

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der
Philosophischen Doktorwürde

Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten

Grundlagen
Methodenentwicklung
und Anwendung

Vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich
von
Tobias Walter Kellenberger
von Walzenhausen (AR)

Begutachtet von
Prof. Dr. Klaus I. Itten
Zürich 1996

Die vorliegende Arbeit wurde von der
Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich auf Antrag von
Prof. Dr. Klaus I. Itten
und
Prof. Dr. Harold Haefner
am 4. Juli 1996 als Inaugural-Dissertation angenommen.

© 1996, T.W. Kellenberger
Geographisches Institut der Universität Zürich, Schweiz

Die Dissertation wurde in den
Remote Sensing Series
des Geographischen Institutes der Universität Zürich, Schweiz,
veröffentlicht und ist erhältlich
bei folgender Adresse:

RSL - Remote Sensing Laboratories
Geographisches Institut
Universität Zürich
Winterthurerstr. 190
CH - 8057 Zürich

Fax: ++41-1-362'52'27
<http://www.geo.unizh.ch/>


Druckerei der Zentralstelle der Studentenschaft der Universität Zürich

Bifurkationen

Alles, was sich verästelt,
verzweigt: Delta Blitz Lunge,
Wurzeln, Synapsen, Fraktale,
Stamm- und Entscheidungsbäume;
alles, was sich vermehrt
und zugleich vermindert -

nicht zu fassen,
schon zu reichhaltig
für dieses Spatzenhirn,
dieses x-beliebige Glied
einer infiniten Serie,
die sich hinter dem Rücken
dessen, der da, statt zu denken,
gedacht wird, entwickelt,
verästelt, verzweigt.

[Enzensberger H. M., 1995]



meiner Frau Michelle

sowie


meinen Söhnen Roman und Benjamin



- **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von 1990 bis 1996 unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.K.I. Itten am Geographischen Institut der Universität Zürich. Ihm möchte ich an dieser Stelle herzlichst für sein ungebrochenes Interesse an meiner Arbeit, seine wertvolle Unterstützung und für seine immer wieder aufbauenden und erfrischenden Anregungen danken.

Danken möchte ich auch allen Kolleginnen und Kollegen des Geographischen Institutes, die mir immer wieder tatkräftig zur Seite gestanden sind, sei es in fachlichen, infrastrukturellen und nicht zu unterschätzen in menschlichen Fragen. Das Gefühl in einem Team arbeiten zu dürfen, hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Speziell und ohne Reihenfolge danke ich Herrn Prof.H. Haefner, Herrn Prof.D. Nüesch, M. Schaepman, I. Leiss, Dr.A. Darvishsefat, Dr.St. Sandmeier, D. Schläpfer, Dr.P. Meyer, Dr.E. Meier, C. Ehrler, P. Schmid, M. Heller, P. Bitter, R. Sandmeier-Leu, I. Paschedag, M. Maier, M. Liechty, M. Fischer, M. Steinmann und allen anderen.



Besonderer Dank gebührt auch Herrn Dr.K. Schmid, der die Anwendung der Methode im Kanton Zürich möglich machte sowie Herrn Dr.U. Frei für die Georeferenzierung und Herrn M. Kneubühler für die Unterstützung der Auswertung der Daten des Kantons Zürich.

Dem Bundesamt für Landestopographie danke ich für die Bereitstellung der digitalen Höhenmodelle DHM25 und RIMINI, der Pixelkarten PK25 und der Bewilligung zur Reproduktion dieser Daten.

Herzlich danken möchte ich auch meinen Eltern. Sie haben mir ein sehr erbauendes Geographie-Studium ermöglicht und mich immer unterstützt.

Der grösste Dank gebührt aber meiner Familie. Besonders danke ich meiner geliebten Frau. Während Jahren hat sie mich kompromisslos unterstützt, mir den notwendigen Rückhalt verschafft und auf vieles, vieles verzichtet, damit diese Arbeit gelingen konnte. Meinen beiden Söhnen danke ich, dass sie mich mit dem Computer 'spielen' liessen und jederzeit mit einem unterstützenden Lächeln die Mühe der Arbeit vergessen machten.

Rümlang, im Februar 1996

Tobias Kellenberger

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	1
II	Abbildungsverzeichnis	9
III	Tabellenverzeichnis	13
IV	Glossar	15
V	Zusammenfassung	23
VI	Summary	27
KAPITEL 1	Einleitung	31
1 - 1	Der Wald der Erde.....	31
1 - 2	Der Schutz der Wälder.....	33
1 - 3	Überwachung des Waldes mit Fernerkundung	36
1 - 3.1	Die Einbettung der Arbeit.....	37
1 - 3.1.1	Interne Arbeiten zur Waldflächenerfassung	38
1 - 3.1.1.1	Waldflächen im 1 km Raster - erste Phase.....	38
1 - 3.1.1.2	Waldflächen im 25m Raster - zweite Phase.....	38
1 - 3.1.1.3	Folgerungen der zweiten Phase.....	41
1 - 4	Zielsetzung der Arbeit	42

1 - 5	Aufbau der Arbeit.....	43
KAPITEL 2 Grundlagen		45
<hr/>		
2 - 1	Allgemeine Informationen	45
2 - 2	Das Untersuchungsgebiet	46
2 - 2.1	Ausdehnung.....	46
2 - 2.2	Geographische Beschreibung.....	47
2 - 2.2.1	Topographie	47
2 - 2.2.2	Siedlungen und Verkehr.....	49
2 - 2.2.3	Gewässer	50
2 - 2.2.4	Wald.....	50
2 - 2.2.5	Übrige Landnutzung	51
2 - 2.2.6	Hinweise zum Wald in der Schweiz.....	51
2 - 2.2.6.1	Die geschichtliche Entwicklung des Waldes in der Schweiz	51
2 - 2.2.6.2	Die Waldvegetation in der Schweiz	52
2 - 2.2.6.3	Limitierende und fördernde Standortfaktoren.....	52
	Klima	53
	Boden	54
2 - 2.2.6.4	Höhenlage; Höhenstufen der Vegetation.....	55
2 - 2.2.6.5	Obere Waldgrenze	56
2 - 2.2.6.6	Waldtypen der Schweiz	58
2 - 3	Topographische Karten und Derivate.....	59
2 - 3.1	Topographische Karten	59
2 - 3.2	Pixelkarten, Farbauszüge der topographischen Karten	59
2 - 3.2.1	Grünauszug der Landeskarte, Waldflächenreferenz.....	60
2 - 3.2.2	Gewässer aus der Landeskarte, Gewässerreferenz	61
2 - 3.3	Digitales Geländemodell DHM25	62
2 - 3.3.1	Digitale Geländemodelle	62
2 - 3.3.2	Rimini.....	63
2 - 3.3.3	DHM25, Projekt DIKART	64
2 - 3.3.4	Verwendetes DHM25, Blatt 1171, Beckenried.....	65
2 - 4	Satellitendaten	66
2 - 4.1	Hochauflösende, multispektrale Satellitensysteme	66
2 - 4.1.1	Landsat-TM	67
2 - 4.1.2	SPOT-HRV	68
2 - 4.1.3	IRS-LISS, MOS-MESSR	69
2 - 4.1.4	Russische Kamerasysteme.....	69
2 - 4.2	Kriterien für die Wahl von Satellitendaten für die Waldklassifikation	71
2 - 4.2.1	Räumliche Auflösung	72
2 - 4.2.2	Spektrale Auflösung	72
2 - 4.2.2.1	Spektrales Reflexionsverhalten des Waldes.....	72

2 - 4.2.2.2	Saisonale Schwankungen.....	74
2 - 4.2.2.3	Reflexion in Abhängigkeit der Auflösung	75
2 - 4.2.3	Zeitliche Auflösung, Verfügbarkeit	75
2 - 4.3	Verwendete Satellitendaten	76
2 - 4.3.1	SPOT-HRV	76
2 - 4.3.2	Landsat-TM	77
2 - 5	Luftbilddaten.....	79
2 - 6	Hard- und Software	80

**KAPITEL 3 Vorverarbeitung I:
Grundlagen, Bodenreferenz 83**

3 - 1	Einleitung	83
3 - 1.1	Definition der Fernerkundung.....	83
3 - 1.2	Fernerkundung im optischen Bereich, deduktiver Ansatz.....	84
3 - 1.2.1	Wellenlänge.....	85
3 - 1.2.2	Beobachtungsgeometrie	86
3 - 1.2.3	Beobachtungszeitpunkt	87
3 - 1.2.4	Ort	87
3 - 2	Räumliche Auflösung, Massstabsprobleme in der Fernerkundung	90
3 - 2.1	Die Problematik der Skalierung	91
3 - 2.1.1	Datenexpansion ('forward zooming')	91
3 - 2.1.2	Datenkomprimierung ('backward zooming')	92
3 - 3	Vorverarbeitung und Analyse der Bodenreferenzdaten	93
3 - 3.1	Vektor-Raster Konvertierung der Bodenreferenzdaten	94
3 - 3.1.1	Verwendete morphologische Deskriptoren.....	95
3 - 3.1.1.1	Fläche A	96
3 - 3.1.1.2	Perimeter; Umfang P	96
3 - 3.1.1.3	Kompaktheit; 'compactness' C.....	97
3 - 3.1.2	Kenndaten für die vektorielle Repräsentation	98
3 - 3.1.3	Kenndaten für die Rasterrepräsentation nach Vektor-Raster Konvertierung.....	99
3 - 3.1.3.1	Wasserflächen.....	99
3 - 3.1.3.2	Waldflächen.....	101
3 - 3.2	Skalierung der Bodenreferenzdaten.....	102
3 - 3.2.1	Skalierungsmethode.....	103
3 - 3.2.2	Flächenbasierte Skalierung der Waldmaske.....	105
3 - 3.3	Rasterbasierte Waldreferenz ab vektoriellen Daten, Empfehlungen.....	107
3 - 3.4	Qualität der Bodenreferenzdaten Wald ab Landeskarte in Rasterform	108
3 - 3.4.1	Waldflächen-Definitionen	109
3 - 3.4.1.1	Walddefinition der EC / EU Helsinki Konferenz	110

	Wald (im eigentlichen Sinne).....	110
	Wald (im erweiterten Sinne)	111
3 - 3.4.1.2	Walddefinition nach Schweizerischer Arealstatistik.....	111
3 - 3.4.1.3	Walddefinition nach Landesforstinventar	113
3 - 3.4.1.4	Walddefinition der Schweizerischen Landestopographie.....	114
3 - 3.4.2	Visuelle Qualitätsanalyse mit SPOT-Pan-Daten.....	115
3 - 3.5	Waldmaske mittels analoger Interpretation.....	119
3 - 3.5.1	Verfahren zur Herstellung der analogen Waldmaske	120
3 - 3.5.2	Kenndaten der analogen Waldmaske	122
3 - 3.5.3	Vergleich mit Waldmaske L+T.....	123
3 - 3.5.4	Skalierung und Vergleich	126

KAPITEL 4 Vorverarbeitung II: Geländemodell, Satellitendaten 129

4 - 1	Geländemodell DHM25	129
4 - 1.1	Skalierung auf die Arbeitsgrößen	129
4 - 1.2	Berechnung der Illuminationswerte.....	130
4 - 1.3	Berechnung der Schlagschattenmasken.....	132
4 - 2	Satellitendaten	133
4 - 2.1	Systemkorrekturen der Rohdaten.....	134
4 - 2.1.1	Systemkorrekturen Landsat-Thematic Mapper	134
4 - 2.1.2	Systemkorrekturen SPOT-HRV	135
4 - 2.2	Qualitätsanalyse der Rohdaten	135
4 - 2.2.1	Qualitätsanalyse der Landsat-Thematic Mapper Daten	136
4 - 2.2.1.1	Geometrie Landsat-TM	136
4 - 2.2.1.2	Radiometrie Landsat-TM	138
4 - 2.2.2	Qualitätsanalyse der SPOT-HRV Daten	140
4 - 2.2.2.1	Geometrie SPOT-HRV	140
4 - 2.2.2.2	Radiometrie SPOT-HRV	140
4 - 2.2.3	Zusammenfassung der Qualitätsanalyse	141
4 - 2.3	Geometrische Korrekturen, Georeferenzierung	142
4 - 2.3.1	Grundlagen	142
4 - 2.3.1.1	Parametrischer Ansatz	142
4 - 2.3.1.2	Nicht-parametrischer Ansatz.....	144
	Helmerttransformation	144
	Affintransformation	145
	Polynome zweiten und höheren Grades	147
4 - 2.3.1.3	Bestimmung der Transformationsgleichungen	147
4 - 2.3.1.4	Reliefverzerrung.....	148
4 - 2.3.2	Praktische Durchführung der Georeferenzierung	152
4 - 2.3.2.1	Verwendeter Korrekturansatz	152
4 - 2.3.2.2	Samplingsmethoden	154
	'nearest neighbour' Resampling.....	154

	‘bilineare’ Interpolation	154
	‘cubic convolution’	156
4 - 2.3.2.3	Verwendete Samplingsmethoden	156
4 - 2.3.2.4	Wahl der Passpunkte und Ausgleichsrechnung	157
4 - 2.3.2.5	Georeferenzierung	161
4 - 2.3.2.6	Redundante Bildinformation infolge ‘nearest neighbour’ Resampling	162
4 - 2.3.2.7	Visuelle Überprüfung der Georeferenzierung	163
4 - 2.3.3	Skalierung.....	164
4 - 2.4	Radiometrische Korrekturen.....	165
4 - 2.4.1	Einfluss der Atmosphäre	165
4 - 2.4.1.1	Wolkenmaske	167
4 - 2.4.1.2	Kondensstreifen-Maske	168
4 - 2.4.2	Einfluss des Blickwinkels	169
4 - 2.4.3	Beleuchtungseinflüsse	170
4 - 2.4.3.1	Semi-empirische Cosinus Korrektur	171
4 - 2.4.3.2	Anwendung der Beleuchtungskorrektur.....	174
4 - 2.5	Übersicht über die Vorverarbeitung der Satellitendaten	176
4 - 2.5.1	Generierte Datensätze für die Klassifikation.....	177
4 - 2.5.2	Bildbeispiele aller verwendeten Kanäle	179

KAPITEL 5 Waldklassifikation **183**

5 - 1	Klassifikationsgrundlagen	184
5 - 1.1	Bezeichnungsschema der Datensätze.....	184
5 - 1.1.1	Schema für die Ausgangsdaten	184
5 - 1.1.2	Schema für die Referenzdaten.....	186
5 - 1.2	Klassifikationsalgorithmus	187
5 - 1.2.1	Bildinterpretation	187
5 - 1.2.2	Pixelbasierte, multispektrale Klassifikationen.....	187
5 - 1.2.2.1	Digitale, überwachte Klassifikationsverfahren	188
5 - 1.2.2.2	Limitierende Faktoren	189
5 - 1.2.2.3	Automatisierter PPD	191
5 - 1.3	Klassifikationsüberprüfung	194
5 - 1.3.1	Klassifikationsgenauigkeit.....	196
5 - 1.3.1.1	‘overall accuracy’ (‘overall performance accuracy’):	197
5 - 1.3.1.2	‘producer’s accuracy’:.....	198
5 - 1.3.1.3	‘user’s accuracy’:	198
5 - 1.3.1.4	‘inclass accuracy’	199
5 - 1.3.1.5	‘average accuracy’	199
5 - 1.3.1.6	‘mean accuracy’	200
5 - 1.3.1.7	‘kappa’ Koeffizient	200
5 - 1.3.2	Verwendete Genauigkeitsmasse.....	201
5 - 1.4	Klassifikationsschema	202
5 - 1.5	Bewertungsschwerpunkte	204

5 - 2	Klassifikationen in Originalauflösung	205
5 - 2.1	Klassifikationen mit SPOT-XS, 20m Auflösung.....	205
5 - 2.1.1	Einfluss des Resamplings (XS-20).....	209
5 - 2.1.2	Einfluss der Beleuchtungskorrektur (XS-20)	210
5 - 2.1.3	Einfluss der Waldmaske (XS-20)	212
5 - 2.2	Klassifikationen mit SPOT-XS und SPOT-Pan, 20m Auflösung.....	214
5 - 2.2.1	Einfluss des Resamplings (XP-20).....	216
5 - 2.2.2	Einfluss der Beleuchtungskorrektur (XP-20)	216
5 - 2.2.3	Einfluss der Waldmaske (XP-20)	216
5 - 2.3	Klassifikationen mit Landsat-TM, 25m Auflösung	217
5 - 2.3.1	Visuelle Analyse der Klassifikation (TM-25)	220
5 - 2.3.2	Einfluss der redundanten Bildinformation (TM-25).....	222
5 - 2.3.3	Einfluss des Resamplings (TM-25)	223
5 - 2.3.4	Einfluss der Beleuchtungskorrektur (TM-25).....	225
5 - 2.3.5	Einfluss der Waldmaske (TM-25).....	226
5 - 3	Klassifikationen mit 100m Auflösung	228
5 - 3.1	Klassifikationen mit SPOT-XS mit 100m Auflösung	228
5 - 3.2	Klassifikationen mit SPOT-XS und SPOT-Pan mit 100m Auflösung.....	230
5 - 3.2.1	Visuelle Analyse der Klassifikation (XP-00).....	232
5 - 3.2.2	Einfluss des Resamplings (XP-00).....	233
5 - 3.2.3	Einfluss der Beleuchtungskorrektur (XP-00)	234
5 - 3.2.4	Einfluss der Waldmaske (XP-00)	236
5 - 3.3	Klassifikationen mit Landsat-TM mit 100m Auflösung.....	237
5 - 3.3.1	Einfluss des Resamplings (TM-00)	240
5 - 3.3.2	Einfluss der Beleuchtungskorrektur (TM-00).....	241
5 - 3.3.3	Einfluss der Waldmaske (TM-00).....	243
5 - 3.3.4	Visuelle Analyse der Klassifikation (TM-00)	245
5 - 4	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	247
5 - 4.1	Satellitendaten	247
5 - 4.2	Waldmasken als Stichprobe und Bodenreferenz	249
5 - 4.3	Abdeckmasken	251
5 - 4.4	Einfluss der Beleuchtungskorrektur in allen Datensätzen	252
5 - 4.5	Einfluss der Resamplingmethode in allen Datensätzen.....	253
5 - 5	Empfehlung für eine Waldflächenklassifikation.....	255
5 - 5.1	Datengrundlagen.....	255
KAPITEL 6 Anwendung der Methode im Kanton Zürich		259
6 - 1	Aufgabenstellung	259
6 - 2	Das Untersuchungsgebiet	259
6 - 3	Datengrundlagen.....	261

6 - 3.1	Satellitendaten	261
6 - 3.2	Digitales Geländemodell und Derivate	262
6 - 3.3	Bodenreferenzdaten.....	263
6 - 4	Vorverarbeitung	263
6 - 4.1	Geometrische Korrekturen	263
6 - 4.2	Beleuchtungskorrektur	264
6 - 5	Klassifikation.....	264
KAPITEL 7 Schlussfolgerungen und Ausblick		269
KAPITEL 8 Literaturverzeichnis und Bewilligungen		275
8 - 1	Literaturverzeichnis	275
8 - 2	Bewilligungen	284

ANHANG

Der Anhang dieser Arbeit umfasst alle detaillierten Resultate in tabellarischer und teilweise graphischer Form. Er liegt der gedruckten Fassung nicht bei. Auf spezielle Anfrage kann er vom Autor angefordert werden.

ANHANG: A	Einleitung und Inhaltsverzeichnis des Anhangs .	ANH-3
ANHANG: B	Flächenanteile der Bodeninformationen in den verwendeten Masken	ANH-13
ANHANG: C	Statistik der Wasser-Bodeninformationen in verschiedenen Auflösungen	ANH-19
ANHANG: D	Statistik der Wald-Bodeninformationen in verschiedenen Auflösungen	ANH-21

ANHANG: E	Genauigkeiten der Klassifikation SPOT XS, 20m	ANH-29
ANHANG: F	Genauigkeiten der Klassifikation SPOT XS & PAN, 20m	ANH-51
ANHANG: G	Genauigkeiten der Klassifikationen LANDSAT TM, 25m (Wolken: Grundmasken)	ANH-65
ANHANG: H	Genauigkeiten der Klassifikationen LANDSAT TM, 25m (Wolken: Referenz verbreitert)	ANH-83
ANHANG: I	Genauigkeiten der Klassifikationen LANDSAT TM, 25m (Wolken: Stichprobe verbreitert).	ANH-95
ANHANG: J	Genauigkeiten der Klassifikationen LANDSAT TM, 25m (Wolken: Stichprobe & Referenz verbreitert).	ANH-105
ANHANG: K	Genauigkeiten der Klassifikation SPOT XS, 100m	ANH-115
ANHANG: L	Genauigkeiten der Klassifikation SPOT XS & PAN, 100m	ANH-131
ANHANG: M	Genauigkeiten der Klassifikation LANDSAT TM, 100m	ANH-145

II Abbildungsverzeichnis

Fig. 1 :	Das Untersuchungsgebiet Beckenried	46
Fig. 2 :	Testgebiet Beckenried, Blick aus Nordosten	48
Fig. 3 :	Expositionen (links) und Hangneigung (rechts) im Untersuchungsgebiet.....	49
Fig. 4 :	Wachstumsgrenzen einiger Waldbäume und hochalpiner Pflanzengruppen	55
Fig. 5 :	Grünauszug der Landeskarte (PK25)	61
Fig. 6 :	Waldflächen und Wasserflächen im Gebiet Beckenried	62
Fig. 7 :	Schattiertes Geländemodell DHM25, Blatt 1171, Beckenried	65
Fig. 8 :	Reflexionsverhalten von Buche und Fichte.....	73
Fig. 9 :	Ausschnitt SPOT-XS Rohdaten (Kanal3).....	77
Fig. 10 :	Ausschnitt Landsat-TM Rohdaten (Kanal3)	78
Fig. 11 :	Einfluss der Pixelgrösse auf die Erkennbarkeit von Objekten am Beispiel Buochserhorn	89
Fig. 12 :	Rasterrepräsentation der Waldfläche in verschiedenen Auflösungen	95
Fig. 13 :	Wasserflächen, Flächenprozent und Kompaktheit nach Vektor-Raster Konversion	100
Fig. 14 :	Waldflächen, Flächenprozent und Kompaktheit nach Vektor-Raster Konversion	102
Fig. 15 :	Skalierungsmethode für binäre Rasterdaten, flächenbasiert	104

Fig. 16 :	Waldflächen, Flächenprozent und Kompaktheit nach Skalierung ab 10m Daten	106
Fig. 17 :	Waldflächen, Flächenprozent und Kompaktheit nach Skalierung ab 16m Daten	107
Fig. 18 :	Kriterien der Schweizerischen Arealstatistik für Waldflächen	112
Fig. 19 :	Kriterien des Schweizerischen Landesforstinventars für Waldflächen	113
Fig. 20 :	Visuelle Überprüfung der Waldmaske nach Landeskarte, Stützberg.....	116
Fig. 21 :	Visuelle Überprüfung der Waldmaske nach Landeskarte, Buochserhorn.....	117
Fig. 22 :	Visuelle Überprüfung der Waldmaske nach Landeskarte, Nollen.....	118
Fig. 23 :	Analoge Satellitenbild-Interpretation am Bildschirm	121
Fig. 24 :	Visuelle Gegenüberstellung der Waldmasken, Buochserhorn	124
Fig. 25 :	Visuelle Gegenüberstellung der Waldmasken, Nollen	125
Fig. 26 :	Waldflächen, Flächenprozent und Kompaktheit nach Skalierung ab 10m Daten	127
Fig. 27 :	Bodeninformation, Waldflächen in % des Untersuchungsgebietes	128
Fig. 28 :	Sonneneinfallswinkel (i) und Sonnenzenithwinkel (sz)	130
Fig. 29 :	Cosinus des Sonneneinfallswinkels, 100m Maschenweite	131
Fig. 30 :	Schlagschattengebiete zur Zeit der Landsat-TM-Daten	132
Fig. 31 :	Zeilenverdoppelung Landsat-TM, systemkorrigierte Rohdaten	136
Fig. 32 :	doppelte Kolonnen Landsat-TM, Testgebiet Beckenried	137
Fig. 33 :	Zeilensegmentversatz in systemkorrigierten Landsat-TM-Daten.....	138
Fig. 34 :	Affine Transformation.....	145
Fig. 35 :	Reliefverzerrungen für Landsat TM Path über der Schweiz mit Testgebiet.....	149
Fig. 36 :	Lageversetzung eines Punktes im Satellitenbild	150
Fig. 37 :	Georeferenzierung von Satellitendaten	153
Fig. 38 :	Bilineare Interpolation.....	155
Fig. 39 :	Verwendete Passpunkte Landsat-TM mit Fehlervektoren ..	159
Fig. 40 :	Georeferenzierung der Satellitendaten	161
Fig. 41 :	Redundante Bildinformation infolge Georeferenzierung mit 'nearest neighbour' Resampling	162

Fig. 42 :	Vergleich der Uferlinie von Landsat-TM georeferenziert mit der Landeskarte.....	164
Fig. 43 :	Wolken- / Wolkenschattenmaske	167
Fig. 44 :	Kondensstreifenmaske	169
Fig. 45 :	Regressionsgerade für Waldflächen nach Landeskarte.....	173
Fig. 46 :	Beispiel einer Anwendung der Beleuchtungskorrektur	175
Fig. 47 :	Vorverarbeitung der Satellitendaten.....	176
Fig. 48 :	Georeferenzierte und beleuchtungskorrigierte SPOT-Kanäle	180
Fig. 49 :	Georeferenzierte und beleuchtungskorrigierte Landsat-Kanäle 1-5	181
Fig. 50 :	Georeferenzierter und beleuchtungskorrigierter Landsat-Kanal 7	182
Fig. 51 :	Schematik der Bezeichnungscode für die verwendeten Ausgangsdaten	184
Fig. 52 :	Beispiel eines Bezeichnungscode	185
Fig. 53 :	Schematik der Bezeichnungscode für die verwendeten Referenzdaten.....	186
Fig. 54 :	Beispiel eines Bezeichnungscode für die verwendeten Referenzdaten	186
Fig. 55 :	Scatterogram Landsat-TM Kanal 2 vs. 4 der verwendeten Objektklassen	190
Fig. 56 :	Trennbarkeit der Objektklassen Wald und Wasser, manuelles Verfahren.....	192
Fig. 57 :	Trennbarkeit der Objektklassen Wald und Wasser, automatisiertes Verfahren	193
Fig. 58 :	Klassifikationsschema	202
Fig. 59 :	Beste Klassifikation mit SPOT-XS, 20m Auflösung.....	206
Fig. 60 :	Genauigkeitsvergleich: Klassierung SPOT XS, 20 m Auflösung.....	208
Fig. 61 :	Genauigkeitsvergleich: Resampling Georeferenzierung, SPOT XS, 20m	209
Fig. 62 :	Genauigkeitsvergleich: Beleuchtungskorrektur, SPOT XS, 20m	211
Fig. 63 :	Genauigkeitsvergleich: Waldmasken, SPOT XS, 20m.....	213
Fig. 64 :	Genauigkeitsvergleich: Klassierung SPOT XS und Pan, 20 m	215
Fig. 65 :	Genauigkeitsvergleich: Klassierung TM, 25 m.....	219
Fig. 66 :	Beste Klassifikation mit Landsat-TM, 25m Auflösung	221
Fig. 67 :	Genauigkeitsvergleich: Resampling Georeferenzierung, TM, 25 m	224

Fig. 68 :	Genauigkeitsvergleich: Beleuchtungskorrektur, TM, 25m	225
Fig. 69 :	Genauigkeitsvergleich: Waldmasken, TM, 25 m	227
Fig. 70 :	Genauigkeitsvergleich: Klassierung SPOT XS, 100 m	229
Fig. 71 :	Genauigkeitsvergleich: Klassierung SPOT XS und Pan, 100 m	231
Fig. 72 :	Beste Klassifikation mit SPOT-XS und SPOT-Pan mit 100m Auflösung	232
Fig. 73 :	Genauigkeitsvergleich: Resampling Georeferenzierung, SPOT XS und Pan mit 100 m Auflösung	233
Fig. 74 :	Genauigkeitsvergleich: Beleuchtungskorrektur, SPOT XS und Pan, 100m	235
Fig. 75 :	Genauigkeitsvergleich: Waldmasken, SPOT XS und Pan, 100m	236
Fig. 76 :	Genauigkeitsvergleich: Klassierung TM auf 100 m	239
Fig. 77 :	Genauigkeitsvergleich: Resampling Georeferenzierung, TM auf 100 m	240
Fig. 78 :	Genauigkeitsvergleich: Beleuchtungskorrektur, TM auf 100m	242
Fig. 79 :	Genauigkeitsvergleich: Waldmasken, TM auf 25 m	244
Fig. 80 :	Beste Klassifikation mit Landsat-TM auf 100m Auflösung.....	245
Fig. 81 :	Genauigkeitsvergleich: Mittelwerte aller Klassifikationen.....	248
Fig. 82 :	Genauigkeitsvergleich: Klassifikationen, beleuchtungskorrigiert, Wald ST.....	254
Fig. 83 :	Das Untersuchungsgebiet Kanton Zürich.....	260
Fig. 84 :	Landsat-TM Szene, 2.8.1990, Kanal 3, Testgebiet Kanton Zürich	262
Fig. 85 :	Klassifikationsergebnis Kanton Zürich	266
Fig. 86 :	Klassifikationsvergleich der Klasse Wald, Kanton Zürich.....	267

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eigentumsverhältnisse des Waldes in der Schweiz.....	36
Tabelle 2:	Testgebiet 'Beckenried; Anzahl Zeilen und Kolonnen relativ zur Auflösung	47
Tabelle 3:	Vegetationshöhenstufen der Alpen	56
Tabelle 4:	Die häufigsten Waldtypen der Schweiz	58
Tabelle 5:	Statistische Kennwerte aus dem verwendeten DHM25	66
Tabelle 6:	Kenndaten einiger hochauflösender, multispektraler Erderkundungssatelliten	71
Tabelle 7:	Aufnahmeparameter der verwendeten Satellitendaten	79
Tabelle 8:	Fläche A, Perimeter P und Compactness C für die vektorielle Bodenreferenz	99
Tabelle 9:	Bodeninformation, Wasserflächen nach Vektor-Raster Konversion	99
Tabelle 10:	Bodeninformation, Waldflächen nach Vektor-Raster Konversion	101
Tabelle 11:	Bodeninformation, Waldflächen nach Skalierung der 10m Daten.....	105
Tabelle 12:	Fläche A, Perimeter P und Compactness C für die analog interpretierte Waldmaske vs. Landeskarte.....	122
Tabelle 13:	Fläche, Perimeter und 'Compactness' der Waldmaske nach analoger Satellitenbilddauswertung.....	126
Tabelle 14:	Sonnenzenith- und Azimuthwinkel für die SPOT und Landsat-Daten	131

Tabelle 15:	Schlagschattengebiete in % des Untersuchungsgebietes	133
Tabelle 16:	Parameter und Kennzahlen der affinen Transformation	160
Tabelle 17:	Wolkenmaske in % des Untersuchungsgebietes.....	168
Tabelle 18:	Kondensstreifenmaske in % des Untersuchungsgebietes ..	169
Tabelle 19:	Zusammenstellung aller verwendeten Satellitendatensätze	178
Tabelle 20:	Fehlermatrix.....	197
Tabelle 21:	Schema der verwendeten Stichproben und Referenzdatensätze.....	203
Tabelle 22:	Erreichte Genauigkeiten SPOT XS, 20m Auflösung.....	205
Tabelle 23:	Erreichte Genauigkeiten SPOT XS und Pan, 20m Auflösung.....	214
Tabelle 24:	Erreichte Genauigkeiten Landsat-TM, 25m Auflösung.....	217
Tabelle 25:	Genauigkeiten Landsat-TM mit 25m Auflösung bei Berücksichtigung redundanter Information	222
Tabelle 26:	Erreichte Genauigkeiten SPOT-XS mit 100m Auflösung	228
Tabelle 27:	Erreichte Genauigkeiten SPOT-XS und Pan mit 100m Auflösung	230
Tabelle 28:	Erreichte Genauigkeiten Landsat-TM mit 100m Auflösung	237
Tabelle 29:	Beste Klassifikationsergebnisse aller Datensätze.....	247
Tabelle 30:	Einfluss der Waldmaske in allen Datensätzen	249
Tabelle 31:	Einfluss der Wolken- und Kondensstreifenmaske in allen Datensätzen	251
Tabelle 32:	Einfluss der Beleuchtungskorrektur in allen Datensätzen	252
Tabelle 33:	Kanalselektion zur Trennung der Objektklassen.....	264
Tabelle 34:	Kanalselektion zur Trennung der Objektklassen, nur Kanäle 2,4,5.....	265
Tabelle 35:	Genauigkeiten der Klassifikation, Testgebiet Kanton Zürich	265

IV Glossar

-
- AIS
 'Airborne Imaging Spectrometer' AIS-1 und AIS-2 des 'JPL',
 1982-1987, CCD Sensor Array, 128 Kanäle, 12m 'GIFOV' bei 6km
 Flughöhe, 365m Streifenbreite (787m AIS-2), 0,9 μ m bis 2,4 μ m
 bei 9,3nm (10.6nm AIS-2) Bandbreite
- ARC/INFO
 'GIS' der Firma ESRI
- Auflösung
 siehe 'räumliche Auflösung', 'radiometrische Auflösung', 'spek-
 trale Auflösung', 'thermale Auflösung'
- AVHRR
 'Advanced Very High Resolution Radiometer', Multispektralscan-
 ner der amerikanischen Wettersatelliten 'TIROS-N' der 'NOAA'.
 'radiometrische Auflösung' von 10bit, 'GIFOV' 1,1km, 0,58-
 0,68 μ m, 0,725-1,1 μ m, 3,55-3,93 μ m, 10,3-11,3 μ m, 11,4-12,4 μ m
- AVIRIS
 'Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer' operationell
 seit 1987, 224 kontinuierliche Bänder von 0.4-2.5 μ m, Band-
 breite ca. 10nm, Einsatzhöhe 20km (ca 20m Bodenauflösung,
 11km Streifenbreite) auf einer ER-2.
- bit
 'binary digit', binäre Ziffer, kleinste Einheit einer Datenverarbei-
 tungsanlage, kann nur Zustände 0 und 1 enthalten. (siehe auch
 'byte')

- BRDF
 'Bidirectional Reflection Distribution Function', Modellierung des Rückstreuerverhaltens eines Objektes über den Halbraum
- byte
 bestehend aus 8 'bit', kleinste adressierbare Speichereinheit moderner Rechner, kann $2^8 = 256$ Zustände/Bitmuster repräsentieren
- CCD
 'charged couple device', linearer Array von opto-elektronischen Einzeldetektoren. Im Einsatz u.a. bei 'PushBroom' Systemen wie 'SPOT'/'HRV'.
- DAIS
 'Digital Airborne Imaging Spectrometer', DAIS-2815, DAIS-7915, DAIS-16115, flugzeuggetragene Bildspektrometer der Firma 'GER'.
- DD5
 siehe 'KWR 1000'
- DEM
 'digital elevation model' (siehe 'DHM')
- DGM
 Digitales Geländemodell (siehe 'DHM')
- DHM
 Digitales Höhenmodell (auch Digitales Geländemodell DGM, 'digital terrain model' DTM, 'digital elevation model' DEM). Digitale Beschreibung der Höheninformation eines Gebietes, zumeist in Rasterform. (Siehe auch 'DHM25' und 'RIMINI')
- DHM25
 Digitales Höhenmodell der Schweizerischen Landestopographie 'L+T'. Rastermodell mit 25m Rasterzellen und einer Höhenauflösung in dm. Abgeleitet aus den Höhenkurven der Schweizerischen Landeskarten 1:25'000, flächendeckend für die ganze Schweiz.
- DIKART
 'Digitale KARTE', Projekt des Bundesamtes für Landestopographie 'L+T' zur Erstellung des 'DHM25'.
- DLR
 Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.
- DIPIX
 siehe 'DIPS'.
- DIPS
 Digitales, interaktives Bildverarbeitungssystem der Firma DIPIX, Ottawa, Kanada. Die Produktion wurde 1992 eingestellt und die Rechte an 'PCI' verkauft.
- DTM
 'digital terrain model' (siehe 'DHM')

EAFV	..... Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (ehemalige Bezeichnung), heute Teil der 'WSL', Birmensdorf, Schweiz
EASI /PACE	..... Interaktive Fernerkundungssoftware der Firma 'PCI'
EC / EU	..... 'European Community' / 'European Union', Europäische Gemeinschaft / Union, Zusammenschluss verschiedener europäischer Staaten
ECE	..... 'Economic Commission for Europe'
EDV	..... Elektronische Datenverarbeitung
EOSAT	..... 'Earth Observation Satellite Company', Betreiber der Satellitensysteme 'Landsat'. Amerikanische, private Organisation
ESA	..... 'European Space Agency', europäische Weltraumbehörde
ESRIN	..... 'European Space Research Institute' der 'ESA', z.Bsp in Frascati, Italien
ETHZ	..... Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FAO	..... 'Food and Agriculture Organization of the United Nations', ein Teil des 'UNEP' Programmes ,Rom
FOV	..... 'field of view', totales Gesichtsfeld eines Sensors, Gesamtöffnungswinkel (siehe auch 'GIFOV' und 'IFOV')
GEMS	..... 'Global Environment Monitoring System', Program zur Erfassung und Archivierung globaler und umweltrelevanter Daten des 'UNEP' der 'UNO'.
geometrische Auflösung	..... siehe 'räumliche Auflösung'
GER	..... 'Geophysical & Environmental Research Corporation', Millbrook, NewYork, USA, Hersteller von abbildenden Bildspektrometern
GIFOV	..... 'ground instantaneous field of view', momentanes Gesichtsfeld eines Sensors auf der Erdoberfläche, definiert durch das 'IFOV', die Flughöhe, die Beobachtungsgeometrie und die Form des Detektorspots. Die Integrationsfläche des Sensors am Objekt.

- GIS
..... Geographisches Informationssystem
- GPS
..... 'Global Positioning System', System für die satellitengestützte Positionsbestimmung auf der Erdoberfläche und im Luftraum
- GRID
..... 'Global Resources Information Database', Umweltdatenbank des 'UNO'/'UNEP' Projektes 'GEMS'.
- HRV
..... 'High Resolution Visible', 'CCD' 'PushBroom' Sensoren der 'SPOT' -1, -2 und -3 Plattformen. Die 2 HRV Sensoren pro SPOT Plattform können unabhängig voneinander im multiskpektralen Modus 'XS'
Kanal XS1: 0.50-0.59 μ m, Bodenauflösung von 20m
Kanal XS2: 0.61-0.68 μ m, Bodenauflösung von 20m
Kanal XS3: 0.79-0.89 μ m, Bodenauflösung von 20m
oder im panchromatischen Modus 'Pan'
Pan: 0.51-0.73 μ m, Bodenauflösung von 10m
eingesetzt werden. Der Sensor kann um $\pm 27^\circ$ auf beide Seiten geschwenkt werden. Bei Nadirsicht beträgt die Abtastbreite bei einem 'IFOV' von 4.13° rund 60km, im Parallelmodus der zwei HRV 117km. Mit der Repetitionsrate von 26 Tagen der SPOT Plattform und dem Schwenken der HRV Sensoren wird eine Repetitionsrate von 1 bis 5 Tagen erreicht. Die Daten sind 8bit kodiert und kommerziell in verschiedenen Formaten vorverarbeitet erhältlich.
- HRVIR
..... 'High Resolution Visible and Infrared', verbesserte Version des 'HRV', 'CCD' 'PushBroom' Sensoren der 'SPOT' -4 und -5 Plattformen.
Kanal B0: 0.43-0.47 μ m, Bodenauflösung von 20m
Kanal B1: 0.50-0.59 μ m, Bodenauflösung von 20m
Kanal B2: 0.61-0.68 μ m, Bodenauflösung von 20m
Kanal B3: 0.78-0.89 μ m, Bodenauflösung von 20m
Kanal SWIR: 1.58-1.75 μ m, Bodenauflösung von 20m
Pan: 0.51-0.73 μ m, Bodenauflösung von 10m
- IFOV
..... 'instantaneous field of view', momentanes Gesichtsfeld eines Sensors, Öffnungswinkel.
- IRS-1A, -1B, -1C
..... 'Indian Remote Sensing Satellite', Start IRS-1A 1988, IRS-1B 1991; Bahnhöhe 904km, Multispektralscanner LISS I und II (0,46-0,52 μ m, 0,52-0,59 μ m, 0,62-0,68 μ m, 0,77-0,86 μ m) GIFOV 1 :72,5m, GIFOV 2: 36,24m; Breite 1: 148,41km, Breite 2 : 146,98 km
IRS-1C, Start 1995; Bahnhöhe 904km, Multispektralscanner LISS III (0,52-0,59 μ m, 0,62-0,68 μ m, 0,77-0,86 μ m, 1,55-1,75 μ m)

GIFOV :23.5m; Breite : 142km; Panchromatische Kamera (0,50-0,90µm), GIFOV :≤10m; Breite : 70,5km

IUFRO

..... 'International Union of Forestry Research Organizations', eine Vereinigung von über 700 privaten, staatlichen und akademischen Forschungsorganisationen; Zweck ist die Verbesserung der internationalen Kommunikation zwischen Waldforschern. Die Untergruppe S 4.12 behandelt primär Themen in Zusammenhang mit Fernerkundung, die Gruppe S 4.02 generell Waldressourcenüberwachung und -inventur.

IKT

..... Institut für Kommunikationstechnik der 'ETHZ'

JPL

..... 'Jet Propulsion Laboratory', Pasadena, Kalifornien, USA; das einzige NASA Zentrum, das von einer Universität verwaltet wird: 'California Institute of Technology'

JRC

..... 'Joint Research Centre' der 'EC / EU', Ispra, Italien

KFA-1000

..... Russisches Kamerasystem, Trägerplattform: Resurs-F1 Satellit, Bahnhöhe 220-350km, Inklination 60°, Auflösung 8-10m, 1982-1989, Filmformat 30cm * 30cm, Breite 147km, Farbfilm, Falschfarbfilm, panchromatischer Film

KFA-3000

..... Russisches Kamerasystem, Trägerplattform: Resurs- Satellit, Bahnhöhe 210-350km, Inklination 60°, Auflösung 3-5m, 1993, Filmformat 30cm * 30cm, Breite 73,5km, Farbfilm, Falschfarbfilm, panchromatischer Film

KVR 1000

..... siehe 'KWR 1000'

KWR 1000

..... auch KVR 1000, Russisches Kamerasystem, Trägerplattform: Kosmos- Satellit, Bahnhöhe 210-350km, Inklination 60°, Auflösung (Original 0,75m) 2-5m, 1993, Filmformat 18cm * 18cm, Breite 40km, Farbfilm, Falschfarbfilm, Breite 660km - 105km, panchromatischer Film, Breite 13km; der panchromatische Film wird digital abgetastet mit einer Auflösung von 1,5m Pixel und unter dem Namen DD5 vertrieben.

L+T

..... Acronym der Schweizerischen Landestopographie, Seftigenstr. 264, 3084 Wabern, Bern

Landsat

..... Amerikanische Erderkundungssatelliten. Zur Zeit sind Landsat-4 und -5 im Einsatz. Sie werden auf einer quasi-polaren Umlaufbahn (Inklination 98°, Flughöhe 705km über Grund) eingesetzt. Äquatorüberflugszeit ist 09:45h Lokalzeit, die Repetitionsrate 16 Tage. Auf den Landsatsatelliten kommen u.a. die multispektra-

len Abtastsysteme 'MSS' und 'Thematic Mapper' zum Einsatz.

LFI

..... Schweizerisches Landesforstinventar der 'EAFV'. Flächendeckende, statistische Waldinventur in einem Raster von 1km mit 50m*50m grossen Bodenstichproben über die ganze Schweiz, basierend auf Luftbildern. Erste Erhebung 1983-1985. Zweite und verbesserte Erhebung 1993-1995 in 500m Raster (in Vorbereitung)

Macintosh

..... Desktop Computer der Firma Apple®

MOS-1a, -1b

..... 'Marine Observation Satellite' der 'NASDA'; Start MOS-1A 1987, MOS-1B 1990; Bahnhöhe 909km, Multispektralscanner
MESSR (0,51-0,59 μ m, 0,61-0,69 μ m, 0,72-0,80 μ m, 0,80-1,10 μ m)
IFOV : 50 m; Breite : 100km
VTIR (0,5-0,7 μ m 900m Auflösung, 6-7 μ m, 10,5-11,5 μ m, 11,5-12,5 μ m) IFOV : 2,7 km; Breite : 327km
Radar MSR {23,8 GHz, 31,4 GHz}, IFOV : 32 km; Breite : 327km

MSS

..... Opto-mechanischer (oszillierender Abtastspiegel) Multispektralabtaster der 'Landsat' Satelliten mit den Kanälen
Kanal 4: 0.5-0.6 μ m, Bodenauflösung 79m
Kanal 5: 0.6-0.7 μ m, Bodenauflösung 79m
Kanal 6: 0.7-0.8 μ m, Bodenauflösung 79m
Kanal 7: 0.8-1.1 μ m, Bodenauflösung 79m
Kanal 8: 10.4-12.6 μ m, (nur Landsat-3)
Abtastbreite 185.2km, 8bit Kodierung.

NASDA

..... 'National Space Development Agency', Japan

NIH-Image

..... 'public domain' Programm für MacIntosh geschrieben von Wayne Rasband am 'U.S. National Institutes of Health'. Es ist auf Internet mittels 'anonymous FTP' erhältlich über folgende Adresse: *zippy.nimh.nih.gov* oder auf Diskette vom *National Technical Information Service, Springfield, Virginia, part number PB93-504868*

NOAA

..... 'National Oceanic and Atmospheric Administration'

Pan

..... Panchromatischer Kanal der 'HRV' Sensoren auf den 'SPOT' Satelliten

PCI

..... PCI Incorporated, 50 West Wilmot Street, Suite 200E, Richmond Hill, Ontario, Canada L4B 1M5; Hersteller der interaktiven Fernerkundungssoftware 'EASI/PACE'. Siehe auch 'DIPS'.

- PK25
 Pixelkarte, Massstab 1:25'000, der 'L+T', digitale Rasterkarte in 4 oder 5 Farbenen mit Rasterweite 25m.
- PushBroom
 Aufnahmesystem, bei dem mittels einem quer zur Flugrichtung liegenden 'CCD' Sensor ein Geländestreifen simultan abgetastet werden kann. Siehe auch 'HRV', 'SPOT'.
- radiometrische Auflösung
 'radiometric resolution', Die Kapazität der Detektoren, eine Anzahl von Messwerten zu unterscheiden.
- räumliche Auflösung
 'ground resolution', Kleinster Abstand zweier Punkte, die getrennt wahrgenommen oder wiedergegeben werden können. Sie wird vor allem durch die Parameter der Aufnahmesysteme 'IFOV', die Wellenlänge der detektierten Strahlung und die Flughöhe bestimmt (gilt nicht für 'SAR' Systeme)
- RC-10
 Reihenbildkamera der Firma Wild, Heerbrugg, Schweiz, Filmformat 23*23cm, Normalobjektiv f=152mm, Schwarzweissfilm, Farbfilm, Falschfarbenfilm
- RC-20
 siehe 'RC-10'
- RGB
 Rot-Grün-Blau, Farbraum, z.Bsp. bei Farbmonitoren, jede Farbe kann zerlegt werden in einen Rot-, Grün- und Blauanteil.
- RIMINI
 Flächendeckendes digitales Geländemodell über die ganze Schweiz. Rastermodell (250m im Mittelland, 500m in den Alpen) mit einer Höhenauflösung in m (siehe auch 'DHM').
- SAC
 Schweizerischer Alpenklub
- SAR
 'synthetic aperture radar', aktives Fernerkundungs-Aufnahmesystem im Bereich der Mikrowellenstrahlung.
- spektrale Auflösung
 'spectral resolution', Das Vermögen eines Systems. einzelne Wellenlängenbereiche (Kanäle) zu trennen
- SPOT
 'Satellite pour l'Observation de la Terre', europäischer Erderkundungssatellit. Zur Zeit befinden sich drei identische SPOT-Satelliten in einem operationellen Status; SPOT-1 (seit 1986), SPOT-2 (seit 1990) und SPOT-3 (seit 1993). Sie werden auf einer quasipolaren Umlaufbahn (Inklination 98,7°, Flughöhe 832km über Grund) eingesetzt. Äquatorüberflugszeit ist 10:30h Lokalzeit, die Repetitionsrate 26 Tage. Auf den SPOT Plattformen sind zwei identische, unabhängige 'HRV' Systeme im Einsatz.

SPOT-4 (geplant 1997) und SPOT-5 (geplant 2001) werden auf dem gleichen Orbit, mit der gleichen geometrischen Konstellation wie die SPOT-1 bis -3 Satelliten eingesetzt werden, verfügen aber über das verbesserte 'HRVIR' System

Thematic Mapper

..... Opto-mechanischer (oszillierender Abtastspiegel) Multispektral-abtaster der 'Landsat' Satelliten mit 7 Kanälen
 Kanal 1: 0.45-0.53 μ m, Bodenauflösung 30m
 Kanal 2: 0.52-0.60 μ m, Bodenauflösung 30m
 Kanal 3: 0.63-0.69 μ m, Bodenauflösung 30m
 Kanal 4: 0.76-0.90 μ m, Bodenauflösung 30m
 Kanal 5: 1.55-1.75 μ m, Bodenauflösung 30m
 Kanal 6: 10.40-12.5 μ m, Bodenauflösung 79m
 Kanal 7: 2.08-2.35 μ m, Bodenauflösung 30m
 Abtastbreite 185.2km, 8bit Kodierung.

thermale Auflösung

..... 'thermal resolution', Die Fähigkeit eines Systems, Temperaturdifferenzen zu erfassen. Die kleinste Temperaturdifferenz, die innerhalb eines Objektes mit gleichem Emissionsfaktor ϵ durch die Detektoren gemessen werden kann.

TIROS-N

..... Meteorologische Satelliten der 'NOAA', unter anderem ausgestattet mit dem 'AVHRR' Sensor, 800-850km Flughöhe, 99° Inklination, sonnensynchron quasi-polar, 12h (11 Tage) Repetitionsrate, 102 Min Umlaufzeit, operationell sind zur Zeit Satellit 11 und 12

TM

..... 'Thematic Mapper' Sensor auf den Satelliten der 'Landsat' -4 und -5 Reihe.

TREES

..... Waldprojekt des 'JRC' der 'EC / EU'

UNEP

..... 'United Nations Environment Program', ein Programmpaket der 'UNO' zum Schutz der Umwelt, siehe auch 'FAO'

UNO

..... 'United Nations Organization'; Organisation der Vereinten Nationen mit Hauptsitz in NewYork

WSL

..... Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Schweiz, (ehemals 'EAFV')

XS

..... Multispektrale Kanäle der 'HRV' Sensoren auf den 'SPOT' Satelliten

V Zusammenfassung

Die Wälder nehmen eine zentrale Rolle im ökologischen Gleichgewicht dieser Erde ein. Aber der Umgang des Menschen mit dem Wald und der sich weltweit verschlechternde Zustand des Waldes sind Ausdruck eines tiefgreifend gestörten Verhältnisses zwischen Mensch und Natur. Der enorme Flächenschwund des Waldes (15,4 Mio ha pro Jahr) und die Verarmung seiner Vielfalt in den vergangenen Jahren zwingt die Menschheit, diese natürliche Ressource besser zu überwachen und für eine nachhaltige Entwicklung zu sorgen.

In der Einleitung werden verschiedene Ansätze internationaler Zusammenarbeit zum Schutz der Wälder rekapituliert. Der Beitrag der Fernerkundung zur Waldproblematik kann unter anderem in der Erfassung und Überwachung der Waldfläche in grossräumigem, nationalem und internationalem Massstab bestehen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, mit der die Waldfläche in der Schweiz und damit auch im angrenzenden Ausland mit multispektralen, optischen Satellitendaten einfach, ökonomisch und möglichst operationell erfasst werden kann. Mit dieser Methode sollte es möglich sein, nationale, wie auch internationale Waldflächenkataster (100m Ras-

ter) mit aktuellsten Waldflächeninformationen der Schweiz periodisch zu beliefern.

Die Methode wurde in einem Testgebiet in der Zentralschweiz entwickelt, welches topographisch sehr anspruchsvoll ist und eine typische Waldflächenverteilung aufweist. Als Satellitendaten wurden eine Landsat-Thematic Mapper Szene vom 11. Juli 1991 sowie zwei SPOT-HRV Szenen vom 30. Juni 1991 (multispektral und panchromatisch) verwendet. Zusätzlich wurden ein digitales Höhenmodell (DHM25), sowie die Farbauszüge der topographischen Landeskarten 1:25'000 (PK25) verwendet.

Masstabsveränderungen in und Skalierung von Fernerkundungs- und Bodenreferenzdaten stellen die Anwender immer wieder vor grosse Probleme. Am Beispiel der verwendeten Bodenreferenzdaten für Wald nach Landeskarte werden die Probleme der Walddefinition und der Skalierung in die Arbeitsmassstäbe aufgezeigt. Da diese Waldmaske den physikalischen Systemeigenschaften der Satellitendaten nicht zufriedenstellend entspricht, wurde mittels analoger Satellitenbildinterpretation eine neue Maske erstellt. Diese Maske weist bis zu 10% mehr Fläche als Wald aus, als die Referenz nach Landeskarte, und eignet sich besser als Vergleichsbasis einer digitalen Klassifikation.

Die Satellitendaten wurden einer Qualitätsüberprüfung unterzogen. Besonders wurde auf die Elimination von Striping- und Bandingeffekten geachtet. Redundante Bildinformation infolge der Systemkorrekturen und der gesamten Vorverarbeitung wurden speziell bei Landsat-TM Daten verfolgt. Die Datensätze wurden mit einer Transformation ersten Grades unter Berücksichtigung der topographiebedingten Verzerrungen mit einer Lagegenauigkeit von einem halben Bildelement auf die Landeskartengeometrie georeferenziert. Es kamen zwei Resamplingverfahren zur Anwendung, deren Auswirkung auf die Waldklassifikation besonders untersucht wurde. Die Georeferenzierung erfolgte in eine Zielauflösung, die den Rohdaten möglichst entspricht (SPOT 10m/20m, Landsat-TM 25m). Anschliessend erfolgte eine Skalierung der Satellitendaten auf eine einheitliche 100m Pixelgrösse.

Die verschiedenen, georeferenzierten Satellitendatensätze wurden mit einer semi-empirischen Korrektur weitgehend von Beleuchtungseinflüssen befreit.

Die Korrektur wurde spezifisch für das Messobjekt Wald durchgeführt. Die Vorverarbeitung der Satellitendaten resultierte in 36 verschiedenen Datensätzen.

Neben den zwei Waldmasken wurden für das Untersuchungsgebiet auch eine Wassermaske, Schlagschattenmasken der zwei Aufnahmezeitpunkte, eine Wolken- und eine Kondensstreifenmaske hergestellt.

Die Unterscheidung der Waldfläche von der Restfläche erfolgte mit einem automatisierten Parallel-Epipiped-Verfahren, das auf den Objektklassen Wald, Nichtwald und Wasser beruht. Alle Klassifikationen wurden relativ zu den Bodenreferenzdaten auf ihre Genauigkeit überprüft. Die Kombination der 36 Satellitendatensätze mit verschiedenen Kombinationen der Masken als Stichprobe und Referenzdaten ergab über 2000 Klassifikationsvergleiche.

Für die Auflösungen zwischen 20m und 25m konnte eine Klassifikationsgenauigkeit zwischen 0.82 und 0.89 'Kappa-Koeffizient' erreicht werden. Die waldspezifischen Genauigkeiten ('user accuracy' und 'producer accuracy') liegen um die 85%. Die besten Ergebnisse wurden mit multispektralen SPOT-Daten unter Einbezug des panchromatischen Kanals erreicht. Auf 100m betragen die 'Kappa' Genauigkeiten zwischen 0,85 und 0,89. Sowohl SPOT wie auch Landsat-TM Daten sind gleichermaßen zur Waldflächenklassifikation geeignet.

Detailuntersuchungen haben gezeigt, dass ein umgebungsbasiertes Resamplingverfahren nur für eine Georeferenzierung auf Originalauflösungen Vorteile bringt. Beleuchtungskorrekturen sind in allen Auflösungen und Klassifikationen unbedingt durchzuführen. Die selbst erstellte Waldmaske steigert die Genauigkeit um bis zu 10%.

Anhand der erzielten Resultate und von ökonomischen Überlegungen wird eine Methode zur Erfassung des gesamtschweizerischen Waldes im 100m Raster auf der Basis von beleuchtungskorrigierten Landsat-TM Daten vorgeschlagen. Eine Überprüfung der Methode über den Kanton Zürich konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die erzielte Genauigkeit beträgt relativ zur ungenauen Waldfläche in der Landeskarte 0,78 'Kappa'. Die entwickelte Methode lässt eine genaue und zuverlässige Waldklassifikation zu.

VI Summary

The forests of our world are a very valuable resource. They occupy a central role in the ecologic stability of our earth. But the way, human beings are treating the forest and the increasingly critical state of it, represents the profoundly disturbed relation between human and nature. In the last years, enormous regions have been deforested (15.4 m ha per year). Additionally, the ecosystems are turned into poor and uniform habitats. These effects force the people to monitor and to care for an sustainable development of this important resource.

Several international efforts to collaborate with the aim of saving the forests are discussed in the introduction. The contribution of remote sensing to the whole forest problem, could consist of large area, national or international, inventoring and monitoring of the forested area.

The aim of this study is to develop a methodology, which allows an easy, economic and semi-operational detection of the forested area in Switzerland and its surrounding area by means of multispectral, optical satellite data. This method should allow the production of national and international forest databases with actual forested areas at raster sizes of around 100m.

For the development of the method, a test area in Central Switzerland was selected. The rough topographic site and the forest pattern are typical for the whole of alpine Switzerland. A Landsat-Thematic Mapper scene, dated July 11 1991 and two SPOT-HRV scenes, dated June 30 1991 (in multispectral as well as in panchromatic mode) were used. Additionally a digital elevation model (DHM25) with a grid cell size of 25m and the color separation layers of the Swiss topographic map sheets at a scale of 1:25'000 (PK25) were used in the study.

Scaling and resizing of remotely sensed and reference data cause always problems to the users. Applying the used groundtruth data for forest, derived from the topographic map, the problems of forest definitions and resizing into working scales are shown. The mentioned forest groundtruth never fits the physical properties of the used satellite systems. Therefore a new forest mask was derived from satellite data by analogue interpretation techniques. This mask shows relative to the topographic map up to 10% more forested areas and suits better to the characteristics of a digital satellite image classification.

The quality of the raw satellite data was checked. Specially banding and striping effects have been removed. Redundant information in the data sets, due to system correction and preprocessing have been analyzed with special attention to Landsat data. All satellite data has been geocoded to the Swiss cartographic reference system with an affine transformation, taking into account the topography induced relief distortion. The precision is better than half a pixel size. Two different resampling algorithm were used and tested individually using the forest area classification performance. Geocoding was done into a resolution similar to the resolution of the raw data (SPOT 10m/20m, Landsat-TM 25m). Afterwards the data sets were scaled to an uniform 100m pixel size, recommended for international forest data bases.

The illumination effects in the different, geocoded satellite data sets were individually corrected applying a semi-empirical correction method, based on the object forest. Preprocessing of satellite data results in 36 different satellite data sets.

Apart from the two individual forest masks, masks for water, clouds, contrail and cast shadow (of the two different dates) were generated.

The separation of the forested area from the rest was done by means of a automatic parallel-piped classifier, basing on the three different object classes forest, nonforest and water. All classification results were compared with the groundtruth data. Combination of the 36 satellite data sets, with all the different combinations of the masks, used as samples and groundreference data directed to over 2000 different accuracy evaluations.

At the resolution level of 20m to 25m a classification accuracy between 0.82 and 0.89 'kappa coefficient' was achieved. The forest specific accuracies ('user' and 'producer' accuracy) were about 85%. Involving multispectral SPOT data and additionally the panchromatic channel gave best result. On a 100m resolution level 'kappa coefficients' in the range of 0.85 to 0.89 were achieved. SPOT data as well as Landsat-TM data are equally suited to classify the forested area.

Based on detailed investigations the usefulness of a neighbourhood based resampling algorithm in the geocoding process for original resolutions has been proven. On all scales and for all classifications, the illumination corrected data sets performed better. Applying the forest boundary mask, derived from satellite data by analogue interpretation, gave up to 10% better classification accuracy than using the topographic map based reference data.

After a compilation of all results, paired with economic considerations, a method was proposed, to detect the forested area of the whole of Switzerland on 100m raster size by means of illumination corrected Landsat-TM data. The method was tested successfully in the region of the Canton of Zurich in northeastern Switzerland. The accuracy achieved, with regard to the disputable and incorrect forest boundaries on the topographic map, amounted to 0.78 'kappa'. Summarizing the experience done with the proposed method, this well suitable tool will help us to detect and monitor our precious forest resources in Switzerland for the next decade.

KAPITEL 1 Einleitung

1 - 1 DER WALD DER ERDE



Die Waldflächen der Erde sind in zwei grossen Waldgürteln rund um den Globus angeordnet. Einerseits kennen wir den durch die zwei Wendekreise begrenzten Tropen- und Subtropengürtel, andererseits den Waldgürtel der gemässigten und der borealen Zone der Nordhalbkugel (auf der Südhalbkugel finden wir mangels Landmassen kein Gegenstück). Es gibt keine einheitliche Statistik über die globale Waldflächenverteilung. Ursprünglich war etwa ein Drittel der Landmasse (4,6 Mrd. ha) bewaldet. Zu kalte Gebiete für eine Waldentwicklung und zu trockene Gebiete machen je einen weiteren Drittel der Erde aus. Aktuelle Waldflächen sind nicht oder kaum mit grosser Genauigkeit festzustellen [Herkendell J., et al., 1995]. Zu Beginn der 80er Jahre wird die Waldfläche mit 3,6 Mrd. ha angegeben [FAO, 1991]. Bei einer Landfläche von 13,077 Mrd. ha entspricht dies 27,5%.

Zurzeit stellt man eine globale Waldflächenabnahme fest, welche sich primär auf die tropischen Wälder beschränkt. In den Industrieländern ist die Waldfläche nahezu stabil, wenn auch die regionale Verteilung unter dem Druck der Ballungszentren

ändert. Die FAO (ref. Glossar) erhob in 90 Tropenländern quantitative Veränderungen und stellte zwischen 1980 und 1990 eine Abnahme von 15,4 Mio ha jährlich fest [FAO, 1994]. Dabei entfallen 4,1 Mio ha auf Afrika, 3,9 Mio ha auf Asien und 7,4 Mio ha auf Lateinamerika. Die Degradation des Waldes und seines Bodens, die Veränderung der Strukturen, der sich verschlechternde Gesundheitszustand und Probleme durch Schadstoffeinträge sind aber global anzutreffen.

Es ist eine Tatsache, dass die Wälder eine zentrale Rolle im ökologischen Gleichgewicht dieser Erde darstellen. *“Der Umgang des Menschen mit dem Wald und der weltweit sich verschlechternde Zustand des Waldes sind Ausdruck eines tiefgreifend gestörten Verhältnisses zwischen Mensch und Natur... Die Krise des Waldes ist eng vernetzt mit den laufenden globalen Veränderungen in den gesellschaftlichen, ökonomischen, politischen, kulturellen und technischen Bereichen sowie in der Umwelt. All diese Bereiche und ihre spezifischen Entwicklungen haben zu der Waldkrise geführt, und das weltweit.”* [Herkendell J., et al., 1995].

Die Funktionen des Waldes in bezug auf Mensch und Natur sind sehr vielseitig. Vom ökonomischen Aspekt aus gesehen liefern die Wälder lebenswichtige Nahrungsmittel, Brennstoffe und Zellulose für eine sprunghaft wachsende Weltbevölkerung. Wälder lieferten während Jahrhunderten die Rohstoffe für die Industrialisierung vieler Länder. Die griechischen und römischen Kulturen hätten nie ihren hohen Entwicklungsgrad ohne Ausbeutung mediterraner Wälder erreicht. Noch heute spielen die Wälder eine wichtige ökonomische Rolle in vielen Ländern, vorab den Entwicklungsländern. Sie sind oftmals die einzige Quelle für Devisen, bilden eine grosse Landreserve für die wachsende und sich ausbreitende Bevölkerung [IUFRO, 1995]. Diese rein ökonomische Betrachtung des Waldes war während Jahrhunderten das dominierende Element im Umgang mit dieser Ressource, und ist es noch heute in vielen Entwicklungsländern. Die Betrachtung des Waldes als Platz der Erholung für die Bevölkerung, die Verehrung des Waldes durch religiöse und kulturelle Gemeinschaften sowie die positive Wirkung auf das Wohlbefinden der Seele sind Funktionen, welche vorwiegend von Vertretern der bil-

denden Künste, Dichtern, Bildhauern und der Öffentlichkeit beachtet wurden und werden. Ihr Einfluss liegt aber weniger im politischen Bereich, welcher die Handhabung der Waldressourcen beeinflussen kann. Dennoch ist es auch diesen Gruppen zu verdanken, dass sich die Betrachtungsweise des Waldes von einem rein ökonomischen Standpunkt zu einem ganzheitlichen Standpunkt verschoben hat.

Neben den rein ökonomischen Funktionen des Waldes wird man sich in heutiger Zeit vermehrt der ökologischen Funktion bewusst. Wälder sind sowohl Kohlenstofflieferanten als auch Kohlenstoffakkumulatoren. Sie dienen als Filter für die Luft, die wir atmen, und das Wasser, das wir trinken. Sie schützen die Landwirtschaftsflächen und Siedlungsgebiete vor Erosion, Lawinen etc. Wälder sind ein wichtiger Lebensraum für diverse Pflanzen und Tiere, welche für das Überleben der Menschheit in Zukunft essentiell sein können [IUFRO ,1995]. Sie dienen aber auch als Erholungsraum für die Menschheit.

1 - 2 DER SCHUTZ DER WÄLDER

Aus diesen Tatsachen ist das Thema Wald in den vergangenen Jahren immer mehr ins Zentrum des internationalen ökologischen und ressourcenpolitischen Interesses gerückt. 1992 fand in Rio de Janeiro die berühmte Konferenz der Vereinten Nationen UNO über Umwelt und Entwicklung statt, welche einige markante Leitsätze verabschiedet hat [UNO, 1992].

- Die Menschheit wird zu einem gesunden und produktiven Leben in Harmonie mit der Natur angehalten (principle 1).

- Umweltrelevante Themen sollen international angegangen und die erhobenen Daten frei verfügbar sein (principle 10).

- Damit man eine nachhaltige Entwicklung erreichen kann, soll der Schutz der Umwelt einen integralen Bestandteil der Entwicklung darstellen und kann nicht losgelöst und isoliert betrachtet werden (principle 4).

Basierend auf der Rio-Deklaration und der Agenda 21 ("Combating Deforestation") sowie der Konvention über "Biological Diversity" fand 1993 in Helsinki die

Ministerial-Konferenz über den Schutz der Wälder in Europa statt. Man versuchte hier die internationale Zusammenarbeit mit legal bindenden Leitsätzen, welche zugegebenermaßen primär vom Standpunkt europäischer Waldbewirtschaftung und Schutzmassnahmen geleitet wurden, zu festigen. Typischerweise konnte man sich nur auf "non-legally binding authoritative" Statements einigen, welche aber in ihrer Aussage fundamental sind [European Community, 1993].

- *"Human actions must be avoided which lead, directly or indirectly, to irreversible degradation of forest soils and sites, the flora and fauna they support and the services they provide..."* (guideline 1)

- *"Forestry policies,....,should recognize the long-term nature of forestry by having an appropriate level of continuity in legal, institutional and operational matters..."* (guideline 2)

- *"Forest management should be based on periodically updated plans and programmes at local, regional or national levels...and on forest surveys, assessments of ecological impact and on scientific knowledge and practical experience"* (guideline 4)

Es ist neben vielen anderen Bemühungen diesen Resolutionen zu verdanken, dass das internationale Interesse am Schutz des Waldes in letzter Zeit wachgerüttelt wurde. Auf lokaler und regionaler Ebene haben in Europa die immensen Waldschäden durch Schadstoffeinträge und Schädlingsbefall das ihrige dazu beigetragen. Damit man überhaupt verstehen kann, welche Auswirkungen die Menschheit und die Umwelt auf unseren Wald haben, ist es notwendig, diese Ressource permanent zu überwachen und notwendige Massnahmen einzuleiten. Die Informationen müssen nach den Datenbedürfnissen aller Interessierten wie Forscher, Politiker, Industrie und Allgemeinheit auf lokaler, nationaler und internationaler Ebene erhoben, gesammelt und verfügbar gemacht werden. Unabhängig vom Beobachtungsmaßstab ist der aktuelle Status und die Entwicklung des Waldes und seiner Folgeelemente zu erfassen. Es braucht Überwachungs- und Planungsaktivitäten, sowie eine ausgedehnte Forschung der Ressourcenreserven und von Prozessen wie Waldflächenabnahme und Klimaänderungen [IUFRO, 1995].

Auf internationaler Ebene betrachtet man die Waldflächen leider oftmals nur vom ökonomischen Standpunkt aus. Der Wald hat aber einen grossen Einfluss auf die Biosphäre, speziell den Kohlenstoffkreislauf und die Bioproduktivität. Globale Beobachtungselemente müssen die Biodiversität, die Waldgesundheit, den Schutz vor Bodenerosion, Klimaänderungen und die Wasserkreisläufe miteinschliessen. Die 'Food and Agriculture Organization' FAO der Vereinten Nationen koordiniert beispielsweise die Erfassung, Analyse und Interpretation solcher Daten zwischen den nationalen Organisationen. Andere Organisationen, wie das 'United Nations Environment Programme' UNEP, die 'Economic Commission for Europe' ECE, das 'Joint Research Centre of the European Community' JRC, EC / EU mit dem Projekt TREES, führen internationale Beobachtungsprojekte zur Erfassung der globalen Waldfläche und ihrer Veränderung durch.

Auf nationaler Ebene steht zumeist die nachhaltige Nutzung im Vordergrund. Vorwiegend werden die Waldfläche und ihre Veränderung wie auch das Gleichgewicht zwischen Nutz- und Wachstumsraten der Waldreserven beachtet. Veränderungen des Bodenzustandes, der Waldgesundheit und der Biodiversität müssen für eine nachhaltige Bewirtschaftung und Konservierung der Reserven beachtet werden. In der Schweiz beschloss der Bundesrat 1981 die Durchführung eines ersten Landesforstinventars LFI, welches idealerweise alle 10 Jahre wiederholt werden sollte. Die Erhebung des ersten Inventars erfolgte in den Jahren 1983-1985 [EAFV, 1988]. Es war ursprünglich stark auf die Holzproduktion ausgerichtet. Diese Fokussierung entsprach dem damaligen Zeitgeist, bei der in Europa der Wald ökonomisch betrachtet wurde, da man annahm, dass die Abholzung und Probleme nur in den Tropen der dritten Welt auftreten. Mit dem zweiten Inventar von 1993-1995 werden vermehrt auch Informationen über die anderen Aufgaben des Waldes erhoben.

Auf lokaler kantonaler und kommunaler Ebene wurden bis anhin vorwiegend Daten in Zusammenhang mit der Waldnutzung erhoben. Zunehmend kommen nun auch Daten in Zusammenhang mit Vegetationsbedeckung, Landnutzungsmuster, Bodenqualität, Vitalitätszustand etc. dazu. In der födera-

listisch organisierten Schweiz sind diese Aufgaben den Waldeigentümern (Privaten, Kantonen und Eidgenossenschaft) zugewiesen, wobei die Koordination über Kreis- und Kantonsforstämter erfolgt. Die folgende Tabelle zeigt die Eigentumsverhältnisse des Schweizer Waldes.

Eigentums-kategorien	Jura %	Mittel-land %	Voralpen %	Alpen %	Südseite %	SCHWEIZ %
Bürgergemeinde	31	25	13	33	66	34
politische Gemeinde	34	19	10	26	8	21
öffentliche Korporation	1	5	20	10	2	8
Kanton	9	7	6	2	1	5
Bund	0	1	1	1	1	1
TOTAL öffentlicher Wald	75	57	50	78	78	69
Einzeleigentum	23	40	43	17	21	28
Gesellschaften	2	3	7	5	1	3
TOTAL privater Wald	25	43	50	22	22	31
Gesamtwald in 1000 ha	195,0	228,2	217,0	381,6	164,5	1186,3

Tabelle 1: *Eigentumsverhältnisse des Waldes in der Schweiz*
 Quelle: [EAFV, 1988], Auswertungseinheit Gesamtwald

1 - 3 ÜBERWACHUNG DES WALDES MIT FERNERKUNDUNG

Waldinventuren wurden und werden zumeist terrestrisch ausgeführt. Eine kosten- und zeitintensive Arbeit, welche nach kostengünstigeren Methoden verlangt. Mit der fortschreitenden technologischen Entwicklung gelangten in verstärktem Masse Fernerkundungsdaten mit ihrem ganzen Potential für diese Kartierungs-, Analyse- und Beobachtungsaufgaben

zum Einsatz [Hildebrandt G., 1993]. Konventionelle Luftbildinterpretation, sei es mit Schwarzweiss-, Farb- oder Falschfarbenfilmen, ist die weltweit verbreitetste Methode zur operationellen Datenerhebung. Die Entwicklung digitaler Aufnahmesysteme im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums stellt heute ein Instrumentarium zu Verfügung, welches grossräumige, flächendeckende und repetitive Erhebungen mit erheblich geringerem Aufwand erlauben kann. Multispektrale Scannerdaten, von satelliten- oder flugzeuggetragenen Systemen, liefern neben der Information über die räumliche Verteilung von Objekten auch spektrale Information. Mit geeigneten, mehrheitlich computergestützten Auswerteverfahren könnte dieser Informationsgehalt in vergleichsweise kurzer Zeit gruppiert oder klassiert werden. Mit dieser Methode könnte das Grundbedürfnis der Waldinventur, die Erfassung der Waldfläche, befriedigt werden. Aktuelle Forschungsergebnisse bieten für gewisse Zonen, Waldtypen und Massstäbe heute schon quasi-operationelle Methoden. Die Informationsextraktion detaillierterer Klassen innerhalb des Waldes (Artenzusammensetzung, Holzvorrat, Gesundheitszustand etc.) ist Teil verschiedenster Untersuchungen [Darvishsefat A., 1995].

1 - 3.1 Die Einbettung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand an der Abteilung für 'Angewandte Fernerkundung' des Geographischen Institutes der Universität Zürich-Irchel. Während den vergangenen sechs Jahren entwickelte sich hier ein Forschungs-Schwerpunkt im Bereich der Waldkartierung mit optischen, multispektralen Satellitendaten, das 'Waldprojekt'. Den Anlass dazu lieferte ein Forschungsauftrag der Umweltorganisation 'United Nations Environmental Program' UNEP der UNO. Sie beauftragte weltweit mehrere Institute mit der Entwicklung satellitengestützter Erfassungsmethoden der globalen Waldfläche zu deren Überwachung. Im Jahre 1972 wurde von der UNEP das GEMS-Projekt ('Global Environment Monitoring System') ins Leben gerufen, mit dem u.a. auch der weltweite Zustand der Wälder mittels Fernerkundung global erfasst werden soll. Die erhobenen Daten werden in der Umweltdaten-

bank GRID ('Global Resources Information Database', ref. Glossar) einer breiten Öffentlichkeit verfügbar gemacht. Die Absicht der Initianten ist eine kontinuierliche Überwachung der globalen Waldfläche als fundiertes, wissenschaftliches Instrument zur politischen Steuerung von Entscheidungen, die eine nachhaltige Nutzung der Waldressourcen beeinflussen (z.Bsp die Abholzung der Tropenwälder).

1 - 3.1.1 Interne Arbeiten zur Waldflächenerfassung

Die Aufgabe unserer Forschergruppe bestand in der Entwicklung von Methoden zur Waldflächenerfassung im mitteleuropäischen Raum mit Satellitendaten. Am Beispiel der Schweiz sollten die Möglichkeiten und Probleme aufgezeigt werden. Die Schweiz bietet insofern ein ideales Testgebiet zur Methodenentwicklung, als hier einerseits eine sehr feingliedrige, artenreiche, inhomogene und topographieabhängige Waldstruktur vorherrscht und andererseits eine flächendeckende Vergleichsbasis mit Landeskarten, Waldinventuren u.a. vorhanden ist.

1 - 3.1.1.1 Waldflächen im 1 km Raster - erste Phase

In einer ersten Phase wurden Methoden der digitalen Waldflächenkartierung in einem 1km * 1km Raster, basierend auf Daten des 'Advanced Very High Resolution Radiometer' AVHRR der amerikanischen Wettersatelliten der 'National Oceanic and Atmospheric Administration' NOAA entwickelt. 1990 wurde diese Phase mit dem Bericht [Hoffmann H., et al., 1989 (b)] zuhanden von UNEP/GRID abgeschlossen. Die Detailangaben sind den Diplomarbeiten von [Affentranger C., 1993] und [Leiss I., 1991] zu entnehmen. Die erreichten Genauigkeiten der Waldflächenerfassung liegen bei durchschnittlich 80,6% 'overall accuracy'.

1 - 3.1.1.2 Waldflächen im 25m Raster - zweite Phase

Für die zweite Phase wurde die zu erreichende Maschenweite der digitalen Klassierung auf 100m * 100m verfeinert. Zusätzlich bestand der Wunsch nach einer Differenzierung der Waldfläche nach Mischungsgrad (Nadelwald, Mischwald und Laubwald). Als Daten-

sensor sollte der Thematic Mapper Sensor (ref. Glossar) des amerikanischen Erdkundungssatelliten Landsat-5 eingesetzt werden. Die geometrische Auflösung (ref. Glossar) dieses Sensors von 30m * 30m zwang uns zum damaligen Zeitpunkt vorab grundlegende Forschungsarbeiten zur Vorverarbeitung durchzuführen. In Zusammenarbeit mit [Bitter P., 1990] wurde eine pixelgenaue geometrische Korrektur von Landsat-TM-Daten entwickelt [Kellenberger T., 1991], welche auch topographiebedingte Verzerrungen berücksichtigt. Der Problematik der stetig steigenden Datenmenge und ihrer Verwaltung nahm sich [Liechty M., 1993] in seiner Arbeit an, wobei er sich in der räumlichen Gliederung auf die verschiedenen Massstabsreihen der Schweizerischen Landeskarten [L+T] abstützte, welche nun für alle weiteren Testgebiete massgeblich ist. [Sandmeier St., 1991] beschäftigte sich in seiner Arbeit mit der Beseitigung von Beleuchtungseffekten in Landsat-TM-Daten, welche besonders im topographisch anspruchsvollen Gebiet der Schweizer Alpen und des Juras eine Waldklassifikation erschweren, wenn nicht sogar verunmöglichen. Die Arbeit von [Leu R., 1991] konzentrierte sich auf die radiometrische Korrektur des Atmosphäreneinflusses. Sie versuchte auch systematische Wege vorzuzeigen, wie die Waldfläche im Gebiet der Innerschweiz mit den TM-Daten klassiert werden könnte.

In Absprache mit Forstfachleuten wurden sechs verschiedene Testgebiete in den Regionen Uster (Mittelland), Beckenried (Voralpen/Alpen), Balsthal (Jura), Biasca (Tessin), Zernez (Engadin) und Simplon (Wallis) ausgewählt, um den wichtigsten in der Schweiz vorkommenden Waldtypen gerecht zu werden. In diesen Testgebieten sollte die Verwendbarkeit von Thematic Mapper-Daten für eine Waldflächenklassifikation und die Anwendbarkeit der Vorverarbeitungsmethoden getestet werden. Bewusst wurde ein Bearbeitungsmaßstab von 25m * 25m Pixel vorgegeben um das spektrale und geometrische Potential der TM-Daten und die Erkennbarkeit der lokalen Objektbedingungen auszuloten.

Im Testgebiet Uster hatte [Bachmann C., 1989] schon einige Vorarbeiten geliefert, welche aber noch auf TM-Daten beruhen, welche auf einer geometri-

schen Korrektur ohne Berücksichtigung des Geländeeinflusses und ohne Beleuchtungskorrektur basierten. Im Vergleich mit dem Grünauszug der Landeskarte (PK25, ref. Glossar) erreichte sie eine Klassifikationsgenauigkeit von 87% für die Waldfläche. Unter Verwendung der verbesserten Vorverarbeitungsmethoden konnte [Leu R., 1991] die Genauigkeit auf über 92% steigern. Sie übertrug die angewandten Methoden auch auf das Testgebiet Beckenried und erreichte in diesem topographisch schwierigerem Gebiet eine Genauigkeit von über 87%.

Die Bearbeitung des Testgebietes Biasca, als typischen Standort für die Tessiner Wälder, wurde von [Paschedag I., 1993] angegangen. Neben dem Fehlen eines hochaufgelösten Geländemodells DHM25 zur Beleuchtungskorrektur standen vorab Probleme mit der Walddefinition und damit verbunden mit den Referenzdaten im Mittelpunkt. Die aufgelösten, oberen Waldränder, die Buschvegetation und Einzelbäume werden im verwendeten Grünauszug der topographischen Karten nicht analog dem Erscheinungsbild in den Satellitendaten abgebildet. Die erreichte 'Genauigkeit' liegt daher bei nur etwa 82%.

Die Arbeit im Testgebiet Zernez legte daher besonderen Wert auf die Objektdefinition 'Wald' und die Erhebung eines 'satellitenkonformen' Referenzdatensatzes [Maier M., 1994]. Die Erfassungsgenauigkeit des Engadiner Waldes liegt bei annähernd 90% relativ zu einer überarbeiteten Version des Grünauszuges. Im Testgebiet Balsthal, mit typischen Wäldern des Juras, konnte die entwickelte Methode mit Einbezug aller Erfahrungen im erwarteten Rahmen (91% Genauigkeit) validiert werden [Fischer M., 1996]. Mit einem editierten Bodenreferenzsatz, der auf der Landeskarte und eigenen Luftbildinterpretationen beruht, konnte in einem Subtestgebiet eine Genauigkeitssteigerung auf über 93% erreicht werden. Die Untersuchungen im Wallis, Gebiet Simplon, stehen noch aus.

Die naheliegende Möglichkeit, neben den Landsat-TM-Daten auch SPOT, wie auch Fusionsdaten der zwei Systeme zu verwenden, testete [Darvishsefat A., 1995] im Testgebiet Zugerberg. Sein Hauptaugenmerk lag hingegen vorwiegend auf der Extraktion von Waldbestandesparametern. Die ermutigenden Genauigkeiten von über 93% in der Waldflächenklassifikation beein-

flussten die vorliegende Arbeit insofern, als das Potential von SPOT vertieft behandelt wird.

1 - 3.1.1.3 Folgerungen der zweiten Phase

Aus den Arbeiten der zweiten Phase sind folgende Konsequenzen zu ziehen:

- Es sollte bei einer Genauigkeit von über 85% möglich sein, die Waldfläche der Schweiz in einem Arbeitsmasstab von 25m * 25m Pixeln mit Landsat-TM-Daten zu erfassen.

- Die angewandte geometrische Korrektur unter Berücksichtigung der topographiebedingten Verzerrungen hat sich bewährt.

- Die Beleuchtungskorrekturen, welche vom zu klassierenden Objekt (Wald) abhängig sind, führten durchwegs zu besseren Klassifikationsergebnissen.

- Die Hauptproblematik in allen Arbeiten liegt zumeist in der differierenden Walddefinition der verschiedenen Bodenreferenzdaten und in der mangelnden Kenntnis über das Objekt Wald an sich, sei es im physikalischen Verhalten, in der Phänologie, in der Ausdehnung etc.

- Der Relevanz und Aussagekraft digitaler Bodenreferenzdaten, in Abhängigkeit ihrer Erfassung, ihres Originalformates und -Masstabes und ihrer Beziehungen zu den in der Fernerkundung gemessenen physikalischen Parametern wurde kaum oder nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

- Als Klassifikatoren kamen zumeist 'Parallelepiped' und 'Maximum Likelihood'-Algorithmen in binärhierarchischer oder einstufiger Anwendung zum Einsatz. Sie verlangen einen hohen Grad an Benutzerführung, welche in operationellen Anwendungen hinderlich sein können.

- Die erwähnten Arbeiten untersuchten jeweils nur Gebiete in der Grösse eines topographischen Kartenblattes 1:25'000 (17,5km * 12km). Eine Anwendung über grössere Gebiete, wenn nicht sogar über die ganze Schweiz und ähnlich gelagerte Gebiete des nahen Auslandes wurde nicht versucht.

- Neben den verwendeten Landsat-TM-Daten müssen vermehrt auch Daten der SPOT-Systeme zur Waldklassifikation untersucht werden. Dies muss sicherlich nicht infolge der Radiometrie, sondern

infolge der besseren geometrischen Auflösung von SPOT und der zeitlichen und auch operationell besseren Verfügbarkeit der Daten erfolgen.

- Alle Arbeiten der zweiten Phase versuchten den Wald in einer dem Sensor Landsat-TM naheliegenden Auflösung von 25m * 25m grossen Pixel zu erfassen. Die Adaption auf die ursprünglich geforderten 100m * 100m Pixel wurde nie getestet und vollzogen.

- Im Verlauf der Untersuchungen musste der Auftraggeber UNEP/GRID aus Spargründen seine finanzielle Unterstützung einstellen. Die ESA finanzierte anschliessend eine Studie zur Korrektur von Landsat-TM Daten in 'rugged terrain' in Hinblick auf eine Waldklassifikation [Itten K., et al., 1992], [Itten K., et al., 1995]. Aus persönlichem Interesse und in der Verantwortung gegenüber unserer wissenschaftlichen Aufgabe wurden die Arbeiten über den Wald darauf weitergeführt. Die Idee einer gesamtschweizerischen, verbesserten Waldklassifikation, als Beitrag zu einer nachhaltigen, internationalen Waldpolitik bleibt die Triebfeder. Mittlerweile haben neue Auftraggeber wie der Bund und die Schweizerische Arealstatistik ihr Interesse an dieser Arbeit bekundet und unterstützen die Weiterführung mit finanziellen Mitteln.

1 - 4 ZIELSETZUNG DER ARBEIT

Das Bedürfnis, die Waldfläche sowohl national, als auch im europäischen Rahmen periodisch zu überwachen, ist in den vergangenen Jahren enorm gestiegen. Internationale Walddatenbanken sind in Entstehung begriffen. Die Schweiz hat ihren Anteil dazu zu liefern.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, mit der die Waldfläche in der Schweiz und damit auch im angrenzenden Ausland mit multispektralen, optischen Satellitendaten einfach, ökonomisch und möglichst operationell erfasst werden kann.

Dabei soll untersucht werden, inwieweit die operationellen Satellitensysteme SPOT (ref. Glossar) und Landsat-TM sich für diese Aufgabe eignen. Untersuchungen sollen sowohl in der geometrischen Originalauflösung der Systeme, als auch in der für internationale Datenbanken geforderten Normauflö-

sung von 100m Rasterweite gemacht werden. Die Datenvorverarbeitung und Korrektur der Satellitendaten ist zu optimieren und auf ihre Brauchbarkeit, konkret ihren Einfluss auf die Waldflächenerfassung, zu überprüfen.

Ein besonderes Augenmerk ist der Qualität von Bodenreferenzdaten für Wald zu widmen. Die verfügbaren Datensätze sind auf ihren qualitativen und quantitativen Inhalt zu überprüfen und ihre Brauchbarkeit im Zusammenhang mit Klassifikationen von optischen Fernerkundungsdaten zu testen.

Die Methodenentwicklung hat in einem gut dokumentierten und repräsentativem Testgebiet zu erfolgen. Ihre Anwendbarkeit muss in einem unabhängigen, grossräumigen Gebiet überprüft werden.

1 - 5 AUFBAU DER ARBEIT

Im [KAPITEL 2] werden die Datengrundlagen besprochen. Einer Vorstellung des Testgebietes inklusive der örtlichen Waldverhältnisse folgt die Beschreibung der verwendeten Karten und ihrer Derivate, wie die Farbauszüge und das digitale Geländemodell. Anschliessend wird die Wahl der verwendeten Satellitendaten im Generellen und mit speziellem Augenmerk auf den zu klassierenden Wald mit seinen relevanten Eigenschaften beschrieben.

Das [KAPITEL 3] geht in einem ersten Teil vertieft auf die Definition der Fernerkundung und die relevanten Parameter ein, die eine Waldflächenklassifikation überhaupt erst ermöglichen. Es folgt ein Exkurs über die Skalierungsproblematik von Fernerkundungs- und Bodenreferenzdaten. Der Hauptteil des Kapitels ist den Untersuchungen der Bodenreferenzdaten gewidmet. Einerseits erfolgt eine Qualitätsüberprüfung der auf der Landeskarte basierenden Referenzdaten, andererseits wird die Erstellung und Überprüfung einer neuen Bodenreferenz beschrieben.

Die Vorverarbeitung des digitalen Geländemodells wird zu Beginn von [KAPITEL 4] erläutert. Anschliessend wird die gesamte Vorverarbeitung der Satellitendaten, die die Punkte Qualitätsanalyse, geometrische

Korrekturen sowie die radiometrischen Korrekturen umfasst, beschrieben.

Die eigentlichen Waldklassifikationen und Auswertungen folgen in [KAPITEL 5], 'Waldklassifikation'. Das Kapitel schliesst mit einem Vorschlag der in den Zielsetzungen geforderten Methode zur Waldflächenklassifikation.

Die Anwendbarkeit der erarbeiteten Methode wird am Beispiel des Gebietes des Kantons Zürich in [KAPITEL 6] überprüft.

In [KAPITEL 7] werden die Arbeit zusammenfassend diskutiert und die entsprechenden Schlussfolgerungen gezogen. Zusätzlich folgt ein Ausblick auf weitere anstehende Arbeiten zur Waldflächenklassifikation.

Der Anhang umfasst die Zusammenstellung aller Auswertungen und Analysen. Auf spezielle Anfrage kann er vom Autor angefordert werden.

KAPITEL 2 Grundlagen

2 - 1 ALLGEMEINE INFORMATIONEN

Die Zielsetzungen dieser Arbeit bedingen eine Integration der bestehenden Arbeiten zu Waldklassifikationen mit Landsat-TM auf 25m * 25m Auflösung und deren Erfahrungen. Das Prüfen der Anwendbarkeit in einer größeren Maschenweite (100m * 100m), die zusätzlichen Untersuchungen von SPOT-Daten, das Entwickeln neuer, besser operationalisierbarer Auswertemethoden sowie Untersuchungen zu Skalierungsänderungen sind nur realisierbar, wenn eine gute und adäquate Datenbasis vorliegt. Deshalb wurde für diese Testphase ein Gebiet ausgewählt, das schon mehrfach in den vorangegangenen Arbeiten untersucht wurde [Leu R., 1991], [Sandmeier St., 1991]. Die verfügbare Datengrundlage besteht aus einer Landsat-TM-Szene sowie einer SPOT-Szene (multispektral und panchromatisch) mit nur 11 Tagen Zeitdifferenz, dem Geländemodell DHM25 mit 25m Maschenweite, einer flächendeckenden Referenzinformation von Wald- und Wasserperimetern, Luftbildern, Bestandskarten, atmosphärische Zusatzinformation und ersten Erfahrungen einer digitalen Waldklassierung.

2 - 2 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Untersuchungsgebiet liegt am nördlichen Rand der Alpen im Zentrum der Schweiz [Fig - 1]. Es entspricht, abgesehen von einem schmalen Streifen am Ostrand (hell dargestellt), dem topographischen Kartenblatt 1:25'000, Blatt Nummer 1091, 'Beckenried'. In Landekoordinaten sind die NW-Ecke mit 672'500/206'000 und die SE-Ecke mit 689'700/194'000 definiert.

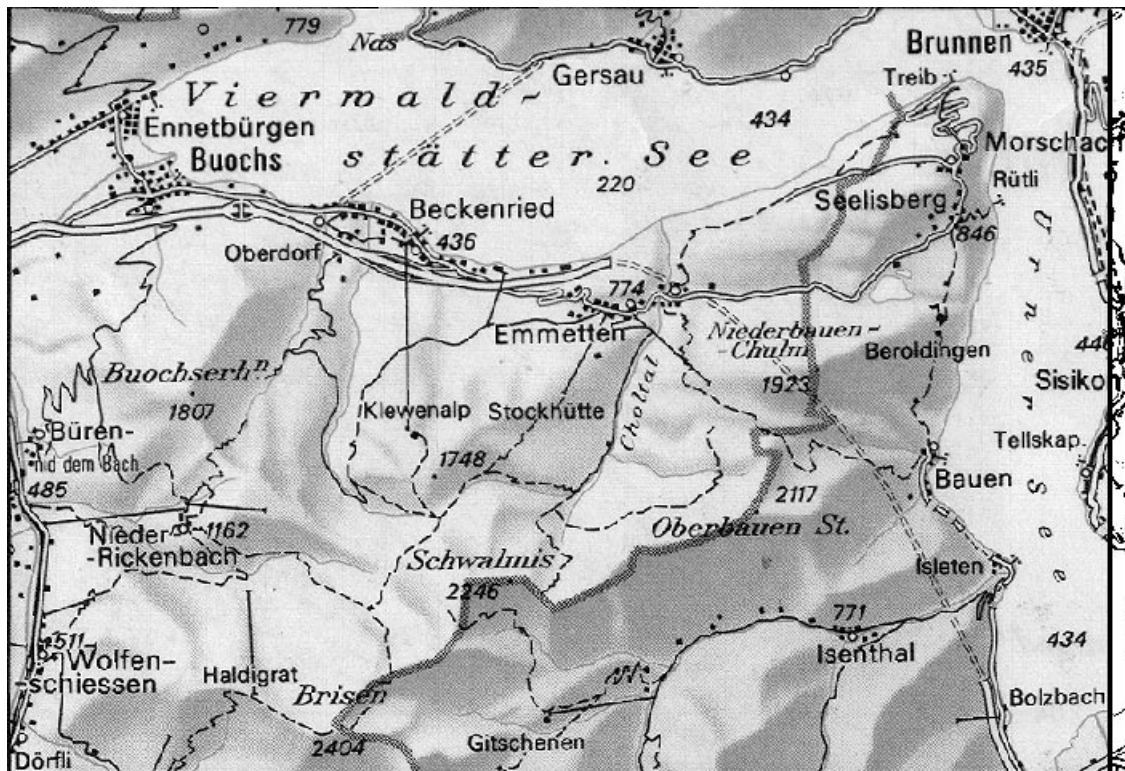


Fig. 1 : Das Untersuchungsgebiet Beckenried
[© Bewilligung: L+T, 1996]

2 - 2.1 Ausdehnung

Die Ausdehnung beträgt 17,2 km * 12 km, im Gegensatz zu einem vollen Kartenblatt von 17,5 km * 12 km. Diese an sich unkonventionelle Begrenzung wurde in Hinblick auf die in dieser Arbeit verwendeten

Pixelgrößen gewählt. Es ist so für alle verwendeten Rastergrößen möglich, den Ausschnitt ganzzahlig mit Pixeln abzudecken. Untersuchungen über den Einfluss von Skalierungen werden dadurch vereinfacht. [Tab - 2] gibt einen Überblick über die Anzahl Bildelemente in Abhängigkeit der Pixelgrößen.

Pixelgröße	Anzahl Kolonnen	Anzahl Zeilen	Fläche pro Pixel
1m * 1m	17200	12000	1 m ²
10m * 10m	1720	1200	100 m ²
16m * 16m	1075	750	256 m ²
20m * 20m	860	600	400 m ²
25m * 25m	688	480	625 m ²
40m * 40m	430	300	1600 m ²
50m * 50m	344	240	2500 m ²
80m * 80m	215	150	6400 m ²
100m * 100m	172	120	10000 m ²

Tabelle 2: Testgebiet 'Beckenried'; Anzahl Zeilen und Kolonnen relativ zur Auflösung

2 - 2.2 Geographische Beschreibung

2 - 2.2.1 Topographie

Das Testgebiet Beckenried [Fig - 2] liegt tektonisch gesehen am Übergang von den helvetischen Decken mit vorwiegend kompakten Kalksandsteinen zu der schräggestellten Molasse. Die Schichten der helvetischen steigen von Süden nach Norden an und brechen auf der Linie Schwalmis-Oberbauenstock-Niederbauenstock abrupt nach Norden ab. Diese Kanten werfen bei natürlicher Beleuchtung aus Südosten markante Schlagschatten, welche die Interpretation der verwendeten Satellitendaten in diesen Bereichen erschweren, wenn nicht sogar verunmöglichen [4 - 1.3]. Eine weitere Kante verläuft entlang dem

Urnerbecken des Vierwaldstättersees. Dominanteste Erhebungen im Bereich der helvetischen Decken im Ostteil des Untersuchungsgebietes sind der Schwalmis mit 2246m ü.M., der Oberbauenstock mit 2117m ü.M. und der Niederbauenstock mit 1923m ü.M. Die markante Landzunge nach Nordosten gegen den See trägt das Hochplateau des Seelisberges mit dem maleischen 'Seelisbergsee'.

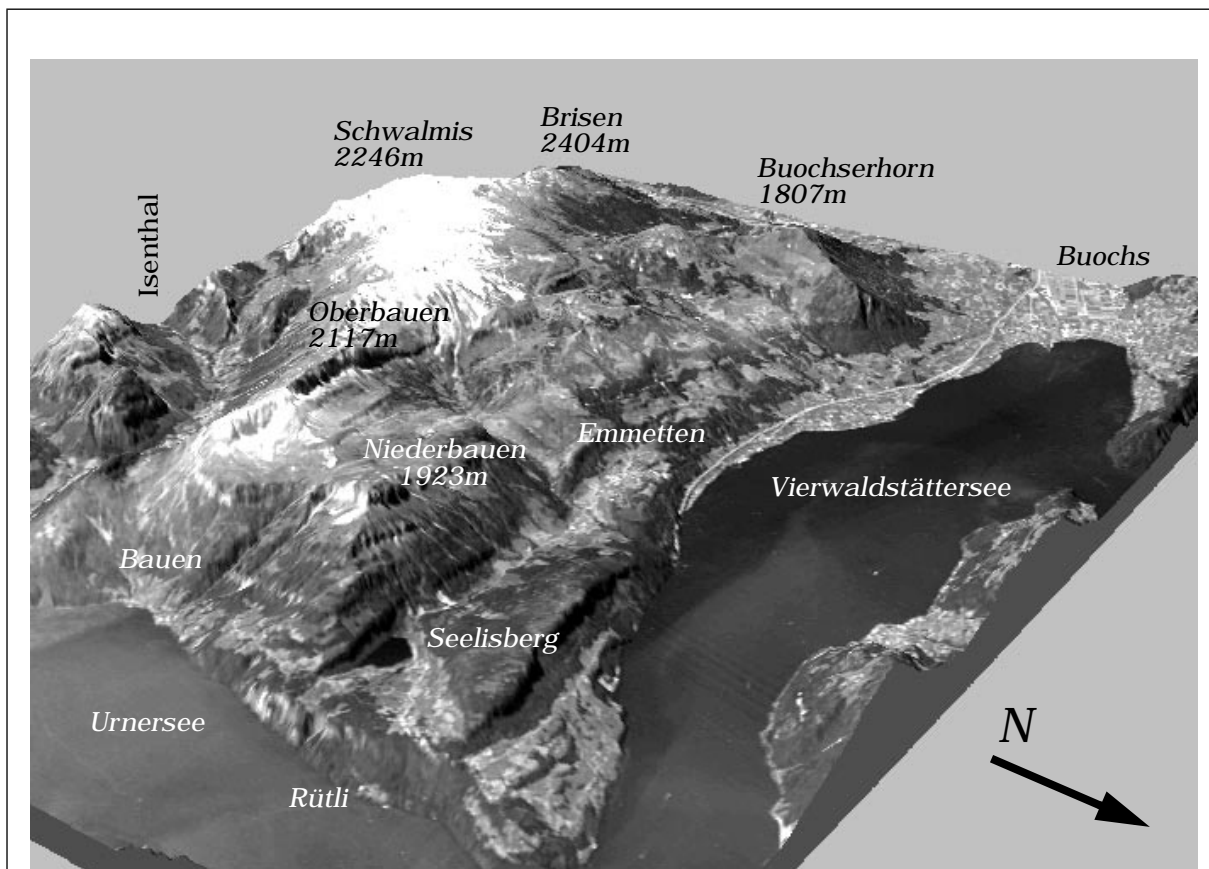


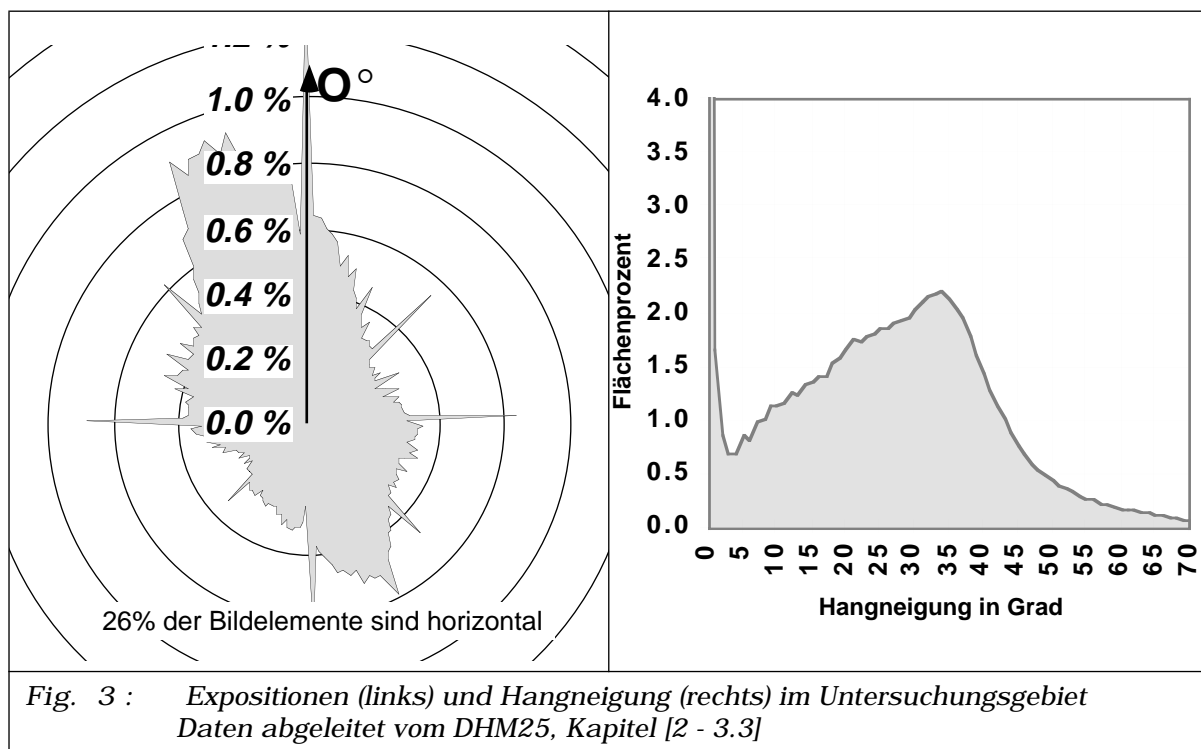
Fig. 2 : Testgebiet Beckenried, Blick aus Nordosten
Dreidimensionale Darstellung mit Hilfe des digitalen Geländemodells DHM25
und dem panchromatischen SPOT Kanal,
[Verwendung DHM25, Bewilligung: L+T, 1996]

Als Besonderheit sind im Westen penninische Klippen, eine kalkhaltige Flyschsandsteinformation, überschoben. Markanteste Erhebung ist das Buochserhorn mit 1807m. ü.M. Das relativ weiche Gestein hat, im Gegensatz zum Bereich der helvetischen Decken, eine gleichmässige Erosion in alle Richtungen zugelassen, so dass wir am Buochserhorn alle Expositionen gleichmässig vorfinden. In vergangener Zeit

waren auch die markantesten Erdbeben und Murgänge vorwiegend in diesem Bereich aufgetreten.

Im Norden des Untersuchungsgebietes steigen die schräggestellten Molasseschichten gegen die Rigi auf.

Das Untersuchungsgebiet zeigt eine dominante Ausrichtung der Exposition gegen Nordwesten [Fig - 3]. Die häufigste Hangneigung liegt im Bereich von 34°.



2 - 2.2.2 Siedlungen und Verkehr

Die grössten Orte sind Buochs am Nordwestufer des Sees, Emmetten und Beckenried im nördlichen Zentrum, Brunnen im äussersten Nordosten sowie Bauen an der Ostflanke des Oberbauenstocks [Fig - 1, Seite 46]. Dominante Verkehrsachse ist die Autobahn N4 Luzern-Gotthard, welche entlang des Südufers des Sees verläuft, den Seelisberg untertunnelt und im äussersten Südosten wieder zum Vorschein kommt. An der Ostseite des Urnersees verläuft die Axenstrasse, die Verbindung Zürich-Schwyz-Gotthard. Parallel zu dieser Strassenachse verläuft die Eisenbahntransversale Basel-Gotthard-Chiasso.

Das südlich gelegene Gebiet ist nur durch kleine Alpstrassen erschlossen. Von Beckenried führt eine

Seilbahn auf die 1600m hohe Klewenalp, von Emmetten auf den gleich hohen Niederbauen. Die Kammlinie des Niederbauen-Oberbauen-Schwalmis-Brisen ist neben einer orographischen Trennlinie auch gleich die Kantonsgrenze von Nidwalden im Nordwesten und Uri im Südosten.

2 - 2.2.3 Gewässer

Dominantes Landschaftselement im Norden und Osten ist der Vierwaldstättersee mit einem mittleren Seepegel von 434 m ü.M. Der Urnersee mit dem Hauptzufluss, der Reuss, ist wegen dem 'Rütli' vielen als die Wiege der Schweiz bekannt. Im Westen erkennt man den geradlinigen Verlauf der Engelbergeraas im Talboden von Süden nach Norden. Sie mündet nach einem scharfen Knick nach Osten auf der Buochserallmend in den Vierwaldstättersee. Der See verfügt über genügend Durchfluss, der eine übermässige Eutrophierung wie beim nahegelegenen Zugersee kaum zulässt. Von fernerkundlicher Seite betrachtet handelt es sich hier um ein sehr homogenes Objekt in Bezug auf das Spektralverhalten. Zusammen mit dem kleinen Seelisbergsee auf der nordöstlichen Geländeterrasse beanspruchen Gewässer 25% oder 51,6 km² des Testgebietes. Abgesehen vom West-Ost verlaufenden Isenthal im Süden wird das Gebiet vorwiegend nach Norden entwässert.

2 - 2.2.4 Wald

Rund 30% (62 km²) des Untersuchungsgebietes 'Beckenried' sind bewaldet. Ausgehend vom Seeufer treffen wir zunächst Buchenwälder (kolline Stufe), dann Tannen-Buchenwälder (montane Stufe) und in den höchsten Lagen bis 2000m Farn-Tannenmischwälder an [Ellenberg H., Klötzli F., 1972]. Durch anthropogenen Einfluss beschränken sich die Waldpartien vorwiegend auf steiles Gelände, sowie Gebiete in denen der Wald eine Schutzfunktion vor Lawinen ausüben muss. Die lokale und regionale Ausprägung des Waldes und seine Zusammensetzung ist ein Resultat langer Entwicklungsprozesse unter natürlichen Standortfaktoren, sowie dem Zusammenspiel von Mensch und Natur. Die regionale Ausprägung des Wal-

des im Testgebiet Beckenried wird in Kapitel [2 - 2.2.6] näher erläutert.

2 - 2.2.5 Übrige Landnutzung

Neben 25% Wasser [2 - 2.2.3] und 30% Wald [2 - 2.2.4] bestehen die restlichen 46% (95 km²) des Untersuchungsgebietes Beckenried aus landwirtschaftlichen Nutzflächen, überbauten Gebieten oder Felsregionen. Abgesehen von der Buochser Allmend im Nordwesten, die durch den Flugplatz Buochs dominiert ist, befinden wir uns hier in einer Region, in der vorwiegend Viehwirtschaft und vereinzelt Obstbau betrieben wird. In tieferen Lagen trifft man neben der Weidewirtschaft vor allem Heuwiesen und Obstbäume an, während die hohen Lagen alpwirtschaftlich genutzt werden.

2 - 2.2.6 Hinweise zum Wald in der Schweiz

2 - 2.2.6.1 Die geschichtliche Entwicklung des Waldes in der Schweiz

Vor etwa 12'000 Jahren zogen sich die Gletscher in die Alpen und nach Skandinavien zurück. Zur Altsteinzeit waren birkenreiche Föhrenwälder im Mittelland und in den Alpentälern vorherrschend. Nach und nach kehrten die Hasel, Eichen und Ulmen zurück und bildeten dichte Laubmischwälder. Vor ca. 6'000 Jahren erreichte die Weisstanne aus den Südwestalpen kommend die Schweiz. Die Fichte wanderte aus Kroatien kommend wenig später in die Bündnertäler ein. Der zeitliche Vorsprung der Weisstanne gegenüber der Fichte im Tessin und Wallis wirkt sich bis heute in einem grösseren Weisstannenreichtum der dortigen Nadelwälder im Vergleich zu Graubünden aus [Steiger P., 1995, p.16].

Die Abkühlung in der Jungsteinzeit und Bronzezeit bewirkten eine Ausdehnung der subalpinen Nadelwälder. Im Mittelland und Jura wurde der wärmeliebende Eichenmischwald grösstenteils durch Buchen- und Tannen-Buchenwald ersetzt. In den Alpen konnte sich die Fichte in den letzten dreitausend Jahre auf Kosten der Arven- und Weisstannenwälder ausdehnen.

2 - 2.2.6.2 Die Waldvegetation in der Schweiz

Die folgenden Bemerkungen zur Waldvegetation in der Schweiz sind soweit ausgeführt, als dass sie das Testgebiet Beckenried betreffen. Für detailliertere und vollständigere Angaben sei auf [Steiger P., 1995], [Landolt E., 1961] und [Ellenberg H., et al, 1972] verwiesen. Die oben beschriebene Entwicklungsgeschichte des Waldes führte im heutigen Klima zur Ausbildung eines Laubwaldes in Mitteleuropa, in dem im Naturzustand die Buche über weite Flächen vorherrscht [Steiger P., 1995, p.17]. Die Rotbuche bildet unter mittleren Standortbedingungen reine, gegenüber anderen Baumarten unduldsame Hallenwälder. Erst in wärmeren, kollinen Grenzlagen der Buchen mischen sich zunehmend Eichen-Hagenbuchenwälder dazu. Die auch das Schweizer Mittelland kreuzenden Grenzlinien sind infolge menschlicher Einflüsse recht fließend und verschoben.

Im Übergang vom gemässigten, ozeanisch gefärbten Klima des Mittellandes zum Montanbereich, mit seinen immer kürzeren Vegetationszeiten, kommt man im Submontanbereich [Tab - 3, Seite 56] in die Konkurrenzzone zwischen Buche, Tanne, Fichte und Bergahorn. Diese Baumarten bilden im Bereich von 900-1300m ausgedehnte Mischwaldbestände der Tannen-Buchenwaldstufe. An günstigeren Stellen der Alpennordseite kommt die Buche lokal bis 1500m waldbildend vor (im Tessin sogar bis 1600m). Abgesehen von diesen Ausnahmefällen ist aber die ganze obere Montan- und Subalpinstufe zwischen 1300m und 2300m natürlicherweise von Nadelwäldern besiedelt. Die Fichte ist der dominante Baum. Dies ist auch der unnatürlichen Förderung durch den Menschen (Kultivierung), überhöhten Wildbeständen (Verbissfestigkeit der Fichte) und Beweidung zu verdanken. Lärche und Arve wachsen in den kontinental geprägten Tälern der Inneralpen in einem ausgeprägten, hochsubalpinen Gürtel über dem Fichtenwald.

2 - 2.2.6.3 Limitierende und fördernde Standortfaktoren

Die eben beschriebenen dominanten Waldgesellschaften sind bei einem raschen Blick auf die Schweizer Verhältnisse kaum oder nur selten über grössere Gebiete anzutreffen. Wir kennen in der Schweiz sehr

inhomogene und kleinräumige Waldflächen der unterschiedlichsten Zusammensetzung. Gleiche Waldgesellschaften treten demnach nicht alleine nur im gleichen Grossraum auf, sondern an bestimmten, ähnlichen Standorten. Diese Ähnlichkeit der Standorte wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt:

- Grossklima
- Höhenlage
- Besonnung
- lokales Klima
- Bodenbeschaffenheit
- Bodenstabilität
- Bodentyp
- Wasserversorgung
- Steilheit

Diese Standortfaktoren stellen die für die Zusammensetzung des Pflanzenkleides ursächlichen Bedingungen. Das Konkurrenzverhalten einzelner Pflanzen trägt das seine dazu bei. Neben diesen natürlichen Faktoren sind auch anthropogene Einflüsse bestimmend, wie die Art der Waldpflege und -Nutzung, die einseitige Hege des Wildes, Bautätigkeiten etc.

Klima

Die Schweiz liegt in Bezug auf den Wald in einer klimatisch bevorzugten Region der gemässigten Zone. Das Zusammenspiel aller Faktoren wie Temperatur, Niederschlag, Licht, Wind etc. ist für das Waldwachstum günstig, so dass die temperaturbedingten Höhengrenzen für Baumwuchs, die Wald- und die etwas höher liegende Baumgrenze, deutlich überschritten werden [Steiger P., 1995, p.21]. Beinahe alles Land, das unter diesen Grenzen liegt, wäre im naturbelassenen Zustand bewaldet.

Zwischen dem Mittelland und den Alpen bemerkt man in der Schweiz eine deutliche Zonierung in die Laubwälder der Tieflagen, die immergrünen Nadelwälder und die Hochgebirgswälder mit Lärchen und Arven. Dies deutet auf eine klare Abhängigkeit der Waldformen von Höhe und Temperatur. Der ozeanisch geprägte Klimabereich bringt in allen Jahreszeiten ausreichend Niederschläge und eine genügende Wärmemenge zur Entwicklung sommergrüner Wälder. Die Topographie modifiziert die Verhältnisse regional. Trockene Talbereiche treten im Regenschatten der

Alpenkämme auf, und regenreiche Gebiete sind in den randlichen Staulagen an der Alpennordseite, gemäss der Hauptwindrichtung an nordexponierten Alpenrand-Lagen und im Jura zu finden. Im Gebiet Beckenried werden Regenmengen zwischen 1000mm im Talbereich und 2000mm in Gipfellagen gemessen. Die Trockengrenze des Buchenwaldes liegt bei 1000mm pro Jahr in 1000m Höhe.

Das Temperaturgeschehen in der Schweiz kann ebenfalls als gemässigt eingestuft werden. Im Mittelland liegt die Jahresmitteltemperatur bei über +7° C mit 160-220 frostfreien Tagen mit Mittelwerten über +10° C [Steiger P., 1995, p.24]. Der Buchenwald benötigt bei uns ein Jahresmittel über +5° C, Fichtenwälder in den Alpen gedeihen bis etwa +2° C Jahresmittel. Viel beeinflussender als Jahresmitteltemperaturen sind aber Temperaturextreme und ihre Verteilungen. So tauen sonnenexponierte Hänge auf 1700m ü.M. im Engadin auch bei tiefen Winter-Temperaturen auf, und Lärchen und Arven können mit ihrer Stoffwechselproduktion beginnen und damit die kommenden Sommertage besser ausnützen. Ein vergleichbarer Hang im wintermilderen und schneereicheren Testgebiet auf derselben Höhe bleibt länger eingeschneit und ist im Sommer vielen kühlen Wolken- und Regentagen ausgesetzt. Die Bedingungen im extremeren Engadin sind für den Waldwuchs wesentlich günstiger als die ausgeglichenen Temperaturen des Alpenrandes.

Boden

Ausgangspunkt für jeden Boden ist das darunterliegende Muttergestein. Durch Verwitterung infolge Niederschlag und Temperaturschwankungen werden die Gesteine und Mineralien zerkleinert sowie teilweise chemisch umgewandelt. Pflanzen und Bodenlebewesen bewirken zusätzlich die organische Bodenbildung, d.h. die Anreicherung des Oberbodens mit organischem Material und die Vermischung mit dem Muttergestein. Der Kalkgehalt im Basisgestein ist bestimmend für den Säuregrad im rezenten Boden und dieser wiederum ein bestimmender Faktor für die darauf wachsende Pflanzen- oder im speziellen Waldgesellschaft. Wichtige waldbildende Baumarten im Testgebiet wie die Buche, Tanne, Fichte und Föhre sind bodenvag, was bedeutet, dass sie sowohl auf sau-

ren oder basenarmen wie auch auf kalk- oder basenreichen Gesteinen wachsen. Die Begleitpflanzen der Kraut- und Strauchschicht können aber variieren. Im Testgebiet Beckenried kommen primär basische Kalkgesteine vor [2 - 2.2.1], die nach Untersuchungen von [Steiger P., 1995, p.28] das Buchenwachstum fördern, so dass die Buchengrenze bis 500m höher liegen kann.

2 - 2.2.6.4 Höhenlage; Höhenstufen der Vegetation

Der Wechsel der Vegetation und im speziellen der Waldzusammensetzung mit zunehmender Höhenlage ist sehr eindrücklich sichtbar. *„...Zwar sind die Grenzen der Höhenstufen meist nicht sehr scharf, sondern durch breite Übergangszonen oder durch tiefe innige Verzahnung der verschiedenen Vegetationen verwischt. Auch erschwert der Mensch an manchen Orten das richtige erkennen der Stufen, da er vielfach die Vegetation zurückgedrängt hat...“* [Landolt E., 1961, p.38].

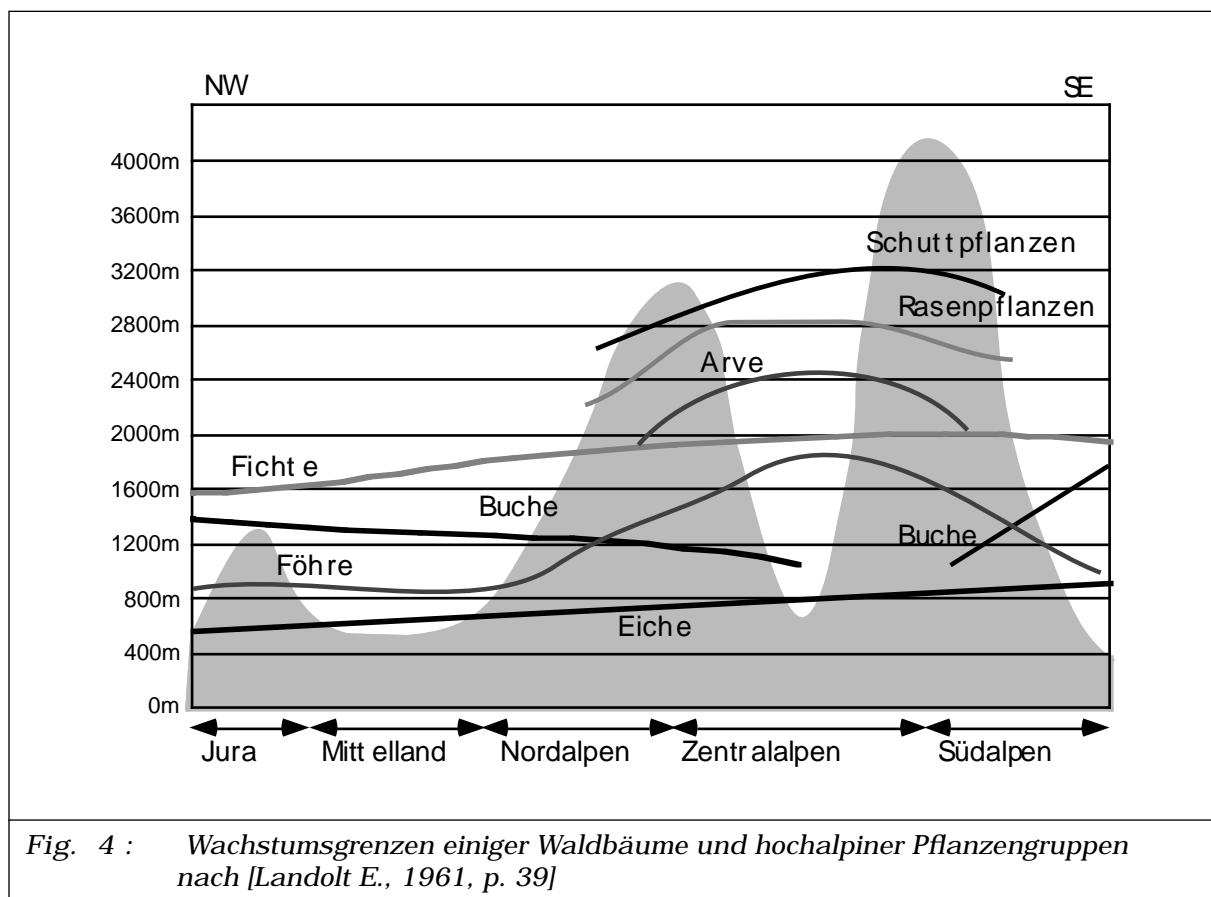


Fig. 4 : Wachstumsgrenzen einiger Waldbäume und hochalpiner Pflanzengruppen nach [Landolt E., 1961, p. 39]

Hauptsächlich die Temperatur und die Exposition sind für die Stufenbildung verantwortlich. Pflanzen der Täler haben eine obere Vorkommensgrenze, während Alpenpflanzen eine obere und untere Grenze vorweisen. [Fig - 4] zeigt das Vorkommen wichtigster Baumarten in Abhängigkeit der Höhe.

Die Vegetation der Alpen kann nach [Landolt E., 1961, pp. 38] in folgende Stufen eingeteilt werden:

Stufe	Wichtigste Vertreter	Höhenlage				
		Jura	Mittel-land	Nord-Alpen	Zen-tral-Alpen	Süd-Alpen
Colline Stufe (Hügelstufe, untere Waldstufe)	Laubmischwälder Eiche, Hagenbuche, Kirsche, Nussbaum, Kastanie	-600m	-600m	-700m	-800m	-800m
Montane Stufe (Bergstufe, mittlere Waldstufe)	Buchenwald, Buchen-Tannenwald, Tannenwald			700m - 1200m	800 - 1400m	900m - 1700m
Subalpine Stufe (Gebirgsstufe, obere Waldstufe)	Fichtenwald, Bergföhren, Arven-Lärchen, Alpenerlen, Zwergstrauch			1200m - 1800m	1400m - 2400m	1700m - 1900m
Alpine Stufe (Hochgebirgs-, Rasenstufe)	baumlos, Rasen			ab Baumgrenze	ab Baumgrenze	ab Baumgrenze

Tabelle 3: *Vegetationshöhenstufen der Alpen nach [Landolt E., 1961, pp. 38]*

2 - 2.2.6.5 Obere Waldgrenze

Die höhenbedingte Waldgrenze, eine eigentliche Temperaturgrenze, ist eine der markantesten Vegetationsgrenzen der Alpen. Im Testgebiet Beckenried liegt sie bei etwa 2000m ü.M. Doch nicht die Temperatur allein, sondern das Zusammenspiel, teilweise noch

unbekannter, weiterer Faktoren sind entscheidend. Wie in Abschnitt [Klima, Seite 53] erwähnt, sind nicht die Durchschnittstemperatur und das Winterminimum entscheidend, sondern die Wärmemenge während der Vegetationsperiode. ***“...Das plötzliche Aussetzen der Bäume an der Waldgrenze (bis zur Baumgrenze, Anm. Verf.) steht in scheinbarem Widerspruch zur allmählichen, höhenbedingten Temperaturabnahme. Hier dürfte sich die spätwinterliche Wasserknappheit bei gefrorenem Boden und Frosttrocknis der Nadeln in Schönwetterperioden als begrenzender Faktor erweisen. Jungbäume sind stärker betroffen als bis in frostfreie Tiefe wurzelnde Altbäume...”*** [Steiger P., 1995, p.43]. In Untersuchungen über die Fichte wurde nachgewiesen, dass neugebildete Nadeln mindestens drei Monate zur Ausreifung und Frosthärtung benötigen. An der Waldgrenze reicht darum ein Sommer gerade zur Bildung genügend resistenter Nadeln, während sie über der Baumgrenze vertrocknen würden. Der Übergang von normalwüchsigen Bäumen in die verkrüppelten Baumtypen oberhalb der Waldgrenze ist deshalb verständlich. Die Kleinbäume schützen sich unter einer Schneedecke vor der Unbill der Trockenheit und des Frostes.

Die obere Waldgrenze liegt heute nur noch an seltenen Stellen auf ihrer natürlich angestammten Höhe. Seit der Besiedlung der Schweiz wurde sie durch den Menschen immer mehr zurückgedrängt. Sie liegt heute durchschnittlich etwa 200m - 300m tiefer. Die alpine Weidewirtschaft gilt als Hauptursache. Nachfolgevegetationen wie Alpenerlen- und Legföhrengesellschaften haben heute an vielen Stellen den Platz des Waldes eingenommen. Gebiete, in denen diese Nachfolgegesellschaften nicht oder nicht rechtzeitig Fuss fassen konnten, fielen oftmals der Bodenerosion anheim. Sobald die Humusdecke weggespült wird, ist es auch bei Aufgabe der Weidewirtschaft und dem Versuch einer Aufforstung selten möglich, eine Waldgesellschaft wieder anzusiedeln. Ist die Schutzfunktion des Waldes nicht mehr vorhanden, so können den Menschen schädigende Naturkatastrophen wie Lawinen, Murgänge etc. überhand nehmen.

2 - 2.2.6.6 Waldtypen der Schweiz

Unter dem Einfluss des Menschen sind in der Schweiz verschiedenartigste Waldtypen entstanden. Die folgende Tabelle bietet eine Übersicht der häufigsten Waldtypen nach dem Landesforstinventar.

Waldtyp	Besonderheit	Prozentuale Verteilung in der Schweiz					
		Jura	Mittelland	Vor-Alpen	Alpen	Süd-Seite	CH
Gleichförmiger Hochwald	gleichförmig einschichtig dominant	67	82	63	47	32	58
Ungleichförmiger Hochwald	ungleichförmig Ansatz zu Plenterstruktur	9	5	11	10	8	9
Plenterartiger Hochwald	stufig jung-mittel-alt lückenlose Verjüngung	7	2	11	13	6	8
Aufgelöste Bestockungen	obere Waldgrenze, Gebirgswaldweiden, schlechte Verjüngung	6	0	5	9	8	6
Gebüschwald	zurückgedrängter Nadelwald durch Alpwirtschaft, Alpenerlen und Legföhren	0	0	1	8	14	5
Mittelwald	Überreste traditioneller Kulturformen, Hausschicht für Brennholz, Oberständer für Bauholz	6	5	1	2	11	4
Niederwald	Brennholz und Pfahlproduktion von Stockausschlägen, im Tessin verbreitet	1	1	0	1	11	2

Tabelle 4: Die häufigsten Waldtypen der Schweiz nach Landes-Forstinventar [EAFV, 1988, pp28]

2 - 3 TOPOGRAPHISCHE KARTEN UND DERIVATE

Die Arbeit mit Fernerkundungsdaten hat in der Schweiz den Vorteil, dass wir uns in topographischer wie auch in qualitativ beschreibender Hinsicht auf eine grosse Menge an exakter räumlicher Information abstützen können. Dazu gehören unter anderen die Produkte der Schweizerischen Landestopographie L+T.

2 - 3.1 Topographische Karten

Das Landeskartenwerk der Schweizerischen Landestopographie L+T besteht aus Blättern der Massstabsreihe 1:25'000 (250 Blätter), 1:50'000 (78 Blätter), 1:100'000 (23 Blätter), 1:200'000 (4 Blätter) und 1:500'000 (1 Blatt).

Die Grundblätter, welche ab Schwarzweiss-Luftbildern photogrammetrisch erstellt werden, sind die Karten 1:25'000. Sie werden in einem Turnus von 6 Jahren periodisch nachgeführt. Die Kartengeometrie basiert auf einer schiefachsigen, winkeltreuen Zylinderprojektion (Mercator) mit dem Berührungspunkt bei Bern. Konkret handelt es sich um eine Parallelprojektion in Meter-Einheiten mit dem Koordinatenzentrum 600'000 (x, West nach Ost) und 200'000 (y, Süd nach Nord) [Merz U., 1990, pp. 4]. Die Äquidistanz der Höhenkurven beträgt 20m. Für die vorliegende Arbeit wurde insbesondere zur geometrischen Korrektur von Satellitendaten das Blatt 'Beckenried', 1:25'000, Nr. 1171 verwendet [Bundesamt für Landestopographie, 1987], [© Bewilligung: L+T, 1996].

2 - 3.2 Pixelkarten, Farbauszüge der topographischen Karten

Eine topographische Karte 1:25'000 ist aus mehreren Farbebenen (Auszügen) aufgebaut, welche separat erstellt werden. Die relevantesten Farbauszüge sind im folgenden beschrieben:

Der Schwarzauszug umfasst die Situation mit Verkehrsträgern, Beschriftung, Gebäuden, Felsschraffuren, Höhenkurven in Felsgebieten etc.

Der Blaulächenauszug beinhaltet die See- und Flussflächen sowie Gletschergebiete, während im

Blaustrichauszug die bathymetrischen Höhenkurven und Höhenkurven auf Gletschern, Bäche und Flüsse, deren Beschriftung etc. zu finden sind.

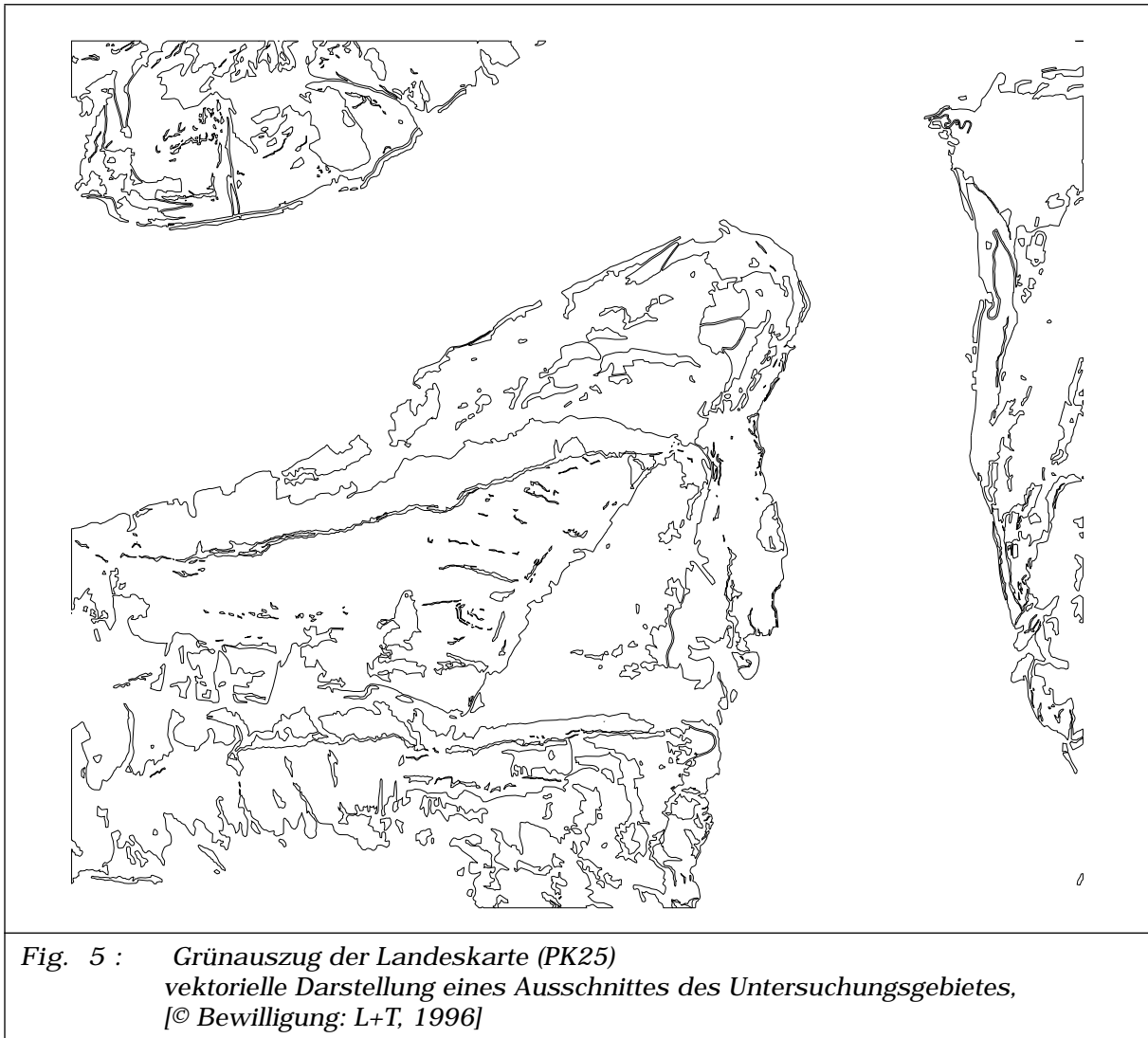
Der **Grünflächenauszug** repräsentiert die Waldfläche nach Landeskartendefinition, wobei flächenhafte Elemente, welche den Wald durchschneiden (Strassen) ausgespart bleiben. Im **Grünstrichauszug** findet man Einzelbaumsignaturen, Hecken etc.

Der **Braunauszug** umfasst unter anderen Elementen den grössten Teil der Höhenkurven.

Die einzelnen Farbauszüge der Karten sind sowohl in analoger Form (Filmmasken) wie seit jüngerer Zeit in digitaler Form (Pixelkarten, PK25) verfügbar. Die Pixelkarten sind gescannte Reproduktionen der Farbauszüge der 1:25'000er Karten mit einer Auflösung von 1,25m pro Bildelement im Rasterformat.

2 - 3.2.1 Grünauszug der Landeskarte, Waldflächenreferenz

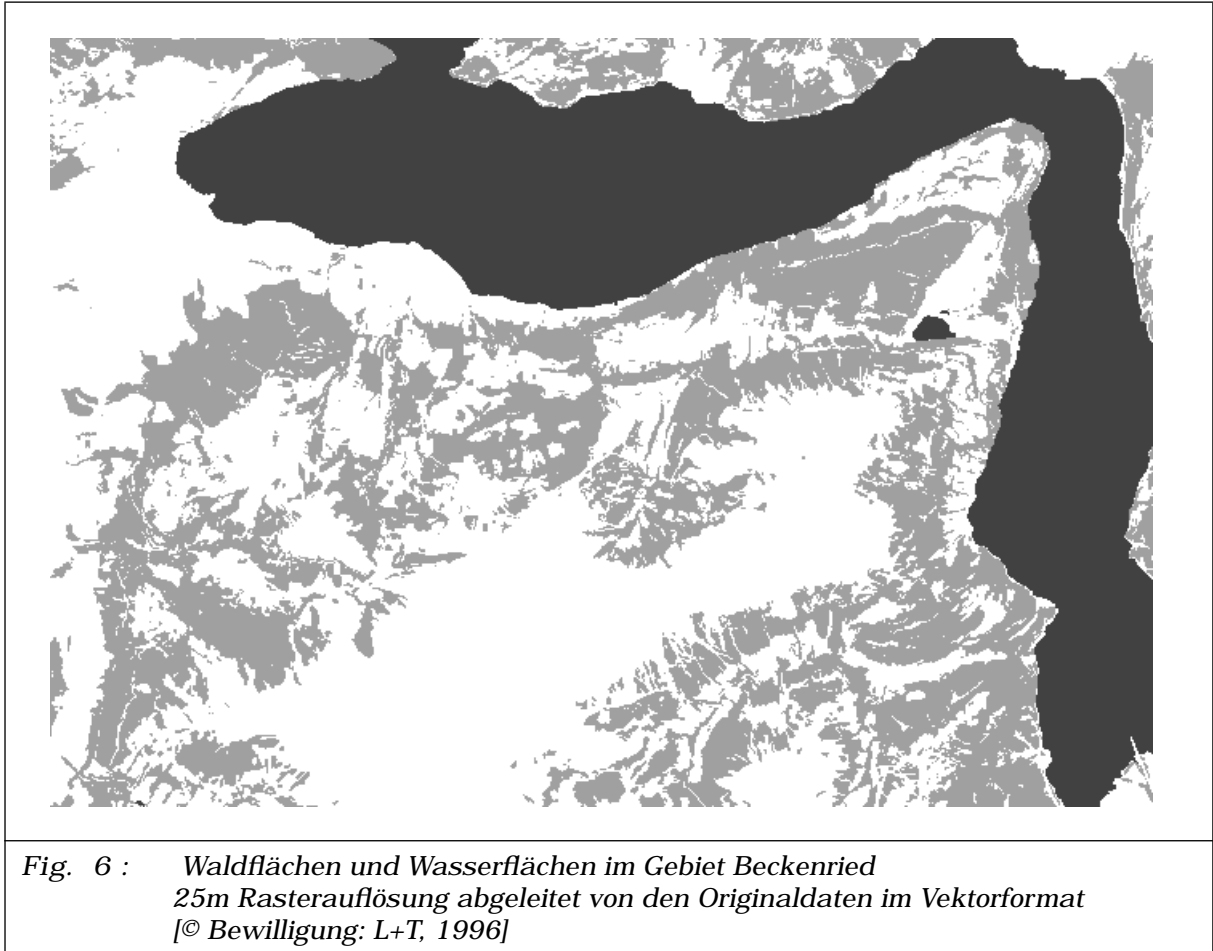
Wie in Kapitel [3 - 3] beschrieben, wird der Grünauszug der Landeskarte in dieser Arbeit als flächendeckender Bodenreferenzdatensatz für die Wald-Nichtwaldunterscheidung verwendet [© Bewilligung: L+T, 1996]. Zum Zeitpunkt des Arbeitsbeginns lagen für das Gebiet Beckenried noch keine Pixelkarten vor. Man musste darum auf die Grüntonauszüge der Kartenblätter 1:25'000 zurückgreifen. Für das Blatt Beckenried lag ein Grüntonfilm der Karte aus dem Jahr 1987 vor. Der Erhebungsstand für den Wald in diesem Kartenjahrgang liegt aber etwa 1 Jahr zurück. Dieser Schwarzweiss-Film wurde mit einem Optronics Trommelscanner am Institut für Kartographie der ETHZ (ref. Glossar) mit einer Auflösung von 50 μ m / 508dpi (entsprechend 1,25m in der Realität) gescannt. Die so erhaltenen Rasterdaten sind anschliessend mit einem Intergraph System vektorisiert, editiert und in unser eigenes Geographisches Informationssystem ARC/INFO (ref. Glossar) transferiert worden [Schaepman M., 1992, p. 72]. [Fig - 5] zeigt einen Ausschnitt des erhaltenen Waldflächendatensatzes.



2 - 3.2.2 Gewässer aus der Landeskarte, Gewässerreferenz

Auf der Basis der auch für den Grünflächenauszug verwendeten Landeskarte 1:25'000, Beckenried, wurde der Referenzdatensatz für die Gewässer erhoben [Fig - 6]. Im Gegensatz zum automatischen Digitalisieren des Grünschnittes mittels Trommelscanners wurden für die Gewässerlinien (Seeufer und Fliessgewässer) die Daten manuell erfasst. Mittels eines Digitalisierendes erfolgte die Eingabe der Koordinaten direkt ab der topographischen Kartengrundlage in das GIS (ref. Glossar) des ARC/INFO Systems. Die geometrische Genauigkeit, unter Berücksichtigung der Lagefehler in der Kartenvorlage und des Digitalisierendes liegt für die Gewässermaske und auch die Waldflächen-

maske bei $\pm 4,7\text{m}$ (Ehrler C., zitiert in [Schaepman M., 1992, p.70]).



2 - 3.3 Digitales Geländemodell DHM25

2 - 3.3.1 Digitale Geländemodelle

Digitale Geländemodelle DGM werden auch Digitales Höhenmodell DHM, 'Digital Terrain Model' DTM oder 'Digital Elevation Model' DEM genannt. Es handelt sich dabei um ein Abbild der Topographie in digitalem Format. Zumeist liegt dem Modell ein mehr oder weniger regelmässiges Raster zugrunde, wobei für jeden Rasterpunkt die topographischen X- und Y-Koordinaten mit zugehöriger Höheninformation gespeichert sind. Höhenmodelle sind in der digitalen Fernerkundung von grosser Wichtigkeit. Nur Dank

diesen Modellen lassen sich die Aufnahmegeometrien der einzelnen Sensoren rekonstruieren und damit deren Daten in Bezug auf die Objektlage absolut referenzieren. Dies ist insbesondere in topographisch anspruchsvollen Gebieten, d.h. mit grossen lokalen Höhenunterschieden von grosser Wichtigkeit.

In der Schweiz sind Anwendungen der digitalen Fernerkundung ohne Einsatz von Geländemodellen nicht denkbar. Ausgeprägte Höhenunterschiede auf engstem Raum bewirken Verzerrungen in Satellitendaten, die nur unter Einbezug der Höheninformation behoben werden können. Versuche, ohne Geländemodelle auszukommen, sind nur unter beschränkten Genauigkeitsanforderungen möglich wie zum Beispiel durch Referenzierungen nach Höhenstufen [Kellenberger T., 1989].

Numerisch berechnete Derivate der digitalen Geländemodelle wie Hangneigung, Exposition und Bruchkanten werden unter anderem bei der Korrektur von Beleuchtungseffekten, atmosphärischen Einflüssen und in der Klassifikation von lageabhängigen Objekten eingesetzt. In dieser Arbeit wurde ein Geländemodell zur Georeferenzierung der Satellitendaten und zur Korrektur von Beleuchtungseffekten verwendet. Es erfolgten keine atmosphärischen Korrekturen.

2 - 3.3.2 Rimini

In der Schweiz gibt es seit den sechziger Jahren das flächendeckende digitale Geländemodell RIMINI. Es ist ein Rastermodell mit 250m Maschenweite im Mittelland und 500m Maschenweite in den Alpen. Hergestellt wurde es durch manuelles Erfassen der Höhenkurven der 1:25'000 Landeskarten auf einer überlagerten Rasterfolie und anschliessender, einzelpunktweiser Eingabe in ein EDV System (ref. Glossar). Infolge dieser Arbeitsmethodik, bei der anstelle der realen Höhenwerte der Stichprobenpunkte oftmals der nächstliegende Knotenpunkt erfasst wurde und bei der menschliche Fehler aufgetreten sind, ist dieses Geländemodell nur bedingt verwendbar. Mangels anderer, flächendeckender digitalen Geländemodelle wurde in der Schweiz in den vergangenen Jahren oftmals das RIMINI zur Geokodierung verwendet. Dabei wurde es auf die Auflösung der Satellitendaten bilinear skaliert.

Genügte dieses Modell nicht, so wurden manuell und projektspezifisch ausgehend von den Höhenkurven der Landeskarten digitale Höhenmodelle erstellt und verwendet ([Maier M., 1994],[Leu R., 1991], [Paschedag I., 1993], [Sandmeier St., 1991]).

Es war von vornherein klar, dass das RIMINI-Modell nur knapp für die Geokodierung von hochauflösenden Satellitendaten wie Landsat oder SPOT genügen würde. Korrekturen von Beleuchtungseffekten und/oder atmosphärischen Störungen können mit diesem groben Rastermodell nicht befriedigend durchgeführt werden.

2 - 3.3.3 DHM25, Projekt DIKART

1982 wurde an der Schweizerischen Landestopographie L+T mit der Herstellung eines neuen, flächendeckenden digitalen Geländemodells DHM25 mit einer Rasterweite von 25m begonnen. Dieses Projekt ist bekannt unter dem Namen DIKART (DIGITALE KARTE, ref. Glossar). Es wurde analog dem RIMINI als militärisches Projekt begonnen, ist mittlerweile aber in einen kommerziellen Status übergeführt worden. Die Herstellung der DHM25 Modelle basiert auf den topographischen Kartenblättern 1:25'000. Die Braunplatten, die Höhenkurven mit einer Äquidistanz von 10m (Alpengebiete 20m) enthalten, werden mit einem Raster Scanner abgetastet und vektorisiert. Fehlende Höhenkurventeile auf der Braunplatte (Gletscherkurven in blau oder Gebiete mit Felsschraffuren und Beschriftungen in schwarz sowie Generalisierungen) werden anschliessend digital editiert und ergänzt. Die Vektoren werden dreiecks-vermascht und mit einem Interpolationsverfahren in ein regelmässiges 25m Rastergitter umgerechnet. Die Höhenauflösung wird in dm angegeben ([Eidenbenz Ch., 1988], [Kellenberger T., 1989, p.41]).

Jedes DHM25-Modell umfasst demnach von West nach Ost 701 Pixel und von Nord nach Süd 481 Pixel. Die Pixelmittelpunkte sind gegenüber den Schnittpunkten des Schweizerischen Landeskoordinatensystems referenziert. Bis heute sind, abgesehen von einigen Kartenblättern des östlichen Graubündens und des Tessins, die aufwendige Editierarbeiten bedingen, alle Modelle der Schweiz erhältlich. Die

generelle Genauigkeit wird von [Kölbl O., 1990, p. 483] mit $\pm 5\text{m}$ in Bezug auf vermessene Höhen angegeben.

2 - 3.3.4 Verwendetes DHM25, Blatt 1171, Beckenried

Für die vorliegende Arbeit wurde das DHM25 Blatt 1171, Beckenried verwendet [© Bewilligung: L+T, 1996]. Die Begrenzung ist analog der Landeskarte 1:25'000 mit den Koordinaten 672'500/206'000 und 690'000/194'000 definiert. Der Minimalwert ist 4256 dm, der Maximalwert 23964 dm. Offensichtliche Fehler mit geringen Ausmassen (einige dm) treten nur in ebenem Gebiet auf und sind durch den Interpolationsalgorithmus bei der Herstellung bedingt. [Fig - 7] zeigt das schräglichtschattierte Geländemodell mit der Beleuchtungssituation der verwendeten Landsat-TM-Daten zur Zeit des Satellitenüberfluges am 11. Juli 1991 um 09:40h MEZ. Dargestellt sind die mit 100 multiplizierten Cosinuswerte des Winkels der Sonneneinstrahlung ('incidence').

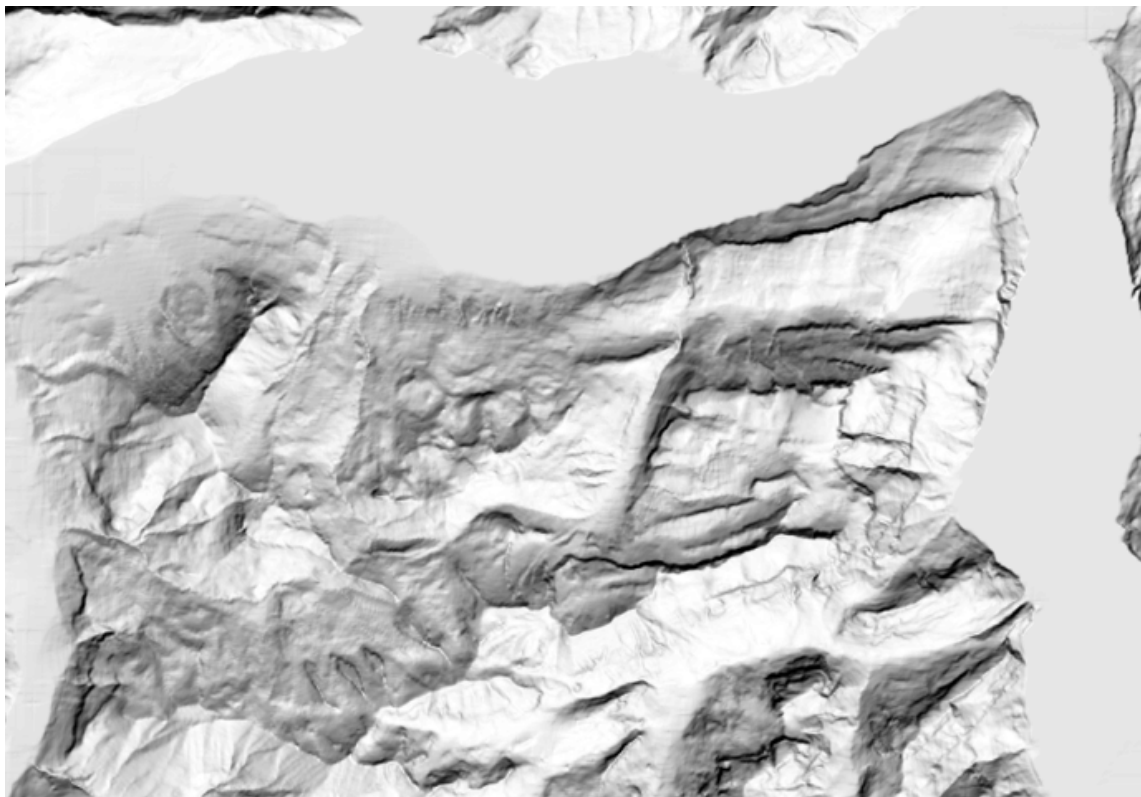


Fig. 7 : Schattiertes Geländemodell DHM25, Blatt 1171, Beckenried
Beleuchtung 11. 7. 1991, 09:40, [Verwendung DHM25, Bewilligung: L+T, 1996]

[Tab - 5] gibt eine Übersicht über statistische Kennwerte des Geländemodells und den abgeleiteten Derivaten in Bezug auf die Aufnahmezeitpunkte der verwendeten Satellitendaten. Weitere Angaben zum Geländemodell an sich, wie Hangneigung und Exposition sind aus [Fig - 3, Seite 49] zu entnehmen.

	Mittelwert	Minimum	Maximum	Bemerkungen
DHM25 Höhe in m	924	434	2404	
Hangneigung in °	20,5°	0°	83°	26% horizontal
Exposition in °	193°	0°	359°	26% horizontal
Illumination Aufnahme SPOT 30.6. 1991 10:31 MEZ	78,8	0	100	cos(i) * 100 Modus = 90
Illumination Aufnahme TM 11.7. 1991 09:40 MEZ	73,8	0	100	cos(i) * 100 Modus = 84
	% Fläche	km²		nicht auswertbar
Schlagschatten Aufnahme SPOT 30.6. 1991 10:31 MEZ	0,52%	1,1		6,6%
Schlagschatten Aufnahme TM 11.7. 1991 09:40 MEZ	0,70%	1,5		9,1%

Tabelle 5: Statistische Kennwerte aus dem verwendeten DHM25

2 - 4 SATELLITENDATEN

2 - 4.1 Hochauflösende, multispektrale Satellitensysteme

Die Möglichkeit, die Erdoberfläche und ihre natürlichen Ressourcen in kleinen und mittleren Masstäben mit Hilfe satellitengestützter Aufnahmesysteme zu erfassen, kartieren, überwachen und Veränderungen sogar zu prognostizieren, weckte schon früh das Interesse von Forschern, Planern und Politikern. 1972 wurden erstmals satellitengestützte Erderkundungsdaten, die bis anhin einer rein militärischen Kontrolle unterworfen waren, der privaten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

2 - 4.1.1 Landsat-TM

Mehr als zwanzig Jahre war das Monopol bei den nicht-meteorologischen Satellitenbildern mit dem Erderkundungssatellitenprogramm Landsat fest in der Hand der Amerikaner [Kellenberger T., 1989]. Speziell das multispektrale Scannersystem MSS (ref. Glossar) auf den Landsat Satelliten 1,2 und 3 lieferte eine grosse Menge an spektraler Bildinformation in digitalem und analog-photographischem Format für eine Vielzahl von Anwendungen. Zu Beginn wurden Landsat-MSS-Daten vorwiegend mit Methoden der Luftbildinterpretation ausgewertet. Mit der immer grösseren Verfügbarkeit digitaler Bildverarbeitungsstationen wurden mehr und mehr digitale Daten zur Landnutzungsklassifikation, Schätzung physikalischer Parameter der Erdoberfläche und Überwachung von Landnutzungsveränderungen herbeigezogen [Curran P., 1985]. Der grundlegende Durchbruch in Europa blieb aber versagt. Die Auflösung des Landsat-MSS mit ca. 80m * 80m ist für die Erfassung der kleinräumigen Gliederung der Landnutzung in unseren Breiten zu grob.

Die Erkenntnis aus dem Betrieb und der Anwendung von Daten der ersten drei Landsat-Satelliten, die sich rasch entwickelnde Technik im Bereich der Sensorherstellung und dem Bau verbesserter polarer Plattformen führte 1983 zu einer neuen Generation von Satelliten, der zweiten Generation. Die neue Landsat-4 Plattform trägt zwar weiterhin einen (leicht modifizierten) MSS-Scanner, aber das neue Thematic Mapper TM (ref. Glossar) Instrument verfügt nun über eine verbesserte räumliche Auflösung (ref. Glossar) mit 30m * 30m und spektrale Auflösung (ref. Glossar) mit 7 Kanälen im visuellen, nahinfraroten und thermalen Bereich. Infolge technischer Probleme mit Landsat-4 wurde 1984 bereits der identische Landsat-5 gestartet, welcher bis heute zuverlässig und operationell arbeitet. Der Start eines verbesserten Landsat-6 ist 1994 gescheitert. Für 1998 arbeitet man an einem Landsat-7 Projekt mit verbesserter räumlicher und spektraler Auflösung.

2 - 4.1.2 SPOT-HRV

Unter der Administration Reagan wurde das private Unternehmen EOSAT (ref. Glossar) für Landsat Daten gegründet, dem aber damals durch die amerikanische, strategische Sicherheitsvorschrift, nur Satellitenbilder mit einer Auflösung schlechter als 10m vertreiben zu dürfen, stark die Hände gebunden wurden [Kellenberger T., 1989, p. 1]. Die Datennutzer mussten sich mit der Auflösung von 30m zufriedengeben.

Das gewaltige Potential, das in diesen Daten steckt, veranlasste Frankreich, das bereits über ausreichende Weltraumtechnik verfügte, 1975 eine Vorstudie zum Bau eines europäischen, polaren Erderkundungssatelliten zu starten. 1976 wurde ein Vorschlag zum Bau einer modularen Satellitenplattform, bestückt mit einem Multispektralsensor in 'PushBroom'-Technik (ref. Glossar) mit einerseits 20m Auflösung und drei Spektralbändern (2 visuell, 1 nahinfrarot) sowie eines Sensors mit 100m Auflösung und 7 Spektralbändern, analog dem TM Instrument der Europäischen Weltraumbehörde ESA (ref. Glossar) unterbreitet. Ein 1977 gescheiterter Zusammenarbeitsvertrag mit Landsat bewog schliesslich Frankreich (mit schwedischer und belgischer Beteiligung) das Projekt in nationaler Eigenregie, unter Verzicht auf den geplanten 100m Sensor durchzuführen. 1986 wurde der erste SPOT-1 Satellit gestartet. Der Satellit hat zwei identische Systeme (HRV), die parallel und unabhängig voneinander eingesetzt werden können. Neben den erwähnten 3 Spektralkanälen mit 20m Auflösung verfügt SPOT auch über einen panchromatischen Kanal mit 10m Auflösung. Zusätzlich bestand nun erstmals die Möglichkeit den Blickwinkel des Instrumentes $\pm 27^\circ$ quer zur Flugrichtung schwenken zu können. Die resultierende Möglichkeit aus dem Weltraum Satellitendaten stereoskopisch auszuwerten, die erhöhte Repetierbarkeit von Aufnahmen des gleichen Gebietes und vieles andere mehr verhalfen diesem System zu einem raschen Durchbruch. 1990 wurde der zweite, identische SPOT-2 Satellit gestartet, obwohl der erste Satellit weiterhin voll funktionstüchtig war. Ein weiterer identischer SPOT-3 Satellit wurde 1993 gestartet. Wie das Landsat System kann SPOT heute als operationell und weltweit verfügbar bezeich-

net werden. Verbesserte Nachfolgesatelliten SPOT-4, -5 mit einem weiteren Nahinfrarot-Kanal zur Erkennung von Vegetation ist für 1997 (SPOT-4) und 2001 (SPOT-5) in Vorbereitung [Kramer J., 1994].

2 - 4.1.3 IRS-LISS, MOS-MESSR

Der Zerfall des Ostblocks in den Neunzigerjahren, das liberalisierte, strategische Sicherheitsverständnis in der Fernaufklärung, die wachsende Anzahl neuer Weltraumnationen mit ihrem verbesserten technischen Wissen, sowie die sich häufenden umweltrelevanten Ereignisse und das sensibilisierte Verständnis für globale Zusammenhänge im Ökosystem Erde bei der Bevölkerung brachten Bewegung in den Markt digitaler Satellitendaten. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die für die vorliegende Arbeit relevanten optischen Systeme. Die Inder lancierten 1988, 1991 und 1995 ihre IRS-1A, -1B, -1C (ref. Glossar) Satelliten. Mangels Bodenempfangsstationen und fehlendem Taperecoder auf dem Satelliten sind leider vorwiegend nur Daten über dem asiatischen Raum und via EOSAT über Amerika erhältlich. Japan startete 1987 und 1990 die MOS-1a, -1b (ref. Glossar) Satelliten, sowie 1992 den JERS-1. Die Erhältlichkeit von japanischen Daten des europäischen Kontinentes ist besser als bei den IRS-1A, -1B, -1C Daten, da die ESA eine Empfangsstation betreibt.

2 - 4.1.4 Russische Kamerasysteme

Finanzielle Probleme zwangen das neue Russland, hochauflösende Daten ihrer photographischen Sensoren KFA-1000, KFA-3000 und KWR 1000 (ref. Glossar) im Westen zu vermarkten. Die zeitlich limitierte Einsatzdauer stufen diese Systeme in langfristiger Hinsicht in den nicht-operationellen Bereich für Landnutzungsüberwachungen ein. Für kartographische Zwecke sind sie aber dank Stereoauswertung sehr gut geeignet. Die Auflösungen im Bereich von wenigen Metern rüttelten die Westnationen auf und bewirkten, dass die strategischen Auflösungslimiten für kommerzielle Systeme ins Wanken kamen. Eine Reihe privater Firmen, vorallem der USA arbeiten an hochauflösenden Minisatelliten (Lockhead-Martin, 1m panchromatisch, 4m multispektral mit 4 Kanälen;

Ball Aerospace, 1m pan und 6m multispektral mit 4 Kanälen etc.) [Konecny G., 1995, p. 10]. [Tab - 6] gibt einen Überblick der operationellen, multispektralen Satellitensysteme, welche für eine Waldflächenklassifikation in Frage kommen.

Satellit	SPOT-1/2	Landsat-5	IRS-1A/1B/1C	MOS-1B	JERS-1	KWR 1000
Eigentümer / Betreiber	Frankreich / CNES	USA / NOAA	Indien / ISRO	Japan / NASDA	Japan / NASDA	GUS / RSA
Start	(1) 1986 (2) 1990 (3) 1993	1984	(1) 1988 (2) 1991 (3) 1995	1990	1992	1993
Orbit	quasi-polar sonnensyn- chron	quasi-polar sonnensyn- chron	quasi-polar sonnensyn- chron	quasi-polar sonnensyn- chron	quasi-polar sonnensyn- chron	Resurs Satellit
Flughöhe	830 km	705 km	904km (817km 1C)	909km	568km	200-350km
Inklination Orbit	98,77°	98,2°	99,5° (98,7° 1C)	99,1°	97,7°	60°
Umlaufzeit	101 Min	99 Min	103 Min (101 Min 1C)	103 Min	96 Min	-
Repetitionsrate	26 Tage	16 Tage	22-24 Tage	17 Tage	44 Tage	
Äquatorüberflugszeit (LST)	10:30	09:30	10:26	10:33	10:30 - 1130	-
Stereo	HRV	-	IRS-1C (PAN)	-	Band 3 & 4	
Inklination Sensor	± 27° seitlich	0°	±26° (PAN) seitlich	0°	15° vorwärts	
Instrumente abbildend, optisch (Auswahl)	2 HRV multispektral (XS) und panchromatisch (Pan)	MSS, TM	Liss I Liss II Liss III (1C) PAN (1C)	2 MESSR	OPS	KWR 1000 panoramische Kamera, 40cm * 40cm
Auflösung in Bodenpixel	XS: 20m Pan: 10m	MSS: 79m TM: 30m (120m TIR)	I: 72,5m II: 36,24m III: 23,5m III Pan: 10m	50m	18,3m x 24,2m	1,5-5m: DD5 (0,75m original)
Streifenbreite (Szenentiefe)	60 km, 2 HRV parallel: 117km	185 km (179 km)	I: 148,48 km II: 146,98 km III: 142km III Pan: 70,5km	100km (parallel 200km)	75km	120km
Kosten pro Szene	XS: 2100\$ Pan: 2650\$	MSS: 1000\$ TM: 4400\$	LISS I: 2500\$ LISS II: 3700\$	MESSR: 350\$ (275 ECU)	OPS: 1200\$ (950 ECU)	1150\$
Kosten pro km²	XS: 0,58\$ Pan: 0,74\$	MSS: 0,03\$ TM: 0,14\$	LISS I: 0,12\$ LISS II: 0,17\$	MESSR: 0,04\$	OPS: 0,21\$	DD5: 0,08\$

Satellit	SPOT-1/2	Landsat-5	IRS-1A/1B/1C	MOS-1B	JERS-1	KWR 1000
Kanäle (in μm)	XS: (1) 0,50-0,59 (2) 0,61-0,68 (3) 0,79-0,89 Pan: (1) 0,51-0,73	MSS: (1) 0,5-0,6 (2) 0,6-0,7 (3) 0,7-0,8 (4) 0,8-1,1 TM: (1) 0,45-0,52 (2) 0,52-0,60 (3) 0,63-0,69 (4) 0,76-0,90 (5) 1,55-1,75 (6) 10,4-12,5 (7) 2,08-2,35	LISS I & II (1) 0,46-0,52 (2) 0,52-0,59 (3) 0,62-0,68 (4) 0,77-0,86 LISS III (1) 0,52-0,59 (2) 0,62-0,68 (3) 0,77-0,86 (4) 1,55-1,75 PAN (1) 0,5-0,90	MESSR (1) 0,51-0,59 (2) 0,61-0,69 (3) 0,73-0,80 (4) 0,80-1,10	OPS (1) 0,52-0,60 (2) 0,63-0,69 (3) 0,76-0,86 (4) 0,76-0,86 (5) 1,60-1,70 (6) 2,01-2,12 (7) 2,13-2,15 (8) 2,27-2,40	Falschfar- benfilm Panchromat- film digitalisiert als DD5 Produkt mit 1,5m Pixel Auflösung

*Tabelle 6: Kenndaten einiger hochauflösender, multispektraler Erderkundungssatelliten welche für digitale Waldflächenklassifikationen in Frage kommen
Quelle: nach [CEOS, 1994], [Kramer J., 1994] und [Konecny G., 1995]*

2 - 4.2 Kriterien für die Wahl von Satellitendaten für die Waldklassifikation

Die Erfassung des Waldes in der Schweiz und im erweiterten Blickfeld in Mitteleuropa mittels digitaler Satellitendaten stellt viele Anforderungen an das verwendete Aufnahmesystem. In den folgenden Kapiteln sollen einige der Faktoren analysiert werden, die schliesslich zur Wahl der verwendeten Daten geführt haben.

Folgende objektbedingte (Wald) Faktoren haben einen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften von forstwirtschaftlichen Beständen und damit auf die Erkennbarkeit in Satellitendaten ([Hoffmann H., et al., 1989 (a)], [Hoffmann H., et al., 1989 (b)], [Kadro A., 1981], [Kirchhof W., 1990], [Rock B.N., et al., 1986]):

- Artenzusammensetzung
- Phänologie (Belaubung, Blüten etc.)
- Alter und Baumhöhe
- Form, Stellung und Ausrichtung der Nadeln und der Blätter
- Oberflächenrauigkeit
- Dichte und Schlussgrad des Waldes
- Anteil des sichtbaren Astwerks und/oder des Untergrundes
- Bodenfarbe (soweit sichtbar) und Feuchtigkeit

- Vitalitätszustand und Schädigungsgrad (anthropogen oder natürlich bedingt).

2 - 4.2.1 Räumliche Auflösung

Die einleitenden Zielsetzungen sehen eine Erfassung der Waldfläche im 100m-Raster vor. Die verwendeten Satellitendaten müssen demzufolge eine räumliche Auflösung vorweisen, die mindestens gleich gut wenn nicht besser ist. Unter räumlicher Auflösung (auch geometrischer Auflösung) versteht man den kleinsten Abstand zweier Punkte, die getrennt wahrgenommen oder wiedergegeben werden können. Sie wird vor allem durch die Parameter der Aufnahmesysteme IFOV (ref. Glossar), die Wellenlänge der detektierten Strahlung und die Flughöhe bestimmt. Zusätzlich muss analysiert werden, wie gross die zu detektierenden Waldflächen sind und ob sich in den Satellitendaten das diskriminierende, physikalische Merkmal für den Wald (Reflexionseigenschaft der Nadel und Blätter) in der entsprechenden Auflösung dominant verhält [3 - 2]. Die auf NOAA/AVHRR Daten basierende europäische Waldkarte [ESA, 1993] zeigte deutlich, dass mit einer geometrischen Auflösung von 1km kein genaues Resultat erreicht werden konnte. Nach den bisherigen Erfahrungen kommen in Europa nur Daten von SPOT und Landsat für die vorliegende Aufgabenstellung in Frage.

2 - 4.2.2 Spektrale Auflösung

Unter Spektraler Auflösung versteht man allgemein das Vermögen eines Systems, einzelne Wellenlängenbereiche (Kanäle) zu trennen (nicht zu verwechseln mit der radiometrischen Auflösung, der Kapazität der Detektoren, eine Anzahl von Messwerten zu unterscheiden). Das spektrale Auflösungsvermögen des verwendeten Aufnahmesystems muss die speziellen Charakteristika unseres Untersuchungsobjektes Wald erfassen können. Daher ist eine vertiefte Kenntnis des Reflexionsverhaltens von Wald wichtig.

2 - 4.2.2.1 Spektrales Reflexionsverhalten des Waldes

Das Reflexionsverhalten eines Blattes oder einer Nadel ist geprägt durch die innere Zellstruktur und

den Anteil von Chlorophyll und weiteren Pigmenten. Im visuellen Bereich der elektromagnetischen Strahlung ($0,4\mu\text{m}$ bis $0,7\mu\text{m}$) wird der grösste Teil der Strahlung durch Blattpigmente in der obersten Blattrespektive Nadelschicht absorbiert. Reflexion und Transmission sind eher schwach. Im nahen Infrarot ($0,7\mu\text{m}$ bis $1,3\mu\text{m}$) reflektiert die grüne Vegetation in direkter Abhängigkeit der Art und der Pflanzenschichten sehr stark. Die Reflexion wird primär durch die Zellstruktur, den Untergrund und den Wassergehalt beeinflusst. Im kurzwelligen Infrarot ($1,3\mu\text{m}$ bis $4\mu\text{m}$) zeigt der Reflexionsgrad den Wassergehalt, die Zellstruktur und soweit ersichtlich, die Eigenschaft des Untergrundes [Kirchhof W., 1990, p. 10].

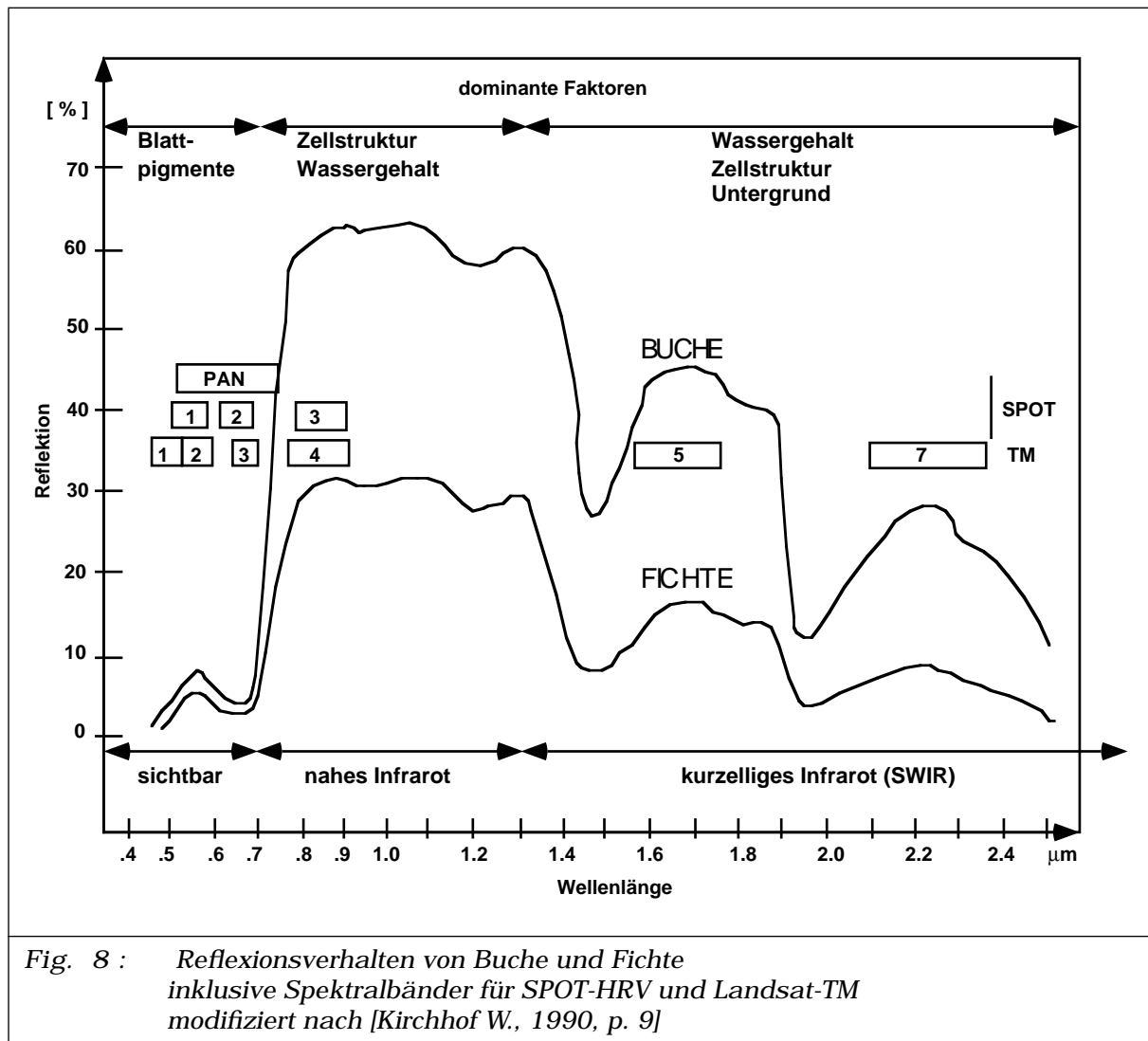


Fig. 8 : Reflexionsverhalten von Buche und Fichte inklusive Spektralbänder für SPOT-HRV und Landsat-TM modifiziert nach [Kirchhof W., 1990, p. 9]

Aus [Fig - 8] ist der markante Reflexionsanstieg von Wald im Übergang vom visuellen Bereich des Spektrums in den nahen Infrarotbereich ersichtlich. Dieser Anstieg ist für die ganze vitale Vegetation charakteristisch. Ein gewähltes System sollte demnach mindestens je ein Band beidseits des Anstieges vorweisen. Wenn möglich sollten die sichtbaren Kanäle gegen den längerwelligeren Rotbereich zu liegen kommen, damit die atmosphärische Beeinflussung geringer ausfällt. Sowohl SPOT-XS wie auch Landsat-TM erfüllen diese Bedingungen. Das deutlich stärkere Reflexionsvermögen von Laubwald gegenüber Nadelwald im nahen Infrarot wird primär bei der Erkennung von Waldbeständen zur Auswertung benutzt und spielt bei der Waldflächenerfassung eine untergeordnete Rolle.

2 - 4.2.2.2 Saisonale Schwankungen

Saisonale Schwankungen im Reflexionsverhalten und -vermögen der Blätter und Nadeln spielen eine grosse Rolle für den idealen Aufnahmezeitpunkt. Dass Laubbäume im Winter ihr Laub in unseren Breitengraden verlieren, kann für eine Bestandeskartierung genutzt werden, indem man eine Sommerszene und eine Winterszene des gleichen Aufnahmesystems gegeneinander auswertet. Ebenso kann die sommergrüne Lärche besser identifiziert werden. Grosse Probleme bietet hier aber die schlechte Beleuchtungssituation im Winter. Der flache Sonnenstand verursacht grosse Schattengebiete, welche im optischen Bereich des Spektrums nicht auswertbar sind. Die zumeist schlechteren Winter-Wetterlagen verunmöglichen oft auch eine wolkenfreie Aquirierung von Daten. Da hier nur die Waldfläche erfasst werden soll, muss ein Zeitpunkt gewählt werden, bei welchem das Blattwerk voll entwickelt ist.

Die Reflexionseigenschaften der Pflanzen verändern sich mit ihrer Entwicklung über die Vegetationsperiode. Ursache ist die sich verändernde Pigmentierung, die Zellstruktur und der Wassergehalt. Untersuchungen von [Hildebrandt G., 1976] haben gezeigt, dass die spektrale Signatur von Buche und Fichte im Zeitraum von Mitte Juni bis Ende August in Mittel- und Süddeutschland als stabil betrachtet werden kann. Deshalb wurde das in Frage kommende

Zeitfenster für die in dieser Arbeit verwendeten Daten in den gleichen Zeitraum gelegt (siehe auch [3 - 1.2.3]).

2 - 4.2.2.3 Reflexion in Abhängigkeit der Auflösung

Die Messung von Reflexionseigenschaften im Labor und/oder im Felde sind eine wichtige Grundlage für die Auswertung von Spektraldaten. Diese Messungen betreffen oftmals die Pflanze als Einheit oder nur einzelne Teile davon, wie Blätter, Astwerk etc. Mit den in der abbildenden, optischen Fernerkundung verwendeten Sensoren werden aber die Oberflächen von Aggregaten wie 'Wald' erfasst. Neben den Einzelblättern beeinflussen auch Astwerk, Untergrund, Form und damit Schattenwurf die spektrale Signatur. Gemessen werden Mischsignaturen, mit der Hoffnung, dass ein physikalischer und gewünschter Parameter sich aus dem Reflexionsgemisch als dominant erweist (siehe auch [3 - 1.2.4]). Im folgenden seien nur zwei Elemente angesprochen.

Die Kronendachstruktur beeinflusst u.a. das Spektralverhalten des Objektes Wald stark. Nadelbäume, mit ihrer ausgeprägten Vertikalgliederung, werfen mehr Schatten auf sich selbst als Laubbäume. Der Reflexionsfaktor von Nadelwald wird gesenkt [Kadro A., 1981, pp. 41]. und ist mit ein Grund für die spektrale Charakteristik wie in [Fig - 8, Seite 73].

Ist der Kronenschluss eines Waldes nicht vollkommen, so wird die Signatur vom Untergrund überlagert. Art des Untergrundes, Oberflächenrauigkeit, Relief, Mineralzusammensetzung, Feuchtigkeit und der Anteil an Schwermetallen sind die wichtigsten Faktoren, welche das Reflexionsverhalten beeinflussen (Collins, 1983 in [Kirchhof W., 1990, p. 12].

Erst die Analyse einiger Satellitendaten wird zeigen, inwieweit welches System eine bessere Leistungsfähigkeit zur Diskriminierung der Waldflächen aufweist.

2 - 4.2.3 Zeitliche Auflösung, Verfügbarkeit

Für diese Arbeit ist das in Frage kommende Zeitfenster (Mitte Juni bis Ende August) aus den Ausführungen in [2 - 4.2.2.2] gegeben. Es musste daher für diese Untersuchungen nur noch ein Jahr gefunden werden, in dem zum fraglichen Zeitpunkt, möglichst

zeitgleich von SPOT und Landsat je eine Szene registriert wurden. Die Szenen sollten natürlich möglichst frei von atmosphärischen Einflüssen und systembedingten Störungen sein. Des Weiteren soll der Untersuchungsausschnitt zentral von den Szenen abgedeckt werden, um die panoramischen Einflüsse gering zu halten. Bei SPOT ist aus analogen Gründen speziell darauf zu achten, dass der Blickwinkel des Instrumentes nicht zu stark von der vertikalen abweicht. Die Übereinstimmung der Erhebung der Referenzdaten, wie Waldmaske, mit dem Aufnahmezeitpunkt ist aus Datenkonsistenzgründen anzustreben.

2 - 4.3 Verwendete Satellitendaten

2 - 4.3.1 SPOT-HRV

Im Frühjahr 1991 wurde bei der Firma [SPOT]-Image ein Auftrag zur Aufnahme des Gebietes Zugersee-Rigi-Beckenried gegeben [Ehrler C., 1993, pp. 18]. Die Rahmenbedingungen umfassten folgende Punkte:

- Aufnahmezeitraum in den Monaten Juni bis Juli
- Gleichzeitige Aufnahme (Parallelmodus) der beiden HRV-Instrumente im multispektralen XS-Modus und Pan-Modus (ref. Glossar)
- Der Blickwinkel darf 7° beidseits aus räumlichen Auflösungsgründen nicht überschreiten.

Am 30. Juni konnte SPOT-Image eine beinahe wolkenfreie Szene der simultan eingesetzten HRV Instrumente im XS und Pan-Modus aufnehmen.

Der Aufnahme war eine lange Regenperiode vorausgegangen. Der 30. Juni 1991 war der erste sonnige Tag. Im Untersuchungsgebiet sind zum Aufnahmezeitpunkt keine Cumuluswolken aufgetreten, welche die Qualität der Aufnahme beeinträchtigen könnten. Dafür verläuft ein Kondensstreifen im zentralen Bereich von Ost nach West. In [Fig - 9] ist dies durch eine Aufhellung über dem Urnersee zu sehen. Wie die weitere Arbeit zeigen wird, handelt es sich hier um ein Problemgebiet für die Klassifikation. Weitere Angaben zu den SPOT-Daten sind aus [Tab - 7, Seite 79] ersichtlich.

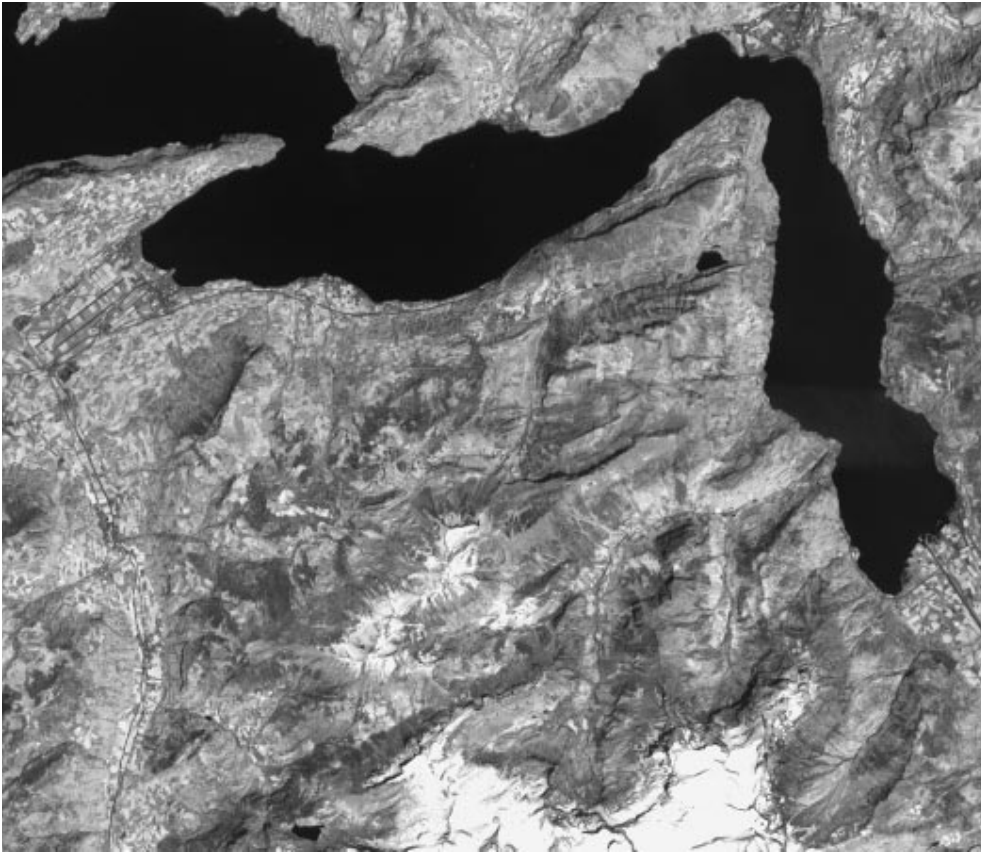


Fig. 9 : Ausschnitt SPOT-XS Rohdaten (Kanal3)

2 - 4.3.2 Landsat-TM

Der Landsat-TM Sensor ist leider nicht programmierbar und schwenkbar wie SPOT. Es waren darum die festen Zeitintervalle abzuwarten und anhand der Quicklooks der Daten über den Erwerb einer Szene zu entscheiden. Glücklicherweise folgte auf das Aufnahmedatum von SPOT eine längere Schönwetterperiode. 11 Tage später gelang eine Landsat-TM Aufnahme von ansprechender Qualität. Die Daten sind in den Tälern, vorab im Engelbergertal mit leichtem Dunst beeinflusst. Auf den Kämmen von Bauen, Schwalmis und Brisen (siehe [Fig - 1, Seite 46]) fällt die starke Bewölkung (Cumuli) auf, die grosse Schatten wirft. Diese Gebiete werden für eine Waldklassifikation unbrauchbar sein. Trotzdem und auch mangels Auswahl wurde diese Szene verwendet.



Fig. 10 : Ausschnitt Landsat-TM Rohdaten (Kanal3)

Die Tabelle [Tab - 7] gibt einen Überblick der technischen Spezifikationen der verwendeten Satellitendaten.

	SPOT-Pan	SPOT-XS	Landsat-TM
Aufnahmedatum	30. Juni 1991		11. Juli 1991
Aufnahmezeit	10:31		09:40
Referenznummer	054/255 SPOT-GRID		195/27 TM-GRID
Szenenzentrum	47°02'22" Nord 8°34'14" Ost		47°27'00" Nord 7°55'48" Ost
Blickwinkel	4° West	4,3° West	- (0°)
Neigungswinkel zur Flächennormalen	4,6°	5°	
Datenkomprimierung	DPCM	keine	keine

	SPOT-Pan	SPOT-XS	Landsat-TM
Systemkorrekturen	1B (23.8.1991)		05 (30.9.1991)
angewandte Resamplingmethode	cubic convolution		nearest neighbour
Sonnenzenithwinkel für SPOT Pan Zentrum:	26,5°		33,2°
Sonnenazimuthwinkel für SPOT Pan Zentrum:	148,8°		128,4°
Plattform	SPOT - 2		Landsat 5
Sensor	HRV 2	HRV 1	TM
Flughöhe	831,488 km		710,026 km
lokaler Erdradius	6366,68 km		
Nadirlinie Offset & Gain (Rohbildkoordinaten)	9119,047 -0,0473	4775,046 -0,0460	3323 -0.0468
Signalverstärkung	High Gain 7	Standard Gain (6,7,5)	-
absolute Kalibrationskoeffizienten	1,65076	Kanal1: 1,05208 Kanal2: 1,16608 Kanal3: 1,28655	(gelieferte Koeffizienten mangelhaft)

Tabelle 7: *Aufnahmeparameter der verwendeten Satellitendaten*

2 - 5 LUFTBILDDATEN

Zur Herstellung der topographischen Landeskarten der Schweizerischen Landestopographie L+T wurde bis anhin im 6-Jahre Rhythmus die ganze Fläche der Schweiz mit Luftbildern im Massstab von ca. 1:25'000 abgedeckt. Dabei wurden Luftbildkammern vom Typ RC-10 und RC-20 (ref. Glossar) mit Schwarzweissfilmen eingesetzt. Für diese Arbeit standen mir 15 Luftbilder vom 30.7.1981 zur Verfügung. Sie decken einen grossen Teil des Untersuchungsgebietes ab. Aufgenommen wurden sie um die Mittagszeit mit einer Brennweite von 153.02mm aus einer mittleren Höhe von 5100 m.ü.Grund. Der berechnete Bildmasstab auf Seehöhe (Vierwaldstättersee 434m.ü.M) liegt bei ca. 1:30'000.

Diese Luftbilder dienten primär zur optischen Überprüfung beim Setzen von Passpunkten für die Geokodierung und zur Orientierung beim analogen Interpretieren von Satellitendaten. Sie sind des weiteren hilfreich bei der Analyse von Klassifikationsresultaten, insbesondere von Klassifikationsfehlern.

2 - 6 HARD- UND SOFTWARE

Die ersten Schritte zu dieser Arbeit wurden auf dem interaktiven Bildverarbeitungssystem DIPS (ref. Glossar) der kanadischen Firma DIPIX ausgeführt. Das DIPS ist auf einer VAX8200 unter VMS 5.4 installiert. Die dedizierte Hardware, welche ein beträchtliches Alter vorweist, zeigte sich aber im Verlaufe der Zeit immer instabiler und kaum mehr operationell. Bis zur Beschaffung eines neuen Systems konnte aber nicht mehr zugewartet werden. In Anbetracht der Operationalisierbarkeit der zu entwickelnden Methode und der Verfügbarkeit der Programme für ein breites Anwenderpublikum wurde auf das '*Public Domain*' Program NIH-Image (ref. Glossar), lauffähig auf Apple MacIntosh zurückgegriffen. Dieses Programmpaket wurde zu Beginn primär für die Bild-Verarbeitung von Medizinaldaten aus dem Bereich der Mikroskopie entwickelt. Als frei erhältliches Programm, inklusive seines Quellcodes in Pascal, wuchs die Leistungsfähigkeit mit dem Einsatz vieler Benutzer. Neben den Basisoperationen für 8bit Bilddaten können eigene Anwendungen mittels eines Makro-'*Interfaces*', basierend auf einer 'Pseudo-Pascal' Sprache, frei programmiert werden.

Die bestehenden, relevanten Anwender-Programme aus dem DIPS wurden deshalb neu in NIH-Image programmiert. Neue Entwicklungen sind direkt auf NIH-Image implementiert worden. Die Leistungsfähigkeit der verwendeten Power-MacIntosh 7100/8100 Workstations reicht für die Bearbeitung der Testgebiete bei weitem aus. Auf Anfrage sind die programmierten Makros beim Autor erhältlich.

Gegen Ende der Arbeit wurde an unserem Institut die interaktive Bildverarbeitungssoftware EASI /PACE der Firma (ref. Glossar) beschafft. Sie ist sowohl auf einem Sun Sparc20 Server, sowie diversen Power MacIntosh Workstations installiert. Neuentwickelte

Anwendungen in NIH-Image wurden portiert, so dass heute die PCI Umgebung den vollen Funktionalitätsumfang bei einer enorm gesteigerten Rechenleistung besitzt.

Graphik und Textverarbeitung wurden mit den Programmen Photoshop und FrameMaker auf MacIntosh durchgeführt.

KAPITEL 3 Vorverarbeitung I: Grundlagen, Bodenreferenz

3 - 1 EINLEITUNG

Bei der Prozessierung von Erderkundungs-Satellitendaten oder allgemein Fernerkundungsdaten, vergessen oder verdrängen Anwender oftmals den Ursprung ihrer Daten. Sie werden oft ohne Rücksicht auf ihre physikalische Basis verarbeitet, unlogisch verknüpft und ausgewertet. Es ist deshalb von grosser Wichtigkeit, sich der grundlegenden Elemente und Basistheorie der Fernerkundung bewusst zu werden. Die Grundlagen der Fernerkundung sind physikalische Gesetze. Diese Erkenntnis spiegelt sich auch in den Definitionen der Fernerkundung wieder:

3 - 1.1 Definition der Fernerkundung

In erster Linie versteht man unter Fernerkundung die *“... Gewinnung von Informationen über Art und Eigenschaften entfernter Objekte”* [Kraus K., et al., 1988, p.7]. Die Art von Objekten ist gegeben durch ihr physikalisches Verhalten und deren Klassifizierung im Rahmen unserer eigenen Modellvorstellung der Realität. Die Eigenschaften können einerseits vom rein physikalischen Aspekt, andererseits durch die

Interaktion des Objektes in einem Gesamtrahmen, wie ein Ökosystem, ein chemisches, physikalisches Gefüge, etc. gegeben sein. Diese Aussage stützt sich natürlich nur auf die physikalischen Grundaxiome ab, welche in den exakten Naturwissenschaften angewandt werden. So sind zum Beispiel soziale Interaktionen und Eigenschaften von Objekten mit dem physikalischen Instrumentarium der Fernerkundung nur deduktiv erfassbar. Die Definition der Fernerkundung kann daher auf folgende Leitsätze beschränkt werden.

- Die Fernerkundung befasst sich mit der Messung und Speicherung von elektromagnetischer Strahlung von Objekten an der Erdoberfläche und in erweitertem Sinne auch mit der Erfassung akustischer, geomagnetischer und gravimetrischer Messdaten, ohne dass sich Messobjekt und Messgerät in direktem Kontakt befinden.

- Die Fernerkundung schliesst des weiteren auch die Verarbeitung der Messungen zu wissenschaftlicher Information ein. Die Datenregistrierung erfolgt im wesentlichen mittels Kameras, Scannern, Radiometern, Radarsystemen und geophysikalischen Sonden. Als Plattformen dienen Ballone, Flugzeuge, Raumfahrzeuge und Satelliten. Die Verarbeitung und Interpretation der Daten kann analog oder digital vorgenommen werden.

Das Fehlen eines direkten Kontaktes von Messobjekt und Messgerät muss etwas relativiert werden. Beim Erfassen der Erdoberfläche werden in der Fernerkundung wohl immer räumliche Distanzen zur Erdoberfläche eingehalten (Satelliten, Flugzeuge). Die dazwischenliegende Atmosphäre hingegen reicht oftmals bis zum Sensor und beeinflusst daher je nach Messart das originale Signal des Objektes an der Erdoberfläche. Im Falle einer Messung atmosphärischer Eigenschaften geht die Distanz zum Objekt verloren.

3 - 1.2 Fernerkundung im optischen Bereich, deduktiver Ansatz

In der vorliegenden Arbeit werden Daten von optischen Sensoren verarbeitet. Konkret wird die Energie elektromagnetischer Strahlung im Bereich von $0,3\mu\text{m}$ bis 1mm Wellenlänge gemessen. Da es sich dabei um Messungen physikalischer Einheiten handelt, sind die

Werte objektiv und eineindeutig. Eine Energieeinheit ist per Modellvorgabe gegeben. Verschiedene Energiemengen sind relativ zueinander differenzierbar und in eine Ordnung zu bringen. Die gemessene Energiemenge lässt aber nicht direkt auf deren Ursache, Entstehung und Beeinflussung schliessen. An sich ist sie vorerst ohne jegliche Qualität. Erst dank dem Wissen über das Energiesystem als Ganzes, dessen Herkunft (Ort, Menge und Form), dessen Weg zum und vom zu detektierenden Objekt, dessen Interaktion mit dem Objekt kann die gemessene Energie implizit eine qualitative Komponente tragen. Diese qualitative Komponente kommt in vielen Fällen erst bei relativen Beobachtungen über die Zeit zum tragen.

Nach [Curran P., 1994, p.1] ist die mit Fernerkundungsmethoden erfasste Strahlung (R) in erster Annäherung eine Funktion f des Ortes (x), der Zeit (t), der Wellenlänge (λ) und der Beobachtungsgeometrie (ϕ):

$$R = f(x, t, \lambda, \phi) \quad (1)$$

Abgesehen vom Faktor Zeit (t) können qualitative und quantitative Informationen aus Fernerkundungsdaten nur bei signifikanten Veränderungen der Parameter x, λ und ϕ extrahiert werden. In den folgenden Kapiteln soll daher auf diese Parameter eingegangen werden. Insbesondere wird dem Aspekt des Ortes x vertieft Rechnung getragen.

3 - 1.2.1 Wellenlänge

Die Wellenlänge λ lässt Rückschlüsse auf physikalische und chemische Materialeigenschaften zu. Die Reflexion, Transmission, Emission, Absorption und Streuung elektromagnetischer Strahlung an und von Objekten steht in direktem Zusammenhang mit der Wellenlänge. Doch oftmals können diese Effekte nicht detektiert werden, da sie entweder zu schwach oder auf sehr enge Wellenlängenbereiche beschränkt sind, die mit konventionellen Breitbandsensoren wie Landsat-TM oder SPOT nicht erfassbar sind. Bessere Möglichkeiten bieten hyperspektrale Schmalbandsensoren wie AVIRIS, AIS oder DAIS (ref. Glossar). Das Problem liegt hier aber oftmals in der geringen Energiemenge (und damit einem ungünstigen Signal-zu-

Rausch Verhältnis) die über einer Objektfläche detektiert werden kann.

Ein weitere Problematik öffnet sich mit den Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Atmosphäre die ihrerseits abhängig von der Wellenlänge sind. So sind nur gewisse Bereiche für die Strahlung transparent und damit nicht alle speziellen Objektinteraktionen in Relation zur Wellenlänge detektierbar. Die Trennung der detektierten Strahlung in objekt- und/oder umgebungsspezifische Komponenten stellt einen weiteren, eigenständigen Forschungszweig innerhalb der ganzen Fernerkundung dar und wird der Datenvorverarbeitung zugewiesen.

3 - 1.2.2 Beobachtungsgeometrie

Reflexionseigenschaften von Objekten sind zum Teil extrem von der Beobachtungsgeometrie ϕ abhängig. In vereinfachten Interpretationen von Fernerkundungsdaten wird zumeist ein lambertianes Rückstreuverhalten von Objekten vorausgesetzt. Dies bedeutet, dass die elektromagnetische Strahlung von einem Objekt in alle Richtungen und gleich stark reflektiert (oder emittiert) wird, unabhängig von der Beleuchtungsrichtung. Lambertiane Strahler in diesem Sinne gibt es natürlicherweise nicht. Heutige Forschungen versuchen das reale Rückstreuverhalten von Objekten zu erfassen und mittels einer Modellierung der BRDF ('bidirectional reflection distribution function', ref. Glossar) in den Interpretationsprozess von Fernerkundungsdaten einfließen zu lassen [Sandmeier St., et al., 1995].

In der vorliegenden Arbeit wird eine lambertiane Annahme vorausgesetzt. Ausschlaggebend ist der noch frühe Stand der Forschung auf dem Gebiet der BRDF. Von den zu detektierenden Objekten der Bodenbedeckung (Wald, Wasser u.a.) sind kaum BRDF Modelle vorhanden, geschweige denn Methoden zur Einbindung in den Detektionsprozess. Sicherlich wird eine Weiterführung dieser Arbeit sich mit diesen Aspekten befassen müssen.

Nicht nur die eben erwähnte geometrische Lage des Objektes relativ zum Sensor sondern auch relativ zur Beleuchtungsquelle findet ihren Niederschlag im detektierten Signal. Im Bereich der optischen Ferner-

kundung nützen wir die Sonne als Beleuchtungsquelle aus. Dies im Gegensatz zu aktiven Radarsystemen, die ihre eigene 'Beleuchtung' in Form eines Mikrowellensenders haben. Die Sonne wird vereinfacht in einer unendlichen Entfernung angenommen. Durch diese Annahme treffen die elektromagnetischen Wellen parallel beim Objekt auf. Der Anteil der empfangenen (und damit auch reflektierten) Energie pro Objekt ist dabei abhängig von dessen Ausrichtung und Neigung gegenüber der Sonne.

3 - 1.2.3 Beobachtungszeitpunkt

Der Beobachtungszeitpunkt t von Objekten der Erdoberfläche ist einer der wichtigsten Parameter in der Detektion. Wir kennen von natürlichen Objekten der Erdoberfläche nicht nur tägliche und saisonale Schwankungen des Verhaltens, sondern auch extrem kurzfristige wie auch sehr langfristige Veränderungen. Für momentane Bestandaufnahmen muss daher der geeignete Zeitpunkt definiert werden. Die Detektion von beispielsweise Waldflächen, wie sie in dieser Arbeit aufgezeigt wird, muss auf die Phänologie des Waldes, den Sonnenstand, die momentanen atmosphärischen Bedingungen und viele weitere Punkte Rücksicht nehmen. Wird die Detektion einzelner langfristiger Phänomene mittels mehrerer Zeitschnitte angestrebt, so ist, abgesehen von den oben erwähnten Faktoren, der Reproduzierbarkeit der Erhebungsdaten grosses Augenmerk zu schenken. Im speziellen sind Störfaktoren, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem Objekt stehen, aus den Messreihen zu entfernen. Dies können zum Beispiel atmosphärische Einflüsse, Objektwandlungen (Waldfläche zu Kahlschlag) und ähnliche Phänomene sein. Sehr kurzfristige Änderungen, wie zum Beispiel Laubblätter, die sich unter Windeinfluss wenden, lassen ein Objekt (Wald) manchmal sehr unterschiedlich erscheinen. Diese Problematik steht in Zusammenhang mit der eigentlichen qualitativen Definition des zu detektierenden Objektes und auch dem Beobachtungsmassstab.

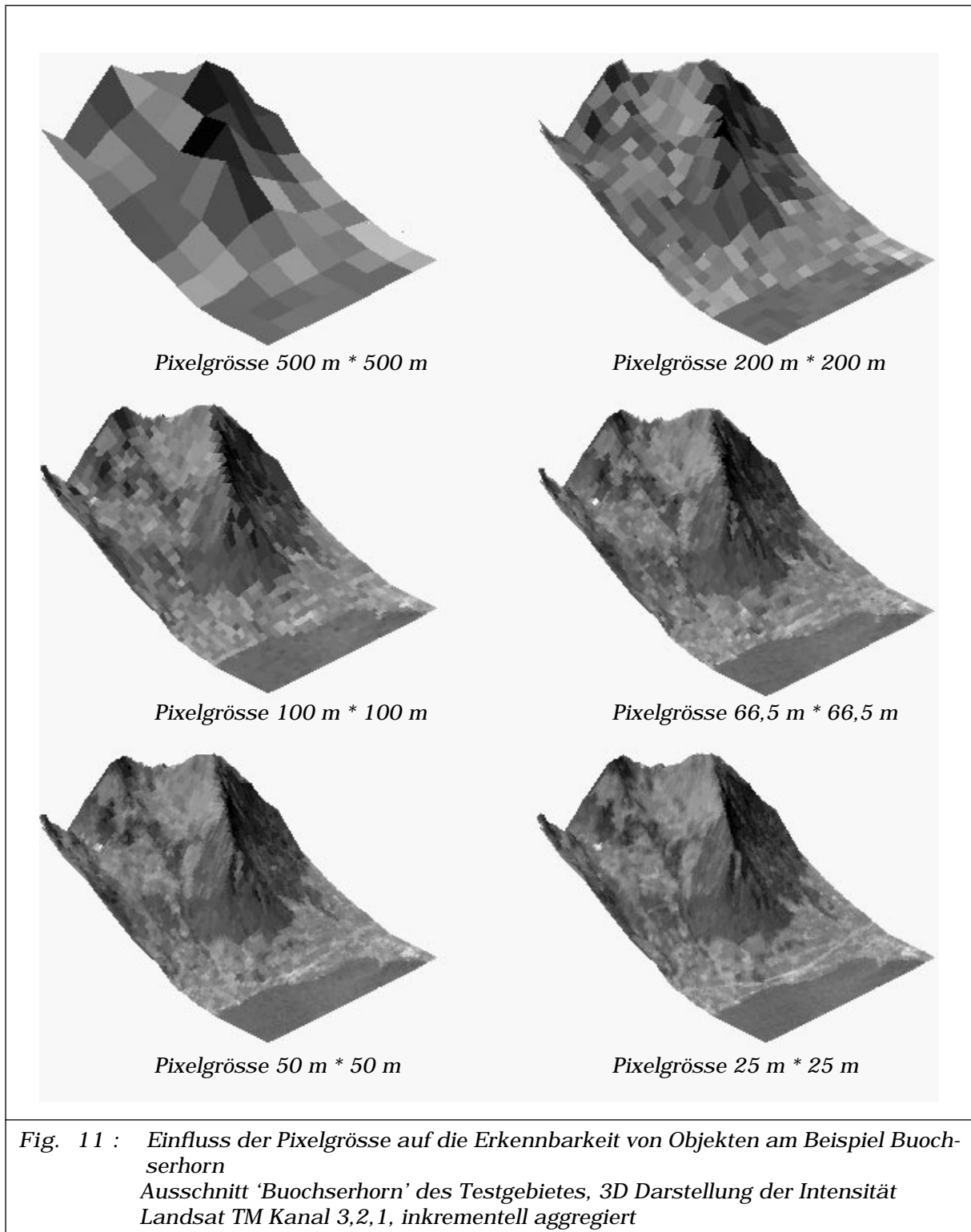
3 - 1.2.4 Ort

Die einfache Formel $R = f(x, t, \lambda, \phi)$ der mit Fernerkundungsmitteln erfassten Strahlung gilt in einer

ersten Annäherung nur für eine infinitesimal kleine Fläche der Erdoberfläche. Die Strahlungsinformation kann demnach nur eine Aussage über einen Punkt zulassen. Die Sensoren der optischen Fernerkundung messen aber ausnahmslos die gesamte von einer durch das GIFOV (ref. Glossar) definierten Fläche des beobachteten Objektes reflektierte (emittierte) Strahlung. Dieser Integrationswert ist für das Messobjekt repräsentativ, solange dieses in Bezug auf den Messparameter homogen ist. Genau dieser Homogenitätsanspruch wird bei klassischen Anwendungen oftmals strapaziert. Manchmal reicht es zur qualitativen Identifikation aus, wenn ein spezifisches, mikroskopisches Spektralverhalten eines Objektes im globalen, makroskopischen dominant erscheint. Beispielsweise sei hier das charakteristische Spektralverhalten von Blättern erwähnt das in der Integrationssignatur einer Waldfläche von 25*25 m durchzeichnet und eine Klassierung erlaubt. Will man aber das Objekt Wald in 2*2m grossen Flächen erfassen, so geht die Homogenität oft verloren und Astwerk oder Untergrund dominieren den Integrationswert. Homogenität ist demnach eine Funktion u.a. des Erfassungsmasstabes. Auf diesen Aspekt soll in Kapitel [3 - 2] vertieft eingegangen werden.

Die Abbildung [Fig - 11] illustriert den Einfluss der Pixelgrösse auf die Erkennbarkeit von Objekten. Dargestellt ist die Intensität der Landsat-TM Kanalkombination 3,2,1. Gezeigt wird das im Untersuchungsgebiet liegende Buochserhorn aus nordöstlicher Richtung. Bei einer Pixelgrösse von 500m * 500m kann man knapp die Wasserfläche von der Landfläche unterscheiden. Das Geländemodell in Punktrasterform bewirkt bei dieser Maschenweite ungewollte Artefakte. So werden beispielsweise Schattenhänge gegen die Sonne ausgerichtet. Verfeinert man die Rasterauflösung, so sind ab 100m * 100m Rasterweite die Waldflächen identifizierbar.

Die schwache spektrale Reflexion von Nadeln und Blättern in den verwendeten sichtbaren Kanälen dominieren das Erscheinungsbild bestockter Flächen. Siedlungsflächen und landwirtschaftliche Gebiete sind hingegen erst ab einer Auflösung von 50m * 50m differenzierbar. Einerseits ist dies in der Objektgrösse, andererseits durch die nicht so dominanten Reflexi-



onseigenschaften der Objekte begründet.

Nicht nur die Grösse des Ortes x sondern auch die relative Lage hat einen grossen Einfluss auf die Strah-

lung. Die von der Fernerkundung zu detektierenden Objekte befinden sich in einer natürlichen Umgebung die direkten Einfluss auf die Objekte ausübt. Darunter soll man nicht Erscheinungen wie zum Beispiel unterschiedliche Wuchsformen einer Pflanzenart in Abhängigkeit der Höhe verstehen. Dies ist eine Frage der Objektdefinition an sich. Vielmehr soll man darunter die Beeinflussung der Strahlung in Abhängigkeit der Beleuchtung oder der Atmosphäre verstehen. Eine Asphaltstrasse zeigt vor Ort ein ähnliches Reflexionsverhalten, gleich ob sie besonnt, beschattet, unter oder über einer Inversionsschicht liegt. Im Satellitenbild kann sich dann aber ein sehr inhomogenes Verhalten zeigen. Solche Effekte sind nicht objektbedingt. Es handelt sich hier alleine um eine Frage der radiometrischen Vorverarbeitung und Korrektur, solche Inhomogenitäten zu vermeiden.

3 - 2 RÄUMLICHE AUFLÖSUNG, MASSSTABSPROBLEME IN DER FERNERKUNDUNG

Eine der häufigsten Aufgaben der optischen Fernerkundung liegt in der qualitativen Identifikation von Objekten, der Klassifikation. Man versteht darunter die Auftrennung des Datenraumes in homogene Einheiten, wobei man die Homogenität auf einen oder mehrere Parameter beschränkt, die physikalischen und/oder kontextuellen Ursprungs sein können. Erst im Anschluss daran kann die quantitative Auswertungen erfolgen. Die Definitionen von Objekten können globalen Charakter (überflutetes Gebiet, Vegetation, Waldfläche, etc.) oder lokalen Charakter (Pflanzenart, Feuchtigkeitsgehalt, chemische Zusammensetzung von Gesteinen, etc.) haben. In allen Fällen stützt sich die Interpretation auf die oben erwähnten physikalischen Modelle ab, die einen Wert einem Set von n messbaren Inputparametern zuordnen. Der verwendete Input ist charakterisiert durch räumlich und/oder zeitlich verteilte Parameter, die mittels einem oder mehreren Instrumenten in globaler bis lokaler geometrischer Auflösung gemessen werden können. Üblicherweise sind dies in der Fernerkundung radiometrische Messungen in n Kanälen [Raffy M., 1994].

Die Berücksichtigung der Heterogenität von gemessenen Objekten ist eines der schwierigsten Probleme bei der Interpretation von Resultaten aus Fernerkundungsdaten. Sie ist gekoppelt mit dem Problem von Massstabsveränderungen und ihrer Gültigkeit innerhalb der verwendeten Daten und Modelle. In der Tat sind die zugrundeliegenden Modelle unter der Hypothese entwickelt worden, dass die Objekte sich in lokalem Masstab homogen verhalten. Ihre Verifikation erfolgt auf mikroskopischer Ebene. Trotzdem werden sie in globalen Massstäben ohne zu zögern verwendet mit der Behauptung, dass diese Resultate einem Mittelwert lokaler Messungen aller homogenen Regionen über das ganze Objekt entsprechen. Hier sei wiederum das Beispiel von Blattmessungen und Waldflächenbestimmung angeführt. Dabei ist der Massstabsfaktor zwischen dem Objekt Blatt und dem Objekt Wald im Bereich von 10^{10} . Selbst wenn wir die Modelle auf dem Massstabsniveau eines Blattes bezüglich des Reflexionsverhaltens validiert haben, müssen wir immer damit rechnen, dass sie für den Wald keine Gültigkeit besitzen. Oder wir müssen das Gegenteil beweisen. Dies erfolgt durch Quantifizierung des Fehlers der durch diese Extrapolation entsteht. Es sind Strategien zu entwickeln, die es uns erlauben, von Lokalem auf Globales zu schliessen [Raffy M., 1994 (b)].

3 - 2.1 Die Problematik der Skalierung

Skalierungsänderungen sind Probleme, die immer wieder in der Fernerkundung auftauchen. [Raffy M., 1994 (b)] unterteilt die Skalierung in 'backward' und 'forward zooming'. In einfachen Worten geht es um das Problem, eine grosse Menge von Informationen möglichst ohne Qualitätsverlust zusammenzufassen (Datenkomprimierung) und vice versa aus einer kleinen Datenmenge mehr Informationen herauszuziehen (Datenexpansion).

3 - 2.1.1 Datenexpansion ('forward zooming')

Die Problematik der Datenexpansion in der Fernerkundung liegt darin begründet, dass lokale Informationen, welche implizit in den Daten vorhanden sein können, aus grossmassstäbigen Satellitendaten her-

geleitet werden sollten. Es ist sicherlich nicht möglich, verschiedene Bodenbedeckungstypen innerhalb eines Bildelementes einer Spektralmessung zu quantifizieren, ohne ihre Verteilung zu kennen ('spectral unmixing'). Sobald wir aber über weitere Datenquellen mit objektrelevanter Information verfügen, kann der Fall auftreten, dass wir eine brauchbare Schätzung der Quantitäten (und auch Qualitäten) erhalten können.

Arbeiten von Leiss [Leiss I., 1995], [Leiss I., et al., 1995], [Leiss I., et al., 1995 (b)] haben beispielsweise gezeigt, dass es in einer Landnutzungsklassifikation im Gebiet Neuenburgersee mit Landsat-TM und SPOT-Daten kaum möglich ist, Rebanlagen vom übrigen Landwirtschaftsgebiet zu unterscheiden. Eine Möglichkeit wäre sicherlich die Verwendung geometrisch und/oder radiometrisch höher aufgelöster Daten, damit die typische lineare Anbaustruktur von Weingärten sichtbar wird. Mit rein multispektraler Klassifizierung tritt dann aber das Problem der Inhomogenität [3 - 1.2.4] auf, wobei die Signatur der Rebstöcke gegenüber dem Untergrund nicht mehr dominant sein wird. Umgebungsbasierte Klassifikationsmethoden müssten in diesem Falle angewendet werden, bei denen die Struktur von Objekten neben der radiometrischen Messung Verwendung findet. Eine weitere Möglichkeit, welche von Leiss angewandt wird, ist der Einbezug eines digitalen Höhenmodells (mit abgeleiteter Exposition) und dem Expertenwissen, dass Rebbau vorwiegend an sonnenexponierten Hängen betrieben wird. Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, die Rebbauf Flächen in 25m *25m grossen Pixeln zu identifizieren.

3 - 2.1.2 Datenkomprimierung ('backward zooming')

Ob und wie weit definierte Objekte mit Fernerkundungssensoren erfasst, qualifiziert und quantifiziert werden können steht demnach u.a. in direktem Zusammenhang mit der geometrischen Auflösung der verwendeten Sensoren. In der vorliegenden Arbeit geht es in erster Linie darum, Waldflächen unabhängig von ihrem Bestandescharakter geometrisch möglichst genau zu erfassen. Die verwendeten geometrischen Grundaufösungen der Sensoren (SPOT XS 20m * 20m; Landsat-TM 25m*25m) lassen vermuten, dass

nicht die Einzelbaumkrone, sondern das Kronendach als Einheit erfassbar sein sollte. Dies ist unproblematisch in Gebieten homogener Waldstrukturen. Sobald aber feinere Strukturelemente auftreten, ist der Übergang zu einer gewissen Homogenität bei immer schlechterer geometrischer Auflösung zu finden. Die vorliegende Arbeit versucht unter anderem diese Grenze für den schweizerischen Wald zu finden. Die Untersuchungen bei 100m Auflösung sollen zeigen, ob diese Rastergrösse sowohl für die Bodenreferenzdaten, als auch die Satellitendaten genügt, um eine gewisse Homogenität des Waldes und damit des Klassifikationsresultates zu erreichen.

3 - 3 VORVERARBEITUNG UND ANALYSE DER BODENREFERENZDATEN

Wie in Kapitel [2 - 3.2] erläutert steht für die Untersuchung der Grüntonauszug der Landeskarte 1:25'000 als Bodenreferenz für die Waldfläche zu Verfügung. Die Daten liegen nach erster Datenvorbereitung als Vektorrepräsentation im ARC/INFO-Format vor. Ebenso sind die manuell digitalisierten Gewässerlinien vektoriell gespeichert. Es galt nun diese Daten für die rasterbasierten Analysen in Zusammenhang mit den Satellitendaten in verschiedene Pixelformate zu transferieren, wobei die Rasterauflösung den diversen Arbeitsmassstäben nach [Tab - 2, Seite 47] angepasst werden muss. Dies kann durch direkte Vektor-Raster Transformation in den Zielmassstab erfolgen. Eine weitere, diskutierte Möglichkeit ist die Vektor-Raster Transformation in einen hochauflösenden Pixelmassstab, gefolgt von einer rasterbasierten Skalierung in den Endmassstab. In den folgenden Kapiteln werden die Auswirkungen dieser Transformationen und Skalierungen quantitativ in Relation zur Waldflächenveränderung analysiert. Die generierten Waldmasken, basierend auf dem Grünauszug der topographischen Karten, werden anschliessend qualitativ untersucht. Es folgt ein Exkurs über Waldflächendefinitionen im allgemeinen und mit speziellem Augenmerk auf die verwendeten Bodenreferenzdaten.

Als Konsequenz dieser Untersuchungen wird die Erstellung eines eigenen Waldflächen-Referenzdaten-

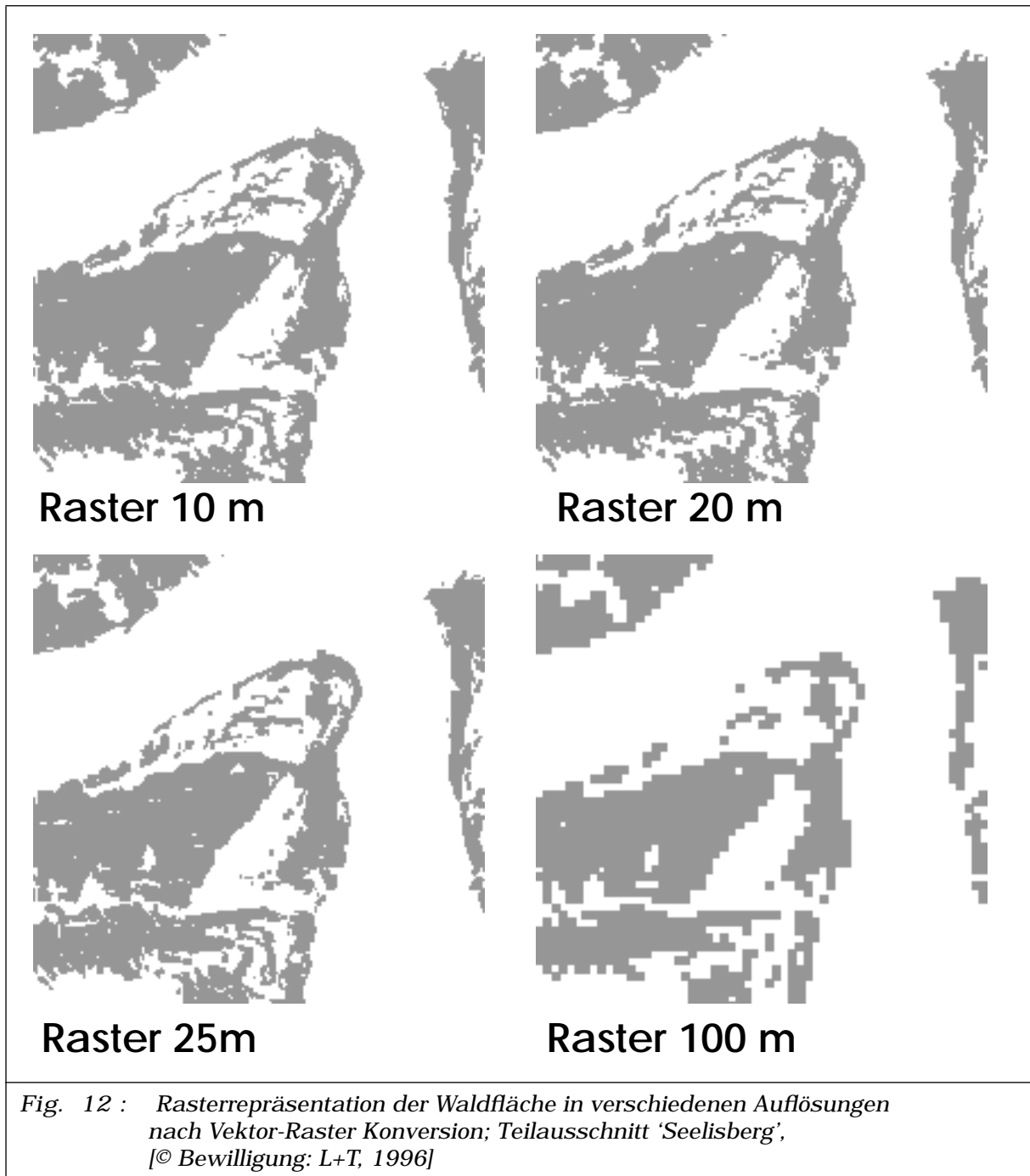
satzes, basierend auf einer analogen Interpretation der SPOT-Pan-Daten, erläutert. Es folgen quantitative und qualitative Untersuchungen über diesen neuen Datensatz sowie ein relativer Vergleich zum Referenzdatensatz, basierend auf der topographischen Karte.

3 - 3.1 Vektor-Raster Konvertierung der Bodenreferenzdaten

Die Bodenreferenzdatei im Vektorformat basierend auf der topographischen Kartengrundlage umfasst für den 17,2 km * 12 km grossen Untersuchungsausschnitt rund 25.03% Wasserflächen, 28,97% Waldfläche und 46,00% Restfläche (siehe [Fig - 6, Seite 62]). Als erster Vorverarbeitungsschritt geht es nun darum, diese Daten in die verschiedenen Rasterauflösungen zu konvertieren, welche für die Analyse der Satellitendaten gebraucht werden [Tab - 2, Seite 47]. Es ist von vornherein ersichtlich, dass dabei Information verloren gehen kann. Die Vektordarstellung repräsentiert die Kartensituation mit einer Auflösungsgenauigkeit von ca. $\pm 1,5\text{m}$ [2 - 3.2.1], respektive einer absoluten Lagegenauigkeit von $\pm 4,7\text{m}$ [2 - 3.2.2]. Die erforderlichen Rastergrössen von 10m, 20m, 25m und 100m können diesen Informationsgehalt nicht in sich tragen. Die quantitative Veränderung der Bodenreferenzdaten muss deshalb vorgängig untersucht werden. Werden bei der Analyse der Klassifikationsresultate von Satellitenbildern diese Veränderungen ausser acht gelassen, so ist eine Genauigkeitsüberprüfung auf Pixelbasis nur bedingt aussagekräftig.

Es ist des weiteren von grossem Interesse, auch Informationen über die Formveränderung der Bodenreferenzflächen zu erhalten. Interpretationen von Fehlklassifikationen in Zusammenhang mit variierender Objektgrösse und -Form werden vereinfacht und können ein Resultat relativieren.

Eine verbale Beschreibung der durch Vektor-Raster Konversionen indizierten Effekte auf z.Bsp. eine Waldmaske ist für ein spezielles Untersuchungsgebiet sicherlich von Interesse. Allgemeingültige Erkenntnisse müssen hingegen reproduzierbar sein. Darum sollen im folgenden Kapitel einige numerische Deskriptoren zur Beschreibung von Flächen eingeführt werden, mit denen der Vektor-Raster Prozess mathematisch analysiert werden kann.



3 - 3.1.1 Verwendete morphologische Deskriptoren

Morphologische Deskriptoren werden zumeist zur symbolischen Beschreibung von Regionen verwendet [Meyer P., 1990, pp. 73]. Sie können beispielsweise die Topologie von Flächen beschreiben. Unter Topologie versteht man '*...diejenige Eigenschaft eines Objekts,*

die von einer Deformation nicht beeinflusst sind. Vorgänge, die ein Aufteilen oder Vereinen von Regionen zur Folge hätten, wären z.Bsp. unzulässige Deformationen für diese Definition' (Gonzales und Wintz, 1987, zitiert in [Meyer P., 1990, p. 73]).

Eine weitere Kategorie morphologischer Deskriptoren umfasst die Momente. Hier wird eine Fläche als Masse betrachtet und anhand des Massenschwerpunktes verschiedene Faktoren berechnet.

Für die Analyse der Flächenveränderungen in dieser Arbeit wurden einige metrische Deskriptoren angewendet. Dies deshalb, weil von Beginn an klar war, dass die angewendeten Deformationen (Skalierungen) keinen Einfluss auf die Topologie haben sollten und es nicht im Sinne der Aufgabenstellung ist, die Formen einzelner Waldflächenstücke per se, sondern die Wald- und Wasserfläche als Ganzes zu analysieren.

3 - 3.1.1.1 Fläche A

Die Angabe der im Testgebiet von einer Klasse (Wald, Wasser, etc.) beanspruchten Fläche A ist sicherlich der wichtigste Deskriptor.

Auf Vektorbasis wird die durch die Polygone umfasste Fläche durch Dreiecks-Vermaschung erfasst. Es muss darauf geachtet werden, dass Gebiete, welche nicht zu einer Klasse gehören, aber vollständig von ihr umgeben sind, ausgeklammert werden.

Auf der Basis von Pixeln errechnet sich die Fläche einfach durch Multiplikation der Anzahl Pixel einer Klasse mit der Pixelfläche.

Wenn der durch das Untersuchungsgebiet repräsentierte Ausschnitt der Erdoberfläche konstant gehalten wird, so kann eine Veränderung der Fläche einer Klasse immer nur auf Kosten des übrigen Gebietes stattfinden.

3 - 3.1.1.2 Perimeter; Umfang P

Der Perimeter P, oder auch Umfang, entspricht der Länge der Grenze einer Region zu ihrer Umgebung. In vektorieller Darstellung ist der Perimeter definiert durch die Länge aller Polygonelemente die eine Fläche umfassen. Auf Rasterbasis analog die Summe aller begrenzenden Kanten der Pixelfläche.

Für eine Einheitsfläche von 1 ist der minimale Perimeter in Vektordarstellung (Kreisumfang) gegeben durch:

$$P_{\text{vektormin}} = 2\pi \cdot r = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}} = 3.545 \quad (2)$$

wobei r der Radius des Einheitskreises mit Fläche 1 ist (r = 0.564)

In Rasterdarstellung entspricht der Perimeter der Einheitsfläche 1 der Summe der vier Kanten a des Pixels:

$$P_{\text{rastermin}} = 4 \cdot a = 4 \quad (3)$$

Für die Erhebung des Perimeters P in Rasterdarstellung spielt nach obgenannten Formeln die Rasterauflösung eine wichtige Rolle. Mit infinitesimal kleinen Rasterzellen kann der Perimeter jeder beliebigen, natürlichen Fläche optimal angenähert werden (Vektordarstellung). Je gröber aber die Einheitszelle gewählt wird, desto grösser wird die Diskrepanz zwischen Realität und Modell [Rosenfeld A., et al., 1982, p.252]. Es gibt einige digitale Berechnungsmethoden des Perimeters P auf Pixelbasis, bei denen Eckpixel einer Fläche abgeschnitten werden, oder konkave Ecken gefüllt. In der vorliegenden Arbeit wurden aber die vollen Kantenlängen aller Grenzflächen berücksichtigt.

3 - 3.1.1.3 Kompaktheit; 'compactness' C

Die Kompaktheit C wird in der Literatur auch unter den Namen '*compactness*', '*complexity*' und '*circularity*' geführt. Die Definitionen sind dabei sehr unterschiedlich. [Russ J., 1995, p. 524] definiert die Kompaktheit folgendermassen:

$$C = \frac{\sqrt{\left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \text{Fläche}(A)}}{\text{Maximaler Durchmesser}} \quad (4)$$

Die in dieser Arbeit verwendete Definition basiert auf Angaben von [Castleman K., 1979, p. 325]:

$$C = \frac{\text{Perimeter}(P^2)}{\text{Fläche}A} \quad (5)$$

Der Perimeter wurde quadriert, damit C dimensionslos wird. Für eine Einheitsfläche von 1 ist die minimale Kompaktheit in Vektordarstellung gegeben durch:

$$C_{\text{vektormin}} = \frac{(2\Pi r)^2}{\Pi r^2} = 4 \Pi = 12.566 \quad (6)$$

wobei r der Radius des Einheitskreises mit Fläche 1 ist (r = 0.564)

In Rasterdarstellung der Einheitsfläche 1 entspricht die minimale Kompaktheit C:

$$C_{\text{rastermin}} = \frac{4^2}{1} = 16 \quad (7)$$

Für Rasterdaten gilt demnach: Je kleiner die Rasterzelle ist und je kompakter (glatter) der Umriss, desto tiefer fällt das Kompaktheitsmass C aus. Im Vergleich verschiedener Rasterflächen der gleichen Auflösung zeigt das Kompaktheitsmass C an, wie stark der Flächenrand onduliert ist und wie zerfurcht die zusammenhängende Fläche sich repräsentiert.

3 - 3.1.2 Kenndaten für die vektorielle Repräsentation

Für das Testgebiet ist für die kompakt definierte Wasserfläche ein tieferes Kompaktheitsmass zu erwarten als für die, wohl gleich grosse, aber zerzauste Waldfläche. Die folgende Tabelle zeigt dies sehr deutlich.

Untersuchungsgebiet Beckenried	Fläche A in [%]	Fläche A in [m ²]	Perimeter P in [m]	Kompaktheit C
Wasser	25.03	51'660'730	65'839	84
Wald	28.97	59'789'232	1'302'252	28'364

Tabelle 8: Fläche A, Perimeter P und Compactness C für die vektorielle Bodenreferenz, Wasserflächen und Waldflächen basieren auf der topographischen Karte

3 - 3.1.3 Kenndaten für die Rasterrepräsentation nach Vektor-Raster Konvertierung

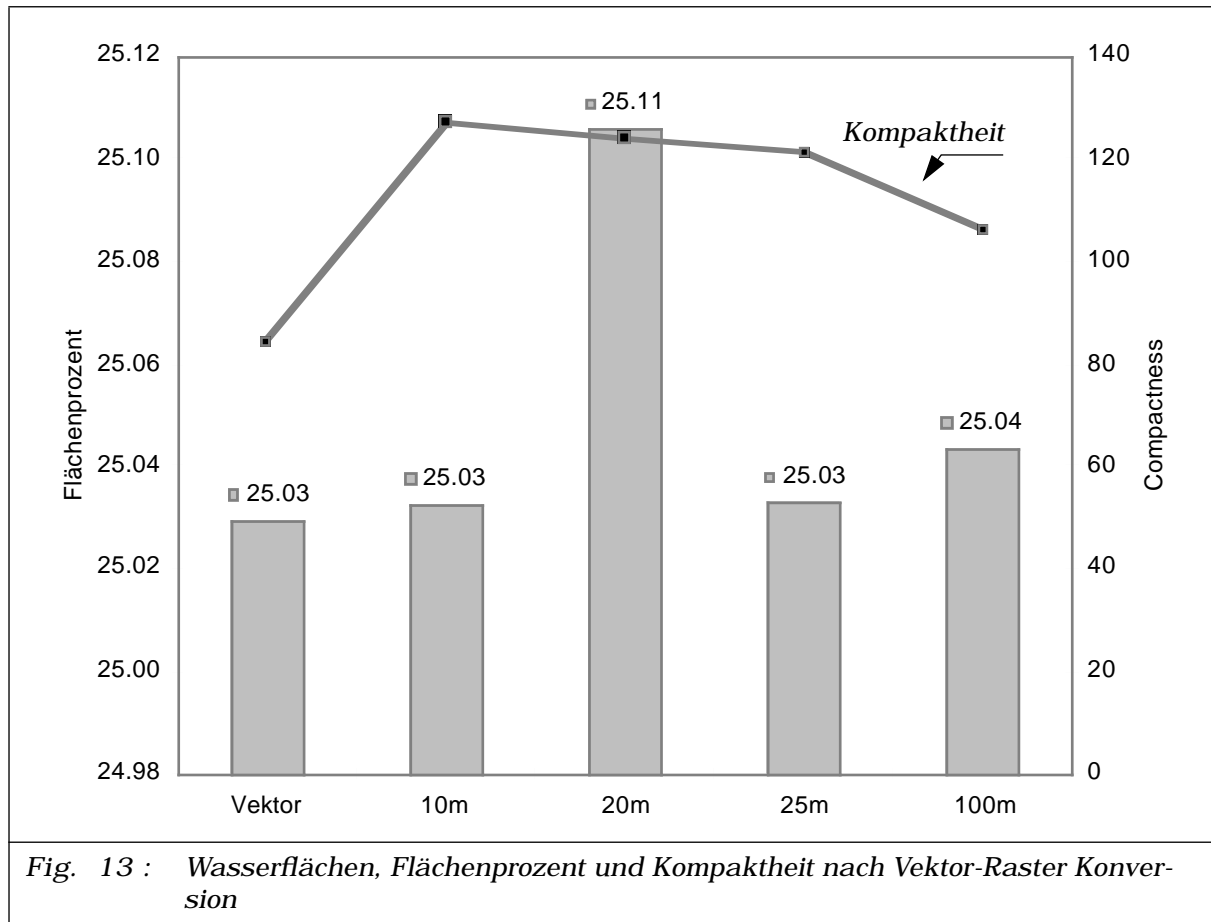
Die vektoriellen Bodenreferenzdaten wurden mit dem Programm *'polygrid'* aus dem ARC/INFO direkt in verschiedene Rasterrepräsentationen umgeformt. Der Algorithmus funktioniert nach dem Dominanzprinzip, wobei bei 50% und mehr Bedeckung einer Rasterzelle durch die vektoriellen Bodenreferenzdaten, dieselbe der Klasse zugeschlagen wird. Die Grössendefinition des Untersuchungsgebietes erlaubt eine Vektor-Raster Konversion in die Rastergrößen 10m, 16m 20m, 25m, 50m, 80m und 100m der gesamten Fläche, bei ganzzahliger Anzahl Kolonnen und Zeilen [Tab - 2, Seite 47]. Der Vergleich und die Analyse der Effekte in den verschiedenen Auflösungen wird dadurch vereinfacht.

3 - 3.1.3.1 Wasserflächen

Die Bodenreferenzdaten für die Wasserflächen wurden in die Rastergrößen 10m, 20m, 25m und 100m konvertiert. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die statistischen Kenndaten.

Auflösungen	Fläche A in [m ²]	Fläche A in [%]	Perimeter P in [m]	Kompaktheit C
Vektor	51660730	25.03	65839	84
10m	51667800	25.03	81100	127
20m	51818800	25.11	80160	124
25m	51668125	25.03	79000	121
100m	51690000	25.04	74000	106

Tabelle 9: Bodeninformation, Wasserflächen nach Vektor-Raster Konversion Testgebiet Beckenried



Wie vorausgesagt, sind die Werte für den Perimeter und für die Kompaktheit sehr tief. Die grosse, abgeschlossene Wasserfläche kann daher sehr genau mit Rasterzellen verschiedenster Auflösung repräsentiert werden. Flächenveränderungen treten unter der Prozentschwelle auf. Auffallend ist, dass sich bei einer Rasterauflösung von 20m die Fläche um weniger als 1 Promille verändert. Vermutlich spielt dabei die Ausprägung der Seeuferlinie eine Rolle, welche Ondulationen der Kurvenform unter 20m aufweist und mit feinem Raster besser repräsentiert werden kann. Ab 20m fallen diese Schwankungen dank Generalisierung weniger ins Gewicht. Mit steigendem Generalisierungsgrad fallen erwartungsgemäss die Perimeter und Kompaktheitswerte. Die gute Übereinstimmung mit dem vektoriiellen Bodenreferenzdatensatz führte zur Verwendung dieser Wasserflächen-Rasterdatensätze in der Arbeit. Es wurden keine weiteren Versuche mit Referenzdatensätzen für Wasser durchgeführt.

(Ausführliche Statistiken sind in [ANHANG: C] zu finden.

3 - 3.1.3.2 Waldflächen

Bei der Analyse der Wasserflächen hat sich gezeigt, dass die Form des Umrisses der konvertierten Fläche einen Einfluss auf den Perimeter bei verschiedenen Rastergrößen hat. Aus diesem Grunde wurden die Waldflächen zusätzlich zu den Rastergrößen 10m, 20m, 25m und 100m auch auf die Zwischengrößen 16m, 40m, 50m und 80m konvertiert.

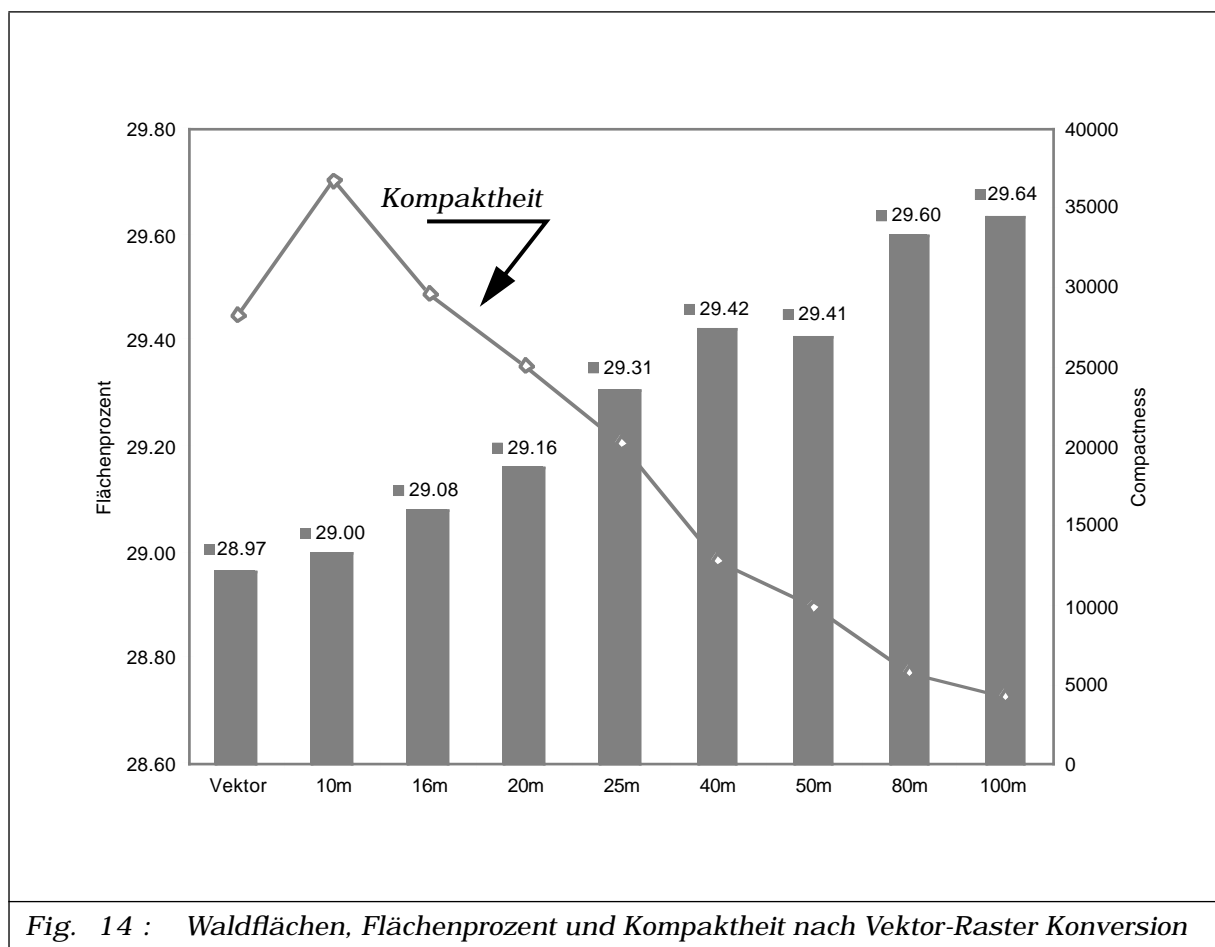
Bei der Vektor-Raster Konversion der Waldfläche fällt die stetige Zunahme der Rasterwaldfläche mit größerem Raster auf. Wie im vorangegangenen Kapitel gesehen, verändert sich die Wasserfläche kaum. Demnach ist für die Nichtwaldfläche ein gegenläufiger Trend in der Fläche zu erwarten. Eine Flächenveränderung von über einem halben Prozent, bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet, entspricht in Tat und Wahrheit einer Fläche von über 138 ha. Diese Veränderung in der Bodenreferenz darf bei einer Genauigkeitsüberprüfung einer Waldflächenklassifikation nicht vernachlässigt werden.

Auflösungen	Fläche A in [m²]	Fläche A in [%]	Perimeter P in [m]	Kompaktheit C
Vektor	59789232	28.97	1302252	28364
10m	59853300	29.00	1484960	36842
16m	60022528	29.08	1334336	29663
20m	60185200	29.16	1228960	25095
25m	60495625	29.31	1108600	20315
40m	60723200	29.42	886640	12946
50m	60697500	29.41	775400	9906
80m	61094400	29.60	592640	5749
100m	61170000	29.64	514400	4326

Tabelle 10: *Bodeninformation, Waldflächen nach Vektor-Raster Konversion
 Testgebiet Beckenried*

Die Graphik [Fig - 14] verdeutlicht diese markante Flächenzunahme. Der Einbruch im Trend bei einer Rastergröße von 50m muss mit der mangelnden statistischen Signifikanz der Änderung begründet werden. Im Gegensatz zu den Wasserflächen weist der Wald mit seinen fein strukturierten Waldrändern einen hohen Perimeter (bei etwa gleicher Fläche) und damit

auch ein hohes Kompaktheitsmass auf. Ist die Kompaktheit bei 10m Rasterzellen noch deutlich höher als in vektorieller Darstellung, so wird bei einer Auflösung zwischen 16m und 20m der gleiche Wert erreicht. Flächenmässig müsste demnach die Rasterauflösung von 10m den Wald am ehesten repräsentieren, die Form der Flächen hingegen ist bei 16m besser angenähert. Sobald jedoch gröbere Rasterzellen gewählt werden, sind die Veränderungen so gross, dass sie nicht mehr toleriert werden können.



3 - 3.2 Skalierung der Bodenreferenzdaten

Im vorangegangenen Kapitel [3 - 3.1] wurden die Effekte, die bei einer Vektor-Raster Konvertierung der Bodenreferenzdaten 'Wald' entstehen können, analysiert. Oftmals liegen die Referenzdaten aber nicht in

vektorieller, sondern in Rasterform vor. Der Raster entspricht in wenigen Fällen genau der Auflösung, die zur Analyse der Klassifikationen gebraucht wird. Es gilt nun in den nächsten Kapiteln, der Skalierung der Waldflächen auf Rasterbasis (siehe auch [3 - 2.1]) Beachtung zu schenken. In Bezug auf die gemachten Erfahrungen wird dabei eine Resultatverbesserung (Flächenproportionalität und ähnliches Kompaktheitsmass) der Waldflächen bei Rasterauflösungen grösser als 20m erwartet, indem man diese Auflösungen nicht direkt ab den vektoriellen Daten durch die Vektor-Raster Konversion errechnet, sondern durch Skalierungen der gut repräsentierenden Waldflächen von 10m bis 16m erhält.

3 - 3.2.1 Skalierungsmethode

Die Waldmaske, abgeleitet von den topographischen Karten, entspricht einer flächenhaften Bodenreferenz. In Rasterform wird jede Zelle mit einem Attribut versehen, welches für die gesamte Zellenfläche Gültigkeit besitzt und die binäre Aussage hat, ob 50% und mehr der Zelle mit Wald bedeckt ist oder nicht. Diese binäre Maske kann nun in eine Maske gröberer Auflösung zusammengefasst werden. Wird dabei den Flächenanteilen der Ursprungszellen, die zu einer neuen Zelle zusammengefasst werden, Rechnung getragen, so kann die Zielzelle nicht nur die Aussage Wald oder Nichtwald in sich tragen, sondern auch den prozentualen Anteil der Waldbedeckung. Abbildung [Fig - 15] illustriert diesen Sachverhalt.

Die prozentuale Waldmaske nach der Skalierung lässt die Analyse beispielsweise einer Waldflächenklassifikation differenzierter durchführen. Speziell der Problematik von Mischpixeln im Satellitenbild und von Fehlklassifikationen kann mit dieser Referenz besser begegnet werden. Wird aber ein Bodenreferenzdatensatz in binärer Form im Verarbeitungsprozess gebraucht, so muss der prozentuale Datensatz binärisiert werden. Dabei stellt sich die Frage, mit welchem Prozentsatz der Bedeckung eine Zelle als bedeckt oder leer bezeichnet werden muss. Setzt man die Zuweisungsgrenze auf 50% oder mehr (klassisches Dominanzprinzip) werden bei ganzzahliger Repräsentation der Werte von 101 möglichen Zuständen (0%,

1%...99%, 100%) nur deren 50 der Klasse 'unbesetzt' und 51 der Klasse 'besetzt' zugeordnet. Das Problem spitzt sich besonders dann zu, wenn durch die Skalierung der Wert 50% ausserordentlich oft besetzt ist. Beispielsweise wenn man 10m Binärdaten auf 20m Auflösung skaliert. In diesem Falle treten nur die 5 Zustände 0%, 25%, 50%, 75% und 100% Bedeckung auf. Grössere Veränderungen in der Fläche, dem Perimeter und damit der Kompaktheit sind zu erwarten, da zuviele Zellen der Klasse 'besetzt' zugeschlagen wurden. Eine Verschiebung der Entscheidungsgrenze auf 51% Bedeckung verschiebt die Problematik nur in die Klasse 'unbesetzt'. Aus diesem Grunde ist es ratsam, wenn möglich nur Skalierungen anzuwenden, bei denen diese Problematik erst gar nicht auftritt (z.Bsp. Skalierung von 10m auf 25m wie in [Fig - 15]). Sonst ist eine genaue Überprüfung der skalierten Masken vonnöten.

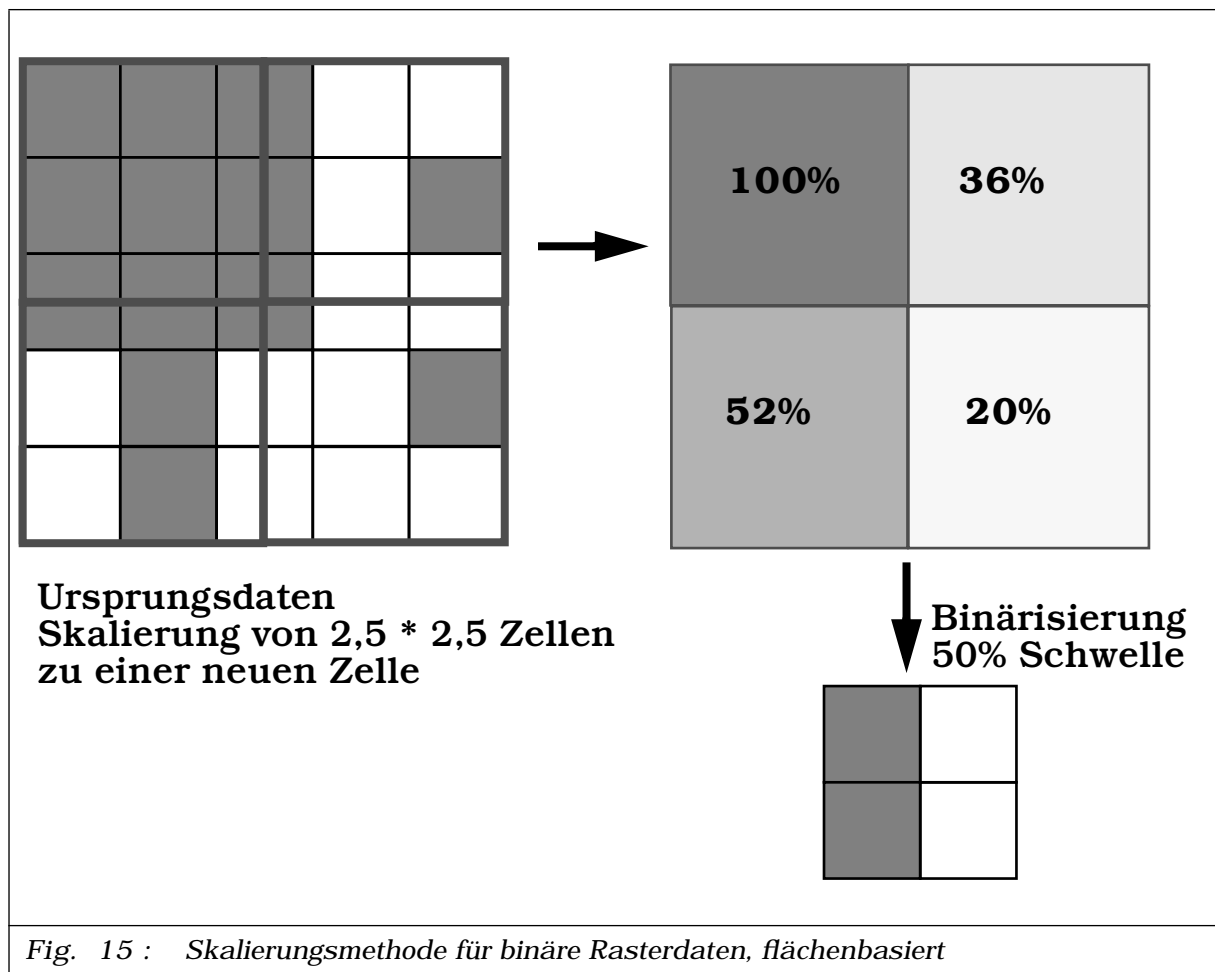


Fig. 15 : Skalierungsmethode für binäre Rasterdaten, flächenbasiert

Verwendet man statt des ganzzahligen Schemas ('integer' Werte) bei der Binärisierung reale Skalen ('real' Werte) so entfallen diese Probleme nur bedingt, wenn der 50%-Fall sehr selten auftritt. Entscheidend bleibt weiterhin das Verhältnis zwischen der Ursprungsauflösung und der Zielauflösung.

3 - 3.2.2 Flächenbasierte Skalierung der Waldmaske

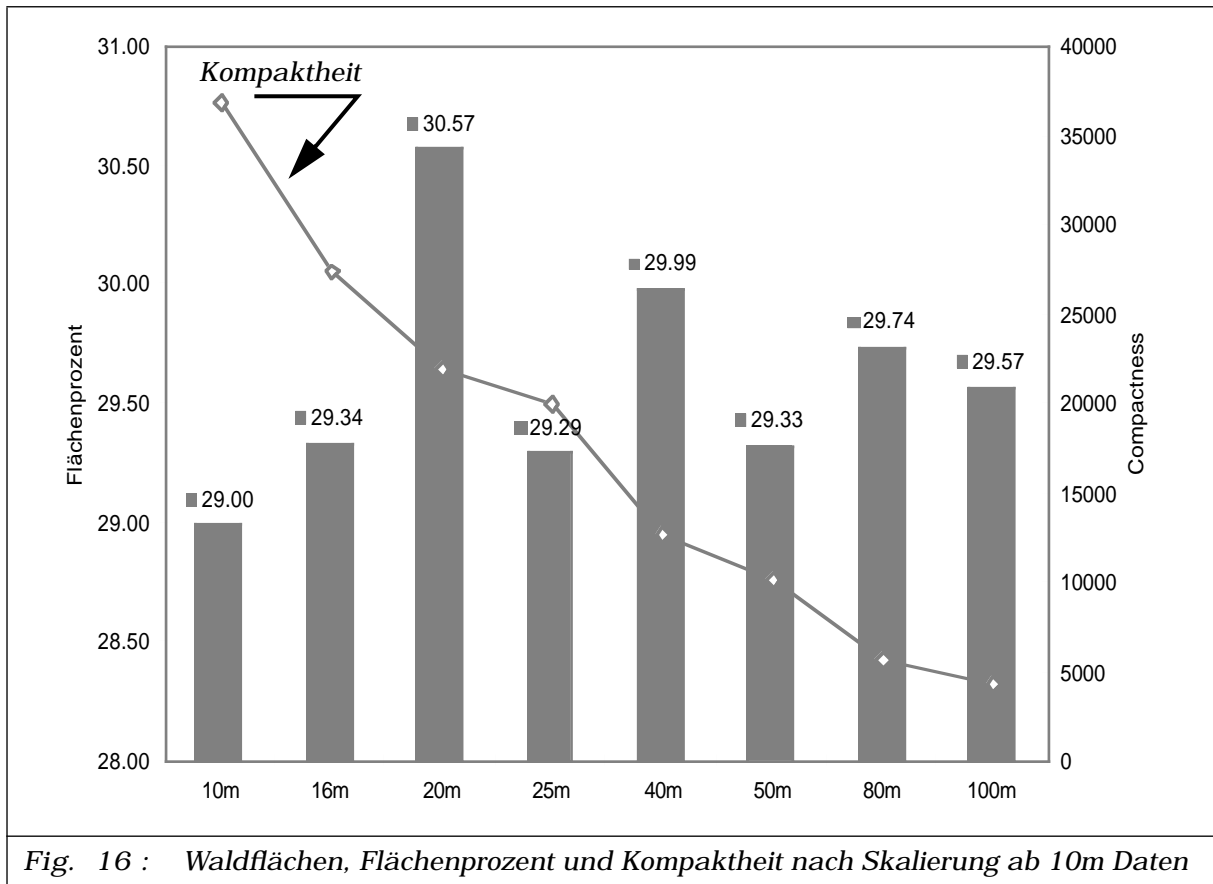
Die Waldmasken im Rasterformat, ab den vektoriel-
 len Ursprungsdaten durch Vektor-Raster Konversion
 generiert [3 - 3.1.3], wurden alle flächenbasiert auf die
 verbleibenden, gröberen Auflösungen skaliert. Die
 vollständigen statistischen Kennwerte sind in Anhang
 [D - 2] nachzusehen. Die folgenden Bemerkungen und
 Analysen betreffen nur einen kleinen Teil der erfolg-
 ten Untersuchungen.

Skaliert man die 10m Rasterdaten auf 20m, 40m,
 80m und 100m so tritt der in [3 - 3.2.1] beschriebene
 50% Effekt bei der Binärisierung deutlich auf [Fig - 16].
 Je gröber die Rasterauflösung, desto geringer die
 Anzahl der betroffenen Zellen, desto besser nähert
 sich der Wert der durch die unproblematischen
 Auflösungen (16m, 25m, 50m) gegebenen Gerade.

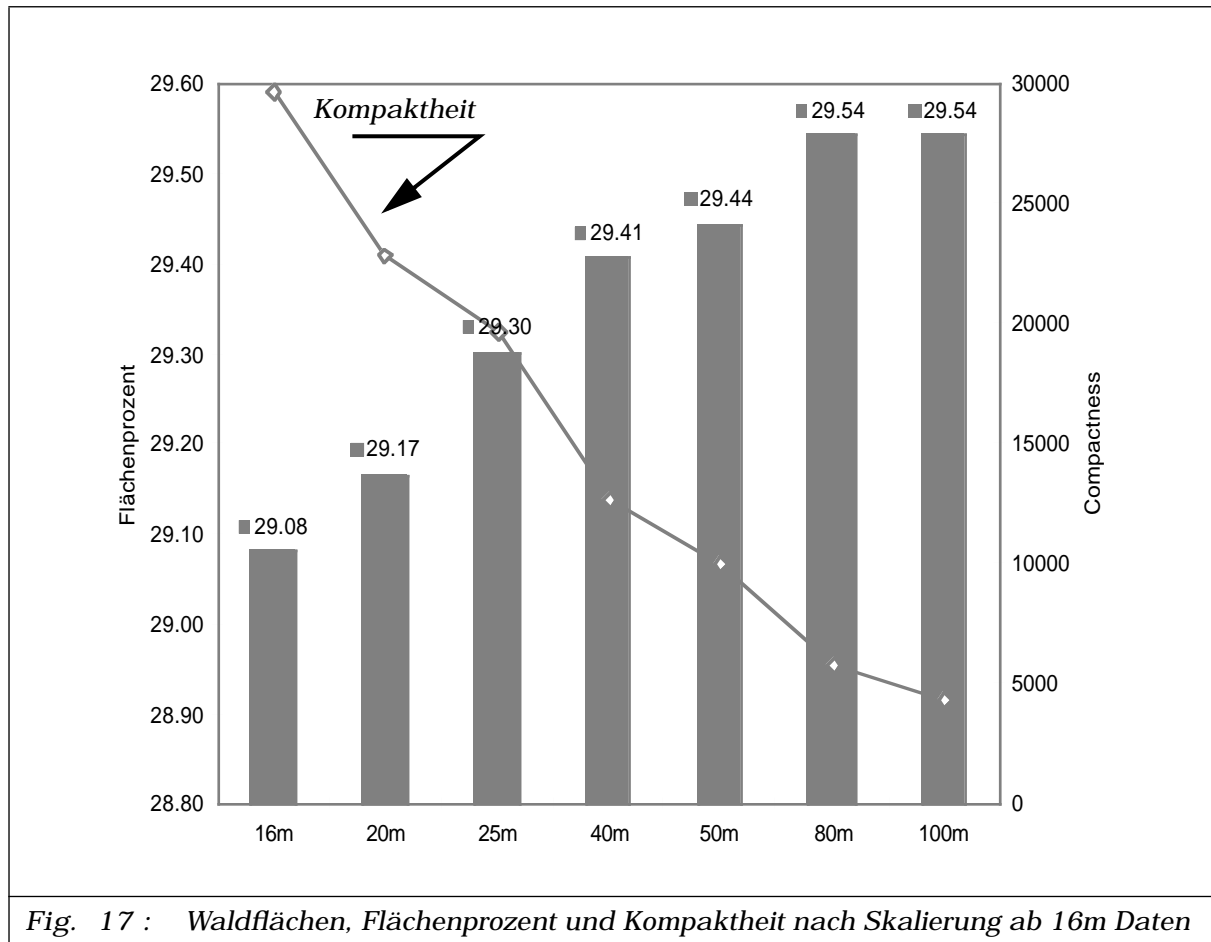
Auflösungen	Wald Fläche in %	Kompaktheit C	Perimeter P in m
(zum Vergleich: Vektordaten)	(28.97)	(28364)	(1302252)
10m	29.00	36842	1484960
16m	29.34	27429	1288864
20m	30.57	21994	1177960
25m	29.29	20065	1101400
40m	29.99	12732	887680
50m	29.33	10132	783200
80m	29.74	5741	593600
100m	29.57	4365	516200

Tabelle 11: *Bodeninformation, Waldflächen nach Skalierung der 10m Daten
 Testgebiet Beckenried*

Die unproblematischen Auflösungen der skalierten
 Daten geben die Flächengenauigkeit relativ zum vektori-
 ellen Datensatz besser an als die Datensätze, welche
 durch Vektor-Raster Konversion generiert wurden [Fig
 - 14, Seite 102]. Dabei lässt sich über die Signifikanz
 der Verbesserung sicherlich diskutieren.



Dass dieser Trend aber konstant vorhanden ist, zeigen auch die Resultate der weiteren Versuche (siehe [Fig - 17] und Anhang [D - 2]). Auffallend ist die sich kaum verändernde Kompaktheit bei gleicher Auflösung.



3 - 3.3 Rasterbasierte Waldreferenz ab vektoriiellen Daten, Empfehlungen

Basierend auf den Erkenntnissen der Analyse mit einigen morphologischen Deskriptoren von Vektor-Raster konvertierten und auch raster-skalierten Daten kann für die Waldfläche zusammenfassend folgende Empfehlung formuliert werden.

- Die Vektor-Raster Konversion der Waldflächendaten mit Hilfe des Programmes *'polygrid'* aus dem ARC/INFO zeigt eine gute Übereinstimmung der Fläche bei einer Raster-Zielauflösung, die die Form des Waldes gut repräsentieren kann. Gute Repräsentation bedeutet, dass die gewählte Zellengröße die dominanten Ondulationen des Waldrandes nachzeichnen kann. Für das Testgebiet Beckenried scheint eine Auflösung um 16m adäquat. Bei Auflösungen über 20m treten

Vergrößerungs-Effekte bis zu einem halben Prozent der Untersuchungsfläche auf.

- Rasterauflösungen der Waldfläche grösser als 20m werden in Bezug auf die Vektorfläche besser durch Skalierung, basierend auf den 10m oder 16m Rasterdaten erreicht. Die Skalierung bei Flächendaten muss unbedingt flächenproportional erfolgen. Vergrößerungseffekte infolge gröberer Rasterzellen können nicht vermieden werden. Zu beachten ist dabei, dass die Komplementärfläche entsprechend verkleinert wird. Sicherlich wird bei noch grösseren Rasterzellen als 100m der Vergrößerungseffekt auf Kosten der Gegenfläche stoppen und eventuell sogar rückläufig ausfallen. Analysen, wann dieser Effekt auftritt, wurden nicht gemacht, da die Anzahl Pixel bei der 100m Rasterauflösung (172 * 120 Zellen) vermutlich schon an die statistische Signifikanzschwelle herankommt und eine Zusammenfassung zu noch weniger Pixel nicht verantwortbar erscheint.

- Skalierungen von Rasterdaten unterliegen dem Problem der 50% Binärisierungsschwelle. Hilfe bietet eine adäquate Zellengrösse der Ausgangsdaten, ab denen man das Zielraster ohne den Fall einer 50% Flächendeckung erhalten kann. Liegen die Bodenreferenzdaten in Vektorform vor, ist dies ohne weiteres möglich.

- Für die vorliegende Arbeit erweist es sich als ideal, die 10m Rasterauflösung direkt ab den Vektordaten zu generieren, während gröbere Auflösungen durch Skalierung der 16m Daten errechnet werden können.

3 - 3.4 Qualität der Bodenreferenzdaten Wald ab Landeskarte in Rasterform

In Kapitel [3 - 3.1] bis Kapitel [3 - 3.3] wurden die Waldflächen-Bodenreferenzdaten nur einer numerischen Kontrolle mit morphologischen Kenngrössen unterzogen. Über die inhaltliche Qualität der Daten, inwieweit sie den Waldflächenstatus zur Zeit der Satellitendaten (Sommer 1991) repräsentieren, wurde noch nichts ausgesagt. Diese Qualitätsüberprüfung, welche mangels weiterer digitaler Referenzen auf visueller Basis erfolgen muss, ist besonders notwendig, da die verwendete Waldmaske auf der Erhebung des topogra-

phischen Kartenblattes 1091 (Beckenried) im Jahre 1987 erfolgt ist. In den Jahren 1987 bis 1991 hat sich die Waldfläche aber mit grosser Wahrscheinlichkeit durch natürliche und anthropogene Einflüsse verändert.

Eine weitere Problematik stellt die Definition der erfassten Waldfläche in den Bodenreferenzdaten dar (siehe auch [1 - 3.1.1.2]). Inwieweit entspricht sie der durch das Fernerkundungssystem erfassten Waldfläche? Die folgenden Kapitel erläutern diese Fragen und bilden eine weitere Grundlage zur Einstufung der Qualität der Waldmaske als Bodenreferenz für die digitale Analyse der Satellitenbildklassifikationen.

3 - 3.4.1 Waldflächen-Definitionen

Karten und Statistiken über Waldflächen gibt es in verschiedensten Variationen, welche auf sehr unterschiedlichen Definitionen beruhen [EAFV, 1988], [Bundesamt für Statistik, 1992], [European Community, 1993]. Die angewendeten Definitionen können sich einerseits primär auf eine Festlegung der Parameter Deckungsgrad, minimale Ausdehnung und minimale Oberhöhen abstützen. Andererseits spielen in vielen Statistiken neben den natürlichen Begrenzungskriterien auch rechtliche Definitionen (Forstgesetze) eine Rolle. Mit den verwendeten Fernerkundungssensoren SPOT-HRV und Landsat-TM wird die Waldfläche allein durch die spektrale Signatur einer Pixelfläche definiert [3 - 1.2.4]. Konkret sind die Parameter Bedeckungsgrad und minimale Ausdehnung relativ zur Sensorauflösung für die Waldflächenbestimmung massgeblich. Effektiv wird eine dichte bestockte Fläche in einer digitalen Klassifikation immer als Wald ausgeschieden, gleichgültig ob es sich um eine Hecke, Obstplantage oder Wald im rechtlichen Sinne etc. handelt. Unterschiede zu den Bodenreferenzdaten sind offensichtlich und führen zu quantitativ unterschiedlicher Erfassung. Man bedenke zum Beispiel nur die Problematik der alpinen Gebirgswälder mit ihren aufgelösten Bestockungen und fliessenden Übergängen der Waldgrenzen [2 - 2.2.6.5]. Kahlschläge und Aufforstungen, Forststrassen, Windwurf- und Legföhrengebiete, Lawinenschneisen etc. sind weitere Problemgebiete.

Definitionen bestockter Gebiete scheiden sich immer an der Grenze von Bestockung über Einzelbaum zur übrigen Nutzung. Der Mensch empfindet als Waldgrenze intuitiv eine scharfe Trennlinie, wie er sie aus seiner vertrauten, parzellierten Umgebung, den bewohnten Gebieten, kennt. Dass ein Grossteil des Waldes, insbesondere im Jura, in den Voralpen und Alpen, in einem fließenden Übergangsbereich zwischen landwirtschaftlichen Nutzflächen, unproduktiven Flächen und eigentlichen bestockten Flächen steht, wird spätestens bei der Betrachtung eines grossräumigen Satellitenbildes ins Bewusstsein gerufen. Deshalb sind bei der Erfassung der Waldfläche, sei es in Statistiken, in Fernerkundungsdaten oder topographischen Karten objektive und messbare Kriterien notwendig [Bundesamt für Statistik, 1992, p.25].

3 - 3.4.1.1 Walddefinition der EC / EU Helsinki Konferenz

Die Bemühungen der *'European Community'* für gemeinsame, nachhaltige Überwachung, Bewirtschaftung und Schutz der europäischen Wälder bedingen auch eine gemeinsame Datengrundlage zu deren Erfassung und Entwicklung. An der Helsinki Konferenz 1993 [1 - 2] wurden gemeinsame Richtlinien, 6 messbare Kriterien und 20 Indikatoren für eine einheitliche Walddefinition aufgestellt. Der Indikator 1.1 umfasst die eigentliche Waldflächendefinition [European Community, 1993] (*'European list of criteria and most suitable quantitative indicators'*).

Wald (im eigentlichen Sinne)

Unter Wald versteht man bestocktes Land mit einem Kronenschlussgrad (Bedeckungsgrad) von mehr als 20% der Fläche. Der Wald soll zusammenhängend sein mit Baumhöhen, welche normalerweise über 7m erreichen und soll die Fähigkeit zur Holzproduktion haben. Ein geschlossen sind sowohl zusammenhängende Waldformationen bei denen Bäume verschiedenster Höhen und die Strauchvegetation einen grossen Anteil des Bodens bedecken, als auch offene Waldgebiete mit flächendeckender Grasnarbe, bei welchen die Baumkronen mindestens 10% des Bodens bedecken [European Community, 1993].

Wald (im erweiterten Sinne)

Unter Wald im erweiterten Sinne versteht man natürliche oder anthropogene Baumbestände, seien sie produktiv oder auch nicht. Eingeschlossen werden Gebüschwald, Savannen etc, Kahlschläge (sofern sie in naher Zukunft wieder aufgeforstet werden), kleine Forststrassen sowie kleine Lichtungen innerhalb des Waldes, sofern sie einen integralen Bestandteil des Waldes darstellen [European Community, 1993].

Diese Definitionen erlauben den einzelnen Mitgliedsländern einen breiten Interpretationsspielraum und bieten nur wenige, griffige Ansatzpunkte für eine Vereinheitlichung. Für die fernerkundliche Seite bieten vor allem die Definition der Baumhöhen, der Einbezug offener und baumloser Flächen Probleme. In Europa variiert zum Beispiel die Definition der minimalen bestockten Fläche, welche als Wald gilt zwischen 3 Bäumen und 100 ha; das Kriterium der minimalen Höhe ausgewachsener Bäume von 3m bis 5m im kontinentalen Europa und 3m in der sub-alpinen und sub-polaren Höhenzone [ESA, 1993, p.4.]

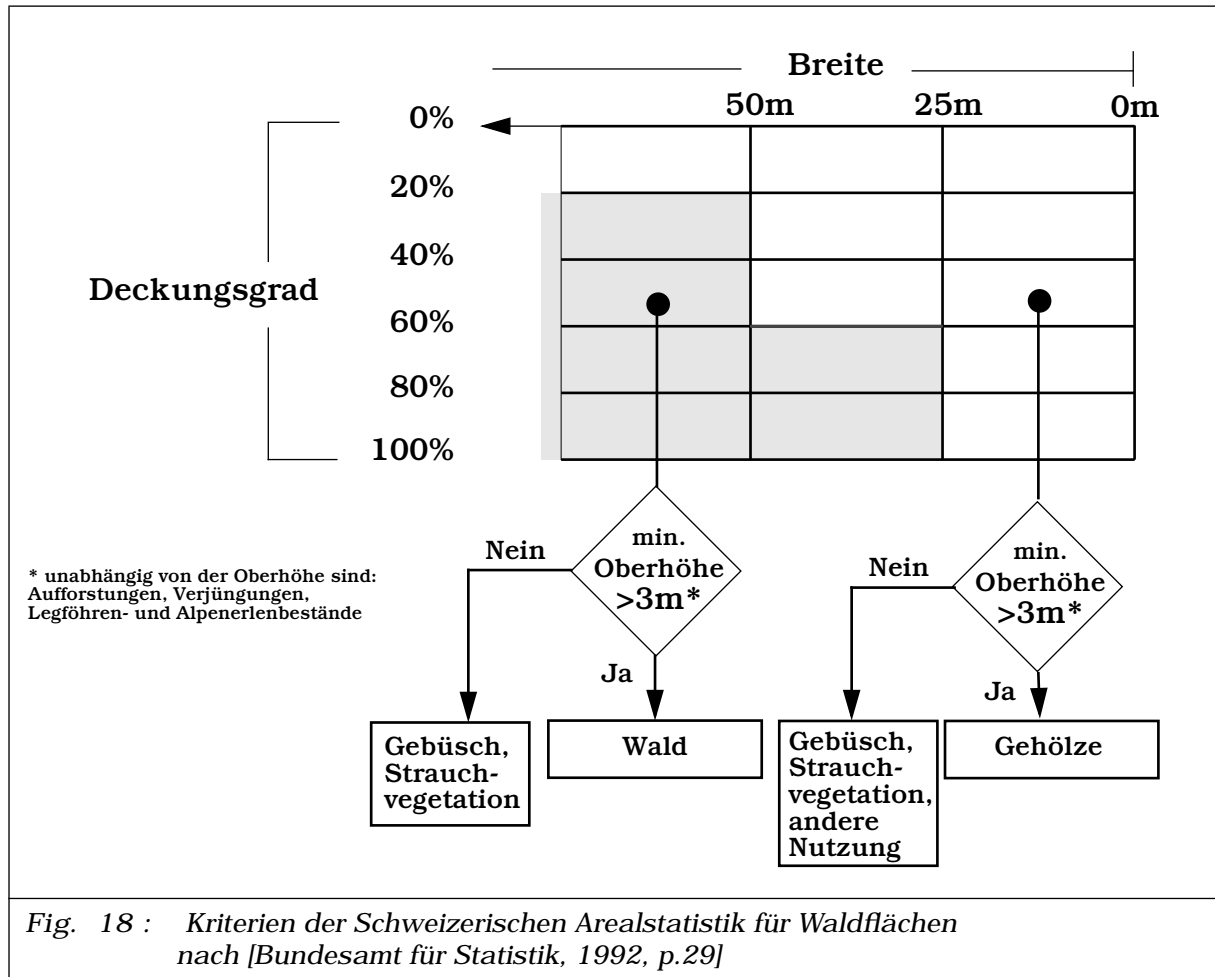
3 - 3.4.1.2 Walddefinition nach Schweizerischer Arealstatistik

Die Schweizerische Arealstatistik ist eine Stichprobenerhebung der Landnutzung über die ganze Schweiz. In einem Rasterabstand von 100m wird aus Luftbildern die lokale Bodennutzung kartiert. Bei den bestockten Flächen umfasst die Arealstatistik die Hauptkategorien Wald und Gehölze. Der Wald wird weiter unterteilt in geschlossene, aufgelöste Wälder, sowie Gebüschwälder. Als Abgrenzungskriterien dienen die Bestockungsgrenze, der Deckungsgrad, die Breite und die Oberhöhe [Bundesamt für Statistik, 1992, pp. 25].

Die Bestockungsgrenze für Wald (Fläche) umfasst alle Bäume und Sträucher mit maximalem Abstand von 3m und einer minimalen Wuchshöhe von 3m. Ausnahmen in der Wuchshöhe bilden Aufforstungen, Verjüngungen sowie Alpenerlen und Legföhren.

Die Bedingungen in Bezug auf den Deckungsgrad, die Oberhöhe sowie die Breite eines Bestandes, wel-

che für eine Zuordnung zu Wald erfüllt sein müssen sind aus [Fig - 18] ersichtlich.



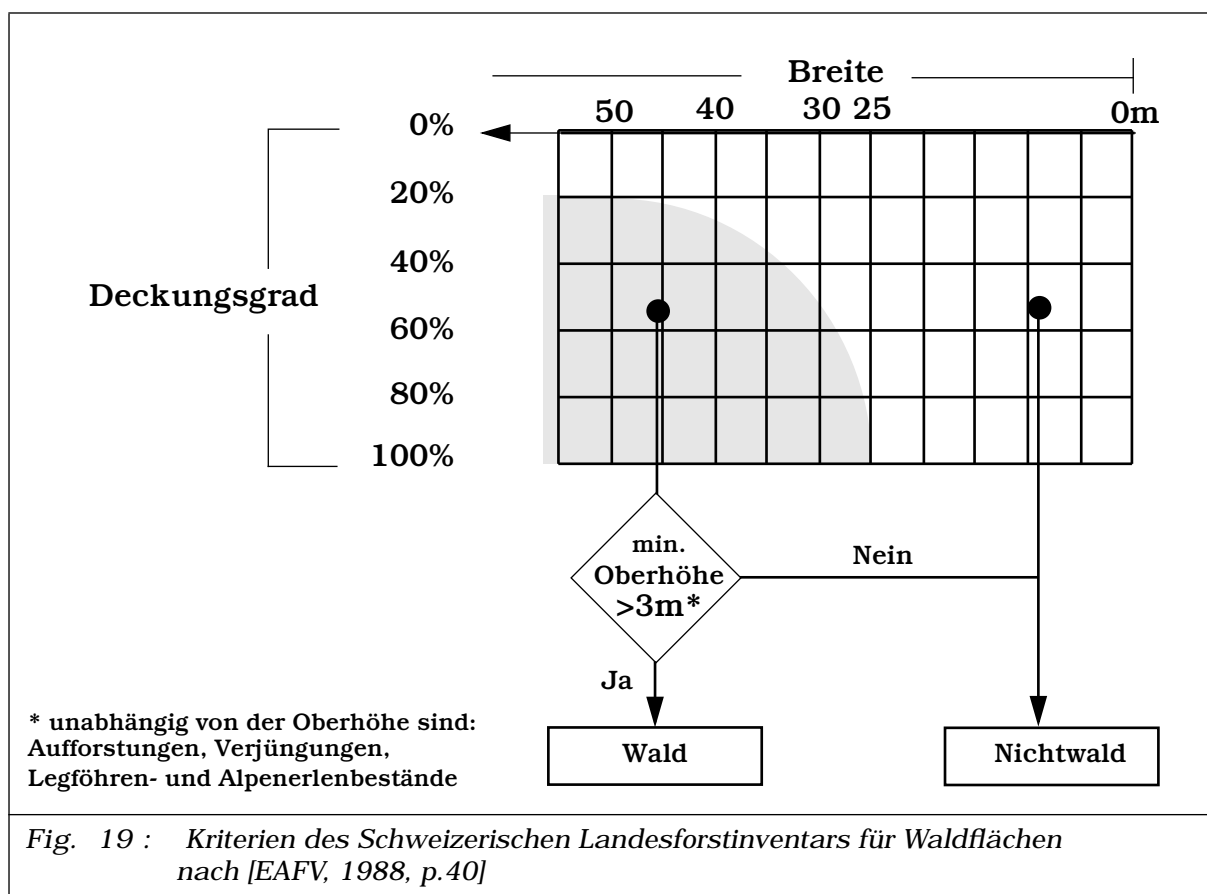
Die Hauptkategorie Wald enthält aber auch Schlagflächen, Windwurfflächen und Holzlagerplätze, welche nach allgemeinem Verständnis ebenfalls als Wald angesehen werden. Zusätzlich aber auch im Wald gelegene Gewässer, sowie Strassen und Wege von <6m Breite, Schlag- Brand- und Wurfflächen, forstliche Bauten sowie bis 25m breite Erosions- und Lawenzüge. Explizit nicht als Wald werden Bestockungen in Parkanlagen, Gärten, Baumschulen ausserhalb des Waldareals und Obstbaumkulturen betrachtet, obwohl sie die Mindestanforderungen erfüllen können.

Gerade diese erwähnten Ausnahmen stellen für die Satellitenbildinterpretation grosse Probleme, da nur die physikalischen Eigenschaften von Objekten, nicht

aber ihre Funktion und Beziehung zu den sozioökonomischen Einheiten gemessen werden kann. Die Verwendung von Arealstatistikdaten als Bodenreferenz für die Waldfläche aus Satellitendaten ist deshalb fragwürdig. Erschwerend erweist sich auch die Erhebungsmethode dieser Daten, da sie auf einem Stichprobenraster beruht und nicht ein dominantes Merkmal von Stichprobenflächen wiedergibt.

3 - 3.4.1.3 Waldefinition nach Landesforstinventar

Das Schweizerische Landesforstinventar LFI (ref. Glossar) ist analog der Arealstatistik eine landesweite Stichprobenerhebung basierend auf Luftbilddaten und Feldarbeit. Der Stichprobenraster entspricht dem kartesischen Kilometernetz der topographischen Landeskarten. Statt Stichprobenpunkte werden an allen Kilometer-Rasterpunkten Stichprobenflächen von 25m * 25m nach verschiedenen forstwirtschaftlichen Parametern aufgenommen.



Die Wald-/Nichtwaldentscheidung wird basierend auf Mindestanforderungen für die Kriterien Breite, Deckungsgrad und Oberhöhe gefällt. Als Sonderfälle werden ebenfalls Aufforstungen, Verjüngungen, Legföhren- und Alpenerlenbestände betrachtet. Diese Definition entspricht in groben Zügen der Definition aus der Arealstatistik und führt zu ähnlichen Problemen beim Vergleich mit satellitenbasierten Daten.

3 - 3.4.1.4 Walddefinition der Schweizerischen Landestopographie

In den topographischen Landeskarten werden die bestockten Flächen als Grünton und mit Kreissignaturen verschiedener Grössen dargestellt [Maier M., 1994, pp. 26]. Es wird zwischen kompaktem Wald, offenem Wald sowie Gebüsch- und Buschwald unterschieden. Die kompakte Waldfläche wird im Grünauszug, der auch in dieser Arbeit Verwendung findet, dargestellt [2 - 3.2].

In den internen Richtlinien für die Kartographen der Landestopographie, der Topografika [Bundesamt für Landestopographie, 1993], wird die dargestellte kompakte Waldfläche folgendermassen definiert:

- "... Als Wald wird jede mit mehr als 3m hohen Bäumen bepflanzte Fläche ausgeschieden, die von den Baumkronen zu mehr als der Hälfte beschirmt wird und deren Boden von einer bestimmten Art Humus - von sich zersetzenden Blättern und Nadeln - bedeckt ist. Weder das Alter des Waldes noch der jeweilige Grad seiner Nutzung spielen bei der Festlegung der Waldumrisse eine Rolle. Somit sind Jungwälder und Wiederaufforstungen auf der Karte genau gleich gekennzeichnet wie der Hochwald..."

Diese Waldflächen werden durch einen geschlossenen Waldrand abgegrenzt, wenn der Übergang zu offenem Gelände abrupt erfolgt. Diese Grenzen können aber auch durch Siedlungselemente wie Strassen, Wege, Eisenbahnen oder Gewässer erfolgen. Wegen kartographischen Verdrängungsproblemen können diese Elemente auch die Waldflächensignatur überdecken. Markantes Beispiel sind Verkehrswege durch Waldgebiete, die trotz vollständiger Kronenbedeckung nicht als Waldfläche ausgeschieden werden, obwohl sie aus der Sicht der Satelliten eindeutig eine Waldflächensignatur aufweisen. Ist die Waldrandgrenze flies-

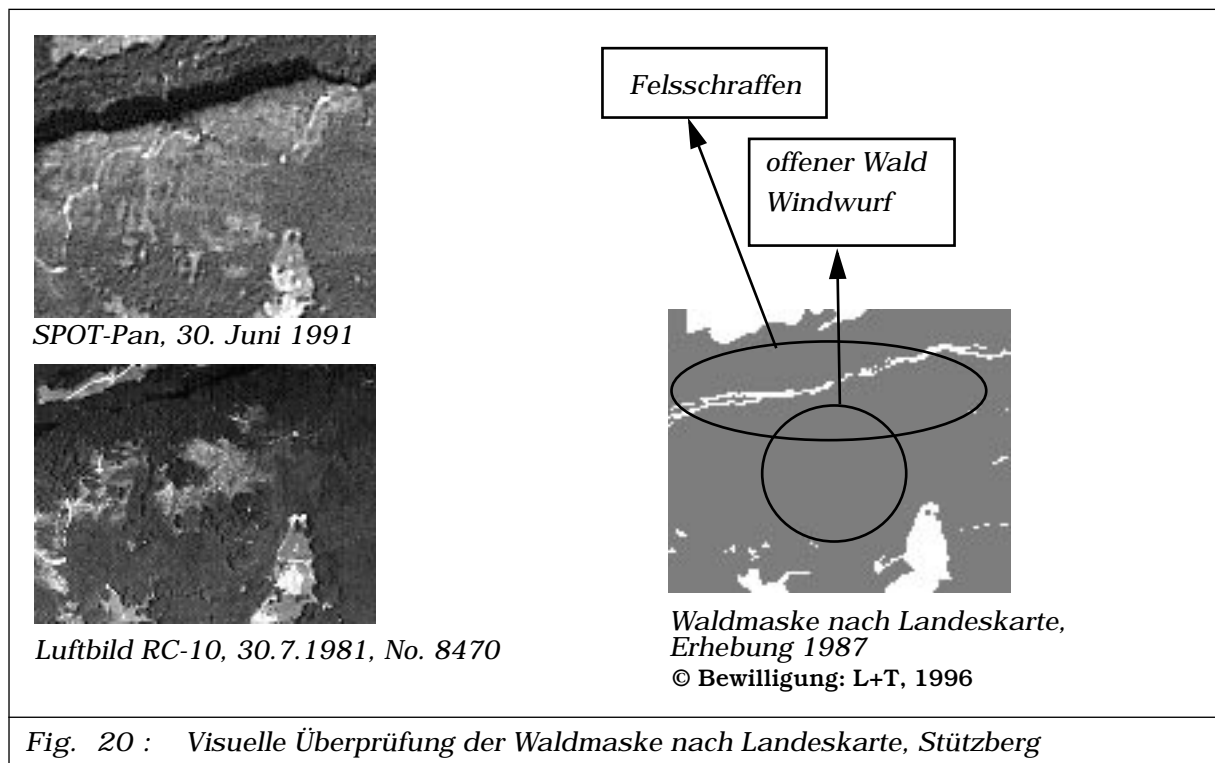
send, wie beispielsweise an der natürlichen oberen Waldgrenze oder in Feuchtgebieten, so tritt an Stelle der markanten Grenzlinie eine Mischung von Punkt und Kreissignaturen. Offene Wälder mit geringem Schlussgrad, Gebüsch- und Buschwälder, Obstbaumkulturen, Einzelbäume und Parkanlagen werden nur noch mit den genannten Signaturen ausgewiesen, welche in der Regel kaum lagetreu, geschweige denn proportional zur Dichte sind. Im Grüntonauszug fehlen diese Gebiete vollständig. Felsgebiete werden in der Karte mit Schraffuren dargestellt und in vielen Fällen (leider nicht in allen!) die darunterliegende Waldmaske freigestellt. Sind diese Gebiete aber bewaldet, so fehlt der Grünton.

Der Grüntonauszug der Landeskarte bietet demnach nur eine eingeschränkte Referenzgrundlage für die Satellitenbildklassifikation. [Maier M., 1994] versuchte darum in seinem Testgebiet (Zernez) die Waldmaske der Landeskarte manuell um die Gebüschwald- und offenen Waldflächen zu ergänzen, wobei dies im Grunde einer Neuinterpretation der Luftbilder entspricht, auf deren Basis die topographischen Karten erstellt wurden. Für operationelle Inventuren der Waldfläche über die gesamte Schweiz ist dieses Vorgehen ökonomisch nicht vertretbar. Der Grüntonauszug bleibt aber vorläufig die einzige, wirklich flächendeckende Waldflächenreferenz in der Schweiz. Genauigkeitsanalysen von Satellitenbildinterpretationen in Bezug auf diese Referenz sind nur unter Berücksichtigung der erwähnten Unzulänglichkeiten und der zugrundeliegenden Definition zu sehen und entsprechend zu relativieren.

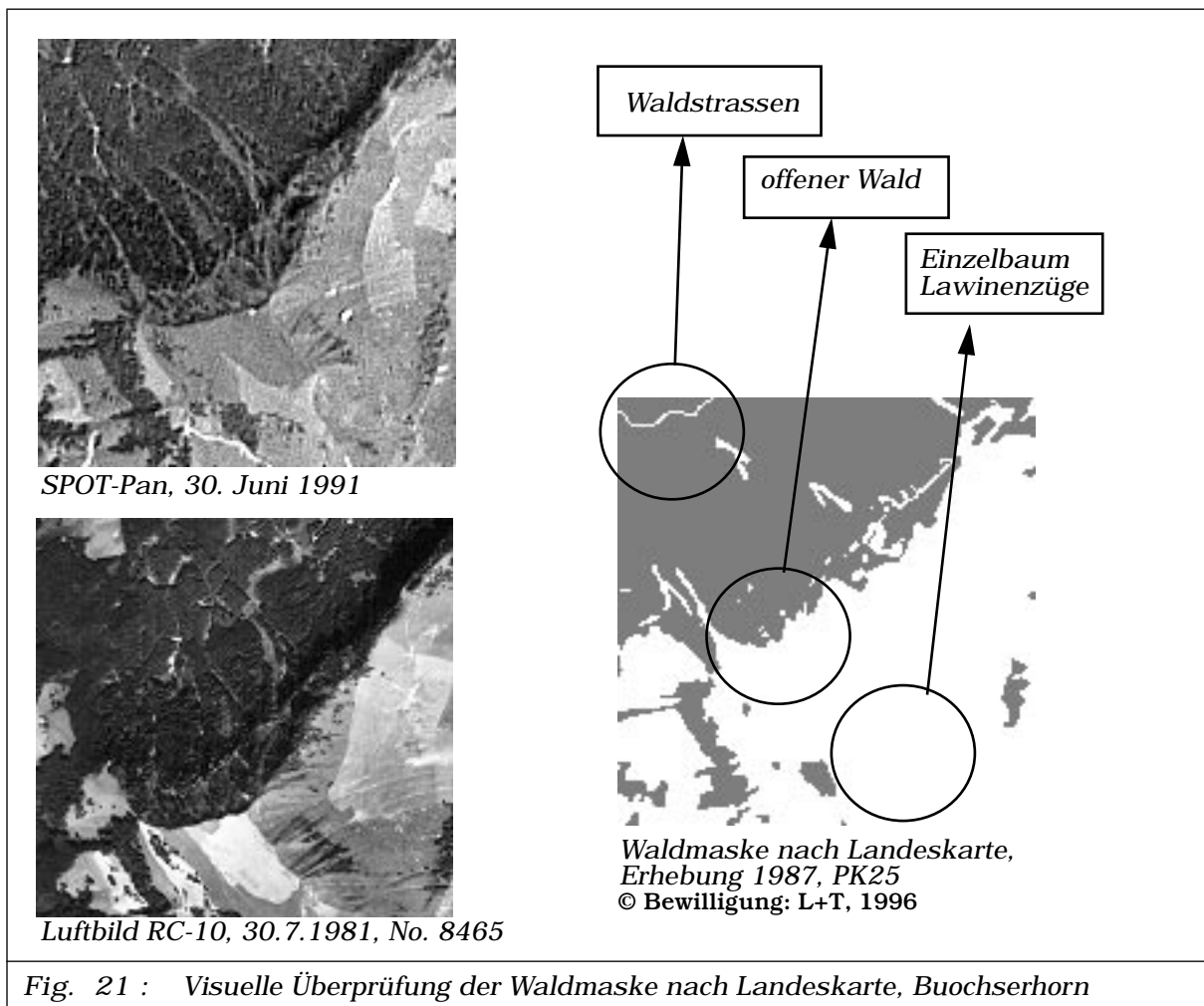
3 - 3.4.2 Visuelle Qualitätsanalyse mit SPOT-Pan-Daten

Der Grüntonauszug der Landeskarte in 10m Rasterauflösung, gewonnen durch Vektor-Raster Konversion ab den vektoriiellen Daten wurde dem georeferenzierten SPOT-Pan Satellitenbild überlagert. Visuell wurde die Übereinstimmung der Waldfläche der Bodenreferenzdaten mit den Satellitendaten analysiert und auf Schwachpunkte gemäss [3 - 3.4.1.4] und zeitliche Veränderungen wie in [3 - 1.2.3] beschrieben, untersucht. Diese Analyse ist weder vollständig noch quantitativ.

Die Darstellung [Fig - 20] zeigt einen Ausschnitt des Stützberges, nordöstlich von Emmetten. Auffallend sind die durch Felsschraffuren verdrängten Waldgebiete auf der Landeskarte zu sehen. Dieser Effekt kann über weite Teile des Kartenblattes gefunden werden, obwohl die Felskanten, wie aus dem Satellitenbild und dem Luftbild ersichtlich, zumeist bestockt sind. Für die Auswertung der Satellitendaten spielen diese Felskanten aber eine untergeordnete Rolle, da sie zumeist durch Schlagschatten beeinflusst sind und kaum auswertbare Reflexionen gemessen werden können. Gravierender sind aber die Gebiete mit offenem Wald (auf der Landeskarte mit Kreissignaturen gekennzeichnet) oder mit Windwurf. Im Luftbild aus dem Jahre 1981 erkennt man diese Windwurffläche deutlich. Nach Landeskarte mit Erhebungsdatum 1987, wird sie aber weiterhin als Waldfläche geführt, da sie rechtlich und logisch weiterhin dem Wald zugeordnet werden muss. Zum Zeitpunkt der Satellitendaten, 1991, sind diese Gebiete bereits wieder leicht bestockt. Es ist aber fraglich, ob sie spektral eindeutig dem Wald zugeordnet werden können. Der helle Bodenanteil ist vermutlich zu hoch.



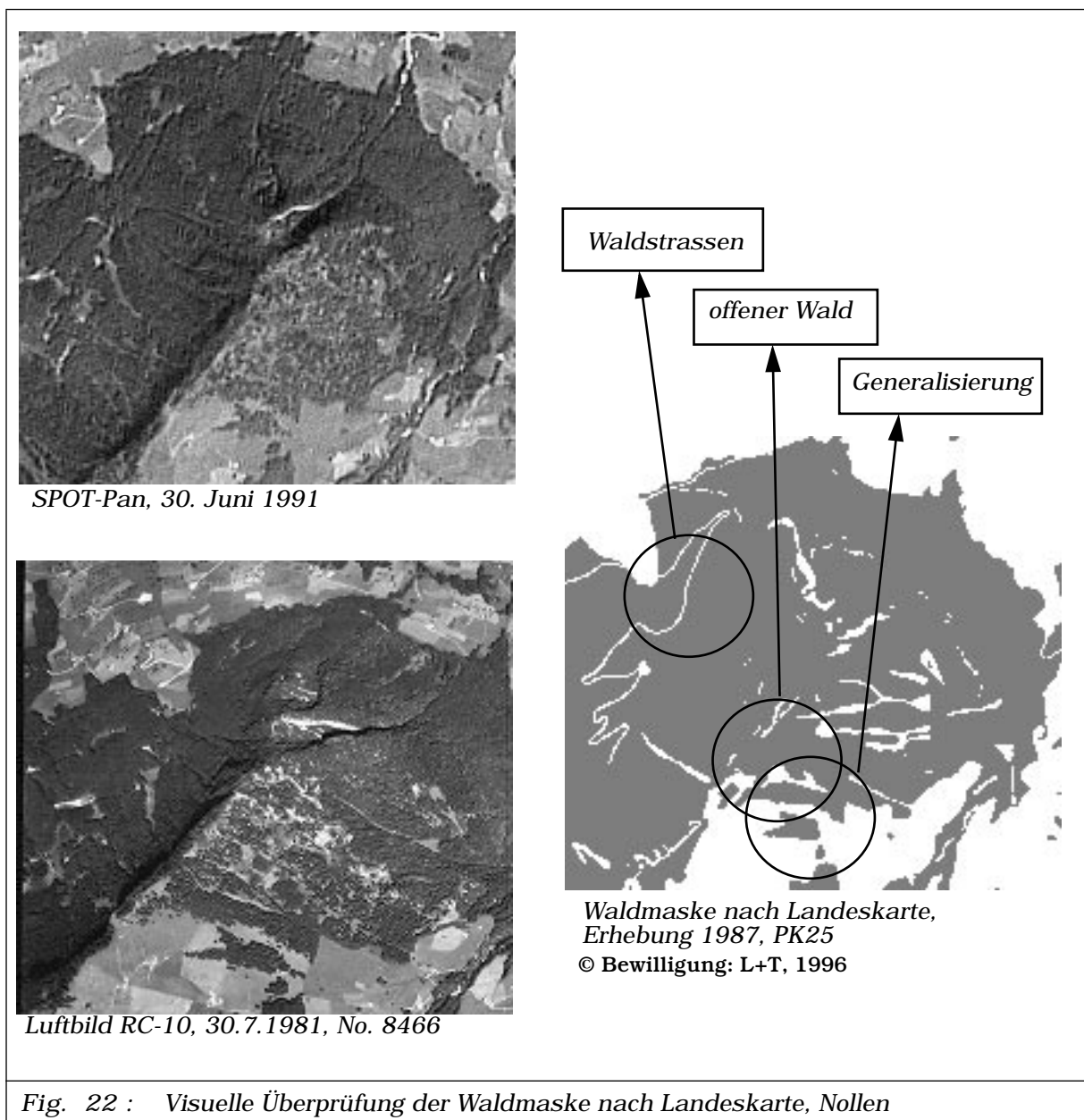
In [Fig - 21] sind am Buochserhorn weitere bestockte Flächen, welche nicht auf der Landeskarte als Wald erscheinen, zu finden. Die hier vorkommende Strauchvegetation ist spektral aber auch definitions-mässig [3 - 3.4.1] dem Wald zuzuordnen. Die Einzelbaumgebiete, in diesem Falle sind es Waldgebiete in Lawinenrunsen, erscheinen ebenfalls nicht auf der Waldmaske.



Strassen, welche die Wälder queren, sind auf der Landeskarte 1:25'000 generalisiert. Strassen 4.Klasse (mind. 1,8m breit) und kleiner werden als lagetreue Liniensignatur in Schwarz gezeichnet und beeinflussen die Grüntonmaske nicht, da sie überdrückt werden. Strassen 3. Klasse (mind. 2,5m breit) und grösser werden als linienhaftes Flächenelement dargestellt. Dabei wird die Grüntonmaske ausgespart, unabhängig

davon, ob das Kronendach geschlossen ist. Solche Lücken in der Waldmaske sind in [Fig - 21] im Nordwesten und in [Fig - 22] zu finden. Es handelt sich dabei um eine Strasse 3. Klasse, welche gemäss den Luftbildern und Satellitendaten über grosse Bereiche von Baumkronen überdeckt und spektral dem Wald zuzuordnen ist.

[Fig - 22] zeigt einen Ausschnitt im Gebiete des Nollen, dem nördlichen Ausläufer des Buochserhorns.



Dieses Gebiet illustriert die Generalisierungsproblematik am Beispiel der Darstellung von Strassen in Waldgebieten, aber auch am Beispiel der Unterschreitung der minimalen bestockten Fläche, welche nach Definition als Wald ausgeschieden wird. Die am südlichen Rand des Ausschnittes liegende Waldparzelle ist im Satellitenbild mit 10m Auflösung eindeutig zu klein und nicht formgemäss ausgeschieden. Diese Generalisierungen spielen, je schlechter die zu analysierenden Satellitendaten aufgelöst sind, eine immer geringere Rolle. Statistisch gesehen, ist aber bei feinen Auflösungen ein zu geringer Waldbedeckungsgrad nach Landeskarte zu erwarten. Das offene, aufgelöste Waldgebiet im Zentrum stellt in diesem Sinne ein klassisches Beispiel dar. Sind auf dem Luftbild deutliche Wald- und Nichtwaldgebiete auf kleinstem Raume erkennbar, so verschwimmen diese auf dem SPOT Bild mehr und mehr, während auf der Waldmaske die Situation sehr schemenhaft und stark generalisiert worden ist.

Zusammenfassend muss die Waldmaske nach Landeskarte als in vielen Fällen nicht adäquat für eine Analyse in Zusammenhang mit Satellitendaten ab 10m Auflösung und schlechter erachtet werden. Generalisierungen, offene Wälder und Waldgrenzen, Einzelbäume und Buschvegetation lassen vermuten, dass die ausgeschiedene Waldfläche zu gering ausgefallen ist. Bei Verwendung der Waldmaske als Bodenreferenz sind solche Unzulänglichkeiten nicht klar abgrenzbar und erkennbar. Fehler wie Windwurf, Aufforstungen etc., bedingt durch die zeitliche Differenz zwischen den Erhebungsjahren der Karte und den Satellitendaten, treten lokal auf und sind als solche klar ersichtlich. In diesem Falle kann eine genaue Analyse des Klassifikationsresultates Vergleichsfehler verhindern helfen.

3 - 3.5 Waldmaske mittels analoger Interpretation

Der analoge Vergleich des SPOT-Pan Bildes mit der Waldmaske nach Landeskarte lässt das Potential erahnen, welches zur Waldflächenbestimmung in den Satellitendaten steckt. Das menschliche Auge vermag sehr einfach und schnell bestockte Gebiete, sprich Waldflächen, abzugrenzen und zu erfassen. Selbst ein

Laie kann dies in einer solch ikonennahen Darstellung mit grosser Sicherheit. Gebiete verschiedenster Beleuchtung können alleine aufgrund des Kontrastes der bestockten Fläche gegenüber seiner Umgebung ausgewertet werden. Selbst die durch Kondensstreifen von Flugzeugen und von Dunst beeinflussten Gebiete stellen, im Gegensatz zur digitalen Auswertung, basierend auf den Reflexionswerten, keine nennenswerte Probleme dar.

Es lag daher auf der Hand, eine neue Waldmaske als verbesserte Bodenreferenz gegenüber dem Grüntonauszug der Landeskarte ab den georeferenzierten SPOT-Pan-Daten herzuleiten und in der Arbeit zu verwenden. In den nachfolgenden Kapiteln wird die Entstehung dieser '*analogen Waldmaske*' erläutert und der Waldmaske ab Landeskarte gegenübergestellt.

3 - 3.5.1 Verfahren zur Herstellung der analogen Waldmaske

Die analoge Auswertung digitaler Satellitenbilder ist historisch aus der Luftbildphotogrammetrie gewachsen und wird Dank der Leistungsfähigkeit der menschlichen Kognition nie vollständig durch digitale Analysen verdrängt werden. Analoge Interpretationen bedingen keine teure Hardware. Sie können sich auf das Expertenwissen lokaler Fachkräfte, welche die zu detektierenden Objekte aus eigener Erfahrung kennen, abstützen. Analoge Satellitenbildinterpretation kann auf jedem visualisierten Datensatz erfolgen, sei es direkt an einem Bildschirm oder auf Analogkopien wie photographischen Aufbelichtungen und Vergrößerungen. Gemäss den Ansprüchen an das zu erwartende Endprodukt kann die Auswertung auf Daten in originaler Geometrie, aber auch auf georeferenzierten Bildern erfolgen. Wenn es das verwendete Sensorsystem erlaubt, so sind photogrammetrische Auswertungen auf digitalen Arbeitsstationen wie auch Analogkopien möglich (z. Bsp. SPOT Stereo Aufnahmen). Aus der Vielzahl von Publikationen der vergangenen Jahre seien stellvertretend nur einige wenige erwähnt: [Akça A., et al., 1987], [Kuntz S., 1991], [Schmitt-Fürntratt G., 1991].

Als Grundlage für die Herstellung einer Waldmaske mittels analoger Interpretation diente die georeferenzierte SPOT-Pan Szene mit 10m geometrischer Boden-

auflösung (siehe Kap. [4 - 2.5.1]). Der Bearbeitungsausschnitt mit 1720 *1200 Pixeln entspricht dem Untersuchungsgebiet Beckenried [2 - 2]. Die Auswertung erfolgte an einem 17" Bildschirm eines Macintosh (ref. Glossar) Computers mit der Bildverarbeitungssoftware NIH-Image. Dazu wurde die Software mit einem Paket von zusätzlichen Funktionen (Makros) ergänzt, welches die analoge Interpretation am Bildschirm mittels Computermaus unterstützt [2 - 6]. Bildverbesserung durch Grauwertmanipulationen, lokale Kanten- und Flächenverfolgungsalgorithmen, verbesserte Cursorsteuerungen basierend auf Pixelkanten und Verwaltung der erhobenen Flächen sind nur einige der neu entwickelten Makros.

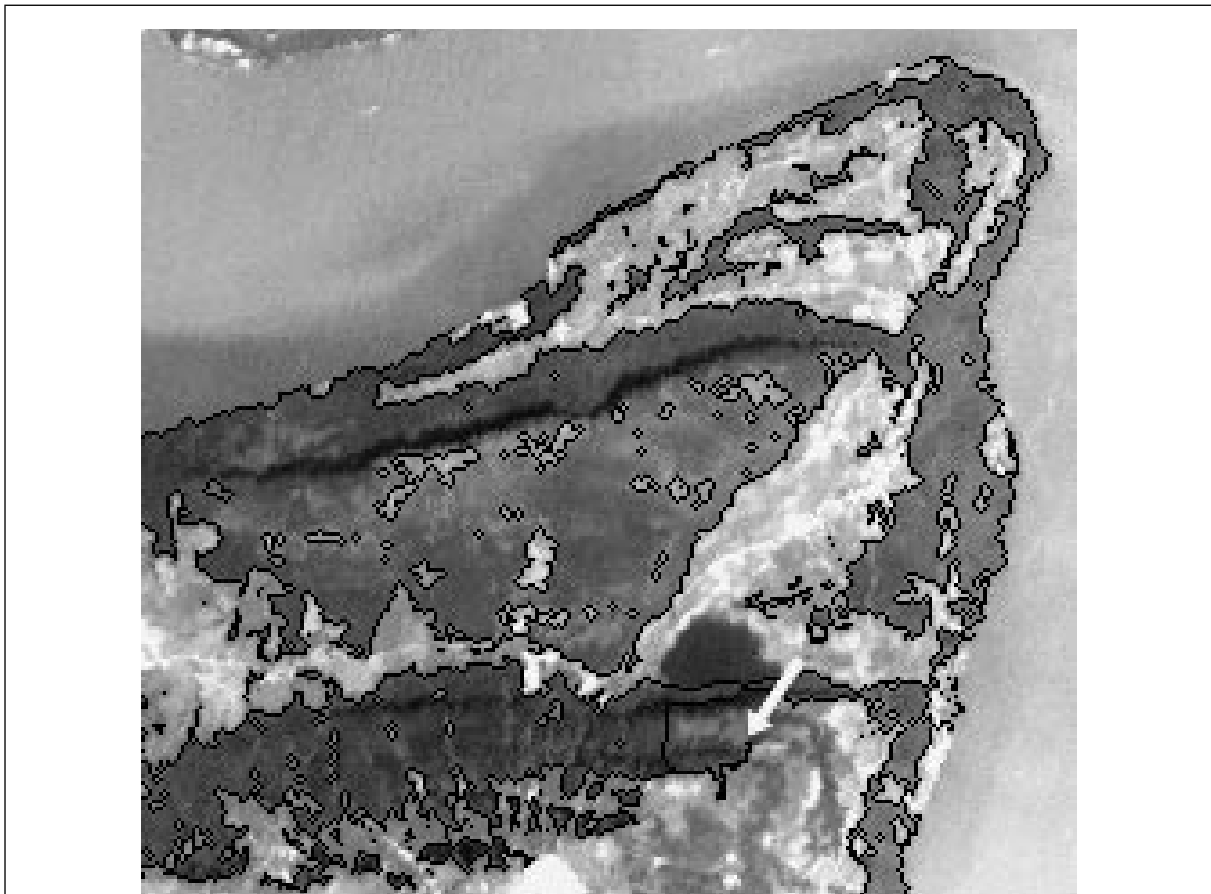


Fig. 23 : Analoge Satellitenbild-Interpretation am Bildschirm basierend auf georeferenzierten SPOT-Pan-Daten

Das ganze Untersuchungsgebiet wurde ausschnittsweise Pixel für Pixel in Wald- und Nichtwaldgebiete analog getrennt [Fig - 23]. Als Orientierungs-

hilfe für gewisse Gebiete dienten zusätzlich die Luftbilder und die Landeskarte 1:25'000, Beckenried. Für das Untersuchungsgebiet Beckenried waren ca. 4 Arbeitswochen zur Interpretation notwendig.

Die Interpretation bot kaum Schwierigkeiten. Selbst das durch den Kondensstreifen beeinflusste Gebiet konnte nahtlos interpretiert werden. Einzelbäume und bestockte Flächen, kleiner als die Auflösung der SPOT-Pan-Daten (10m * 10m) wurden nach lokalen Grauwertverteilungen der jeweiligen Klasse zugeordnet. Schattenwurf an Waldrändern konnten in den meisten Fällen eindeutig identifiziert werden.

Ein Gebiet von 4km * 4km Ausdehnung in der Nähe des Buochserhorns wurde zu Beginn versuchsweise dreimal neu interpretiert. Die Differenzen in der Waldmaske lagen bei einigen wenigen Bildelementen (<3%) und stimmten in der Lage sehr gut übereinander. Deshalb kann eine gewisse Konsistenz der Qualität in der analogen Interpretation über das ganze Untersuchungsgebiet vorausgesetzt werden. Sicherlich ist diese Konsistenz geprägt durch die persönliche Generalisierungs- und Zuweisungstendenz des Interpreten.

3 - 3.5.2 Kenndaten der analogen Waldmaske

Im Vergleich mit der Bodenreferenz, basierend auf dem Grüntonauszug der Landeskarte [Tab - 12] wurden bei der analogen Interpretation der Satellitendaten bedeutend mehr Waldflächen ausgeschieden.

Untersuchungsgebiet Beckenried 10m Auflösung	Fläche A in [%]	Fläche A in [m2]	Perimeter P in [m]	Kompakt- heit C
Wald nach analoger Interpretation von SPOT-Pan-Daten	31.20	64'394'300	1'914'560	56'923
Wald nach Landeskarte Vektordarstellung	28.97	59'789'232	1'302'252	28'364
Wald nach Landeskarte Rasterdarstellung	29.00	59'853'300	1'484'960	36'842

Tabelle 12: *Fläche A, Perimeter P und Compactness C für die analog interpretierte Waldmaske vs. Landeskarte*

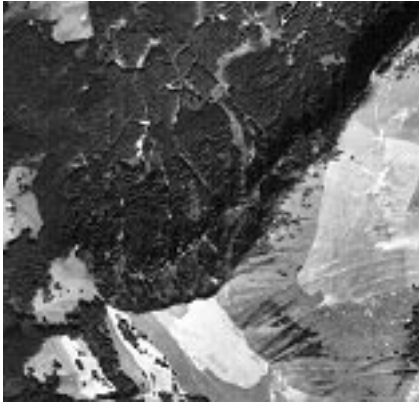
Gegenüber den vektoriiellen Daten entspricht dies einer Flächenzunahme von 7,7%, gegenüber der Rasterrepräsentation von 7,6%. Vorwiegend die in der Karte nicht erfassten Gebiete offenen Waldes, der Waldstrassen und Einzelbäume haben zu dieser Steigerung geführt. Die hohen Perimeter- und Kompaktheitsmasse sind zusätzlich ein deutliches Zeichen für eine feiner aufgelöste Erfassung (Minimalflächen) bei der analogen Interpretation. Zusätzlich ist der Generalisierungsgrad tiefer.

3 - 3.5.3 Vergleich mit Waldmaske L+T

Neben der numerischen Gegenüberstellung der analogen Waldmaske und der Maske nach Landeskarte im vorangegangenen Kapitel [3 - 3.5.2], drängt sich ein visueller Vergleich, wie in Kapitel [3 - 3.4.2] auf. Wie aus [Fig - 24] und [Fig - 25] anschaulich zu entnehmen ist, konnten bei der visuellen Interpretation der SPOT-Pan-Daten verschiedene Fehler, die in der Landeskarte vorkommen eliminiert werden.

Offene Waldgebiete, auslaufende Waldgrenzen bis hin zur Baumgrenze, Einzelbäume und kleine Flächen in Lawinenzügen wurden genau erfasst. Eine markante Flächenzunahme des Waldes in der analogen Waldmaske ist die Folge. Der Generalisierungsgrad ist deutlich schwächer ausgefallen, was sich besonders in offenen Strukturen und Kleinstflächen auswirkt.

Die Verbesserungen können durchgehend über das ganze Untersuchungsgebiet verfolgt werden. Sehr grobe Diskrepanzen wie Windwurf und Kahlschlag entsprechen in der analogen Interpretation natürlicherweise dem Aufnahmejahr der verwendeten Satellitendaten. Der angewandte Interpretationsschlüssel, d.h. die Walddefinition ist zusätzlich der Aufnahmesituation des Satellitensystems angepasst. Alle Flächen, die bestockt sind und einen grossen Schlussgrad aufweisen, wurden erfasst. Auch darum ist diese neue Maske als Referenz zur Überprüfung von digitalen Satellitenbildklassifikationen besser geeignet.



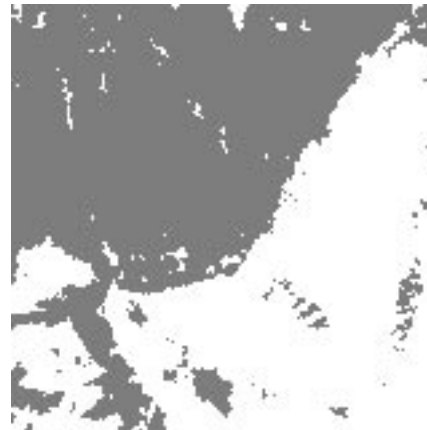
Luftbild RC-10, 30.7.1981, No. 8465



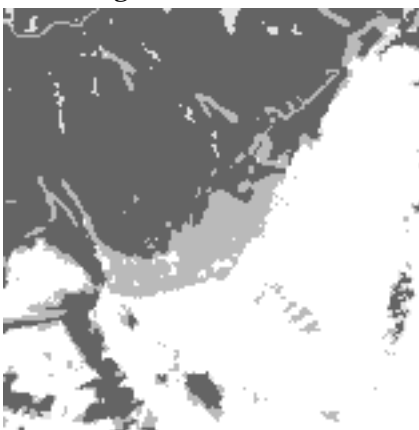
SPOT-Pan, 30. Juni 1991



Waldmaske nach Landeskarte,
Erhebung 1987, PK25



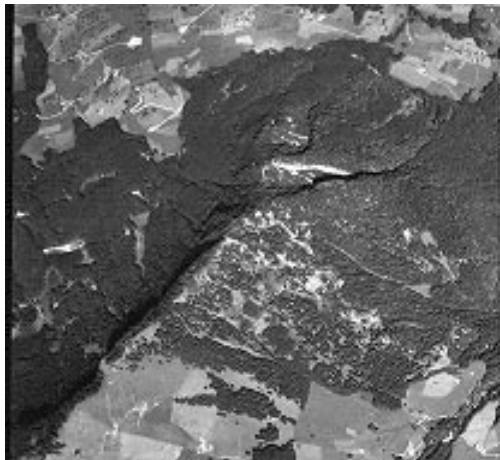
Waldmaske nach SPOT-Pan



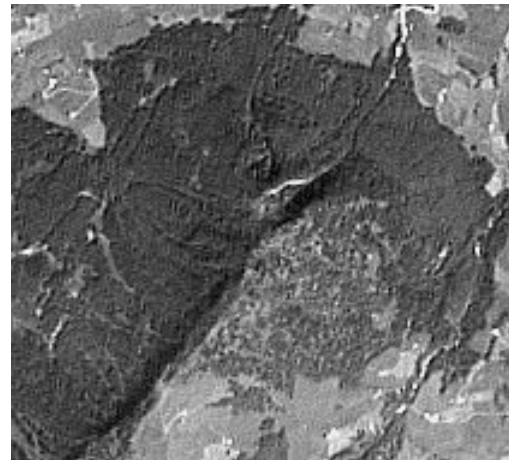
Differenz der Masken



Fig. 24 : Visuelle Gegenüberstellung der Waldmasken, Buochserhorn
 vergleiche [Fig - 22, Seite 118], [© Bewilligung: L+T, 1996]



Luftbild RC-10, 30.7.1981, No. 8466



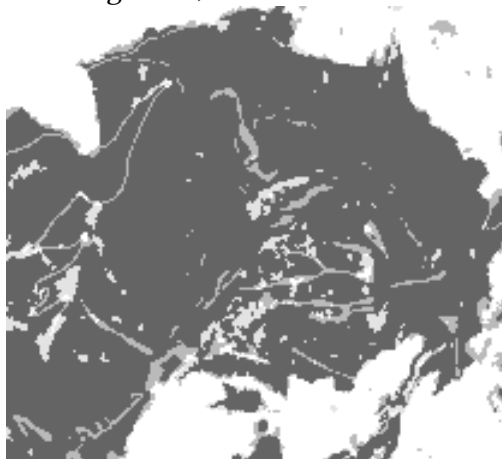
SPOT-Pan, 30. Juni 1991



Waldmaske nach Landeskarte,
 Erhebung 1987, PK25



Waldmaske nach SPOT-Pan



Differenz der Masken



Fig. 25 : Visuelle Gegenüberstellung der Waldmasken, Nollen
 vergleiche [Fig - 22, Seite 118], [© Bewilligung: L+T, 1996]

Die analoge Waldmaske basiert selbst auf Satellitendaten (SPOT-Pan). Wird sie als Referenz der Klassifikationsprodukte weiterer Satellitendaten verwendet, so muss die Unabhängigkeit der Informationen gewährleistet werden. Wie in [KAPITEL 5] ausgeführt, wird mit den SPOT-Pan-Daten alleine keine digitale Wald- Nichtwaldunterscheidung durchgeführt. Gegenüber den Klassifikationen mit SPOT-XS-Daten ist die Datenunabhängigkeit durch physisch und spektral verschiedene Sensoren, HRV 1 und 2 gegeben. Dass die Landsat-TM-Daten unabhängig sind, ist selbstverständlich. Fließen gleichzeitig aber Pan, XS und/oder TM-Daten in die Klassifikation ein, so kann man die Datenunabhängigkeit mit der verschiedenen Auflösung und der Interpretationsart begründen. Die analoge Waldmaske wurde visuell alleine aufgrund des lokalen Kontrastes, der Textur und Nachbarschaftssituation generiert. Die angewendete digitale Klassifikation erfolgt aber nur mit Hilfe des unterschiedlichen Spektralverhaltens verschiedener Bodenobjekte. Die Waldmaske, analog interpretiert ab SPOT-Pan wird im weiteren als unabhängig und qualitativ hochwertig betrachtet.

3 - 3.5.4 Skalierung und Vergleich

Die Waldmaske, analog ab den SPOT-Pan-Daten interpretiert liegt in einer geometrischen Auflösung von 10m * 10m vor. Zur weiteren Verwendung als Bodenreferenz wurde sie wie die Masken ab Landeskarte, flächenbasiert in die gröberen Auflösungen skaliert [3 - 3.2.2].

Auflösungen	Wald Fläche in %	Kompaktheit	Perimeter in m
10m	31.20	56923	1914560
16m	31.49	35607	1521216
20m	32.84	29787	1420920
25m	31.25	24205	1249400
40m	31.88	14427	974320
50m	31.27	11148	848200
80m	31.49	5830	615520
100m	31.36	4516	540600

Tabelle 13: Fläche, Perimeter und 'Compactness' der Waldmaske nach analoger Satellitenbilddauswertung Ausgangsdaten 10m Auflösung

Wie erwartet zeigt sich bei der Skalierung der gleiche Binärisierungseffekt wie bei den Masken ab Landeskarte. Solange die skalierte Auflösung nicht auf dem 50% Flächenbedeckungsniveau trennbar ist, wird die neue Waldfläche regelmässig überschätzt. Interessanterweise ist dieser Effekt bei der analogen Waldmaske nach größeren Auflösungen rückläufig, dies im Gegensatz zu den Landeskartenmasken [3 - 3.2.2].

Im Falle einer eindeutigen Binärisierungsmöglichkeit zeigt sich hingegen auch die Tendenz zur Flächenzunahme mit größerem Raster. Das Ausmass aber erreicht knapp 0,5% der Ausgangsfläche und ist vernachlässigbar klein. Perimeter, und damit verbunden die Kompaktheit, liegen infolge des höheren Detaillierungsgrades durchwegs über den Werten der Masken nach Landeskarte. Sie nähern sich ihnen aber mit größerer Auflösung.

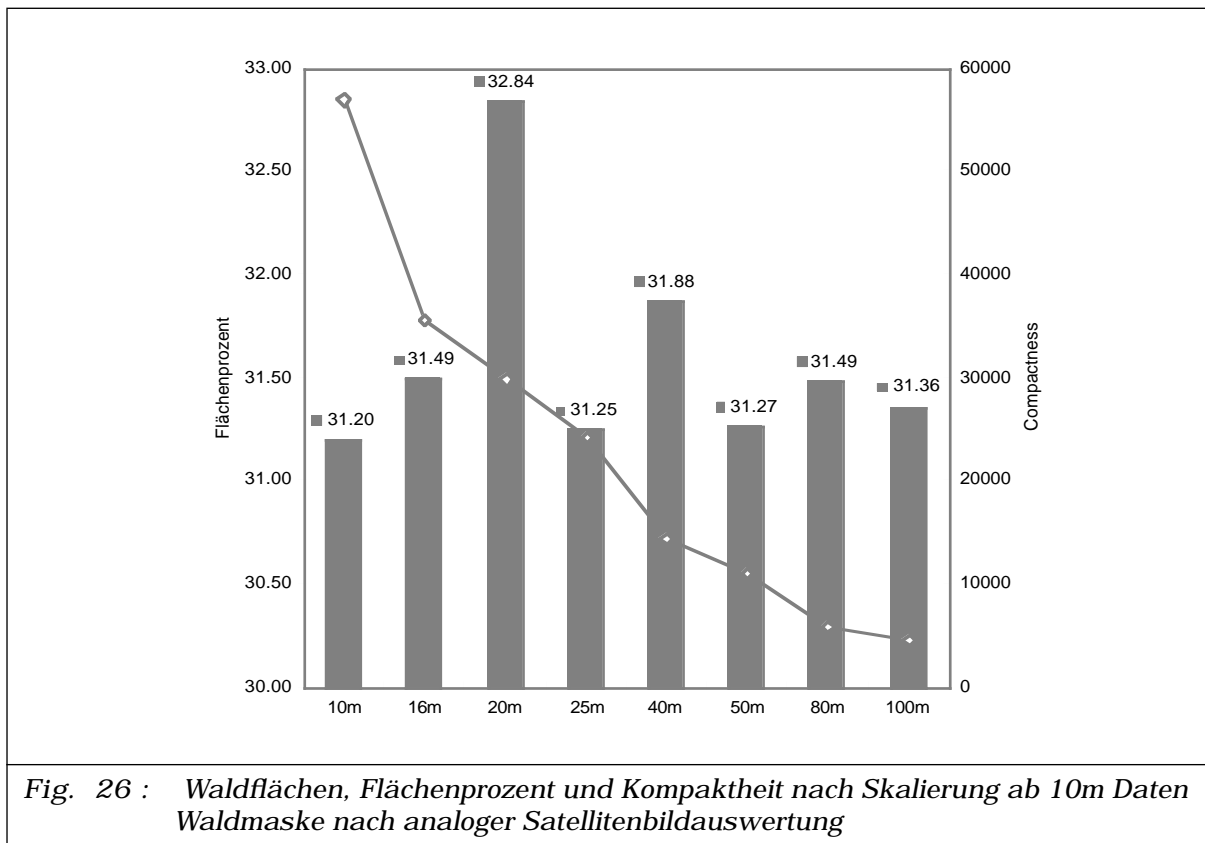
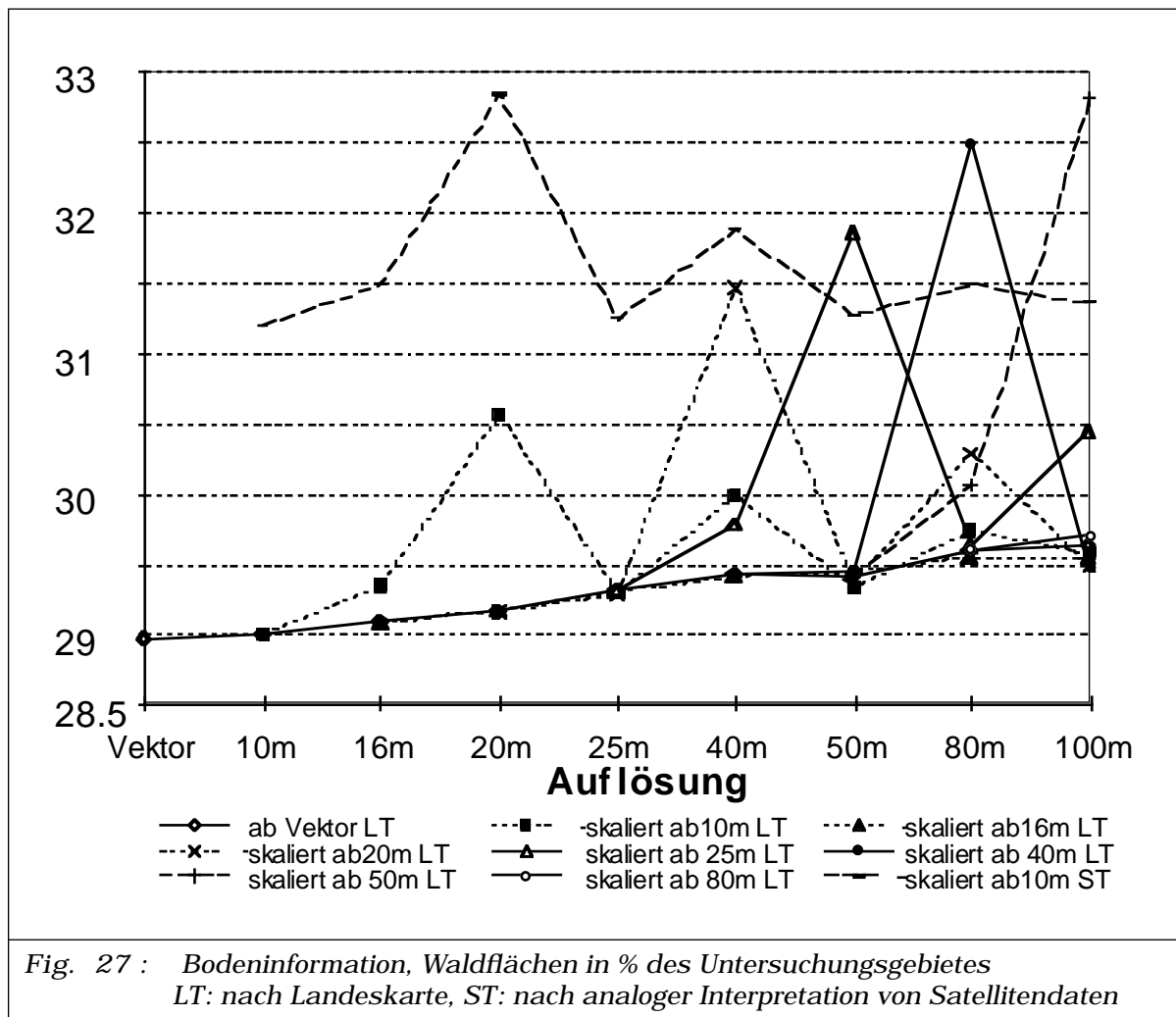


Fig. 26 : Waldflächen, Flächenprozent und Kompaktheit nach Skalierung ab 10m Daten Waldmaske nach analoger Satellitenbildauswertung

Als Zusammenfassung sind die Waldflächen in Prozent des Untersuchungsgebietes in [Fig - 27] sowohl für die auf der Landeskarte basierenden und abgeleiteten Masken wie auch für die Masken nach analoger Satellitenbildinterpretation dargestellt.



KAPITEL 4 Vorverarbeitung II: Geländemodell, Satellitendaten

4 - 1 GELÄNDEMODELL DHM25

Für diese Untersuchungen steht das Rastergeländemodell DHM25 der Schweizerischen Landestopographie L+T zur Verfügung. Die Maschenweite beträgt 25m * 25m in horizontaler Richtung. Die Höhenangaben sind in dm und erfordern eine minimale Speichertiefe von 16 bit (ref. Glossar). Das digitale Geländemodell wird in dieser Arbeit für die Georeferenzierung der Satellitendaten, für Beleuchtungskorrekturen und auch zur Ausmaskierung von Schlagschattengebieten in der Klassifikation verwendet. Weitere Derivate des digitalen Geländemodells wie Hangneigung und Exposition, Parameter welche in radiometrischen Korrekturen oder Klassifikationen Verwendung finden könnten, wurden nicht explizit berechnet.

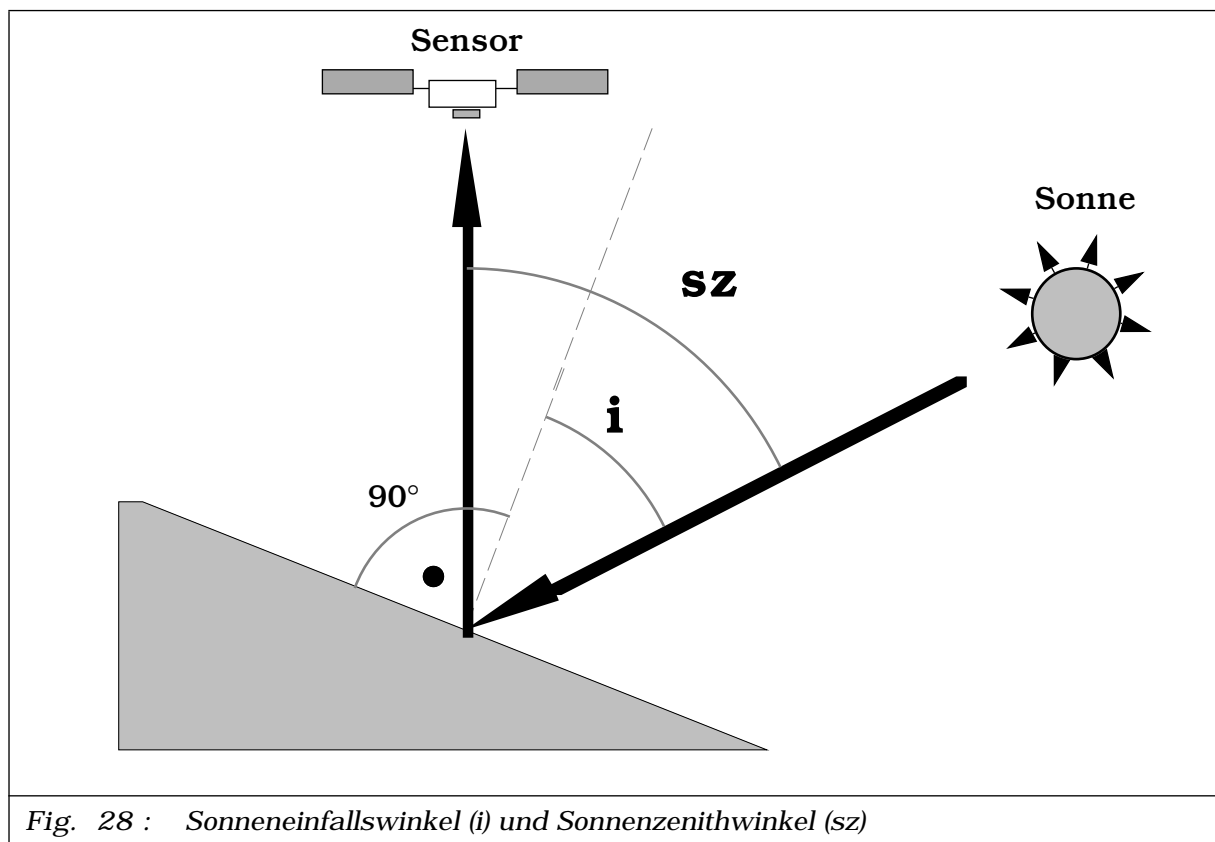
4 - 1.1 Skalierung auf die Arbeitsgrössen

Das Geländemodell deckt das gesamte Kartenblatt 1:25'000, Beckenried, ab und musste zur Verwendung auf die Grösse des Untersuchungsgebietes von 17,2km * 12km zugeschnitten werden. Zusätzlich

wurde es durch bilineare Interpolation den Pixelgrößen von SPOT-Pan (10m *10m Maschenweite), von SPOT-XS (20m * 20m Maschenweite) und der zusätzlichen Arbeitsauflösung von 100m * 100m Maschenweite angepasst. Für die Verwendung in Zusammenhang mit den Landsat-TM-Daten, welche eine Rohdatenauflösung von ca. 30m * 30m haben, wurde die Originalauflösung von 25m * 25m Maschenweite beibehalten. Der bilineare Interpolationsalgorithmus wurde gewählt um den Rasterpunkt basierten Höhenangaben gerecht zu werden (Satellitendaten sind Flächenkontinua und erfordern flächenbasierte Interpolationsalgorithmen [3 - 3.2.1]).

4 - 1.2 Berechnung der Illuminationswerte

Die Korrektur von Beleuchtungseinflüssen der Sonne auf die Szene in Satellitenbildern beruht in den meisten Ansätzen auf dem Cosinus des Sonneneinfallswinkels, dem 'incidence' Winkel i [Fig - 28].



Er repräsentiert, unter der lambertianen Annahme, den Anteil der direkten Sonnenstrahlung, welche ein Pixel am Boden erreicht. Die Illumination ist darum von der Orientierung gegenüber der aktuellen Sonnenposition abhängig [Itten K., et al., 1992, pp. 5.]

Die aktuelle Sonnenposition ist gegeben durch die Überflugszeit, das Datum und die genauen Ortskoordinaten. Die Angaben dazu sind aus den Headerinformationen der Satellitendaten ersichtlich [Tab - 7, Seite 79]. Für das relativ kleine Untersuchungsgebiet Beckenried kann die aktuelle Sonnenposition, unter der Annahme parallel einfallender Sonnenstrahlen, als konstant betrachtet werden.

Aus der Landeskarte wurden die geographischen Koordinaten des Zentrums des Untersuchungsgebietes übernommen und die Sonnenposition für die verwendeten SPOT und Landsat-Daten bestimmt.

Untersuchungsgebiet Beckenried	SPOT Pan und XS	Landsat-TM
geographische Koordinaten des Zentrums	46°56'75" N 8°30'50" E	
Aufnahmedatum	30.6.1991	11.7.1991
Aufnahmezeit (UTC)	10:31 h	09:40 h
Sonnenzenithwinkel	26.33°	33.21°
Sonnenazimuthwinkel	148.80°	128.19°

Tabelle 14: Sonnenzenith- und Azimuthwinkel für die SPOT und Landsat-Daten des Untersuchungsgebietes Beckenried

Der Cosinus des Sonneneinfallswinkels ($\cos(i)$) für die Geländemodellauflösungen 10m und 20m wurde gemäss den SPOT Parametern, die Maschenweite 25m nach den Landsat Parametern berechnet.

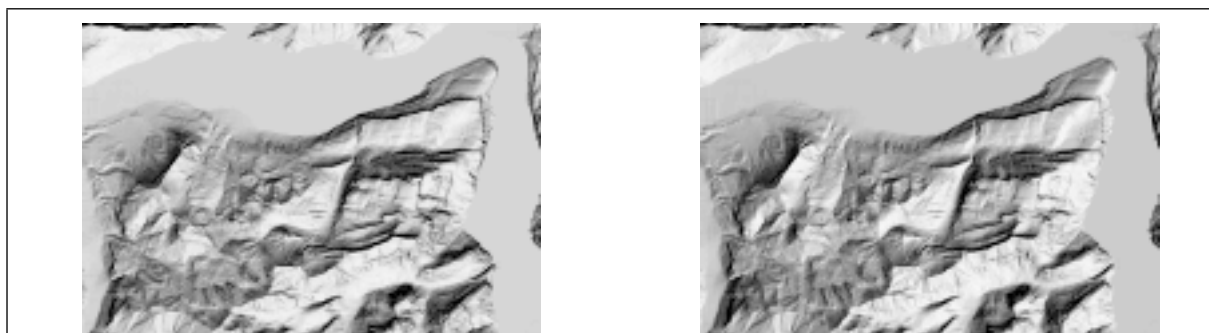


Fig. 29 : Cosinus des Sonneneinfallswinkels, 100m Maschenweite links: nach SPOT Parametern, rechts: nach Landsat Parameter [Tab - 14]

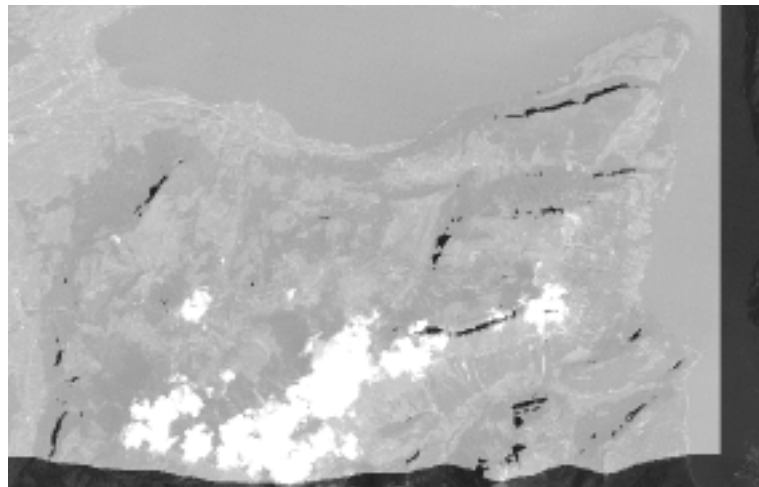
Damit digitale Geländemodelle für Beleuchtungskorrekturen verwendet werden können sollten sie nach [Goodenough D., et al., 1990] mindestens die vierfache Auflösung der zu korrigierenden Daten haben um das Gelände vernünftig zu modellieren. Diese Anforderung kann bei der vorliegenden Datelage nicht erfüllt werden. Die Originalauflösung des Geländemodells entspricht in etwa nur der Sensorauflösung von Landsat-TM. Trotzdem wird der Einsatz dieses Geländemodells für die Beleuchtungskorrektur als sinnvoll betrachtet. In dieser Arbeit werden auch Untersuchungen in der Maschenweite 100m für beide Sensoren gemacht. Zur Korrektur dieser Daten wurde der Cosinus des Sonneneinfallswinkels mittels Skalierung der 10m Auflösung (SPOT XS und Pan) und der 25m Auflösung (Landsat) bereits berechneter Winkel generiert [Fig - 29].

4 - 1.3 Berechnung der Schlagschattenmasken

Gebiete, die durch Schlagschatten beeinflusst werden, können in den Satellitendaten infolge mangelnder Reflexion nicht ausgewertet werden. Sie werden in der Klassifikation gesondert bearbeitet. Die Generierung der Schlagschattenmasken erfolgte nach den Sonnenstandsparametern [Tab - 14, Seite 131] mit den skalierten Geländemodellen, wobei wiederum die 100m Maschenweite mittels Skalierung der 10m und 25m Schlagschattenmasken erfolgte.

*Fig. 30 : Schlag-
schattengebiete zur
Zeit der Landsat-TM-
Daten*

*11.7.1991, 09:40h
im Hintergrund Land-
sat-TM Kanal 3*



Der verwendete Algorithmus nach [Bitter P., 1990, p. 57], berechnet, ausgehend von jedem Bildelement, ob die Sonne sichtbar ist, indem das Geländemodell in Sonnenrichtung abgesucht wird. Schneidet der Suchstrahl das Gelände, wird das Element dem Schlagschatten zugeordnet. Verlässt der Suchstrahl das Geländemodell, ohne eine zuvor festgelegte Maximalhöhe erreicht zu haben, muss das betroffene Bildelement als nicht definierbar bezeichnet werden. Diese Elemente sind in [Fig - 30] als breiter Streifen am Süd- und Nordrand der Szene ersichtlich. Die Verwendung der Schlagschattendaten zur Maskierung der Trainingsflächen in der Klassifikation führte zur Zusammenfassung der Kategorien 'Schlagschatten' und 'nicht definierbare Gebiete' zu einer einheitlichen Maske. [Tab - 15] gibt einen Überblick der Maskenanteile. Für Flächenvergleiche mit weiteren Masken sei auf [ANHANG: B] verwiesen.

Maschenweite: berechnet für:	10m SPOT	20m SPOT	25m Landsat	100m SPOT	100m Landsat
Schlagschatten und nicht definierbare Gebiete Beckenried	7.08 %	6.97 %	9.81 %	9.76 %	6,76 %
nur Schlagschatten Beckenried	0.52 %	0.41 %	0.70 %	0.26 %	0.52 %

Tabelle 15: Schlagschattengebiete in % des Untersuchungsgebietes

4 - 2 SATELLITENDATEN

Die von den Satellitensensoren zur Erde übermittelten Daten sind mit einer Fülle technischer Fehler, Verzerrungen und Unregelmässigkeiten versehen, die einerseits systemspezifisch (bedingt durch Sensor und Plattform) andererseits objektspezifisch (abhängig vom zu detektierenden Objekt und seiner Umgebung) sein können [Darvishsefat A., 1995, p. 23]. In dieser Arbeit gelangen eine SPOT Szene im panchromatischen Modus vom 30. Juni 1991, eine gleichzeitig registrierte SPOT Szene im multispektralen Modus sowie eine multispektrale Landsat-Thematic Mapper Szene vom 11. Juli 1991 zur Auswertung. Die Daten wurden anhand von Quicklooks ausgewählt und sind

vom Satellitenbetreiber bereits vorkorrigiert worden. Bevor eine Auswertung erfolgen kann, muss zuerst eine gründliche Qualitätsanalyse in geometrischen, wie auch radiometrischen Belangen erfolgen. Anschliessend sind die Daten mittels Geocodierungsverfahren in die Referenzgeometrie zu überführen. Korrekturen des radiometrischen Inhaltes der Daten in Bezug auf aufnahmespezifische Verhältnisse könnten in der Rohgeometrie erfolgen, werden aber zumeist in der Referenzgeometrie vollzogen.

4 - 2.1 Systemkorrekturen der Rohdaten

Die Satellitenbetreiber wenden auf ihre Produkte gewisse Vorkorrekturen an, deren Grad und Umfang von den auszuliefernden Daten abhängig ist. Im Rahmen dieser Korrekturen können gewisse system- und objektbedingte Fehler behoben werden. In einigen Fällen kann die Art und Weise dieser Korrekturen aber einen teilweise erheblichen Einfluss auf die Datenauswertung haben. Eine vernünftige Qualitätsanalyse der Rohdaten kann darum nur mittels genauer Kenntnis dieser Korrekturen erfolgen.

4 - 2.1.1 Systemkorrekturen Landsat-Thematic Mapper

Die Landsat-Thematic Mapper Szene wurde von der Datenempfangsstation ESRIN der ESA in Frascati, Italien geliefert. Es ist dies neben Kiruna in Schweden, die einzige Empfangsstation für Landsat-Daten über Mitteleuropa. Das ESRIN lieferte die Daten mittels einer Systemkorrektur Stufe 05 aus. Sie umfasst neben radiometrischen auch geometrische Korrekturen [Fusco L., et al., 1985]:

- Basierend auf Systemmessungen vor dem Start wurden die Detektoren radiometrisch korrigiert und angeglichen.

- Geometrische Systemkorrekturen umfassen die Beseitigung von Verzerrungen induziert durch Geschwindigkeitsänderungen des oszillierenden Abtastspiegels, panoramische Verzerrungen inklusive Erdkrümmung, Zeilenversatz ('skew') infolge Erdrotation während der Aufnahme, Massstabsveränderungen infolge Geschwindigkeits- und Höhenvariationen der Trägerplattform sowie Verzerrungen aufgrund der

Eigenbewegung des Satelliten (Rollen, Nicken und Gieren).

- Die Daten wurden mittels Resampling auf eine einheitliche Pixelgröße von 30m * 30m gebracht. Das gewählte Zuweisungsverfahren der Reflexionswerte entspricht dem "Nächsten Nachbar Prinzip" ('*nearest neighbour*'), mit dem Vorteil keine neuen Werte, welche nicht gemessen wurden, zu generieren. Details zu den Resamplingverfahren findet man in [Frei U.; 1984, pp. 71].

- Die verschiedenen Spektralbänder wurden auf die beste halbe Pixelposition zueinander angepasst.

4 - 2.1.2 Systemkorrekturen SPOT-HRV

In Europa werden SPOT-Daten von der Datenvertriebsorganisation SPOT-Image in Toulouse (Frankreich) als auch in Kiruna (Schweden) empfangen und geliefert. Die panchromatische und multispektrale Szene wurde auf dem Vorverarbeitungsniveau 1b geliefert. Diese Systemkorrekturen entsprechen etwa dem Vorverarbeitungsniveau 05 bei Landsat-Thematic Mapper, mit dem Unterschied, dass keine Spiegelgeschwindigkeits-Variationen beim PushBroom System SPOT korrigiert werden müssen und das Resampling durch dreidimensionale Faltung ('*cubic convolution*') erfolgt (siehe [4 - 2.1.1]). Die Pixelgröße beträgt einheitliche 10m für die panchromatische und 20m für die multispektrale Szene.

4 - 2.2 Qualitätsanalyse der Rohdaten

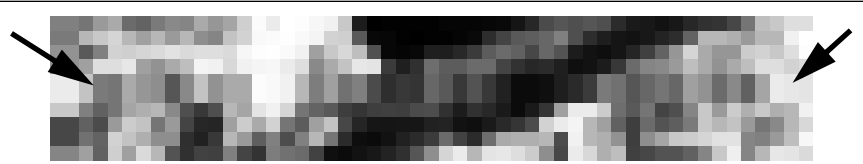
Die verwendeten, systemkorrigierten Datensätze von SPOT und Landsat müssen qualitativ getrennt untersucht werden. Nach Geometrie und Radiometrie unterschieden müssen die systemspezifischen und objektspezifischen Fehler gesucht und beseitigt werden. Die Analyse und Korrektur systemspezifischer Effekte, welche die Landsat Szene betreffen erfolgten in Zusammenarbeit mit [Darvishsefat A., 1995], diejenigen für die SPOT Szene mit [Ehrler C., 1993]. Spezielles Augenmerk wurde auf Effekte innerhalb des Untersuchungsgebietes Beckenried gelegt.

4 - 2.2.1 Qualitätsanalyse der Landsat-Thematic Mapper Daten

4 - 2.2.1.1 Geometrie Landsat-TM

Die Systemkorrektur der von ESA/ESRIN gelieferten Daten bewirkt geometrische Bildfehler in den Satellitendaten. Die Zeilenverdoppelung ist eine Folge der Korrektur von Flughöhen- und Fluggeschwindigkeitsänderung in Kombination mit dem Öffnungswinkel des Sensors. In allen Kanälen treten sie an der gleichen Stelle auf. In einem unregelmässigen Rhythmus von 42-55 Zeilen wird eine Zeile dupliziert und eingeschoben. Diese redundante Information kann vor der Georeferenzierung ohne weiteres gelöscht werden, da durch die danach angewendeten, polynomialen Transformationen 1. Grades der durch Zeilenverdoppelung eingeführte Massstabsausgleich erneut nachvollzogen werden kann [Bähr H.-P., et al., 1991, pp.56], [Darvishsefat A., 1995]. Die doppelten Kolonnen wurden für diese Arbeit detektiert und aus allen Kanälen entfernt.

Fig. 31 : Zeilenverdoppelung Landsat-TM, systemkorrigierte Rohdaten



Im Rahmen der Korrekturen der Panoramaeffekte und der Erdkrümmung müssen die Bildelemente, welche mit zunehmendem Abstand von der Nadirlage eine grössere Bodenfläche repräsentieren auf die einheitliche Auflösung von 30m * 30m gebracht werden. Das Resampling in der Systemkorrektur der Landsat-TM-Daten durch ESA/ESRIN erfolgt mittels dem 'nearest neighbour' Resamplingverfahren. Die Kompensierung der erwähnten Verzerrungen erfolgt durch Einschub verdoppelter Kolonnen. Da zugleich aber auch Instabilitäten in der Spiegelgeschwindigkeit des Sensors ausgeglichen werden, erfolgt diese Kolonnenverdoppelung für jeden 'sweep' zu 16 Zeilen separat. Ist der Beginn jedes 'sweeps' bekannt und sind vorgängig die doppelten Zeilen eliminiert worden, so können die doppelten Kolonnen detektiert werden. [Darvishsefat A., 1995, pp. 40] zeigte aber, dass die

doppelten Kolonnen mit ihrer redundanten Information nicht aus den Daten entfernt werden dürfen, da sonst in der Georeferenzierung grosse Fehler in Kolonnenrichtung auftreten. Das Problem kann sich bei der Berücksichtigung topographiebedingter Verzerrungen verschärfen. [Fig - 32] zeigt die detektierten doppelten Kolonnen der Landsat-TM-Daten im Ausschnitt Beckenried nach der Georeferenzierung, welche 1,47% des Untersuchungsgebietes ausmachen. Sie beinhalten redundante Information, welche bei der Genauigkeitsanalyse von Klassifikationen berücksichtigt werden sollte. Rechnet man die doppelten Zeilen dazu, so sind rund 3,5% der Daten in der systemkorrigierten Landsat-TM Szene von ESA/ESRIN als redundant und damit als nur bedingt aussagekräftig zu behandeln [Darvishsefat A., 1995]. Doppelte Kolonnen und Zeilen treten jedoch nicht gleich häufig in jeder Szene auf. Der Prozentsatz redundanter Information ist für jede Szene neu zu bestimmen.

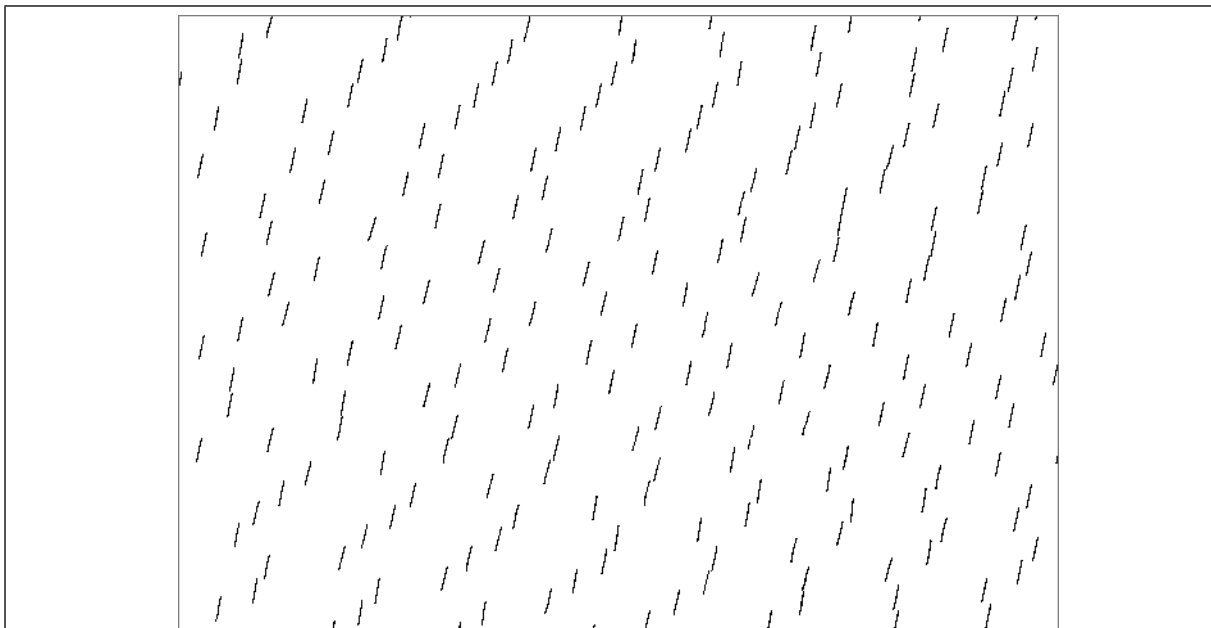
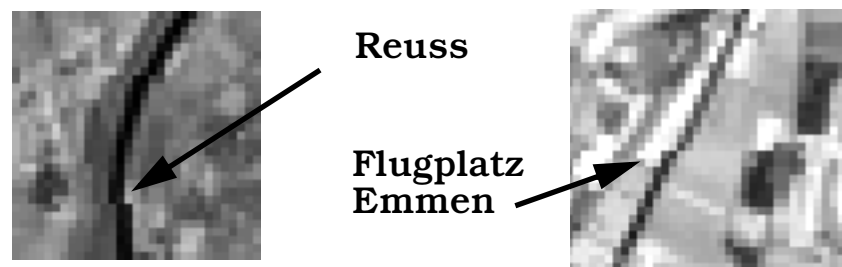


Fig. 32 : doppelte Kolonnen Landsat-TM, Testgebiet Beckenried
 Situation nach der Georeferenzierung

Der unregelmässige Einschub von doppelten Kolonnen pro 16 Zeilen ('sweep') führt an den Übergängen eines 'sweeps' zum anderen oft zu einem Zeilensegmentversatz. Der Effekt ist bei vertikalen, linearen Elementen wie Gewässern, Strassen, Bahnli-

nien besonders augenfällig. In den Rohdaten konnten diese Fehler mangels linearer Elemente nur in Gebieten ausserhalb des Untersuchungsgebiet Beckenried lokalisiert werden. Eine Überprüfung der Georeferenzierung zeigte aber, dass besonders im Bereich des Westufers des Urnersees am Rütli dieser Versatz vorkommt.

Fig. 33 : Zeilensegmentversatz in systemkorrigierten Landsat-TM-Daten



4 - 2.2.1.2 Radiometrie Landsat-TM

Die Qualitätsüberprüfung der Rohdaten erfolgt nur in Bezug auf systemspezifische Effekte. Der Landsat-TM besitzt für jeden Kanal (ausser Kanal 6) 16 Detektorelemente, die pro Abtastvorgang parallel eingesetzt werden und einer individuellen Empfindlichkeits-Charakteristik unterliegen. Sie müssen in der Systemkorrektur anhand von Kalibriermessungen vor dem Start, sowie repetitiven Referenzmessungen während dem Einsatz zueinander angeglichen werden. Dies insbesondere, da die Sensorelemente altern, ihre Empfindlichkeit degradiert oder sie im schlimmsten Falle ausfallen können. Detektorausfälle werden vom Satellitenbetreiber durch benachbarte Zeilen ersetzt [Bernstein R., et al., 1984] und zusätzlich in den Zeilenreferenzdaten der gelieferten Produkte markiert. Sie betreffen Teile oder ganze Zeilen. In der vorliegenden Szene wurden keine totale Detektorausfälle gefunden.

Ausfälle einzelner Bildelemente (Störpixel) oder Teile von Bildzeilen können auch durch die Datenfernübertragung bei der Übermittlung vom Satelliten zur Empfangsstation oder infolge Störungen der Sensor Elektronik entstehen. In homogenen Gebieten, wie Wasserflächen u.a., können Störpixel lokalisiert werden. In inhomogenen Gebieten ist die Detektion

schwierig, wenn nicht sogar unmöglich. Jedenfalls konnten explizit keine eindeutigen Störpixel im Untersuchungsgebiet lokalisiert werden.

Ungenügende Kalibration der Detektorelemente (pro Kanal) untereinander äussert sich im Satellitenbild durch hellere oder dunklere Bildzeilen, welche nach Elimination der doppelten Zeilen [4 - 2.2.1.1] periodisch alle 16 Zeilen (16 Detektorelemente pro Kanal) auftreten. Dieser Effekt wird auch '*striping*' genannt. Visuell ist dieser Effekt in den Satellitendaten deutlich erkennbar. Analysiert man aber die Mittelwerte abweichender Zeilen in Bezug auf die Umgebung, so sind Abweichungen unter einem Intensitätswert festzustellen [Darvishsefat A., 1995, pp. 30]. Vermutlich handelt es sich um einen Restfehler in der Kalibration, der durch die vorgegebene Intensitätsskala von 8 bit mittels Rundungsproblematik entsteht. Mit textuellen Methoden können diese Zeilen detektiert werden, eine numerische Korrektur ist unmöglich und wurde nicht weiter verfolgt.

Ungleiche Kalibrierung der 16 Zeilen umfassenden Abtaststreifen bei der Vorwärts- und Rückwärtsabtastung äussert sich in einem systematischen Intensitätswertunterschied benachbarter Abtaststreifen ('*sweeps*'). Dieser Effekt ist auch unter dem Begriff '*banding*' bekannt. Das '*banding*' wurde mittels Summenhistogrammgenerierung jeder Bildzeile und Ersetzen von Intensitätswerten mit Abweichungen von grösser als zwei Messwerten in den Kanälen 1 und 5 korrigiert [Suter M., 1992], [Darvishsefat A., 1995]. Bei den weiteren Kanälen drängte sich keine Korrektur auf.

Die Sensorelemente des Landsat-TM bestehen aus Silizium, welches eine spezifische Trägheit in der Licht-Empfindlichkeit aufweist. Tastet der Sensor über eine gewisse Zeit sehr reflexionsstarke Gebiete ab und trifft dann auf Gebiete mit geringer Rückstrahlung (hoher Kontrastsprung), so kann bis 1000 Bildelemente später der '*hysteresis*' oder '*memory*' Effekt auftreten. Die reflexionsschwachen Gebiete werden überschätzt und ein zu hoher Messwert geliefert. Im Untersuchungsgebiet konnten glücklicherweise keine solche Artefakte ausfindig gemacht werden.

4 - 2.2.2 Qualitätsanalyse der SPOT-HRV Daten

4 - 2.2.2.1 Geometrie SPOT-HRV

Die geometrische Qualität der SPOT-Daten ist um ein vielfaches besser als diejenige der Landsat-TM-Daten. Durch die wesentlich neuere Sensortechnologie von SPOT mit dem PushBroom System fallen verschiedene Effekte, die den optomechanischen Sensoren mit ihren wippenden oder rotierenden Spiegeln eigen sind, weg. Beispielsweise der Zeilensegmentversatz, doppelte Zeilen und Kolonnen (soweit sie durch die Kombination von Vorwärtsbewegung und orthogonal dazu verlaufender Abtastbewegung bedingt sind). Der Einschub redundanter Information, der durch Massstabsänderungen in Flugrichtung (Variation der Orbithöhe) oder quer dazu (panoramische Verzerrung) notwendig ist, kann in den SPOT-Daten nicht lokalisiert werden, da von SPOT-Image ein 'cubic convolution' Resampling (dreidimensionale Faltung) angewendet wurde. Pixelwerte werden nicht übernommen sondern aus benachbarten Pixeln interpoliert. Dabei können neue Messwerte entstehen, welche in der Szene oder in der näheren Umgebung nie detektiert worden sind.

Das PushBroom System von SPOT nimmt eine panchromatische Zeile zu 6000 Werten (3000 für XS durch Zusammenfassung von 2*2 Werten) mit 4 überlappenden CCD-Arrays (ref. Glossar) zu 1728 Sensorelementen auf. Diese Arrays müssen geometrisch zueinander angepasst werden. In der SPOT Szene konnten aber keine Verschiebungen lokalisiert werden.

4 - 2.2.2.2 Radiometrie SPOT-HRV

Im Gegensatz zu Landsat-TM tritt bei SPOT das 'striping' (siehe [4 - 2.2.1.2]) infolge der unterschiedlichen Abtastrichtung in Flugrichtung auf. Totale oder temporäre Detektorausfälle fanden sich im Untersuchungsgebiet sowohl im Pan wie auch im XS Kanal nicht. Hingegen konnte über homogenen Wasserflächen ein 'striping' von maximal zwei Messwerten, bedingt durch die ungenügende Interkalibration der Sensorelemente innerhalb der CCD-Arrays gefunden werden. Über den inhomogenen Landflächen nur

bedingt [Ehrler C., 1993, pp. 37]. Durch das angewendete 'cubic convolution' Resampling in der Systemkorrektur wurde dieser Effekt etwas verwischt. Mittels morphologischer Filterung nach [Banon G., et al., 1989], welche ausführlich in [Ehrler C., 1993, pp. 48] beschrieben wird, konnte das '*striping*' aus den Daten entfernt werden.

Nicht vollständige Kalibration der vier CCD-Arrays pro Kanal zueinander kann sich bei SPOT als vertikales 'banding' äussern. Mittelwertvergleiche der vier Arrays über homogenen Wasserflächen lassen für die vorliegenden Daten auf eine saubere Kalibration schliessen. Trotzdem können die Grenzen zwischen den Arrays in allen Kanälen lokal visuell detektiert werden. Dies darf nicht als '*banding*' bezeichnet werden, sondern muss als spezielles '*striping*' der Übergangsdetektoren angesehen werden. Es gibt keine Korrekturmöglichkeit.

4 - 2.2.3 Zusammenfassung der Qualitätsanalyse

Sowohl die panchromatischen und multispektralen SPOT-Daten wie auch die Landsat-TM-Daten sind nach den besprochenen Systemkorrekturen und den gemachten, grundlegenden Vorverarbeitungsschritten qualitativ hochwertig und für die Weiterarbeit geeignet. Diese Basiskorrekturen und -analysen sind bei jeder digitalen Satellitenbildklassifikation unbedingt durchzuführen. Ausführung der Systemkorrekturen durch die Satellitenbetreiber nimmt den Anwendern viele Arbeit ab, behindert andererseits aber den Zugriff auf die reellen Messwerte und eine eventuelle Fehlerlokalisierung. Bei genügend vorliegendem Fachwissen, Infrastruktur und Zeitreserve sind pixelgenaue digitale Auswertungen vorzugsweise auf absoluten Rohdaten auszuführen, welche selber vorkorrigiert werden. Die ganze Kette von den rohen Messwerten zur Klassifikation kann jederzeit vom Benutzer kontrolliert und eine genaue Fehlerabschätzung durchgeführt werden. Die Satellitenbetreiber müssen dazu aber genaue Hilfsdaten zur gesamten Aufnahmegeometrie jedes Bildelementes sowie eine vollständige Dokumentation über die aktuelle Sensorcharakteristik liefern können.

Ein überwiegender Anteil der Benutzer von optischen Satellitendaten kann aber nicht auf ein solches

Vorverarbeitungspotential zurückgreifen und ist auf die Systemkorrekturen der Satellitendaten-Vertreiber angewiesen. Dass die gelieferten Daten mit redundanter Information und Fehlern behaftet sind, sollten aber auch sie nicht vergessen und bei Genauigkeitsanalysen entsprechend berücksichtigen. Beispielsweise sind Genauigkeitsunterschiede um 1% bei Landsat-TM Klassifikationen nicht signifikant, da in den Ursprungsdaten schon 3,5% redundante, und damit zweifelhafte Information vorliegt.

4 - 2.3 Geometrische Korrekturen, Georeferenzierung

4 - 2.3.1 Grundlagen

Die Rohdaten stellen Zeile um Zeile ein zentralperspektives Abbild des rotierenden Erdkörpers (Geoid) dar, wobei der Aufnahmestandort (Plattform) sich relativ zur Erde kontinuierlich verschiebt. Zur Interpretation müssen die Rohdaten in eine einheitliche und horizontale Referenzgeometrie, z.Bsp. das Schweizerische Landeskarten - Koordinatensystem überführt werden. Die zentralperspektivische Zeileninformation wird in eine Orthogonalprojektion überführt. Diesen Vorgang nennt man geometrische Referenzierung, (Ortho-) Rektifizierung oder auch Geokodierung. Geokodierung bedeutet im speziellen die Überführung des Abbildes der Erdoberfläche in die planare Orthogonalprojektion. Dieser Schritt ist bekannterweise mathematisch nicht eindeutig lösbar und bedarf einer Näherungslösung. Grundsätzlich kennt man zwei verschiedene Methoden der Georeferenzierung.

4 - 2.3.1.1 Parametrischer Ansatz

Parametrische Ansätze sind als strenge Verfahren bekannt. Die Aufnahmegeometrie jedes einzelnen Bildelementes wird mathematisch, und möglichst auch physikalisch exakt modelliert mit Hilfe von Aufnahmeparametern, Position der Plattform, Orientierung des Sensors, der Geländehöhe sowie wenigen Bodenreferenzpunkten, die in den Rohdaten wie auch in der Referenzgeometrie eindeutig identifizierbar sein

müssen. Diese Bodenreferenzpunkte (Passpunkte) dienen der absoluten Referenzierung, während die anderen Parameter die innere, relative Geometrie beschreiben. Das physikalische Verhalten des Aufnahmesystems (Empfindlichkeitscharakteristik der Sensorelemente über Wellenlänge und Raum, analog-digital Wandlung, etc.) sowie die Beeinflussung des Strahlenganges durch die Atmosphäre (Beugung, Streuung und Brechung) können zusätzlich eingebunden werden, da die Bildgeometrie und der Bildinhalt nicht scharf trennbar sind [Bähr H.-P., et al., 1991, pp. 33]. Für die operationellen, satellitengestützten Aufnahmesysteme im optischen Bereich sind strenge Verfahren in den seltensten Fällen verwendbar. Die Position und Orientierung der Systeme ändert innerhalb einer Aufnahme. Die notwendigen Parameter für die exakte Modellbildung können von den Satellitenbetreibern nicht oder nur mit zu ungenauer Präzision und zeitlicher Auflösung geliefert werden [Ehrler C., 1993, pp. 64]. Der Einsatz parametrischer Verfahren zur Rektifizierung von optischen Satellitendaten ist aus den genannten Gründen nur sinnvoll, wenn das zu untersuchende Gebiet keine oder nur mangelhafte Detektion von Bodenreferenzpunkten (Passpunkten) erlaubt. Dies können Wüstengebiete, Eisflächen, grosse Wasserflächen etc. sein.

In Zukunft werden aber vermehrt parametrische Modelle zur Rektifizierung von Satellitendaten verwendet werden. Die heutige Satellitenpositionsbestimmung, unter anderem mit Distanz- und Lagemessungen innerhalb eines ganzen Netzwerkes von Satelliten, verbesserten Lagekontrollinstrumenten, laserbasierter Verfolgung und Einmessung, erhöhter Datenübertragungsrate von Lagedaten zur Bodenempfangsstation, etc. werden für eine neue Satellitengeneration die Kontrollparameterbestimmung in genügender Präzision und Auflösung liefern können. Für flugzeuggestützte Sensoren, welche vom Boden aus mit Radar eingemessen werden können und über GPS (ref. Glossar) und Inertialsystem gestützte Positions- und Lagekontrolle verfügen, sind parametrische Verfahren heute schon im Einsatz [Meyer P., 1994].

4 - 2.3.1.2 Nicht-parametrischer Ansatz

Sind keine oder nur mangelhafte Kenntnisse der Aufnahmegeometrie und -verhältnisse bekannt, so muss auf nicht-parametrische Näherungslösungen zurückgegriffen werden. In der Praxis werden sie häufig angewendet. Mittels Passpunkten wird eine numerische Transformationsfunktion der Rohdaten auf die Referenzgeometrie bestimmt. Verglichen mit den parametrischen Verfahren sind diese Näherungslösungen einfach zu handhaben und sind unabhängig von den verwendeten Sensoren. Je nach Aufgabenstellung können zusätzliche geometrische Bedingungen und Regeln, wie die Verzerrung infolge unterschiedlicher Geländehöhe, hinzugefügt werden, damit das georeferenzierte Ergebnis den gestellten Genauigkeitsanforderungen entspricht. Allgemein werden die Näherungslösungen in ihrer Anwendung auf die Satellitendaten in ihrer Genauigkeit überschätzt. Die dynamischen und auch instabilen Aufnahmesysteme bewirken lokale und das ganze Bild betreffende Verzerrungen, die mit den Polynomfunktionen nicht ausgeglichen werden können.

Die verwendeten Näherungslösungen sind in der Regel bivariate Polynomfunktionen wie die Helmerttransformation, die Affintransformation oder Transformationen mit Polynomfunktionen höheren Grades.

$$\begin{aligned} X' &= a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y + a_{20}X^2 + a_{02}Y^2 + a_{11}XY + \dots \\ &= b_{00} + b_{10}X + b_{01}Y + b_{20}X^2 + b_{02}Y^2 + b_{11}XY + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

dabei sind a_{ij} und b_{ij} die unbekanntenen Transformationsparameter zwischen den Koordinaten des Rohbildes (X, Y) und der Referenzgeometrie (X', Y') .

Helmerttransformation

Die Helmerttransformation ist eine Ähnlichkeitstransformation mit Überbestimmungen und Ausgleichung mit 4 Unbekannten [Bähr H.-P., et al., 1991].

$$\begin{aligned} X' &= a_{00} + a_{10}X - a_{01}Y \\ Y' &= b_{00} + a_{01}X + a_{10}Y \end{aligned} \quad (9)$$

Mit dieser Transformation können nur
Translationen (a_{00} und b_{00}),
Rotationen ($\alpha = \text{atan}(a_{01}/a_{10})$) sowie
Massstabsänderungen ($M = (a_{01}^2 + a_{10}^2)^{1/2}$)

korrigiert werden, welche gleich gross in X und Y sind. Anschaulich entspricht dies einer photographischen Projektion eines Bildes auf die Referenzgeometrie. Die innere Geometrie des Bildes wird nicht verzerrt, sodass die Restfehler nach ihrer Anwendung Auskunft über die Geometrie des Originals geben. Helmerttransformationen werden manchmal für die Entzerrung ganzer Satellitenszenen verwendet.

Affintransformation

Die Affintransformation, oder Transformation 1.Grades, beruht auf 6 Unbekannten.

$$\begin{aligned} X' &= a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y \\ Y' &= b_{00} + b_{10}X + b_{01}Y \end{aligned} \quad (10)$$

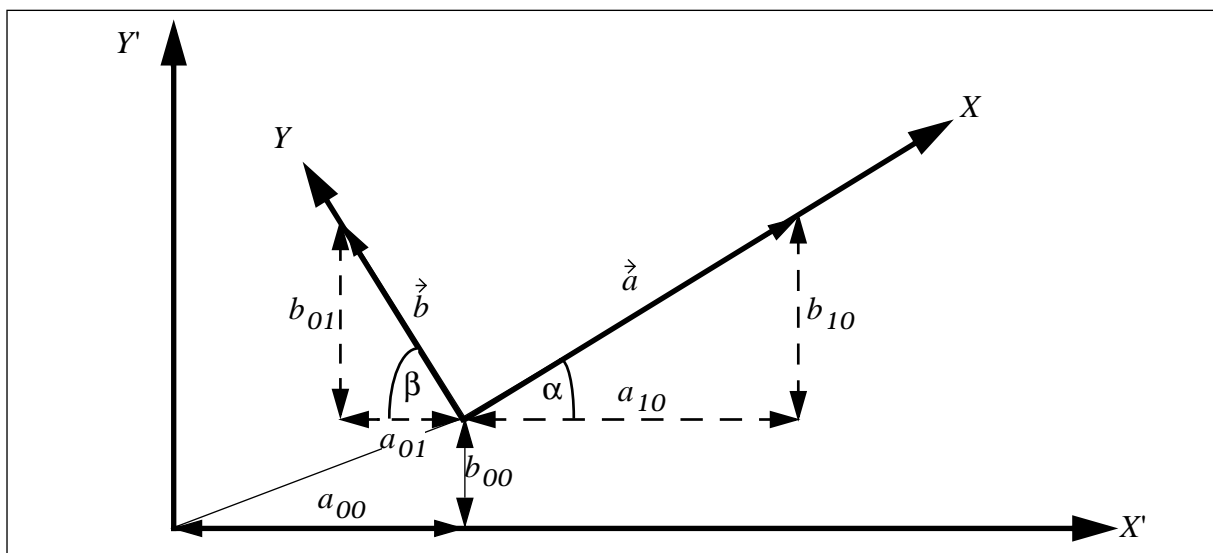


Fig. 34 : Affine Transformation
nach [Frei U.; 1984]

Im Gegensatz zur Helmerttransformation werden unterschiedliche Massstäbe in X und Y Richtung eingeführt. Somit können mit der Affintransformation

Translationen, Rotationen und Massstabsänderungen unabhängig in X und Y Richtung ausgeführt werden.

Viele der geometrischen Fehler, die den systemkorrigierten Satellitendaten anhaften, können mit ihr behoben werden. Die Affintransformation ist geraden-
treu, parallelentreu sowie teilverhältnistreu [Frei U.; 1984]. Aber sie ist weder winkeltreu noch längentreu.

Die Stauchung oder Dehnung eines Bildes kann durch die Länge der Einheitsvektoren beschrieben werden:

$$\begin{aligned} |\vec{a}| &= \sqrt{a_{10}^2 + b_{10}^2} \\ |\vec{b}| &= \sqrt{a_{01}^2 + b_{01}^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Die Drehungskomponente des Bildes auf die Karte, sowie die Winkelverzerrung innerhalb des Bildes können durch die Winkel zwischen den Koordinatenachsen beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos\left(\frac{a_{10}}{|\vec{a}|}\right) \\ \beta &= \arccos\left(\frac{a_{01}}{|\vec{b}|}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

Die Affintransformation ist eine Ebenenabbildung. Bei Satellitendaten von *flachem* Gelände sollte eine korrekte Systemkorrektur, wie sie in [4 - 2.1.1] und [4 - 2.1.2] beschrieben wurde, die Rohdaten in eine planare Abbildung überführt haben. Somit können die SPOT-Daten auf Vorverarbeitungsniveau 1b wie auch die Landsat-TM-Daten auf Niveau 05 mit der Affintransformation in die Referenzgeometrie der Schweizerischen Landeskarten überführt werden. Dies unter der Bedingung, dass die innere Geometrie der Satellitenszene stabil ist. Wie eigene Erfahrungen gezeigt haben, trifft dies für die SPOT-Daten in den allermeisten Fällen zu. Der Landsat-TM Sensor hat zuweilen geringe Instabilitäten, die sich in lokalen Abweichungen bemerkbar machen [4 - 2.3.2.7].

Polynome zweiten und höheren Grades

Transformationen 2. Grades und höher können geometrisch nicht mehr anschaulich dargestellt werden. Es handelt sich um Transformationen von Hyper-ebenen. Die grosse Anzahl von Unbekannten erhöht die notwendige Anzahl von Passpunkten zur Bestimmung der Gleichungen, was in vielen Fällen die Anwendung einschränkt. Die Transformationen höheren Grades können lokal bessere Ergebnisse als die Affintransformation liefern, da sie in beschränktem Umfang den Einfluss der Geländehöhe, welcher in den besprochenen Näherungslösungen nicht mitgeführt wird, nachmodellieren können. Das Gelände ganzer Szenen ist üblicherweise aber so komplex, dass mittels einer speziellen Korrektur vor der Affintransformation die Verzerrungen infolge von Höhenunterschieden korrigiert werden müssen.

4 - 2.3.1.3 Bestimmung der Transformationsgleichungen

Die Georeferenzierung erfolgt in drei Schritten [Bähr H.-P., et al., 1991, p.41].

1. Formulierung des mathematisch-physikalischen Modells.
2. Bestimmung der Modellparameter
3. die eigentliche Referenzierung jedes Bildelementes

Zur Bestimmung der Unbekannten in den bivariaten Polynomialgleichungen sind für die Affintransformation minimal 3 Passpunkte, bei der Transformation 2. Grades 6 Passpunkte notwendig. In der Regel werden aber die Gleichungssysteme überbestimmt und die Transformationskoeffizienten mittels Regression, üblicherweise nach der Methode der kleinsten Quadrate, berechnet. Die notwendige Bestimmung von Passpunkten in den Rohdaten und der Referenzgeometrie stellt einen grossen Schwachpunkt in der automatisierten Anwendung dieser Georeferenzierungsmethode dar. Sie müssen mühsam in Bild und Karte lokalisiert und gemessen werden. Damit das bestimmte geometrische Modell eine gute Qualität erreicht, muss darauf geachtet werden, dass erstens eine grosse Anzahl von Passpunkten bestimmt werden kann und zweitens die Verteilung

möglichst flächendeckend und regelmässig ist. Nur so können allfällige interne Bildverzerrungen (unabhängig in X und Y Richtung), infolge Instabilitäten des Systems während der Aufzeichnung, erkannt und wenn nötig eliminiert werden [Bähr H.-P., et al., 1991]. Die notwendige Anzahl Passpunkte für eine genaue Rektifizierung kann nicht im voraus bestimmt werden. Eine grosse Anzahl ermöglicht aber auch die Qualitätsüberprüfung der Passpunkte, während dem Definieren und Erfassen derselben. So können augenscheinliche Ausreisser eliminiert werden. Nach [Bähr H.-P., et al., 1991] können Passpunkte in Satellitendaten auf bis zu $\pm 1/3$ Bildelement genau lokalisiert werden.

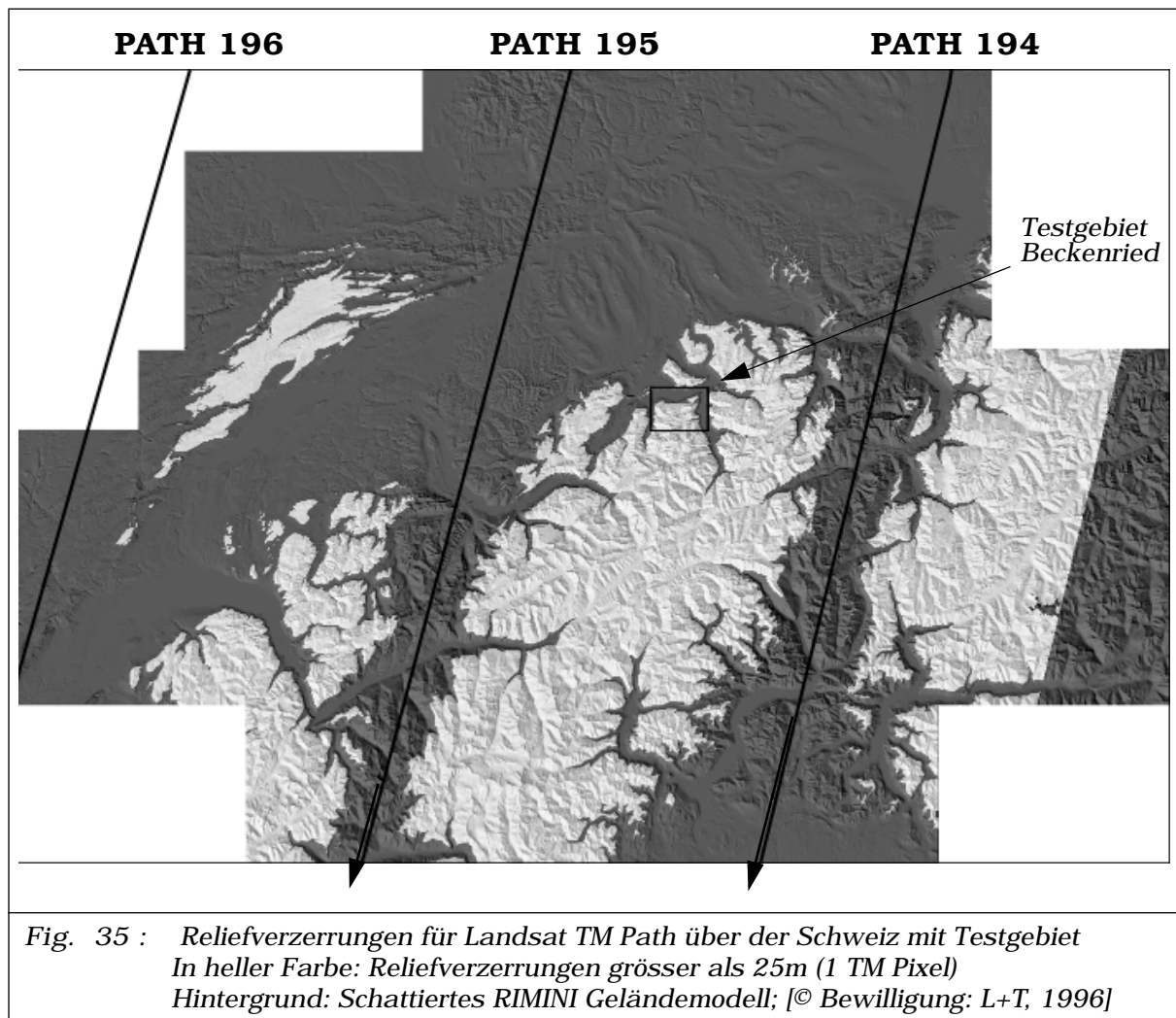
4 - 2.3.1.4 Reliefverzerrung

Die nicht-parametrischen, bivariaten Polynomtransformationen zur Georeferenzierung von Satellitendaten sind wie besprochen Ebenenabbildungen. Im Falle einer orthogonalen Senkrechtaufnahme können mit ihr Satellitendaten entzerrt werden. In den Landsat-TM-Daten entspricht die zentrale Bildkolonne (Nadirlinie) diesen Anforderungen. In den SPOT-Daten, welche mit einem Blickwinkel von 4° , respektive $4,6^\circ$ aufgenommen wurden, ist die Nadirlinie aus dem Zentrum verschoben.

Höhenunterschiede im Gelände, welche eine interne Lageverzerrung bei Schrägsicht bewirken, können mit den bivariaten Gleichungen aber nicht berücksichtigt werden. Nach [Ehrler C., 1993, p. 65] bewirken Höhenunterschiede von 100m bis 130m der verwendeten panchromatischen und 200m bis 250m in den multispektralen SPOT-Daten im Untersuchungsgebiet bereits eine Lageversetzung um ein Bildelement.

[Fig - 35] zeigt die Lageversetzung in Bezug auf die verwendete Landsat-TM Szene. Hell sind die Gebiete der Szene markiert, welche infolge Höhenunterschied eine Lageversetzung grösser als 1 Bildelement erfahren. Anschaulich ist die Notwendigkeit einer Modifikation der bivariaten Polynomfunktion durch eine zusätzliche Korrektur dieses Höhenversatzes sichtbar. Als geometrische Korrekturidee dient folgendes: Nach der Systemkorrektur beider Datentypen kann

davon ausgegangen werden, dass eine Bildzeile einer zentralperspektivischen Abbildung entspricht. Diese Zentralperspektive muss vor der Polynomtransformation zeilenweise in eine Parallelperspektive umgewandelt werden.



Der hier vorgeschlagene Korrekturalgorithmus zur Elimination von Lageverzerrungen innerhalb einer Bildzeile von Landsat-TM und SPOT Satellitendaten wurde mit P.Bitter gemeinsam entworfen und im DIPIX Bildverarbeitungssystem implementiert [Bitter P., 1990], [Kellenberger T., 1991]. Für die Anwendung in der vorliegenden Arbeit wurde er auf NIH-Image umgeschrieben, wobei das mehrstufige Verfahren in der DIPIX Implementation zu einem einstufigen Georeferenzierungsverfahren vereinfacht wurde.

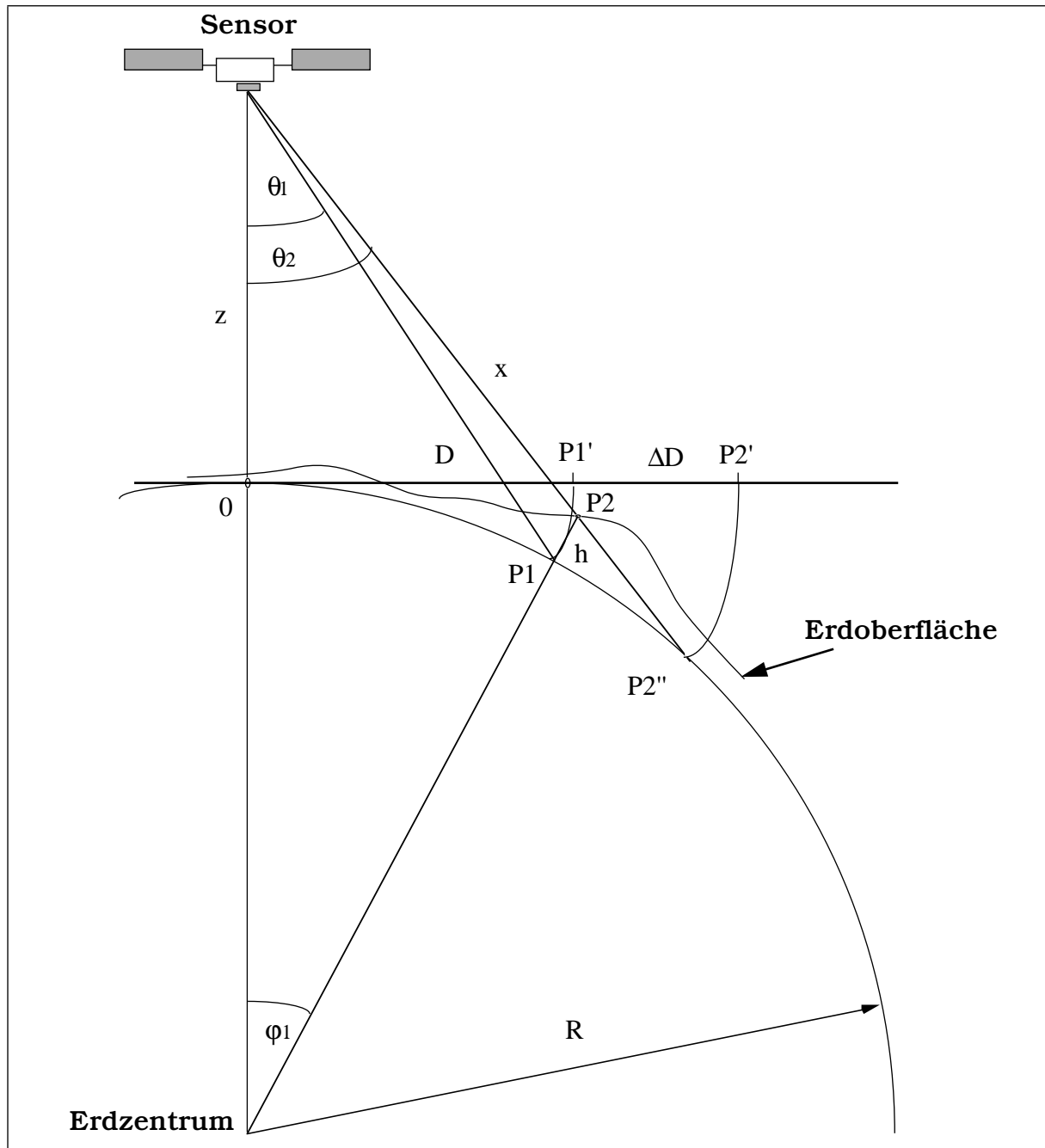


Fig. 36 : Lageversetzung eines Punktes im Satellitenbild unter Berücksichtigung der Erdkrümmung [Kellenberger T., 1991]
Erklärung siehe im Text

Die Abbildung [Fig - 36] zeigt die Lageversetzung eines abgebildeten Punktes auf der Erdoberfläche. Die Erde wird vereinfacht als Kugel betrachtet. Diese Annahme ist nach Untersuchungen von [Suter M., 1992] ohne Bedenken zu machen, da die Verzerrungen

relativ zum Bessel-Ellipsoid innerhalb einer Landsat-TM Szene im Extremen nur 16cm ausmachen. Bei den viel schmaleren SPOT Szenen entsprechend weniger.

Der Punkt P1 in [Fig - 36] liegt auf der Referenzfläche und wird unter dem Scanwinkel θ_1 erfasst. Er wird durch die panoramische Verzerrung im Punkt P1' auf der Bildebene abgebildet. Die Strecke $OP1'$ (Nadirdistanz) berechnet sich aus

$$\overline{OP1'} = \tan\theta_1 z$$

$$z = \text{effektive Flughöhe}$$

$$\theta_1 = \text{Scanwinkel 1 in } ^\circ$$

Die korrekte Lage von P *nach* Korrektur der panoramischen Verzerrung befindet sich in P1". Die korrekte Nadirdistanz $D = OP1''$ entspricht dem Kreisbogen OP1 und berechnet sich aus

$$D = \varphi_1 R \frac{\pi}{180} \quad (13)$$

$$\varphi_1 = \text{Zentralwinkel 1 (in } ^\circ)$$

$$R = \text{Erdradius}$$

Der Zentralwinkel φ_1 lässt sich unter Anwendung des Sinussatzes als Funktion von θ_1 ausdrücken:

$$\varphi_1 = \text{asin}\left(\frac{\{R+z\}}{R} \sin\theta_1\right) - \theta_1 \quad (14)$$

Im *nicht* panoramisch entzerrten Bild ergibt sich der reliefbedingte Versatz als Differenz von $OP2'$ und $OP1'$

$$\overline{P1'P2'} = z(\tan\theta_2 - \tan\theta_1) \quad (15)$$

$$\theta_2 = \text{Scanwinkel 2 in } ^\circ$$

θ_2 ist nicht bekannt, falls man von θ_1 ausgegangen ist. Mit dem Sinus - Satz ergibt sich:

$$\theta_2 = \text{asin}\left(\sin\varphi_1 \frac{(R+h)}{SP_2}\right) \quad (16)$$

Die Strecke $\overline{SP_2}$ lässt sich mit Hilfe des Cosinus-Satzes berechnen:

$$\overline{SP_2} = \sqrt{(R+h)^2 + (R+z)^2 - 2(R+h)(R+z)\cos\varphi_1} \quad (17)$$

$h =$ Höhenunterschied zwischen P1 und P2

Bei der panoramischen Entzerrung ohne Höheninformation, wie sie von ESA/EARTHNET für Landsat-TM und von SPOT-Image für SPOT Niveau_1b Produkte bei der Systemkorrektur angewendet wird, hat der Höhenunterschied h den gleichen Effekt, wie wenn P2 im Punkt P2* lokalisiert wäre. Das Bogenstück P1P2* entspricht dem reliefbedingten Versatz ΔD im panoramisch entzerrten Bild. Es lässt sich als Differenz von OP2* und OP1 berechnen:

$$\Delta D = R \frac{\pi}{180} \left(\left(\text{asin}\left(\frac{R+z}{R} \sin\theta_2\right) - \text{asin}\left(\frac{R+z}{R} \sin\theta_1\right) \right) + \theta_1 - \theta_2 \right) \quad (18)$$

$\Delta D =$ reliefbedingter Versatz im panoramisch korrigierten Bild.

4 - 2.3.2 Praktische Durchführung der Georeferenzierung

4 - 2.3.2.1 Verwendeter Korrekturansatz

Die verwendeten Satellitendaten von SPOT und Landsat-TM wurden mittels einer Affintransformation unter Berücksichtigung von höhenbedingtem Versatz auf die Geometrie der Schweizerischen Landeskarten

georeferenziert. Ausgangsdaten bilden die systemkorrigierten Satellitendaten, das digitale Geländemodell sowie die Landeskarten 1:25'000.

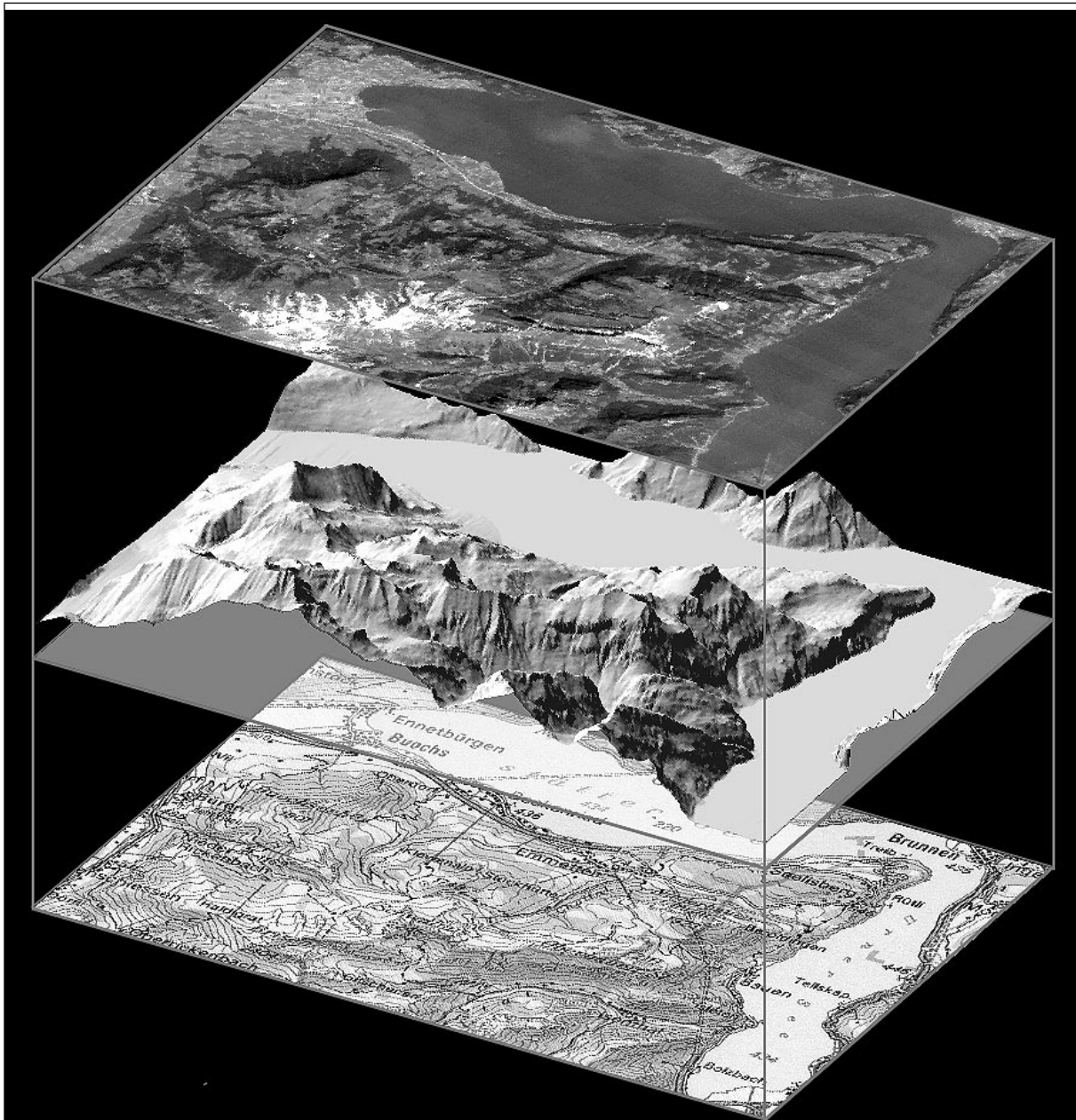


Fig. 37 : Georeferenzierung von Satellitendaten mit Hilfe eines digitalen Geländemodells DHM25 (Mitte) auf die Landeskarte Untersuchungsgebiet Beckenried, [© Bewilligung: L+T, 1996]

Das Verfahren, welches in Form diverser Makros in NIH-Image auf Macintosh implementiert wurde, benutzt eine Rückwärtstransformation. Dies bedeutet,

dass für jedes Bildelement in der Zielgeometrie, eine korrespondierende Umgebung (Pixel) in den Ursprungsdaten gerechnet wird. Inwieweit die Umgebung der errechneten Position in den Rohdaten zur Zuweisung des Pixelwertes in den Zieldaten eine Rolle spielt, ist abhängig vom gewählten '*Resamplingverfahren*'.

4 - 2.3.2.2 Samplingsmethoden

Bei jeder Rückwärtstransformation werden die Pixelmittelpunkte des Outputbildes in der Regel nicht genau auf die Zentren von Pixeln im Inputbild abgebildet, sondern liegen in der Regel dazwischen. Daher lassen sich verschiedene Möglichkeiten denken, wie die Videowerte für das Outputbild berechnet werden können [Frei U.; 1984, pp.71]. In der vorliegenden Arbeit wurden grundsätzlich drei verschiedene Resamplingverfahren angewendet.

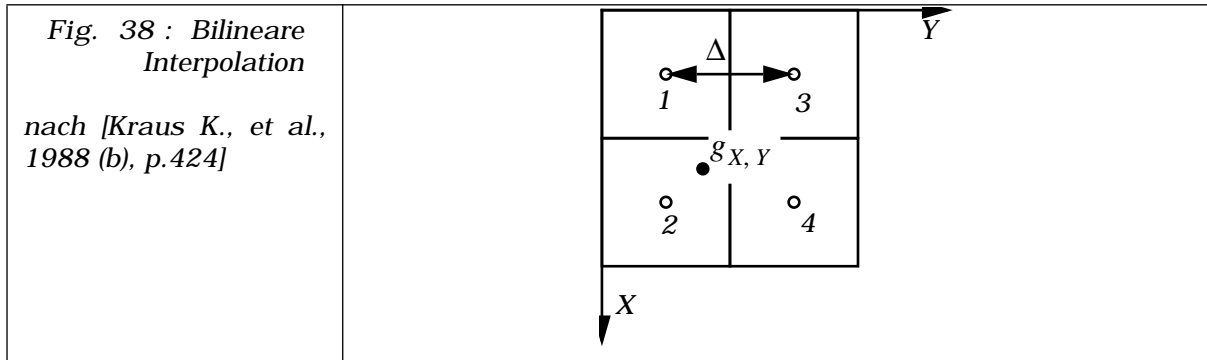
'nearest neighbour' Resampling

Das Zuordnungsverfahren nach dem '*nearest neighbour*' Verfahren (nächster Nachbar) ist das einfachste aller beschriebenen Verfahren. Das Outputpixel erhält den Wert jenes Inputpixels, in dessen Nähe es durch die Transformation zu liegen kommt. Der Vorteil dieser Methode liegt einerseits in ihrer Einfachheit, und es werden keine neuen Bildwerte generiert, welche in den Ursprungsdaten nicht vorkommen. Dies kann ein Vorteil, bei der Interpretation von Satellitendaten sein, welche sich auf den spektralen Bildinhalt abstützt. Die nach dem nächsten Nachbarn berechneten Bilder haben oftmals eine sehr blockige Struktur. Für die Extraktion von Strukturen und Lineamenten in den transformierten Daten, wie auch zu deren optisch anspruchsvollen Repräsentation ist dieses Verfahren eher hinderlich.

'bilineare' Interpolation

Die '*bilineare*' Interpolation berücksichtigt nicht nur den Wert des Inputpixels, in welches bei der Rückwärtstransformation der Pixelmittelpunkt des Outputpixels fällt, sondern nach Flächenanteilen gewichtet die Werte der vier anliegenden Inputpixel. Diese

Methode findet für Flächenkontinua, wie zum Beispiel digitale Geländemodelle [4 - 1.1 Skalierung auf die Arbeitsgrößen, Seite 129] ihre verbreiteste Anwendung.



$$g_{x,y} = \left(1 - \frac{x}{\Delta} - \frac{y}{\Delta} + \frac{xy}{\Delta^2}\right)g_1 + \left(\frac{x}{\Delta} - \frac{xy}{\Delta^2}\right)g_2 + \left(\frac{y}{\Delta} - \frac{xy}{\Delta^2}\right)g_3 + \left(\frac{xy}{\Delta^2}\right)g_4 \quad (19)$$

- $g_{X,Y}$ = Wert des Pixels an der Position X,Y
- Δ = Seitenlänge des Pixels
- g_i = Wert des Ursprungspixels i

Bei optischen Satellitendaten müssen gewisse Grundvoraussetzungen erfüllt sein, damit diese Resamplingmethode verwendet werden darf:

a.) Findet in der Rückwärtstransformation eine Skalierung der Pixelgrößen statt, so dass die Inputpixeldimension nicht annähernd der Outputpixeldimension entspricht, so kann die durch das bilineare Verfahren berücksichtigte Umgebung im Falle größerer Outputauflösung zu wenige Inputpixel berücksichtigen oder im umgekehrten Falle zu wenige Pixel. Mit dieser Voraussetzung ist eine vorgängige Skalierung der Inputdaten, wie sie in Kapitel [3 - 3.2.1] beschrieben wird, auf die gewünschte Outputauflösung unumgänglich. Die folgende Rückwärtstransformation kann dann durchgeführt werden.

b.) Der bilineare Algorithmus beruht auf der Tatsache, dass die Pixelwerte für die ganze Pixelfläche bei Flächenkontinua gelten. Die Satellitensysteme integrieren aber ihren Messwert nicht gleichgewichtet über diese Pixelfläche, sondern besitzen eine, oftmals bekannte, zweidimensionale Empfindlichkeitsvariabi-

lität, welche mit der '*point spread function*' PSF modelliert wird. Die Berücksichtigung der Nachbarschaft müsste in der Regel in Anbetracht dieser PSF modelliert werden. Die durch die PSF entstandenen Variabilitäten werden aber für die hier verwendeten Sensoren oft vernachlässigt. Bei genauen radiometrischen Korrekturmodellen muss sie in der Georeferenzierung aber sicherlich untersucht und mitberücksichtigt werden.

Die bilineare Interpolation gleicht extreme Werte aus und generiert neue Bildwerte. Dies kann, insbesondere bei nachfolgenden radiometrischen Korrekturen hinderlich sein. Das Bild wirkt an sich kontrastärmer und geglättet.

'cubic convolution'

Im Gegensatz zur Bilinearen Interpolation mit Berücksichtigung einer 4er-Nachbarschaft werden bei der dreidimensionalen Faltung ('*cubic convolution*') die 16 umgebenden Inputpixelwerte berücksichtigt und gewichtet. Die Einschränkungen, welche bei der bilinearen Methode aufgeführt wurden, gelten auch hier. Insbesondere die Generierung neuer Pixelwerte und die Berücksichtigung der Nachbarschaftsfläche bei Skalierungen in der Rückwärtstransformation.

4 - 2.3.2.3 Verwendete Samplingsmethoden

Sowohl die SPOT wie auch die Landsat-TM-Daten wurden nach der 'nearest neighbour' Methode umgerechnet. Mit der Annahme, dass die Empfindlichkeitsfunktion der Detektoren als zweidimensional uniform betrachtet werden, wurden die Daten auch nach der bilinearen Methode umgerechnet. Dabei wurde beachtet, dass die SPOT-Daten in der Zielauflösung der Originalauflösung entsprachen (10m und 20m). Für Landsat-TM wurde die Zielauflösung auf 25m (bei ca. 30m Originalauflösung) festgesetzt. In den nachfolgenden Klassifikationen wurde die Brauchbarkeit der Datensätze nach bilinearer Methode und 'nearest neighbour' Methode getrennt getestet.

4 - 2.3.2.4 Wahl der Passpunkte und Ausgleichsrechnung

Für die Durchführung einer Georeferenzierung mittels Affintransformation wurden in den Satellitendaten und der topographischen Kartengrundlage Passpunkte identifiziert. Zur Vermeidung von lokalen Fehlern und aus Gründen der Identifizierbarkeit wurde die Passpunktsuche nicht nur auf das Kartenblatt 1:25'000, 'Beckenried' beschränkt, sondern auch auf die zwei nördlichen Anschlussblätter 'Rigi' und 'Zug' ausgedehnt.

Für den Landsat-TM-Datensatz wurden 130 Passpunkte bestimmt, wobei sich die Kanalkombinationen (4,3,2) und (3,2,1) in RGB-Darstellung (ref. Glossar) zur Identifikation am besten eigneten. Als Passpunkte kamen im Untersuchungsraum eindeutig identifizierbare Blechdächer von Alpwirtschaftsgebäuden, Strassenkreuzungen 4.Klasse, Einzelgebäude, sowie markante Seeuferelemente in Frage. Es sind dies alles Elemente, die durch Kartengeneralisierung in der Regel unbeeinflusst sind.

In den SPOT-Pan-Daten wurden 30 Passpunkte, in den SPOT-XS-Daten 38 Passpunkte identifiziert. Dies sind bedeutend weniger als in den Landsat-Daten, da bei SPOT von einer stabileren inneren Geometrie ausgegangen werden kann. Die feinere geometrische Auflösung erlaubte zusätzlich die Wahl von Elementen in den Satellitendaten, welche auf der Karte als Fixpunkte definiert sind. Dies können Bergspitzen, Kreuzungsmittelpunkte von Fahrwegen etc. sein.

Die Bildkoordinaten der drei verschiedenen Passpunktsets entsprechen in ihrer Lage der Satellitengeometrie inklusive des Einflusses des Geländes. Die zu verwendende Korrekturmethode [4 - 2.3.2.1] sieht aber eine Affintransformation vor, welche auf einer Geometrie beruht, in welcher der Reliefeinfluss bereits korrigiert wurde (d.h. die Satellitendaten werden vor der Affintransformation in Bezug auf höhenbedingten Versatz korrigiert). Die Passpunktkoordinaten in den Satellitenrohdaten mussten demzufolge mit der Reliefkorrektur auf eine Referenzebene transformiert werden. In dieser Geometrie können nun die affinen Transformationskoeffizienten durch Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden. Die Regressionsrechnung der Pass-

punktesets liefert für jeden Passpunkt die Residualwerte in X- und Y-Richtung, sowie für das gesamte Set den Standardfehler der Regression rms .

$$rms = \sqrt{\frac{\sum r^2}{n}} \sqrt{\frac{n-2}{n}} \quad (20)$$

r = Residualwerte
 n = Anzahl Passpunkte

Grosse Residuen der einzelnen Passpunkte können verschiedene Gründe haben. Der Passpunkt kann in der Karte oder im Bild ungenau lokalisiert worden sein. Nicht-lineare Verzerrungen, welche mit der Affintransformation [Affintransformation, Seite 145] nicht behoben werden können, sind im Satellitenbild aufgetreten. Generalisierungsfehler in der Referenzgrundlage, der Karte, verunmöglichen eine genaue Lokalisierung. Ist bei einem Passpunkt ein Lokalisationsfehler offensichtlich, so kann er eliminiert und die Transformationskoeffizienten mit den verbleibenden Punkten erneut berechnet werden. Treten Passpunkte mit grossen Abweichungen ohne offensichtlichen Grund auf, so können sie nach der Regel von [Kirby M., 1975] von der Berechnung ausgeschlossen werden, wenn der Betrag des Restfehlers grösser als die doppelte Standardabweichung ist. Diese universale Regel kann aber nicht die Identifikation aller falsch gesetzten Passpunkte, beziehungsweise die Verwendung aller korrekten Punkte garantieren. Sie ist eher als Faustregel zu betrachten.

In den drei verschiedenen Passpunktsets wurden die Punkte mit grossen Restfehlern identifiziert und eliminiert [Tab - 16, Seite 160], wenn sie im erneuten Vergleich mit der Karte als eindeutig falsch bestimmt identifiziert werden konnten, oder eine homogene Verteilung über das Untersuchungsgebiet, nach ihrer Elimination noch gewährleistet war.

[Fig - 39, Seite 159] zeigt die Passpunktverteilung in den Landsat-TM Rohdaten, nach der Elimination schlechter Punkte, inklusive ihrer Restfehlervektoren.

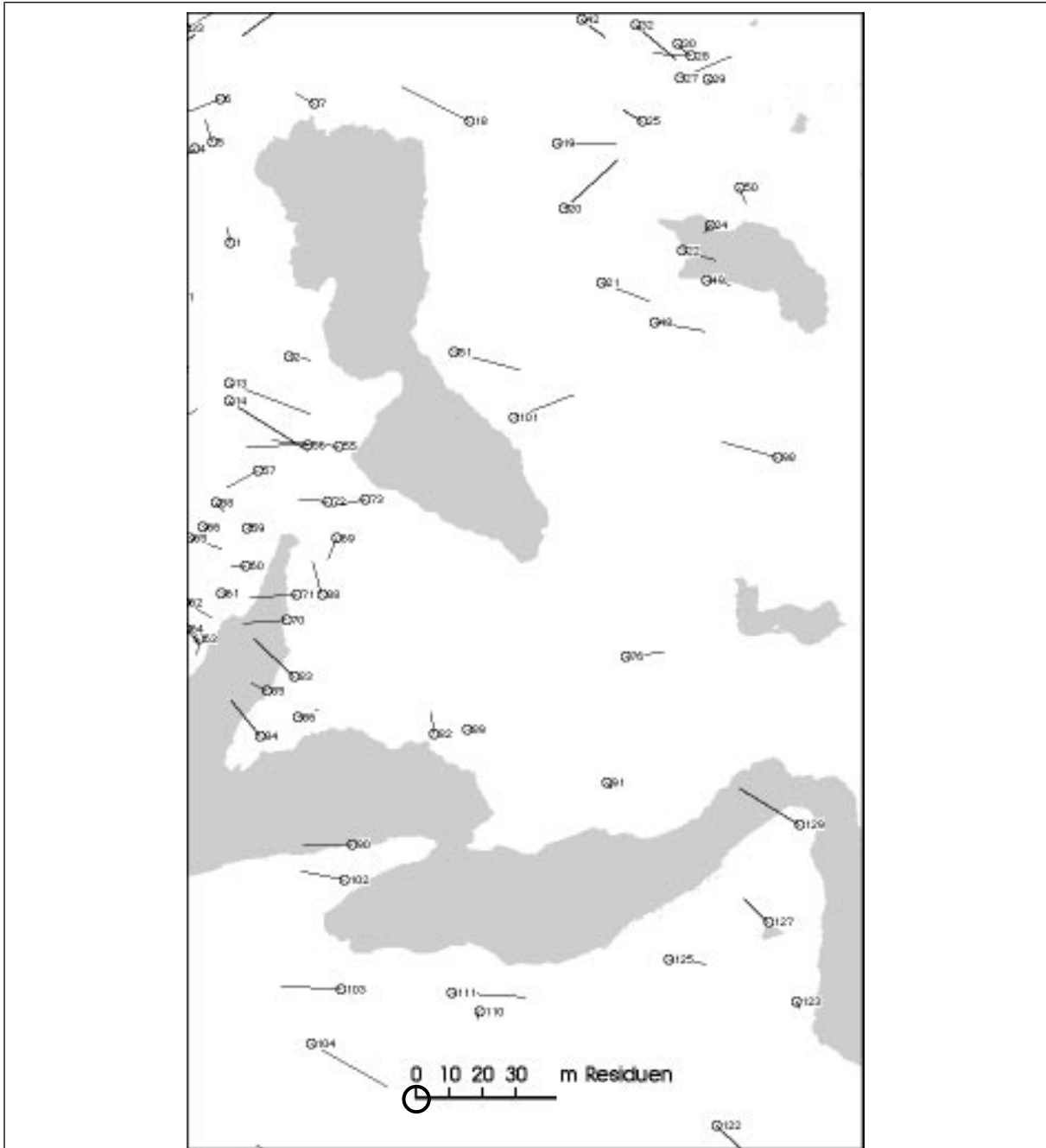


Fig. 39 : *Verwendete Passpunkte Landsat-TM mit Fehlervektoren
Darstellung in der Rohgeometrie*

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Güte der verwendeten Passpunkte, die Transformationskoeffizienten und deren Kennzahlen.

	Landsat-TM	SPOT-XS	SPOT-Pan
identifizierte Passpunkte	130	38	30
verwendete Passpunkte	85	23	22
Standardfehler in X (rms) (Formel "(20)", Seite 158)	10.25 m	5.84 m	4.56 m
Standardfehler in Y (rms) (Formel "(20)", Seite 158)	4.63 m	7.27 m	4.52 m
Maximaler Restfehler in X	-24 / +24 m	-16 / +14 m	-13 / +10 m
Maximaler Restfehler in Y	-14 / +14 m	-16 / +15 m	-13 / +9 m
Transformationskoeffizienten (Formel "(10)", Seite 145)			
a_{00}	-5949.87	55.27	-333.00
a_{10}	29.41	19.61	9.80
a_{01}	-6.29	-3.95	-1.98
b_{00}	-5747.53	20196.46	19988.96
b_{10}	6.19	3.99	1.97
b_{01}	30.03	19.61	9.79
Länge des Einheitsvektors (siehe [Fig - 34, Seite 145])			
a	30.06 m	20.01 m	9.996 m
b	32.69 m	20.00 m	9.990 m
Affinitätsfaktor $\frac{a}{b}$	0.979	1.001	1.001
Rotationswinkel (siehe [Fig - 34, Seite 145])			
α	11.89°	11.49°	11.37°
β	78.18°	78.62°	78.56°
$\alpha - \beta$ Differenzwinkel	89.87°	89.77°	90.14°

Tabelle 16: Parameter und Kennzahlen der affinen Transformation

Der maximale Restfehler in den Passpunktesets liegt immer unter der Grösse eines Pixels. Er bewegt sich etwa im Bereich des doppelten Standardfehlers. Diese Angaben täuschen, da es sich nur um einige wenige Passpunkte handelt, die trotz grosser Residuen in der Berechnung berücksichtigt wurden. Dies musste aus Gründen einer guten Passpunktverteilung über das zu korrigierende Gebiet erfolgen.

Die Länge der Einheitsvektoren, im speziellen des Affinitätsfaktors, zeigt für die SPOT-Daten eine sehr

gute innere Stabilität der Geometrie. Bei den Landsat-Daten macht sich die Elimination der doppelten Zeilen [4 - 2.2.1.1 Geometrie Landsat-TM, Seite 136] in den Rohdaten bemerkbar, welche in einer leichten Streckung in Y-Richtung sichtbar wird.

Die Qualität der affinen Transformation der Satellitendaten kann gemäss den besprochenen Residualwerten als gut bezeichnet werden.

4 - 2.3.2.5 Georeferenzierung

Die geometrische Entzerrung der Satellitendaten erfolgte auf der Basis des digitalen Geländemodells und der Aufnahmeparameter (Reliefkorrektur), und einer anschliessenden affinen Transformation mit den anhand der Passpunkte berechneten Koeffizienten.

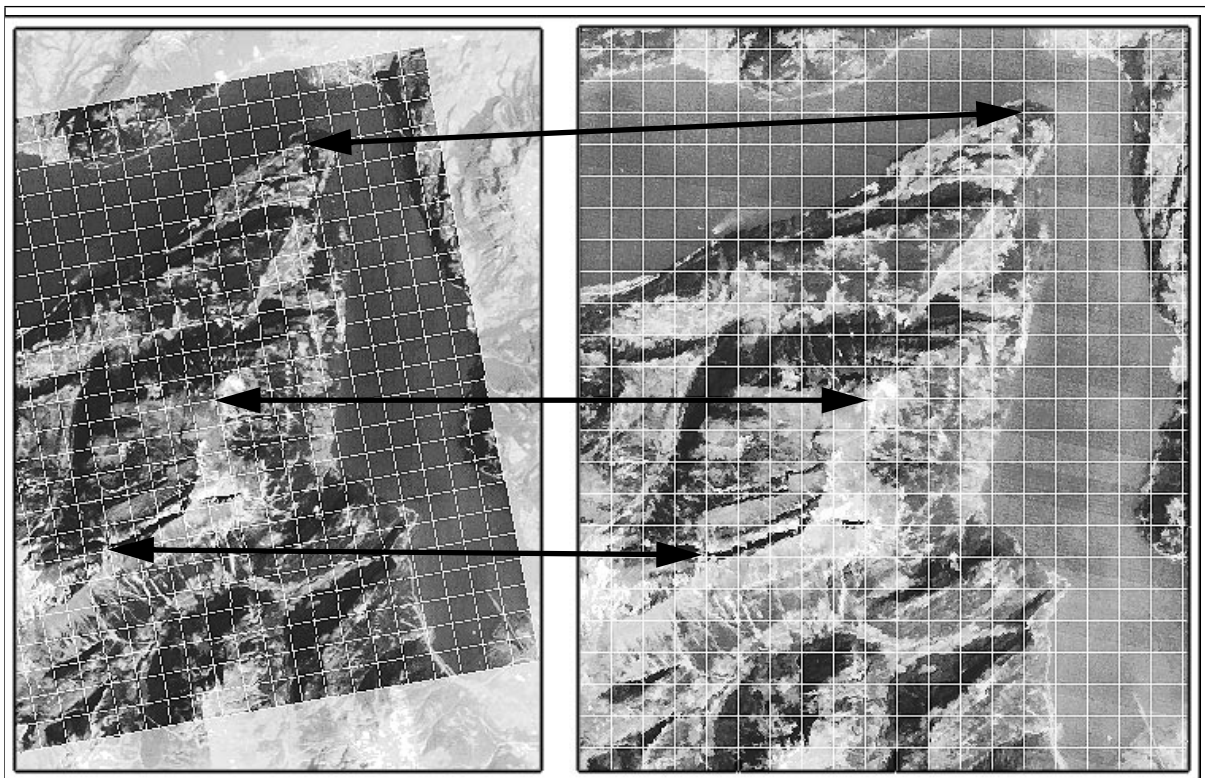


Fig. 40 : Georeferenzierung der Satellitendaten
links: Landsat-TM, Band 3, Rohdaten; rechts: Georeferenzierte Daten
Ausschnitt Seelisberg, überlagertes km-Netz der Landeskarte

Die Zielgeometrie entspricht der Schweizerischen Landeskarte mit den in [2 - 2.1] beschriebenen Dimensionen. Die SPOT-Daten wurden auf 10m (Pan) respekt-

tive 20m (XS), die Landsat-TM auf 25m mit dem 'nearest neighbour' und auch mit dem bilinearen Algorithmus [4 - 2.3.2.2] interpoliert.

[Fig - 40] zeigt die Georeferenzierung am Beispiel eines Ausschnittes des Landsat-TM Bandes 3. Im linken Bild sind die Daten in der Rohgeometrie abgebildet, wobei der in der Georeferenzierung tatsächlich verwendete Bildanteil hervorgehoben ist. Im rechten Bild sind die Daten in der Kartengeometrie abgebildet. Zur Illustration der Reliefkorrektur und der Auswirkungen der nachfolgenden affinen Transformation wurde das km Netz der Landeskarte überlagert.

4 - 2.3.2.6 Redundante Bildinformation infolge 'nearest neighbour' Resampling

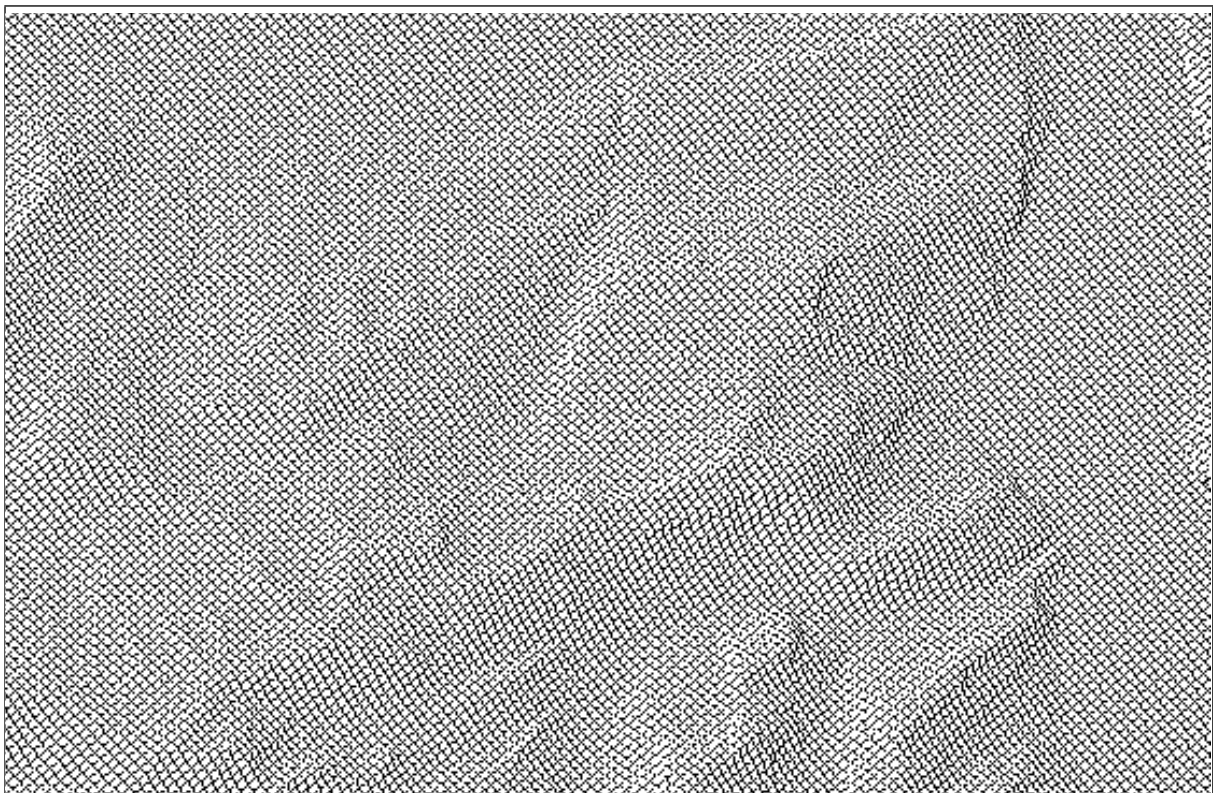


Fig. 41 : Redundante Bildinformation infolge Georeferenzierung mit 'nearest neighbour' Resampling
schwarz: mehrfach vorkommende Bildinformation im Testgebiet Beckenried

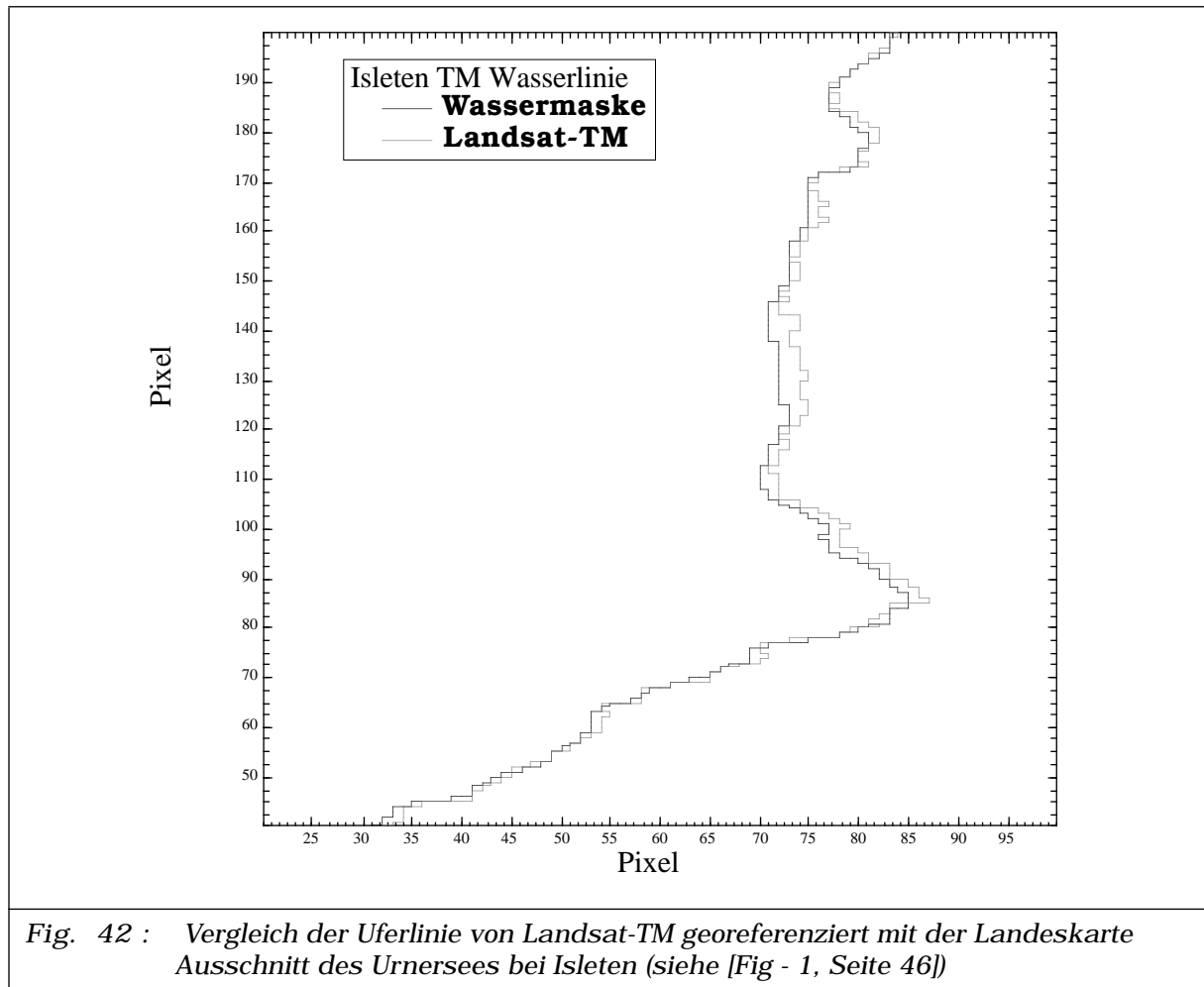
Die angewandte Rückwärtstransformation nach der 'nearest neighbour' Methode kann zu einer mehrfachen Zuweisung des gleichen Wertes eines Bildele-

menten in den Rohdaten für verschiedene Pixel in den georeferenzierten Daten führen. So kann neben der durch die Systemkorrektur produzierten redundanten Bildinformation [4 - 2.2.1.1] ein weiterer Anteil an Redundanz entstehen, welcher die Genauigkeitsanalyse von satellitenbasierten Klassifikationen beeinflusst. Für die Georeferenzierung von Landsat-TM des Untersuchungsgebietes ist in [Fig - 41] die Bildinformation dargestellt, welche durch mehrmalige Berücksichtigung eines Bildelementes in der Rohgeometrie mit dem 'nearest neighbour' Algorithmus redundant abgebildet wird. 29.94% der Nachbarwerte von Bildelementen im Untersuchungsgebiet kommen doppelt vor, 2.04% dreifach und 0.09% sogar vierfach. Das Relief im Untersuchungsgebiet lässt sich in dieser Darstellung erahnen, weil seine Verzerrung mit der Reliefkorrektur behoben wird und ein weiterer Grund für mehrfache Wertzuweisung ist.

4 - 2.3.2.7 Visuelle Überprüfung der Georeferenzierung

Die Güte der Georeferenzierungen wurde mittels visuellem Vergleich der Satellitendaten mit den Wassermasken nach Landeskarte zusätzlich untersucht. (Ein Vergleich mit der Waldmaske ist als unbrauchbar einzustufen, da sie vielen Generalisierungen und zeitlichen Veränderungen unterworfen ist.) Für topographisch markante Elemente wurden zusätzlich die Koordinaten eingemessen und mit der Landeskarte verglichen.

In allen drei Satellitendatensätzen konnten keine systematischen Abweichungen festgestellt werden. Sowohl auf dem Seenniveau wie auch in den höher gelegenen Gebieten erweist sich die Georeferenzierung als konstant gut. In den SPOT-Daten sind auch keine lokalen geometrischen Unregelmässigkeiten detektierbar. In den Landsat-Daten konnte anhand der Nord-Süd verlaufenden Uferlinie des Urnersees im Gebiet Isleten eine lokale, systematische Abweichung gefunden werden. Es handelt sich um eine Verschiebung der Satellitendaten um 1-2 Bildelemente nach Westen, welche in der gleichen Szene auch schon von [Ehrler C., 1993, p.87] gefunden wurde.



Davon sind etwa 16 Aufnahmestreifen zu 16 Zeilen betroffen. Die Vermutung, dass der Landsat Sensor in diesem Bereich der Szene geometrische Probleme hat, war schon bei der Begutachtung der Passpunkte aufgefallen. So musste eine Reihe von Passpunkten in diesem Bildstreifen infolge grosser Restfehler eliminiert werden. Die lokalen Abweichungen können nicht behoben werden. Der Ungenauigkeit der Übereinstimmung muss daher auch in der Klassifikation für dieses Gebiet spezielle Aufmerksamkeit gewidmet werden.

4 - 2.3.3 Skalierung

Nach der Georeferenzierung stehen nun ein SPOT-Pan-Datensatz mit 10m Pixelauflösung, ein SPOT-XS-Datensatz mit drei Kanälen und 20m Auflösung sowie ein Landsat-TM-Datensatz mit 25m Auflösung und 6

Kanälen (1-5,7) in der Geometrie der Schweizerischen Landeskarten für das Untersuchungsgebiet Beckenried bereit. Die Daten sind weder höhenabhängig, noch sind grobe Lageungenauigkeiten in Bezug zur Referenzgeometrie vorhanden.

Für die angestrebten Waldklassifikationen sind aber nicht nur Satellitendaten in den genannten geometrischen Auflösungen notwendig, sondern auch Daten einer einheitlichen Auflösung von 100m. Die gewählte Georeferenzierungsmethode erlaubt aber keine sinnvolle direkte Transformation der originalen Bildauflösung in eine Zielauflösung von 100m. Die Resamplingsalgorithmen würden aus einer zu engen Umgebung in den Rohdaten den Wert für ein Zielelement errechnen.

Demzufolge wurde die 100m Bildauflösung durch eine flächenbasierte Skalierung der georeferenzierten Daten (10m, 20m und 25m) nach dem Mittelwertsprinzip gewonnen (analog der Skalierung der Waldmasken [3 - 3.2.1]).

4 - 2.4 Radiometrische Korrekturen

Die Intensitätswerte (Reflexionswerte) welche der Sensor über einem Objekt misst, werden beeinflusst durch sensorspezifische und objektspezifische Effekte. Die sensorspezifischen Störungen des Signals wurden bereits in [4 - 2.2.1.2] und [4 - 2.2.2.2] beschrieben, analysiert und wenn möglich eliminiert. Unter den objektspezifischen Faktoren sind die Beeinflussung der eigentlichen Reflexionscharakteristik des Objektes durch Topographie, Sonnenstand, Atmosphäre und Blickwinkel zu verstehen.

4 - 2.4.1 Einfluss der Atmosphäre

Die Atmosphäre über einer ganzen Satellitenszene darf nicht als konstant betrachtet werden. In der topographisch stark gegliederten Schweiz, mit den bekannten lokalen Wetterlagen, ist dies besonders zu beachten. Die horizontale, wie auch vertikale Verteilung absorbierender Gase der Atmosphäre (O_2 , O_3 , H_2O , CO_2) und streuender, beziehungsweise reflektierender Partikel (Aerosole, Staub, Dunst) kön-

nen die vom Sensor erfasste Strahlung beeinflussen [Hill J., 1993]. Für die Auswertung multitemporaler Datensätze und Zeitreihen sind Korrekturen der atmosphärischen Einflüsse unabdingbar. Da der Zustand der Atmosphäre zum Zeitpunkt einer Satellitenaufnahme in der Regel kaum detailliert bekannt ist, wird in den zur Zeit bekannten Korrekturansätzen mittels Modellierung einer Standardatmosphäre, bei Annahme einer horizontal homogenen Atmosphäre, gearbeitet [Hill J., 1993], [Sandmeier St., 1995]. Atmosphärenmodelle, wie beispielsweise 6S [Tanré D., et al., 1986], [Vermote E., et al., 1994] oder Lowtran-7 [Kneizys F., et al., 1990], verwenden diese Standardatmosphären und haben als primären Eingabeparameter die horizontale Sichtweite. Diese atmosphärischen Korrekturansätze sind sehr rechenzeitaufwendig und in den seltensten Fällen für einen quasioperationellen Einsatz, wie er in dieser Arbeit gefordert ist, geeignet. Aus diesem Grunde und weil das Untersuchungsgebiet Beckenried räumlich sehr begrenzt ist, wurde auf eine Atmosphärenkorrektur verzichtet. Trotzdem ist es notwendig, sich der atmosphärischen Einflüsse im Untersuchungsraum bewusst zu werden.

Sowohl die Landsat-TM Szene wie auch die SPOT Szenen wurden während einer Schönwetterperiode mit stabiler Wetterlage aufgenommen [SMA, 1991]. Im Untersuchungsgebiet treten in der Landsat Szene Quellwolken über den Bergkämmen auf. Gebiete die durch die Wolken und deren Schatten bedeckt werden, können in einer Waldklassifikation nicht ausgewertet werden; ein immer wieder auftretendes Handicap der optischen Fernerkundung, welches insbesondere in operationellen, flächendeckenden Ansätzen zu Problemen führen kann. Für den Klassifikationsprozess müssen Wolken- und Wolkenschattengebiete ausmaskiert werden. So können sie von der Analyse ausgeschlossen werden. Die Generierung dieser Wolkenmaske ist in [4 - 2.4.1.1] beschrieben. Bei genauerer Betrachtung der Landsat-Daten fällt auch eine geringe Dunstbeeinflussung im Tal der Engelbergeraas (westlichster Bildrand) auf, welche auf eine Klassifikation einen Einfluss haben könnte. Sie wurde nicht korrigiert und auch nicht ausmaskiert. Der Einfluss auf eine Klassifikation ist in späteren Schritten zu untersuchen.

Beide SPOT-Datensätze sind wolkenfrei. Die einzige, visuell identifizierbare Störung der atmosphärischen Verhältnisse ist ein Kondensstreifen eines in nordwestlicher Richtung fliegenden Verkehrsflugzeuges. Eine sich verjüngende Zone, beginnend über dem südlichsten Teil des Urnerbeckens bis zum Buochserhorn wird radiometrisch stark beeinflusst. Sie kann nicht korrigiert werden und wird für die weiteren Untersuchungen, analog der Wolkenproblematik, ausmaskiert [4 - 2.4.1.2].

4 - 2.4.1.1 Wolkenmaske

Die Wolken- und Wolkenschattenmaske wurde durch visuelle Interpretation der georeferenzierten Landsat-Daten am Monitor generiert. Es wurde darauf geachtet, dass die Wolken- und Schattenumrisse grosszügig nachgezeichnet wurden. Dies aus Sicherheitsgründen und um in einem angestrebten operationellen Verfahren eine schnelle Generierung einer brauchbaren Maske zu simulieren.

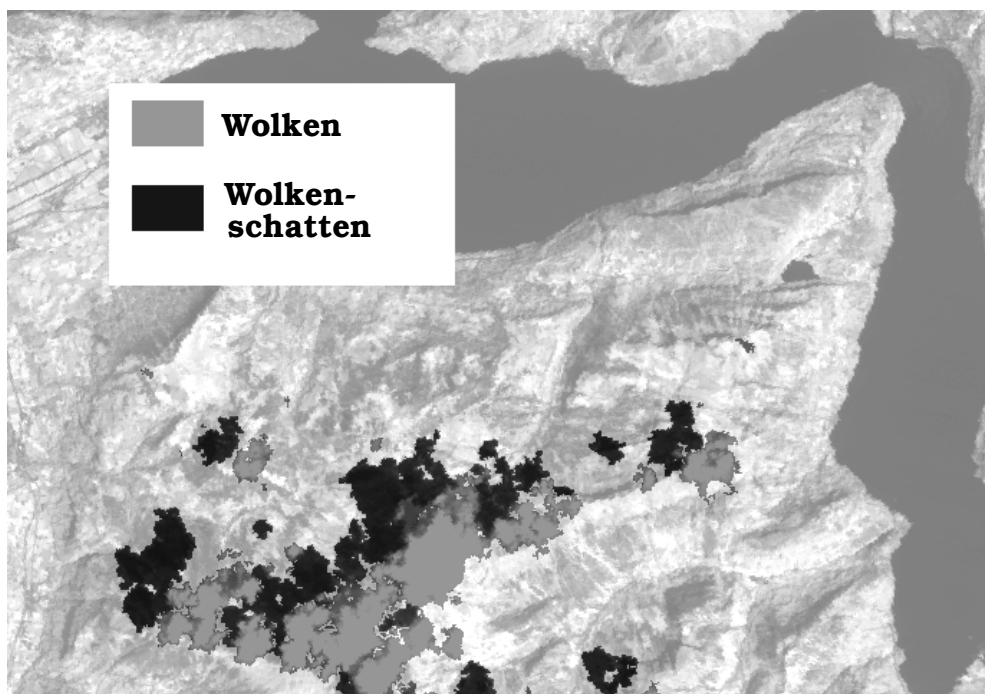


Fig. 43 : Wolken- / Wolkenschattenmaske
überlagert dem Landsat-TM Kanal 4

Infolge der erhöhten Streueffekte der Atmosphäre in den kurzwelligeren Bereichen des optischen Spektrums wurde die Wolkenmaske im visuellen Bereich interpretiert. Wie genau diese Maske sein muss, wurde in den Klassifikationen mit Landsat mit 25m getestet [5 - 2.3].

Da in der vorliegenden Arbeit die Verwendbarkeit von SPOT und Landsat-Daten gegeneinander abgewogen werden und deren Verwendung im 100m Raster geprüft wird, ist es notwendig, dass Klassifikationsresultate unabhängig von momentanen Störungen während dem jeweiligen Aufnahmezeitpunkt analysiert werden können.

In Bezug auf eine allfällige Wolkenbedeckung müssen die dadurch nicht auswertbaren Gebiete im betroffenen, wie auch in den anderen Datensätzen gleichzeitig ausmaskiert werden können. Nur ein Vergleich gleichzeitig fehlerfreier Gebiete in allen Daten ist aussagekräftig.

Die Maske, mit einer geometrischen Auflösung von 25m musste daher anschliessend auf 10m, 20m und 100m skaliert werden. Die Skalierung erfolgte flächenbasiert nach dem Dominanzprinzip (analog der Skalierung der Waldmasken [3 - 3.2.1]). Die Flächenanteile der Wolkenmasken (inklusive Wolkenshatten) in den jeweiligen Arbeitsauflösungen sind in [Tab - 17] aufgeführt. Für Flächenvergleiche mit weiteren Masken sei auf [ANHANG: B] verwiesen.

Maschenweite:	10m	20m	(Interpretation) 25m	100m
Wolkenmaske Beckenried	9.64 %	9.59 %	9.47 %	9.68 %

Tabelle 17: Wolkenmaske in % des Untersuchungsgebietes

4 - 2.4.1.2 Kondensstreifen-Maske

Die Kondensstreifenmaske wurde wie die Wolkenmaske [4 - 2.4.1.1] mittels visueller Interpretation von SPOT-Pan-Daten in 10m Pixelauflösung am Bildschirm bestimmt. Es galten die gleichen Generalisierungskriterien.

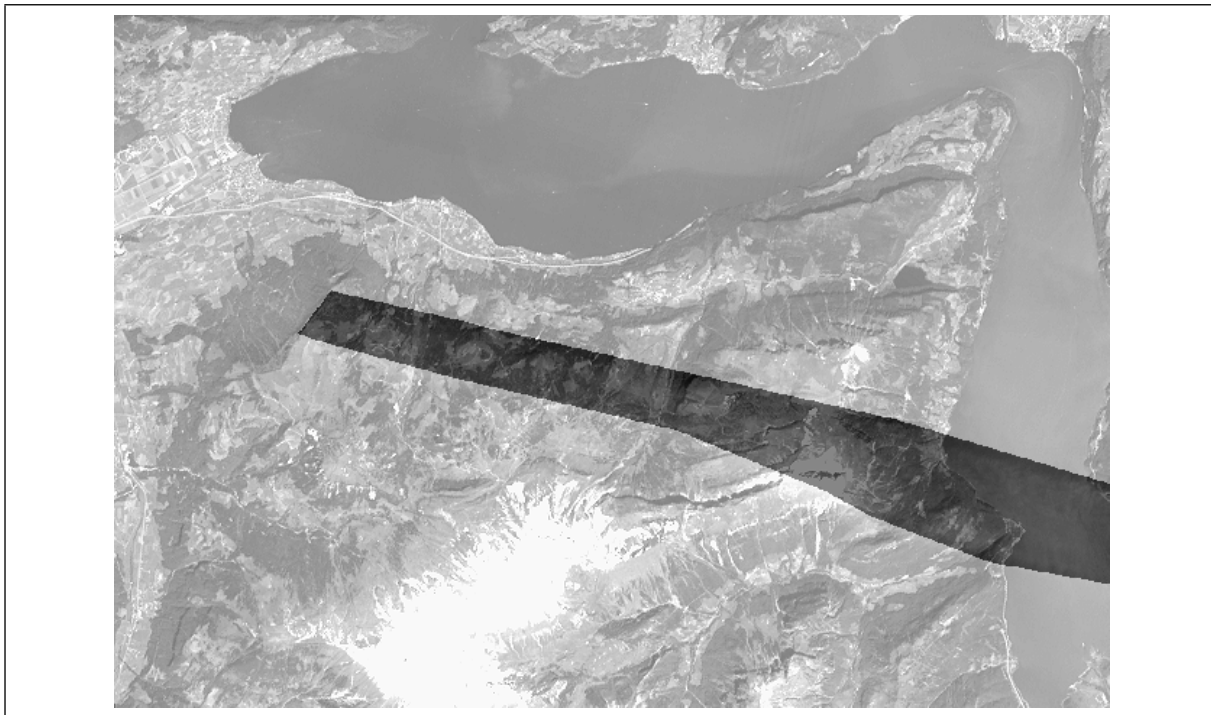


Fig. 44 : Kondensstreifenmaske
dem SPOT-Pan Kanal überlagert

Die Kondensstreifenmaske wurde ebenfalls flächenbasiert skaliert auf geometrische Auflösungen von 20m, 25m und 100m. Die prozentualen Anteile der Masken am Untersuchungsgebiet in den verschiedenen Auflösungen sind [Tab - 18] zu entnehmen.

Maschenweite:	(Interpretation) 10m	20m	25m	100m
Kondensstreifenmaske Beckenried	9.02 %	9.02 %	8.98 %	9.02 %

Tabelle 18: Kondensstreifenmaske in % des Untersuchungsgebietes

4 - 2.4.2 Einfluss des Blickwinkels

Die Bildelemente in den Untersuchungsausschnitten wurden von den Sensoren unter unterschiedlichem Blickwinkel aufgenommen. Der Strahlengang von Objekt zum Sensor ist von unterschiedlicher Länge, und nimmt vom Nadir zum Bildrand kontinuierlich zu. Damit ist auch eine Erhöhung der optischen Dichte verbunden. Gleichzeitig durchquert der Strahlengang bei inhomogener Atmosphäre unter-

schiedlich dichte Luftmassen die das Signal abschwächen. Sandmeier ([Sandmeier St., 1991], [Itten K., et al., 1992]) zeigte aber, dass für ein kleines Testgebiet wie Beckenried die Variabilität der Länge des Strahlenganges für Landsat unter 1% liegt. Unter der Annahme einer stabilen Wetterlage, bei der für eine gegebene Höhe die optische Dichte als konstant vorausgesetzt werden kann, darf auf die Korrektur des Einflusses unterschiedlich langer Strahlengänge verzichtet werden. Die beiden SPOT Szenen wurden unter einem vernachlässigbar kleinen Winkel aufgenommen und werden wie die Landsat Szene eingestuft und nicht korrigiert.

Der Einfluss des Blickwinkels in Zusammenhang mit der Reflexionscharakteristik natürlicher Objekte wurde im Kapitel [3 - 1.2.2] behandelt. Als vereinfachte Annahme und auch aus Mangel an Rückstreumodellen BRDF der zu detektierenden Objektklassen wird ein lambertianes Verhalten aller Elemente im Untersuchungsgebiet vorausgesetzt.

4 - 2.4.3 Beleuchtungseinflüsse

Wie in Kapitel [3 - 1.2] ausgeführt ändert sich das Reflexionsverhalten des Waldes mit den Beleuchtungsbedingungen durch die Sonne. Unter Vernachlässigung der atmosphärischen Bedingungen und der Annahme eines lambertianen Rückstreuverhaltens, ist die Reflexion des Waldes von der Sonneneinstrahlung und der Topographie abhängig. Die Sonneneinstrahlung variiert mit der geographischen Lage, dem Datum und der Zeit. Im Untersuchungsgebiet kann sie als konstant angenommen werden, wie schon in Kapitel [4 - 1.2] diskutiert wurde. Die Variabilität des Rückstreuverhaltens kann unter all den getroffenen Annahmen allein auf den Einfluss der topographischen Gegebenheiten reduziert werden. Reflexionsvariationen eines identischen Objektes in verschiedenen Expositionen, Hangneigungen und Höhenlagen erschweren eine Klassifikation und müssen vor der Interpretation korrigiert werden können. Diese Korrektur des Reliefeinflusses kann nach zwei prinzipiell unterschiedlichen Ansätzen erfolgen [Darvishsefat A., 1995].

1.) Das Untersuchungsgebiet wird mit Hilfe des digitalen Höhenmodells nach Exposition und/oder Höhenlage in Subgebiete stratifiziert. Die Klassifikation wird nach Stratum getrennt optimiert und durchgeführt. Der Arbeitsaufwand ist sehr gross und erfordert für jedes Stratum sichere Stichproben. Die Methode ist schlecht operationalisierbar.

2.) Die topographiebedingten Beleuchtungseinflüsse werden vor der Klassifikation korrigiert. In den meisten Fällen wird ein radiometrisches Modell aufgestellt, das auf dem momentanen Sonnenstand, der Exposition, Hangneigung und Höhenlage jedes Bildelementes und dem spektralen Verhalten einer zu optimierenden Objektklasse im Untersuchungsgebiet beruht. Damit ist auch gesagt, dass diese Korrekturverfahren in der Regel objektspezifisch (e.g. Wald) angewendet werden. Ziel ist es, für die Klasse Wald jedes einzelne Bildelement auf eine fiktive, horizontale Beobachtungsgeometrie zurückzuführen um dadurch eine Homogenisierung zu erreichen. Die topographische Komponente wird eliminiert. Verschiedene mögliche Korrekturansätze sind in [Itten K., et al., 1992] aufgeführt und besprochen. Die verwendete Korrekturmethode wird im nächsten Abschnitt besprochen.

4 - 2.4.3.1 Semi-empirische Cosinus Korrektur

Illuminationsunterschiede in multitemporalen, optischen Satellitendaten über flachem Gelände können mit der Cosinus Korrektur eliminiert werden [Teillet P., et al., 1982, p.88]. In topographisch anspruchsvollerem Gebiet ist ihre Anwendbarkeit durch Artefakte und Überkorrekturen beschränkt. Ihr liegt eine einfache trigonometrische Beziehung zugrunde, die physikalisch begründet werden kann.

Die total einfallende Sonnenstrahlung ist abhängig von der Solarkonstante und dem aktuellen Sonnenstand (Sonnenzenitwinkel sz). Der Anteil der totalen, direkten Strahlung, die eine geneigte Ebene erreicht, ist abhängig vom Sonneneinfallswinkel ('incidence angle' i), definiert durch den Winkel zwischen dem Strahlungsvektor der Sonne und der Flächennormalen auf die Ebene. Die reflektierte Strahlung einer geneigten Fläche L_T kann mit folgender Formel auf die

reflektierte Strahlung einer horizontalen Fläche L_H umgerechnet werden:

$$L_H = L_T \frac{\cos(sz)}{\cos(i)} \quad (21)$$

wobei

L_H = reflektierte Strahlung einer horizontalen Fläche

L_T = reflektierte Strahlung einer geneigten Fläche

sz = Sonnenzenitwinkel

i = Sonneneinfallswinkel relativ zur Flächennormalen

Die Cosinus-Korrektur berücksichtigt die diffusen Strahlungsanteile nicht. Nur die direkten Anteile werden modelliert. In schwach beleuchteten Gebieten oder in Regionen mit Eigenschatten kann eine extreme Überkorrektur auftreten oder das Modell nicht mehr definiert sein ($\cos(i) \rightarrow 0$).

Die Cosinus Korrektur kann nun mit einer aus den Bilddaten gewonnen empirischen Komponente für die zu optimierende Klasse kombiniert werden. Die Originalintensitätswerte der gewünschten Klasse werden den $\cos(i)$ Werten gegenübergestellt [Fig - 45]. Der Wald soll sich nun nach der Beleuchtungskorrektur in allen Beleuchtungsklassen homogen verhalten. Dies kann mittels der Bestimmung der Regressionsgeraden erreicht werden:

$$L_T = m \cdot \cos(i) + b \quad (22)$$

m, b = Regressionsparameter

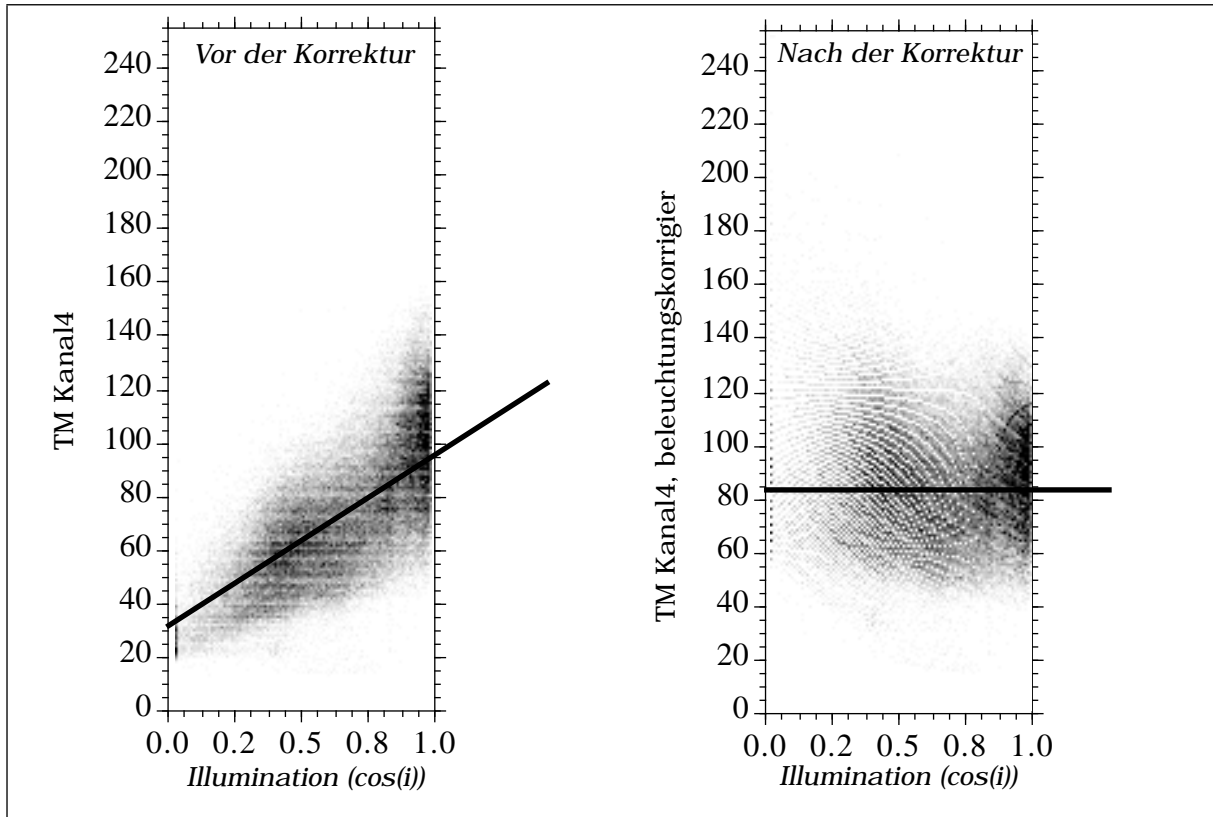


Fig. 45 : Regressionsgerade für Waldflächen nach Landeskarte
Landsat-TM Kanal 4, vor / nach der Korrektur
(Wolken ausmaskiert)

Als empirische Komponente führt [Teillet P., et al., 1982] nun einen neuen Parameter c in die Cosinusfunktion ein, welcher das Himmelslicht nachmodellieren sollte und die Überkorrektur infolge kleiner $\cos(i)$ Werte abschwächen hilft. Der Parameter c ist definiert als Quotient der Regressionsparameter Formel:(22):

$$c = \frac{b}{m} \quad (23)$$

Die semi-empirische Cosinus-Korrektur nimmt den Parameter c als Summand auf:

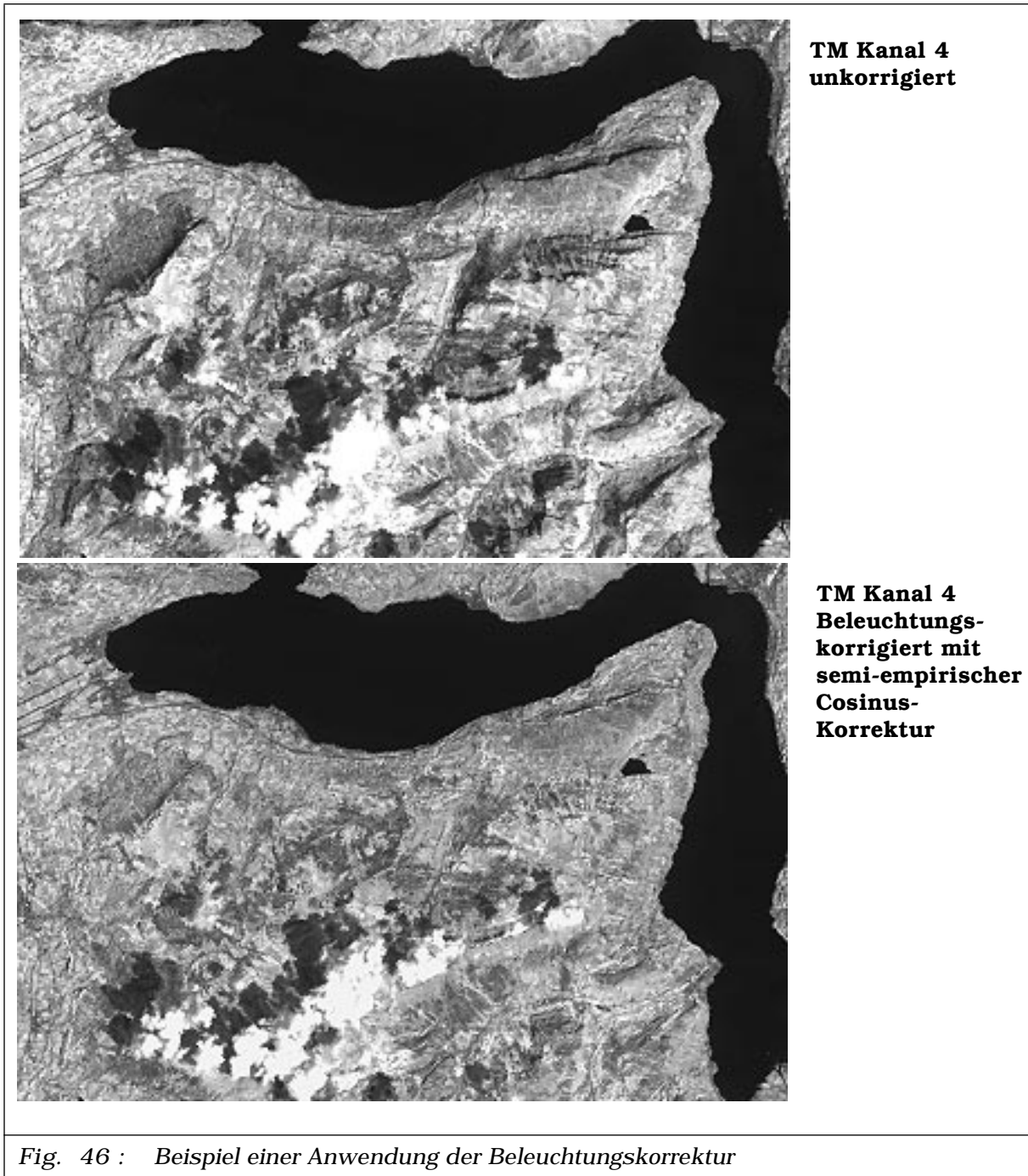
$$L_H = L_T \cdot \left(\frac{\cos(sz) + c}{\cos(i) + c} \right) \quad (24)$$

4 - 2.4.3.2 Anwendung der Beleuchtungskorrektur

Die semi-empirische Cosinus-Korrektur wurde auf die Satellitendaten, nach Nachbarschafts- und bilinearer Methode georeferenziert, angewendet. Die Berechnung der Illuminationswerte ($\cos(i)$) zu den Überflugszeiten wurden in [4 - 1.2] beschrieben. Die Optimierung (Regression) erfolgte in Hinblick auf das zu klassierende Objekt Wald. Die Beleuchtungskorrektur setzt ein minimales Wissen über die Waldverteilung im Testgebiet voraus. Zur Berechnung der Regressionsgerade zwischen Satellitendaten und Beleuchtung muss eine repräsentative Waldstichprobe mit Wald in allen Expositionen, Hangneigungen und Höhenlagen bekannt sein. Diese Stichprobe kann entweder manuell in den Daten erhoben werden, oder wie im vorliegenden Fall als Bodenreferenz vorliegen. Die Satellitendaten wurden unabhängig voneinander sowohl mit der Waldmaske nach Landeskarte, wie auch der durch analoge Interpretation von SPOT gewonnenen Maske korrigiert. Diese Masken bedecken auch Gebiete, die die Regressionsparameter nachteilig beeinflussen können.

Mit der Wolkenmaske für Landsat-Daten, respektive der Kondensstreifenmaske für SPOT-Daten wurden unauswertbare Gebiete in den Waldmasken eliminiert und von der Regressionsberechnung ausgeschlossen. Zur Vermeidung des Einflusses von Einzel- und Randpixel in den Satellitendaten wurden die Masken zur Regressionsberechnung zusätzlich um einen Faktor 2 erodiert.

Abbildung [Fig - 46] zeigt die Auswirkung der Beleuchtungskorrektur auf den Landsat Kanal 4. Der visuelle Reliefeindruck geht weitgehend verloren. Auf den Kreten sind die Artefakte infolge undefiniertem Cosinus des incidence Winkels ($\cos(0)$) als helle Streifen ersichtlich.



4 - 2.5 Übersicht über die Vorverarbeitung der Satellitendaten

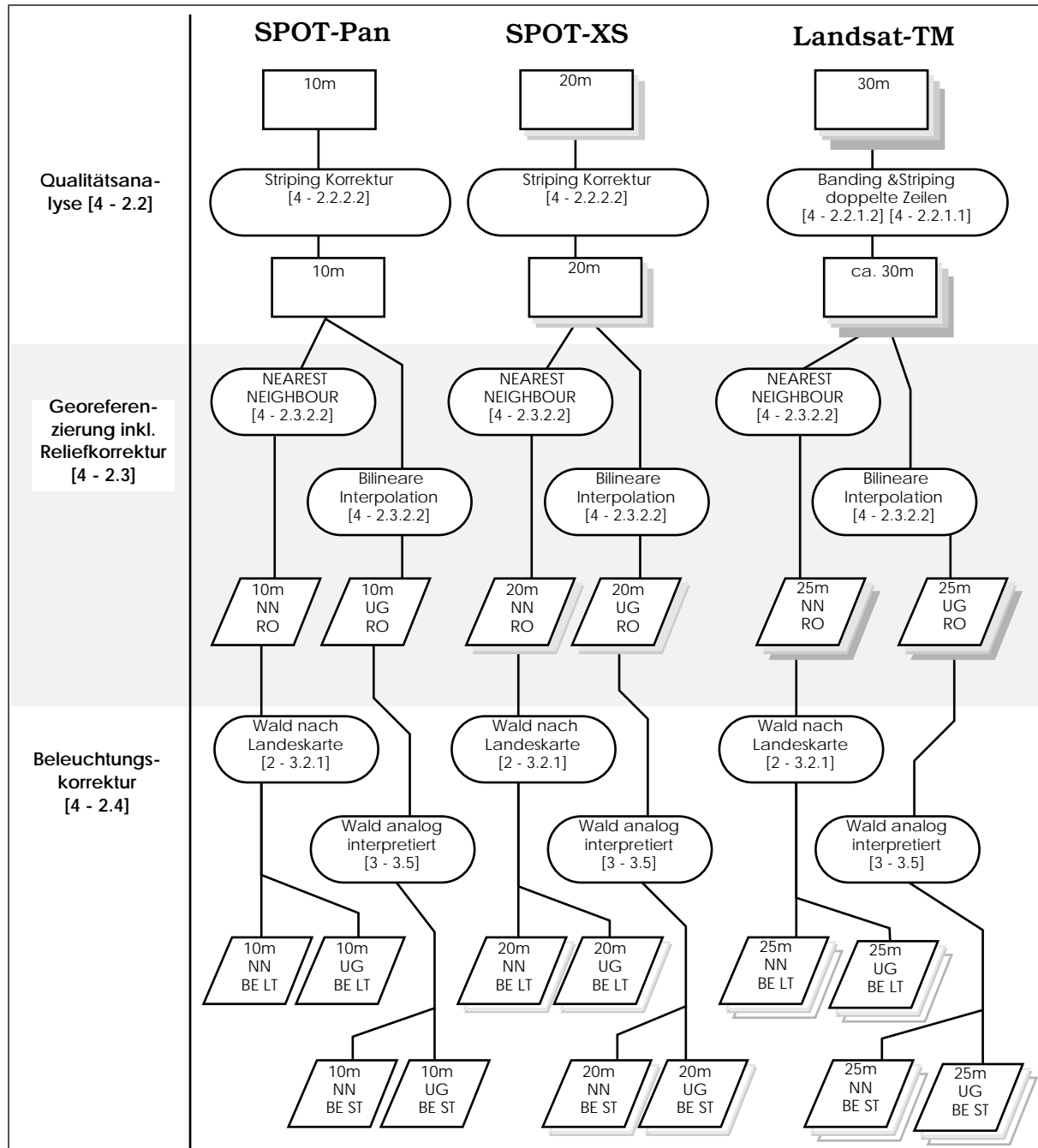


Fig. 47 : Vorverarbeitung der Satellitendaten
Interpolation: NN: nearest neighbour; UG: Umgebungsbasiert (bilinear)
Beleuchtungskorrektur: RO: keine Korrektur; BE: mit Korrektur
Waldmaske für Beleuchtungskorrektur: LT: nach Landeskarte, ST: analoge Satellitenbildauswertung SPOT Pan

In [Fig - 47] ist der Ablauf der Vorverarbeitung, wie er ausgeführt wurde, schematisch dargestellt. Es ist zu ergänzen, dass alle hier aufgeführten Datensätze flächenbasiert auf 100m * 100m Pixelauflösung skaliert wurden. Eine Waldklassifikation mit dem panchromatischen SPOT Kanal alleine ist nicht möglich. Darum wurden die Pan-Datensätze auch auf die 20m Pixelauflösung von SPOT XS skaliert und bilden mit den drei XS Kanälen einen weiteren Datensatz, d.h. der skalierte Pan Kanal wird als 4. Kanal zugeordnet, ohne dass eine numerische Kanalfusion stattfindet wie sie beispielsweise von [Darvishsefat A., 1995] vorgeschlagen wird.

Fusionen unterschiedlicher Datensätze von verschiedenen Sensoren sind nur dann sinnvoll für eine Waldklassifikation, wenn sie möglichst zeitgleich aufgenommen wurden. Aus Kostengründen wird man jedoch in operationellen Anwendungen darauf verzichten, sowohl SPOT-Pan und SPOT-XS-Daten des gleichen Aufnahmedatums, oder SPOT und Landsat-TM-Daten zu beschaffen. Die Informationen sind entweder zu redundant oder die Kosten rechtfertigen die zu erwartenden Genauigkeitssteigerung in der Klassifikation nicht. Der Sinn der vorliegenden Arbeit liegt unter anderem in der Ausarbeitung eines Beschaffungsvorschlages von Satellitendaten für die Waldklassifikation. Die Alternativen bestehen nur aus Landsat-TM-Daten, SPOT-XS-Daten oder als Zugeständnis zu der simultanen Aufnahmetechnologie von SPOT in zwei Modi aus der nichtfusionierten Kombination von SPOT-Pan und SPOT-XS-Daten.

4 - 2.5.1 Generierte Datensätze für die Klassifikation

Die folgende Tabelle zeigt alle 36 Datensätze, welche in der Klassifikation verwendet werden. Zur Vereinfachung wird den Datensätzen ein Bezeichnungscode zugewiesen, welcher den Typ und die Vorverarbeitung implizit enthält. Dieser Code ist aus zweistelligen Segmenten aufgebaut und wird für die gesamte Arbeit verwendet. Die Beschreibung ist dem Kapitel [5 - 1.1] zu entnehmen.

Datensatz	Anzahl Kanäle	berechnet ab	skaliert ab
SPOT XS 20m und 100m Auflösung			
XS-20-NN-RO	3	ROHDATEN	
XS-20-UG-RO	3	ROHDATEN	
XS-20-NN-BE-LT	3	XS-20-NN-RO	
XS-20-NN-BE-ST	3	XS-20-NN-RO	
XS-20-UG-BE-LT	3	XS-20-UG-RO	
XS-20-UG-BE-ST	3	XS-20-UG-RO	
XS-00-NN-RO	3		XS-20-NN-RO
XS-00-UG-RO	3		XS-20-UG-RO
XS-00-NN-BE-LT	3		XS-20-NN-BE-LT
XS-00-NN-BE-ST	3		XS-20-NN-BE-ST
XS-00-UG-BE-LT	3		XS-20-UG-BE-LT
XS-00-UG-BE-ST	3		XS-20-UG-BE-ST
SPOT XS und Pan 20m und 100m Auflösung			
XP-20-NN-RO	4	ROHDATEN	Pan ab 10m
XP-20-UG-RO	4	ROHDATEN	Pan ab 10m
XP-20-NN-BE-LT	4	XP-20-NN-RO	Korrektur Pan auf 10m
XP-20-NN-BE-ST	4	XP-20-NN-RO	Korrektur Pan auf 10m
XP-20-UG-BE-LT	4	XP-20-UG-RO	Korrektur Pan auf 10m
XP-20-UG-BE-ST	4	XP-20-UG-RO	Korrektur Pan auf 10m
XP-00-NN-RO	4		XP-20-NN-RO
XP-00-UG-RO	4		XP-20-UG-RO
XP-00-NN-BE-LT	4		XP-20-NN-BE-LT
XP-00-NN-BE-ST	4		XP-20-NN-BE-ST
XP-00-UG-BE-LT	4		XP-20-UG-BE-LT
XP-00-UG-BE-ST	4		XP-20-UG-BE-ST
Landsat-TM 25m und 100m Auflösung			
TM-25-NN-RO	6	ROHDATEN	
TM-25-UG-RO	6	ROHDATEN	
TM-25-NN-BE-LT	6	TM-25-NN-RO	
TM-25-NN-BE-ST	6	TM-25-NN-RO	
TM-25-UG-BE-LT	6	TM-25-UG-RO	
TM-25-UG-BE-ST	6	TM-25-UG-RO	
TM-00-NN-RO	6		TM-25-NN-RO
TM-00-UG-RO	6		TM-25-UG-RO
TM-00-NN-BE-LT	6		TM-25-NN-BE-LT
TM-00-NN-BE-ST	6		TM-25-NN-BE-ST
TM-00-UG-BE-LT	6		TM-25-UG-BE-LT
TM-00-UG-BE-ST	6		TM-25-UG-BE-ST

*Tabelle 19: Zusammenstellung aller verwendeten Satellitendatensätze
Zeichenerklärung siehe [5 - 1.1 Bezeichnungsschema der
Datensätze, Seite 184]*

4 - 2.5.2 Bildbeispiele aller verwendeten Kanäle

Zur Illustration sind in [Fig - 48] und [Fig - 49] die georeferenzierten und beleuchtungskorrigierten Bild-daten dargestellt. Die ausgenützte Dynamik in allen visuellen Bildkanälen ist durchwegs sehr eng, obwohl die Sensoren in ihrer Empfindlichkeit von den Satellitenbetreibern besser adaptiert werden könnten. Da aber in einem Überflug auch helle Schneegebiete im Norden der Erdhalbkugel und grosse Wasserflächen über den Meeren differenziert aufgenommen werden müssen, wurde bei Landsat und bei SPOT eine Kompromisseinstellung für diese Szenen vorgenommen. In den Nahinfrarot-Kanälen tritt eine deutliche Bimodalität in den Histogrammen auf, die auf das schwache Reflexionsverhalten der Wasserfläche gegenüber der Landfläche zurückzuführen ist.

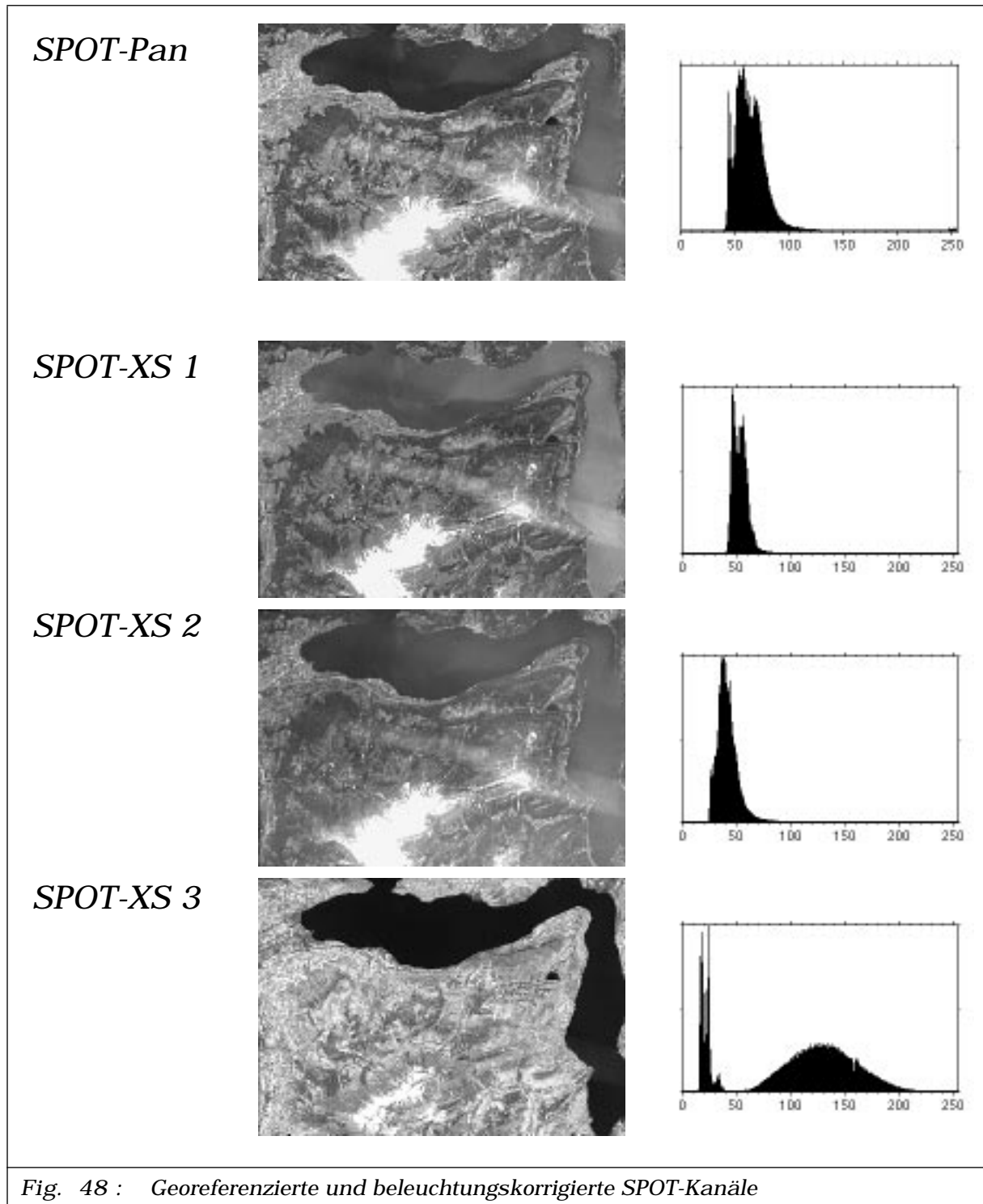


Fig. 48 : Georeferenzierte und beleuchtungskorrigierte SPOT-Kanäle

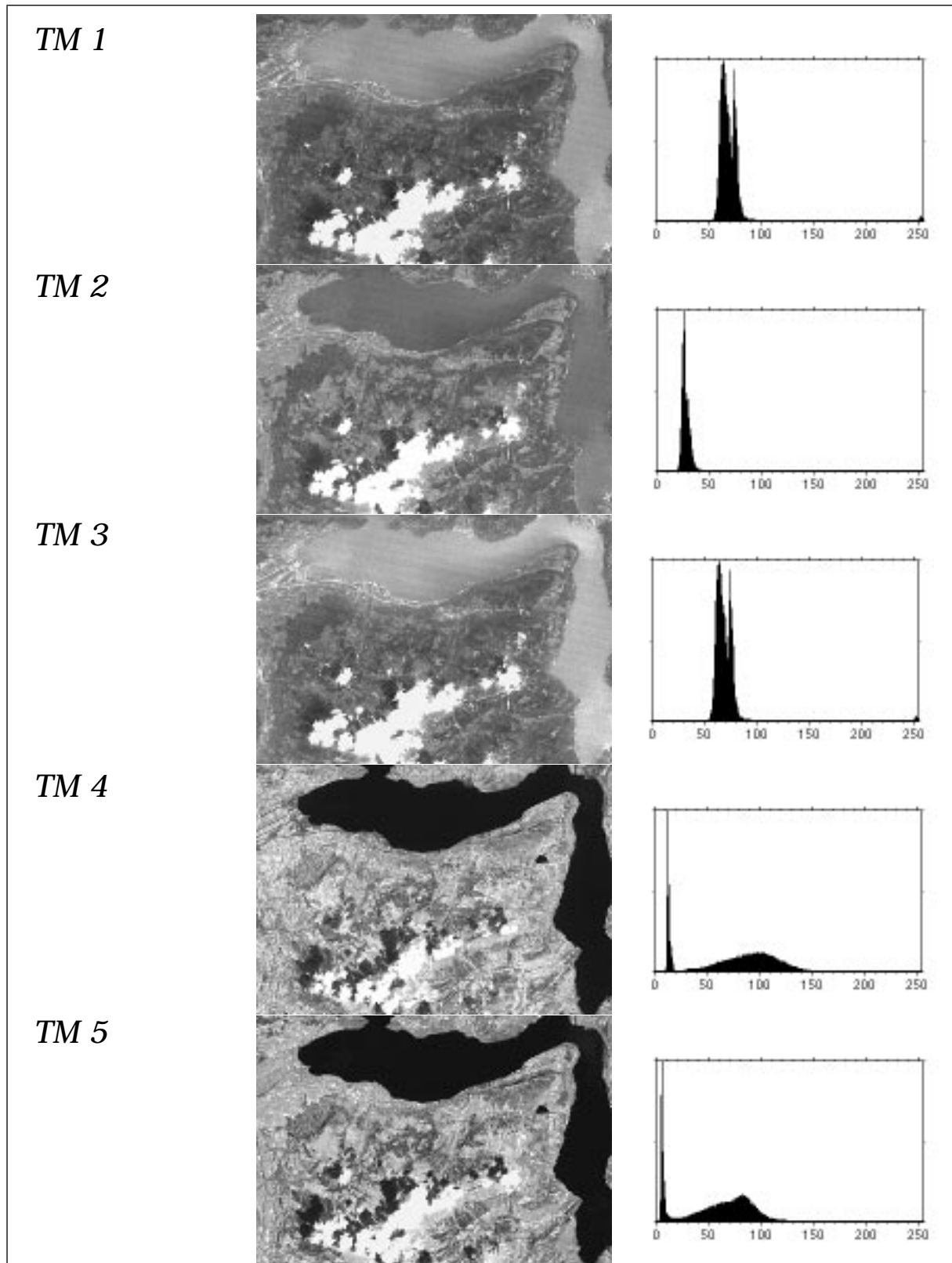
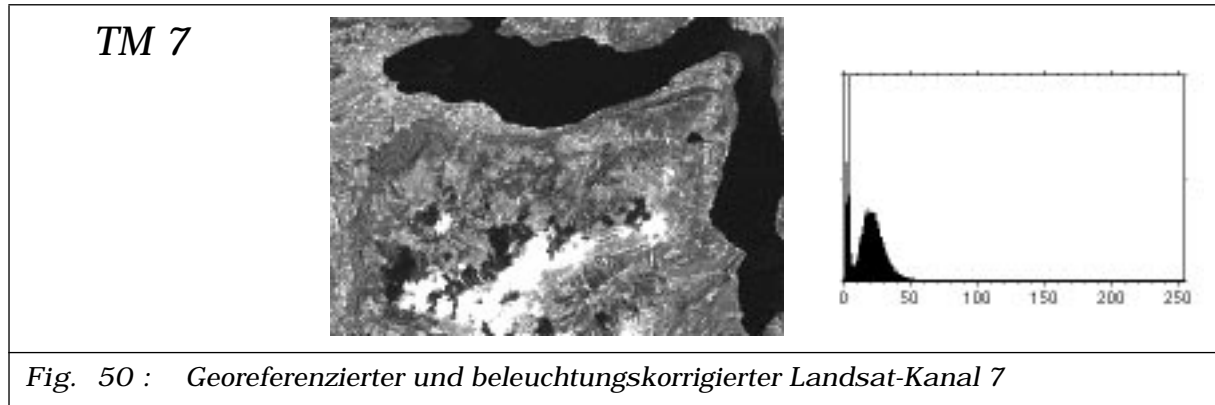


Fig. 49 : Georeferenzierte und beleuchtungskorrigierte Landsat-Kanäle 1-5



KAPITEL 5 Waldklassifikation

Die folgenden Kapitel befassen sich mit der eigentlichen Klassifikation der Satellitendatensätze im Untersuchungsgebiet Beckenried. Zu Beginn wird ein Bezeichnungscode für die eindeutige Identifikation der verwendeten Ausgangs- und Referenzdaten eingeführt, welcher auch als Orientierung in den vollständigen Resultaten im Anhang dient. Anschliessend wird der verwendete Klassifikationsalgorithmus erläutert und die verwendeten Genauigkeitsmasse der pixelbasierten Klassifikationen vorgestellt.

Das anschliessende Kapitel zeigt in einer Übersicht die verschiedenen Daten- und Verfahrenskombinationen, welche im Rahmen der Waldflächenklassifikation getestet wurden. Die Analysen erfolgen getrennt nach den unterschiedlichen Einflussfaktoren wie Resampling, Beleuchtungskorrektur, Bodenreferenzdaten und Masken. Sie führen zu einer Empfehlung für eine grossräumige Waldflächenklassifikation in der Schweiz, respektive dem mitteleuropäischen inklusive alpinen Waldgürtel.

5 - 1 KLASSIFIKATIONSGRUNDLAGEN

5 - 1.1 Bezeichnungsschema der Datensätze

Zur Übersichtlichkeit und Schematik wird ein Bezeichnungscode für die Ausgangsdaten und die Referenzdaten, basierend auf den verwendeten Bodenreferenzdaten, den Satellitendaten und den angewandten Prozessierungsschritten eingeführt. Zusätzlich werden die Ergebnisse nach der geometrischen Auflösung der Klassifikation gruppiert.

5 - 1.1.1 Schema für die Ausgangsdaten

Der Bezeichnungscode für die Ausgangsdaten zur Klassifikation besteht aus maximal sieben zweistelligen Codesegmenten. Diese Segmente werden in sequentieller Reihenfolge mit Bindestrichen aneinandergereiht und definieren eineindeutig die Klassifikation. Das siebte Codesegment wird nur in Zusammenhang mit der Anwendung einer Wolkenmaske auf Landsat TM-Daten gebraucht.

<p>Fig. 51 : Schematik der Bezeichnungscode für die verwendeten Ausgangsdaten</p>	<p>Segment 1 (Verwendete Sensoren):</p> <p>XS SPOT XS (054/255, 30.6.1991, 10:31 UTC)</p> <p>XP SPOT XS & Pan (054/255, 30.6.1991, 10:31 UTC)</p> <p>TM Landsat TM (195/27, 11.7.1991, 09:40 UTC)</p>
	<p>Segment 2 (Geometrische Auflösung der Klassifikation):</p> <p>10 10m</p> <p>20 20m</p> <p>25 25m</p> <p>00 100m</p>
	<p>Segment 3 (Angewandte Geokodierungsmethode, 'Resampling'):</p> <p>NN NN: 'nearest neighbour' Verfahren</p> <p>UG UG: Umgebungsbasiertes 'bilineares' Verfahren</p>
	<p>Segment 4 (Angewandte Beleuchtungskorrektur):</p> <p>RO keine Korrektur angewandt</p> <p>BE semi-empirische C-Korrektur angewandt</p>

Segment 5 (Verwendeter Stichprobensatz):	
LT	Wald-Stichproben gemäss Landeskarte L+T
ST	Wald-Stichproben gemäss analoger Satellitenbilddauswertung von SPOT Pan-Daten
Segment 6 (Verwendete Masken auf dem Stichprobensatz):	
OO	keine Maske verwendet
WO	Wolkenmaske
KO	Kondensstreifenmaske
SS	Schlagschattenmaske
WK	Wolkenmaske und Kondensstreifenmaske
WS	Wolkenmaske und Schlagschattenmaske
KS	Kondensstreifenmaske und Schlagschattenmaske
AL	Wolkenmaske, Kondensstreifenmaske und Schlagschattenmaske
Segment 7 (optionaler Dilatationsfaktor für die Wolkenmasken):	
00	Stichprobensatz = Dilatationsfaktor 0 ; Referenzdatensatz = Dilatationsfaktor 0
02	Stichprobensatz = Dilatationsfaktor 0; Referenzdatensatz = Dilatationsfaktor 2
20	Stichprobensatz = Dilatationsfaktor 2; Referenzdatensatz = Dilatationsfaktor 0
22	Stichprobensatz = Dilatationsfaktor 2; Referenzdatensatz = Dilatationsfaktor 2

Die folgende Code-Sequenz definiert z.Bsp. eine Klassifikation von Landsat-TM-Daten (TM) mit einer Auflösung von 25m (25). Die Satellitendaten wurden vorgängig mit einem 'nearest neighbour' Verfahren geokodiert (NN). Die unterschiedliche Beleuchtung in den Satellitendaten in Abhängigkeit des Sonnenstandes wurden mit einer semi-empirischen C-Korrektur normalisiert (BE). Die zur Waldklassifikation notwendigen Stichprobendaten, dh. Wald-, Wasser- und Nichtwaldstichproben, basieren auf dem Grünauszug der Landeskarte 1:25'000 (LT). Aus dem Stichprobensatz wurden die Wolken und Schlagschattengebiete (WS) ausmaskiert, wobei aber weder in den Stichproben noch in den Referenzdaten die verwendete Wolkenmaske verbreitert wurde (OO).

Fig. 52 : Beispiel eines Bezeichnungs-codes

LT	25	NN	BE	LT	WS	[OO]
1	2	3	4	5	6	7

CODE: XS-20-NN-BE-LT-WS-OO

5 - 1.1.2 Schema für die Referenzdaten

Analog den Ausgangsdaten, im speziellen der verwendeten Stichproben und Stichprobenmasken, wird für die Identifikation der Vergleichs- oder Referenzdaten ein Bezeichnungscode verwendet, der sich in den Genauigkeitstabellen und -graphiken wiederfindet. Dabei sind zusätzlich noch zwei zweistellige Codesegmente notwendig [Fig - 53].

<p>Fig. 53 : Schematik der Bezeichnungs-codes für die verwendeten Referenzdaten</p>	<p>Segment A (Verwendeter Referenzdatensatz):</p> <p><input type="checkbox"/> LT Wald-Referenzdaten gemäss Landeskarte L+T</p> <p><input type="checkbox"/> ST Wald-Referenzdaten gemäss analoger Satellitenbilddauswertung von SPOT Pan-Daten</p>
	<p>Segment B (Verwendete Masken auf dem Referenzdatensatz):</p> <p><input type="checkbox"/> OO keine Maske verwendet</p> <p><input type="checkbox"/> WO Wolkenmaske</p> <p><input type="checkbox"/> KO Kondensstreifenmaske</p> <p><input type="checkbox"/> SS Schlagschattenmaske</p> <p><input type="checkbox"/> WK Wolkenmaske und Kondensstreifenmaske</p> <p><input type="checkbox"/> WS Wolkenmaske und Schlagschattenmaske</p> <p><input type="checkbox"/> KS Kondensstreifenmaske und Schlagschattenmaske</p> <p><input type="checkbox"/> AL Wolkenmaske, Kondensstreifenmaske und Schlagschattenmaske</p>

Die folgende Code-Sequenz [Fig - 54] für die verwendeten Referenzdaten zeigt, dass sowohl die Wolkenmaske als auch die Kondensstreifenmaske (WK) auf die Waldreferenzdaten, die mittels analoger Satellitenbilddauswertung ab SPOT-Pan-Daten erhoben wurden, angewendet worden sind. Diese Daten dienen dann als absolute Referenz für die Genauigkeitsanalyse.

<p>Fig. 54 : Beispiel eines Bezeichnungs-codes für die verwendeten Referenzdaten</p>	<p><input type="checkbox"/> ST <input type="checkbox"/> WK</p> <p>A B</p> <p>CODE: -ST-WK</p>
--------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

5 - 1.2 Klassifikationsalgorithmus

Die Interpretation / Klassifikation von optischen Satellitendaten besteht grundsätzlich in der Segmentierung des mehrdimensionalen Datenraumes (Bildwertematrix in mehreren Kanälen) in die gewünschten Objektklassen.

5 - 1.2.1 Bildinterpretation

Die Bildinterpretation, welche hinlänglich von der konventionellen Luftbildinterpretation bekannt ist, segmentiert den Untersuchungsraum nach der Erscheinung des Objektes in seinem räumlichen Kontext. Die Abgrenzungskriterien beschränken sich nicht auf das Verhalten eines einzelnen Bildelementes, sondern auf räumliche Variablen wie Kontrast, Form, Grösse, Textur, Muster, Lage, Schatten und eine Bandbreite des Messsignales von Bildelementgruppen ('*cluster*') [Bähr H.-P., et al., 1991]. Mit dem zusätzlichen Fachwissen des Interpreten können diese Merkmale eines Objektes auch zu funktionellen, qualitativen Einheiten zusammengefasst werden. Zumeist erfolgt die Bildinterpretation visuell auf der Basis von bildverbesserten Analogprodukten als Hardcopy oder am Bildschirm, den Visualisierungen der digitalen Satellitendaten. Ein typisches Beispiel ist die in Kapitel [3 - 3.5] generierte Waldmaske, welche mittels analoger Bildinterpretation der SPOT-Pan-Daten am Bildschirm erhoben wurde. Digitale Bildinterpretation, d.h. Klassierung mit kontext-sensitiven Algorithmen, ist sehr aufwendig und zumeist auf wenige Parameter, wie Form, Textur, Muster, Kontrast etc. beschränkt. Als Beispiel sei eine Interpretation landwirtschaftlicher Flächen in einem Flugzeugscannerbild von [Meyer P., 1990] angeführt. Das oftmals unfassbar grosse Expertenwissen des Interpreten kann in den seltensten Fällen vollumfänglich digital formuliert werden.

5 - 1.2.2 Pixelbasierte, multispektrale Klassifikationen

Die Grundlage der pixelbasierten, multispektralen Klassifikation ist die gemessene elektromagnetische Energie pro Bildelement und Kanal. Jedes Bildelement

besitzt daher einen charakteristischen Messvektor im mehrdimensionalen Merkmalsraum des Datensatzes. Diese Merkmalsvektoren können dann gruppiert und einer Objektklasse zugeordnet werden. Im Gegensatz zu der Bildinterpretation kann der nachbarschaftliche Kontext nur bedingt berücksichtigt werden.

Pixelbasierte, multispektrale Klassifikationsverfahren werden zumeist rechnergestützt durchgeführt. Der Prozess der Informationsextraktion beruht auf der Analyse der spektralen Signaturen und der anschließenden Zuordnung von Pixeln zu Objektklassen nach Ähnlichkeitskriterien. Überwachte Klassifikationsverfahren benutzen unabhängige Informationsquellen, wie Trainingsgebiete aus Bodenreferenzdaten, für die Zuordnung der einzelnen Merkmalsvektoren zu den Objektklassen. Es handelt sich um Methoden der Mustererkennung, welche genaues Vorwissen über die im Datensatz vorkommenden Objekte zur Bildung von Musterklassen im Klassifikationsprozess erfordern. Unüberwachte Klassifikationsverfahren stützen sich alleine auf die statistischen Eigenschaften des Bildinhaltes ab und segmentieren den Bildraum nur basierend auf der Verteilung des spektralen Messsignals.

5 - 1.2.2.1 Digitale, überwachte Klassifikationsverfahren

Nach [Lillesand T., et al., 1987] gliedert sich der digitale Klassifikationsprozess in drei Stufen:

1. Trainingsstufe: Für jede Objektklasse werden die spektralen Attribute bestimmt. Basierend auf repräsentativen Stichproben pro Objektklasse werden statistische Parameter wie Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung im mehrdimensionalen Merkmalsraum der Satellitendaten berechnet.

2. Klassifikationsstufe: Die Signatur jedes Bildelementes wird mit den verschiedenen spektralen Objektattributen verglichen und der ähnlichsten Klasse zugeordnet. Die Zuordnung kann mittels verschiedenster Strategien, sogenannten Klassifikationsalgorithmen, erfolgen. Bei eindeutiger Zuordnung wird das Bildelement mit dem Klassencode versehen. In Zweifelsfällen, bei keiner oder zu geringer Ähnlichkeit, kann ein Bildelement auch mit dem Attribut 'nicht zuordnungsbar' versehen werden. Gewisse Klassifika-

toren lassen auch Mehrfachzuordnungen zu verschiedenen Objektklassen zu.

3. Ausgabe- und Überprüfungsstufe: Die Bildelemente werden mit dem Zuordnungscode versehen und als Klassifikationsergebnis ausgegeben. Eine Genauigkeitsüberprüfung mit Bodenreferenzdaten auf digitaler (oder auch visueller) Basis rundet den Prozess ab.

Es gibt eine Vielzahl von überwachten Klassifikationsverfahren, die in der multispektralen, optischen Fernerkundung verwendet werden wie 'Parallel-Epiped'-Methode (PPD), Zentroidmethode, minimale Distanzmethode, maximale Mutmasslichkeit ('maximum likelihood') etc. Ausführliche Beschreibungen sind in [Bähr H.-P., et al., 1991, pp.172], [Darvishsefat A., 1995, pp. 72], [Itten K., 1979, pp.20], [Kraus K., et al., 1988 (b), pp.533], [Schumacher H., 1991, pp.36], [Weissflog G., 1993, pp.62] zu finden. Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahren wird daher verzichtet.

5 - 1.2.2.2 Limitierende Faktoren

Die operationalisierte Anwendung von überwachten, digitalen Klassifikationsverfahren stellt an die Klassifikationsalgorithmen gewisse, teilweise einschränkende Anforderungen. Dies gilt insbesondere, wenn wie im vorliegenden Falle verschiedene Datensätze und Vorverarbeitungsverfahren gegeneinander abgewogen werden sollen. Subjektive Einflüsse des Interpreten auf die Steuerung der Algorithmen müssen tunlichst vermieden werden.

Die Definition der Trainingsgebiete für die Objektklassen erfordert besondere Sorgfalt und müssen klar bestimmt werden. Die Trennbarkeit im mehrdimensionalen Datenraum muss überprüft werden und wenn nötig sind zusätzliche Klassen einzuführen. Die in der Einleitung besprochenen internen Arbeiten zur Waldflächenerfassung [1 - 3.1.1] haben gezeigt, dass zur Waldflächenidentifikation die Einführung der Objektklassen 'Wald', 'Nichtwald', und 'Wasser' notwendig ist. [Fig - 55] zeigt das Scatterogram der drei Objektklassen im zweidimensionalen Merkmalsraum der georeferenzierten und beleuchtungskorrigierten Landsat-TM Kanäle 2 und 4.

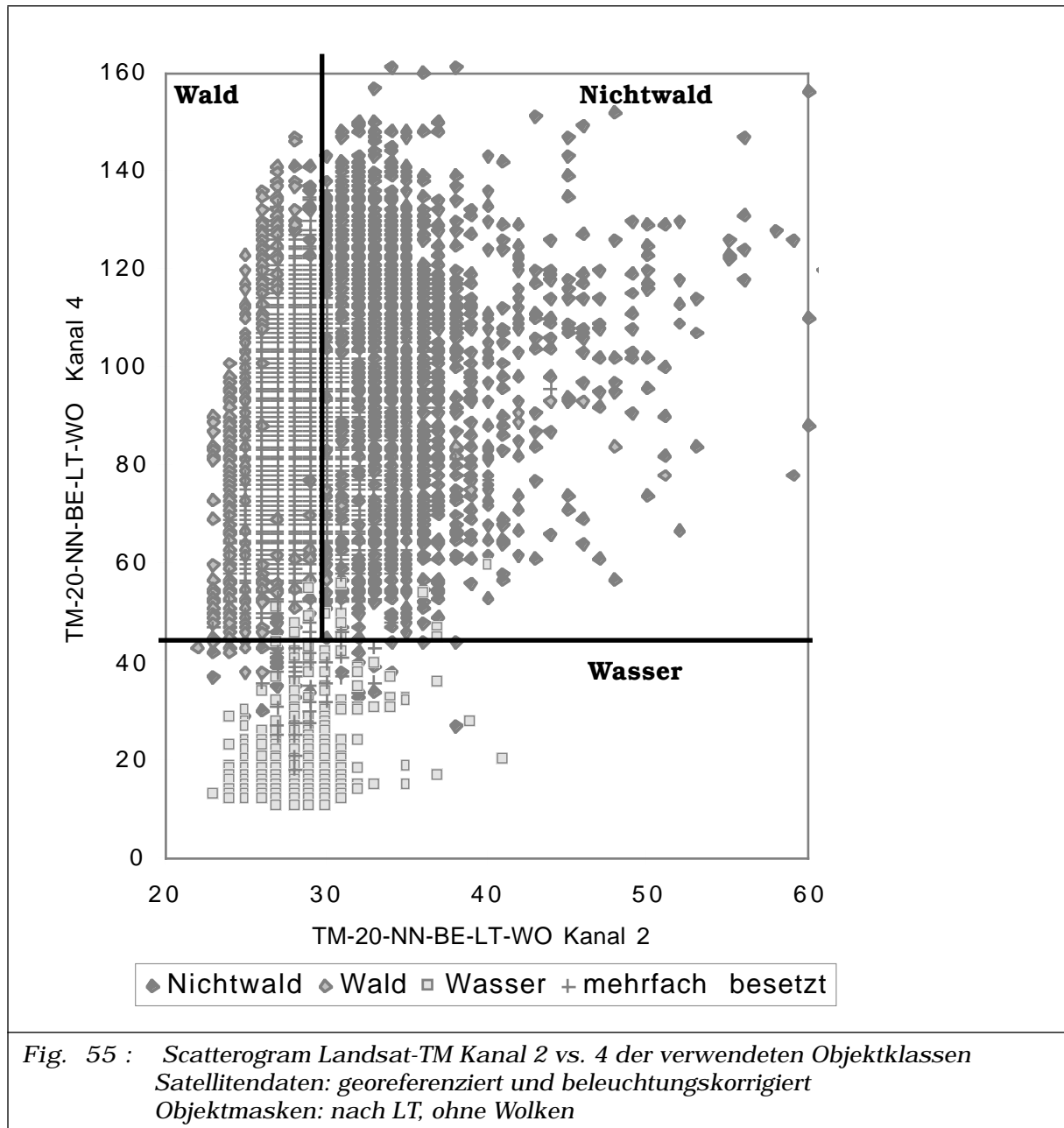


Fig. 55 : Scattergram Landsat-TM Kanal 2 vs. 4 der verwendeten Objektklassen
Satellitendaten: georeferenziert und beleuchtungskorrigiert
Objektmasken: nach LT, ohne Wolken

Die Objektklassen Wald und Nichtwald können in diesem Beispiel im Nahinfrarotkanal 4 vom Wasser und in sich im Grünkanal 2 mittels Geraden getrennt werden, was einem Parallel Eppiped Algorithmus PPD entsprechen würde. Der Überschneidungsbereich zwischen Wald und Nichtwald zeigt aber auf, dass die Trennung mittels Wahrscheinlichkeitsellipsoiden, wie sie der Maximum Likelihood Algorithmus verwendet, angebracht wäre.

Leider setzt dieser Algorithmus eine Normalverteilung der Objektklassen voraus, welche bei natürlichen Objekten in den seltensten Fällen gewährleistet ist. Insbesondere bei bimodalen Verteilungen können erhebliche Falschzuordnungen auftreten. Die im Maximum Likelihood Algorithmus geforderten a priori Wahrscheinlichkeiten sind zusätzlich in den seltensten Fällen verfügbar, ausser es handle sich um eine Nachführung einer bestehenden Klassifikation desselben Gebietes [Leiss I., et al., 1995 (b)].

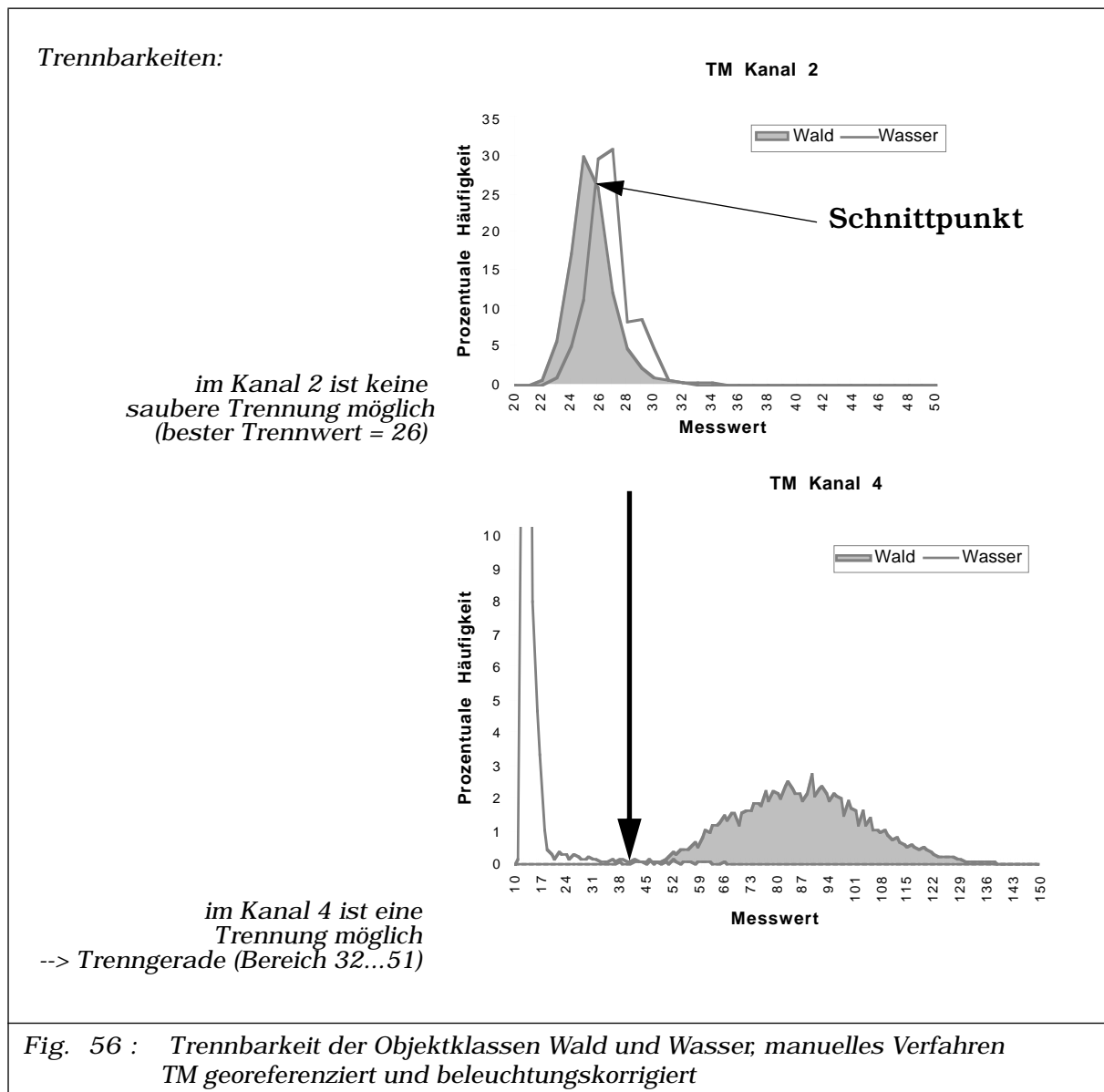
Aus den genannten Gründen wurde für die folgenden Klassifikationen eine Variante des PPD verwendet. Ein zusätzlicher Vorteil liegt in der geringeren erforderlichen Rechenleistung dieses Verfahrens, welche in operationalisierten Anwendungen positiv zu Buche schlägt.

5 - 1.2.2.3 Automatisierter PPD

Dem Parallel Epiped Algorithmus liegt ein deterministischer Ansatz zugrunde. Die Klassifikation einer Objektklasse wird durch rechteckige Entscheidungsregionen im mehrdimensionalen Merkmalsraum vorgegeben. Jede Klasse wird von den anderen durch Definition eines minimalen und maximalen Messwertes in einem oder mehreren Kanälen eindeutig abgetrennt. Die notwendigen Klassengrenzen können direkt im Histogramm der Musterklassen definiert werden. Nach [Schumacher H., 1991] ist besonders bei einer grossen Anzahl zu trennender Klassen und/oder in vielen Kanälen die Bestimmung der Grenzwerte sehr schwierig und kann zu Grenzüberlappungen führen. Das manuelle Bestimmen der Grenzwerte ist des weiteren sehr zeitaufwendig und kann in Überschneidungsbereichen der Histogramme zweier Musterklassen zu Problemen führen. [Fig - 56] zeigt die Trennbarkeit der Klassen Wald und Wasser in zwei verschiedenen Landsat-TM Kanälen.

[Fig - 56] zeigt deutlich, wie schwierig das manuelle Setzen der Trenngeraden ist. Der Spielraum für den Interpretieren ist gross und wird bei wiederholter Anwendung keine reproduzierbaren Ergebnisse liefern können. Müssten die beiden Klassen im Kanal 2 getrennt werden, so könnte man den Schnittpunkt als Trennwert definieren. Dabei würde der Gewichtung der Flä-

chenanteile der zwei Klassen kein Gewicht eingeräumt und eine unzulässige Verschiebung der Anzahl klassierter Bildelemente zur flächenärmeren Klasse wäre zu beklagen.



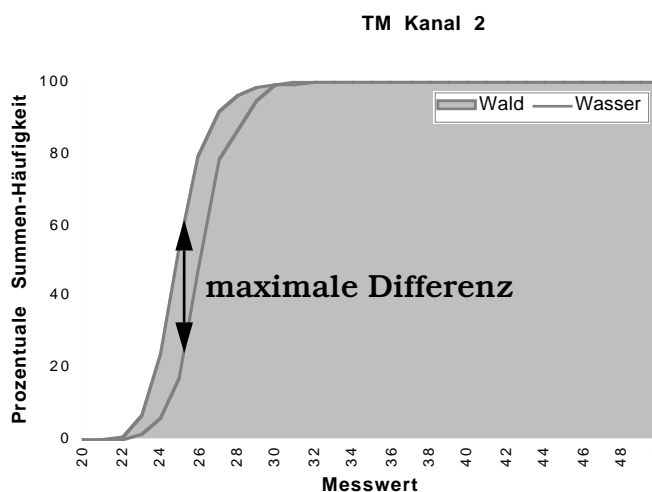
Um diese Unzulänglichkeiten zu umgehen wurde das automatische PPD Verfahren entwickelt. Die Basis zur Entscheidungsfindung des Trennpunktes liefert nicht das prozentuale Häufigkeitshistogramm der

Objektklassen (Stichproben), sondern die Summenhäufigkeitsverteilung zweier Klassen.

In jedem Kanal, der dem Klassifikator zur Verfügung gestellt wird, werden die maximalen Differenzen jeder Objektklasse zu den andern in den prozentualen Häufigkeitsdiagrammen berechnet. Die Messwertposition der maximalen Differenz liefert den optimalen Trennwert für zwei Klassen im betreffenden Kanal.

Trennbarkeiten:

im Kanal 2 ist keine saubere Trennung möglich, das Setzen des Trennwertes ist aber eindeutig (Trennwert 25)



im Kanal 4 ist eine Trennung mit eindeutiger Trenngerade möglich --> Trenngerade (Wert 50)

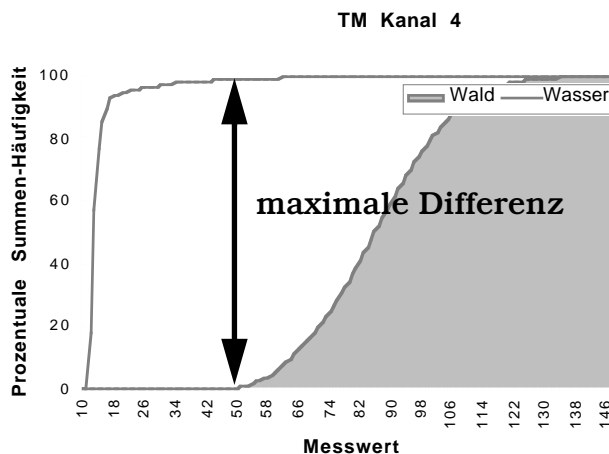


Fig. 57 : Trennbarkeit der Objektklassen Wald und Wasser, automatisiertes Verfahren TM georeferenziert und beleuchtungskorrigiert

Der Betrag der maximalen Differenz zweier Klassen variiert über die Kanäle und ist ein Mass für die Güte der Trennbarkeit und zugleich wird der Kanal zur

Trennung der zwei Objektklassen festgelegt. Wie [Fig - 57] zeigt, kann der Trennwert der zwei Klassen Wald und Wasser in allen Kanälen eindeutig zugewiesen werden. Der Betrag der maximalen Differenz in Kanal 4 ist deutlich grösser als in Kanal 2, darum sollten die zwei Klassen auch im 4. Kanal getrennt werden.

Die Definition eines PPD verlangt nun pro Klasse einen minimalen und maximalen Trennwert, wobei die maximale Differenz den einen Wert liefert. Der zweite Wert wird entweder durch eine Trennung von einer weiteren Klasse geliefert, oder umfasst den nach unten, respektive oben noch vorkommenden Wertebereich der Messwertrepräsentierung (0 respektive 255). So kann gewährleistet werden, dass alle vorkommenden Messwerte, welche in einer Musterklasse (Stichprobe) eventuell fehlen, einer Objektklasse zugeschlagen werden. Diese Ausdehnung der Klassenzugehörigkeit kann optional durch die Beschränkung auf den in der Stichprobe repräsentierten Wertebereich oder auf die Eingrenzung eines Bereiches mit Hilfe von Standardabweichungen der Musterklassen modifiziert werden. Das automatische PPD Verfahren verunmöglicht bei konsequenter Anwendung das Auftreten von Mehrfachklassifikationen. Für 3 zu unterscheidende Objektklassen werden mit dem automatischen PPD Verfahren minimal 1 und maximal 3 verschiedene Kanäle selektiert.

Alle folgenden Klassifikationen wurden mit dem automatischen PPD Verfahren berechnet. Als Eingabe wurde jeweils eines der 36 vollständigen Satellitendatensets, wie in Kapitel [4 - 2.5.1] beschrieben, mit 3 Kanälen (XS), 4 Kanälen (XP) oder 6 Kanälen (TM) genommen und basierend auf unterschiedlichen Trainingsmasken die Trennwerte der Objektklassen Wald, Nichtwald und Wasser gerechnet. Im Anschluss erfolgte die eigentliche PPD Klassierung automatisch mit den Trennwerten und den ausgewählten (maximal 3) Kanälen.

5 - 1.3 Klassifikationsüberprüfung

Jede Klassifikation ist mit Fehlern behaftet und erreicht nie eine 100% Genauigkeit. Die bei einer pixelweisen, digitalen Waldflächenklassifikation auftretenden Fehler können grob in die objektbedingten

und die verfahrensbedingten Klassifikationsfehler unterteilt werden.

Die objektbedingten Fehler haben ihre Ursache im natürlichen Verhalten des zu klassierenden Objektes. Viele der möglichen Fehlerquellen wie Objektgrösse, Aufnahmesituation, topographische Einflüsse, Mischpixelproblematik, spektral uneindeutiges Verhalten wurden in Kapitel [3 - 1.2] und anderen bereits diskutiert. Ihre Auswirkungen auf eine Klassifikation sind mehr oder weniger unabhängig vom gewählten Klassifikationsverfahren.

Die verfahrensbedingten Fehler sind andererseits direkt mit dem Klassifikationsalgorithmus und den verwendeten Stichproben- bzw. Referenzdaten gekoppelt. Die Güte einer Klassifikation steht in direktem Zusammenhang zur Charakteristik des Untersuchungsraumes, der Datenqualität, dem Auswerteverfahren und der Erfahrung des Interpreten, der das Zusammenspiel von Methode, Bodenreferenzdaten, Aufnahmesysteme etc. optimal aufeinander abstimmen muss. So können zum Beispiel in der Definition von Musterklassen (Stichproben) Fehler auftreten, wie Überlappungen und damit spektral nicht differenzierbare Klassen oder Fehlinformationen, die zu einer Über- oder Unterklassierung einzelner Objekte führen. Zu viele oder spektral zu ähnliche Objektklassen können den Diskriminanzraum überfordern. Oder noch gravierender, die Objektdefinition wird zu weit gefasst und kann sich nicht mehr auf einen einzigen dominanten Faktor abstützen, so dass physikalisch verschiedene Objekte in einer Klasse zusammenfallen (z.Bsp. Nichtwald).

Insbesondere bei der Entwicklung einer quasi-operationellen Klassifikationsmethode sind die thematischen Klassifikationsergebnisse einer objektiven Erfolgskontrolle zu unterziehen. Die Verfügbarkeit von repräsentativer Bodeninformation, als Vergleichsbasis ist eine absolute Notwendigkeit. Die Bereitstellung solcher Bodeninformation ist normalerweise sehr zeit- und kostenintensiv und wird bei operationeller Anwendung auf ein Minimum beschränkt. Bei der Methodenentwicklung ist es eine Voraussetzung, Bodeninformationen über das gesamte Untersuchungsgebiet bereitzustellen.

Eine visuelle Beurteilung der Daten lässt grobe Fehler in der Klassifikation schnell erkennen. Sie erfordert aber ein grosses Vorwissen seitens des Interpreten und ist subjektiv und nicht reproduzierbar. Ihre Aussage beschränkt sich auf lokale Ereignisse, kann aber auch der erste Schritt zur Fehleranalyse darstellen.

Eine digitale, pixelweise Überprüfung mit Referenzdaten ist objektiv (im Rahmen der Güte der Referenz) und kann reproduzierbar mit statistischen Kennwerten formuliert werden. Es zeigt sich aber, dass in vielen Klassifikationsarbeiten multispektraler Satelliten- und Luftbildern eine grosse Unsicherheit in der Anwendung und Interpretation der bekannten Genauigkeitsmasse vorherrscht. Darum sollen im folgenden Kapitel die gebräuchlichsten Masse definiert und ihre Anwendbarkeit diskutiert werden.

5 - 1.3.1 Klassifikationsgenauigkeit

Zur Verifizierung einer digitalen Klassifikation und/oder der Bestimmung der Klassifikationsgüte wird nach Möglichkeit ein Bodenreferenzdatensatz ('groundtruth') herbeigezogen und ein Vergleich auf Pixel-zu-Pixel Basis durchgeführt. Dabei wird zumeist von einer Fehlermatrix ('*error matrix*') ausgegangen, wobei auf der horizontalen Achse die Referenzdaten und auf der vertikalen Achse das Klassifikationsergebnis aufgetragen wird. Die richtig klassierten Bildelemente werden in der Fehlermatrix [Tab - 20] durch alle Elemente der Diagonalen dargestellt. Die falsch klassierten Bildelemente teilen sich in:

- **Fehler 1. Art:** ('*commission error*'): Alle irrtümlich einer anderen Klasse zugewiesenen Elemente.
- **Fehler 2. Art:** ('*ommission error*'): Alle von ihrer Klasse nicht erkannten Bildelemente.

		groundtruth				
Klassifikation	KLASSE	1	2	...	i	SUMME
	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1i}	$\sum_{a=1}^n x_{1a}$
	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2i}	$\sum_{a=1}^n x_{2a}$
	...	...	...	...	...	$\sum_{a=1}^n x_{?a}$
	i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ii}	$\sum_{a=1}^n x_{ia}$
	SUMME	$\sum_{a=1}^n x_{a1}$	$\sum_{a=1}^n x_{a2}$	$\sum_{a=1}^n x_{a?}$	$\sum_{a=1}^n x_{ai}$	richtig klassierte Pixel

richtig klassierte Pixel	commis- sion error Fehler 1.Art	ommis- sion error Fehler 2.Art	N Gesamtpix- elzahl	n Anzahl Klassen
--------------------------------	------------------------------------------	-----------------------------------------	---------------------------	------------------------

Tabelle 20: Fehlermatrix

5 - 1.3.1.1 'overall accuracy' ('overall performance accuracy'):

Die 'overall accuracy' ist das Verhältnis der Hauptdiagonalen zu der Gesamtzahl der zu klassierenden Pixel. Dieses Mass ist einfach, aber wenig aussagekräftig. Die Fehler 1.Art und 2.Art werden nicht berücksichtigt. Zufallsübereinstimmungen sind möglich ('chance agreement'). Neben einer hohen 'overall accuracy' sollten auch die Genauigkeiten der einzelnen Objekte möglichst gleich hoch sein.

$$A_0 = \frac{\sum_{a=1}^n x_{aa}}{N}$$

$$A_0 = \frac{\text{richtig klassierte Pixel}}{\text{alle Pixel}} \quad (25)$$

Zur Überprüfung der Ausgewogenheit verwendet man die folgenden zwei klassenspezifischen Genauigkeitsmasse [Story M., et al., 1986]:

5 - 1.3.1.2 'producer's accuracy':

Der Kartenhersteller ('*producer*') ist interessiert, wie gut eine Objektklasse *b* richtig klassiert werden kann.

$$P_b = \frac{x_{bb}}{\sum_{a=1}^i x_{ab}} \cdot 100$$

$$P_b = \frac{\text{richtig Klassierte der Klasse (b)}}{\text{Klasse (b) in Groundtruth}} \cdot 100 \quad (26)$$

Dabei werden die der Klasse (b) falsch zugeordneten Bildelemente nicht berücksichtigt. Die 'producer's accuracy' zeigt an, wie häufig ein Pixel der Referenzdaten richtig klassiert wurde.

5 - 1.3.1.3 'user's accuracy':

Der Kartenbenutzer ('*user*') ist interessiert an der Zuverlässigkeit der hergestellten thematischen Karte.

$$U_b = \frac{x_{bb}}{\sum_{a=1}^i x_{ba}} \cdot 100$$

$$U_b = \frac{\text{richtig Klassierte der Klasse (b)}}{\text{Klasse (b) in Klassifikation}} \cdot 100 \quad (27)$$

Hier werden die Pixel von Objekt (b), die nicht zur Klasse (b) zugeordnet wurden, nicht berücksichtigt. Die 'user's accuracy' zeigt die Wahrscheinlichkeit an, dass es sich bei einem klassierten Pixel der Klasse (b) auch in der Wirklichkeit um das Objekt (b) handelt.

5 - 1.3.1.4 'inclass accuracy'

Die Qualität der Trennwertsetzung in den PPD Verfahren kann mit der 'user's accuracy' und 'producer's accuracy' nicht beurteilt werden, da eine Verschiebung der Trenngeraden das Genauigkeitsmass auf Kosten des anderen beeinflusst. Um sowohl Fehler der 1.Art als auch Fehler der 2. Art, wie sie bei den erwähnten Genauigkeitsmassen auftreten können, in einem Schritt zu berücksichtigen, definierte [Darvishsefat A., 1995, pp.79] u.a. das Genauigkeitsmass '*inclass*'.

$$\text{Inclass}_b = \frac{x_{bb}}{\sum_{a=1}^i x_{ba} + \sum_{a=1}^i x_{ab} - \left(2 \cdot \left(\sum_{a=1}^i x_{bb} \right) \right)}$$

$$\text{Inclass}_b = \frac{\text{richtig Klassierte der Klasse (b)}}{\text{zuwenig + zuviel Klassierte der Klasse (b)}} \quad (28)$$

Ein höheres Inclass-Mass einer Klasse weist auf einen optimalen Kompromiss zwischen Fehler 1.Art und 2.Art hin. Das Genauigkeitsmass eignet sich auch zur Beurteilung der Eignung zweier Kanäle in der Klassifikation.

5 - 1.3.1.5 'average accuracy'

Die 'average accuracy' ist durch folgende Formel gegeben:

$$A_A = \frac{\sum_{a=1}^n U_a}{n}$$

$$A_A = \frac{\text{Summe der user accuracies aller Klassen}}{\text{Anzahl Klassen}} \quad (29)$$

5 - 1.3.1.6 'mean accuracy'

Die 'mean accuracy' berechnet sich nach folgender Formel:

$$A_M = \frac{A_O + A_A}{2}$$

$$A_A = \frac{\text{overall accuracy} + \text{average accuracy}}{2} \quad (30)$$

5 - 1.3.1.7 'kappa' Koeffizient

Um die sogenannte Zufallsübereinstimmung ('*chance agreement*') von der Gesamtgenauigkeit ('*overall accuracy*') einer Fehlermatrix zu entfernen, wird der 'kappa' Koeffizient eingeführt. Der 'kappa' Koeffizient zeigt, wie gut ein Klassifikationsergebnis mit dem Groundtruth übereinstimmt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass anhand der Varianz des 'kappa'-Koeffizienten ein Signifikanztest zur Beurteilung verschiedener Klassifikationsaspekte durchgeführt werden kann. Dieser statistische Parameter hat sich bei der Evaluation der Klassifikationsergebnisse von Satellitendaten gut bewährt. Zur Berechnung des 'kappa'-Koeffizienten wird die Zufallsübereinstimmung eliminiert und durch deren maximal möglichen Wert bei gegebenem *chance agreement* normalisiert. Der höchste Wert von 'kappa' ist damit immer gleich 1 [Darvishsefat A., 1995, pp.81].

$$\text{'kappa' Koeffizient: } \hat{K} = \frac{A_O - \theta}{1 - \theta} \quad (31)$$

$$\text{wobei: } \theta = \frac{\sum_{a=1}^n x_{ai} \cdot x_{ia}}{N^2} \quad \text{die Zufallsübereinstimmung}$$

ist. (32)

5 - 1.3.2 Verwendete Genauigkeitsmasse

In allen in dieser Arbeit vorgenommenen Genauigkeitsüberprüfungen der Waldflächenklassifikationen wurde das gesamte erwähnte Spektrum der Genauigkeitsmasse verwendet. Zur Konsistenzwahrung wurde der Genauigkeitsvergleich für die drei Klassen Wasser, Wald und Nichtwald in einem Schritt vollzogen. In der folgenden Resultatdiskussion wurden die Aussagen auf die folgenden Genauigkeitsmasse fokussiert:

- 'user's accuracy' und 'producer's accuracy' nur für die Klasse Wald. Da das Hauptziel dieser Arbeit in der Klassifikation der Waldflächen liegt, ermöglichen diese Masse eine Beurteilung wie gut die Klassifikation die Bodenreferenzdaten wiedergibt ('producer's accuracy') oder wie zuverlässig die erhaltene Klassifikation ist ('user's accuracy').

- 'overall accuracy' für die Gesamtklassifikation mit drei Klassen. Mit diesem Mass wird die Gesamtgüte der Klassifikation beurteilt, wobei aber Zufallsübereinstimmungen eingeschlossen sind. Dies spielt insofern eine untergeordnete Rolle, als dass die drei Klassen Wald, Nichtwald und Wasser in etwa je zu einem Drittel das Untersuchungsgebiet bedecken.

- 'kappa'-Koeffizient für die Gesamtklassifikation mit drei Klassen. Der 'kappa' Koeffizient dient als objektivstes Genauigkeitskriterium für die Gesamtklassifikation, da er die Fehler 1. und 2. Art berücksichtigt. Seine Unabhängigkeit von der Testgebietsgrösse lässt auch objektive Vergleiche der Güte der Klassifikation mit anderen Testgebieten [KAPITEL 6] zu.

Generell kann festgehalten werden, dass alle Masse im Untersuchungsgebiet Beckenried für Klassifikationen in allen geometrischen Auflösungen untereinander vergleichbar bleiben, da bei der Ausschnittswahl auf ein räumlich identisches Gebiet geachtet wurde [Tab - 2, Seite 47].

5 - 1.4 Klassifikationsschema

Die vorliegenden Waldflächenklassifikationen wurden alle nach dem gleichen Schema [Fig - 58] berechnet. Als Eingabe für den verwendeten automatisierten PPD Algorithmus dienten pro Durchgang einer der 36 verschiedenen Satellitendatensätze [4 - 2.5.1] sowie einer von 16 Stichprobendatensätzen [Tab - 21, Seite 203].

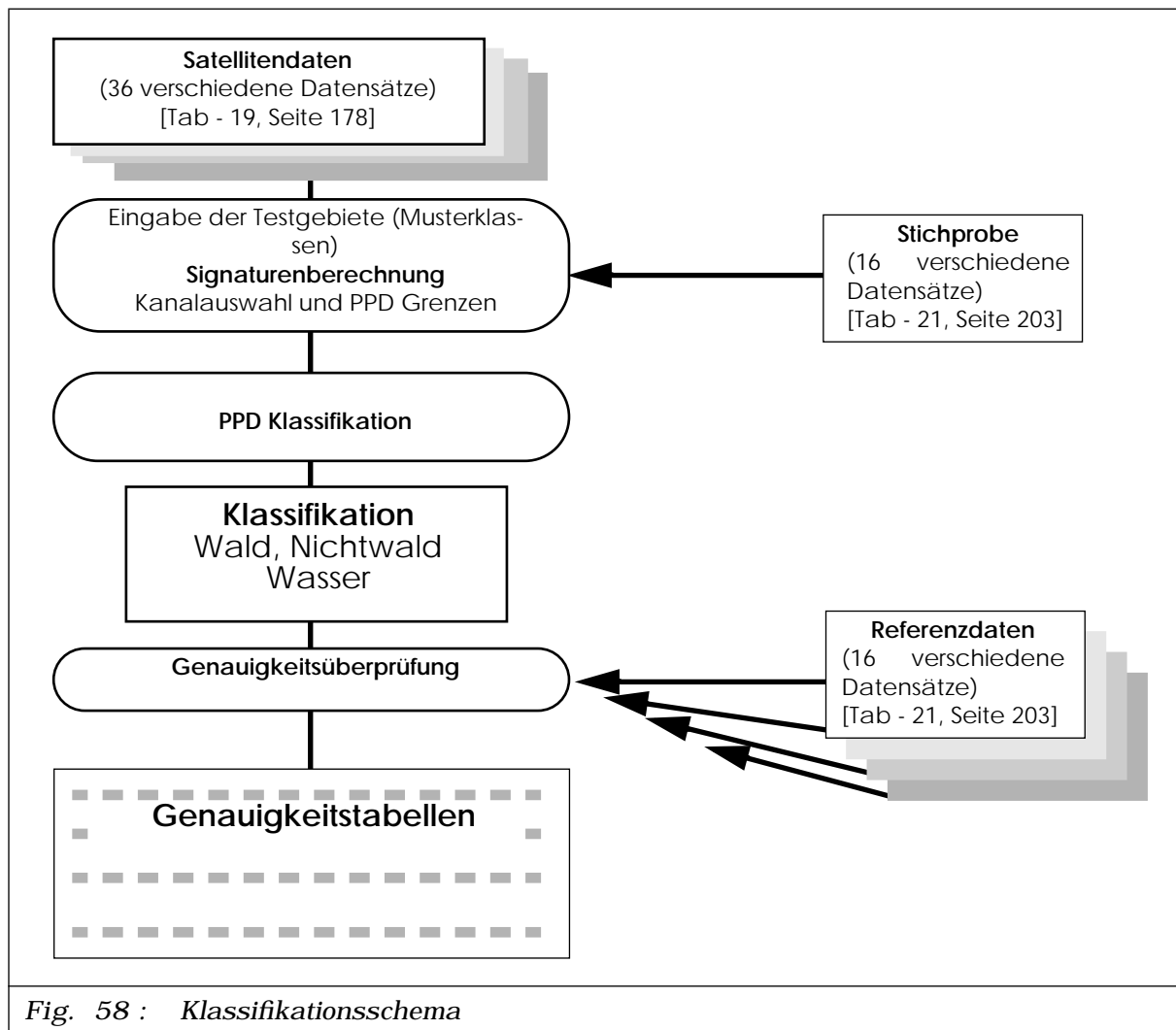


Fig. 58 : Klassifikationsschema

Die *Satellitendaten* liegen in unterschiedlichen Auflösungen von 20m (SPOT-XS, SPOT-XS und SPOT-Pan), 25m (Landsat-TM) sowie 100m (SPOT-XS, SPOT-XS und SPOT-Pan, Landsat-TM) vor.

Maske	Wasser LT	Wald/Nichtwald LT	Wald/Nichtwald ST	Wolken WO	Kondenssstreifen KO	Schlagschatten SS (SPOT oder Landsat Datum)
LT-OO	X	X				
LT-WO	X	X		X		
LT-KO	X	X			X	
LT-SS	X	X				X
LT-WK	X	X		X	X	
LT-WS	X	X		X		X
LT-KS	X	X			X	X
LT-AL	X	X		X	X	X
ST-OO	X		X			
ST-WO	X		X	X		
ST-KO	X		X		X	
ST-SS	X		X			X
ST-WK	X		X	X	X	
ST-WS	X		X	X		X
ST-KS	X		X		X	X
ST-AL	X		X	X	X	X
für Stichproben:	<ul style="list-style-type: none"> • generelle Erosion der Waldmaske um 2 Pixel • generelle Verbreiterung der Wolkenmaske um 2 Pixel (ausser TM, Versuche mit und ohne Verbreiterung) 					
für Referenzdaten:	<ul style="list-style-type: none"> • keine Erosion der Waldmaske • keine Verbreiterung der Wolkenmaske (ausser TM, Versuche mit und ohne Verbreiterung) 					

Tabelle 21: Schema der verwendeten Stichproben und Referenzdatensätze

Die *Stichprobendatensätze* [Tab - 21] sind durch Kombination einer der zwei Waldmasken (LT, ST) mit den Abdeckmasken (Wolken, Schlagschatten und Kondensstreifen) entstanden. Zur Verringerung der Randpixelproblematik wurden die Waldmasken für die Stichproben um einen Saum von 2 Bildelementen erodiert. Entsprechend wurden die Wolken und Kondensstreifenmasken um 2 Saumpixel verbreitert. Für eine zusätzliche Untersuchung der Auswirkung einer verbreiterten Wolkenmaske, wurde bei den Klassifikationen mit 25m Landsat-TM-Daten die Erosion der Wolkenmaske alternativ weggelassen.

Mit dem automatisierten PPD wurden die Trennwerte für die Klassen Wasser, Wald und Nichtwald gemäss den Kombinationen von Satellitendaten und Stichproben berechnet, eine optimale Kanalauswahl getroffen und klassiert. Es resultierten gegen 600 verschiedene Klassifikationen.

Die Klassifikationen wurden je mit einem der 16 Referenzdatensätze [Tab - 21] pixelweise verglichen und die Genauigkeitsmasse berechnet. Für die Referenzdaten wurden die Waldmasken nicht erodiert. Wolkenmaske und Kondensstreifenmaske wurden hingegen ebenfalls um einen Saum von 2 Bildelementen verbreitert. Wie bei den Stichproben wurden für die 25m Landsat-TM-Daten Versuche mit verbreiteter und herkömmlicher Wolkenmaske gerechnet. Die Schlagschattenmaske in den Bodenreferenzdaten wurde in den meisten Fällen nicht benutzt, da der Schlagschatten ein objektspezifisches, dauerhaftes Phänomen ist und in operationellen Anwendungen an derselben Stelle wiederkehrt. Wolken und Kondensstreifen hingegen sind temporär zufällige Ereignisse und müssen auch in operationellen Anwendungen maskiert werden.

Schliesslich resultieren über 2000 Klassifikationsvergleiche, die in den folgenden Kapiteln auszugsweise analysiert werden. Die vollständige Resultatübersicht ist dem Anhang zu entnehmen.

5 - 1.5 Bewertungsschwerpunkte

Die Analyse der Klassifikationsvergleiche kann infolge der Datenmenge nicht vollständig erfolgen. Für jede geometrische Arbeitsauflösung werden das beste

und das schlechteste Resultat vorgestellt. Die absoluten Genauigkeiten werden graphisch für alle Fälle angegeben, bei denen die Stichprobendaten mit den Referenzdaten übereinstimmen. Dies soll einen repräsentativen Querschnitt geben. Der Einfluss des Resamplingverfahrens, der Beleuchtungskorrektur sowie der verwendeten Waldmaske wird umschrieben.

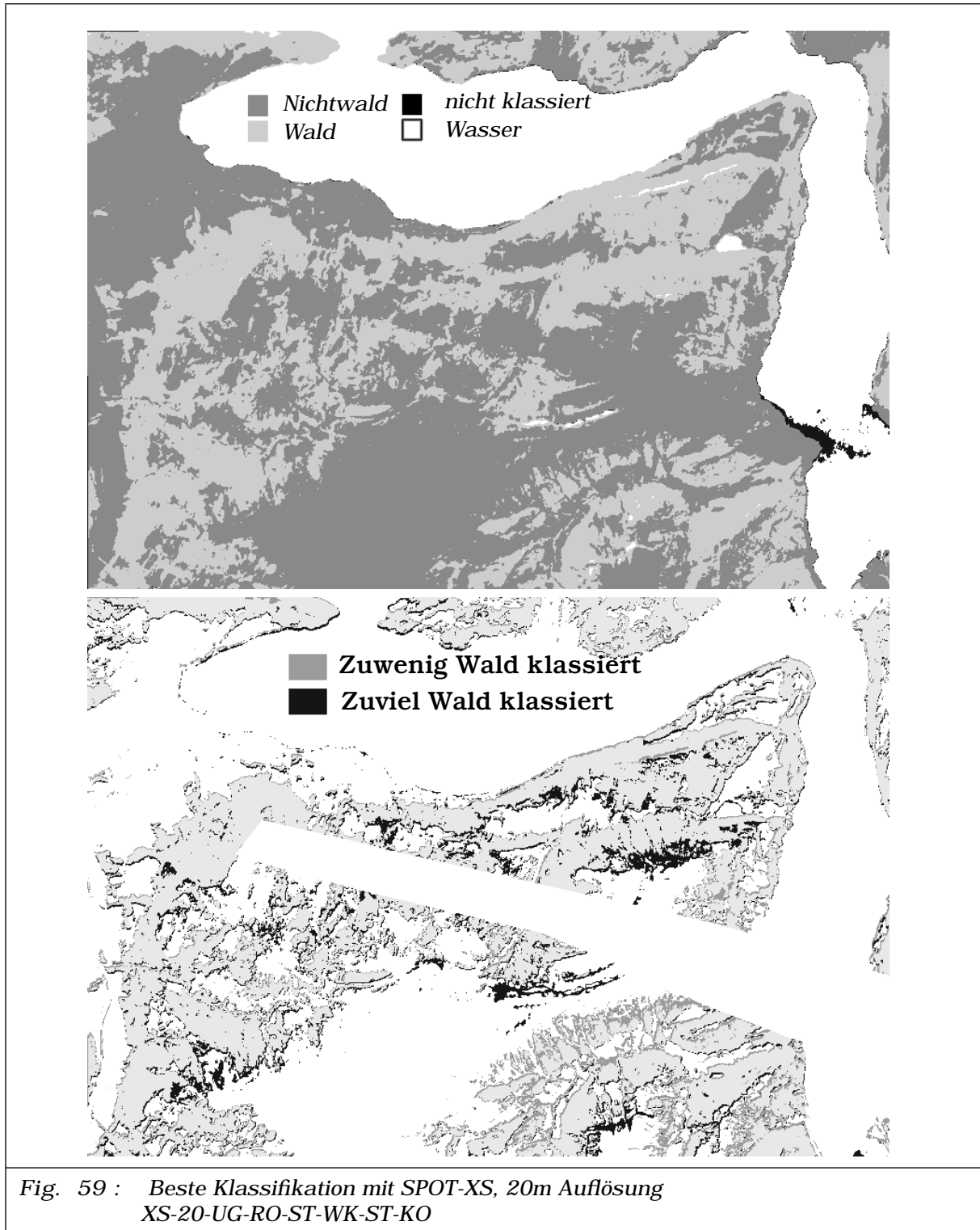
5 - 2 KLASSIFIKATIONEN IN ORIGINALAUFLÖSUNG

5 - 2.1 Klassifikationen mit SPOT-XS, 20m Auflösung

erreichte Genauigkeiten	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
Mittelwerte	82.06%	78.91%	86.52%	0.7946
beste Klassifikationmasse:	89.90%	83.16%	88.17%	0.8190
beste Klassifikation (kappa): XS-20-UG-RO-ST-WK-ST-KO	84.26%	81.61%	88.17%	0.8190
Minimalwerte:	75.95%	70.90%	84.23%	0.7616
verwendete Kanäle:	SPOT-Multispektral Kanal 1 und 3			

Tabelle 22: Erreichte Genauigkeiten SPOT XS, 20m Auflösung

Die Waldklassifikation mit den drei SPOT-XS Kanälen in 20m zeigte sehr gute Resultate. Die 'producer's accuracy' für den Wald liegt konsequent über der 'user's accuracy'. Dies bedeutet, dass die Referenzgrundlage (Karte oder analoge Satelliteninterpretation) deutlich besser wiedergegeben werden kann, als die Zuverlässigkeit der klassierten Pixel an sich ist. Die 'overall accuracy' und auch der 'kappa' Koeffizient fallen hoch aus, insbesondere da die Wasserfläche sehr präzise klassiert werden kann (vergleiche Genauigkeitstabellen [ANHANG: E]). Klassifikationsungenauigkeiten sind primär auf Verschiebungen zwischen den Klassen Wald und Nichtwald zurückzuführen.[Fig - 59] zeigt die beste mit den drei SPOT-XS Kanälen in 20m geometrischer Auflösung erhaltenen Klassifikation. Die SPOT-Daten werden bekannterweise durch einen diagonal verlaufenden Kondensstreifen beeinflusst.

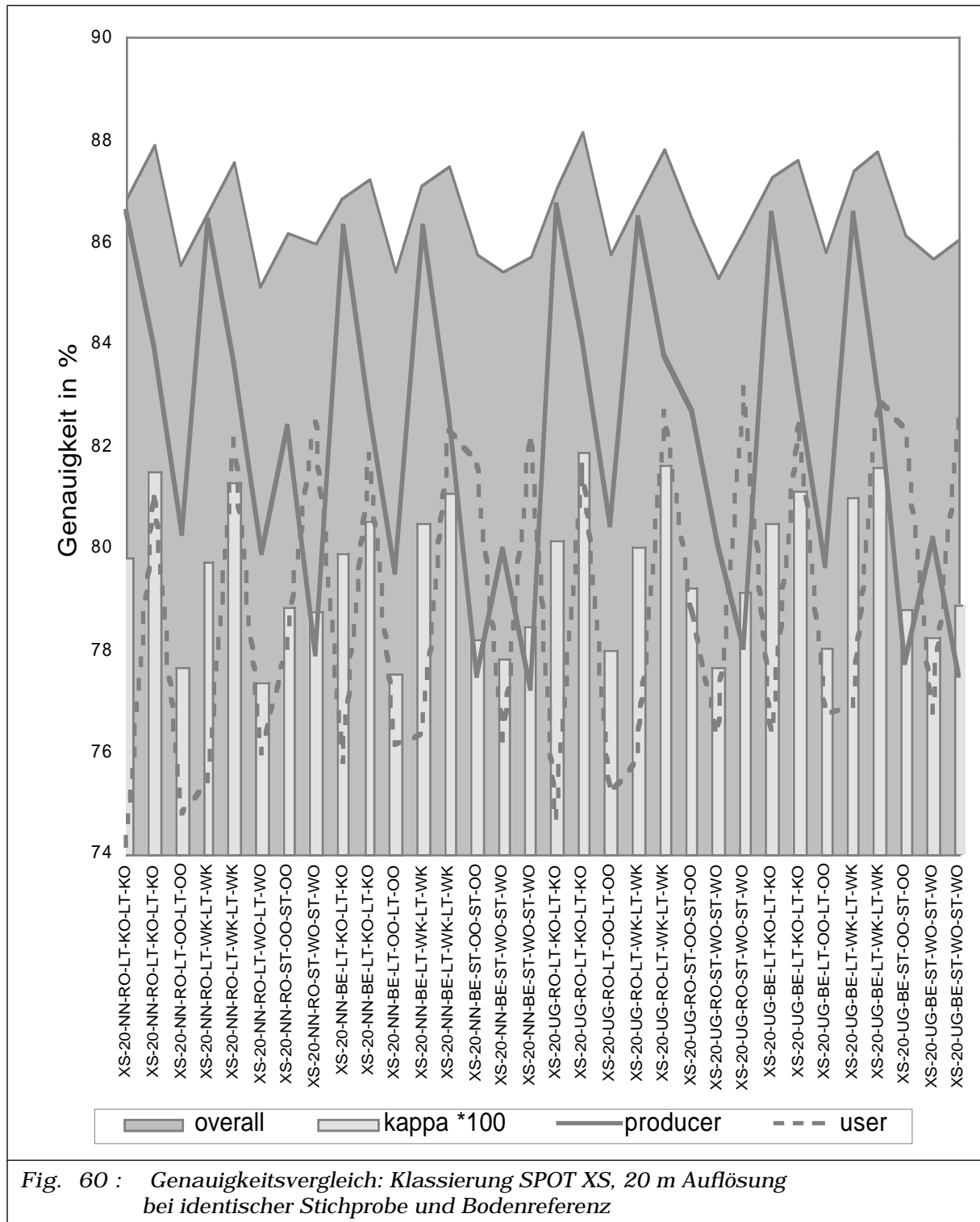


Eine saubere Klassifikation ist, wie aus [Fig - 59] ersichtlich, in diesem Bereich nicht möglich. Wird dieses Gebiet aber sowohl in den Stichproben wie auch in

der Bodenreferenz ausmaskiert, so steigt der 'kappa' Koeffizient von 0.78 auf 0.82, die 'user' und 'producer accuracy' um bis zu 8% (siehe [Fig - 60]). Es ist daher notwendig, bei jeder Klassifikation der SPOT-Daten die Kondensstreifen auszumaskieren. Eine lokale Atmosphärenkorrektur in diesem Bereich kann das Resultat sicherlich verbessern. Ob sich der ökonomische Aufwand einer solchen Korrektur rechtfertigt ist zu bezweifeln.

Auffallend sind auch die Gebiete, in denen zuviel Wald relativ zur Bodenreferenz klassiert wurden. Einerseits betrifft dies die nordwestlichen Waldränder, die beim aktuellen Sonnenstand einen grossen Schatten werfen, welcher eine ähnliche Signatur wie Wald aufweist. Andererseits stellen wie erwartet die aufgelockerten Waldgebiete an der oberen Waldgrenze zur Baumgrenze grosse Probleme. Die Identifikation dieser Gebiete aufgrund ihrer spektralen Signatur fällt zumeist zugunsten des Waldes aus.

Wie die Übersicht in [Fig - 60] klar zeigt, spielt es keine Rolle, ob die in den Landsat-TM-Daten durch Wolken beeinflussten Gebiete in der Klassifikation mit SPOT-Daten ausmaskiert werden oder nicht. Dies kann als gute Repräsentanz der verbleibenden Stichprobengebiete für das Untersuchungsgebiet gewertet werden. Werden gleichzeitig die Landsat Wolkengebiete und der Kondensstreifen ausmaskiert, so sind keine nennenswerte Veränderungen zu einer Ausmaskierung des Kondensstreifens alleine zu beobachten.



5 - 2.1.1 Einfluss des Resamplings (XS-20)

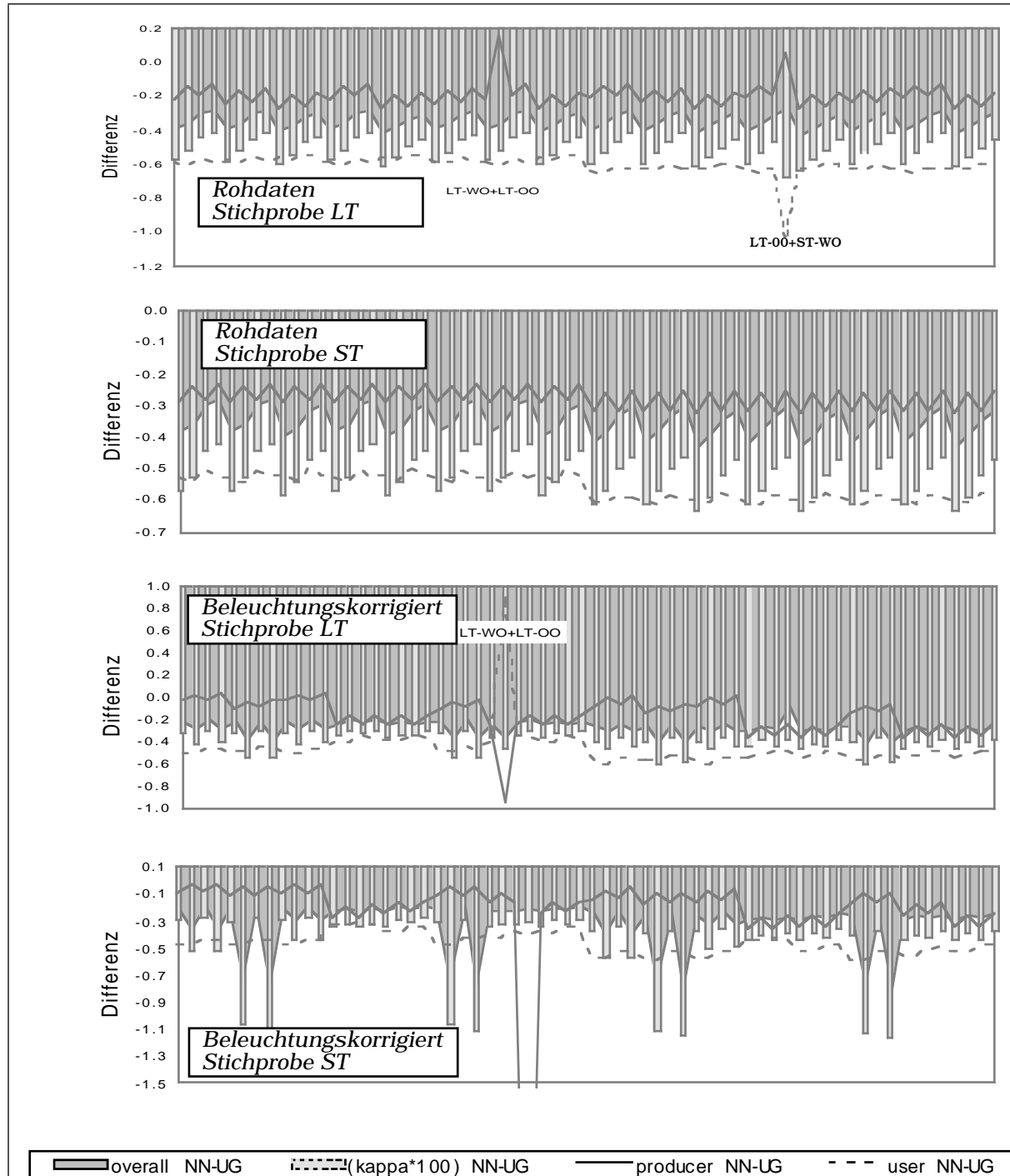


Fig. 61 : Genauigkeitsvergleich: Resampling Georeferenzierung, SPOT XS, 20m
 Differenzen zwischen 'nearest neighbour' NN und 'bilinearem' Resampling UG
 der Satellitendaten der Masse 'producer' und 'user' Wald, 'overall', 'kappa'*100

In [Fig - 61] wird der Einfluss der bei der Georeferenzierung verwendeten Resamplingmethode illustriert. Dabei ist bemerkenswert, dass die 'bilineare' Resamplingmethode (UG) durchwegs bessere Klassifikationen bewirkt als die 'nearest neighbour' Methode. Die Differenzen für den 'kappa' Koeffizient bewegen sich im Rahmen von etwa einem halben Prozent. Diese Verbesserung kann nicht als signifikant gewertet werden. Da aber die Tendenz durchwegs für eine Verbesserung gewährleistet ist, muss dem umgebungsbasierten Resamplingsverfahren der Vorzug gegeben werden. Die vereinzelt Ausreisser beruhen auf dem automatischen PPD Verfahren, das in gewissen Konstellationen (bei sich vollständig überdeckenden Histogrammen oder Bimodalitäten) die Trennwerte instabil setzen kann. Dies tritt insbesondere dann auf, wenn die durch Kondensstreifen beeinflussten Gebiete nicht ausmaskiert werden und die Stichprobe eine nicht repräsentative Schiefe in der Verteilung erhält.

5 - 2.1.2 Einfluss der Beleuchtungskorrektur (XS-20)

Der Einfluss der Beleuchtungskorrektur auf das Klassifikationsergebnis wird in [Fig - 62] illustriert. Werden die Daten mit der Stichprobe nach der analogen Satellitenbilddauswertung klassiert, so hat die Beleuchtungskorrektur, unabhängig vom verwendeten Resamplingsverfahren im Schnitt kaum einen Einfluss auf das Klassifikationsergebnis. Tendenziell ist nur eine minimale, nicht repräsentative Verbesserung zu erwarten (etwas mehr im Vergleich mit den Bodenreferenzdaten nach Landeskarte). In Einzelfällen werden aber Verbesserungen bis zu 2% erreicht. Stammen die Stichproben von der Landeskarte, so ist eine kleine Verbesserung unter Benutzung der Landeskarte als Vergleichsreferenz ersichtlich. Relativ zur Waldmaske nach analoger Satellitenbilddauswertung ist sogar eher eine Verschlechterung zu erwarten. Der Einfluss der Beleuchtungskorrektur kann nicht generell beurteilt werden. Von Fall zu Fall ist ihre Notwendigkeit abzuwägen.

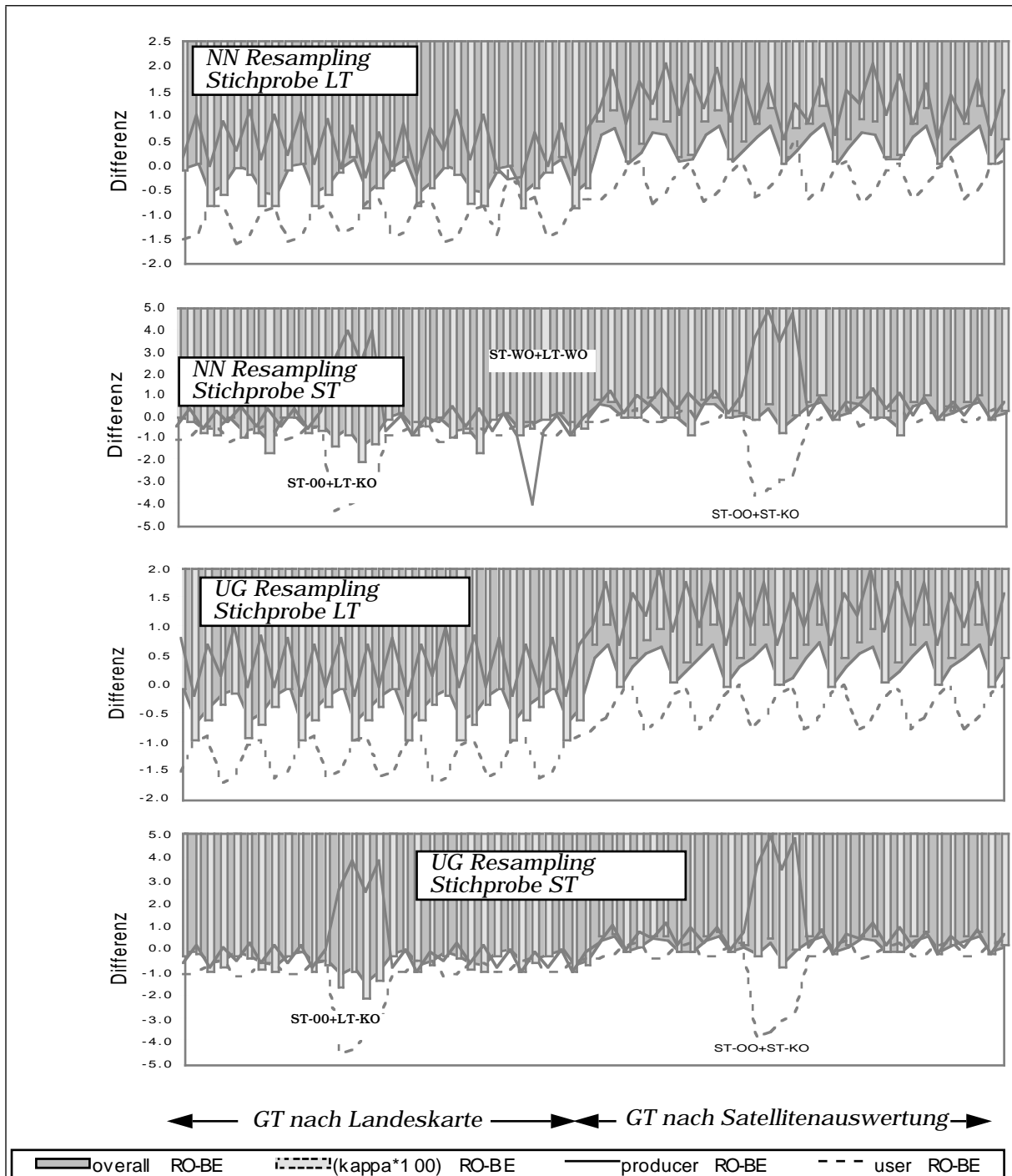


Fig. 62 : Genauigkeitsvergleich: Beleuchtungskorrektur, SPOT XS, 20m
 Differenzen zwischen unkorrigierter RO und korrigierter BE Beleuchtung
 der Satellitendaten der Masse 'producer' und 'user' Wald, 'overall', 'kappa'*100

5 - 2.1.3 Einfluss der Waldmaske (XS-20)

Der Einfluss der zwei unterschiedlichen Waldmasken auf das Resultat wird mit [Fig - 63] dargestellt. Es ist bemerkenswert, dass unter Verwendung der durch analoge Satellitenbildinterpretation erhaltenen Waldmaske die 'user accuracy' für Wald durchwegs um 6-7% besser ist. Dies bedeutet, dass die Zuverlässigkeit der klassierten Waldpixel auch in Wirklichkeit Wald zu beinhalten, enorm steigt. Entsprechend fällt die 'producer accuracy' um 2-4%. Mit diesen Verschiebungen der waldspezifischen Genauigkeitsmasse steigt parallel die 'overall accuracy' um bis zu 2%, während der 'kappa' Koeffizient um den gleichen Betrag steigt. Dass der 'kappa' Koeffizient nicht mehr angehoben worden ist, liegt an der Verteilung und Klassierbarkeit der Objektklassen. Das Wasser wird unabhängig aller Waldmasken immer gleich gut (96% und mehr Genauigkeit) klassiert und beeinflusst die Gesamtgenauigkeitsmasse stark. Die unterschiedlichen Waldmasken steuern im Prinzip nur die Zuordnung der Restfläche zu den Objektklassen Wald und Nichtwald. Verbessert sich die Waldklassifikation, so geht parallel dazu eine Verbesserung der Nichtwaldklassifikation einher.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit setzt eine Optimierung der Klassifikation für die Waldfläche voraus. Daher wird der Verbesserung der 'user accuracy' grosses Augenmerk zuteil. Die optimierte Waldflächenreferenz nach der analogen Satellitenbildinterpretation zeigt, dass jeder Klassifikationsvergleich mit der Landeskarte um mehrere Prozent schlechter als in Wirklichkeit ausfallen kann. Die Landeskarte ist aber, auch aus ökonomischen Überlegungen, die einzige flächendeckende Waldflächenreferenz über die gesamte Schweiz. Für gesamtschweizerische Untersuchungen gibt es demnach keine Referenzdaten-Alternative und die Genauigkeiten der Waldflächenklassifikationen sind um diesen Betrag zu relativieren.

Es ist klar, dass die SPOT-Pan basierte Waldflächenreferenz nicht vollständig unabhängig von den SPOT-XS-Daten ist. Die unterschiedliche Auflösung (geometrisch, radiometrisch) der Daten, sowie die Aufnahmetechnik mittels zweier unabhängiger HRV-Instrumente berechtigt meines Erachtens diesen Genauigkeitsvergleich anzustellen.

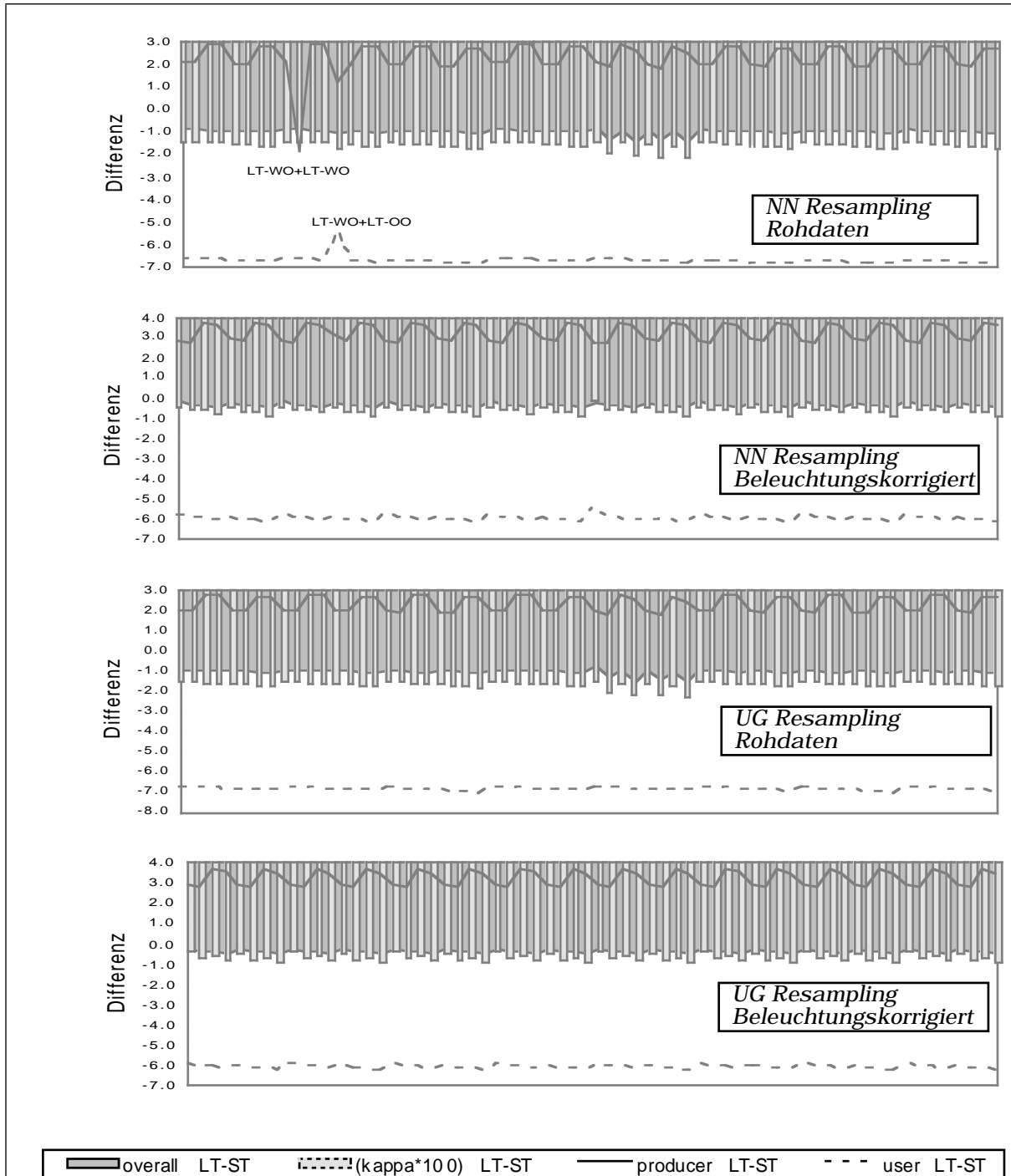


Fig. 63 : Genauigkeitsvergleich: Waldmasken, SPOT XS, 20m
 Differenzen zwischen Waldmaske nach Landeskarte (LT) und Maske nach
 analoger Satellitenbildinterpretation ST, der Satellitendaten der Masse
 'producer' und 'user' Wald, 'overall', 'kappa'*100

5 - 2.2 Klassifikationen mit SPOT-XS und SPOT-Pan, 20m Auflösung

erreichte Genauigkeiten	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
Mittelwerte	86.54%	84.05%	89.84%	0.8450
beste Klassifikationsmasse:	91.16%	92.39%	92.99%	0.8942
beste Klassifikation (kappa): XP-00-UG-BE-ST-WK-ST-WK	91.16%	89.72%	92.99%	0.8942
Minimalwerte:	79.69%	76.54%	86.68%	0.7949
verwendete Kanäle:	SPOT-Multispektral Kanal 3 und SPOT-Pan			

Tabelle 23: Erreichte Genauigkeiten SPOT XS und Pan, 20m Auflösung

Wird zu den drei SPOT-XS Kanälen noch der auf 20m skalierte SPOT-Pan Kanal hinzugefügt, so wird im automatisierten PPD Verfahren statt dem 1. multispektralen Kanal, der panchromatische Kanal zur Klassifikation ausgewählt. Das beste, erreichte Ergebnis ist um 7% besser ('kappa') als ohne Verwendung des panchromatischen Kanals. Die 'overall accuracy' steigt um 4%, die 'user accuracy' und die 'producer accuracy' für die Waldfläche sind hingegen deutlich geringer. Dies gilt aber nur für den besten Fall. Die Mittelwerte aller Klassifikationen sind durchwegs deutlich besser. Vermutlich hat die hohe geometrische Auflösung des panchromatischen Kanals mit seinem hohen Bildkontrast keine oder nur geringen Qualitätsverlust durch die Skalierung erlitten. Positiv trägt auch der hohe Kontrast der Objektklasse Wald gegenüber seiner Umgebung für eine Klassifikationsverbesserung bei.

[Fig - 64] zeigt bei identischen Stichproben und Referenzdaten die absoluten Genauigkeiten. Die satellitenbasierte Waldmaske zeigt deutlich bessere Resultate. Das Abdecken der Kondensstreifenmaske wirkt sich in einer Steigerung des 'kappa'-Koeffizienten um durchschnittlich 2% aus. Die waldspezifische 'user accuracy' verbessert sich parallel dazu.

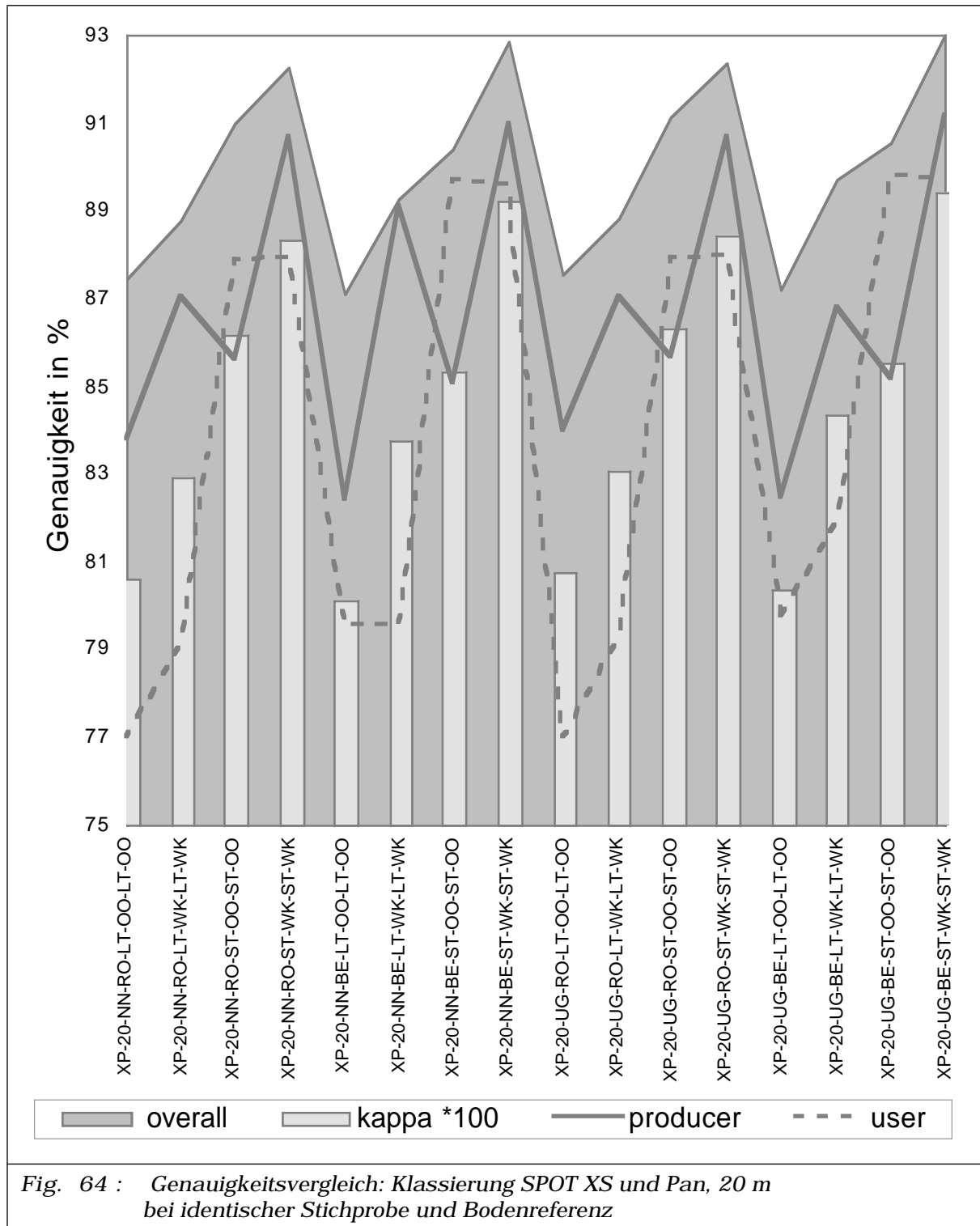


Fig. 64 : Genauigkeitsvergleich: Klassierung SPOT XS und Pan, 20 m bei identischer Stichprobe und Bodenreferenz

5 - 2.2.1 Einfluss des Resamplings (XP-20)

Die graphische Darstellung der Resultate ist dem Anhang zu entnehmen. Tendenziell ist wie bei den SPOT-XS Klassifikationen mit 20m Auflösung eine Verbesserung der Genauigkeit unter Verwendung des 'bilinearen' Resamplings festzustellen, wobei die Verbesserung nur bei den nicht beleuchtungskorrigierten Daten als signifikant bezeichnet werden kann. Auffallend ist eine überdurchschnittliche Verbesserung des 'kappa'-Koeffizienten bei den nicht beleuchtungskorrigierten Daten unter Verwendung der Kondensstreifenmaske bei den Stichproben und dem Vergleich mit den unmaskierten Waldflächendaten. Die 'bilineare' Resamplingmethode (UG) sollte zusammenfassend unbedingt angewendet werden.

5 - 2.2.2 Einfluss der Beleuchtungskorrektur (XP-20)

Die graphische Darstellung der Resultate ist dem Anhang zu entnehmen. Die Beleuchtungskorrektur hat nur in Einzelfällen eine positive Auswirkung auf den 'kappa'-Koeffizienten. Wird das 'nearest neighbour' Resampling verwendet, so sind die Verbesserungen deutlicher (0 bis 2%) als mit der 'bilinearen' Methode. In vielen Fällen kommt sogar eine Verschlechterung des 'kappa'-Koeffizienten vor. Die waldfächenspezifischen Genauigkeitsmasse zeigen aber eine deutlich positive Auswirkung der Beleuchtungskorrektur auf das Ergebnis. Die 'user accuracy' für Wald wird ausnahmslos um bis zu 4% verbessert. Die als Wald klassierten Bildelemente sind mit grösserer Sicherheit klassiert worden. Daher ist die Beleuchtungskorrektur unbedingt anzuwenden.

5 - 2.2.3 Einfluss der Waldmaske (XP-20)

Die graphische Darstellung der Resultate ist dem Anhang zu entnehmen. Wie erwartet, bringt die Verwendung der analogen Satellitenbildinterpretation als Waldmaske eine massive Genauigkeitssteigerung der Klassifikationen. Die waldspezifische 'user accuracy' ist in allen Fällen um über 10% besser. Selbst die 'producer accuracy' wird um bis zu 2% gesteigert. Die logische Konsequenz, bei immer gleichguter Wasserflächenklassifikation, ist die Verbesserung des

‘kappa’-Koeffizienten um über 4%. Noch mehr als bei Verwendung der drei SPOT-XS Kanäle allein, ist die Verwendung einer geeigneten Bodenreferenz, die auf die physikalische Charakteristik von Messobjekt und Messsystem abgestimmt ist, für die Genauigkeitsanalyse in diesem Falle notwendig. Die grössere Waldfläche der Maske nach analoger Interpretation im Gegensatz zur Maske nach Landeskarte [Fig - 27, Seite 128] wirkt sich positiv zugunsten der digitalen Klassifikationen aus. Wie in [5 - 2.1.3] bereits erwähnt, ist diese Diskrepanz der Waldmaske nach Landeskarte zur Satellitendatenrealität bei gesamtschweizerischen Klassifikationen zu berücksichtigen.

5 - 2.3 Klassifikationen mit Landsat-TM, 25m Auflösung

erreichte Genauigkeiten	‘producer’ Wald	‘user’ Wald	‘overall’	‘kappa’
Mittelwerte	88.82%	76.97%	86.55%	0.7976
beste Klassifikationsmasse:	92.22%	84.54%	90.61%	0.8581
beste Klassifikation (kappa): TM-25-UG-BE-ST-WO-ST-WK	88.96%	84.19%	90.61%	0.8581
Minimalwerte:	81.30%	67.43%	80.84%	0.7164
verwendete Kanäle:	Landsat-TM Kanal 2 & 4 oder 3 & 4			

Tabelle 24: Erreichte Genauigkeiten Landsat-TM, 25m Auflösung

Die Klassifikation mit den 6 Landsat-TM Kanälen mit 25m geometrischer Auflösung liegt etwa im Genauigkeitsbereich der SPOT Klassifikationen mit 20m. Der automatisierte PPD wählte in den meisten Fällen die Kanalkombination Landsat-TM Kanal 2 und 4 zur Klassifikation aus. In einigen Fällen wurde der 2. Kanal durch den 3. Kanal ersetzt. Die Trennung von Wasser gegenüber der Restklasse erfolgte erwartungsgemäss im Nahinfrarotkanal 4, während der Wald vom Nichtwald in den sichtbaren Kanälen 2 oder 3 erfolgte.

Der ‘kappa’ Koeffizient und die ‘overall accuracy’ liegen wenig unter den Werten der SPOT Klassifikationen (vergleiche Genauigkeitstabellen [ANHANG: G] bis [ANHANG: J]). Das walddspezifische Genauigkeitsmass

‘producer accuracy’ liegt aber durchwegs höher. Dies bedeutet, dass mit den Landsat-TM-Daten die Referenzgrundlage bedeutend besser nachvollzogen werden kann, was aber nicht im Sinne einer Waldflächenklassifikation sein kann. Berücksichtigt man aber das Waldflächengenauigkeitsmass ‘user accuracy’, so fällt auch dieses im Mittel aller Klassifikationen besser aus. Die Verbesserung beider Masse gemittelt bedeutet, dass mit den Landsat-TM-Daten mit 25m Auflösung die Waldfläche eindeutig besser zu klassieren ist als mit SPOT-Daten mit 20m Auflösung. Die Landsat-TM Klassifikation ist für die Restklassen (Wasser und Nichtwald) zusammen weniger gut, vermutlich infolge der schlechteren geometrischen Auflösung in Zusammenhang mit den Wassergrenzen.

[Fig - 65] illustriert stellvertretend für alle Klassifikationen mit Landsat-TM diejenigen Genauigkeitsüberprüfungen, bei denen der Stichprobensatz mit dem Referenzdatensatz identisch ist. Wie die SPOT-Daten werden auch die Landsat-Daten durch kondensierten Wasserdampf beeinflusst. Anstelle eines Kondensstreifens tritt hier die Quellbewölkung über den südlichen Bergkämmen. Diese Bewölkung ist ein Problem, das bei Waldklassifikationen in der Schweiz immer wieder auftritt. Der Aufnahmezeitpunkt der Daten im Sommer, welcher mit der optimalsten Entwicklung der Blätter definiert wird, fällt mit der grössten Aktivität der Quellwolkenbildung zusammen. Nicht allein die durch die Wolken verdeckten Gebiete, sondern auch die durch ihren Schatten abgedunkelten Regionen sind mit spektralen Klassifikatoren nicht auswertbar. Ihre Maskierung ist deshalb unbedingt notwendig und zwingend. Der Einsatz der Wolkenmaske verbessert den ‘kappa’-Koeffizienten im vorliegenden Fall um bis zu 5%. Bei einer anderen Wolkenverteilung wird die Genauigkeitssteigerung abweichend ausfallen. Interessanterweise führt die Verwendung der für die SPOT-Daten notwendigen Kondensstreifenmaske ebenfalls zu einer markanten Genauigkeitssteigerung. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da im Gebiet des Bauen sich die Kondensstreifenmaske mit der Wolkenmaske überschneiden. Die gemeinsame Anwendung von Wolken- und Kondensstreifenmaske auf die Landsat Klassifikationen zeigt einen leicht kumulativ-positiven Effekt.

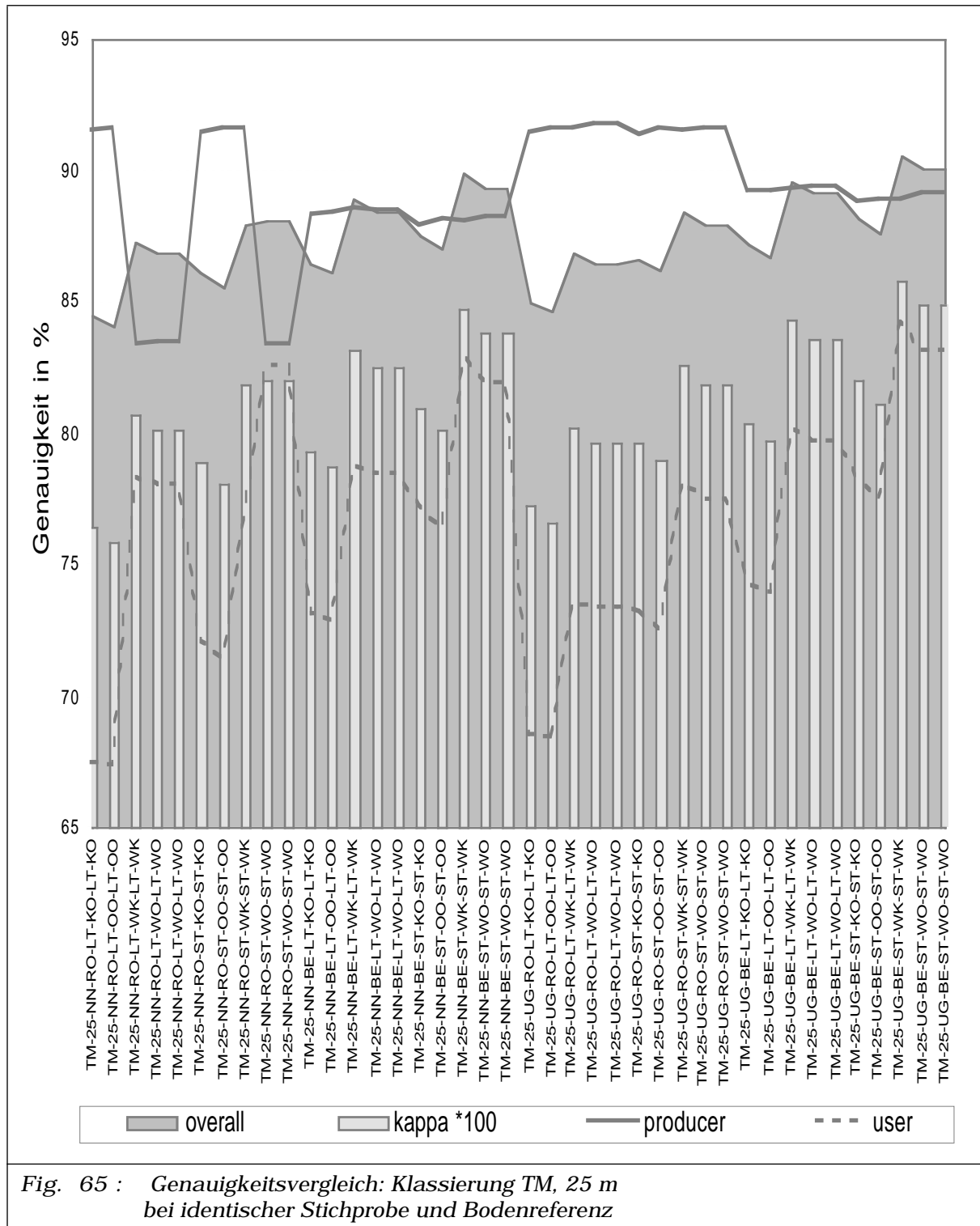


Fig. 65 : Genauigkeitsvergleich: Klassierung TM, 25 m bei identischer Stichprobe und Bodenreferenz

Die Wolken und ihre Schattengebiete müssen nach dieser Interpretation immer von einer Klassifikation mit Landsat-Daten ausgeschlossen werden. Nur dann

kann ein optimierter 'kappa'-Koeffizient erwartet werden. Die Genauigkeitssteigerung ist auch an den sich massiv angleichenden waldspezifischen Massen 'producer' und 'user accuracy' zu erkennen. Wie geometrisch genau diese Wolkenmaske beschaffen sein muss, wurde mit den Landsat Klassifikationen mit 25m Auflösung getestet. Die Interpretation der Wolkenmaske erfolgte im Landsat Kanal 3. Die Streuung in den kurzwelligeren Kanälen 1 und 2 ist aber grösser. Daher wurde die Maske um einen Saum von 2 Bildelementen erweitert (Dilatation), und die Klassifikationen mit und ohne Verbreiterung durchgeführt und getestet (siehe Genauigkeitstabellen im Anhang).

Es konnte kein signifikanter Unterschied in der Verwendung der zwei Wolkenmasken festgestellt werden. Demnach muss die generierte Ursprungsmaske ohne Verbreiterung genügend grosszügig abgegrenzt worden sein und den Anforderungen genügen. In der Folge wurde die Wolkenmaske ohne Verbreiterung bei allen Klassifikationsvergleichen (auch mit SPOT-Daten) mit allen geometrischen Auflösungs niveaus verwendet. Einzig aus Sicherheitsgründen, infolge erhöhter geometrischer Präzision, gelangte die verbreiterte Wolkenmaske bei den Klassifikationen mit SPOT mit 20m Auflösung zur Anwendung.

5 - 2.3.1 Visuelle Analyse der Klassifikation (TM-25)

[Fig - 66] zeigt die beste Klassifikation mit Landsat mit 25m Auflösung. Eine visuelle Überprüfung der fälschlicherweise als Wald klassierten Gebiete zeigt wieder einmal deutlich die Problematik des offenen Waldes. Sowohl an der Nordwestflanke des Niederbauen wie an den südostexponierten Hängen des Hornes bei Isenthal {siehe [Fig - 1, Seite 46]} wurden offene Waldgebiete dem Wald zugeordnet. Das spezifische Reflektionsverhalten von Blättern und Nadeln setzte sich gegenüber dem Untergrund durch, obwohl in der visuellen Satelliteninterpretation, auch nach weiteren Überprüfungen, die Flächen dem Nichtwald zugeordnet wurden. Grössere Gebiete, in denen zu wenig Wald erfasst wurde, kommen nur vereinzelt vor. In einer visuellen Nachüberprüfung entpuppten sich einige Gebiete als Lichtungen oder Windwurfflächen,

die bei der analogen Satellitenbildinterpretation nicht berücksichtigt worden sind.

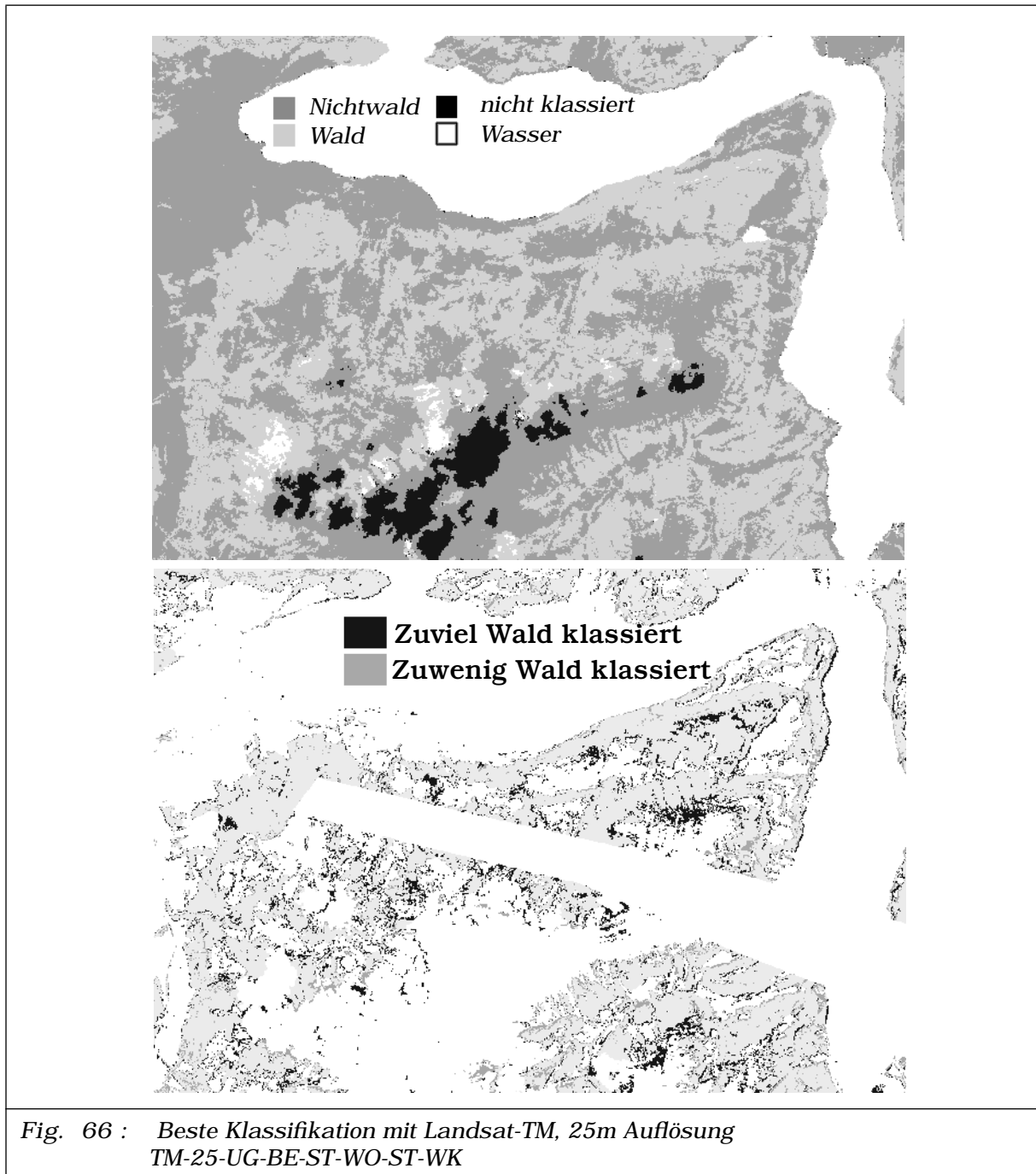


Fig. 66 : Beste Klassifikation mit Landsat-TM, 25m Auflösung
TM-25-UG-BE-ST-WO-ST-WK

Visuelle Überprüfungen von Klassifikationen verglichen mit der Waldmaske nach Landeskarte zeigen bedeutend mehr Gebiete, die nicht als Wald erkannt wurden. Vorwiegend sind es die Windwurfflächen

nördlich von Seelisberg und am Niederbauen, sowie einige Gebiete im Bereich der oberen Waldgrenze. Dies ist nicht erstaunlich, da das Datum der Erfassung der Waldfläche in der Landeskarte nicht mit dem Aufnahmedatum der Landsat-Daten übereinstimmt und in der zeitlich besser abgestimmten analogen Waldmaske, basierend auf den SPOT-Pan Daten, offene Waldflächen erfasst wurden.

Entlang den Waldrändern im mittleren Bildstreifen ist eine Tendenz zur systematischen Fehlklassifikation erkennbar. An den westlichen Waldrändern wurde zuwenig, entsprechend an den östlichen Rändern zuviel Wald klassiert. Wie schon in Kapitel [4 - 2.3.2.7] erwähnt, war der Landsat Sensor in diesem Bereich instabil, so dass eine systematische Verschiebung der Bilddaten um 1-2 Elemente nach Westen erfolgte. Dies erklärt die auffallende Fehlklassifikation.

Weitere vereinzelte Fehlklassifikationen im Randbereich sind zusätzlich auf die Mischpixelproblematik zurückzuführen. Insbesondere gilt dies für Bereiche entlang von Wasserflächen.

5 - 2.3.2 Einfluss der redundanten Bildinformation (TM-25)

Die Systemkorrektur bewirkt den Einschub redundanter Bildinformation in den Satellitendaten [4 - 2.2.1]. Für die beste Klassifikation mit Landsat mit 25m Auflösung (TM-25-UG-BE-ST-WO-ST-WK) wurde versuchsweise die redundante Kolonneninformation [Fig - 32, Seite 137] in der Genauigkeitsanalyse ausmaskiert.

erreichte Genauigkeiten TM-25-UG-BE-ST-WO-ST- WK	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
Klassifikationsgenauigkeit redundante Information <u>eingeschlossen</u>	88.96%	84.19%	90.62%	0.8581
Klassifikationsgenauigkeit redundante Information <u>ausmaskiert</u>	88.94%	84.18%	90.61%	0.8580

Tabelle 25: Genauigkeiten Landsat-TM mit 25m Auflösung bei Berücksichtigung redundanter Information

Die durchwegs tieferen erreichten Klassifikationsmasse zeigen, dass im vorliegenden Falle die redundante Bildinformation keinen Einfluss auf die Klassifikation hat. Im Gegenteil ist eine Tendenz zur Verschlechterung festzustellen. Inwieweit dieser Effekt mit der systematischen Bildinstabilität gekoppelt ist, konnte nicht eruiert werden.

5 - 2.3.3 Einfluss des Resamplings (TM-25)

Der Einfluss der verwendeten Resamplingmethode, der Beleuchtungskorrektur und der Waldmaske auf die Waldflächenklassifikation mit Landsat mit 25m Auflösung wird repräsentativ mit den Daten unter Verwendung der verbreiterten Wolkenmaske gezeigt, da deren Einfluss nicht feststellbar ist. Die gesamte graphische Übersicht ist dem Anhang zu entnehmen.

Werden die Landsat-Daten keiner Beleuchtungskorrektur unterworfen, so hat die Resamplingmethode keinen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Bei Verwendung der umgebungsbasierten Methode ('bilinear') sind tendenziell eher schlechtere Gesamtgenauigkeiten zu erwarten. Insbesondere verbessert sich die 'producer accuracy' für Wald in vielen Fällen auf Kosten der 'user accuracy'. Dies bedeutet, dass die Klassifikationssicherheit eines Bildelementes der Objektklasse Wald stark abnimmt und damit die Güte der Gesamtklassifikation.

Werden die Daten beleuchtungskorrigiert, so verbessert die 'bilineare' Resamplingmethode das Ergebnis um 1% 'kappa'. Der Einbezug von Wolkengebieten in die Referenzdaten verschlechtert das Ergebnis, wie in [Fig - 65] schon gesehen. Die umgebungsbasierte Resamplingmethode sollte zusammenfassend für Landsat-Daten mit 25m Arbeitsauflösung (30m Originalauflösung) bevorzugt werden.

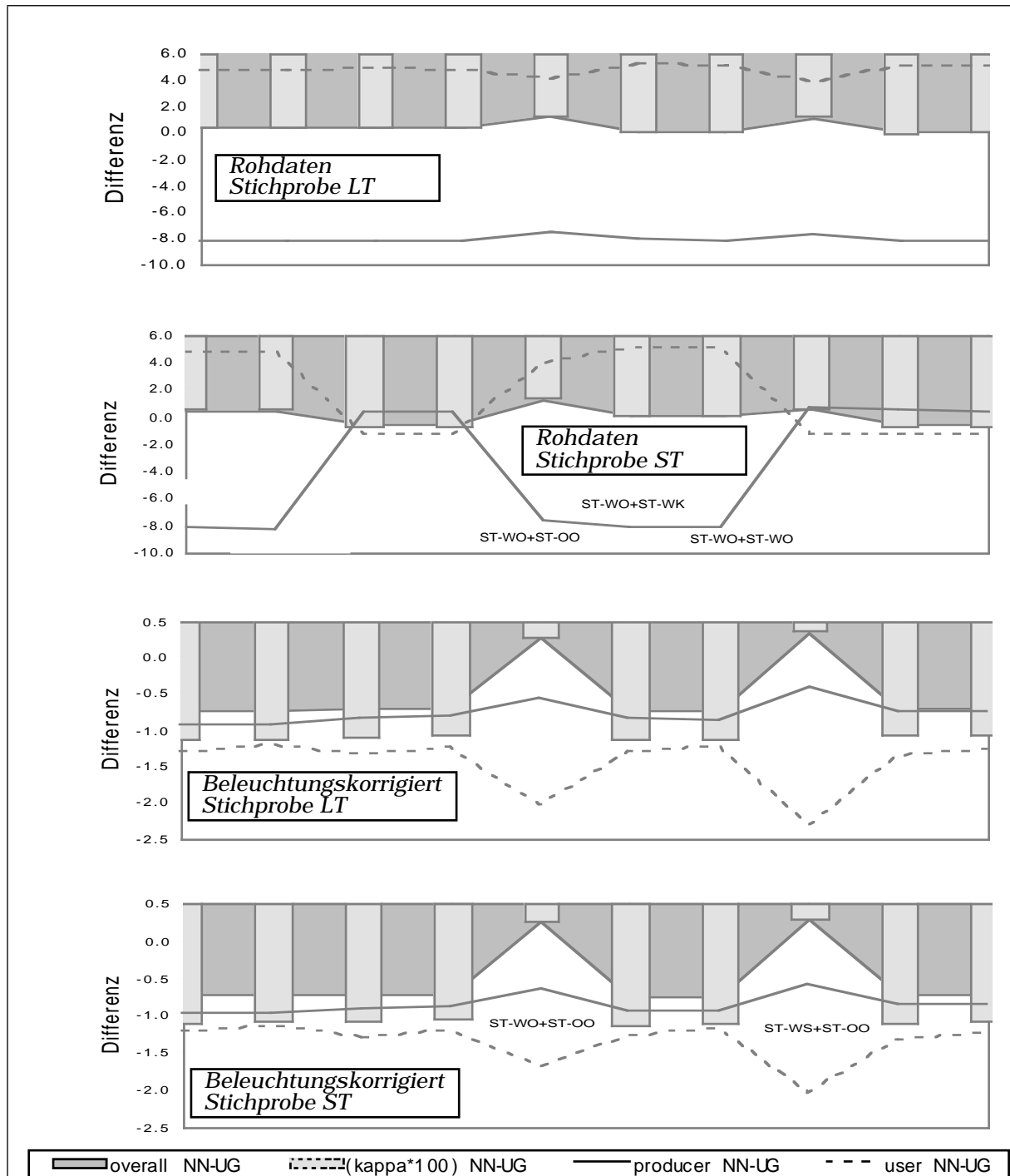
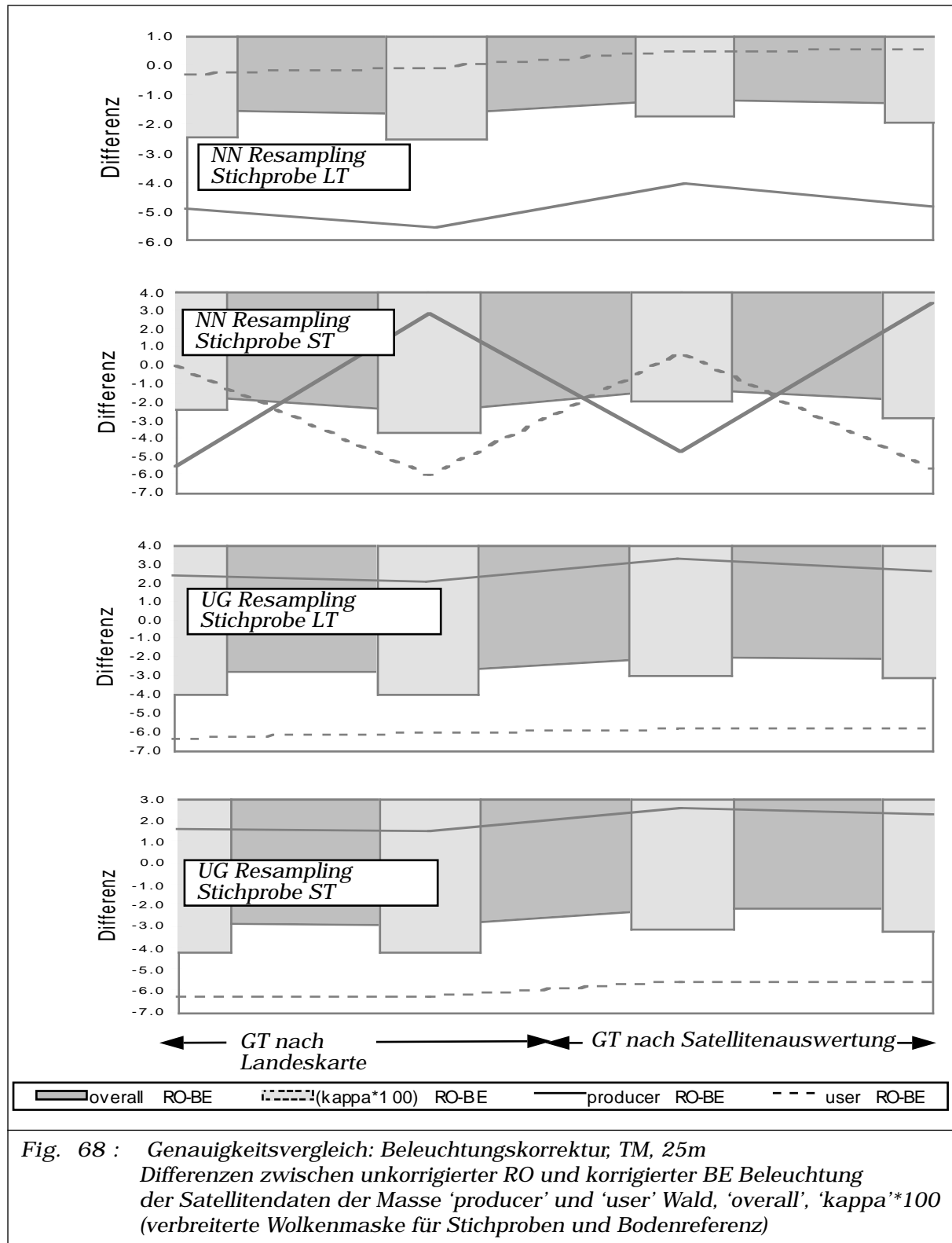


Fig. 67 : Genauigkeitsvergleich: Resampling Georeferenzierung, TM, 25 m
 Differenzen zwischen 'nearest neighbour' NN und 'bilinearem' Resampling UG
 der Satellitendaten der Masse 'producer' und 'user' Wald, 'overall', 'kappa'*100
 (verbreiterte Wolkenmaske für Stichproben und Bodenreferenz)

5 - 2.3.4 Einfluss der Beleuchtungskorrektur (TM-25)



Die Beleuchtungskorrektur hat einen sehr positiven Einfluss auf die Ergebnisse. Bei 'nearest neighbour' Resampling steigt der 'kappa' Koeffizient um 1-2%. Die waldspezifischen Masse 'producer' und 'user accuracy' beeinflussen sich bei Verwendung der Waldmaske nach Satellitenbildinterpretation gegenseitig. Dies deutet auf starke Zuweisungsverschiebungen zwischen den Klassen Wald und Nichtwald. Dieser Effekt verschwindet, sobald die Daten nach umgebungs-basiertem Resampling verwendet werden. Insbesondere steigt die 'user accuracy' um über 6% an. Die klassierten Waldpixel gehören mit grösserer Sicherheit der Objektklasse Wald an. Da das Wasser wiederum als sehr gut klassierbar eingestuft werden darf, bewirkt die Erhöhung der Waldflächengenauigkeit auch eine Erhöhung der Gesamtgenauigkeit 'kappa' um bis zu 4%. Die Beleuchtungskorrektur ist für Landsat-Daten eine unabdingbare Voraussetzung für gute Resultate. Sie hat in diesem Falle eine zweimal so grosse positive Auswirkung wie bei der Anwendung auf die SPOT-Daten mit 20m Auflösung.

5 - 2.3.5 Einfluss der Waldmaske (TM-25)

Wie aus den Erfahrungen mit SPOT Daten mit 20m Auflösung erwartet, bringt die Verwendung der Waldmaske nach analoger Satellitenbildklassifikation eine Genauigkeitssteigerung von 1-2% 'kappa', respektive 'overall accuracy'. Die Klassifikationsgüte der Objektklasse Wald wird um 4% 'user accuracy' angehoben, während die Kartenreproduzierbarkeit ('producer accuracy') nur geringfügig verschlechtert wird. Die Sicherheit der klassierten Waldpixel wird demnach verbessert. Die Genauigkeitssteigerung in Abhängigkeit der verwendeten Waldmaske ist nicht unabhängig vom verwendeten Resamplingsverfahren, respektive der Beleuchtungskorrektur wie aus den vorangegangenen Kapiteln auch hervorgeht. Die generelle Tendenz ist aber einheitlich.

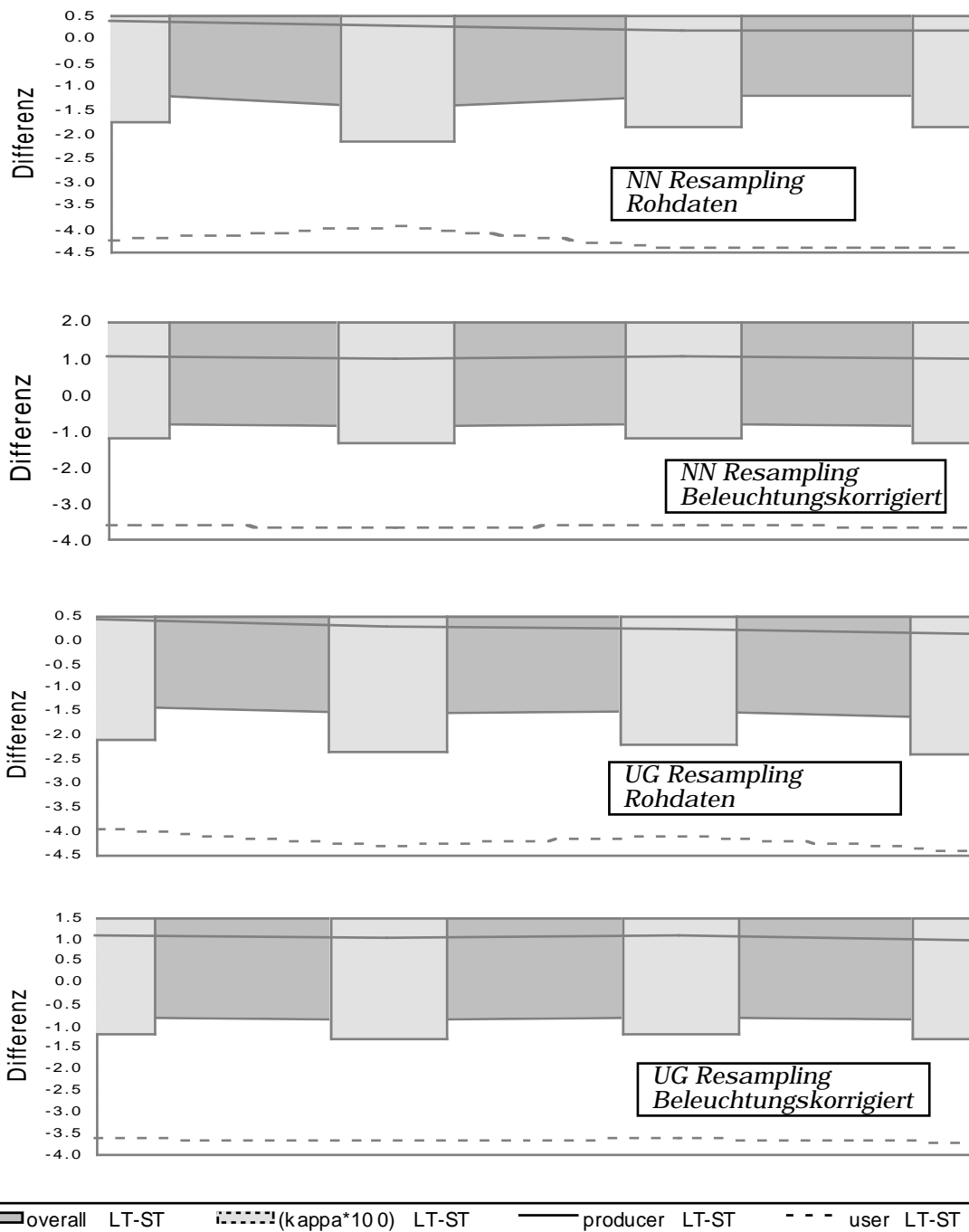


Fig. 69 : Genauigkeitsvergleich: Waldmasken, TM, 25 m
 Differenzen zwischen Waldmaske nach Landeskarte (LT) und Maske nach analoger Satellitenbildinterpretation ST, der Satellitendaten der Masse 'producer' und 'user' Wald, 'overall', 'kappa'*100, (verbreiterte Wolkenmaske für Stichproben und Bodenreferenz)

5 - 3 KLASSIFIKATIONEN MIT 100M AUFLÖSUNG

5 - 3.1 Klassifikationen mit SPOT-XS mit 100m Auflösung

erreichte Genauigkeiten	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
Mittelwerte	85.16%	80.91%	88.39%	0.8227
beste Klassifikationsmasse:	92.63%	88.41%	89.90%	0.8451
beste Klassifikation (kappa): XS-00-UG-BE-ST-KO-ST-KO	87.27%	83.12%	89.90%	0.8451
Minimalwerte:	72.85%	74.00%	86.29%	0.7895
verwendete Kanäle:	SPOT-Multispektral Kanal 1 und 3			

Tabelle 26: Erreichte Genauigkeiten SPOT-XS mit 100m Auflösung

Werden die SPOT-XS-Daten von 20m auf 100m skaliert und dann klassiert, so liegen die erreichten Genauigkeiten nur wenig unter der originalen Auflösung. Das Mittel der Gesamtgenauigkeit ('kappa' Koeffizient und 'overall accuracy') ist leicht schlechter ($\leq 1\%$). Die waldspezifische 'user accuracy' sinkt um etwa 4%. Die Sicherheit der Waldklassifikation verringert sich. Auffallend ist des Weiteren, dass das beste erreichte Resultat deutlich schlechtere Genauigkeiten erreicht. Ein Unterschied von 4% 'kappa' ist nicht zu vernachlässigen.

Eine vollständige Übersicht der Genauigkeiten, des Einflusses der Resamplingmethode, Beleuchtungskorrektur und der Waldmaske auf die Ergebnisse findet man im Anhang in Kapitel [ANHANG: K]

Die Interpretation aller Einflüsse auf die Klassifikation zeigt, dass beinahe alle Veränderungen wie sie für SPOT-XS mit 20m Auflösung beobachtet wurden [5 - 2.1] auch für die Klassifikation mit 100m Auflösung zutreffen. Der einzige Unterschied liegt in der um systematisch wenigen Prozenten geringeren Genauigkeit, sowie dem fehlenden Einfluss des Resamplingverfahrens. Daher wird hier auf eine vertiefte Analyse verzichtet, insbesondere da im Kapitel [5 - 3.2] vergleichbare Bedingungen untersucht wurden.

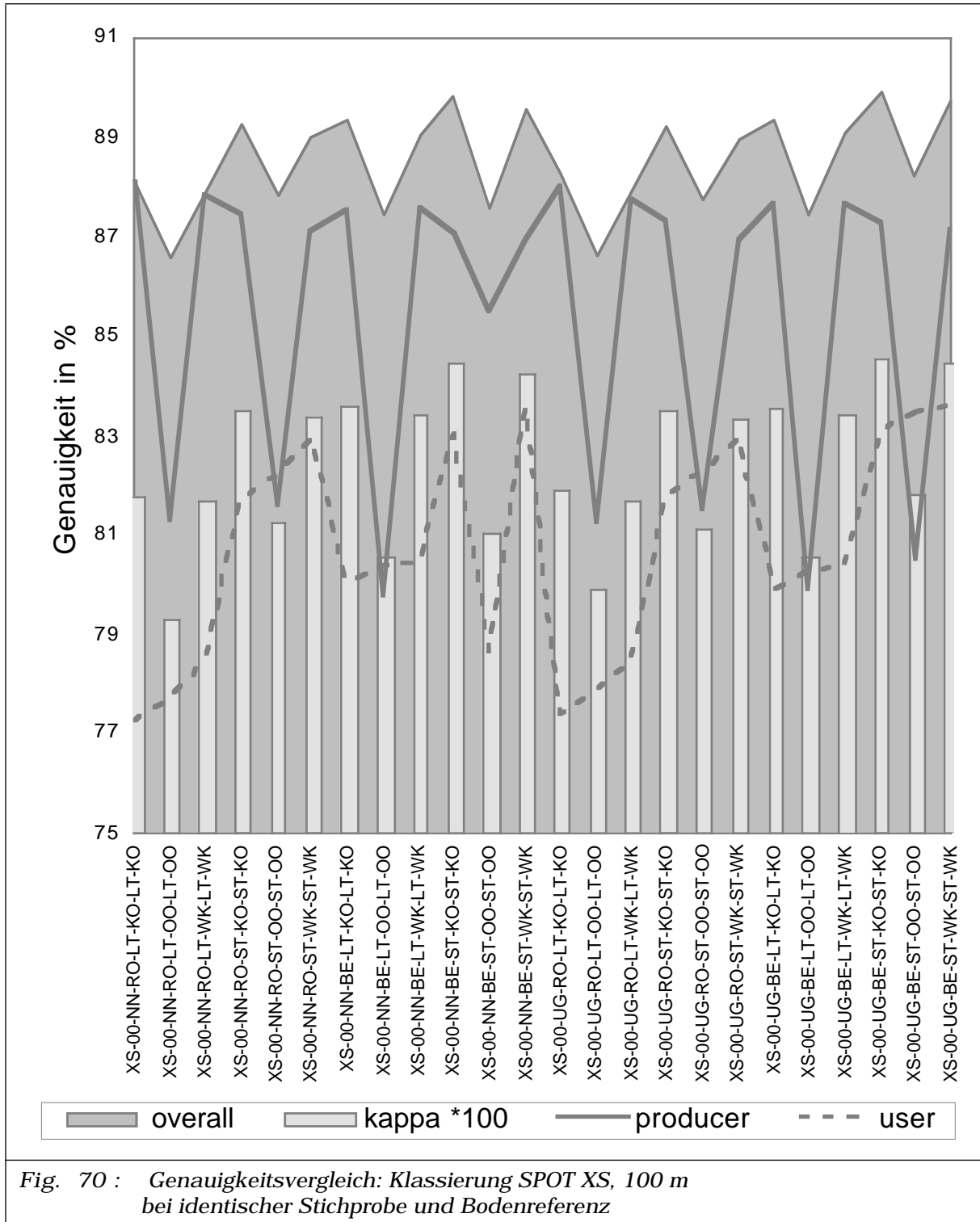


Fig. 70 : Genauigkeitsvergleich: Klassierung SPOT XS, 100 m bei identischer Stichprobe und Bodenreferenz

5 - 3.2 Klassifikationen mit SPOT-XS und SPOT-Pan mit 100m
Auflösung

erreichte Genauigkeiten	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
Mittelwerte	86.12%	83.29%	89.68%	0.8426
beste Klassifikationsmasse:	91.65%	90.69%	92.43%	0.8854
beste Klassifikation (kappa): XP-00-UG-BE-ST-WK-ST-WK	88.02%	89.71%	92.43%	0.8854
Minimalwerte:	79.04%	75.77%	86.89%	0.7985
verwendete Kanäle:	SPOT-Multispektral Kanal 3 und SPOT-Pan			

Tabelle 27: Erreichte Genauigkeiten SPOT-XS und Pan mit 100m Auflösung

Wird den auf 100m skalierten SPOT-XS-Daten der ebenfalls skalierte SPOT-Pan Kanal hinzugefügt, so bemerkt man eine markante Genauigkeitssteigerung der mittleren Genauigkeiten gegenüber den Klassifikationsvergleichen derselben Datenkonstellation mit 20m Auflösung (Kapitel [5 - 2.2]). Der 'kappa' Koeffizient steigt um 5%, die 'overall accuracy' um 3%. Die waldspezifische 'user accuracy' erhöht sich um 4% und parallel dazu die 'producer accuracy' um den gleichen Betrag. Die gesamte Klassifikation wird auch gegenüber [5 - 3.1] verbessert. Die vom automatisierten PPD getroffene Kanalauswahl bleibt identisch.

[Fig - 71] zeigt wiederum graphisch eine repräsentative Auswahl der Klassifikationen. Der positive Einfluss der Verwendung einer Kondensstreifenmaske entspricht den Resultaten mit 20m Auflösung, bis auf die etwas geringere Genauigkeitssteigerung.

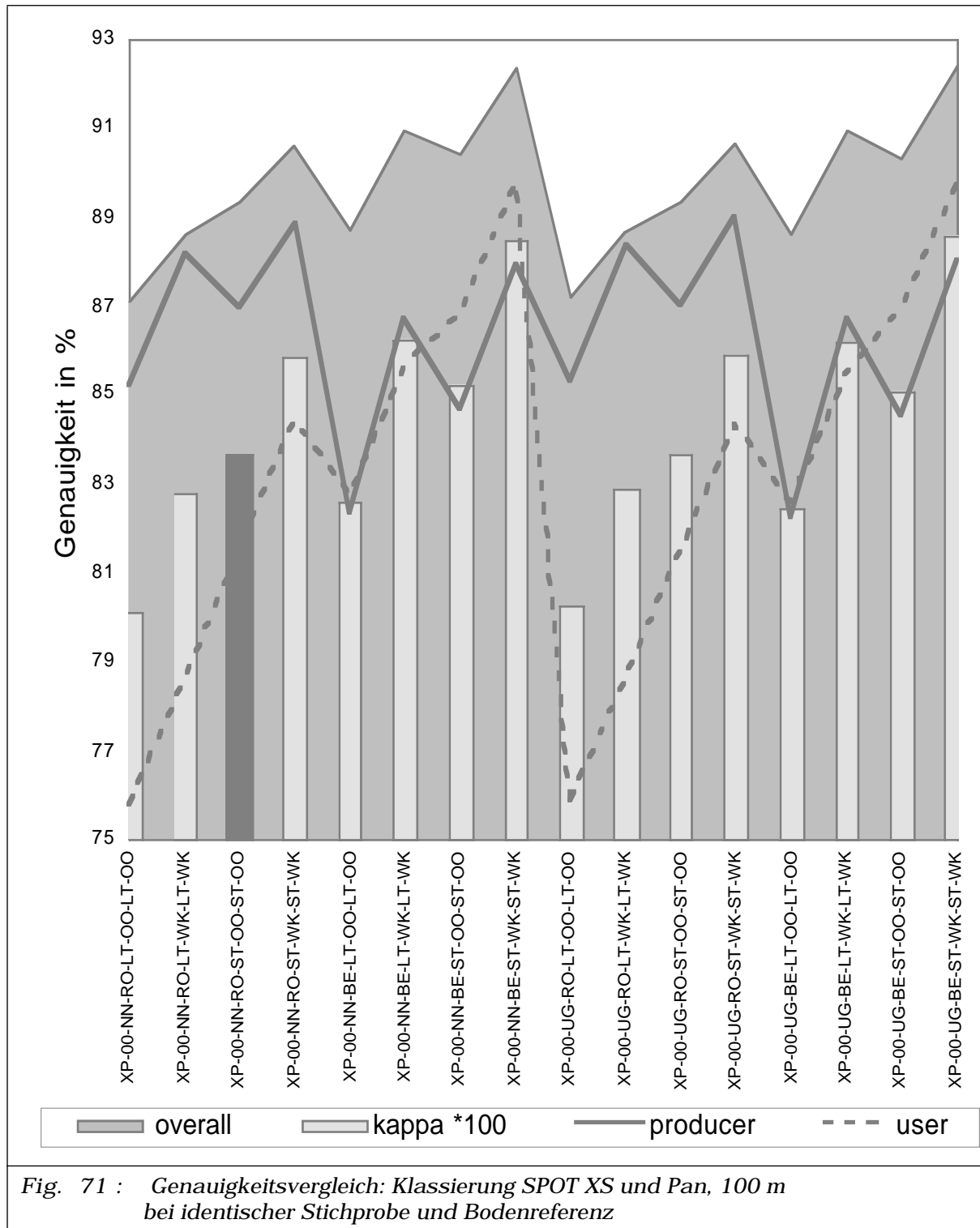
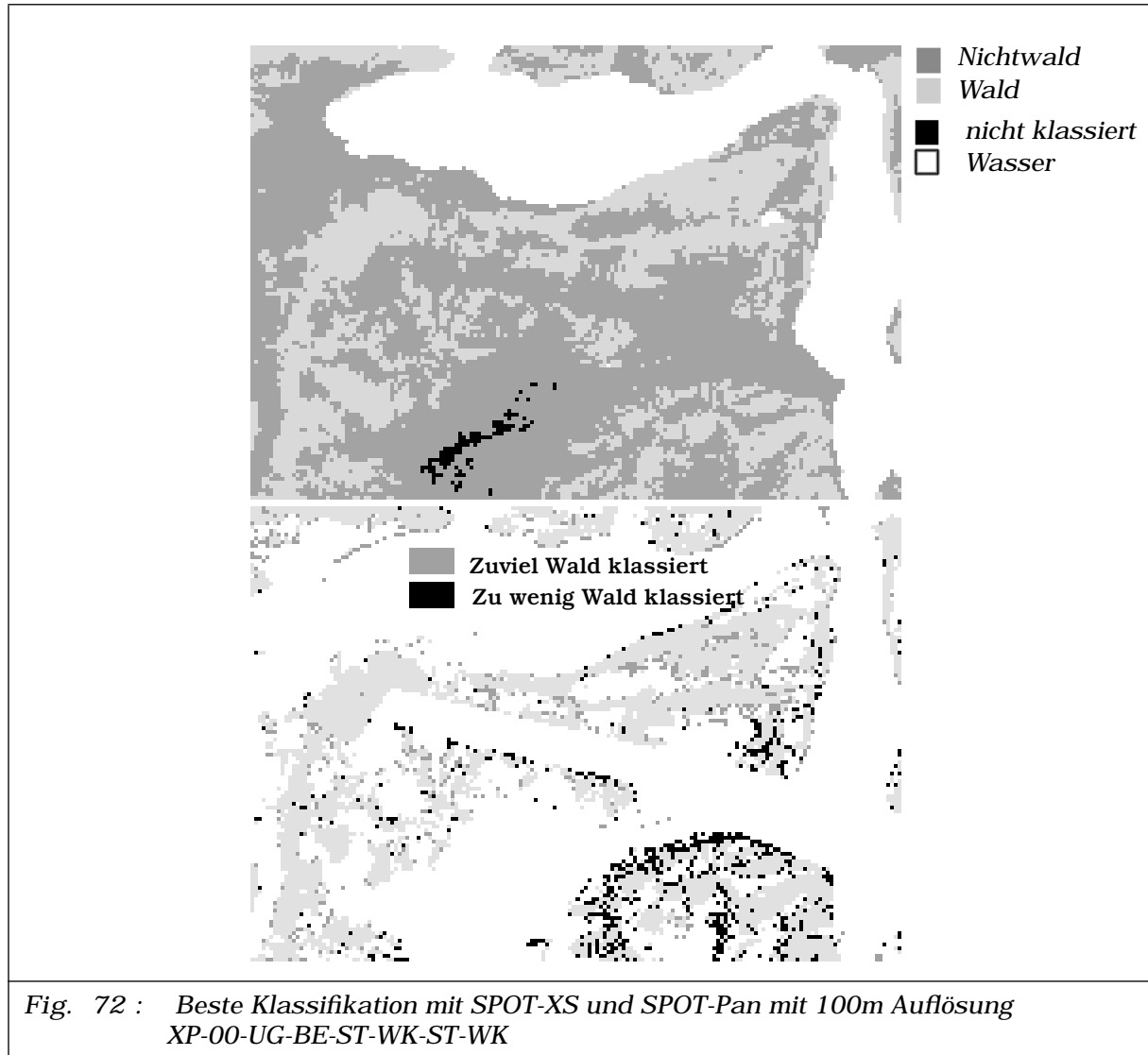


Fig. 71 : Genauigkeitsvergleich: Klassierung SPOT XS und Pan, 100 m bei identischer Stichprobe und Bodenreferenz

5 - 3.2.1 Visuelle Analyse der Klassifikation (XP-00)



Zu wenig Wald wurde entlang des ausmaskierten Kondensstreifens, welcher vermutlich zuwenig tolerant interpretiert wurde, klassiert. Des weiteren stellen die sonnenexponierten Gebiete mit feingliedrigen Waldflächen entlang des Oberbauen mit 100m Auflösung ein grosses Klassifikationsproblem dar.

In den Gebieten, in denen der Wald überklassiert wurde, herrscht vorwiegend ein lockerer Waldbestand vor. Weitere Interpretationsdetails folgen in Kapitel [5 - 3.3.4], da die Klassifikation mit Landsat-TM auf ähnliche Differenzen führt.

5 - 3.2.2 Einfluss des Resamplings (XP-00)

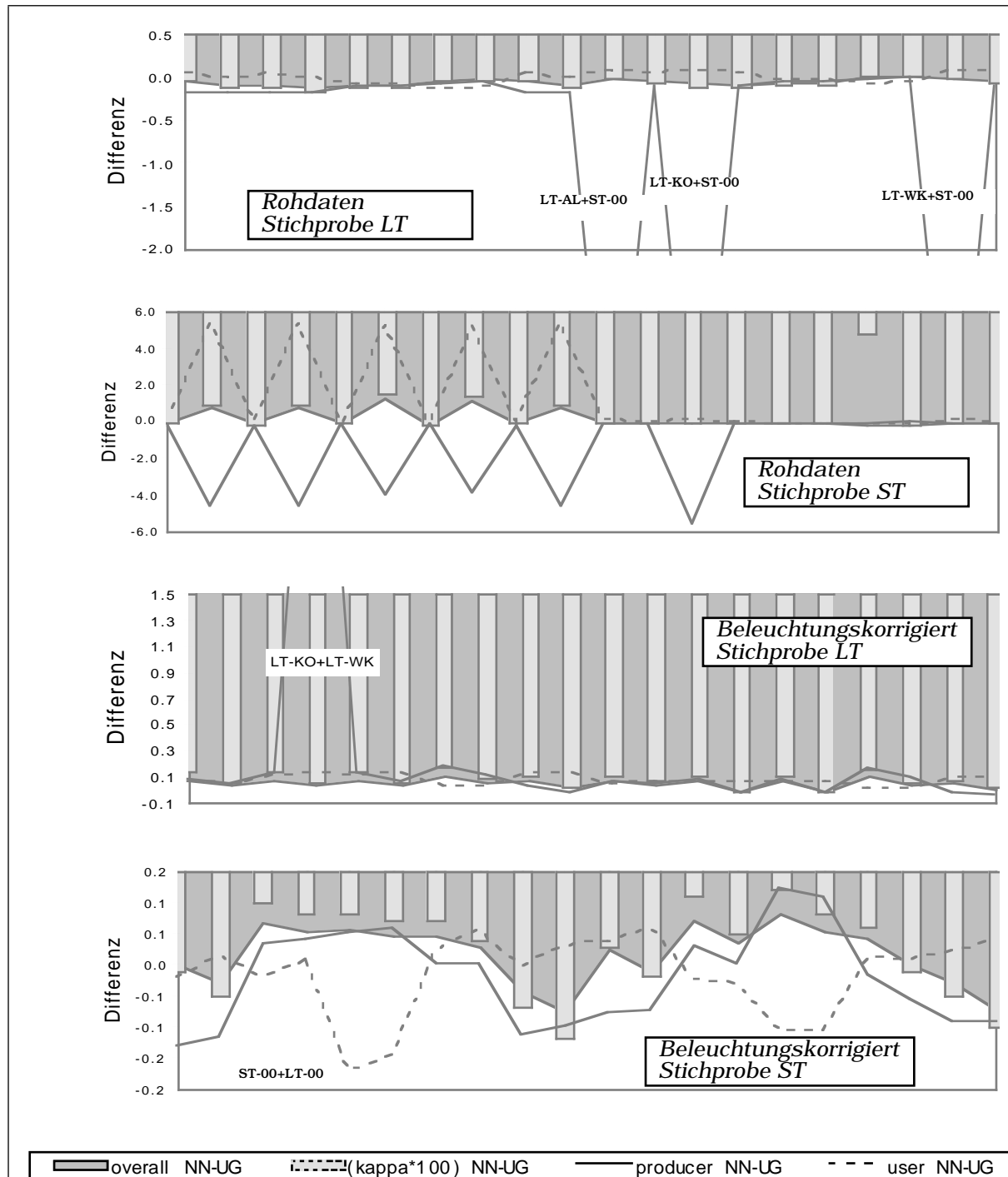


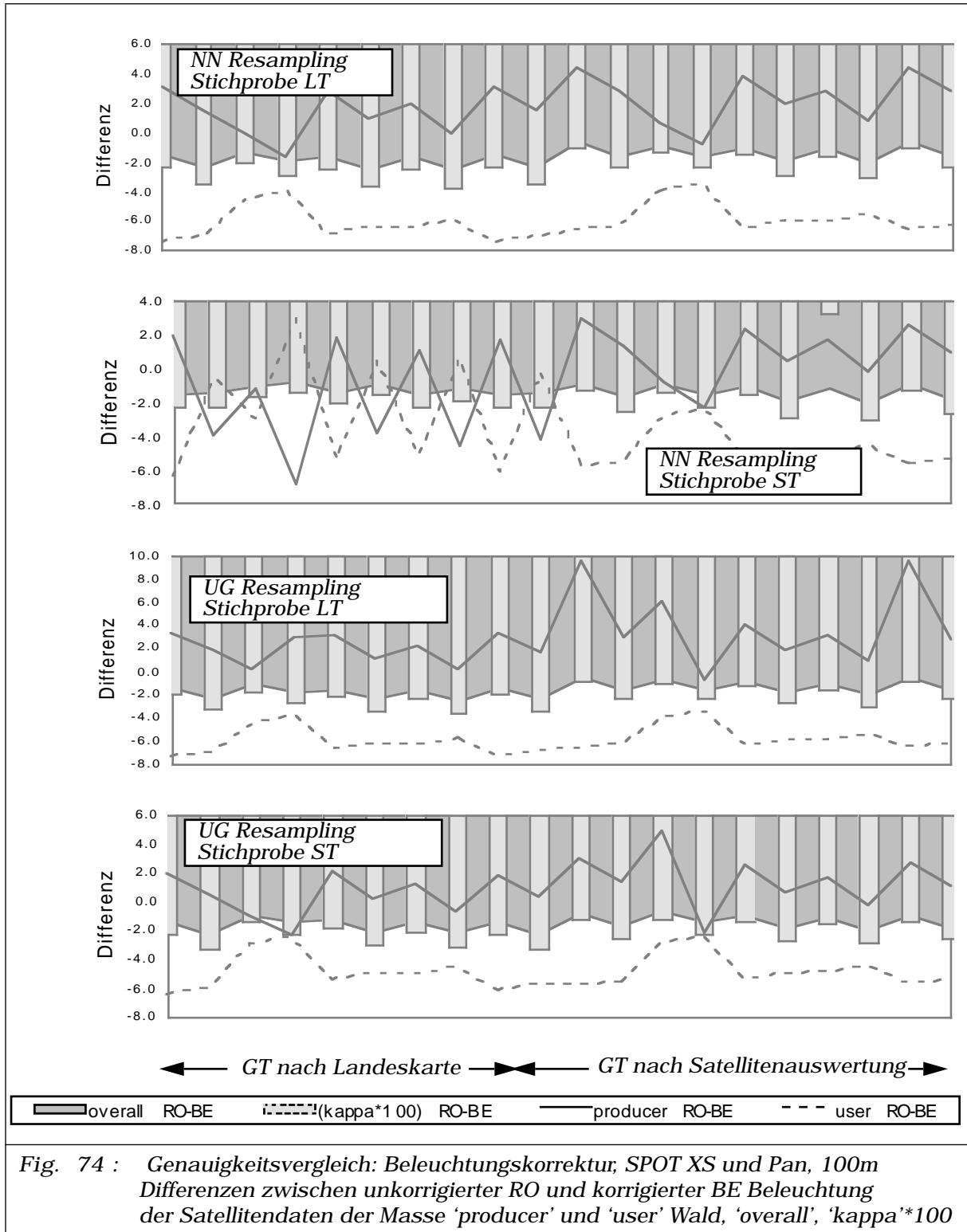
Fig. 73 : Genauigkeitsvergleich: Resampling Georeferenzierung, SPOT XS und Pan mit 100 m Auflösung
 Differenzen zwischen 'nearest neighbour' NN und 'bilinearem' Resampling UG der Satellitendaten der Masse 'producer' und 'user' Wald, 'overall', 'kappa'*100

Im Gegensatz zum Datensatz mit 20m Auflösung hat die verwendete Resamplingmethode einen anderen Einfluss auf die Klassifikationsgenauigkeit [Fig - 73]. Werden die Satellitendaten nicht beleuchtungskorrigiert, so sind die Genauigkeiten unabhängig von der gewählten Resamplingmethode. Bei beleuchtungskorrigierten Daten tritt in vereinzelt Fällen sogar eine leichte, nicht signifikante Verschlechterung ein. Dieses Verhalten ist nicht verwunderlich. Bei der Georeferenzierung wurden durch die Resamplingmethode entweder ein 20m Bildelement neu zugewiesen, oder der Zielwert aus maximal vier 20m Elementen berechnet. Die Skalierung auf 100m fasste dann 25 Bildelemente zusammen. Der Einfluss des Resamplings wird verschwindend klein und wird von anderen Einflüssen, wie Masken etc. überlagert. Welche Resamplingmethode für Klassierungen mit 100m Auflösung optimal ist, kann deshalb nicht bestimmt werden.

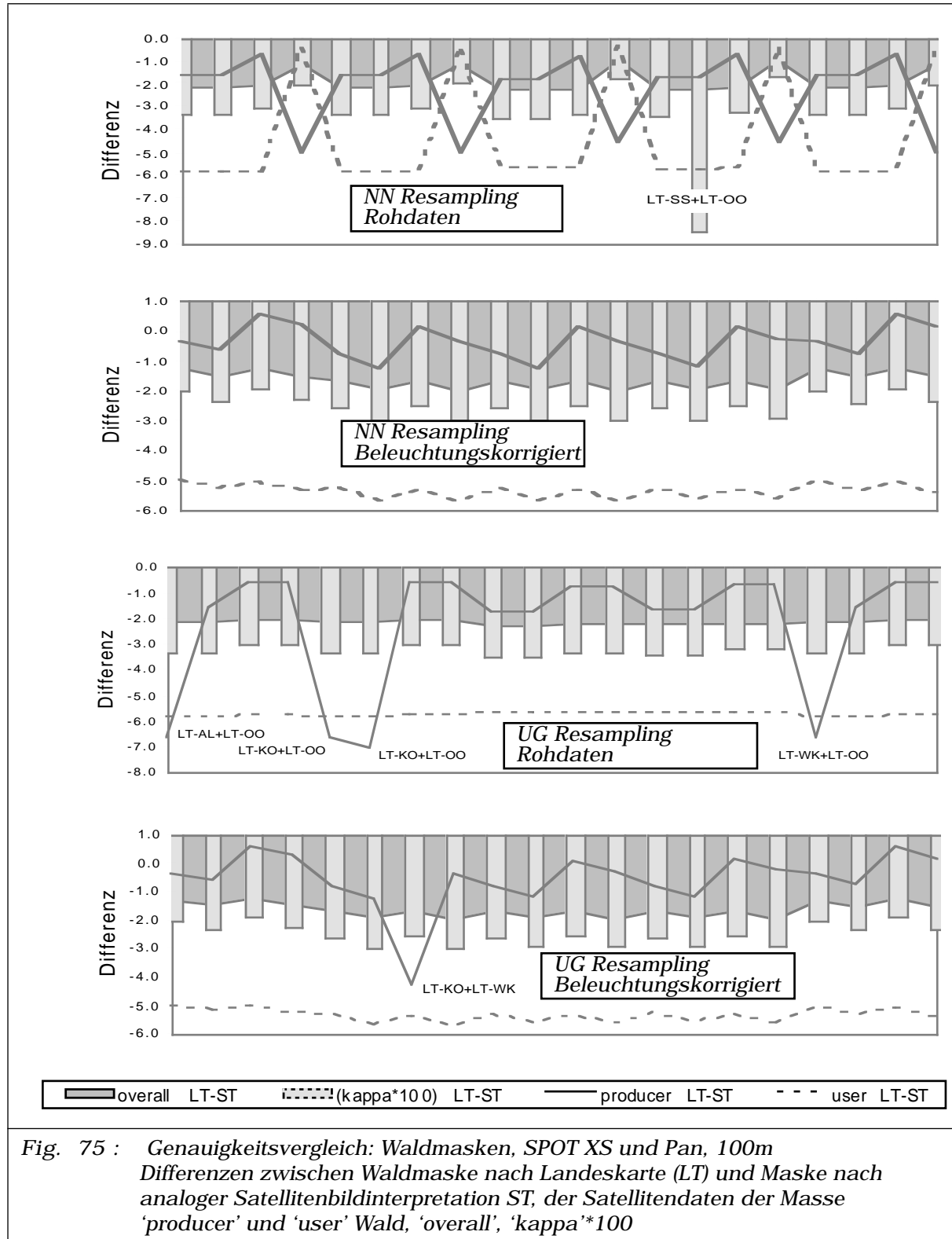
5 - 3.2.3 Einfluss der Beleuchtungskorrektur (XP-00)

Die Beleuchtungskorrektur hat durchwegs einen positiven Einfluss auf die Genauigkeiten [Fig - 74]. Das tendenzielle Verhalten entspricht den Erfahrungen mit 20m Auflösung, nur dass die Genauigkeitssteigerungen beinahe das doppelte betragen. Es zeigt sich erneut, dass die Resultate unabhängig von der Resamplingmethode sind. Der 'kappa' Koeffizient und die 'overall accuracy' sind um 2% besser. Tendenziell verbessert sich auch die waldspezifische 'user accuracy', teilweise bis zu 6%. In wenigen Fällen kippt das Verhältnis der 'user' zur 'producer accuracy' zu Ungunsten der Klassifikationssicherheit ('user'). Dieser Effekt kann mit der immer kleiner werdenden Stichprobe mit 100m Auflösung, die in gewissen Fällen ihre Repräsentanz verliert, erklärt werden. Der automatisierte PPD kann dann überreagieren wie schon früher erklärt wurde.

Grundsätzlich muss der Einsatz einer Beleuchtungskorrektur wiederum empfohlen werden.



5 - 3.2.4 Einfluss der Waldmaske (XP-00)



Wie bei der Analyse des Einflusses der Beleuchtungskorrektur stellt man ein tendenziell identisches Verhalten zu der 20m Auflösung beim Einfluss der Waldmaske fest. Die Benutzung der auf analoger Satellitenbildinterpretation beruhenden Waldmaske bringt grundsätzliche Vorteile. Die Genauigkeitssteigerungen sind, entgegen dem Verhalten bei der Beleuchtungskorrektur, nur etwa halb so gross. 'kappa' ändert sich um 2-3%. Die 'user accuracy' für Wald um etwa 5%. Wiederum sind keine Einflüsse der Resamplingmethode bemerkbar. Die Waldmaske nach Landeskarte kann auch in diesem Falle den Detektionseigenschaften des Satellitensystems nicht gerecht werden.

5 - 3.3 Klassifikationen mit Landsat-TM mit 100m Auflösung

erreichte Genauigkeiten	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
Mittelwerte	89.99%	79.36%	87.58%	0.8134
beste Klassifikationsmasse:	91.69%	87.34%	91.86%	0.8769
beste Klassifikation (kappa): TM-00-UG-BE-LT-WO-ST-WK	89.41%	87.29%	91.86%	0.8769
Minimalwerte:	87.17%	69.47%	80.43%	0.7112
(7) Minimalwerte (von Berechnung ausgeschlossen):	0.82%	1.21%	31.57%	0.1359
verwendete Kanäle:	Landsat-TM Kanal 2 & 4 oder 3 & 4			

Tabelle 28: Erreichte Genauigkeiten Landsat-TM mit 100m Auflösung

Werden die Landsat-TM Kanäle auf 100m skaliert, und anschliessend klassiert, verbessern sich die mittleren Genauigkeiten für 'kappa' und für die 'overall accuracy' um 1%. Die waldspezifische 'user accuracy' steigt im Mittel um 1%. Die zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Referenzkarte entscheidende 'producer accuracy' steigt sogar um 2%. Vergleicht man nur die besten Resultate mit Landsat-TM mit 25m und 100m Auflösung, so erhält man einen um 3% besseren 'kappa'-Koeffizienten mit 100m. Die Gesamt-

klassifikation fällt demnach besser aus. Auch die 'overall accuracy' zeigt diesen Erfolg. Die Analyse der waldspezifischen Masse zeigt, dass sich vor allem die 'producer accuracy' verbessert, während die 'user accuracy' leicht abnimmt. Die Referenzdaten müssen demnach besser den Satellitendaten entsprechen.

Interessanterweise wurde die beste Klassifikation [Fig - 80] mit den Stichprobendaten nach Landeskarte und den Referenzdaten nach der analogen Satellitenbildinterpretation erreicht. Vermutlich ist mit 100m geometrischer Auflösung die Grösse der Stichprobe nach der Maskierung der Wolkengebiete schon so klein, dass einige wenige Bildelemente deren Repräsentanz stark beeinträchtigen können. [Fig - 76] zeigt wiederum eine Auswahl der Klassifikationsanalysen. In Falle der Verwendung der analogen Waldmaske ohne Wolkenmaske für die Stichprobe und Referenz, trat dieser Effekt der mangelhaften Stichprobe auf. Der automatisierte PPD konnte diese Datenlage nicht kontrollieren und lieferte ein absolut unbrauchbares Ergebnis. Vergleicht man die Darstellung [Fig - 76] mit den Resultaten mit 25m Auflösung [Fig - 65, Seite 219], sind tendenziell keine Unterschiede zu bemerken. Der Einsatz einer Wolkenmaske in den Landsat-TM ist unter allen Fällen notwendig und bringt Genauigkeitssteigerungen für 'kappa' von einigen Prozenten. Werden zusätzlich noch die Gebiete, welche in den SPOT-Daten durch Wolken beeinflusst werden, ausmaskiert, erfolgt eine zusätzliche Genauigkeitssteigerung. Sie ist nur gering, aber konsequent vorhanden. Die Kondensstreifenmaske deckt ein sehr feingliedriges und heterogenes Waldgebiet im Bildzentrum ab. Die 100m Bildelemente können die Realität nur in Form von Mischpixeln widerspiegeln, welche in der PPD Klassifikation Probleme bieten. Vermutlich bringt der Ausschluss dieser Elemente aus der Beurteilung das verbesserte Resultat.

Die waldspezifische 'producer accuracy' verändert sich unter dem Einfluss der Masken, beziehungsweise der Vorverarbeitung nur geringfügig. Klassifikationsverbesserungen in Bezug auf den Wald schlagen sich primär in der 'user accuracy', und dabei primär im verschobenen Gleichgewicht der Objektklassen Wald und Nichtwald nieder.

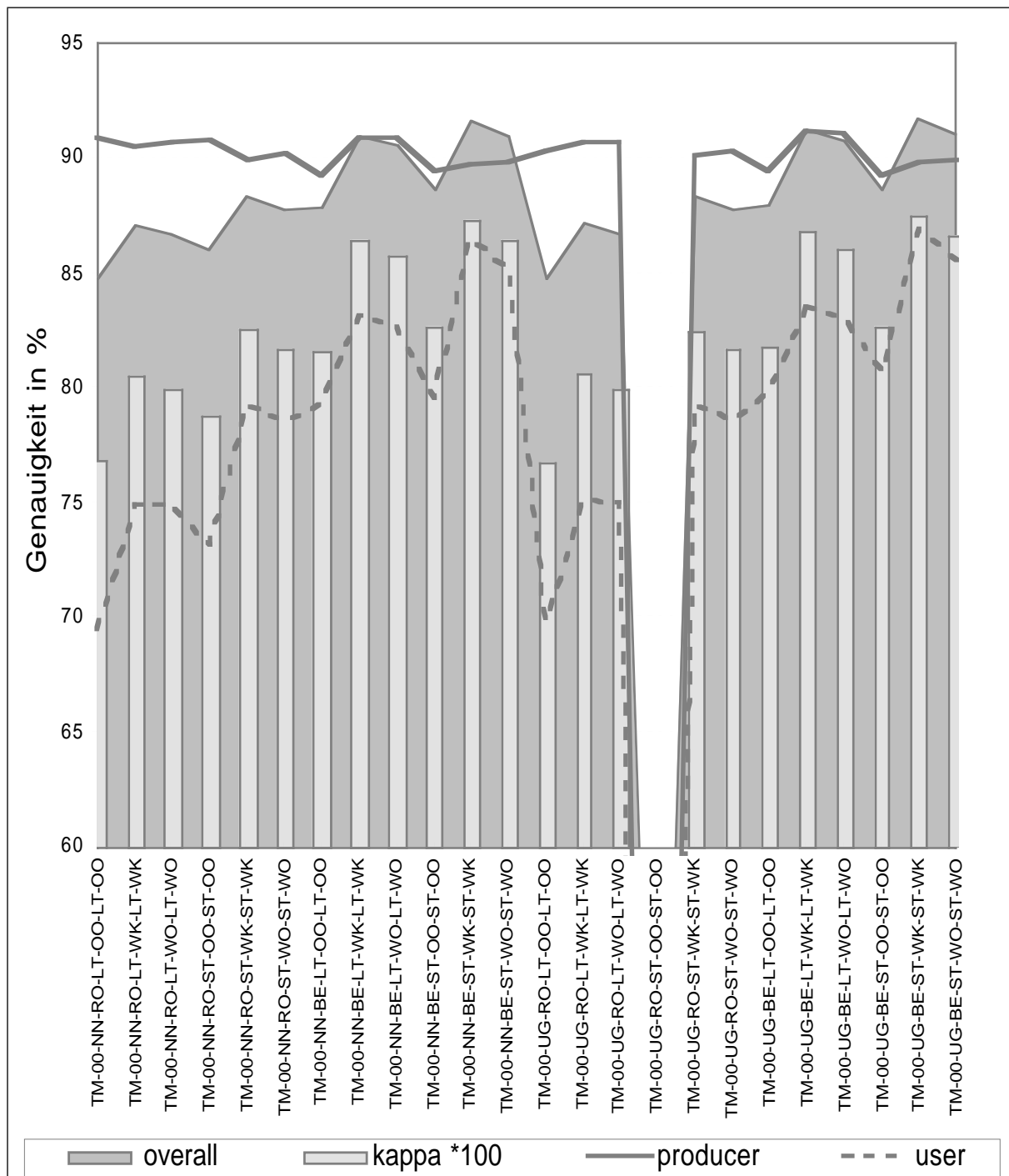
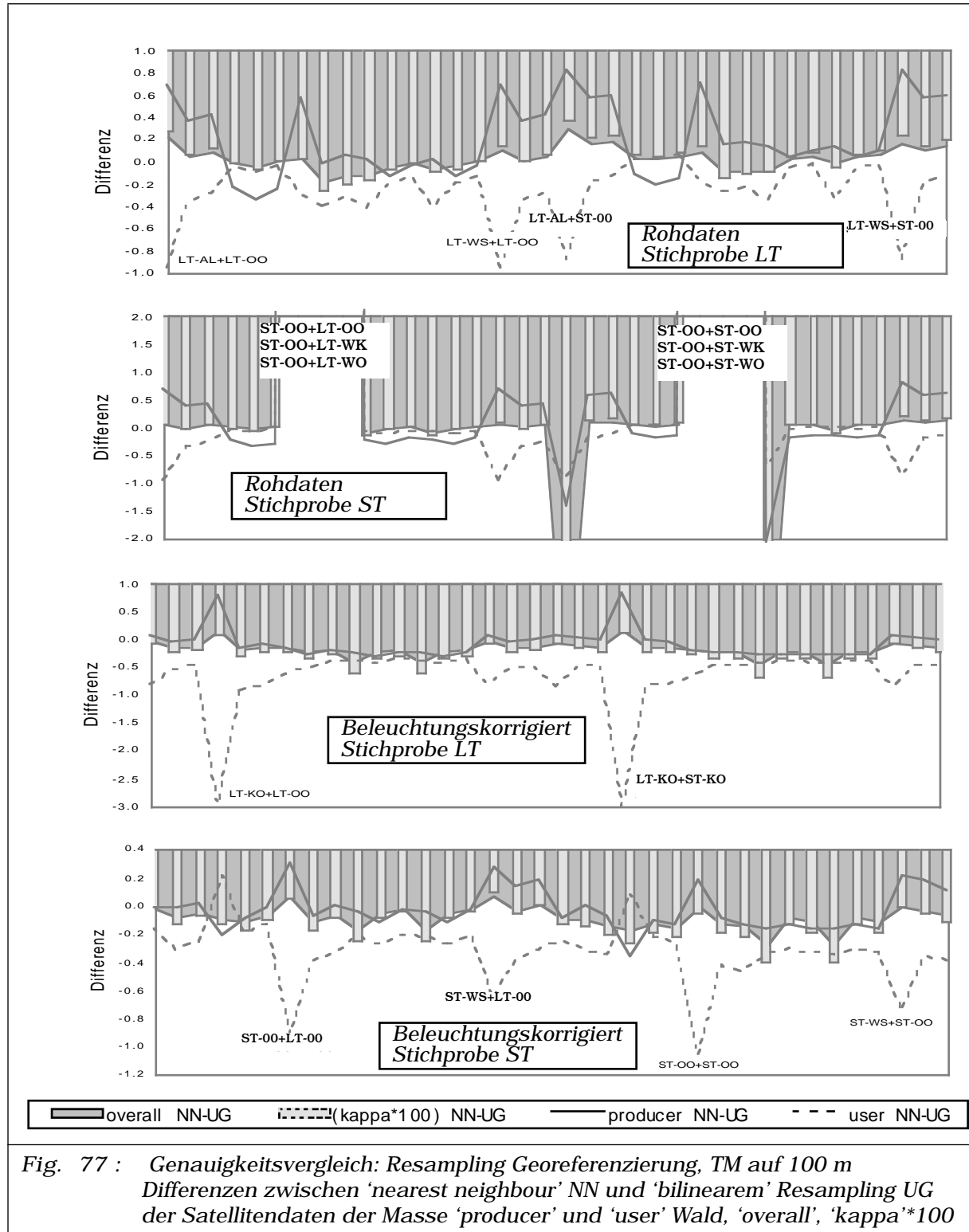


Fig. 76 : Genauigkeitsvergleich: Klassierung TM auf 100 m bei identischer Stichprobe und Bodenreferenz

5 - 3.3.1 Einfluss des Resamplings (TM-00)



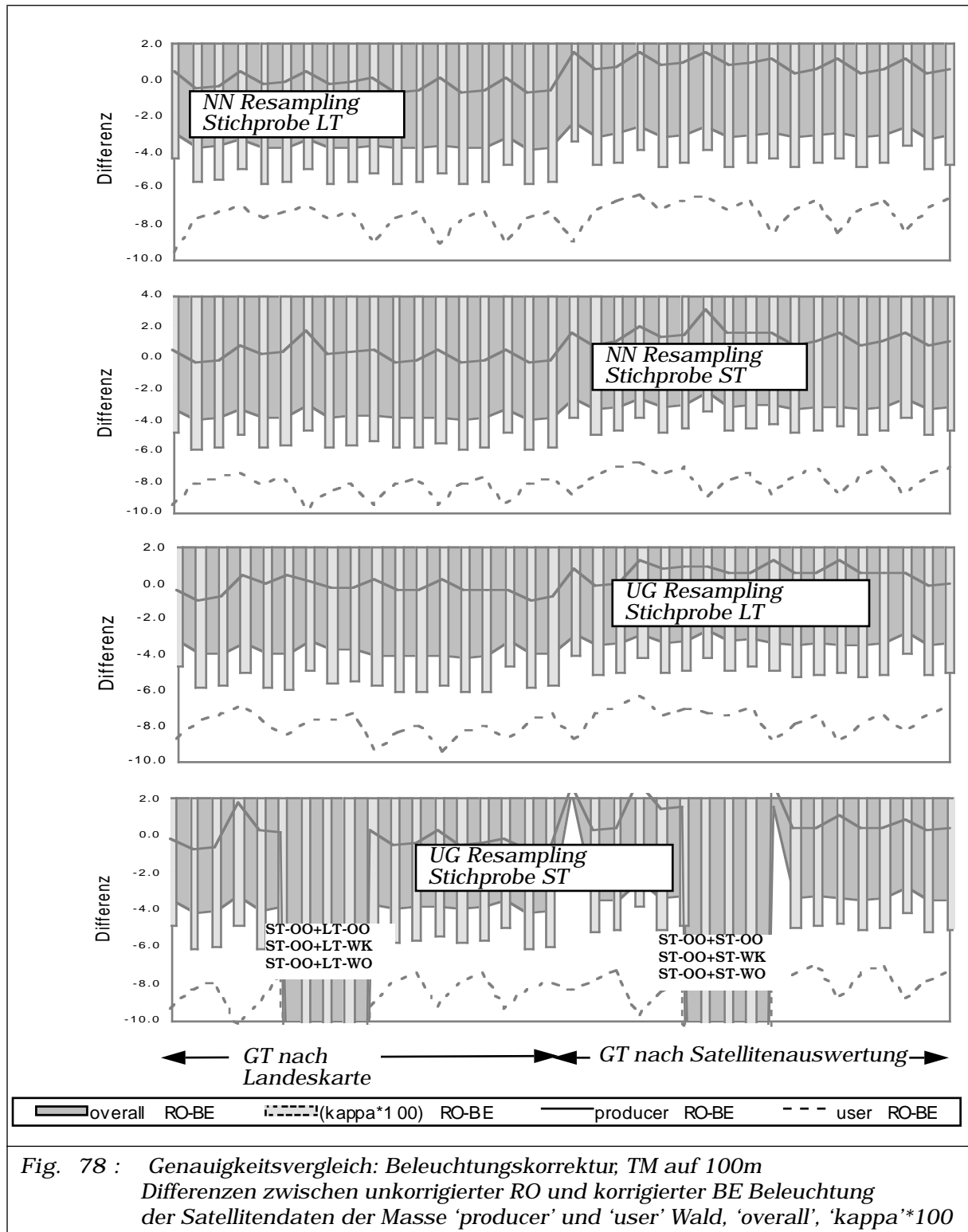
Unter Verwendung der Waldmaske, nach analoger Satellitenbildinterpretation als Stichprobe kein vernünftiges Klassifikationsresultat. Die resultierenden Genauigkeitsangaben sind zufällig und dürfen nicht in die Beurteilung des Resamplingverfahrens einfließen. Die Gründe wurden auf vorangegangener Seite erläutert.

Wie schon in der Analyse der SPOT Klassifikationen auf 100m bemerkt, kann kein eindeutiger Einfluss der verwendeten Resamplingmethode auf das Klassifikationsresultat mit Landsat-TM auf 100m festgestellt werden. Die Unterschiede in 'kappa' bewegen sich im Rahmen von $\pm 2\%$. Die Skalierung der Satellitendaten von 25m auf 100m hat auch in diesem Falle den Resamplingseinfluss verdeckt.

5 - 3.3.2 Einfluss der Beleuchtungskorrektur (TM-00)

Die Beleuchtungskorrektur hat wiederum einen sehr positiven Einfluss auf das Klassifikationsergebnis. Der 'kappa' Koeffizient steigert sich um 4-6%, die 'overall accuracy' um rund 4%. Diese Steigerung erfolgt unabhängig vom gewählten Resamplingverfahren, wie aus der Analyse in Kapitel [5 - 3.3.1] zu erwarten war. Vergleicht man die Resultate mit den Klassifikationen auf 25m Auflösung, so stellt man im Falle der umgebungsbasierten Georeferenziermethode den gleichen positiven Einfluss der Beleuchtungskorrektur fest.

Dass man keinen Unterschied zwischen der Anwendung der Waldmaske nach Landeskarte und nach Satellitendaten feststellt, deutet auf eine auflösungsbasierte Annäherung dieser zwei Masken hin. Den grössten Anteil am Unterschied der zwei Masken verursachen nach Kapitel [3 - 3.5] vorwiegend kleine Baumgruppen, Verdrängungsproblematiken von Verkehrswegen in der Landeskarte, sowie die fein strukturierten Waldränder dar. Mit einer geometrischen Auflösung von 100m verschwinden diese Details. Die Masken unterscheiden sich nur noch in grösseren Kahlschlagflächen und Problemgebieten im Bereich des oberen Waldrandes. Der Waldflächenunterschied beträgt nur noch ca. 1,8% des Untersuchungsgebietes.

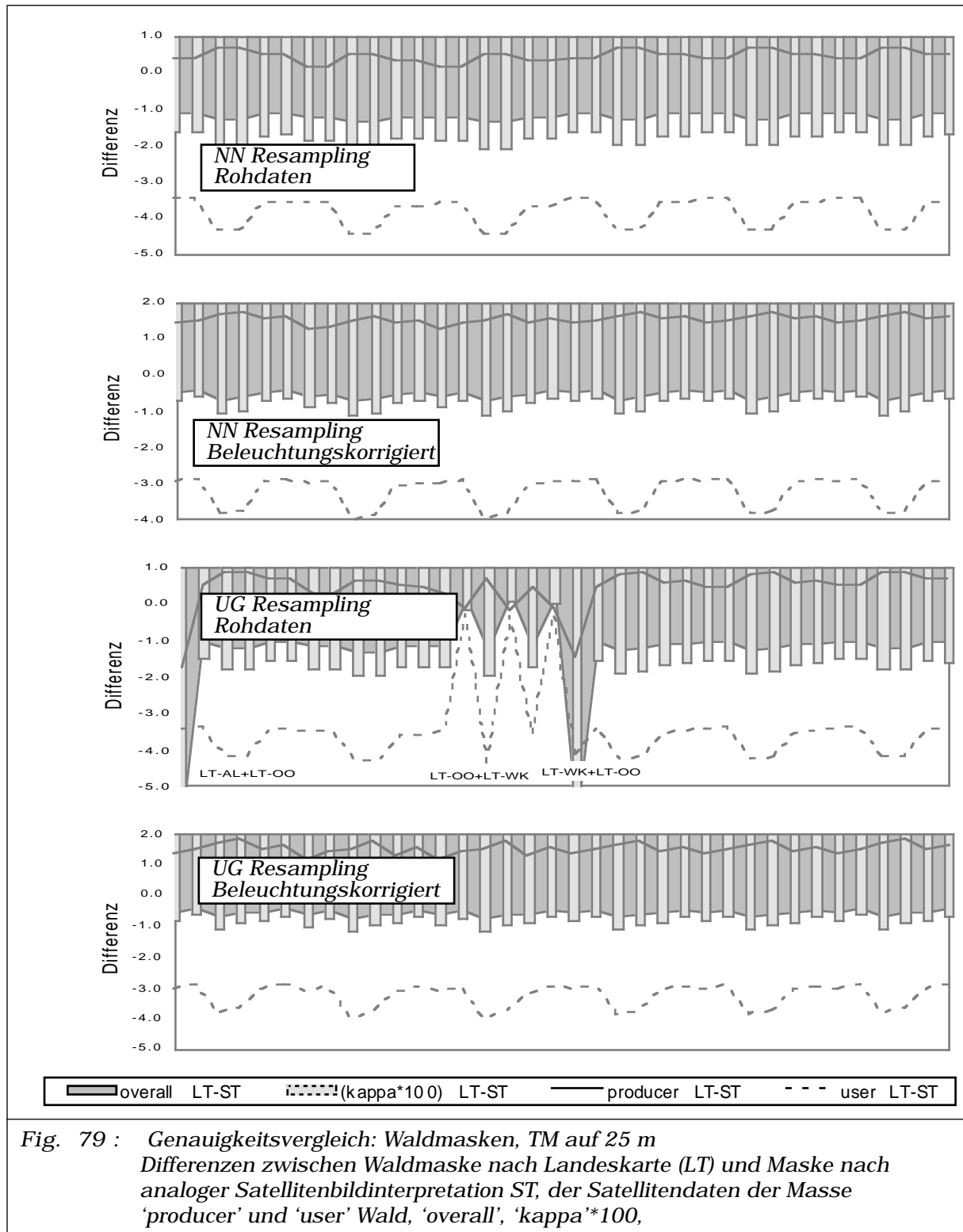


Betrachtet man die klassierte Waldfläche separat, so fällt die um 8-10% gesteigerte 'user accuracy' auf Kosten von etwa 1% 'producer accuracy' auf. Die Bild-

elemente der Klassifikation können nach der Beleuchtungskorrektur mit grösserer Wahrscheinlichkeit als richtig klassiert eingestuft werden. Eine Beleuchtungskorrektur ist allein aus diesem Grunde zwingend für die Landsat-TM-Daten auf 100m vorzuschreiben.

5 - 3.3.3 Einfluss der Waldmaske (TM-00)

Die Waldmaske nach analoger Satellitenbildinterpretation zeigt auch auf 100m ihre gewisse Überlegenheit gegenüber der Landeskarte. Allein schon deren Verwendung als Stichprobe bringt eine Steigerung des 'kappa' Koeffizienten von 1-2% und der waldspezifischen 'user accuracy' von 3-4% ('producer accuracy' verringert sich um 1-2%). Diese Verbesserungen treten sowohl bei den unkorrigierten, wie auch bei den beleuchtungskorrigierten Daten auf. Dass das Resampling keinen Einfluss auf die 100m Daten hat, ist bereits hinlänglich bekannt.



5 - 3.3.4 Visuelle Analyse der Klassifikation (TM-00)

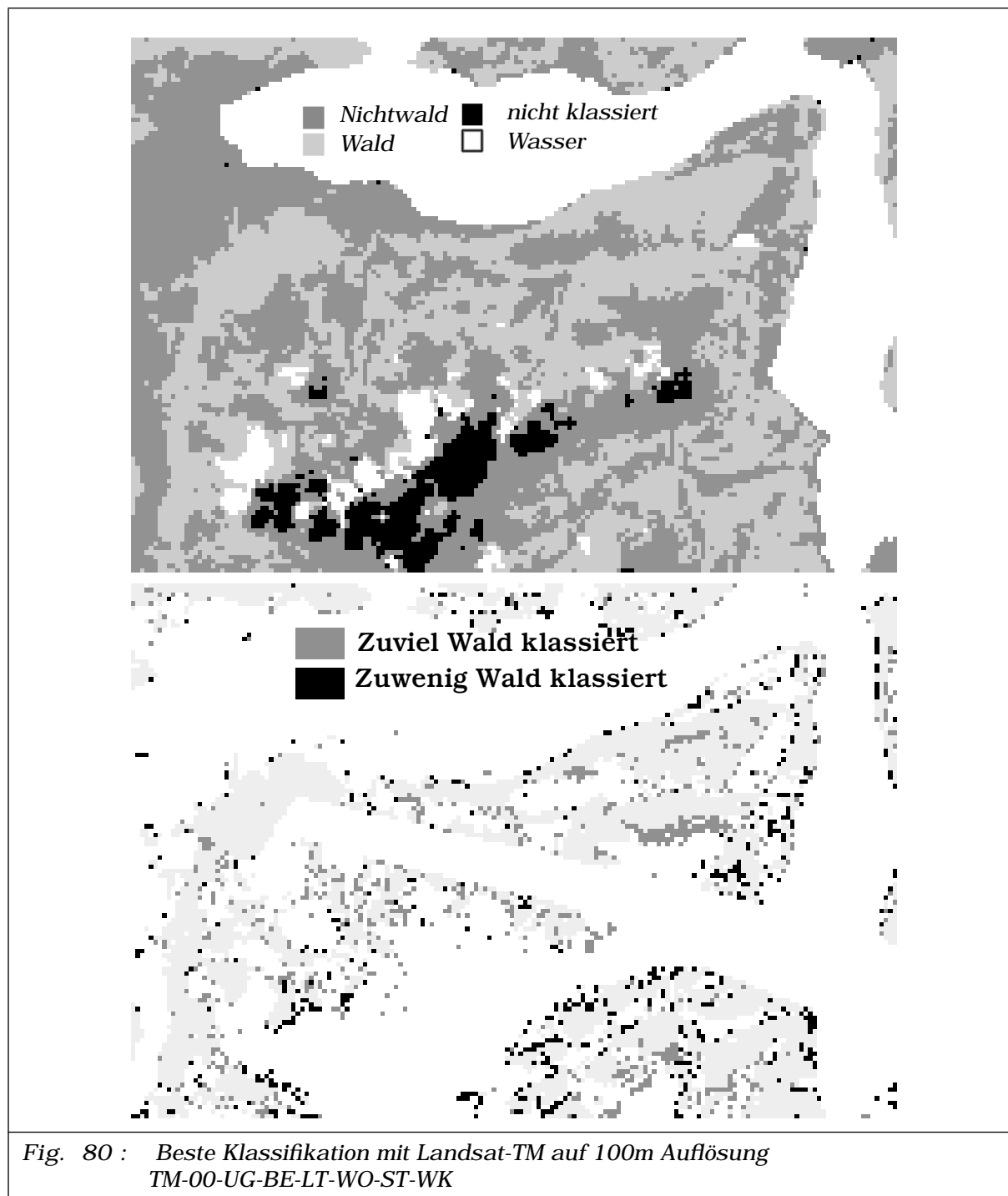


Fig. 80 : Beste Klassifikation mit Landsat-TM auf 100m Auflösung
TM-00-UG-BE-LT-WO-ST-WK

[Fig - 80] zeigt wiederum deutlich, dass im Bereich des Niederbauen der offene Wald zur Baumgrenze überklassiert wurde. In der analogen Satellitenbildinterpretation wurde diese Fläche durchwegs als Nicht-

wald interpretiert. Offensichtlich dominiert aber das charakteristische Spektralverhalten der Blätter und Nadeln. Der gleiche Effekt tritt auch am Buochserhorn sowie am Horn im Isenthal in kleinen Gipfelregionen auf. Die visuelle Nachüberprüfung mittels Luftbilddaten und den panchromatischen SPOT-Daten bestätigten, dass die Klassifikation hier als korrekt eingestuft werden muss. Der Fehler liegt in den Waldmasken. Weitere kritische Regionen, in denen zuviel Wald klassiert wurde, liegen im sehr feingliedrigen und heterogenen Bildzentrum. Die 100m Auflösung vermag die Situation nicht genügend vernünftig nachzuzeichnen.

Zuwenig klassierte Gebiete beschränken sich primär auf die sonnenexponierten Waldflanken. Die dominante Signatur des Untergrundes, die durch die Sonne noch verstärkt wird, erschwert die Klassifikation in aufgelösten und/oder feingliedrigen Waldbeständen. Einige der zuwenig klassierten Bildelemente wurden im Wolkenrandbereich dem Wasser zugeschlagen. Eventuell müsste die Wolkenmaske verbreitert, oder zumindest den Auflösungsverhältnissen angepasst werden. Mischsignaturen zwischen Wolken Schatten und dem eigentlichen Objekt an Boden verfälschen das Resultat.

5 - 4 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

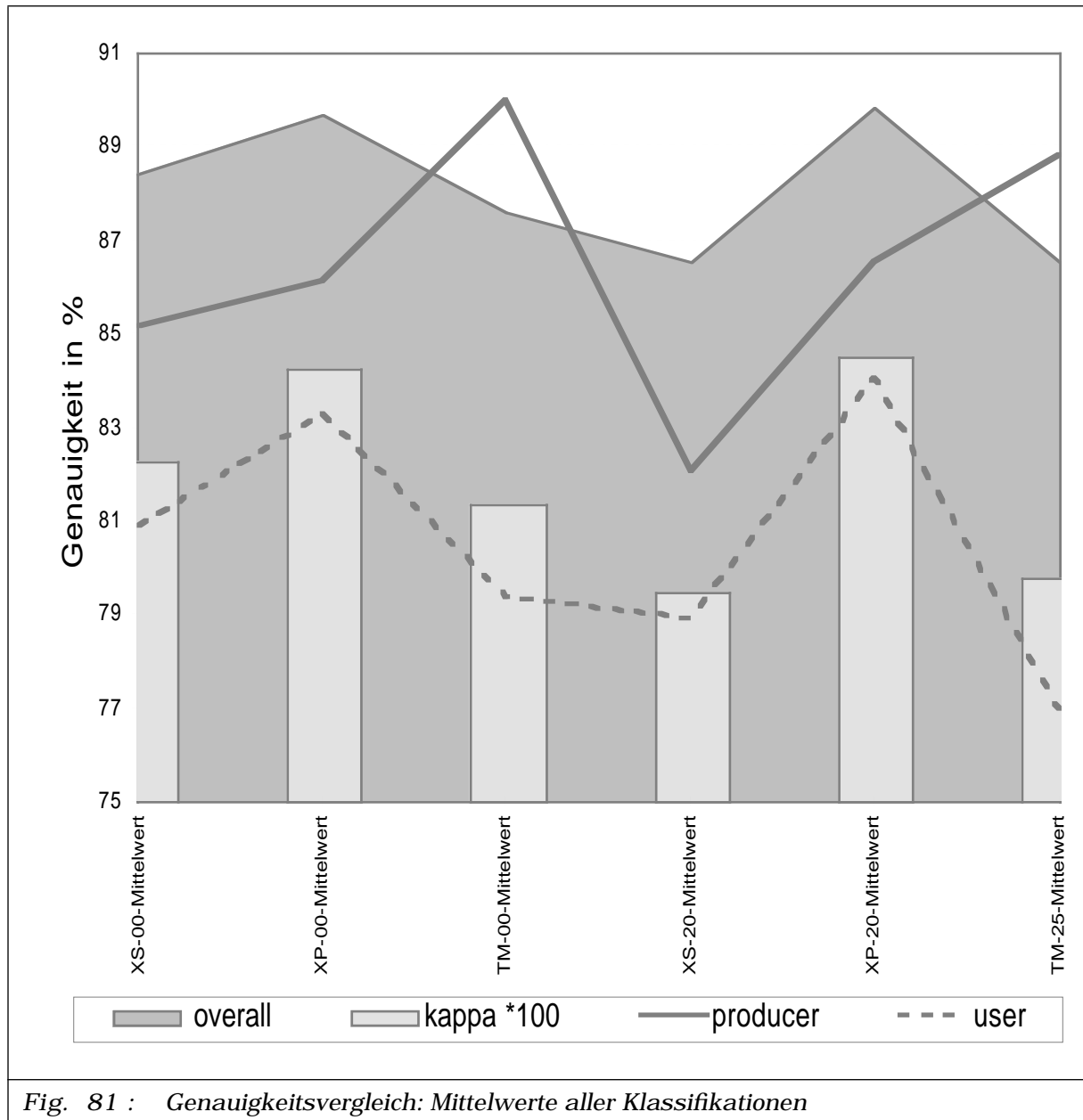
5 - 4.1 Satellitendaten

beste Klassifikationen	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
XS-20-UG-RO-ST-WK-ST-KO	84.26%	81.61%	88.17%	0.8190
XP-00-UG-BE-ST-WK-ST-WK	91.16%	89.72%	92.99%	0.8942
TM-25-UG-BE-ST-WO-ST-WK	88.96%	84.19%	90.62%	0.8581
XS-00-UG-BE-ST-KO-ST-KO	87.27%	83.12%	89.90%	0.8451
XP-00-UG-BE-ST-WK-ST-WK	88.02%	89.71%	92.43%	0.8854
TM-00-UG-BE-LT-WO-ST-WK	89.41%	87.29%	91.86%	0.8769

Tabelle 29: Beste Klassifikationsergebnisse aller Datensätze

Der Vergleich der besten Klassifikationsergebnisse aller Satellitendatensätze zeigt ein einheitliches, positives Bild. Mit allen Datensätzen ist eine Waldklassifikation im Untersuchungsgebiet mit einer Gesamtgenauigkeit von über 81% 'kappa', relativ zu der Bodenreferenz nach analoger Satellitenbildinterpretation möglich. Die 'overall accuracy' nimmt sogar Werte zwischen 88% und 91% ein. Konzentriert man sich auf die Waldfläche alleine, so bewegen sich die 'user accuracies', welche die Sicherheit der Klassifikation betreffend Waldzugehörigkeit widerspiegeln, im Rahmen des 'kappa'-Koeffizienten. Die 'producer accuracy', das Mass für die Reproduzierbarkeit der Bodenreferenz (Karte) liegt deutlich höher. Es ist auffallend, dass für die beste Klassifikation in jeder geometrischen Auflösung, das Resultat im Vergleich mit der analogen Satellitenbildinterpretation erzielt wurde.

In der Originalauflösung der SPOT Satellitendaten (20m Auflösung), brachte der Einbezug des panchromatischen Kanals eine deutliche Genauigkeitssteigerung, welche sich auf 100m nicht mehr so stark auswirkt. Die Landsat-TM-Daten sind den multispektralen SPOT-XS-Daten überlegen. Den Einfluss des panchromatischen SPOT-Pan Kanals können aber auch sie nicht wettmachen. Offensichtlich ist der Kontrast des Objektes Wald in den panchromatischen Daten der entscheidende Faktor, der zur besseren Identifizierbarkeit führt. Analysiert man nicht nur die Spitzenergebnisse, sondern das Mittel aller Klassifikationen nach geometrischer Auflösung getrennt [Fig - 81], so gelten die gleichen Aussagen.



Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methode bereitzustellen, mit der man in der Schweiz auf annähernd operationellem Wege eine Waldflächenklassifikation durchführen kann. Die geometrische gewünschte Auflösung sollte 100m Rastergrösse betragen. Unter diesen Voraussetzungen ist den Landsat-TM-Daten der Vorzug zu geben. Das beste Resultat ist um nicht signifikante 0.8% 'kappa' schlechter als mit den SPOT-Daten inklusive panchromatischem Kanal. Die waldspezifische 'user accuracy' ist um 2,5%

schlechter. Bedenkt man aber, dass ein Quadratmeter SPOT-XS oder SPOT-Pan-Daten mehr als viermal teurer ist als Landsat-TM-Daten [Tab - 6, Seite 71] und dass man gleichzeitig eine SPOT-XS und SPOT-Pan Szene aufnehmen und kaufen muss, so ist die gewonnene Genauigkeitssteigerung ökonomisch nicht sinnvoll. Ebenso ist für eine digitale Waldklassifikation auf 20m bis 25m Auflösung der Einsatz von SPOT-XS oder SPOT-Pan nicht angebracht. Hat man genügend Infrastruktur und Arbeitsleistung zur Verfügung, so kann sich eine visuelle Interpretation der Waldflächen in SPOT-Pan-Daten lohnen. In den meisten Fällen schlägt aber die Arbeitsleistung des Fernerkundungsspezialisten am stärksten zu Buche, sodass die visuelle Bildinterpretation weiterhin den Herstellern von topographischen Karten auf der Basis von Luftbildern vorbehalten bleibt. Die Luftbildphotogrammetrie und -auswertung, besonders wenn sie zum Beispiel durch digitale Arbeitstechniken unterstützt werden kann, ist weiterhin die sinnvollste Methode. Grossräumige Inventuren und digitale Auswertungen von hochauflösenden Satellitendaten (unter 20m Auflösung) bleiben auch weiterhin ökonomisch nicht sinnvoll. Inventuren mit Auflösungen über 20m Rastergrösse, können vermehrt durch die Satellitenfernerkundung ergänzt und abgelöst werden.

5 - 4.2 Waldmasken als Stichprobe und Bodenreferenz

beste Klassifikationen	XS-20		XP-20		TM-25		XS-00		XP-00		TM-00	
Einfluss der Waldmaske: Verwendung der Maske ST	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald
Steigerung in %	2	6.5	4	10	2	4	2	4	3	5	2	3

Tabelle 30:

Einfluss der Waldmaske in allen Datensätzen

Jede Angabe einer Klassifikationsgenauigkeit steht und fällt mit der Qualität der Vergleichsreferenz. Die Vor- und Nachteile der in dieser Arbeit beschriebenen Referenzdaten wurden in [3 - 3.4] und [3 - 3.5] beschrieben. In allen Klassifikationsvergleichen [Tab - 30] konnten mit der Waldmaske nach analoger Satellitenbildinterpretation erwartungsgemäss bessere

Resultate erzielt werden. Die bei einer Auflösung von 100m festgestellten Steigerungen von 2% 'kappa' betreffen vorwiegend die offenen Waldgebiete hin zur Baumgrenze, welche in der Karte nur als Kreissignaturen ausgeschieden werden, sowie einige Windwurfflächen und Rodungen. Das beeindruckend bessere Ergebnis der waldspezifischen 'user accuracy' in den Originalauflösungen ist zusätzlich auf feine Elemente und Variationen zurückzuführen, welche in der Waldmaske nach Landeskarte fehlen. Dies können zum Beispiel verdrängte Flächen durch die Strassensignaturen, generalisierte Waldränder und Einzelbaumgruppen sein. Das Erstellen einer Bodenreferenz auf der Basis der analogen Satellitenbildinterpretation ist für grossräumige Anwendungen wie im vorangegangenen Kapitel als ökonomisch nicht sehr sinnvoll zu betrachten. So bleibt der Grünflächenauszug der Landeskarte die einzige nationale, flächendeckende Referenz. Wird sie zur Genauigkeitsüberprüfung herangezogen, so spiegelt das Klassifikationsergebnis eine zu tiefe Genauigkeit wieder.

Die zwei Waldreferenzen dienen in der vorliegenden Arbeit gleichzeitig als Stichprobengrundlage für die Beleuchtungskorrektur und die Klassifikation. Nur in digitalen Klassifikationen die der Überwachung von Veränderungen eines bestehenden Zustandes (Monitoring) dienen, kann man üblicherweise auf eine solch umfassende Stichprobe zurückgreifen. Einzelne Versuche haben aber gezeigt, dass für die Beleuchtungskorrektur nur eine kleine Stichprobe, die das Objekt Wald in möglichst allen Expositionen und Hangneigungen zeigt, genügt. Diese Stichprobe kann ein geübter Interpret visuell in den zu klassierenden Daten mit genügender Qualität erfassen.

Die Stichprobe für die Klassifikation muss ihrerseits die charakteristische Verteilung für das zu klassierende Objekt vorweisen und eine genügend grosse Anzahl Bildelemente umfassen. Diverse Tests im Untersuchungsgebiet mit den hier bearbeiteten Daten deuteten darauf hin, dass etwa 5% der Objektfläche als Stichprobe genügen, wenn sie frei von Fremdobjekten sind. Diese Stichproben sollten für die Waldflächenklassifikation in der ganzen Schweiz erhältlich sein. In gewissen Fällen kann die Erfassung einer Wasserstichprobe infolge eutrophierter Seen oder mangeln-

der Wasserflächen im Untersuchungsgebiet Probleme bieten. In diesen Fällen kann eine Erweiterung des hier gezeigten Dreiklassenproblems (Wald, Wasser und Nichtwald) auf 4 und mehr Klassen im PPD Verfahren eine Lösung bringen.

5 - 4.3 Abdeckmasken

beste Klassifikationen	XS-20		XP-20		TM-25		XS-00		XP-00		TM-00	
	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald
Steigerung in %												
Einfluss der Wolkenmaske: WO	-	-	-	-	5	10	-	-	-	-	3	5
Einfluss der Kondensstreifenmaske: KO	0.5	8	2	8	-	-	2	1	2	1	-	-

Tabelle 31: Einfluss der Wolken- und Kondensstreifenmaske in allen Datensätzen

Gebiete, welche unter Wolken und Kondensstreifen oder in deren Schlagschatten liegen, sind mit optischen Fernerkundungsdaten nicht oder nur eingeschränkt klassierbar. Wie die vorliegenden Untersuchungen gezeigt haben, müssen die betroffenen Gebiete aber in den Stichproben und in den Referenzdaten ausgeschlossen werden. Die Genauigkeitssteigerung ist wie zu erwarten hoch. Der Einbezug der von einem Kondensstreifen beeinflussten Gebiete in den SPOT-Daten in den Klassifikationsprozess beeinträchtigt das Resultat wesentlich geringer. Die analoge Satellitenbildinterpretation mit den panchromatischen SPOT-Daten zeigte, dass diese Gebiete lokal klassierbar sind, im Rahmen des ganzen Untersuchungsgebietes Beckenried das Resultat aber stören. Dunstgebiete in einer Satellitenszene verhalten sich analog. Entweder müsste man die Satelliten- daten atmosphärisch nach Regionen getrennt korrigieren, oder die Waldflächenklassifikation ist getrennt nach den einheitlichen, atmosphärischen Subregionen zu vollziehen.

In den Detailuntersuchungen nach den einzelnen geometrischen Auflösungen kam der Einsatz der Schlagschattenmasken nicht zur Sprache. Ihre Ver-

wendung in den Referenzdaten ist wenig sinnvoll, da die Schatten des Geländes in jeder Aufnahme (des gleichen Datums) an der gleichen Stelle auftreten und mit den zu Verfügung stehenden Satellitendaten nicht ausgewertet werden können. Sinnvoll kann der Einsatz der Schlagschattenmasken in der Definition der Stichproben sein. Die Resultatübersicht im Anhang zeigt aber, dass im Untersuchungsgebiet Beckenried eine sehr geringe Anzahl Bildelemente von Schlagschatten beeinflusst sind, welche die Stichprobensignatur der drei Objektklassen nicht oder nur sehr geringfügig beeinträchtigen. Es konnte weder ein signifikanter positiver noch ein negativer Einfluss der Schlagschattenmaske auf das Klassifikationsresultat festgestellt werden. Wird der automatisierte PPD aber mit einer sehr viel kleineren Stichprobengrösse trainiert, oder kommen Satellitendaten mit tiefem Sonnenstand zum Einsatz, so wird eine Schlagschattenmaske sicherlich notwendig sein. Auch Gebiete mit noch stärker ausgeprägter Topographie können ihren Einsatz verlangen.

5 - 4.4 Einfluss der Beleuchtungskorrektur in allen Datensätzen

beste Klassifikationen	XS-20		XP-20		TM-25		XS-00		XP-00		TM-00	
	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald
Steigerung in %												
Einfluss der Beleuchtungskorrektur: mit Korrektur BE	1	1.5	2	4	2	4	0-1	1-2	2	6	5	8

Tabelle 32:

Einfluss der Beleuchtungskorrektur in allen Datensätzen

Die Beleuchtungskorrektur verbessert in allen getesteten Datensätzen das Ergebnis signifikant und deshalb unbedingt anzuwenden. Die Genauigkeitssteigerungen sind insbesondere für die Landsat-TM-Daten sehr gross. Die SPOT-XS-Daten zeigen ein etwas heterogenes Bild und werden nur in speziellen Konstellationen durch die Beleuchtungskorrektur beeinflusst. Generell reagieren die Datensätze mit 100m Auflösung besser auf die Korrektur. Eine Steigerung von 'kappa' bei Landsat-TM um 5% ist sehr signifikant.

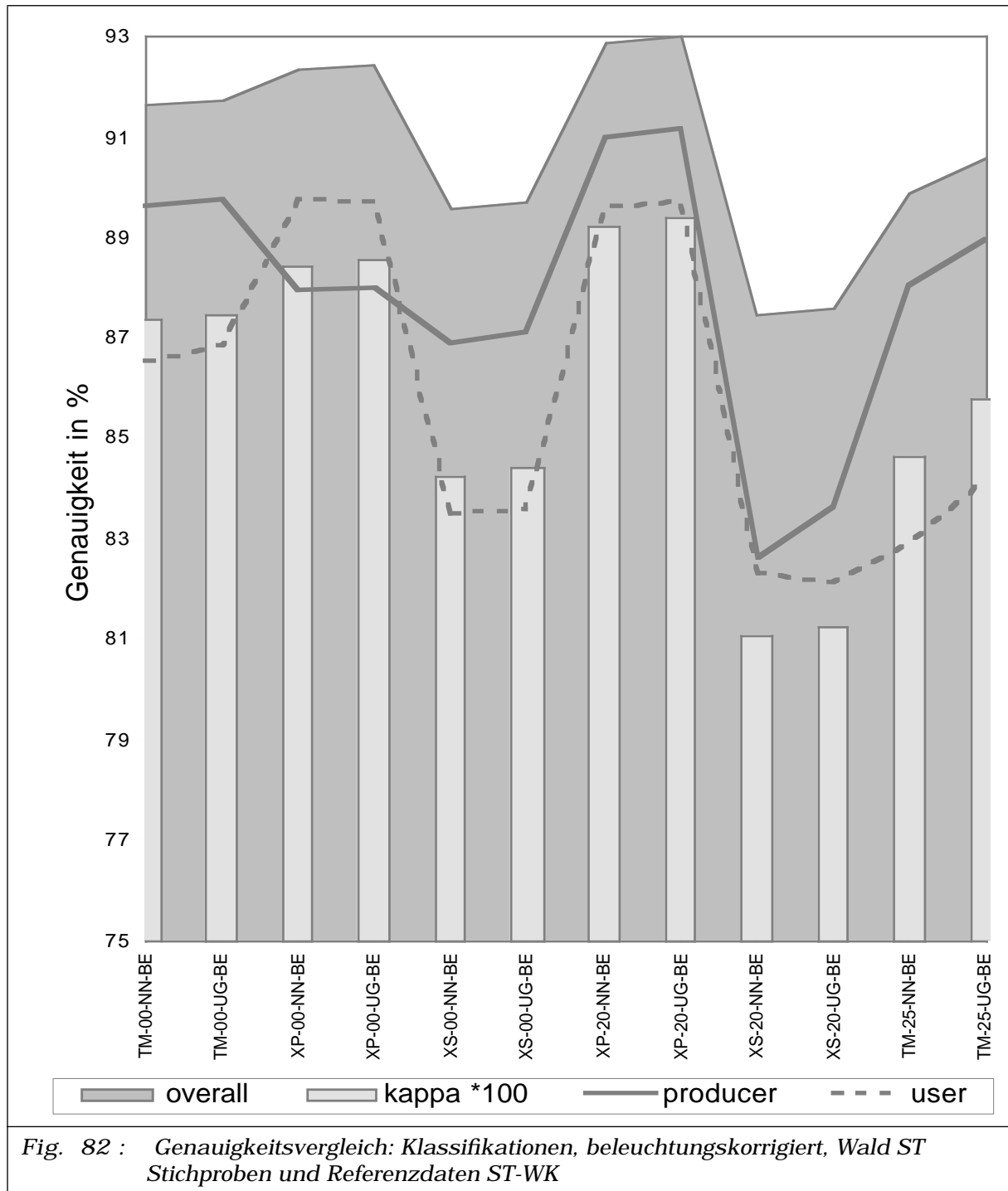
Die Beleuchtungskorrektur wurde spezifisch auf das Messobjekt Wald angewendet. Damit ist in allen Fällen eine deutliche Verbesserung der waldspezifischen 'user accuracy' verbunden. Die Beleuchtungskorrektur hat aber auch ihren Einfluss auf die Restgebiete, die nicht korrekt korrigiert werden. Es gibt mittlerweile gute Beleuchtungskorrekturalgorithmen, die objektunabhängig arbeiten, aber einen größeren Rechenaufwand erfordern [Sandmeier St., 1995]. Zukünftige Arbeiten werden, sofern es die Datenlage erlaubt, auf sie zurückgreifen. Inwieweit sie aber das Resultat signifikant verbessern können, muss in weiteren Untersuchungen überprüft werden.

5 - 4.5 Einfluss der Resamplingmethode in allen Datensätzen

beste Klassifikationen	XS-20		XP-20		TM-25		XS-00		XP-00		TM-00	
Steigerung in %	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald	kappa	user wald
Einfluss der Resamplingmethode: nach UG	0.5	0.5	0.2	0	1	1-8	-	-	-	-	-	-

Bei der Georeferenzierung der Satellitendaten in ihre geometrischen Originalauflösungen (10m, 20m und 25m) wurden zwei verschiedenen Resamplingmethoden getestet. Die umgebungsbasierte Methode (bilineare Interpolation) führt zu einem besseren Klassifikationsergebnis als die 'nearest neighbour' Methode. Die Genauigkeitssteigerungen sind nur beschränkt signifikant. Eine generelle Tendenz zur Verbesserung konnte in allen Datensätzen in Originalauflösung festgestellt werden. Daher ist die umgebungsbasierte Resamplingmethode im Verarbeitungsprozess zu empfehlen. [Fig - 82] zeigt den Einfluss der Resamplingmethode. Insbesondere für Landsat-TM-Daten mit 25m Auflösung ist die Verbesserung bemerkbar.

Die Datensätze mit einer geometrischen Auflösung von 100m wurden durch Skalierung der georeferenzierten Originalauflösung berechnet. Dieser Zusammenfassungsschritt von mehreren Bildelementen lässt erwartungsgemäss den Einfluss des Resamplings verschwinden.



Daher ist für 100m Auflösung durch Skalierung die Art der Resamplingmethode nicht entscheidend. Eine direkte Georeferenzierung der Rohdaten auf 100m Auflösung ist mit den besprochenen Resamplingmethoden unvernünftig. Der Wert eines Zielelementes wird nicht aus allen Rohelementen berechnet, die zur

Signatur etwas beitragen müssten. Ein Resamplingsalgorithmus, der die gesamte Bodenfläche für das Ziel-element in den Rohdaten berücksichtigen würde, könnte eine Verbesserung bringen.

5 - 5 EMPFEHLUNG FÜR EINE WALDFLÄCHENKLASSIFIKATION

Die folgende Empfehlung für eine Waldflächenklassifikation in der Schweiz und dem angrenzenden Ausland ist die Quintessenz der beschriebenen Untersuchungen. Die Klassifikation soll ökonomisch sinnvoll sein. Datenkosten, Aufwand für die Vorverarbeitung, Beschaffung von Referenzdaten und die Arbeitszeit sollen in einem vernünftigen Verhältnis zur erreichten Genauigkeit, bzw. der Genauigkeitssteigerung sein. Die geometrische Auflösung soll einerseits für regionale Studien im Bereich 20m bis 25m betragen, andererseits für nationale Untersuchungen, welche in die internationalen Kartierungen eingebunden werden sollen, 100m Rasterweite betragen. Die Waldfläche entspricht in dieser Empfehlung der bestockten Fläche. Eingeschlossen ist hier sowohl dichte Strauchvegetation, wie auch der eigentliche Wald.

5 - 5.1 Datengrundlagen

Satellitendaten: Aus Kostengründen sind Landsat-TM-Daten vorzuziehen. Sie sollten möglichst wolkenfrei und ohne Dunstbeeinflussung sein. Das Aufnahmedatum ist in die Zeit der grössten Entwicklung der Bäume zu legen, d.h. in die Monate Juni bis August. Dies auch infolge des optimal hohen Sonnenstandes.

Digitales Geländemodell: Ein digitales Geländemodell ist für die Georeferenzierung und die Beleuchtungskorrektur zwingend. Die Maschenweite für die Georeferenzierung sollte mindestens den Satellitendaten entsprechen. Für die Beleuchtungskorrektur ist wenn möglich ein höher aufgelöstes Modell zu verwenden. Die DHM25 Modelle der L+T entsprechen diesen Anforderungen nicht vollumfänglich.

Referenzdaten: Als *Stichprobe* sind für die Objekt-klassen Wald, Nichtwald und Wasser repräsentative

Gebiete zu erfassen, die mindestens 5% des Untersuchungsgebietes abdecken. Die Farbauszüge der Landeskarten 1:25'000 genügen diesen Ansprüchen.

Zur Korrektur des *Beleuchtungseinflusses* ist eine signifikante Waldflächenstichprobe notwendig, die den Wald in allen vorkommenden Expositionen und Hangneigungen umfasst. Entweder werden die Gebiete direkt in den Satellitendaten bezeichnet, oder man verwendet wiederum die Landeskartenauszüge.

Abdeckmasken sind für die Stichprobendefinition notwendig wenn Wolken (und Wolkenschatten), Dunst, Kondensstreifen und grosse Schlagschattengebiete die Daten beeinflussen. In den Referenzdaten finden nur Abdeckmasken für atmosphärische Störungen Verwendung.

Für die *Genauigkeitsanalyse* der Klassifikation ist für eine Gesamtbeurteilung ein flächendeckender Waldflächendatensatz notwendig. Die Verwendung des Grünauszuges der Landeskarte spiegelt eine bis zu 10% zu geringe Genauigkeit wieder, da deren Definition und Erstellung mit Fehlern behaftet ist und nicht der Aufnahmecharakteristik des Satellitensystems entspricht. Flächendeckend über die ganze Schweiz sind zur Zeit keine weiteren Waldflächendatensätze verfügbar. Eine auf die Satellitendaten abgestimmte Neuinterpretation der bestockten Fläche ist zu teuer und zeitintensiv.

Datenvorverarbeitung: Die Landsat-TM-Daten sind einer *Qualitätsanalyse* zu unterziehen. Doppelte Bildzeilen sind zu eliminieren. Redundante Kolonneninformation oder Störpixel sind wenn möglich zu kennzeichnen und in der Auswertung speziell zu berücksichtigen.

Die Satellitendaten müssen mittels Passpunktmethode und unter Berücksichtigung der topographiebedingten Lageversetzung in ein einheitliches Referenzsystem *georeferenziert* werden. Der verwendete *Resamplingsalgorithmus* sollte umgebungsbasiert (z.Bsp. bilinear) erfolgen, wenn die Rohauflösung etwa der Zielauflösung entspricht. Für die Klassifikation auf 100m sind die Landsat-TM-Daten zuerst auf 25m bis 30m zu referenzieren und anschliessend mittels flächenbasierter Skalierung auf 100m zu bringen. Die verwendeten Passpunkte sollten möglichst homogen über die Szene, bzw. den Bildausschnitt verteilt

sein. Eine dichte Passpunktbesetzung erleichtert das Auffinden von Instabilitäten des Aufnahmesystems.

Liegen die Referenzdatensätze in Rasterform vor, so sind sie flächenbasiert nach dem Dominanzprinzip in die Arbeitsauflösung zu *skalieren*. Liegen sie in vektorieller Form vor, so erfolgt zuerst eine Vektor-Raster Konversion in eine Maschenweite, die einerseits den lokalen Strukturen des Messobjekts gerecht werden kann (ca. 5-15m für den Wald in Beckenried), andererseits darf die Rasterweite kein Teiler der Ziel-rasterweite (z.Bsp. 20m für 100m Pixel) sein. Diese Bedingung ist notwendig, da die Daten anschliessend flächenbasiert skaliert werden müssen und man die Binärisierung nach dem Dominanzprinzip nicht vollziehen kann (50% Niveau).

Klassifikation: Die eigentliche *Klassifikation* erfolgt mit einem automatisierten PPD-Verfahren. Die Bestimmung der Grenzwerte wird dem Interpreten abgenommen und es erfolgt ein automatischer Ausgleich der Stichprobengrössen. Die *Beurteilung* der Klassifikationsgüte sollte für die Gesamtklassifikation mit dem 'kappa'-Koeffizienten erfolgen. Dieses Mass ist über verschiedene Gebiete und Klassifikationen direkt vergleichbar. Für die einzelnen Objektklassen stellen die 'user accuracy', die 'producer accuracy' und der 'inclass coefficient' die geeigneten Überprüfungsmaße dar. Die Aussagen zur Güte müssen immer mit dem Hinweis auf die Art und Qualität der Referenzdaten relativiert werden. Die visuelle Überprüfung einzelner Problemgebiete kann einen grossen Teil der Fehlinterpretation erklären.

KAPITEL 6 Anwendung der Methode im Kanton Zürich

6 - 1 AUFGABENSTELLUNG

Im Frühjahr 1995 wurde der Autor vom Bund beauftragt, eine Waldflächen- und Waldbestandeskartierung im Gebiet des Kantons Zürich herzustellen. Dies bot eine gute Gelegenheit, die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode zur Waldflächenklassifikation an einem ersten operationellen Beispiel auf ihre Anwendbarkeit zu überprüfen. In den folgenden Kapiteln wird das Untersuchungsgebiet kurz vorgestellt. Anschliessend wird die Datenlage für Satellitenbilder und Referenzdaten erläutert. Erste Klassifikationsergebnisse werden vorgestellt und analysiert.

6 - 2 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das zu klassierende Gebiet umfasst 12 Kartenblätter 1:25'000, die beinahe den ganzen Kanton Zürich, sowie Teile der angrenzenden Kantone Thurgau, St.Gallen, Schwyz, Zug, Aargau, Schaffhausen und von Deutschland abdecken. Die Kartenblattnummern sind: 1051 Eglisau, 1052 Andelfingen, 1053 Frauenfeld, 1071 Bülach, 1072 Winterthur, 1073 Wil, 1091 Zürich,

1092 Uster, 1093 Hörnli, 1111 Albis, 1112 Stäfa und 1113 Ricken. Die Begrenzungen des 48km * 52,5km grossen Gebietes sind mit folgenden Landeskoordinaten gegeben: 672'500/278'000, 725'000/230'000. Das Gebiet gehört geographisch zum nordöstlichsten Mittelland.

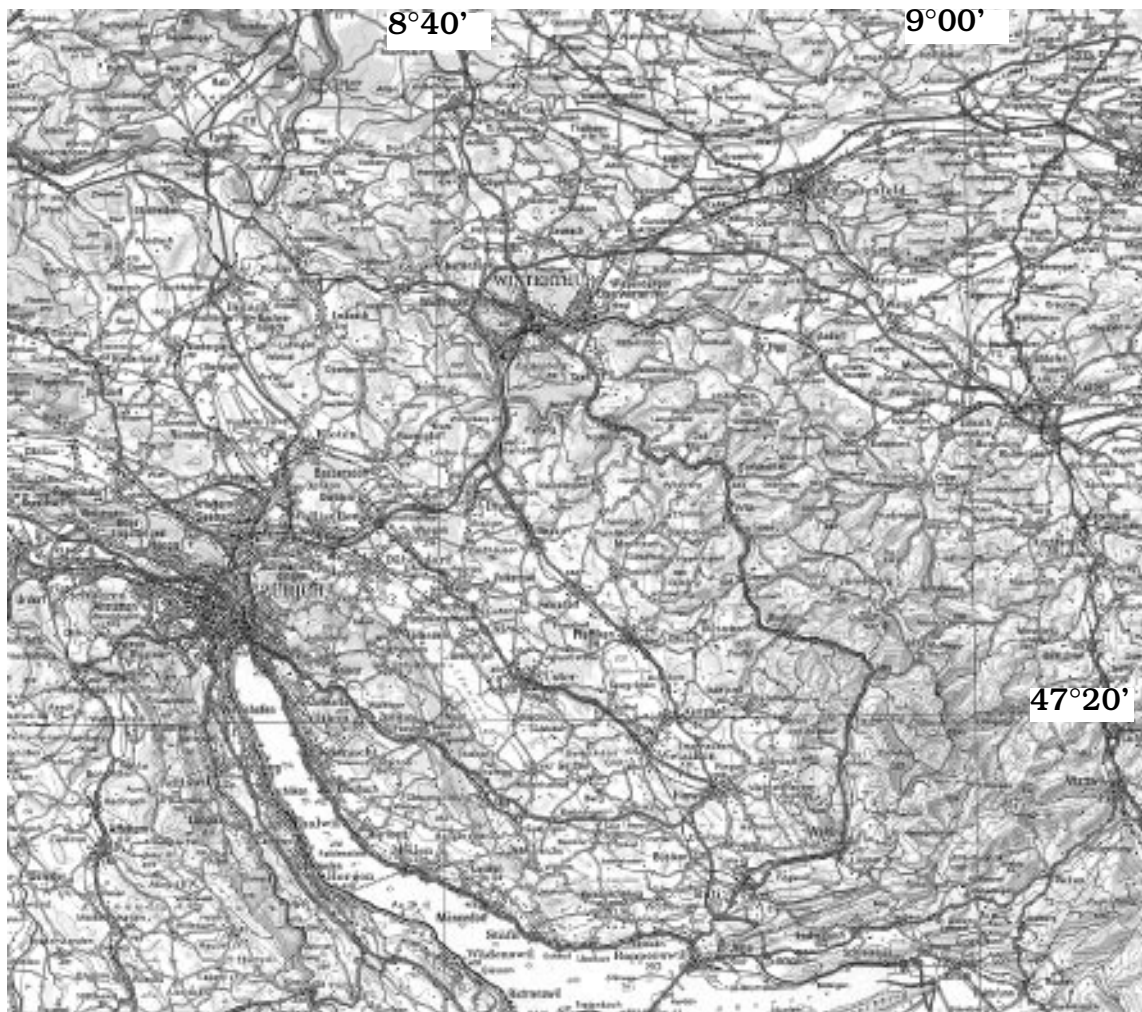


Fig. 83 : Das Untersuchungsgebiet Kanton Zürich
Kartengrundlage LK 1:300'000, [© Bewilligung: L+T, 1996]

Rund 4% des Untersuchungsgebietes umfassen Wasserflächen. Dominanteste Gewässer sind der Zürichsee im Süden, der Greifensee und Pfäffikersee in der Bildmitte und die beiden Flüsse Thur und Rhein im Nordteil. 29% des Gebietes sind bewaldet. Dominierend sind Buchenwaldgesellschaften. Vereinzelt findet man Nadelholzbestände, die vorwiegend anthropoge-

nen Ursprung haben. Die restlichen 67% des Untersuchungsgebietes bestehen vorwiegend aus landwirtschaftlichem Gebiet und Siedlungen. Wichtigste Agglomerationen sind Zürich in der südwestlichen Ecke, sowie Winterthur und Frauenfeld im Nordteil.

Die topographischen Verhältnisse sind geprägt durch das glazial beeinflusste Molassebecken des nördlichen Alpenvorlandes. Die höchsten Erhebungen sind im südöstlichen Teil mit dem rund 1300m hohen 'Hörnli' zu finden. Tiefster Punkt mit 330m.ü.M. stellt das Rheinniveau bei Hohentengen in der nordwestlichen Ecke dar.

Die geometrische Arbeitsauflösung für das Untersuchungsgebiet wurde auf 25m festgelegt.

6 - 3 DATENGRUNDLAGEN

6 - 3.1 Satellitendaten

Wie in der Klassifikationsmethode vorgeschlagen, erfolgen die Auswertungen mit Landsat-TM-Daten. Damit auch die Laub- und Nadelbaumproblematik besser untersucht werden kann, wurde aus dem Jahre 1990 eine Sommer- und eine Winterszene (Landsat Referenznummer 194/27) ausgewählt.

Die *Sommerszene* [Fig - 84] datiert vom 2. August 1990, 09:30h. Die Flughöhe betrug 712.2 km. Die Aufnahme ist wolkenfrei mit geringster Dunstbeeinflussung. Es konnten keine Detektorausfälle und fehlende Bildelemente gefunden werden.

Die Winterszene datiert vom 7. Februar 1990, 09:32h. Die Flughöhe betrug ebenfalls 712.2km. Das gesamte abgedeckte Gebiet ist schneebedeckt. Auf den Baumkronen findet man aber keinen Schnee, sodass sie als ideal für die Diskriminierung des Waldes erachtet wurde. Das Gebiet um den Bodensee ist mit einer Nebeldecke überzogen, beeinflusst aber das Testgebiet nur in der nordöstlichsten Bildecke. Gebiete unterhalb 700m / 800m.ü.M. sind durch einen leichten Dunstschleier beeinflusst. Die höheren Lagen sind frei von direkt ersichtlichen atmosphärischen Störungen

Beide Datensätze wurden von der Empfangsstation der ESA/ESRIN in Frascati, Italien auf Level 05 systemkorrigiert.

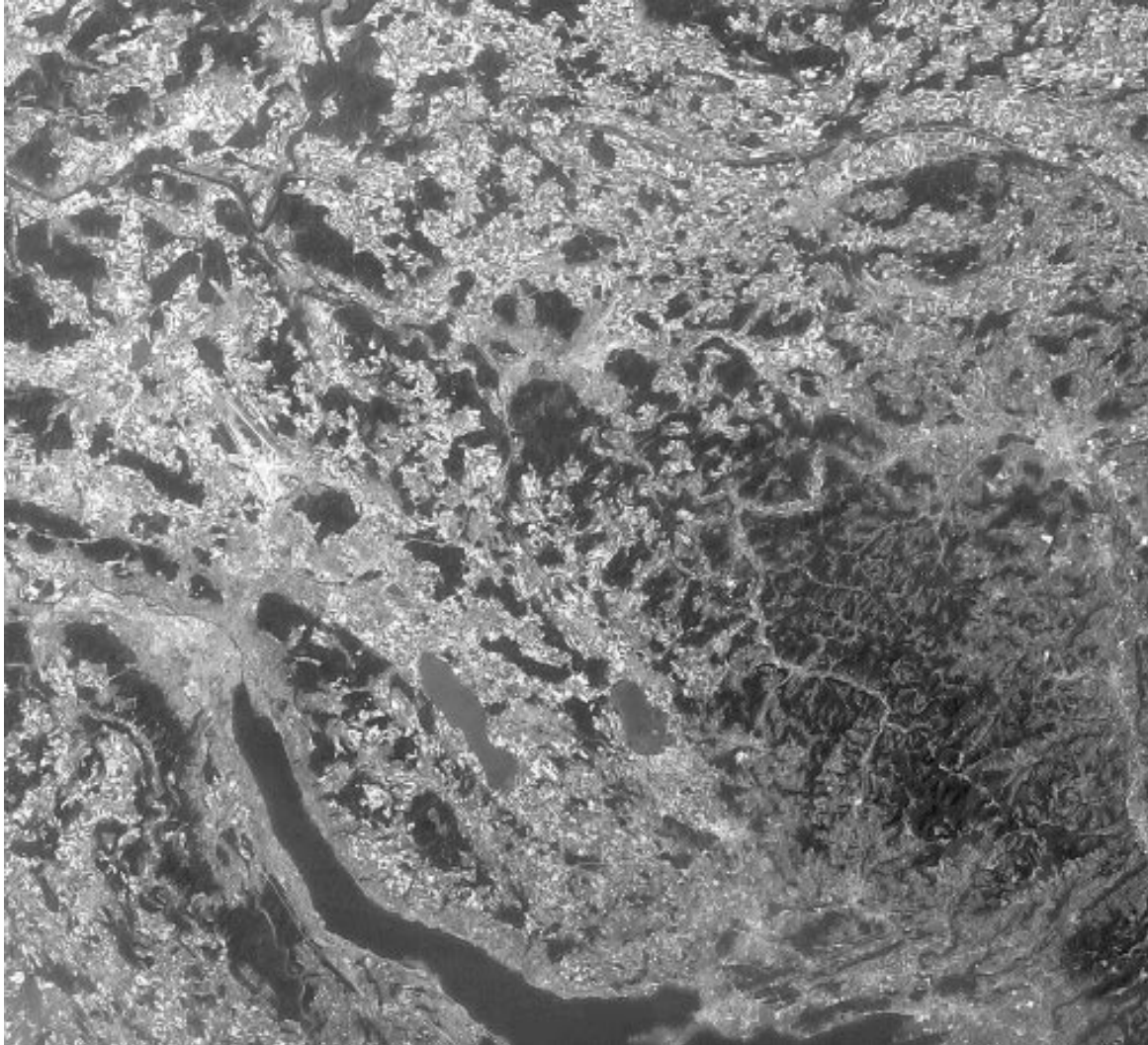


Fig. 84 : Landsat-TM Szene, 2.8.1990, Kanal 3, Testgebiet Kanton Zürich

6 - 3.2 Digitales Geländemodell und Derivate

Zur Georeferenzierung der Satellitendaten und für die Beleuchtungskorrektur wurde das digitale Geländemodell DHM25 über alle 12 Kartenblätter verwendet. Die *Sommerszene* wurde mit einem Sonnenzenitwinkel von 38.1° und einem Sonnenazimutwinkel von 129.3° beleuchtet. Dabei konnten 1842 Eigenschatten-

pixel (0.04% des Untersuchungsgebietes) beobachtet werden. Die *Winterszene*, mit einem Sonnenzenitwinkel von 69.0° und einem Azimutwinkel von 147.2° , wird bedeutend flacher beleuchtet. Daraus resultieren 64476 Eigenschattenpixel (1.6% des Untersuchungsgebietes).

In der gesamten Sommerszene konnten nur 13 Bildelemente mit Schlagschatten ermittelt werden. Eine besondere Berücksichtigung dieser Pixel in den Stichproben ist daher nicht notwendig. In der Winterszene hingegen wurden 1.63% des Untersuchungsgebietes (95727 Pixel) als Schlagschatten definiert. Sie wurden in den Stichproben ausmaskiert.

6 - 3.3 Bodenreferenzdaten

Die Bodenreferenzdaten für die Objektklassen Wald, Nichtwald und Wasser wurden ab der digitalen Pixelkarte (PK25), dem Grünton-, dem Blautonauszug sowie dem Gewässerlinienauszug generiert. Die digitale Pixelkarte basiert auf den Landeskarten 1:25'000. Die Originalauflösung dieser Rasterdaten beträgt 1.25m. Sie wurden mittels flächenbasierter Skalierung auf die Arbeitsauflösung der Satellitendaten von $25m * 25m$ umgerechnet. Elemente des Gewässerlinienauszuges, die nicht verwendbar sind (bathymetrische Tiefenkurven, Beschriftungen von Gewässern, Strömungssignaturen etc.) wurden am Bildschirm interaktiv eliminiert.

Die Verwendung der Masken der einzelnen Objektklassen als Stichproben erfolgte nach deren Erosion um einen Saum von 2 Randpixeln, damit die Mischpixelproblematik an Objektübergängen etwas vermieden werden konnte. Zur Verifikation wurden die unveränderten Masken verwendet.

6 - 4 VORVERARBEITUNG

6 - 4.1 Geometrische Korrekturen

In den Satellitendaten wurden redundante, doppelte Bildzeilen eliminiert. Ebenso wurden Störpixel durch Nachbarschaftsinterpolation ersetzt und das auftretende Banding korrigiert. Die Daten wurden im

Rahmen eines anderen Projektes mittels Passpunkt-
methode affin auf die Landeskartengeometrie referen-
ziert. Topographisch bedingte Verzerrungen konnten
mit Hilfe des digitalen Geländemodells eliminiert wer-
den. Für das Resampling wurde die umgebungsba-
sierte 'cubic convolution' Methode [Kapitel: 'cubic
convolution', Seite 156] verwendet. Nur für den Ther-
malkanal (Kanal 6) fand die bilineare Methode Verwen-
dung, da die Pixelgrösse in diesem Falle 120m beträt.
Die Lokalisationsgenauigkeit der Bildelemente liegt
im Bereich einer halben Pixelposition. Eine visuelle
Genauigkeitsüberprüfung konnten keine systemati-
schen Fehler in der Georeferenzierung feststellen.

6 - 4.2 Beleuchtungskorrektur

Alle Kanäle wurden spezifisch auf den Wald
beleuchtungskorrigiert. Die angewendete Methode ist
entsprechend den Empfehlungen die semi-empirische
C-Korrektur, basierend auf den Regressionsparame-
tern des Gebietes in der Waldmaske.

6 - 5 KLASSIFIKATION

Das automatisierte PPD Klassifikationsverfahren
wurde mit allen 14 zur Verfügung stehenden, beleuch-
tungskorrigierten Satellitenkanälen und den Stichpro-
benmasken über das gesamte Gebiet für die Klassen
Wald, Nichtwald und Wasser angewendet. Zur Tren-
nung der Klassen wählte der automatisierte PPD die
Kanäle 4,5 und 7 der Sommerszene aus. [Tab - 33]
zeigt die Trennkanäle der Klassifikation. Die Winter-
daten fanden in der Waldflächenbestimmung keine
Verwendung.

Trennung der Klassen	Kanal	Trennbarkeit
Wasser und Wald	4 Sommer	96%
Wasser und Nichtwald	5 Sommer	98%
Wald und Nichtwald	7 Sommer	87%

Tabelle 33: Kanalselektion zur Trennung der Objektklassen

Für einen Vergleich mit den Klassifikationen im Gebiet Beckenried, wurde zusätzlich ein Klassifikationsversuch nur mit den Kanälen 2,4 und 5 durchgeführt. Die Trennbarkeiten der Objektklassen sind in [Tab - 34] aufgeführt.

Trennung der Klassen	Kanal	Trennbarkeit
Wasser und Wald	4 Sommer	96%
Wasser und Nichtwald	5 Sommer	98%
Wald und Nichtwald	2 Sommer	84%

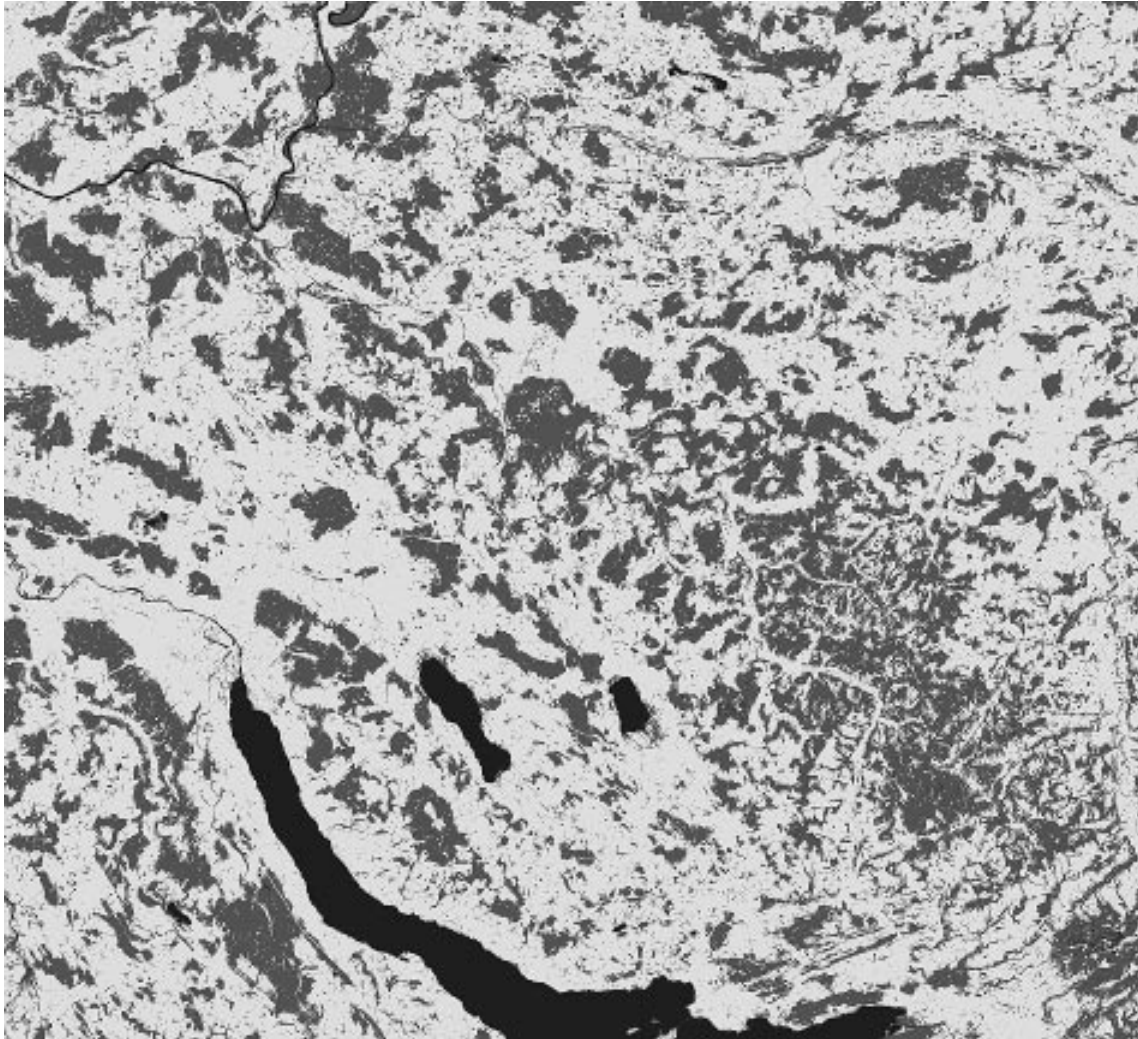
Tabelle 34: Kanalselektion zur Trennung der Objektklassen, nur Kanäle 2,4,5

Die Genauigkeitsüberprüfung erfolgte mit den unveränderten Referenzdaten. Die Klassifikation mit den Kanälen 4,5,7 weist einen etwas höheren 'kappa' Koeffizienten auf. Insbesondere die bessere waldspezifische 'user accuracy', d.h. das Mass für die Klassifikationssicherheit der als Wald ausgeschiedenen Bildelemente, trägt zum besseren Resultat bei.

erreichte Genauigkeiten	'producer' Wald	'user' Wald	'overall'	'kappa'
Klassifikation Kanal 4,5,7	90.13%	79.79%	90.60%	0.7791
Klassifikation Kanal 2,4,5	91.91%	73.58%	88.19%	0.7316

Tabelle 35: Genauigkeiten der Klassifikation, Testgebiet Kanton Zürich

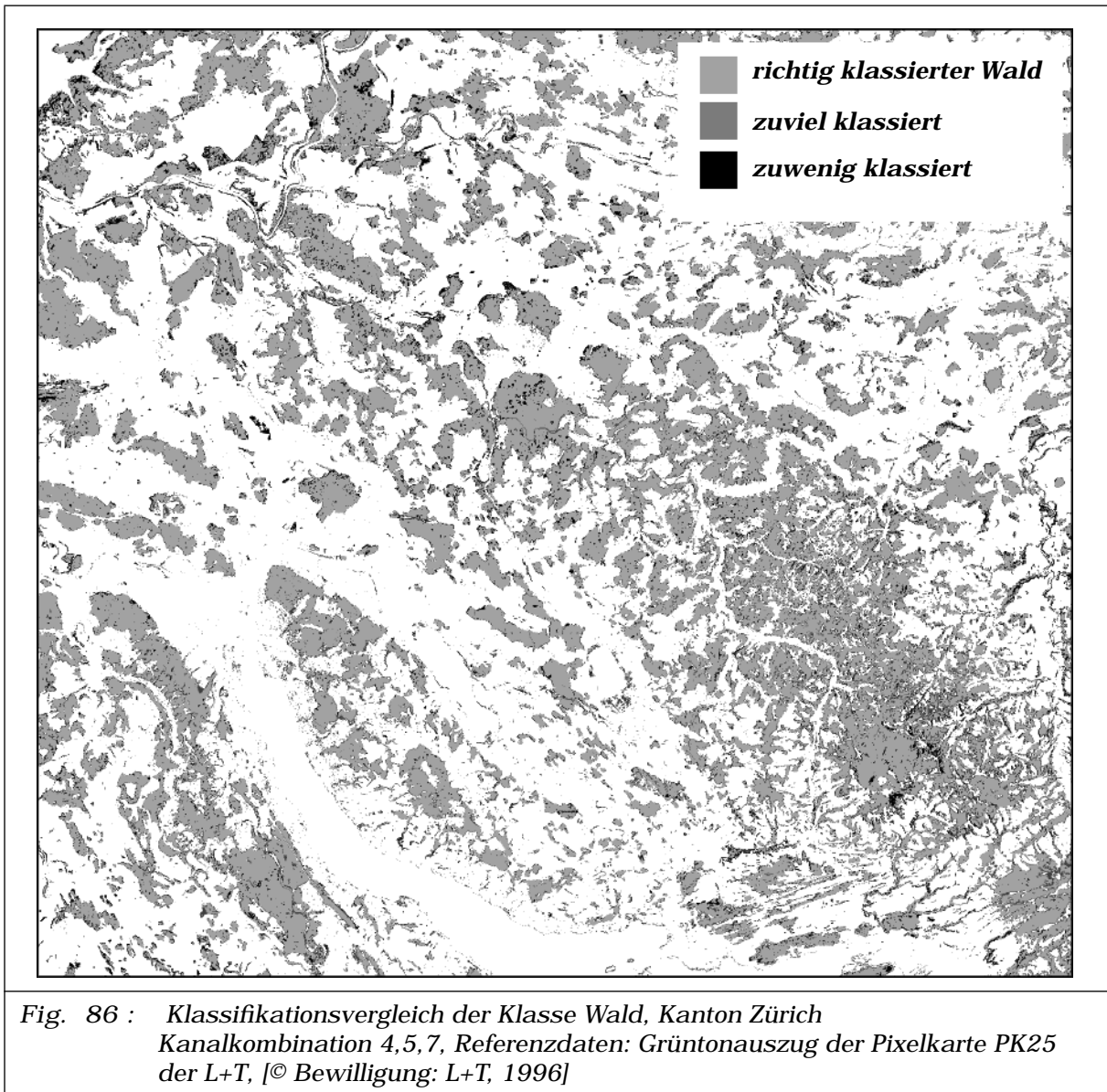
Im Vergleich mit der Waldflächenklassifikation im Testgebiet Beckenried [Tab - 24, Seite 217] liegen der 'kappa' Koeffizient und die waldspezifischen Genauigkeitsmasse im Bereich der dort erhaltenen, mittleren Genauigkeiten. Die 'overall accuracy' entspricht sogar dem besten Resultat in Beckenried. Die vorgeschlagene Klassifikationsmethode [5 - 5] muss daher im zwölf mal grösseren Gebiet des Kanton Zürichs als anwendbar bezeichnet werden. Die Verwendung der Kanalkombination 2,4,5 ist brauchbar, aber nicht optimal. [Fig - 85] zeigt graphisch das Klassifikationsergebnis mit der Kanalkombination 4,5,7.



*Fig. 85 : Klassifikationsergebnis Kanton Zürich
Kanalkombination 4,5,7
Stichprobendaten: Pixelkarte PK25 der L+T, [© Bewilligung: L+T, 1996]*

Die Überprüfung der Klassifikationsgenauigkeit für den Wald ist aus [Fig - 86] zu entnehmen. Die Referenzdaten nach der Landeskarte sind, wie im Testgebiet Beckenried schon erläutert, nicht den Systembedingungen der Satellitendaten entsprechend. Gerade im dicht besiedelten Gebiet des Kantons Zürich, führt die durch die Verkehrs- und Gebäudesignaturen verdrängte Waldfläche in der Landeskarte, die für Fernerkundung nicht ganz adäquate Waldflächendefinition (offener Wald, Einzelbaumgruppen, Baumschulen, Sumpfbiete etc.) sowie die

starke Bewirtschaftung der Wälder zu einigen 'zuviel' klassierten Waldgebieten.



Zuwenig Wald wurde unter anderem im sehr kleinparzelligen Gebiet des Hörnlis klassiert. Der Schattenwurf der engen Täler verhindert eine saubere spektrale Trennung der Objektklassen. In diesem Gebiet ist auch auffallend, dass die Landeskarte den Wald über die engen Täler und Gräben sehr stark generalisiert, obwohl der Waldbestand unterbrochen und feingliedrig ist. Die zuwenig klassierten Waldgebiete im Nordwesten sind auf die Mischpixelproblematik, verursacht

durch die vielen Flussläufe, zurückzuführen. Einerseits sind diese Flüsse stellenweise kaum 25m breit und werden mit der 25m Rasterauflösung nicht homogen detektiert. Andererseits werden diese Gewässer oft von Bäumen und Sträuchern gesäumt. Homogene Bildelemente sind kaum zu finden.

Nach den Erfahrungswerten im Testgebiet Beckenried, welche sicherlich unter den zu erwartenden Werten für den Kanton Zürich liegen, kann mit Sicherheit angenommen werden, dass die vorliegende Waldklassifikation die Waldfläche um einige Prozent (geschätzt etwa 8-10%) besser repräsentiert, als der Vergleich mit der Landeskarte vorspiegelt. Die waldspezifische 'user accuracy' käme in einen Bereich von 90% zu liegen. Der 'kappa' Koeffizient, der infolge der geringen Wasserfläche im Kanton Zürich vorwiegend von der Trennbarkeit der Wald- und der Nichtwaldfläche abhängt, kann dann im Bereich von 0.85 bis 0.90 erwartet werden. Eine Bestätigung dieser Vermutung kann nur durch den Einsatz verbesserter Bodenreferenzen erhalten werden. Der Aufwand ist aber enorm und ökonomisch nicht vertretbar.

Die Betrachtungen über die Zuverlässigkeit der Referenzdaten bekräftigen zusätzlich, dass der in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene Ansatz zur Waldflächenklassifikation in der Schweiz mit guter Resultaterwartung anwendbar ist. Weiterführende Untersuchungen und Klassifikationsvergleiche im Testgebiet Kanton Zürich sind [Kneubühler M., 1996] zu entnehmen.

KAPITEL 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass die Waldfläche in der Schweiz und dem angrenzenden Ausland mit einer Sicherheit von über 90% erfasst und damit auch überwacht werden können. Die vorgeschlagene Methode kann einen wichtigen Input für ein europäisches Waldinformationssystem bedeuten. Rasterauflösungen im Bereich von 25m als auch 100m haben sich als ein Standard in einer gesamteuropäischen Datenbank herauskristallisiert. Für diese Auflösungen wurde ein ökonomisch vertretbarer Weg vorgeschlagen, der eine rasche, zielstrebige Auswertung erlaubt. Die erste operationelle Anwendung im Gebiet des Kantons Zürich, welche innerhalb von drei Arbeitswochen zur Klassifikation führte, bewies einerseits die Zuverlässigkeit der Methode, andererseits offenbarte sie die Möglichkeit, die gesamtschweizerische Waldfläche schnell zu klassieren und damit in kurzen Zeitabständen zu überwachen. Die Erfahrungen zeigten, dass eine Klassifikation der ganzen Schweiz in atmosphärisch homogenen Teilregionen erfolgen muss. Gleichzeitig ist der regionalen Waldausprägung Rechnung zu tragen. Die Grösse der auswertbaren Teilregionen dürfte der Fläche des Untersuchungsgebietes 'Kanton Zürich' entsprechen (12 Kartenblätter 1:25'000 die etwa 5% der Schweiz abdecken). Berücksichtigt man

den Zeitgewinn infolge der simultanen Georeferenzierung ganzer Satellitenszenen für mehrere Teilregionen, so reduziert sich der Zeitaufwand für die Waldflächenklassifikation einer Teilregion auf etwa zwei Arbeitswochen. Die Waldfläche der ganzen Schweiz könnte demnach in etwas mehr als 40 Arbeitswochen erfasst werden.

Das Spannungsverhältnis zwischen den ständig gesteigerten geometrischen Auflösungen neuer Sensorsysteme und der Identifizierbarkeit des Messobjektes Wald offenbarte sich in den Klassifikationsanalysen der hochauflösenden Satellitensysteme SPOT und Landsat-TM mit 20m respektive 25m Auflösung. Die Homogenität des Waldes in der Schweiz ist unter 25m Auflösung für fernerkundliche Spektralmessungen nicht oder nur sehr bedingt gewährleistet. Die Genauigkeitsunterschiede sind sehr ausgeprägt. Bei Klassierungen auf skalierten Satellitendaten mit 100m geometrischer Auflösung erreichen beide Systeme einen optimalen Grenzwert in der Genauigkeit. Meines Erachtens sollten nicht zu hohe Erwartungen in die geometrische Auflösung von optische Fernerkundungsdaten gesetzt werden. Eine Landsat-TM Klassifikation auf 25m Auflösung ist mit zuvielen Mischpixeleffekten und Zufälligkeiten behaftet. Der Einsatz dieser Sensoren für Klassifikationen in einer etwa viermal schlechteren Zielauflösung (100m) scheint gerechtfertigt. Die gleiche Aussage gilt entsprechend für die SPOT-Daten. Eine optimale Empfehlung zum Bau eines zukünftigen Sensors wird in bezug auf den Wald nicht mit der Forderung nach verbesserter geometrischer Auflösung enden. Vielmehr wird die Auflösung von Landsat-TM mit 25m-30m als genügend erachtet. Waldflächenklassifikationen aufgrund des spektralen Rückstreuerverhaltens sind objektbedingt aber nur ab 50m Zellengrösse an aufwärts sinnvoll. Neue Systeme könnten sich aber durch verbesserte spektrale Auflösung und stabilere Aufnahmesysteme (Zeilen oder Flächen CCD 'arrays') auszeichnen.

Der Vorverarbeitung der Satellitendaten ist in Zukunft grössere Beachtung zu schenken. Nur die Verwendung absoluter Rohdaten, ohne Systemkorrekturen, erlaubt es dem Interpreten, redundante Bildinformation zu erkennen und in der Auswertung zu

berücksichtigen. Die Absicht, in Zukunft Daten des geplanten Landsat-7 Satelliten nur noch in Rohform zusammen mit einem Algorithmus zur Systemkorrektur zu vertreiben, kommt dieser Forderung sehr entgegen. Da dem Datenbenutzer damit zwangsläufig auch der Zugang zu den immer genauer werdenden Hilfsdaten, welche für parametrische geometrische Korrekturen notwendig sind, gebnet wird, kann die Georeferenzierung mit der Zeit auch operationeller und weniger zeitaufwendig gestaltet werden. Statt Dutzender von Passpunkten sind nur noch einige wenige Punkte zur absoluten Referenzierung notwendig. Die parametrischen Methoden sind heute soweit ausgereift, dass sie ohne grossen Aufwand auf neue Systeme adaptiert werden können [Meyer P., 1994].

Radiometrische Korrekturen der Satellitendaten sind eine unabdingbare Voraussetzung für ein gutes Klassifikationsergebnis. Insbesondere die Korrektur von Beleuchtungseinflüssen ist in der topographisch rauhen Schweiz wichtig. Die vom Messobjekt abhängige semi-empirische C-Korrektur wird in zukünftigen Arbeiten von unabhängigen, physikalischen Verfahren abgelöst werden [Sandmeier St., 1995]. Nachbarschaftseffekte, Streulichteffekte etc. können dabei zusätzlich berücksichtigt werden und verbessern mit Sicherheit das Klassifikationsresultat. Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit zumeist atmosphärisch idealen Daten gemacht. In operationellen Anwendungen, besonders in der Waldflächenüberwachung, wird es immer wieder Jahre geben, in denen kein optimaler Datensatz zum phänologisch richtigen Sommerzeitpunkt registriert werden konnte. Atmosphärische Korrekturen, teilweise nach Subregionen unterschiedlich angewendet, müssen vorgenommen werden. Die Korrekturalgorithmen basieren zumeist auf radiometrischen Transfermodellen wie beispielsweise 6S [Vermote E., et al., 1994]. Das relativ dichte Netz von Wetterbeobachtungsstationen, wie es zur Zeit in der Schweiz installiert ist, kann flächendeckend einigermaßen ausreichend die notwendigen atmosphärischen Parameter zur Korrektur liefern. Die Bestrebung, dieses Netz infolge Sparmassnahmen in Zukunft auf wenige Stationen zu beschränken, kann der optischen Fernerkundung grosse Probleme bieten und sollte unbedingt verhindert werden.

Eine Waldflächenklassifikation ohne Genauigkeitsangabe hat nur eine geringe Aussagekraft. Der Vergleich mit der auf der Landeskarte ausgeschiedenen Waldfläche zeigt die unterschiedlichen Ansätze der Gewinnung von Waldflächeninformation auf. Die Klassifikationsergebnisse stimmen nur bedingt mit den in der Landeskarte ausgeschiedenen Waldgebieten überein. Die Waldflächendefinition der Landeskarte ist einerseits stark durch graphische Generalisierungs- und Verdrängungseffekte belastet. Andererseits entspricht die angewendete Definition des Waldes nicht den physikalischen Eigenschaften der Satellitensysteme. Die spektrale Erfassung der Waldfläche basiert auf dem dominanten Rückstreuverhalten der grünen Baumteile und wird zusätzlich durch die Dichte der Vegetation gesteuert. Einfach gesagt, erfasst der Satellitensensor bestockte Flächen mit einem relativ hohen Kronenschluss als Wald. Die Landeskarte unterscheidet aber auch offene Waldbestände, Obstanlagen, Hecken etc. mit speziellen Signaturen und stellt sie nicht als Flächenton dar. Die Landeskarte zeigt in den Untersuchungsgebieten bis zu 10% zu wenig Waldflächen relativ zu einer fernerkundlichen Anwendung. Wird dieser Unterschied berücksichtigt, so kann der Klassifikationsvergleich mit der Landeskarte trotzdem einen vernünftigen Anhaltspunkt für die Klassifikationsgüte liefern. Die Erstellung einer neuen Waldflächenreferenz durch beispielsweise analoge Satellitenbildinterpretation oder auf der Basis von Luftbildern ist zu kostenintensiv und zeitraubend, als dass sie gerechtfertigt wäre.

Bestehende Bodenreferenzdateien, welche in den Klassifikationsprozess oder die Genauigkeitsanalyse einfließen, liegen oftmals nicht in der Rasterauflösung des Arbeitsmassstabes vor. Besonders wenn sie in vektorieller Form sind, ist die Vektor-Raster Konversion und/oder Skalierung der Daten mit grosser Sorgfalt anzugehen. Die methodisch bedingt auftretenden Flächen- und Formänderungen können solche Ausmasse annehmen, dass sie das Resultat verfälschen. Je feingliedriger die Begrenzung des Messobjektes und seiner Verteilung, desto grösser wird dieser Effekt.

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass die Stichproben zur Signaturbestimmung der Messob-

jekte homogen sein und eine gewisse, repräsentative Pixelanzahl umfassen sollten. In der Schweiz können in kleinräumigen Gebieten vor allem Probleme mit genügend Wasserstichproben auftreten. Grossräumig sind keine Probleme zu erwarten. Die Waldfläche nach Landeskarte ist ein sehr grosszügiger Lieferant für Waldstichproben. Des weiteren sind die Bestandeskarten der Forstämter verfügbar. Trotzdem wird man für Überwachungszwecke sich auf gewisse Standardstichproben für einzelne Regionen beschränken müssen. Sie erlauben eine konsequent vergleichbare Klassifikation und mindern die Rechenzeit.

Zukünftige Arbeiten zielen in erster Linie auf die Erfassung der gesamtschweizerischen Waldfläche hin. Zur Zeit sind neben dem Gebiet des Kantons Zürich, Waldklassifikationen des Kantons Genf und der gesamten Nordostschweiz in Gange. Methodenverbesserungen besonders in der radiometrischen Korrektur werden sukzessive eingebunden.

In einer nächsten Phase wird eine Klassifikation des Juras, des Mittellandes und des Voralpenbereiches erfolgen, welche schliesslich in der Klassifikation der gesamten Schweiz, mit Zeitreihenanalysen gipfeln soll. Verbesserungen der Georeferenziermethode hin zu einer parametrischen Methode, der Einsatz weiterer und neuer Fernerkundungssysteme sowie die Erhöhung der Operationalisierbarkeit des ganzen Verarbeitungsprozesses stehen auf der zukünftigen Arbeitsliste.

Parallel dazu werden die Untersuchungen zur Waldbestandeskartierung, die Unterscheidung nach Nadelholzanteil, vorangetrieben. Sie stellen keinen Bestandteil der vorliegenden Arbeit dar, bilden aber einen Forschungsschwerpunkt vieler hier zitierter Arbeiten zum Thema Wald, welche an unserem Institut erstellt wurden.

KAPITEL 8 Literaturverzeichnis und Bewilligungen

8 - 1 LITERATURVERZEICHNIS

Affentranger C., 1993

Geocodierung von NOAA-AVHRR-Bildern; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich

Akça A., Zindel U., 1987

Zur Vorratsschätzung mit Hilfe von Luftbilddaten und Regressionsmodellen bei der Baumart Fichte; Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Nr. 158, Jhrg. 2/3, p. 109-115

Bachmann C., 1989

Der Einsatz von Landsat-TM Daten für Arealstatistische Zwecke; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich

Bähr H.-P., Vögtle T., 1991

Digitale Bildverarbeitung, Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung; 2. Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe

Banon G., Barrera J., 1989

Morphological filtering for striping correction of SPOT images; Photogrammetria No. 43, Amsterdam, pp.195-205

Bernstein R., Lotspiech J., Myers H., Kolsky H., Lees R., 1984

Analysis and Processing of Landsat-4 Sensor Data using Advanced Image Processing Techniques and Technologies; IEEE Transac-

tions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-22, No.3, pp. 192-221

Bitter P., 1990

Einbau von Landsat Thematic Mapper - Daten in ein Wald-Informationssystem; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich

Bundesamt für Landestopographie, 1987

Kartenblatt 1:25'000, Beckenried, Nummer 1171; Wabern, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landestopographie, 1993

Topografica: Interne Richtlinien für die Kartographie; Wabern, Bern, Schweiz

Bundesamt für Statistik, 1992

Die Bodennutzung der Schweiz: Arealstatistik 1979/1985, Kategorienkatalog; BFS, Sektion Raumnutzung, Bern, Schweiz

Castleman K., 1979

Measurement and Classification; Prentice-Hall Inc., London

CEOS, 1994

Committee on Earth Observation Satellites, 1994 CEOS Dossier, Satellite Missions; CEOS/ESA, France, Japan, USA

CNES SPOT Image, 1988 (a)

SPOT User's Handbook Vol.1; reference manual, edition 01, Toulouse France

CNES SPOT Image, 1988 (b)

SPOT User's Handbook Vol.2; reference manual, edition 01, Toulouse France

Curran P., 1985

Principles of remote sensing; Longman Publishers, London, New York

Curran P., 1994

Imaging Spectrometry - its present and future role in environmental research, in Hill, J., Mégier J. (Hrsg.): Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations, Euro Courses, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht

Darvishsefat A., 1995

Einsatz und Fusion von multisensoralen Satellitenbilddaten zur Erfassung von Waldinventuren; RSL, Remote Sensing Series Vol. 24, Dissertation; Geographisches Institut der Universität Zürich

- EAFV, 1988
Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986; Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV), Bericht Nr. 305, Birmensdorf, Schweiz
- Ehrler C., 1993
Einsatz von Satellitendaten für die Schweizerische Arealstatistik: Radiometrische und geometrische Grundlagen; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Eidenbenz Ch., 1988
Photogrammetrie und Fernerkundung als Informationsquelle zur Kartenherstellung; Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, Nr. 4
- Ellenberg H., Klötzli F., 1972
Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz; Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen EAFV, Birmensdorf, Schweiz, Vol. 48, Heft 4
- Enzensberger H. M., 1995
Kiosk; Gedichtband, Suhrkamp-Verlag, Zürich
- ESA, 1993
ISY Forest Map, Remote Sensing Forest Map of Europe; brochure and map, ESA/ESTEC, ISY Office, Noordwijk, the Netherlands
- European Community, 1993
Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe; Documents of the Conference 16-17 June, Helsinki, Ministry of Agriculture and Forestry of Finland, Conference Secretariat
- FAO, 1994
Yearbook Forest Products 1989-1994; Rome
- FAO, 1991
Protection of Land Resources: Deforestation; Prepcomm. UNCED, 2nd session, Doc. A/CONF.151/PC/27
- Fischer M., 1996
Digitale Waldklassifikation mit Landsat-TM Daten im Gebiet Balthal; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Frei U.; 1984
Geometrische Korrekturen von NOAA-AVHRR-Daten; Remote Sensing Series Vol. 8, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Fusco L., Frei U., Hsu A., 1985
Thematic Mapper: Operational Activities and Sensor Performance at ESA/Earthnet; Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. LI, No.9, p. 1299-1314

- Goodenough D., Deguise J.-C., Robson M., 1990
Multiple expert systems for using digital terrain models; Proceeding IGARSS'90, pp. 961
- Herkendell J., Pretzsch J., 1995
Die Wälder der Erde: Bestandesaufnahme und Perspektiven; Verlag C.H.Beck, München
- Hildebrandt G., 1976
Die spektralen Reflexionseigenschaften der Vegetation; Proceedings of XVI IUFRO World Congress, Oslo
- Hildebrandt G., 1993
Fernerkundung in der Forstwirtschaft; Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung ZPF, Nr. 4, Wichmann Verlage, Karlsruhe, pp. 135-138
- Hill J., 1993
High precision land cover mapping and inventory with multi-temporal earth observation satellite data: The Ardèche Experiment; Ph.D. Thesis, Joint Research Centre [JRC], ECSC-EEC-EAEC Brussels, Luxembourg
- Hoffmann H., Kirchhof W., 1989 (a)
Vergleichende reflexionsspektroskopische Vegetationsmessungen im Labor und Gelände an Rotbuchen und Fichtenzweigen, Teil I: Versuchsaufbau, Labormessungen, Modellierung; [DLR], -JB 552-08/89, Oberpfaffenhofen
- Hoffmann H., Kirchhof W., 1989 (b)
Vergleichende reflexionsspektroskopische Vegetationsmessungen im Labor und Gelände an Rotbuchen und Fichtenzweigen, Teil II: Geländemessungen, Vergleich mit Labordaten, Eignungstest verfügbarer Spektralbänder; [DLR] -JB 552-09/89, Oberpfaffenhofen
- Itten K., 1979
Grossräumige Inventuren mit Landsat-Erderkundungssatelliten in der Schweiz; Habilitationsschrift, Philosophische Fakultät II der Universität Zürich, Schweiz
- Itten K., Meyer P., Kellenberger T., Affentranger C., Leiss I., 1990
Mapping of swiss forests with NOAA-AVHRR: Report on Phase I; UNEP/GRID Report H/ISY/0733/BP/me. Remote Sensing Laboratories, Dept. of Geography, University of Zurich
- Itten K., Meyer P., Kellenberger T., Leu R., Sandmeier St., Bitter P., Seidel K., 1992
Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of alpine regions; Remote Sensing Series Vol. 18, Remote Sensing Laboratories, Dept. of Geography, University of Zurich

- Itten K., Meyer P., Kellenberger T., Leu R., Sandmeier St., Bitter P., Seidel K., 1995
Digital forest mapping of alpine regions: Correction of the impact of topography and atmosphere; in 'Satellite Remote Sensing Forest Atlas of Europe', Beckel L. (Hrsg.), Justus Perthes Verlag Gotha, 1. Auflage, pp. 60-61
- IUFRO, 1995
IUFRO World Series Vol.5, IUFRO International guidelines for forest monitoring; Päivinen R., Lund H., Poso S., Zawila-Niedzwiecki T.; IUFRO Working Party S4.02-05, Vienna, Austria
- Kadro A., 1981
Untersuchung der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetationsbestände; Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg i.Br., Deutschland
- Kellenberger T., 1989
Geometrische Korrekturen von SPOT-1 Satellitendaten; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Kellenberger T., 1991
Programmdokumentation Dipix-Task 'KT' / 'KTB'; interner Bericht, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Kellenberger T., Sandmeier St., Itten K., 1994
Comparison of forest/non-forest classification in raw and geometrically corrected images of an illumination corrected SPOT data set; Proceedings of 6th International ISPRS Symposium on 'Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing', Val d'Isère, France, pp. 85-92
- Keller M., Itten K., Meyer P., Kellenberger T., Affentranger Ch., Leiss I., Bodmer H.-C., Seidel K., 1995
Forest Mapping in Switzerland Using Different Satellite Sensor Systems; in 'Satellite Remote Sensing Forest Atlas of Europe', Beckel L. (Hrsg.), Justus Perthes Verlag Gotha, 1. Auflage, pp. 226-229
- Kirby M., 1975
A solution of the geometric base problem in Landsat-1 (ERTS-1) multispectral scanner data by means of an affine Transformation and method of least squares; M.A. Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada
- Kirchhof W., 1990
The Application of Remote Sensing Techniques for Surveys on Forest Damage, a German Experiment; Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt [DLR], Institute for Optoelectronics, Weissling, Germany

- Kneizys F., Shettle E., Anderson G., Abrew L., Chetwynd J., Shelby E., Ballery W., 1990
Atmospheric transmittance/radiance: computer code LOWTRAN-7;
Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA
- Kneubühler M., 1996
Waldklassifikation im Kanton Zürich (Arbeitstitel); Diplomarbeit in
Vorbereitung, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Kölbl O., 1990
Utilisation de la Photogrammetrie pour la REMO, Vermessung,
Photogrammetrie und Kulturtechnik, Nr.9, pp. 480-484
- Konecny G., 1972
Geometrische Probleme der Fernerkundung; Bildmessung und
Luftbildwesen Nr. 4, pp.162-172
- Konecny G., Schuhr W., 1975
Digitale Entzerrung der Daten von Zeilenabtastern; Bildmessung
und Luftbildwesen Nr.4, pp. 135-143
- Konecny G., 1976
Mathematical Models and Procedures for the Geometric Restitution
of Remote Sensing Imagery; Invited Paper, XIII. congress of the
International Society for Photogrammetry, Helsinki, Finland
- Konecny G., 1995
Satelliten-Fernerkundung und Kartographie; GIS, Nummer 2,
pp.3-12
- Kramer J., 1994
Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions
and Sensors; second edition, Springer-Verlag, Berlin
- Kraus K., Schneider W., 1988
Fernerkundung; Band 1, Physikalische Grundlagen und Aufnah-
metechniken; Dümmler Verlag, Bonn
- Kraus K., Schneider W., 1988 (b)
Fernerkundung; Band 2, Auswertung photographischer und digi-
taler Bilder; Dümmler Verlag, Bonn
- Kuntz S., 1991
Anwendung von Satellitendaten zur Erfassung und Kartierung von
Sturmschäden; in Fernerkundung in der Forstwirtschaft, Oesten
G., Kuntz St., Gross C. (Hrsg.), Wichmann Verlag, Karlsruhe,
Deutschland. p. 124-134
- Landolt E., 1961
Unsere Alpenflora; Verlag des Schweizerischen Alpenklubs SAC
(ref. Glossar), Zollikon, Zürich

- Leiss I., 1991
Der Einsatz von NOAA_AVHRR-Wettersatellitendaten zur Erfassung des Waldes in gemässigten Zonen; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Leiss I., 1995
Einsatz von Satellitendaten für die Schweizerische Arealstatistik; Ergebnisse der Projektphase III; Projektbericht, Remote Sensing Laboratories, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Leiss I., Sandmeier St., Itten K., Kellenberger T., 1995
Improving Land Use Classification in Rugged Terrain Using Radiometric Corrections and a Possibility Based Classification Approach; Proceedings of IGARSS'95, Firenze, Italy, pp. 1924-1926
- Leiss I., Sandmeier St., Itten K., Kellenberger T., 1995 (b)
Use of Expert Knowledge and Possibility Theory in Land Use Classification; Proceedings of EARSeL 15th Symposium, Basel, Switzerland
- Leu R., 1991
Digitale Kartierung des Schweizer Waldes mit Landsat TM-Daten, Teil 2 :Atmosphärische Korrekturen und Klassifikation; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Liechty M., 1993
Waldinformationssystem Schweiz: Grundlagen zur Datenbankmodellierung von Fernerkundungsinformationen; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Lillesand T., Kiefer R., 1987
Remote Sensing and Image Interpretation; John Wiley & Sons, NewYork, Chichester, Brisbane, Toronto
- Maier M., 1994
Digitale Waldklassifikation mit Landsat-TM Daten im Gebiet Engadin/Zernez: Eine Untersuchung von Bodenreferenzdaten; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Merz U., 1990
Untersuchungen zur Nachführbarkeit der schweizerischen Landeskarte 1:50'000 mit Satellitenbildern in Gebieten des grenznahen Auslandes am Beispiel des Blattes 285 Domodossola; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Meyer P., 1990
Segmentierung und symbolische Beschreibung als Grundlage zur Klassifikation landwirtschaftlicher Kulturen in einem Multispektralscanner-Datensatz; RSL, Remote Sensing Series Vol. 16, Dissertation; Geographisches Institut der Universität Zürich

- Meyer P., 1994
A parametric approach for the geocoding of Airborne Visible(Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data in rugged terrain; Remote Sensing of Environment, Vol. 49, No. 2, pp. 118-130
- Paschedag I., 1993
Digitale Waldklassifikation mit Landsat-TM Daten im Raume Biasca/Tessin; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Raffy M., 1994
Heterogeneity and change of scale in models of remote sensing. Spatialization of multi-spectral models. International Journal of Remote Sensing, Vol. 15, No. 12, pp 2359-2380
- Raffy M., 1994 (b)
Change of scale theory: a capital challenge for space observation of earth. International Journal of Remote Sensing, Vol. 15, No. 12, pp 2353-2357
- Rock B., Vogelmann I., Williams D., Vogelmann A., Hoshizaki T., 1986
Remote Detection of Forest Damage; Bioscience, Vol. 36, No. 7
- Rosenfeld A., Kak A., 1982
Digital Picture Processing, Vol II; Academic Press Inc., Orlando, Florida
- Russ J., 1995
The image processing handbook, second edition; CRC Press Inc., Boca Raton, AnnArbor, London, Tokyo
- Sandmeier St., 1991
Digitale Kartierung des Schweizer Waldes mit Landsat TM-Daten, Teil 1: Radiometrische Korrekturen topographiebedingter Effekte; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Sandmeier St., 1995
A physically-based radiometric correction model: Correction of atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain; Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Sandmeier St., Sandmeier W., Itten K.I., Schaepman M., Kellenberger T., 1995
The Swiss Field-Goniometer System (FIGOS); Proceedings of IGARSS'95, Firenze, Italy, pp 2078-2080
- Schaepman M., 1992
Bildspektrometrie: Grundlagen und Datenerhebung im AVIRIS-wiss'91 Projekt; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich

- Schmitt-Fürntratt G., 1991
Thematische Kartierung tropischer Wälder durch verbesserte Auswertemethoden digitaler Satellitenbilder; in Fernerkundung in der Forstwirtschaft, Oesten G., Kuntz St., Gross C. (Hrsg.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, Deutschland. p. 188-205
- Schumacher H., 1991
Untersuchungen zur überwachten Klassifikation von Fernerkundungsaufnahmen; Dissertation, Universität Hannover, Deutschland
- SMA, 1991
'Wetterkarten der Monate Juni, Juli 1991'; Schweizerische Meteorologische Anstalt SMA, Zürich
- Story M., Congalton R., 1986
Accuracy assessment: A user's perspective; Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.52, No. 3, p. 397-393
- Suter M., 1992
Digitales Mosaik der Schweiz aus Landsat Thematic Mapper Satellitendaten; Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- Steiger P., 1995
Wälder der Schweiz; Ott Verlag Thun, Schweiz
- Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J., Perbos J., Deschamps P., 1986
Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code; International Journal of Remote Sensing, Vol. 11, No. 4, pp. 659-668
- Teillet P., Guindon B., Goodenough D., 1982
On the slope-aspect correction of multispectral scanner data; Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 8, No. 2, pp. 84-106
- Vermote E., Tanré D., Deuzé J., Herman M., Morcrette J., 1994
Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S); Users Guide
- UNO, 1992
The Rio Declaration on Environment and Development; Declaration of the United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 3-14 June
- Weissflog G., 1993
Landnutzung und Waldmerkmale in Ostthüringen: Methoden und Grenzen der digitalen Auswertung von Satellitendaten; Jenaer Geographische Schriften, Band 2, Friedrich-Schiller Universität Jena, Deutschland

8 - 2 BEWILLIGUNGEN

© Bewilligung: L+T, 1996

**“Benützung der Höhenmodelle DHM25 und RIMINI,
sowie der analogen und digitalen Kartengrundlage
LK25 und PK25 mit Bewilligung des Bundesamtes für
Landestopographie vom 16.2.1996.”**

*LK25 : Landeskarte 1:25'000, PK25 : Pixelkarte 1:25'000
(Anm. d. Autors)*

LEBENS LAUF von Tobias Walter Kellenberger

Adresse: Tempelhofstr. 24 / 8153 Rümlang
 Geboren: am 2. Juli 1962 in Winterthur
 Heimatort: Walzenhausen AR, Schweiz
 Zivilstand: verheiratet seit 1988
 Kinder: Roman Tobias, geb. 3.12.1989
 Benjamin Alexander, geb 23.3.1992

Schul- und Ausbildung:

1969 - 1974 5 Jahre Primarschule in Wettingen AG
 1974 - 1978 4 Jahre Bezirksschule in Wettingen AG
 1978 - 1981 3,5 Jahre Aargauische Kantonsschule in Baden mit Abschluss Eidg. Matura Typ C, 1981
 1981 - 1982 2 Semester Studium physikalische Chemie an der ETH Zürich
 1982 - 1985 Militärische Ausbildung zum Offizier der Genietruppen (Seilbahnsappeur)
 1983 - 1989 Studium der Geographie an der Universität Zürich mit Spezialisierung in Fernerkundung. Grosses Nebenfach: Kartographie, mittleres Nebenfach: Geologie, kleine Nebenfächer: Photographie, Mathematik
 1989 Diplomabschluss in Geographie bei Prof. K.I. Itten: "Geometrische Korrekturen von SPOT-1 Satellitendaten"
 1989-1996 Dissertationsarbeit unter Leitung von Prof. Dr. K.I. Itten, Geographisches Institut der Universität Zürich-Irchel
 1988- 1992 Assistent an der Abteilung "Angewandte Fernerkundung" , Prof. K.I. Itten
 1992 -heute stv. Oberassistent und Stellvertreter der Professur K.I. Itten
 1992-1993, 1996 stv. Sekretär (seit 1996 vollamtlich) der Schweizerischen Kommission für Fernerkundung (SKF) der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (SANW)

Lehrtätigkeit:

1992/1993, 1995/1996 Lehrauftrag an der Uni Zürich, Geographie, Fernerkundung IV
 1995 Lehrauftrag an der Uni Zürich, Geographie, Fernerkundung II, Stellvertretung Prof. Itten
 1996 Lehrauftrag an der Uni Zürich, Umweltwissenschaften, Raumbeobachtung und -bewertung

Bei folgenden Dozenten besuchte ich Vorlesungen und Uebungen:

Geographie: P.Abt, K.Brassel, G.Dorigo, A.Dürst, H.Elsasser, P.Fitze, E.Flütsch, G.Furrer, M.Gamper, G.A.Gensler, H.Gilgen, K.J.Graf, Th.Gutermann, V.Häberli, H.Haefner, K.I. Itten, H.Kishimoto, E.Landolt, A.Leemann, M.Maisch, H.Maurer, E.Meier, D.Nüesch, Ch.Ragaz, K.Seidel, H.Trachler, P.Walther
 Kartographie: Z.Parsic, E.Spiess
 Geologie und Mineralogie: H.M.Bolli, M.Casey, J.G.Ramsay, R.Trümpy
 Photographie: F.Tomamichel
 Mathematik: H.H.Storrer



LEBENS LAUF
