

Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz

Aufbau, Optimierung und Anwendung eines forstlichen
Geo-Informationssystems im Gebiet der Bayerischen Alpen
– Implementierung eines wissensbasierten Systems zur
Integration von Fernerkundung und GIS

Alfred Buck

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur
Erlangung des akademischen Grades eines *Doktors rer. silv.*
genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr. G. Wegener

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. U. Ammer
2. Prof. Dr. H.-D. Quednau
3. Prof. Dr. E. Kennel

Die Dissertation wurde am 05.02.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 07.02.2001 angenommen.

„In an era when we are trying to do things “better, faster, and cheaper,” remote sensing and GIS should be just the ticket.“

JOHN E. ESTES & JEFFREY L. STAR (1997)

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich nachdrücklich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ulrich Ammer bedanken, der mir die Bearbeitung des Themas und somit die Erstellung dieser Dissertation überhaupt ermöglichte. Durch seine Betreuung, die mir bei der Durchführung und Gestaltung dieser Arbeit viel Freiheit bot, waren es nicht zuletzt sein Interesse, seine wertvolle Unterstützung und seine kritischen Ratschläge, die wesentlich zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Weiterhin gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Thomas Schneider, der die wissenschaftliche Betreuung des Projekts übernahm, mir in fachlichen Fragen wertvolle Hinweise gab, für Probleme stets ein offenes Ohr hatte und mir seit Beginn meiner Tätigkeit am Lehrstuhl freundschaftlich verbunden ist.

Vielen Dank auch an alle Mitarbeiter des Lehrstuhls für Landnutzungsplanung und Naturschutzes für Ihre offene, hilfsbereite und freundschaftliche Art. Vor allem möchte ich meinem Team-Kollegen Ir. Roeland de Kok danken, der durch konstruktive Diskussionen, fachlichen Gedankenaustausch und seine mir entgegengebrachte Freundschaft auch maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beitrug.

Danken möchte ich außerdem Herrn Dipl. Forstwirt Rainer Blaschke, der unsere intensive und ausgezeichnete Zusammenarbeit im Projekt durch wertvolle Gespräche bereicherte.

Für die finanzielle Förderung möchte ich mich bei den Projektträgern DLR, Bayerische Staatsforstverwaltung und bei der Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, die das Projekt federführend leitete, bedanken. Insbesondere danke ich Herrn Ltd. FD Dr. Reinhard Mößmer (LWF), der die Gesamtprojektleitung inne hatte und zahlreiche fachliche Anregungen lieferte. Auch Herrn Armin Troyke von der LWF sei an dieser Stelle für seine Unterstützung bei der Beschaffung des Luftbildmaterials gedankt.

Ein Dankeschön auch an die Firma Definiens für die Bereitstellung der β -Version der Software eCognition.

Frau Dipl. Geogr. Silke Riedel möchte ich herzlich dafür danken, daß sie die Zeit fand, diese Arbeit kritisch durchzulesen.

Meinen Eltern, die mir immer Ihr vollstes Vertrauen schenken und nie am Gelingen dieser Arbeit gezweifelt haben möchte ich besonders danken vor allem, da sie mir meinen beruflichen Werdegang erst ermöglichten.

Nicht zuletzt gebührt mein herzlichster und größter Dank meiner Freundin Gudrun für ihre Geduld und ihr Verständnis bei den zahlreichen, durcharbeiteten Wochenenden und für ihre wertvolle und intensive Unterstützung in privater wie fachlicher Hinsicht, weshalb ich ihr diese Arbeit auch widmen möchte.

Alfred Buck, Februar 2001

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG	1
1.2 ZIELSETZUNG	2
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	5
2. DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	6
3. AUFBAU EINES FORSTLICHEN GEO-INFORMATIONSSYSTEMS (GIS) FÜR DAS USG FOA OBERAMMERGAU	8
3.1 GRUNDSÄTZLICHES ZUM BEGRIFF GIS	8
3.2 DATENERFASSUNG UND AUFBAU DER ZENTRALEN DATENBASIS	10
3.2.1 <i>Recherche über vorhandene Daten</i>	10
3.2.2 <i>Erfassung und Transformation der verfügbaren Daten</i>	12
3.2.3 <i>Übersicht und Beschreibung der eingebauten Datensätze</i>	13
3.2.3.1 Der Datenbestand der Forsteinrichtung	15
3.2.3.1.1 Die Forstbetriebskarte (FBK)	16
3.2.3.1.2 Die Daten der Waldinventur	18
3.2.3.2 Die ATKIS-Daten	19
3.2.3.3 Das Digitale Geländemodell (DGM 25)	19
3.3 VERWALTUNG UND ÜBERPRÜFUNG DER BESTEHENDEN DATENBASIS	22
3.3.1 <i>Geometrische Genauigkeit oder Lagegenauigkeit</i>	25
3.3.2 <i>Inhaltliche oder thematische Genauigkeit</i>	27
3.3.3 <i>Einflußfaktoren auf Qualität und Zuverlässigkeit räumlicher Daten</i>	32
3.3.3.1 Herkunft der Daten	32
3.3.3.2 Aktualität des Datenbestandes	33
3.3.3.3 Gebietsabdeckung und Vollständigkeit	34
3.3.3.4 Maßstab und räumliche Auflösung der Daten	34
3.3.3.5 Dichte der Beobachtungen bzw. Meßpunkte	36
3.3.3.6 Datenformat und -austausch	37
3.3.3.7 Numerische Fehler (rechnerbedingt)	38
3.3.4 <i>Qualitätsanalyse ausgewählter Datensätze</i>	39
3.3.4.1 Überprüfung der Forstbetriebskarte (FBK)	39
3.3.4.2 Überprüfung der ATKIS-Daten	41
3.3.4.3 Qualitätsvergleich zwischen ATKIS und FBK	41
3.3.4.4 Überprüfung der Waldinventur-Daten	45

3.3.4.5	Überprüfung des Digitalen Geländemodells (DGM 25).....	47
4.	INTEGRIERTE ANALYSE MITTELS FERNERKUNDUNG UND GIS FÜR FORSTLICHE FRAGESTELLUNGEN	51
4.1	GRENZEN HERKÖMMLICHER VERFAHREN.....	51
4.2	VERFAHREN ZUR INTEGRATION VON FE UND GIS IM ÜBERBLICK	55
4.2.1	<i>Satellitenbilddaten als GIS-Datenquelle.....</i>	<i>55</i>
4.2.2	<i>GIS-Daten zur Unterstützung der Klassifizierung von Satellitenbildern.....</i>	<i>57</i>
4.2.3	<i>Umfassende Integration von FE und GIS.....</i>	<i>60</i>
4.3	WISSENSBASIERTE SYSTEME	62
4.3.1	<i>Definition und Aufbau.....</i>	<i>62</i>
4.3.2	<i>Expertensysteme.....</i>	<i>65</i>
4.4	DAS ANGEWANDTE VERFAHREN	67
4.4.1	<i>Die Bildverarbeitung mit eCognition.....</i>	<i>67</i>
4.4.1.1	Segmentierung	67
4.4.1.2	Klassifizierung	69
4.4.2	<i>Ansatz zur Integration von FE und GIS (Ablauf).....</i>	<i>72</i>
4.5	ANWENDUNGSBEISPIEL: BAUMARTENZUSAMMENSETZUNG	78
4.5.1	<i>Das Regelwerk.....</i>	<i>79</i>
4.5.1.1	Wissensakquisition	79
4.5.1.1.1	Auswertung der Daten aus der Forsteinrichtungsdatenbank	80
4.5.1.1.2	Auswertung der Literatur und des Expertenwissens.....	90
4.5.1.2	Definition der Einflußfaktoren auf die Baumartenzusammensetzung und Erstellung der hierfür notwendigen GIS-Datenlayer	96
4.5.1.2.1	Höhe über N.N.....	96
4.5.1.2.2	Exposition und Hangneigung	99
4.5.1.2.3	Geomorphologische Aspekte.....	100
4.5.1.2.4	Spezifische klimatische Ereignisse	101
4.5.1.2.5	Geologische Unterlage	103
4.5.1.2.6	Verfügbare Standortskriterien: Edaphische Faktoren.....	106
4.5.1.2.7	Das Gewässernetz	107
4.5.1.3	Erstellung der Wissensbasis: Wissensformalisierung und -repräsentation.....	107
4.5.2	Ergebnis der Wissensverarbeitung	110
4.6	ERSTELLUNG UND AKTUALISIERUNG VON GIS-DATENBESTÄNDEN	115
4.6.1	<i>Erstellung neuer Datengrundlagen.....</i>	<i>115</i>
4.6.2	<i>Erweiterung bestehender Datensätze.....</i>	<i>118</i>
4.6.3	<i>Aktualisierung von Grenzverläufen.....</i>	<i>123</i>

5. ABSCHLIEBENDE DISKUSSION UND AUSBLICK.....	124
5.1 AUFBAU EINES FORSTLICHEN GIS.....	124
5.1.1 <i>Der Nutzen für die Forstverwaltung.....</i>	<i>124</i>
5.1.2 <i>Notwendigkeit der Qualitätsanalyse von Daten.....</i>	<i>126</i>
5.2 INTEGRATION VON FERNERKUNDUNG UND GIS.....	129
5.2.1 <i>Wissensbasierte Analyse.....</i>	<i>129</i>
5.2.2 <i>Objektbasierter Ansatz.....</i>	<i>133</i>
6. ZUSAMMENFASSUNG.....	137
7. LITERATURVERZEICHNIS.....	140

Abbildungsverzeichnis *(nach Kapiteln)*

Abb. 1.1: Projektaufbau	2
Abb. 2.1: Das Untersuchungsgebiet FoA Oberammergau.....	7
Abb. 3.1: Prinzip der Geokodierung raumbezogener Information innerhalb eines GIS	12
Abb. 3.2: Das Digitale Geländemodell: Höhenstufenkarte für das Untersuchungsgebiet FoA Oberammergau.....	20
Abb. 3.3: Beziehung zwischen Datenqualität und Datenkosten (ARONOFF 1995)	23
Abb. 3.4: Maßstabsabhängige Darstellung einer Lageabweichung von 75 m.....	35
Abb. 3.5: Fehler bei näherungsweise Rasterdarstellung exakter Formen (nach BURROUGH & MCDONNELL 1998).....	37
Abb. 3.6: Beispiel für inhaltliche Fehler in der digitalen Forstbetriebskarte. Hier: fehlende Attributbeschreibung für manche Bestände.....	40
Abb. 3.7: Beispiele für Unstimmigkeiten zwischen der digitalen Forstbetriebskarte und den ATKIS-Daten. Ausschnitte aus den Daten des Forstamts Oberammergau.....	42
Abb.3.8: Beispiele für Lageungenauigkeiten: Das Wegenetz der Forstbetriebskarte (links) und das der ATKIS-Daten (rechts), beide in grün, sind zusammen mit den Orthophotos als Referenzgrundlage dargestellt.	43
Abb. 3.9: Attributierungsfehler im Inventurdatensatz, die durch die Überlagerung der Inventurpunkte auf das DGM sichtbar werden.....	46
Abb. 3.10: A: Beispiele für Fehler des Digitalen Geländemodells, die als Streifenstrukturen in Zeilen- (❶) und in Spaltenrichtung (❷) sichtbar werden (gelbe Kästen). B: Vergleich zwischen den Höhenlinien berechnet aus dem DGM (gelb) und den Höhenlinien aus der TK25 (rot)..	48
Abb. 3.11: Unterschiedliche numerische Genauigkeiten im DGM-Datensatz.	50
Abb. 4.1: Darstellung des Verhältnis eines Waldobjekts zu der Bildelementgröße des Landsat- und IKONOS-Sensors im multi-spektralen (MS) und panchromatischen (Pan) Bereich.	52
Abb. 4.2: Hierarchisches Netz aus Bildobjekten unterschiedlicher Auflösung (nach Delphi2, eCognition, verändert)	69
Abb.4.3: Ablaufschema des mehrstufigen Integrationsverfahrens. Die Integration vollzieht sich vor (❶ ❷), während (❸) und nach (❹ ❺) der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten.	73
Abb. 4.4: Aufbau der Wissensbasierten Bildanalyse-Komponente	75
Abb.4.5: Ablaufschema für die Erstellung eines Regelwerkes	80
Abb. 4.6: Absolutes Vorkommen der Hauptbaumarten an den Inventurpunkten im Untersuchungsgebiet	81
Abb.4.7: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Fichte	83
Abb. 4.8: Höhenverteilung der Inventurpunkte mit Vorkommen der Baumart Buche	85
Abb. 4.9: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Buche	86
Abb. 4.10: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Kiefer	88
Abb. 4.11: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Tanne	88

Abb. 4.12: 3-dimensionale Visualisierung der Höhenverteilung der Inventurpunkte mit Vorkommen der Baumart Buche und Tanne. Blick auf die nordexponierte Seite des Kreuzspitz-Gebirgskammes im zentralen Bereich des USG mit dem Tal der Linder im vorderen Bildteil.....	89
Abb. 4.13: Natürliche Waldzusammensetzung im bayerischen Hochgebirge (vereinfacht) (Bayer. StMELF 1987)	97
Abb. 4.14: Konvexe und konkave Geländeformen unterschiedlichen Intensitätsgrades.....	101
Abb. 4.15: Beispiel einer Föhngasse im Untersuchungsgebiet Oberammergau.....	103
Abb. 4.16: Zugehörigkeitsfunktion für die Klasse Kiefer bezüglich der Höhenverteilung.....	109
Abb. 4.17: Zugehörigkeitsfunktion für die Klasse Kiefer bezüglich des Vorkommens an süd-exponierten Hanglagen	109
Abb. 4.18: Klassifikationsergebnisse a) ausschließlich auf der Basis der FE und b) unter Hinzunahme von GIS	111
Abb.4.19: Beispiel aus der Plausibilitätsüberprüfung der in der reinen Satellitenbildklassifikation (①) als Laubwald klassifizierten Flächen mit Hilfe des regelbasierten Ansatzes.....	112
Abb. 4.20: Beispiel aus der Plausibilitätsüberprüfung der als Nadelwald klassifizierten Flächen unter Verwendung des regelbasierten Ansatzes..	113
Abb. 4.21: Beispiel aus der Plausibilitätsüberprüfung der als Nadelwald klassifizierten Flächen unter Verwendung des regelbasierten Ansatzes..	114
Abb. 4.22: Segmentiertes Bild, erstellt aus einer multispektralen SPOT-Satellitenszene vom 21.06.98 und der panchromatischen Information digitaler Ortholuftbilder vom 01.10.96.....	117
Abb. 4.23: Aktualisierungsstrategie unter Verwendung bestehender forstlicher Datenstrukturen (① Ausschnitt aus der Forstbetriebskarte, ② Objekte aus dem Segmentierungsverfahren von eCognition mit den jeweiligen Attributtabelle).....	120
Abb. 4.24: Das verwendete Segmentierungsverfahren ermöglicht zusätzlichen Informationsgewinn: ① Ausschnitt aus der Forstbetriebskarte, ② Kartenmäßige Darstellung eines in Attributform im Datenbestand der Forsteinrichtungsdatenbank DB2 vorgehaltenen Information über die Be-standsformen der einzelnen Bestände; ③ Grenzen der Waldbestände aus der FBK (zugehörige Attributtabelle unterhalb abgebildet), überlagert auf ein digitales Orthophoto; ④ Objekte aus dem Segmentierungsverfahren von eCognition (hellblau) innerhalb der Grenze eines Wald-bestandes aus der FBK (grün) mit der dazugehörigen Sachdatentabelle.....	122
Abb. 4.25: Aktualisierung der Bestandesgrenzen der Forstbetriebskarte. In blau sind die Original-Bestandesgrenzen dargestellt, in rot die anhand des eCognition Segmentierungsverfahrens ermittelten Grenzen. Die weißen Pfeile verdeutlichen besonders markante Unterschiede.....	123

Tabellenverzeichnis *(nach Kapiteln)*

Tab. 3.1: Übersicht der GIS-Datensätze für das Untersuchungsgebiet Oberammergau.....	14
Tab. 3.2: Bilddaten des Untersuchungsgebietes Oberammergau.....	15
Tab. 3.3: Verbreitete Fehlerquellen in der Verwendung von GIS (nach ARONOFF 1995, verändert)	24
Tab. 3.4: Berechnung der Lagefehler für die Datensätze der Forstbetriebskarte und der ATKIS- Daten (Angaben in m). Referenzgrundlage bildeten jeweils Orthophotos.....	44
Tab. 4.1: Beziehung zwischen der Höhenverteilung der Baumart Fichte und der Exposition.....	84
Tab. 4.2: Beziehung zwischen der Höhenverteilung der Baumart Buche und der Exposition	87
Tab. 4.3: Beziehung zwischen der Höhenverteilung der Baumart Tanne und der Exposition.....	90
Tab. 4.4: Aktuelle Obergrenzen von Einzelbuchen und geschlossenen Fichten- und Latschenbeständen in nördlichen, zentralen und südlichen Bereichen der Ammergauer Alpen. Angaben in Metern nach KOEGEL (1923) und EGGENSBERGER (1994) (aus EGGENBERGER 1994).....	98
Tab. 4.5: Standortkundliche Gruppen geologischer Ausgangssubstrate in den Bayerischen Alpen. Die blau beschrifteten Gesteinsformationen kommen im Untersuchungsgebiet Oberammergau vor (nach EWALD 1997 und KUHNERT (1967 a+b), verändert)	105

Abkürzungsverzeichnis

ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BLVA	Bayerisches Landesvermessungsamt
DB2	Forsteinrichtungsdatenbank
DGM	Digitales Geländemodell
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EARSeL	European Association of Remote Sensing Laboratories
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FE	Fernerkundung
FER	Forsteinrichtungsrichtlinie
FoA	Forstamt
GAF	Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung
GIS	Geo-Informationssystem
GPS	Global Positioning System
HRV	High Resolution Visible/ Haute Resolution Visible
HRV-MS	Haute Resolution Visible - Multispectral Mode
IR	Infrarot
IRS-1C	Indian Remote Sensing System
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LBP	Bayer. Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau
LISS	Linear Imaging Self Scanning Sensor
LNP&N	Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz
LWF	Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

MOMS	Modular Optoelectronic Multispectral Scanner
MS	Multispectral
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PAN	Panchromatic Sensor
RMS	Root Mean Square
SPOT	Systeme Probatoire d'Observation de la Terre
StMELF	Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
TK	Topographische Karte
TM	Thematic Mapper
VHR	Very High Resolution

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

In den bayerischen Alpen sind 60% (ca. 147 000 ha) des Bergwaldes als Schutzwald ausgewiesen, wobei über die Hälfte hiervon Staatswald ist (BAYER. STAATSFORSTVERWALTUNG [Hrsg.] 1997). Die Fähigkeit des Bergwaldes, schnee- und erosionsbedingte Risiken langfristig zu verhindern, hängt im wesentlichen vom Waldzustand und den ihn charakterisierenden Faktoren wie Beschirmungsgrad, Baumartenkombination, räumliche Anordnung, Alter und Stufigkeit ab (AMMER 1989). Eines der vorrangigen Ziele der Bayerischen Staatsforstverwaltung ist es, die Schutzfähigkeit der Bergwälder in alpinen Regionen hinsichtlich der vielfältigen Waldfunktionen wie Wasserschutz, Bodenschutz und Lawinenschutz zu erhalten und zu stärken. Dazu sind genaue, in regelmäßigen Zeitabständen erhobene Informationen über Zustand und Gefährdung der Bestände notwendig.

In den Alpen ist die Erhebung der hierfür benötigten Parameter mit hohen Kosten verbunden. Diese entstehen durch die orographischen Verhältnisse und die damit verbundene Unzugänglichkeit des Geländes. Aufgrund der zwingenden Notwendigkeit, Veränderungen, welche die Schutzfunktion der Wälder beeinträchtigen, rechtzeitig zu erkennen, müssen stets aktuelle Flächendaten verfügbar sein.

Bisher wurden, ergänzend zu den terrestrischen Aufnahmen, insbesondere Luftbilder eingesetzt, die zwar kostengünstiger sind als die herkömmliche Erfassung über terrestrische Begehung, die aber für die Auswertung dennoch einen erheblichen Zeit- und Kostenaufwand erfordern (s. BAUER 2000). Die neue Generation von Satellitensystemen verspricht im Vergleich zu den bisherigen kommerziellen Systemen erhebliche Verbesserungen in der geometrischen und radiometrischen Auflösung der Satellitenbilder, was deren Einsatz für forstliche Zwecke interessant macht.

Diese neuen Bilddaten sowie die besonderen Verhältnisse der Gebirgs-Regionen erfordern allerdings neue Auswertemethoden, die über die konventionellen Klassifikationsverfahren hinausgehen.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Pilotprojektes „Inventur und Beobachtung der Schutzwälder in alpinen Regionen – Nutzungsmöglichkeiten von hochauflösenden Satelliten-Daten in der Bayer. Staatsforstverwaltung (MOMS-2P Pilotprojekt ALPS)“ bearbeitet, das am Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz der TU München im Unterauftrag der Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) durchgeführt wurde, mit finanzieller Förderung des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und der Bayer. Staatsforstverwaltung.

Hauptziel des Pilotprojektes ist es, die Anwendung hochauflösender Fernerkundungsdaten für die operationelle Nutzung in der Praxis der Bayerischen Staatsforstverwaltung zu überprüfen. Dabei soll sich das Augenmerk vorrangig auf die Abstimmung zwischen den Anforderungen und Bedürfnissen des Nutzers und den Untersuchungsmethoden richten, um somit eine Zusammenführung zwischen Forschung und Anwendung zu erreichen.

Das Pilotprojekt setzt sich aus drei Teilbereichen zusammen, die in Abbildung 1.1 dargestellt sind:

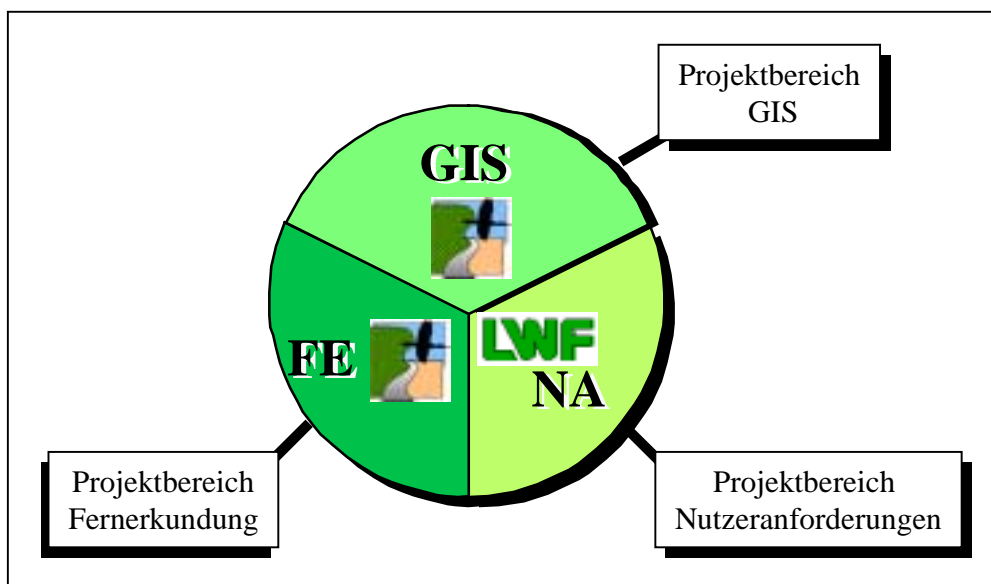


Abb. 1.1: Projektaufbau

Der Teilbereich "Nutzeranforderungen" wird von der Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) bearbeitet. Hier erfolgt die Erstellung eines forstlichen

Anforderungsprofils und die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von GIS und FE in den Planungsabläufen der Bayer. Staatsforstverwaltung.

Die Teilbereiche "Fernerkundung" und "GIS" werden vom Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz bearbeitet.

Im Projektbereich "Fernerkundung" werden für forstliche Anwendungen optimierte Bildverarbeitungsmethoden zur Auswertung von hochauflösenden Fernerkundungsdaten eingesetzt bzw. Simulationen zukünftig höher auflösender Satellitenbildsysteme vorgenommen. Besonderes Gewicht wird dabei auf die Verwendung und Ableitung forstlich relevanter Parameter gelegt.

Der Projektbereich "GIS", der Gegenstand dieser Arbeit ist, beinhaltet im Wesentlichen folgende Ziele:

- Aufbau eines forstlichen Geo-Informationssystems unter Einbau der verfügbaren Daten einschließlich der Fernerkundungsdaten für das ausgewählte Untersuchungsgebiet
- Entwicklung eines Verfahrens zur Integration von Fernerkundung und GIS, das den Klassifizierungsprozeß der Satellitenbilder mit Hilfe von Zusatzdaten unterschiedlicher Informationsquellen unterstützt und im Sinne einer Plausibilitätsuntersuchung überprüft

Hierbei ergeben sich weitere Zielsetzungen:

- Qualitätsanalyse der bestehenden Datenbasis zur Abschätzung von Verwendbarkeit und Aussageschärfe sowie eine Gegenüberstellung der vom Nutzer gestellten Anforderungen
- Erstellung eines wissensbasierten Auswerteverfahrens als Lösungsstrategie zur Interpretation von Satellitenbilddaten höherer Auflösung unter Einbeziehung von Expertenwissen und sonstigen, der Forstverwaltung vorliegenden Informationen.

- Verbesserung von Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Klassifizierungsergebnisse aus der Fernerkundung bzw. Ableitung neuer Informationen, die erst durch den wissensbasierten Ansatz unter Verwendung von Zusatzinformation möglich werden.
- Rückführung der Ergebnisse aus der integrierten Klassifizierung in das bestehende forstliche Geo-Informationssystem unter Berücksichtigung bzw. Beibehaltung der bestehenden Datenstruktur des Informationssystems der Bayerischen Staatsforstverwaltung
- Aufbau eines wissensbasierten Regelwerks, das die Gesetzmäßigkeiten für das Vorkommen bestimmter Vegetationstypen im Bereich der Bayer. Alpen zuverlässig berücksichtigt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach einer einführenden Charakterisierung des Untersuchungsgebietes in Kapitel 2 ist die vorliegende Arbeit gemäß den bereits erwähnten Zielen in zwei Hauptbereiche gegliedert. Der erste Hauptbereich (Kap. 3) befaßt sich mit dem Aufbau eines forstlichen Geo-Informationssystems für das Untersuchungsgebiet Oberammergau. Hier werden die einzelnen Schritte von der Datenerfassung und –verwaltung bis hin zur Überprüfung der bestehenden Datenbasis eingehend erläutert. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Qualitätssicherung und Qualitätsanalyse des Datenbestandes, da eine einheitliche und von datentyp- und erfassungsabhängigen Unschärfen befreite Datenbasis eine wichtige bis entscheidende Rolle bei der Kombination und Integration von Fernerkundungsdaten in einem Geo-Informationssystem spielt, was insbesondere auch für geometrisch sehr hochauflösende Sensoren (engl. VHR) gilt.

Die Integration von Fernerkundung und GIS, ist Thema des zweiten Hauptbereichs dieser Arbeit und wird ausführlich in Kapitel 4 untersucht. Dabei werden die Grenzen bereits bestehender Verfahren aufgezeigt und der hier eingesetzte, mehrstufige integrative Ansatz vorgestellt, der unter Verwendung objekt- und wissensbasierter Methoden implementiert wurde.

Anhand der Bestimmung der Baumartenzusammensetzung, als eines der entscheidenden Kriterien zur Beurteilung der Stabilität von Waldbeständen, werden die Vorgehensweise und Vorteile dieses neuen Ansatzes dargestellt. Entscheidend ist dabei auch die in Kapitel 4.7 dargestellte Möglichkeit einer Aktualisierung des GIS-Datenbestandes, die erst durch das neue Verfahren praktikabel wird.

2. DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

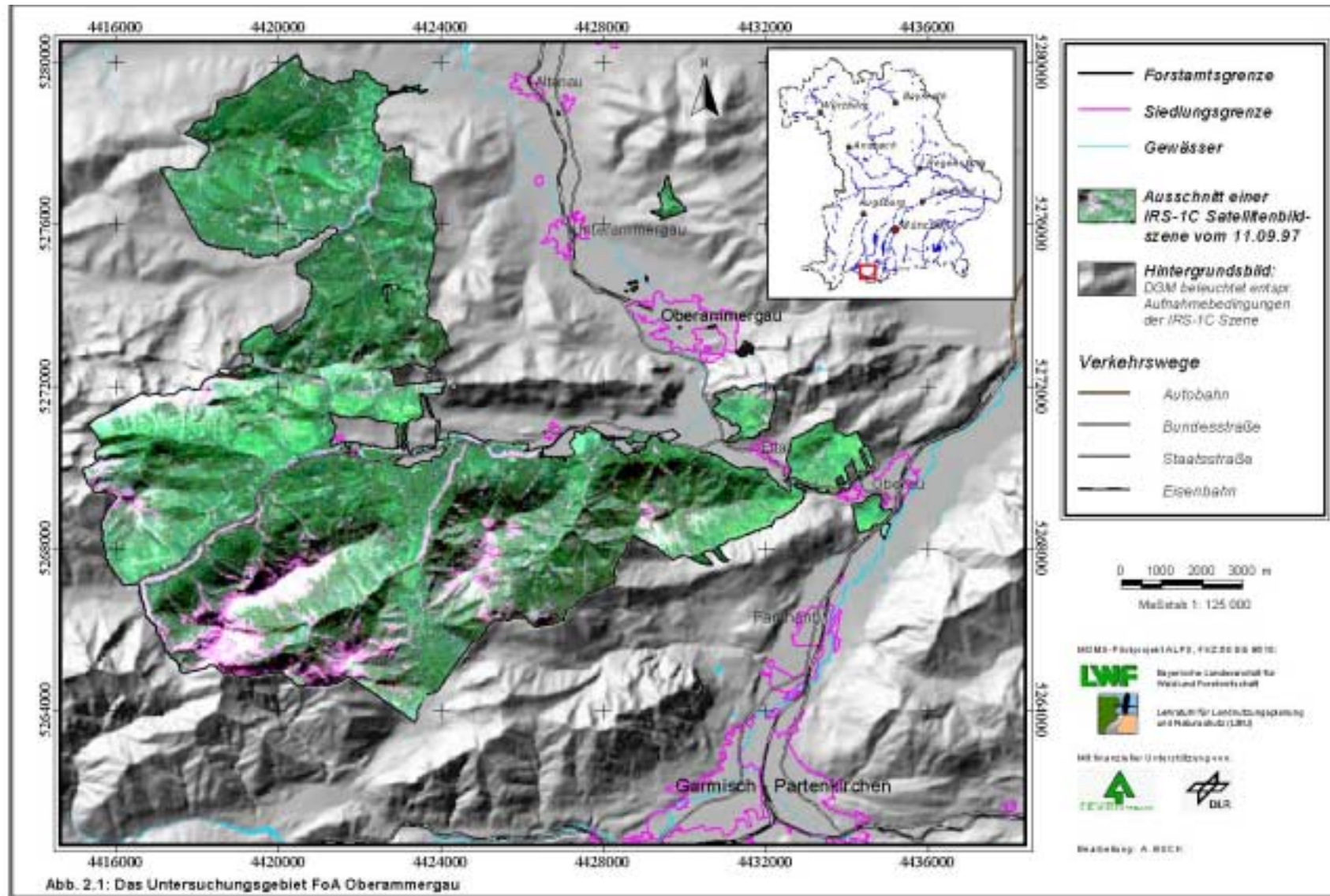
Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den Bayerischen Alpen und umfaßt größtenteils das Forstamt Oberammergau, als Schwerpunkt des Naturschutzgebietes "Ammergebirge" (s. Abb.2.1). Das Forstamt grenzt im Osten an die Stadt Oberau und im Südwesten an die österreichische Landesgrenze.

Die Auswahl des Untersuchungsgebietes erfolgte einerseits aus Gründen der Datenverfügbarkeit, da für dieses Gebiet die aktuellen Daten der letzten Forsteinrichtung von 1996 mit den dazugehörigen Daten der Stichprobeninventur bereits in digitaler Form vorlagen. Andererseits beinhaltet es einen repräsentativen Querschnitt der Bedingungen, die generell in den Bayerischen Alpen zu finden sind (s. auch BAUER 2000).

Das Forstamt Oberammergau besitzt eine Gesamtfläche von 19 299 ha und ist zu 64% bewaldet (STMELF 1997). Es umfaßt einen Querschnitt durch die typische Vegetationsabfolge im nördlichen Alpenraum, vom Bergmischwald über den subalpinen Fichtenwald bis hin zu den Latschenfeldern und alpinen Rasen. In den Altbeständen des montanen Bereichs ist der Bergmischwald (Fichten-Tannen-Buchen-(Bergahorn)-Bestände) noch weitgehend vorhanden, während in den mittelalten und jüngeren Beständen, die Mischungsbaumarten zugunsten der Fichte erheblich an Anteil verlieren (STMELF 1997).

Die klimatischen Verhältnisse werden durch die Lage im nördlichen Staubeereich der Alpen geprägt. Die Gesamtniederschlagsmenge liegt bei ca. 1550 mm/a, die in den Wintermonaten fast durchweg als Schnee fällt. In den unteren Lagen ist an rund 100, in den höheren Bereichen zwischen 150 und 200 Tagen eine geschlossene Schneedecke zu beobachten (ALPS 2000).

2. Das Untersuchungsgebiet



3. AUFBAU EINES FORSTLICHEN GEO-INFORMATIONSSYSTEMS (GIS) FÜR DAS USG FOA OBERAMMERGAU

3.1 Grundsätzliches zum Begriff GIS

Im Zusammenhang mit dem Begriff GIS wurden in der Literatur bereits vielerlei Definitionen geliefert, deren Inhalte sich jedoch stark ähneln. Dabei setzte sich anstelle der bislang üblichen Übersetzung als „Geographisches Informationssystem“ (Geographic Information System) des aus dem anglo-amerikanischen Sprachraum stammenden Begriffes mehr und mehr die neutralere Bezeichnung „Geo-Informationssystem“ durch (vgl. LINDER 1999).

Die Daten, welche mit Geo-Informationssystemen bearbeitet werden, verfügen stets über einen räumlichen Bezug. Geodaten stellen dabei einen Spezialfall raumbezogener Daten dar, die einen konkreten Bezug zur Erdoberfläche haben, d.h., die Lage aller Objekte auf der Erde muß durch xy-Koordinaten definiert sein, wobei entweder geographische Koordinaten (Längen- und Breitengrade) oder landesspezifische Referenzsysteme (Gauß-Krüger, UTM, etc.) verwendet werden können (vgl. GOODCHILD 1994).

In Anlehnung an BURROUGH (1986) soll an dieser Stelle der Begriff GIS als rechnergestütztes System zur *Erfassung, Haltung, Transformation* und *Darstellung* von räumlichen Daten mit geographischem Bezug definiert werden. Durch diese Definition lassen sich die funktionalen Aspekte eines GIS in vier Hauptkomponenten untergliedern, die allgemein und auch im Rahmen dieser Arbeit für die Verwendung von GIS maßgebend sind und nachfolgend kurz beschrieben werden sollen.

Geodatenerfassung: Hierbei können entweder Primärdaten erfaßt oder bereits vorhandene digitale Daten eingebaut werden. Bei einer Ersterfassung der Daten erfolgt die Übernahme von Geo-Informationen aus analogen Vorlagen (Karten, Bildmaterial).

Datenhaltung: Innerhalb dieser GIS-Komponente werden die Geo-Daten in eine Systemarchitektur eingebaut, überprüft und verwaltet. Vor einem Einbau der Daten müssen diese auf ihre grundsätzliche Eignung hin sowie bezüglich ihrer geometrischen (Lagegenauigkeit) wie auch thematischen Qualität (inhaltliche Genauigkeit) überprüft werden.

Transformation der Daten: Unter dem Aspekt Datentransformation versteht man die Umwandlung von raumbezogenen Daten in ein für das GIS adäquates Datenformat. Beim Import von Geodaten aus Fremdsystemen ergeben sich dabei bisweilen Kompatibilitätsprobleme. Andererseits sind auch raumbezogene Analysen, welche mit Hilfe von GIS erfolgen, nicht selten mit einer Datenumwandlung verbunden, sei es durch graphische Selektion bzw. räumliche Abfrage aus dem Datensatz, Reklassifizierung bzw. Gruppierung von Attributen verschiedener thematischer Ebenen mit der Bildung neuer Klassen, Berechnung von Nachbarschaftsbeziehungen, Entfernungsanalysen („buffering“) oder durch Überlagerung („overlay“) und Verschneidung („intersection“) innerhalb des Datenbestandes.

Darstellung: Jedes GIS enthält in der Regel Instrumente zur Visualisierung und Präsentation der Daten (graphische Ausgabe). Mit der Ausgabe von Geodaten oder Analyse-Ergebnissen in Form von thematischen Karten werden die Möglichkeiten, welche GIS bietet, für viele Betrachter erst augenfällig.

3.2 Datenerfassung und Aufbau der zentralen Datenbasis

Die Aufstellung des Datenbestandes nimmt den größten Teil eines GIS-Vorhabens in Anspruch. Mit der Möglichkeit jedoch, die Basisdaten mehrfach für verschiedene Aufgabenbereiche nutzen zu können, stellt der Datenbestand auch die langlebigste Komponente eines GIS dar, was wiederum wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt (CASPARY 1992, STANEK et al. 1995). CASPARY (1992) schätzt, daß beim Aufbau eines Geo-Informationssystems 65% der Gesamtkosten durch die Erstellung des Datenbestandes verursacht werden, wobei dessen Lebensdauer von ca. 10 Jahren im Vergleich wesentlich höher liegt als die Laufzeiten der restlichen, an einem GIS beteiligten Komponenten, wie Hardware und Software. Nach BUHMANN & WIESEL (1998) können die Kosten für Daten¹ sogar einen Anteil von mehr als 80% der Gesamtkosten eines GIS-Projektes betragen, wobei hier ergänzend anzufügen ist, daß durch die zunehmende Verfügbarkeit digitaler Daten in Zukunft eine Senkung dieser Kosten zu erwarten ist.

3.2.1 Recherche über vorhandene Daten

Der Aufbau eines Geo-Informationssystems für das Untersuchungsgebiet Oberammergau ging einher mit einer intensiven Recherche über vorhandene Daten, um eine zentrale Datenbasis zu schaffen und um gleichzeitig eine wiederholte, arbeits- und kostenintensive Erfassung bereits digital vorliegender Daten zu vermeiden. Ferner mußten Daten, welche nur analog vorlagen, aber für die Untersuchung relevant erschienen, digitalisiert werden.

Wichtig bei der Akquisition von bereits digital vorliegenden Datensätzen ist es, über Informationen zur Entstehung dieser Fachdaten, also die verwendete Erhebungs- und Erfassungsgrundlage sowie über Angaben zu Erfassungsmethode, -zeitpunkt, -zeitraum, Aktualität und räumlichen Ausdehnung bzw. Abgrenzung zu verfügen. Diese sollten in Form

¹ Die Aufstellung der Datenkosten berücksichtigt i.d.R. die Kosten für die Erfassung bzw. Erstbeschaffung der Daten, die Datenpflege, -fortführung, Qualitätskontrolle und Fehlerbeseitigung sowie die Archivierungskosten.

von Metadaten den eigentlichen Datensätzen als Ergänzungsinformation beigelegt und somit dem Anwender zugänglich gemacht werden.

Die Anbieter digitaler Geo-Daten sind gegenwärtig meist Landesvermessungsämter sowie Landesämter und andere Fachverwaltungen, die im Besitz bzw. Aufbau entsprechender „Geographischer Fachinformationssysteme“ sind. Im Bereich von Rasterbilddaten, speziell von Satelliten- und sonstigen Fernerkundungsdaten, sind wegen ihrer frühen kommerziellen Ausrichtung (breites Anwendungsspektrum im zivilen Bereich), schon seit längerem² Vertriebssysteme etabliert worden. Das zeigt sich auch durch den höheren Anteil privatwirtschaftlicher Anbieter am Markt. Im Vergleich dazu dominieren bei den vektorbasierten GIS-Datensätzen die Anbieter aus dem öffentlichen Sektor.

In den letzten Jahren hat die Anzahl digitaler Datensätze stetig zugenommen. Probleme bereiten aber weiterhin die Verfügbarkeit, Verbreitung und Austausch sowie das Wissen über die Bezugsquelle solcher Datensätze. Als positives Beispiel sei hier das Metainformationssystem des Bayerischen Landesvermessungsamts genannt, welches via Internet unter der Adresse <http://www.geodaten.bayern.de/gfis.html> einen Überblick über die einzelnen „Geographischen Fachinformationssysteme in der Bayer. Staatsverwaltung“ bietet. Dort sind Informationen zu den bereits vorhandenen Geo-Daten der einzelnen Fachbehörden zusammengestellt, mit Angaben u.a. über deren Inhalt, Verfügbarkeit, Entstehung und Qualität.

Die Verfügbarkeit der einzelnen Geo-Daten für den interessierten Anwender wird jedoch oft durch bürokratische Hürden erschwert. In manchen Fällen ist die Abgabe raumbezogener Daten eingeschränkt oder aufgrund des ausschließlich betriebsinternen Gebrauchs gänzlich untersagt, so daß häufig die paradox erscheinende, wiederholte digitale Erfassung der Daten in Erwägung gezogen werden muß. Im Rahmen dieses Projektes traten in dieser Hinsicht jedoch keine Schwierigkeiten auf.

² Bereits Anfang der 70ziger Jahre standen mit dem Start der ersten Erdbeobachtungssatelliten, dem U. S. amerikanischen Landsat-System, größere Mengen an Bilddaten zur Verfügung.

3.2.2 Erfassung und Transformation der verfügbaren Daten

Die bereits digital in unterschiedlichen Formaten (DXF, SICAD, ASCII, etc.) und aus verschiedenen Quellen vorliegenden Geo-Daten zum Untersuchungsgebiet wurden aufbereitet, um sie in das Softwarepaket ARC/INFO und ArcView der Firma ESRI integrieren zu können. Bei den hier erforderlichen Konvertierungsprozeduren mußte insbesondere darauf geachtet werden, daß kein Informationsverlust erfolgte und bereits bestehende Attributanbindungen, wie sie z.B. bei der digitalen Forstbetriebskarte vorlagen, erhalten blieben.

Die Integration von Daten aus Fremdsystemen erfordert in den meisten Fällen den Neu-Aufbau topologischer Beziehungen, wobei große Sorgfalt darauf zu legen ist, daß sich keine Veränderungen bei den Objektgrenzen ergeben oder bei der Datenkonversion gar Objekte verloren gehen. Solche Schwierigkeiten, die generell beim Austausch von digitalen Datensätzen durch unterschiedliche programmeigene Datenformate entstehen können, wären durch eine Standardisierung im Sinne eines „Open GIS“ aufgehoben. Auf diese Thematik, die derzeit noch Forschungsfeld ist, soll in Kapitel 5.1 noch näher eingegangen werden.

Für die digitale Ersterfassung analoger Daten, wie z.B. der Geologischen Karten (Blattnr. 8431 und 8432) im Maßstab 1 : 25 000, kamen ebenfalls die Geo-Informationssysteme ARC/INFO und ArcView zum Einsatz. Diese Programme dienten im Rahmen des Projektes generell als zentrale GIS-Programme zur Analyse und Verwaltung aller raumrelevanten Daten.

Entscheidend ist, daß alle Daten, die in ein GIS integriert werden, sich auf ein einheitliches, gemeinsames Lagereferenzsystem beziehen (s. Abb. 3.1). Somit kann gewähr-

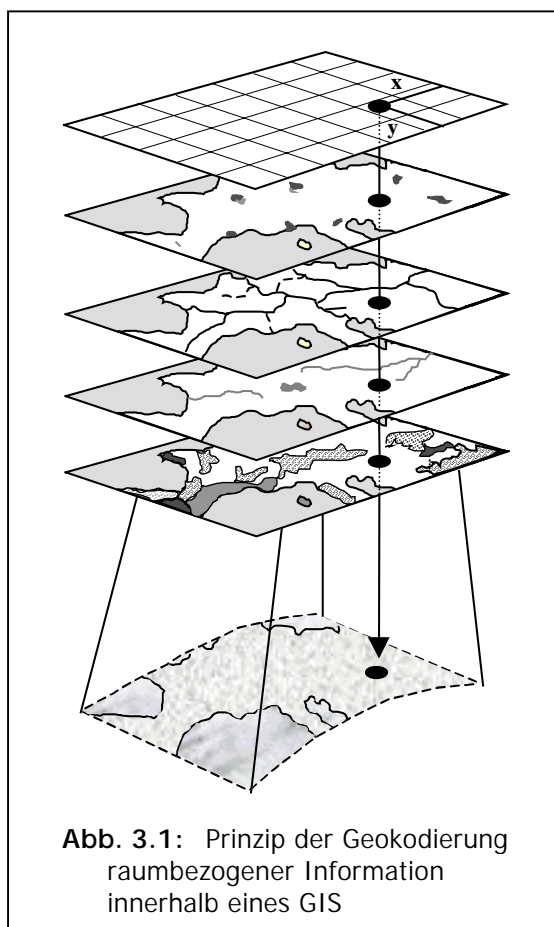


Abb. 3.1: Prinzip der Geokodierung raumbezogener Information innerhalb eines GIS

leistet werden, daß sie aufeinander abgestimmt sind und im Rahmen räumlicher Analysen und Abfragen miteinander verknüpft werden können, um daraus neue Informationen abzuleiten.

Als gemeinsames räumliches Bezugssystem im Rahmen dieser Arbeit wurde das Gauß-Krüger-Gitternetzsystem (12°-Meridian), bezogen auf das Bessel-Ellipsoid mit einer Meridianstreifenbreite von 3 Grad, verwendet, welches dem amtlichen Topographischen Kartenwerk des Landesvermessungsamt Bayern (BLVA) zugrunde liegt.

3.2.3 Übersicht und Beschreibung der eingebauten Datensätze

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die Datensätze, die in das Geo-Informationssystem für das Untersuchungsgebiet Oberammergau eingebaut werden konnten und liefert Informationen über die Bezugsquelle sowie das Format, in dem die Daten zur Verfügung standen.

Tab. 3.1: Übersicht der GIS-Datensätze für das Untersuchungsgebiet Oberammergau

Bezeichnung	Bezugsquelle	Datenformat	Auflösung/ Maßstab
DGM 25 (<i>Digitales Geländemodell</i>) Abgeleitete Daten: Hangneigungs-, Exposition- und Beleuchtungskarte	BLVA	ASCII- Punktdateien	50m Maschen- weite
ATKIS-DLM- 25/1 Daten (Vorstufe) (<i>Amtliches Topographisch-Kartogra- phisches Informations-System</i>) Objektbereiche: Siedlung Verkehr Vegetation Gewässer pol. Grenzen	BLVA	DXF- Vektorformat	1:25 000
TK25 Blattnr. 8432 (digitale Topographische Karte)	BLVA	Rasterformat (TIF)	— —
Digitale Forstbetriebskarte u. Inventurpunktdateien	Bay. Staatsforst- verwaltung	SICAD (SQD- Vektorformat)	1: 10 000
Daten aus der Forsteinrichtungs- Datenbank (DB2): GIS-Satztyp: OR: Tabelle Waldort HB: Tabelle Holzbodenfläche FU: Tabelle Waldort-Funktion BK: Tabelle Betriebsklasse VZ: Tabelle Verjüngungsziel IK: Tabelle Inventur-Kreis IB: Tabelle Inventur Baumart	Bayer. Staats- forstverwaltung	ASCII-Format (tabellarische Sachdaten)	— —
GIS-WAS (<i>Geographisches Informationssystem Wasserwirtschaft</i>) für das Einzugsgebiet Giessenbach Hangneigungs-, Standorts- und Vegetationskarte	Bayer. Landesamt für Wasser- wirtschaft	ARC/INFO Vektorformat	1: 5 000
digital erfaßte Geologische Karte Blattnr. 8431 und 8432	LNP&N	ARC/INFO Vektorformat	1: 25 000
Latschenkarte (digitalisierte Latschenkartierung)	LWF	ARC/INFO Vektorformat	1: 10 000
GEORISK Daten (<i>Hangbewegungen im bayerischen Alpenraum</i>)	Bayer. Geologisches Landesamt	ArcView Vektorformat	1: 25 000
Hanglabilitätskarte (für einen Teilbereich des Unter- suchungsgebietes Oberammergau)	LWF	ARC/INFO Vektorformat	1: 10 000
Almen und Alpen in Bayern (<i>Übersichtskarte</i>)	STMELF, LBP	ARC/INFO Vektorformat	1 : 25 000

Außer diesen Vektor-Datensätzen standen für das Untersuchungsgebiet auch Bild-Datensätze zur Verfügung, die in der Tabelle 3.2 aufgelistet und beschrieben werden.

Tab. 3.2: Bilddaten des Untersuchungsgebietes Oberammergau

Bezeichnung	Beschreibung	Bezugsquelle	Datenformat	Geometr. Auflösung
Orthophotos	Digitale Ortho- luftbilder vom 01.10.96	BLVA	TIFF	0.8 m
IRS-1C (LISS) Satellitenbilddaten	Szenen vom 07.02., 07.06. und 11.09.97	EUROMAP (GAF)	BSQ	23,5 m
SPOT IV (HRV- MS) Satellitenbilddaten	Szene vom 21.06.98	GAF	DAT	20 m

Für das Projekt erwiesen sich insbesondere die Daten der Forsteinrichtung sowie die Daten des Bayerischen Landesvermessungsamts als zentrale und wichtigste Lieferanten von Geo-Informationen. Deshalb soll auf diese Daten in den folgenden Kapiteln ausführlicher eingegangen werden.

3.2.3.1 Der Datenbestand der Forsteinrichtung

Aufgabe der mittel- und langfristigen Forstbetriebsplanung (Forsteinrichtung), die in der Regel in periodischen Zeitabständen von 10 Jahren durchgeführt wird, ist es, den Waldzustand zu erfassen, eine Erfolgskontrolle des bisherigen Betriebsvollzuges durchzuführen und mittelfristig Maßnahmen für den kommenden Zeitabschnitt zu planen. Die hierbei gewonnenen Daten werden in der Forstbetriebskarte bzw. Waldpflege- und Nutzungskarte abgebildet und in einer zentralen Datenbank (DB2) gesammelt, um sie für betriebsübergreifende Auswertungen einzusetzen oder auch um sie den einzelnen Forstämtern zur Verfügung stellen zu können (STMELF 1990).

3.2.3.1.1 Die Forstbetriebskarte (FBK)

Die Forstbetriebskarte stellt die wichtigste Arbeitsgrundlage für den Planungsvollzug in einem Forstbetrieb dar. Auf ihr werden die Pflege- und Nutzungsarten bzw., wie im Falle des Hochgebirges, die Entwicklungsstadien der einzelnen Waldbestände, die im Rahmen der mittel- und langfristigen Forstbetriebsplanung neu festgelegt werden, farblich differenziert dargestellt (STMELF 1990).

Der Bestand bildet die kleinste Bezugseinheit in der Forstbetriebsfläche. Dieser kann als ein Kollektiv von Bäumen definiert werden, das eine weitgehend einheitliche, waldbauliche Bewirtschaftung ermöglicht (LOTHER & NEFT 1994).

Die in der Forstbetriebskarte enthaltenen Elemente kann man in drei Kategorien gliedern:

Ständiges Detail: Hierzu zählen die Staatswaldgrenze, die im allgemeinen dauerhafte bzw. lang bestehenden Waldeinteilungen der Forstbetriebsfläche (Distrikte, Abteilungen), das Wegenetz sowie sonstige Verkehrsanlagen.

Unständiges Detail: Darunter versteht man die neu aufzunehmenden Waldeinteilungen (Unterabteilungs- und Bestandesgrenzen), welche Veränderungen unterworfen sind, mit den dazugehörigen Flächeninformationen sowie Rückewegen, Schneisen usw.

Generelles Detail: Dies sind Grundelemente der Basiskarte (Umgebungsdetail = Grundriß und Gewässer der TK25), mit Elementen der Geländedarstellung wie z.B. Höhenlinien und Felssignaturen, die als Hintergrundinformation dienen.

Bei der langfristigen Forstbetriebsplanung erfolgt eine periodische Überprüfung des ständigen Details und eine Neuaufnahme des unständigen Details.

Der Erfassungsmaßstab der Forstbetriebskarte liegt bei 1 : 10 000, wobei ein gültiger Maßstabsbereich von 1 : 5 000 bis 1 : 15 000 angegeben wird, innerhalb dessen eine lineare Skalierung der Daten erfolgen kann, ohne eine Generalisierung vornehmen zu müssen. Außerhalb dieses Bereiches kann nach LOTHER (1996) eine grundrißtreue Darstellung der in der Forstbetriebskarte enthaltenen Elemente nicht mehr gewährleistet werden.

Die digitale Forstbetriebskarte wird seit 1992 im FORST-GIS der Bayerischen Staatsforstverwaltung als Vektordatensatz erfaßt. Dabei sind die jeweiligen Oberforstdirektionen für die Digitalisierung der Daten verantwortlich. Die Kartenfertigung sowie der Aufbau einer bayernweiten Forstdatenbank wird dagegen zentral an der Kartographischen Anstalt des Bayer. STMELF durchgeführt (LOTHER & NEFT 1994).

Bei der Ersterfassung der Daten wird mit der manuellen Digitalisierung des ständigen Details aus den analogen Vorlagen begonnen. Dabei wird die Staatswaldgrenze aus Flurkarten im Maßstab 1 : 5 000 entnommen. Anschließend werden die restlichen Elemente des ständigen Details anhand vorliegender (alter) Vorgaben aufgenommen, wobei z.B. beim Wegenetz noch zusätzlich Luftbildkarten für die Erfassung neuer bzw. für die Lagekorrektur bestehender Wege herangezogen werden können. Die erhobenen Daten aus der Forsteinrichtung (unständiges Detail) werden dann schließlich von den verwendeten Vorlagen (Begangspausen) manuell abdigitalisiert. (LOTHER & NEFT 1994).

Zusätzlich zur Überprüfung bzw. Neuaufnahme des ständigen und unständigen Details werden im Rahmen der Forsteinrichtung auch Bestandsbeschreibungen vorgenommen, die weitere Information für die Planung liefern. Hier finden sich Angaben, welche die einzelnen Bestände betreffen, wie z.B.:

Bestandsform, Bestandsalter, Altersklasse, Pflegedringlichkeit, Verjüngungsdringlichkeit, Bestockungsziel, Bestandsschichtung, Bestands-schlußgrad, Waldort-Funktionsart und Tauglichkeitsgrad der Schutz- und Erholungsfunktion.

Im Rahmen des Projektes wurden von der Bayerischen Staatsforstverwaltung folgende Daten aus der Forsteinrichtungsdatenbank (DB2) in tabellarischer Form (ASCII-Format) zur Verfügung gestellt:

- Tabelle Waldort bzw. Bestand (GIS-Satztyp "OR")
- Tabelle Holzbodenfläche (GIS-Satztyp "HB")
- Tabelle Waldort-Funktionen (GIS-Satztyp "FU")
- Tabelle Betriebsklasse (GIS-Satztyp "BK")
- Tabelle Verjüngungsziel (GIS-Satztyp "VZ")

3.2.3.1.2 Die Daten der Waldinventur

Zu dem Datenbestand der Forsteinrichtung zählen neben der Forstbetriebskarte auch die Daten der Waldinventur.

Die betriebsweise Stichprobeninventur (Waldinventur) dient zur zuverlässigen Beurteilung der nachträglichen Ertragsleistung eines Forstbetriebes, indem sie wichtige Informationen zur Ermittlung des Holzvorrats und des Zuwachses liefert (StMELF 1990).

Im Hochgebirge erfolgt i.d.R. noch eine Schutzwaldinventur, die zum Ziel hat, die Bestockung insbesondere hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung der Schutzfunktionen zu überprüfen (StMELF 1990).

Die Probeflächen der Stichprobeninventur sind anhand eines regelmäßigen Gitters festgelegt, so daß die Aufnahme der Inventurpunkte im gleichen Abstand zueinander erfolgt. Kartengrundlage für die Waldinventur ist die Forstbetriebskarte im Maßstab 1 : 10 000.

Für die systematisch festgelegten Inventurpunkte werden u.a. folgende Daten erhoben bzw. abgeleitet:

vorkommende Baumarten, Flächenanteile der einzelnen Baumarten, Durchschnittsalter, Bonität, Bestockungsgrad, mittlere Baumhöhe und Brusthöhendurchmesser (BHD), Stammzahl, Vorrat und Zuwachs sowie Angaben über den Standort.

Von der Bayerischen Staatsforstverwaltung wurden aus der Forsteinrichtungsdatenbank (DB2) bezüglich der Waldinventur folgende, stichpunktartig an den Inventurpunkten erhobene Daten in tabellarischer Form (ASCII-Format) zur Verfügung gestellt:

- Tabelle Inventur-Baumart (GIS-Satztyp "IB")
- Tabelle Inventur-Kreis (GIS-Satztyp "IK")

3.2.3.2 Die ATKIS-Daten

Das bundeseinheitliche Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS), welches für das Gebiet des Freistaates Bayern vom Bayerischen Landesvermessungsamt (BLVA) erstellt wird, entspricht inhaltlich dem Informationsgehalt der Topographischen Karte im Maßstab 1 : 25 000 (TK 25). Die ATKIS-Daten sind in einer ersten Erfassungsstufe (ATKIS-Vorstufe) flächendeckend für Bayern verfügbar. Sie umfassen folgende Objektbereiche (BLVA 1999):

- Siedlung (Ortslagen, -namen und -symbole)
- Verkehr (Autobahnen, Bundes-, Staats-, Kreis- und Gemeindestraßen, Wege und Bahnlinien)
- Vegetation (Waldflächen; weitere Nutzungsarten lagen nicht vor)
- Gewässer (1., 2. und 3. Ordnung)
- Relief (Digitales Geländemodell, DGM 25)
- Gebiete (politische Grenzen: Regierungsbezirke, Landkreise, Gemeinden sowie Gemarkungsgrenzen)

Ihre geometrische Lagegenauigkeit wird vom Landesvermessungsamt mit etwa 10 - 20 m angegeben, wobei hierfür sowie für die Detailschärfe wiederum die Topographische Karte 1 : 25 000 (TK25) maßgebend ist (BLVA 1999). Die Ersterfassung der ATKIS-Daten beruht auf manuellem Digitalisieren der analogen Vorlage (TK25), wobei für die Laufenthaltung und weitere Fortführung bzw. Überführung der Daten der ATKIS-Vorstufe in das objektstrukturierte ATKIS-DLM 25/1 (welches zum Projektende noch nicht vorlag) Orthophotos eingesetzt werden. Eine flächendeckende Aktualisierung soll nach Angaben des BLVA mindestens alle 5 Jahre erfolgen.

3.2.3.3 Das Digitale Geländemodell (DGM 25)

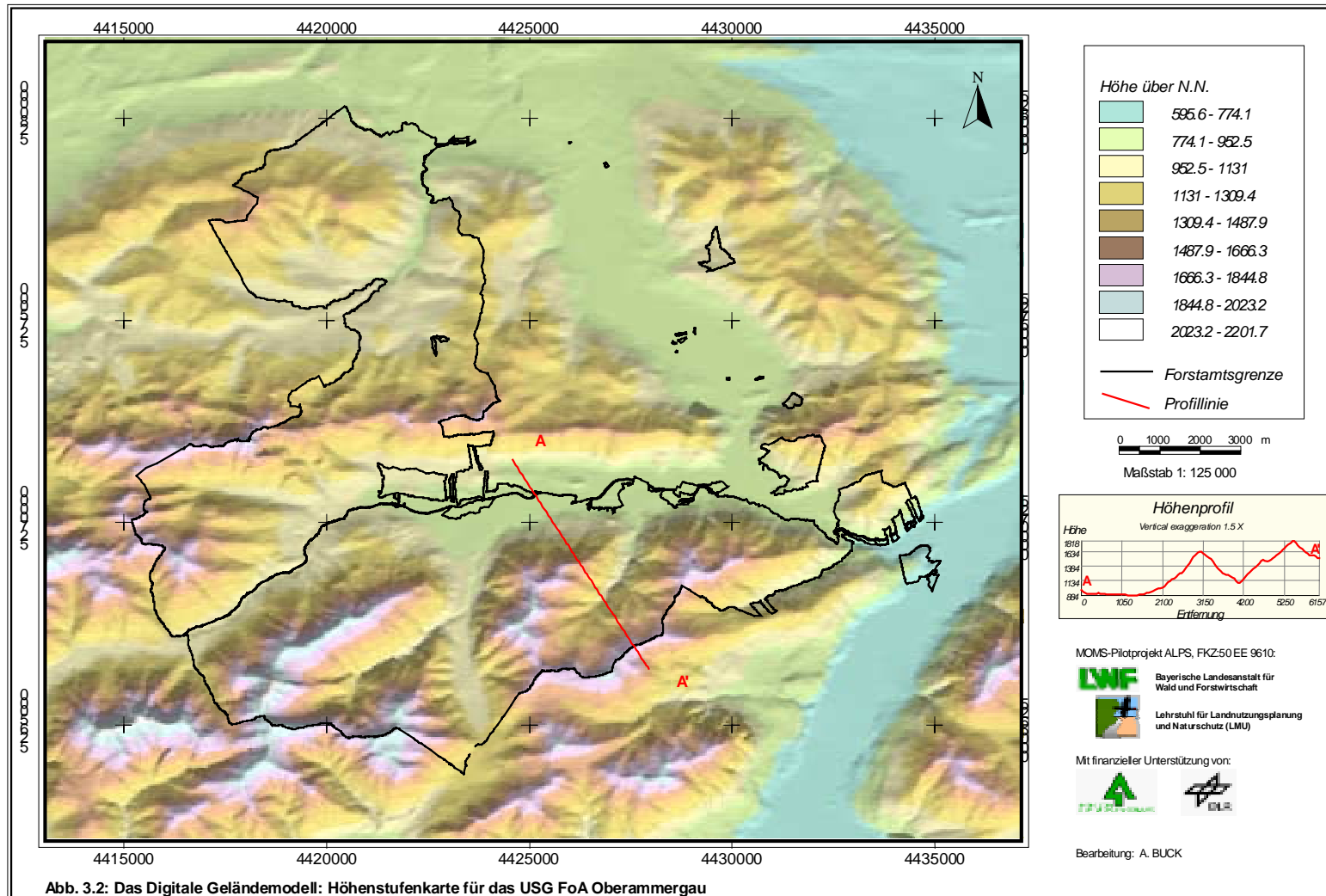
Das für das Untersuchungsgebiet Oberammergau vorliegende Digitale Geländemodell (DGM) wurde als ASCII-Datensatz über das Bayer. Landesvermessungsamt (BLVA) bezogen. Wie auch die ATKIS-Daten (vgl. Kap.3.2.3.2), wurde es auf Grundlage der Daten der Topographischen Karte 1 : 25 000 erstellt, die daher auch für Auflösung und Genauigkeit maßgebend ist. Die Höhengenaugigkeit wird vom BLVA mit $\pm 2 - 3$ m

angegeben, wobei in Waldgebieten auch größere Ungenauigkeiten auftreten können (BLVA 1999).

In der Literatur herrscht Uneinigkeit über die Bezeichnung digital gespeicherter Geländehöhen­daten (vgl. dazu HOFMANN 1986). Es wird hierfür sowohl der Begriff „Digitales Geländemodell (DGM)“ als auch „Digitales Höhenmodell (DHM)“ verwendet. Da aber unter „DHM“ bisweilen außer Erdoberflächen-Modellen auch andere digitale Oberflächenmodelle verstanden werden, soll hier im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich der Begriff „DGM“ verwendet werden.

Mit der zur Verfügung stehenden Software ARC/INFO (vgl. dazu Kap. 3.2.2) konnte aus dem als ASCII-Tabelle vorliegenden Punkt-Datensatz, nach einer Konvertierung in ein für das verwendete GIS-Programm lesbares Format, ein TIN (Triangulated Irregular Network) berechnet werden³. Anschließend wurde davon ein regelmäßiges Rasterbild (im ARC/INFO GRID-Format) mit einer Auflösung von 50 m x 50 m abgeleitet (s. Abb. 3.2). Für jeden einzelnen Rasterpunkt waren somit die x- und y-Koordinaten, welche die Lage als Rechts- und Hochwert ausdrücken, sowie die z-Koordinate für die Geländehöhe bekannt.

³ Bei dem hier angewendeten Interpolationsalgorithmus nach der Triangulationsmethode von DELAUNAY wird die Erdoberfläche als ein irreguläres Netz aus benachbarten, sich nicht überschneidenden Dreiecksstrukturen dargestellt. Diese Methode stellt die Forderung, daß ein durch die drei Eckpunkte eines Dreiecks gezeichneter Kreis keinen anderen Punkt beinhalten darf. Das führt dazu, daß die Punkte mit ihren zwei nächsten Nachbarn verbunden werden, um ein Dreieck zu bilden (vgl. dazu ARC/INFO Online-Hilfe bzw. entspr. Programmhandbücher).



3.3 Verwaltung und Überprüfung der bestehenden Datenbasis

Obwohl das Nutzen bereits digital vorhandener Datensätze große Vorteile wie Kosten- und Zeitersparnis mit sich bringt, darf die Verifikation des Datenbestandes in bezug auf die Qualität, d.h. die Eignung und Zuverlässigkeit der jeweiligen Daten, wie auch auf die Kompatibilität dieser zu den anderen, im GIS-Datenpool integrierten Datensätzen nicht außer Acht gelassen werden. Aufgrund der großen Bedeutung dieser Problematik wurden für den Aufbau eines Projekt-GIS für das Untersuchungsgebiet Oberammergau, gemäß den anfangs formulierten Zielen, raumbezogene Daten vor der Verwendung in einem Geo-Informationssystem hinsichtlich ihrer Qualität sowie ihrer Kompatibilität zum restlichen, dort integrierten Datenbestand überprüft.

Geo-Informationssysteme haben in den letzten Jahren zunehmende Verbreitung erfahren und hielten Einzug in öffentliche Verwaltungen, Behörden und private Unternehmen, die sich mit Landnutzungsplanung und raumbezogenen Fragestellungen auseinandersetzen. Der damit einhergehende Anstieg an Nachfrage und Verfügbarkeit digitaler Datensätze erfordert eine vollständige und präzise Beschreibung der Qualität dieser Datensätze, denn die Qualität der Geo-Daten spiegelt sich auch direkt in der Qualität der darauf basierenden Entscheidungen wider.

Eine optimale Datenqualität ist gleichzusetzen mit einem Qualitätsniveau, das zur Bearbeitung der Aufgabenstellung ausreicht (ARONOFF 1995). Die Qualitätsanforderungen sind von der Fragestellung und dem Verwendungszweck der Daten abhängig und richten sich nicht nach dem Grundsatz: *so gut wie nur möglich*, sondern folgen der Maxime: *so gut wie nötig*. Es hat wenig Sinn, für Untersuchungen, die globale Phänomene zum Thema haben, eine Genauigkeit anzustreben, die kleinräumige Strukturen noch erkennen läßt. So dürfte z.B. für die Beurteilung der Gesamtertragsleistung im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Planung von Forstbetrieben die Lagegenauigkeit der zu diesem Zweck aufgenommenen Probeflächen eine andere Bedeutung haben, als bei der Planung von Infrastrukturmaßnahmen (z.B. Straßenbau oder Gebäudeerrichtung), zu der eine exakte Ortung der erhobenen Standortparameter notwendig ist. Als weiteres Beispiel ist zur Ermittlung der Niederschlagsverteilung eines Gebietes eine mit den heute zur Verfügung stehenden Techniken mögliche, genaue Positionierung der Meßpunkte im cm-

Bereich für das Ergebnis irrelevant. Es ist deshalb sehr wichtig, sich über die Fragestellung im klaren zu sein, um die Qualitätsansprüche darauf abzustimmen.

Die Arbeit, die zum Erreichen einer hohen Datenqualität nötig ist, muß also immer in Relation zum jeweiligen Nutzen stehen. Denn hohe Datenqualität ist nicht nur mit einem größeren Zeitaufwand, sondern auch mit höheren Kosten verbunden. Das Verhältnis der Steigerung der Datenqualität zum damit verbundenen Kostenanstieg ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Der exponentielle Verlauf der Kurve macht deutlich, daß es ab einem bestimmten Punkt sehr teuer wird, um einen vergleichsweise geringen Zuwachs an Datenqualität zu erreichen (vgl. ARONOFF 1995).

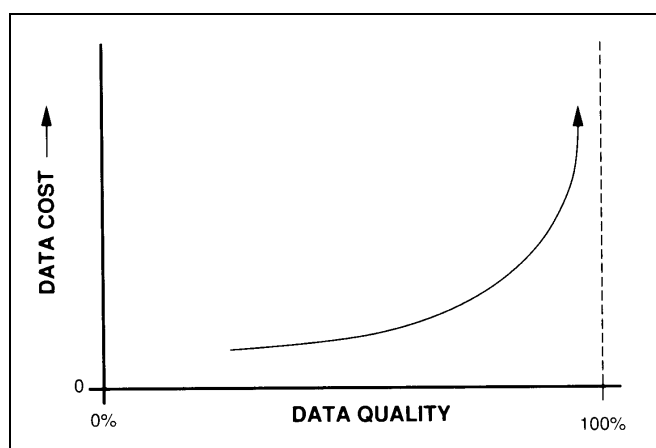


Abb. 3.3: Beziehung zwischen Datenqualität und Datenkosten (ARONOFF 1995)

Da sich die Qualitätsanforderungen nach den jeweiligen Fragestellungen richten müssen oder, im umgekehrten Fall, die Kenntnisse über die Datenqualität oder Genauigkeiten der im GIS integrierten Datensätze die Einschätzung ermöglichen soll, für welche Untersuchungen sich diese eignen, ist es von großer Bedeutung, die möglichen Ursachen eines Qualitätsverlustes zu kennen.

Der Qualitätsverlust durch Fehler und Ungenauigkeiten im Datenbestand z.B. kann seinen Ursprung in allen Einzelschritten der Verwendung eines Geo-Informationssystems haben, die von der Datenerfassung über die Verarbeitung bis hin zur Datenausgabe reichen (s. Tab. 3.3).

Tab.3.3: Verbreitete Fehlerquellen in der Verwendung von GIS (nach ARONOFF 1995, verändert)

Stadium	Fehlerquelle
Datenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • Fehler bei der Erhebung von Daten im Feld • Fehler in bestehenden Kartengrundlagen • Fehler bei der Analyse von Fernerkundungsdaten
Dateneingabe	<ul style="list-style-type: none"> • Ungenauigkeiten bei der Digitalisierung, verursacht durch den Bearbeiter oder durch die technische Ausstattung • Ungenauigkeiten, die in der Natur der geograph. Elemente liegen (wie z.B. bei Waldgrenzen, die keinen scharfen Rand, sondern fließende Übergänge bilden)
Datenverwaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Ungenügende numerische Präzision (limitierender Faktor: bit Speichergröße) • Ungenügende räumliche Genauigkeit bzw. Auflösung (limitierender Faktor: Pixelgröße)
Datenmodellierung	<ul style="list-style-type: none"> • Ungeeignete Klassenintervalle und -einteilungen • Fehler durch nicht übereinstimmende Objektgrenzen (Randfehler) • Fehlerfortpflanzung bei der Kombination von mehrfachen Überlagerungen • „Slivers“, welche bei Überlagerungsprozeduren von Polygonlayers entstehen
Datenausgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Skalierungsungenauigkeiten • Fehler, die durch die Ungenauigkeiten der Ausgabevorrichtung verursacht werden • Fehler, welche durch die Instabilität des Ausgabemediums verursacht werden
Verwendung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Die Information kann falsch verstanden werden • Die Information kann unsachgemäß verwendet werden (Ergebnisse falsch interpretiert)

Über die Qualität von Daten können sowohl geometrische wie auch thematische Eigenschaften der abgebildeten Objekte Auskunft geben. In den nachfolgenden Kapiteln sollen daher diese beiden Aspekte der Qualitätsprüfung diskutiert und anhand von Beispielen aus dem Datenbestand des Projekt-GIS Oberammergau genauer erläutert werden.

3.3.1 Geometrische Genauigkeit oder Lagegenauigkeit

Die geometrische Genauigkeit beschreibt die Genauigkeit, mit der die Lage und die Form der dargestellten Objekte der realen Welt wiedergegeben werden.

Der Anspruch an die Lagegenauigkeit der raumbezogenen Daten hängt neben der Fragestellung (vgl. Kap. 3.3) auch von der Art und Natur der betrachteten Daten ab. So weisen z.B. Vegetations- und Bodenkarten schon allein aus dem Grund, daß es sich dabei um die Darstellung der Verbreitung natürlicher Phänomene mit kontinuierlichen Übergängen handelt, andere Lagegenauigkeiten auf, als z.B. topographische Karten mit klar definierten und auffindbaren Objekten, deren Abgrenzung und Festlegung nicht im Ermessensspielraum des Kartierers und dessen Sachkenntnis liegt (BURROUGH & McDONNELL 1998).

Das Problem der geometrischen Lageungenauigkeiten der einzelnen Datensätze gewinnt zunehmend an Bedeutung, wenn man sich das Projektziel, nämlich die Kombination und Integration von Fernerkundungsdaten in einem Geographischen Informationssystem, vor Augen hält. Nur durch eine übereinstimmende Lagebeziehung wird gewährleistet, daß die einzelnen Datensätze miteinander verknüpft werden können.

Die Überprüfung der Daten für das Untersuchungsgebiet Oberammergau hinsichtlich geometrischer Qualität und Konsistenz wurde z.T. durch das Einmessen von GPS-(Globales Positionierungssystem)⁴ Punkten im Feld vorgenommen. Beabsichtigt war, eine Referenzgrundlage für voneinander abweichende Datensätze zu schaffen. Im Projektgebiet Oberammergau bestehen z.T. beachtliche Abweichungen zwischen den Daten der digitalen Forstbetriebskarte (FBK) und den ATKIS-Daten des Landesvermessungsamtes (vgl. dazu Kap. 3.3.4.3). Bereiche, in denen die beiden Geodatensätzen besonders stark divergierten, wurden aufgesucht, um dort mit Hilfe eines GPS Kontrollpunkte zu setzen. Die gemessenen

⁴ Unter GPS (Global Positioning System) versteht man ein satellitenbasiertes Navigationssystem, das z.Z. aus 24 Satelliten in geostationären Erdumlaufbahnen besteht. Durch den Empfang der von den Satelliten weltweit ausgestrahlten Signale ist es möglich, über Triangulationsberechnungen die genaue Position zu bestimmen. Dabei ist für die Berechnung der Lagekoordinaten eines Standpunktes der Signalempfang von mindestens drei und zur Bestimmung der Höhe von mindestens vier Satelliten erforderlich (vgl. dazu BILL 1999a, LILLESAND & KIEFER 2000).

Koordinaten dieser Kontrollpunkte, die im Gelände eindeutig identifizierbar sein mußten, wurden dann mit den Koordinaten der in beiden Datensätzen voneinander abweichenden Punkte verglichen.

Eine endgültige Überprüfung des Datenbestandes erfolgte durch den Abgleich mit digitalen Orthophotos des Landesvermessungsamtes. Orthophotos sind nach photogrammetrischen Verfahren entzerrte Luftbilder und bilden die lagegenaueste, zur Verfügung stehende Grundlage. Ihre Genauigkeit wird vom Landesvermessungsamt mit ≤ 2 m angegeben. Im Waldgebiet können jedoch höhere Fehlerwerte auftreten (BLVA 2000, mündliche Mitteilung). Für das Untersuchungsgebiet Oberammergau standen Bilder einer Befliegung vom 01.10.1996 im Maßstab 1 : 10 000 mit einer Rasterauflösung von 80 cm zur Verfügung. Nach ihrem Einbau in das GIS wurden sie als Referenz zur Verifizierung der Datensätze herangezogen, um so Aussagen über das Genauigkeitsmaß und die Zuverlässigkeit der einzelnen, in die Analysen eingebrachten Daten zu erbringen. Die Ergebnisse der Qualitätsüberprüfung werden im Einzelnen im Kap. 3.3.4 dargestellt.

Eine im Rahmen dieser Arbeit angewandte Methode zur Überprüfung der Lagegenauigkeit von Elementen eines Datensatzes, ist die Berechnung der *mittleren quadratischen Abweichung*, des „root mean square error“ (RMS). Diese Methode wird in der Regel in der Photogrammetrie und Fernerkundung bei der Georeferenzierung zur anschließenden Georektifizierung von Bilddaten herangezogen. Der RMS-Fehler stellt eine Größe dar, der die Lageabweichung zwischen eindeutig identifizierbaren Kontrollpunkten im geometrisch korrekten Referenzbild und den entsprechenden Paßpunkten im zu überprüfenden bzw. zu korrigierenden Bild erfaßt. Mit Hilfe der Koordinaten dieser Verknüpfungspunkte wird folglich über die gewählte Transformationsgleichung des Rektifizierungsprozesses die Entfernung berechnet, die notwendig ist, um die Eingangsdaten in die vom Referenzbild vorgegebene, geometrisch korrekte Lage zu bringen. Hohe RMS-Fehler geben somit Auskunft darüber, daß die beiden Bildpunkte nicht gut übereinstimmen. Eine ausführliche Darstellung dieser Methode findet sich u.a. bei LILLESAND & KIEFER (2000) und RICHARDS & JIA (1999).

Für die ATKIS-Daten existieren keine Aussagen, inwieweit die Genauigkeitsangaben zu den Datensätzen verifiziert werden können (vgl. BILL 1999b). Dieses Informationsdefizit bezüglich der Qualität von Geodaten ist im europäischen Raum generell vorhanden. Das Europäische Institut für Normung (CEN) befaßt sich daher zur Zeit mit der Aufgabe,

Standards im Bereich der Geoinformation zu entwickeln. Dazu wurde das Technische Komitee CEN/TC287 gegründet, mit dem Auftrag, u.a. Normen zur Qualitätssicherung und Genauigkeitsabschätzungen für die benötigte Geoinformation zu entwickeln. Auf internationaler Ebene werden diese Normbestrebungen in der ISO/TC 211 verankert, die wiederum von dem Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) übernommen und gegebenenfalls weiterverarbeitet werden sollen. Die Ergebnisse dieser Standardisierung liegen gegenwärtig im wesentlichen nur als Entwurfsfassung vor. Die endgültigen Richtlinien sind noch in Vorbereitung.

In manchen Ländern haben jedoch staatliche Institutionen, so z.B. der Geological Survey in den USA, bereits Genauigkeitsstandards für die Verwendung sowohl analoger als auch digitaler, raumbezogener Daten definiert. Die Anforderungen, die hierbei an die Lagegenauigkeit gestellt werden, sind abhängig vom jeweiligen Erfassungsmaßstab. Für Karten mit einem Maßstab von 1 : 20 000 oder größer sollten demnach nicht mehr als 10% der gesetzten Kontrollpunkte einen Fehler von mehr als 1/30 inch gemessen am jeweiligen Maßstab aufweisen. Bei Datensätzen mit einem Maßstab kleiner als 1 : 20 000 ist die Grenze bei 1/50 inch gesetzt. Im Fall der Forstbetriebskarte, die im Maßstab 1 : 10 000 vorliegt, würde das einen maximal erlaubten Fehler von 8,47 m bedeuten. Bei den ATKIS-Daten im Erfassungsmaßstab 1 : 25 000 würde der zulässige Fehler 12,7 m betragen.

Mögliche Ursachen für Lageungenauigkeiten stehen, wie bereits in Kap. 3.3 beschrieben, in Zusammenhang mit den einzelnen Bearbeitungsschritten bei der Verwendung eines GIS. So können Fehler schon bei der Erfassung (s. Tab. 3.3), aber auch bei der Verwaltung bis hin zur Modellierung und Ausgabe von raumbezogenen Daten entstehen.

3.3.2 Inhaltliche oder thematische Genauigkeit

Die thematische Genauigkeit bezieht sich auf Fehler, die von einer falschen oder fehlenden Attributierung der raumbezogenen Elemente herrühren.

Nach BILL (1999a) beinhaltet die Verifikation eines Datenbestandes die Prüfung auf Vollständigkeit, Zuverlässigkeit, Eindeutigkeit und Korrektheit der Daten. Übertragen auf die thematische Genauigkeit bedeutet dies,

- daß Attributbeschreibungen aller, ins GIS überführten Objekte vorhanden sein müssen,
- daß die Attribut- oder Klassenbeschreibungen mit den zugeordneten Objekten übereinstimmen,
- daß jedes Objekt in der Attribut- oder Sachbeschreibung im Sinne einer 1:1 oder n:1 Beziehung nur einmal vorkommt und
- daß die den Objekten zugeordnete, beschreibende Information inhaltlich richtig ist.

Letzteres bezieht sich z.B. auf Meßfehler, die nicht das Ergebnis eines falschen Eintrags bei der Datenübertragung bzw. Datenzuordnung sind, sondern bereits bei der Datengewinnung im Feld oder Labor entstanden.

Die Beurteilung der thematischen Ungenauigkeiten hängt vom untersuchten Datentyp ab:

Bei Vektordatensätzen handelt es sich dabei meist um falsche oder fehlende Einträge in der Attributtabelle der jeweiligen Punkt-, Linien- oder Flächenobjekte. Vektordatenmodelle versuchen die Wirklichkeit anhand dieser drei geometrischen Grundelemente zu beschreiben. Sie haben den Nachteil, daß sie die reale Welt als scharf voneinander getrennte, in sich homogene Flächen darstellen. Das führt nach GOODCHILD (1994) dazu, daß eine Überprüfung der Attributgenauigkeit allein dahingehend erfolgt, ob einer Fläche oder einem Polygon die richtige Klasse zugewiesen wurde, wodurch die Heterogenität, als Ergebnis sich kontinuierlich verändernder Eigenschaften, außer Acht gelassen wird. Für eine bekanntermaßen heterogene Fläche wird als „korrekte“ Klasse die häufigste Klasse angenommen. Es erfolgt jedoch keine Einschätzung über das Vorkommen anderer Klassen innerhalb des Polygons.

Zur Aufdeckung von Attributierungsfehler können u.a. raumbezogene Analysen in Form einer Plausibilitätsuntersuchung durchgeführt werden. Dabei werden Grundverschneidungen von Daten gleichen Inhalts vorgenommen, mit dem Ziel, diese miteinander zu verknüpfen, um eventuelle Abweichungen zu erkennen. Ein Beispiel hierfür ist in Kap. 3.3.4.4 gegeben. Aber auch durch Probeplots können z.B. fehlende Attributzuweisungen leicht identifiziert werden (vgl. hierzu CASPARY 1992).

Auch bei Rasterdaten kann man von Attributgenauigkeit sprechen. Hier wird in der Regel der Wert, der einer Rasterzelle oder einem Pixel zugeordnet ist, als Attributinformation

angesehen. Diese Attributswerte können **diskreter** oder **kontinuierlicher** Natur sein. Bei ersteren entspricht die Attributgenauigkeit einer Klassifikationsgenauigkeit bzw. der Richtigkeit, mit dem ein Pixel einer Klasse zugeordnet wurde. Typisches Beispiel hierfür sind Landnutzungsklassifikationen als Ergebnis der Interpretation von Satellitenbildern.

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Pixel einer falschen Klasse zugeordnet wird, hängt vom Unterschied bzw. von der Trennbarkeit der spektralen Signaturen der jeweiligen Klassen ab. Die Methoden zur Überprüfung der Klassifikationsergebnisse stammen vorwiegend aus dem Anwendungsbereich der Fernerkundung und der Bildverarbeitung. Die Ermittlung der Fehler bei der Attribut- bzw. Klassenzuweisung kann z.B. durch einen stichprobenartigen Vergleich mit unabhängig davon gewählten Kontrollpunkten erfolgen, deren Klassen bei einer Geländebegehung oder anhand von Referenzmaterial im Sinne eines „ground truth“ eindeutig bestimmbar waren. Die ermittelten Klassen der Stichproben werden den tatsächlich vor Ort vorkommenden, eindeutig bestimmten Klassen gegenübergestellt. Die Anzahl der Pixel der jeweiligen Stichprobe werden dabei in Form einer Fehlermatrix, auch als „confusion matrix“ bekannt, dargestellt und interpretiert.

Eine andere, oft verwendete Methode, die einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der Qualität einer pixelbasierten Klassifikation liefert, ist die statistische Berechnung des Cohen´s Kappa-Koeffizienten. Die möglichen Werte schwanken hier zwischen 0 und 1. Je mehr sich der Koeffizient an 1 annähert, desto genauer ist die Klassifikation. Für eine weitergehende Beschreibung dieser und weiterer Methoden zur Bestimmung von Klassifikationsgenauigkeiten wird auf zahlreiche Fernerkundungspublikationen verwiesen (vgl. dazu RICHARDS & JIA 1999, LILLESAND & KIEFER 2000, GOODCHILD 1994)

Neue Möglichkeiten bei der Ermittlung von Klassifikationsfehlern eröffnen sich durch das hier im Rahmen der Arbeit untersuchte objektbasierte Klassifikationsverfahren (s. Kap. 4.4). Für jedes klassifizierte Objekt kann die Sicherheit, mit der dieses spezifische Objekt einer bestimmten Klasse zugeordnet wurde, angegeben werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Lage der unsicher klassifizierten Flächen zu lokalisieren. Im Gegensatz dazu können bei den konventionellen pixelbasierten Verfahren nur Angaben von Klassifikationsgenauigkeiten für das gesamte Gebiet bzw. einer Gesamtklasse gemacht werden (= *overall accuracy*). Der Vorteil gegenüber dem vektorbasierten Verfahren liegt wiederum darin, daß der Heterogenität oder der natürlichen Variation eines Merkmals innerhalb einer bestimmten Fläche, Rechnung getragen werden kann. Erreicht wird dies

hier durch die Verwendung von „Fuzzy-Logik“ während der Klassifizierung und der damit verbundenen Definition von Zugehörigkeitsfunktionen für jede Klasse (s. Kap. 4.3.2).

Besitzt ein Objekt, um ein Beispiel aus dem Forstbereich zu nennen, neben Nadelwald auch größere Anteile an Laubbaumarten, ist aber durch die dominierende spektrale Signatur als Nadelwald klassifiziert worden, so handelt es sich in diesem Fall um eine relativ unsichere Klassenzuweisung, die aber bei herkömmlichen pixelbasierten Klassifizierungsverfahren allein anhand der Klassenzuweisung nicht erkennbar ist. Im Falle des objektorientierten Ansatzes kann jedoch, anhand des für das Objekt errechneten, niedrigen Zugehörigkeitswerts zur Klasse Nadelwald geschlossen werden, daß es sich nicht um einen Nadelholzreinbestand, sondern lediglich um einen von Nadelbaumarten dominierten Bestand handeln muß. Durch die Angaben der restlichen Klassenzugehörigkeitswerte, z.B. Angaben über die zweit- und drittbeste Klassenzuweisung, können sogar Rückschlüsse gezogen werden, mit welchen weiteren Klassen Verwechslungsmöglichkeiten aufgrund großer Ähnlichkeiten bestehen.

Daraus ergeben sich für den Anwender bzw. Bearbeiter in zweierlei Hinsicht wichtige, zusätzliche Informationen, welche bei den klassischen Klassifikationsverfahren bisher nicht zur Verfügung stehen:

1. einen Anhaltspunkt über die Zuverlässigkeit einer Klassenzuordnung (handelt es sich um einen Reinbestand oder können andere Baumarten im Bestand vertreten sein bzw. ist eine Verwechslung mit anderen Baumarten wahrscheinlich)
2. die genaue Lokalisierung von Objekten geringer oder hoher Zuverlässigkeit (um welche Flächen handelt es sich), was dann die Chance beinhaltet Objekte mit geringer Zuverlässigkeit zusätzlich zu kontrollieren.

Bei Rasterdaten mit **kontinuierlichen** Attributinformationen, wie z.B. digitalen Geländemodellen (DGM), in denen die Information der Höhe anhand kontinuierlicher Grauwertzuweisungen dargestellt wird, können Fehler und somit Qualitätsverluste bei der Interpolation der Ausgangsdaten erfolgen. Zur Überprüfung von digitalen Geländemodellen eignet sich z.B. die Berechnung von Höhenkontourlinien, anhand derer grobe Fehler gut erkennbar werden (s. Kap. 3.3.4.5).

Die in einem digitalen Geländemodell auftretenden Mängel können unterschiedlicher Natur sein. So ist es möglich, daß im Datensatz z.B. vereinzelt Störeinflüsse, wie Streifenstrukturen in Zeilen- oder Spaltenrichtung auftreten oder es können auch Bildpunkte gegeneinander in x- bzw. y-Richtung versetzt sein. Korrekturverfahren hierfür könnten darin bestehen, daß fehlerhafte Bildelemente, im Falle einer zweipixelbreiten Fehlzeile, durch das Kopieren z.B. der oberen Nachbarzeile und der anschließenden Mittelwertbildung dieser verdoppelten Zeile mit der unten angrenzenden Bildzeile ersetzt werden (vgl. Buck 1996). Die Ursachen dieser genannten Fehler können in der Datenüberspielung liegen oder bereits bei der Generierung des DGMs entstehen.

Probleme anderer Art sind z.B. künstliche Höhensprünge, die im Höhenmodell eine scharfe Kante bzw. eine Terrasse verursachen. Die falschen Bildwerte können mit Hilfe von Tiefpaßfiltern, durch die die Umgebung der zu ersetzenden Bildelemente berücksichtigt wird, bearbeitet werden wodurch eine Glättung der Bildstrukturen erreicht wird. Dabei muß natürlich versucht werden, nur die Pixel mit falschen Werten durch die Filteroperationen zu modifizieren, um die Höhenangaben des Originalbildes so gering wie möglich zu verfälschen. Dies kann sowohl durch die Wahl der Filtermatrixgröße erreicht werden als auch dadurch, daß die Größe des Aktionsfeldes für den Filteroperator von vornherein eingegrenzt wird.

Beispiele für thematische oder inhaltliche Fehler, die im Datenbestand für das Untersuchungsgebiet Oberammergau auftraten, werden in den entsprechenden Kapiteln dargestellt.

3.3.3 Einflußfaktoren auf Qualität und Zuverlässigkeit räumlicher Daten

Die wichtigsten Faktoren, welche die Qualität räumlicher Daten beeinflussen, lassen sich in Anlehnung u.a. an ARONOFF (1995), BURROUGH & McDONNELL (1998), CASPARY (1993) und STANEK et al. (1995) wie folgt unterscheiden:

- Herkunft der Daten
- Aktualität
- Gebietsabdeckung und Vollständigkeit
- Maßstab und räumliche Auflösung
- Dichte der Beobachtungen bzw. der Meßpunkte
- Datenformat und -austausch
- Numerische Fehler (rechnerbedingt)

Diese Faktoren, die sich sowohl auf die thematische als auch auf die geometrische Genauigkeit der Daten auswirken, sollen nachstehend im Einzelnen anhand von Beispielen aus den Datensätzen des GIS-Projekts Oberammergau behandelt werden.

3.3.3.1 Herkunft der Daten

Zur Charakterisierung der Datenqualität sind Angaben über die Herkunft der Daten, d.h. Informationen zur Datenquelle bis hin zu Angaben über die Erfassungsmethoden mit einer Beschreibung der einzelnen Bearbeitungs- bzw. Vorverarbeitungsschritte unbedingt erforderlich. Diese Informationen sollten den digitalen Daten als Metainformation beigelegt werden, denn nur so kann eine Einschätzung über die möglichen Fehlerursachen und über die Eignung der Daten für die jeweilige Untersuchung erfolgen. Die Bedeutung der Metainformationen wird dabei um so größer, je mehr Modellierungen der Daten erfolgten.

BINZENHOFER (1997) hebt den Einfluß hervor, den die Wahl der geeigneten Methoden, z.B. bei Datengenerierung oder –bearbeitung, auf die Datenqualität hat und kommt zu dem Schluß, daß dem Benutzer dabei eine besondere Verantwortung zufällt, da durch die Auswahl der Bearbeitungsmethode das zu erzielende Ergebnis in die eine oder andere Richtung bewußt oder unbewußt beeinflusst werden kann. Der Bearbeiter muß deshalb

nicht nur in der Lage sein, das Programm bzw. das verwendete System zu beherrschen, sondern er muß auch wissen, welche Operationen sich hinter jedem Befehl verbergen.

3.3.3.2 Aktualität des Datenbestandes

Es ist eher unwahrscheinlich, daß alle Daten eines GIS-Projektes zum gleichen Zeitpunkt erfaßt wurden (BURROUGH & McDONNELL 1998). Meistens muß man zufrieden sein, wenn die gewünschte Information überhaupt vorliegt. Die Aktualität dieser Information ist zwar gefordert, aber oft nicht gegeben. In der Praxis wird man daher in der Regel mit der Verwendung unterschiedlich alter Daten konfrontiert sein. Hierdurch entstehen Unterschiede zwischen den einzelnen Datensätzen gleicher Gebietsabdeckung und auch die Zuverlässigkeit der Daten wird, je nach Inhalt unterschiedlich rasch, mit ansteigendem Alter abnehmen. So spielt der Zeitpunkt der Erfassung gerade bei Vegetationsaufnahmen oder bei Landnutzungsklassifikationen, als Ergebnis einer Interpretation und Klassifizierung von Fernerkundungsdaten, eine entscheidende Rolle, da diese, z.B. im Gegensatz zu einer geologischen Karte, schnellen Veränderungen unterworfen sind. Der Faktor Zeit beeinflußt also je nach Datentyp stark den Informationsgehalt der jeweiligen Daten, was bei deren Auswertung berücksichtigt werden muß.

Hinsichtlich der Aktualität sind nach CASPARY (1993) u.a. folgende Aspekte zur Beurteilung der Datenqualität und -eignung wichtig:

- Quellendatum
- Erfassungsdatum
- Testdatum
- geschätzte Veränderungsrate
- letzte und nächste Fortführung.

Die Entscheidung, ob Daten aufgrund mangelnder Aktualität für eine Untersuchung verwendet werden können, verbleibt, unter Berücksichtigung des Datentyps, letztendlich beim Nutzer und ist von der bearbeiteten Fragestellung abhängig.

In manchen Fällen kann die Verwendung eines älteren Datensatz auch Vorteile mit sich bringen, nämlich dann, wenn für das Untersuchungsgebiet Daten neueren Datums nur

partiell zur Verfügung stehen und somit keine vollständige Gebietsabdeckung gewährleistet ist.

3.3.3.3 Gebietsabdeckung und Vollständigkeit

Der Vorteil einer Gesamtabdeckung des Untersuchungsgebietes mit den gewünschten Daten und damit einer einheitlichen Datengrundlage ist gegenüber einer gegebenenfalls aktuelleren aber lückenhaften Zusammenstellung von Daten unbedingt Vorrang zu geben (nach ARONOFF 1995). Denn wie bereits erwähnt, kann eine unterschiedliche Gebietsabdeckung der einzelnen, in einem GIS integrierten Datensätze Probleme hervorrufen.

Im konkreten Fall des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gebietes Oberammergau stehen z.B. die digitalen Daten der Forsteinrichtung flächenhaft zur Verfügung. Dagegen sind detaillierte Angaben über Standortverhältnisse, die vom Wasserwirtschaftsamt erhoben wurden, nur für einen kleinen Teilbereich des Untersuchungsgebietes (Wassereinzugsgebiet des Giessenbachs) vorhanden. Die Ergebnisse, die anhand unterschiedlicher Datengrundlagen bzw. für Bereiche unterschiedlicher Informationsdichten entstanden sind, dürfen jedoch nicht direkt miteinander verglichen werden. Für Aussagen, die das ganze Gebiet betreffen, müssen einheitliche Bedingungen und Datengrundlagen herrschen.

3.3.3.4 Maßstab und räumliche Auflösung der Daten

Die Möglichkeit, Datensätze in einem GIS in jedem beliebigen Maßstab präsentieren zu können, verleitet zu der Aussage, daß ein Geo-Informationssystem „maßstabsfrei“ sei. Dies ist nur bedingt richtig. Die meisten, in einem GIS integrierten Datensätze wurden aus analogen Primärdaten abgeleitet und in ein digitales Format gebracht. Sie besitzen also, aufgrund ihrer Quelle, einen Erfassungsmaßstab und sind strenggenommen auch nur für diesen Maßstab oder einem festgelegten Maßstabsbereich konzipiert und zu verwenden (vgl. hierzu Kap. 3.2.3.1.1, Maßstabsbereich der FBK). Es ist wichtig, daß der Maßstab der Quelldaten dem der Untersuchung entspricht. Nur Daten, die einen ähnlichen

Erfassungsmaßstab aufweisen, können miteinander verschnitten werden. Es ist nicht von Nutzen, eine Karte des Maßstabs 1 : 100 000 mit entsprechend geringem Detaillierungsgrad für großmaßstäbige Untersuchungen verwenden zu wollen, denn eine Vergrößerung des Maßstabs führt nicht automatisch zu mehr Information, Genauigkeit oder Detailreichtum.

Je nach Fragestellung ist abzuwägen, welche im GIS enthaltenen Daten aufgrund ihres Maßstabes miteinander kombiniert werden können. Zur Ableitung forstlich relevanter Parameter im Rahmen dieser Arbeit wurden z.B. Daten mit einem Erfassungsmaßstab zwischen 1 : 10 000 und 1 : 25 000, also im mittelmaßstäbigen Bereich, verwendet.

Die Anforderungen an die Datengenauigkeit wird also entscheidend vom jeweiligen Untersuchungsmaßstab beeinflusst. In Abbildung 3.4 soll veranschaulicht werden, wie ein Fehler bzw. eine Lageabweichung, die in Wirklichkeit 75 m beträgt, sich entsprechend dem jeweiligen Maßstab darstellt und damit unterschiedliches Gewicht bekommt. Die Fehlertoleranz wird demnach auch vom Maßstab beeinflusst.

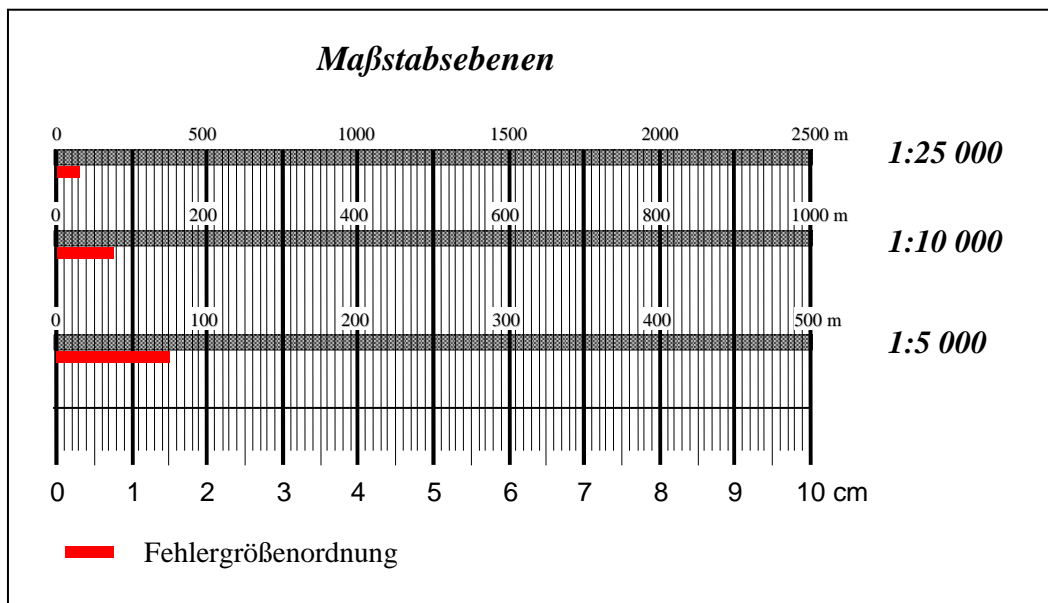


Abb. 3.4: Maßstabsabhängige Darstellung einer Lageabweichung von 75 m. Der hier dargestellte Fehler wird bei einem Maßstab von 1:5 000 mit 1,5 cm wiedergegeben und ist somit deutlich erkennbar. Bei einem Maßstab von 1:25 000 hingegen ist die Detailerkennbarkeit erheblich reduziert, was sich auf die Fehlertoleranz auswirkt.

Bei der Darstellung von Objekten anhand von Rasterzellen oder Pixeln (engl. picture element) können Fehler auftreten, die mit der Auflösung bzw. der Größe der Rasterzellen

in Zusammenhang stehen. Bei einer zu großen Pixelgröße im Verhältnis zum darzustellenden Objekt entsteht die Problematik der sogenannten „Mischpixel“. Das heißt, daß das spektrale Merkmal eines Pixels Signaturen mehrerer Objekte mit teils sehr unterschiedlichen Ausprägungen abdeckt.

3.3.3.5 Dichte der Beobachtungen bzw. Meßpunkte

Die benötigte Dichte an Beobachtungspunkten bzw. Meßpunkten, die eine Übertragung der Informationen auf die Fläche erlauben, hängt neben der Fragestellung u.a. auch stark von den natürlichen Gegebenheiten und dem zu repräsentierenden Element ab. Handelt es sich, z.B. bei der Erstellung einer Bodenkarte, um eine kleinstrukturierte Landschaft, in der auf engem Raum ein häufiger Wechsel der Bodenformen zu erwarten ist, so wird eine größere Anzahl an Beprobungspunkten benötigt, um die Fläche zu charakterisieren, als dies bei homogenen Lößlandschaften der Fall wäre. Umgekehrt muß nicht grundsätzlich eine hohe Anzahl von Stichproben vorliegen, um eine gute Qualität in der Beschreibung des zu charakterisierenden Elements zu erreichen. Ein entscheidender Faktor bleibt die Repräsentativität bzw. Aussagekraft der einzelnen Stichproben (gekoppelt natürlich an eine gewisse Mindestanzahl), was z.B. besonders bei der Erstellung von Niederschlagsverteilungskarten zum Tragen kommt. Hier werden nur Klimadaten von solchen Stationen verwendet, die für größere Gebiete sowie für lokalklimatische Standorte kennzeichnend sind.

Soll mit Hilfe von punktuell ermittelten Informationen auf die umliegende Fläche geschlossen werden, dann ist es wichtig, im Vorfeld über Angaben zur Erfassungsmethode und dem vorgesehenen Erfassungszweck zu verfügen. Im konkreten Falle der im Rahmen der Waldinventur aufgenommenen Stichproben erfolgte die Datenerhebung nicht unter der Prämisse repräsentative, für die umliegenden Bereiche gültige Informationen zu sammeln. Vielmehr stellen die Inventurpunkte lediglich eine Bestandsaufnahme von eng begrenzten Probeflächen dar und sind primär nur für diese gültig. Dazu kommt, daß es gerade im Gebirge, wie es im FoA Oberammergau der Fall ist, zu einem kleinräumigen Wechsel der Standortverhältnisse kommt. Eine Interpolation der Daten auf die Fläche ist also hierbei nicht ohne weiteres zulässig.

3.3.3.6 Datenformat und -austausch

Sowohl bei der Umwandlung eines Datentyps in einen anderen (Vektor \leftrightarrow Raster) als auch bei der Konversion von einem programmspezifischen Datenformat in das andere können Fehler auftreten.

Wird ein als Vektordatensatz vorliegendes Element in eine Rasterdarstellung umgewandelt, erfolgt ein Verlust an Information, der um so geringer ausfallen wird, je höher die Auflösung der Rasterzellen gewählt wird. Heutzutage stellen die Näherungsfehler bei Rasterdaten ein immer geringeres Problem dar, da ein großer Nachteil der Rasterdaten, der hohe Speicherbedarf, durch die neue Rechnergeneration mit großen Speichermöglichkeiten und schnellerem Datenzugriff schwindet (BURROUGH & McDONNELL 1998). In Abbildung 3.5 ist exemplarisch dargestellt, welche Fehler bei der Konversion eines in Vektorform dargestellten Objekts in das Rasterformat entstehen können. So kann die Fläche eines Dreiecks einmal durch sieben und einmal durch sechs Rasterzellen dargestellt werden, wobei es immer bei einer Annäherung an die Dreiecksform bleiben wird.

BINZENHÖFER (1997) geht in seinem Artikel auf den möglichen Informationsverlust bei der Verschneidung von Raster- und Vektordaten im Rahmen raumbezogener Analysen ein, wobei er den Schwerpunkt auf die Umformung von Raster nach Vektor legt. Hierbei ergeben sich weniger Probleme in der Geometrie der Daten (die geometrischen Eigenschaften der Daten werden bei der Transformation eindeutig gewahrt), als vielmehr Probleme bei der Attributzuweisung. Diese Fehler sind abhängig von der Größe der Rasterzelle sowie von Größe und Lage des Verschneidungspolygons.

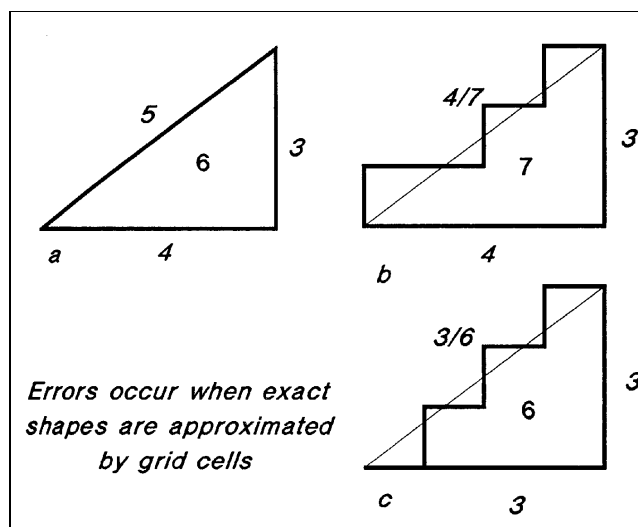


Abb. 3.5: Fehler bei näherungsweise Rasterdarstellung exakter Formen. Bei der Umkonvertierung einer Vektorform (Dreiecksstruktur a) in Rasterzellen kann zum einen eine Über- (b), zum anderen eine Unterschätzung (c) stattfinden (nach BURROUGH & McDONNELL 1998)

Beim Austausch von Daten von einem System in das andere und bei der hier oft notwendigen Umwandlung in ein anderes, von der verwendeten Software unterstütztes Datenformat, muß gewährleistet werden, daß eine bestehende Attributanbindung nicht verloren geht und, speziell bei Vektordaten, die topologischen Beziehungen erhalten bleiben oder wiederhergestellt werden können.

3.3.3.7 Numerische Fehler (rechnerbedingt)

Hierzu zählen Fehler, die durch Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit des Rechners bzw. eines Programms entstehen, d.h. Daten können nicht in der gewünschten Präzision verwaltet und verarbeitet werden. Beispiele hierzu sind Rundungsfehler bei der Berechnung, Prozessierung und Modellierung von Daten. Bei der Umwandlung von Werten, die in einem Dezimalzahlenwertebereich vorliegen hin zu ganzen Zahlen, werden von manchen Programmen die Dezimalstellen gekappt, ohne daß eine Ab- oder Aufrundung der Zahl erfolgt. Durch diese Einschränkung in der Darstellung und Umformung der Zahlenwerte entsteht ein Verlust an numerischer Präzision.

3.3.4 Qualitätsanalyse ausgewählter Datensätze

Nachdem die einzelnen Einflußfaktoren auf die geometrische wie auch auf die thematische Genauigkeit der Daten in den vorangegangenen Kapiteln allgemein beschrieben wurden, sollen nun nachfolgend die für die Analysen im Untersuchungsgebiet Oberammergau relevanten Daten näher charakterisiert und hinsichtlich ihrer Qualität überprüft werden.

3.3.4.1 Überprüfung der Forstbetriebskarte (FBK)

Die durch die Bayerischen Staatsforstverwaltung im Rahmen des Projektes zur Verfügung gestellte digitale Forstbetriebskarte (FBK) des FoA Oberammergau wurde vor ihrer Verwendung im Projekt-GIS hinsichtlich ihrer geometrischen wie thematischen Genauigkeit überprüft.

In Bezug auf die **geometrische** Genauigkeit erfolgte die Überprüfung anhand von 210 Paßpunkten, die in regelmäßigem Abstand entlang des Wegenetzes, als Element des ständigen Details, gesetzt wurden.

Bezogen auf digitale Orthophotos als Referenzgrundlage konnten aus der Differenzbildung einzelner Koordinatenwerte Abweichungen in x-Richtung von bis zu 44,5 m, in y-Richtung bis maximal 40 m festgestellt werden.

Weiterhin wurde mit Hilfe der bestimmten Paßpunkte der mittlere Lagefehler - in Bezug auf die Orthophotos - anhand eines Ausgleichsverfahrens nach der Methode der *mittleren quadratischen Abweichung* (RMS (Root Mean Square)) in x- und y-Richtung berechnet (vgl. Kap. 3.3.1). Dabei wurde eine *polynomiale Transformationsgleichung* 2. Ordnung verwendet. Der resultierende Gesamt-RMS-Fehler in x- und y-Richtung erscheint mit $x = 9,54$ m und $y = 7,74$ m relativ klein. Betrachtet man dagegen die RMS-Fehler der einzelnen Paßpunktpaare für sich, so ergibt sich eine große Spannbreite zwischen dem kleinsten und dem größtmöglichen RMS-Fehler. Der schlechteste Wert weist einen Fehler von bis zu 42,13 m in x- und 36,77 m in y-Richtung auf. Andere Punktpaare wiederum stimmten sehr gut überein (Abweichung von $x = 0,02$ m bzw. $y = 0,01$ m), weisen also eine hohe Lagegenauigkeit auf. Im Hinblick nun auf den niedrigen Gesamt-RMS-Fehler wird deutlich, daß es sich bei diesen starken Abweichungen um einzelne Ausreißer handelt, die

wahrscheinlich auf Digitalisierungsfehler bei der Datenerfassung zurückzuführen sind. Sie stellen dennoch eine nicht zu vernachlässigende Größe dar.

Was die Überprüfung der **thematischen** Fehler des Datensatzes anbelangt, so wurden sowohl fehlende Attributierungen einiger Bestände als auch falsche Attributbeschreibungen ermittelt. Diese Fehler konnten anhand von Plausibilitätsuntersuchungen und durch Abfragen der entsprechenden Attributtabelle entdeckt werden (vgl. dazu Kap. 3.3.2).

Abbildung 3.6 zeigt ein Beispiel fehlender Attributierungen in der Forstbetriebskarte des FoA Oberammergau. In der kartenmäßigen Darstellung erscheinen hier zwei Bestände weiß, d.h. nach der Legende könnten dies unbestockte Flächen sein. In Wirklichkeit handelt es sich, wie ein Blick auf die Attributtabelle zeigt, um Flächen, die keine Attributzuweisung aufweisen. Ein Vergleich mit Satellitenbilddaufnahmen ließ erkennen, daß es sich bei den unattribuierten Flächen um Nadelwaldbestände handelt.

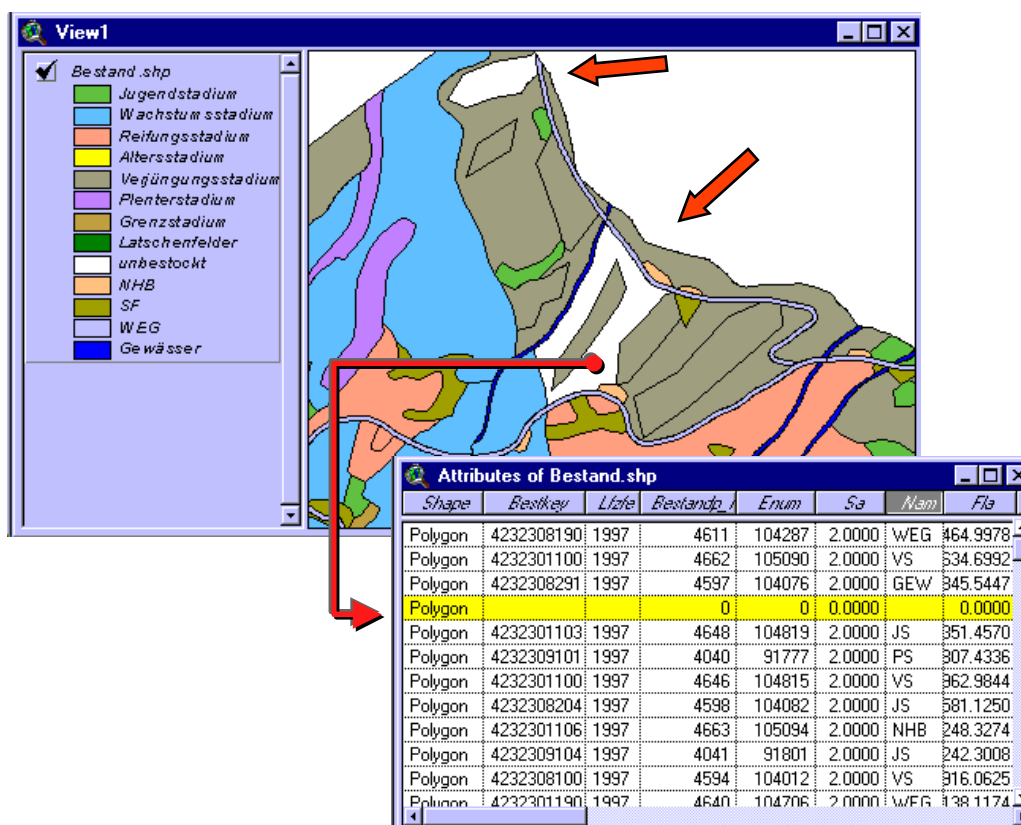


Abb. 3.6: Beispiel für inhaltliche Fehler in der digitalen Forstbetriebskarte. Hier: fehlende Attributbeschreibung für manche Bestände.

3.3.4.2 Überprüfung der ATKIS-Daten

Die Lagegenauigkeit der für das Untersuchungsgebiet vorliegenden ATKIS-Daten konnte durch die Verwendung von Orthophotos als Referenzgeometrie überprüft werden. Bei der Differenzbildung der ATKIS-Daten zu den Referenzkoordinaten der Orthophotos traten im einzelnen Abweichungen von maximal 28,1 m in x-Richtung und von bis zu 74,9 m in y-Richtung auf. Für diese Prüfung der geometrischen Genauigkeit wurden die gleichen Paßpunkte verwendet, die bereits für den Abgleich der Forstbetriebskarte herangezogen wurden (vgl. Kap. 3.3.4.1), was u.a. einen direkten Vergleich dieser beiden Datensätze erlaubt (s. auch Kap. 3.3.4.3).

Bei der Berechnung der *mittleren quadratischen Abweichung* (RMS) der Paßpunkte konnte ein Gesamt-Fehler von 11,17 m in x- und 15,06 m in y-Richtung ermittelt werden, was den Angaben des BLVAs bezüglich der Lagegenauigkeit ziemlich nahekommt (s. Kap. 3.2.3.2). Diese, für das gesamte Untersuchungsgebiet ermittelten Werte, verleiten jedoch zu Fehlinterpretationen, da aus dieser Angabe nicht ersichtlich wird, daß in Wirklichkeit im Untersuchungsgebiet RMS-Fehler von maximal 65,18 m (in y-Richtung) vorkommen können.

Die z.T. erheblichen Lagefehler bei den ATKIS-Daten sind wohl auf Fehler bei der Digitalisierung aus analogen Vorlagen zurückzuführen.

3.3.4.3 Qualitätsvergleich zwischen ATKIS und FBK

Vergleicht man das Wege- und Gewässernetz aus den ATKIS-Daten mit den Angaben der digitalen Forstbetriebskarte, so lassen sich im Untersuchungsgebiet Unstimmigkeiten in den Lagebeziehungen zueinander erkennen. In Abbildung 3.7 sind die beiden Datensätze exemplarisch in zwei Überlagerungen dargestellt. Die Abweichungen im Wegenetz betragen in diesem Beispiel bis zu 40 m. Die Größenordnung der Diskrepanzen zwischen den beiden Datensätzen variiert im Untersuchungsgebiet lokal sehr stark. Dabei handelt es sich nicht um Unterschiede, die durch verschiedene Erfassungs- bzw. Aktualisierungszeitpunkte der einzelnen Datensätze zustande kommen (z.B. Unterschiede durch Wegeneubau bzw. Trassenveränderungen). Oft sind nämlich dieselben

Straßenkreuzungen in ihrer Lage versetzt, was nicht von einer veränderten Wegeführung herrühren kann.

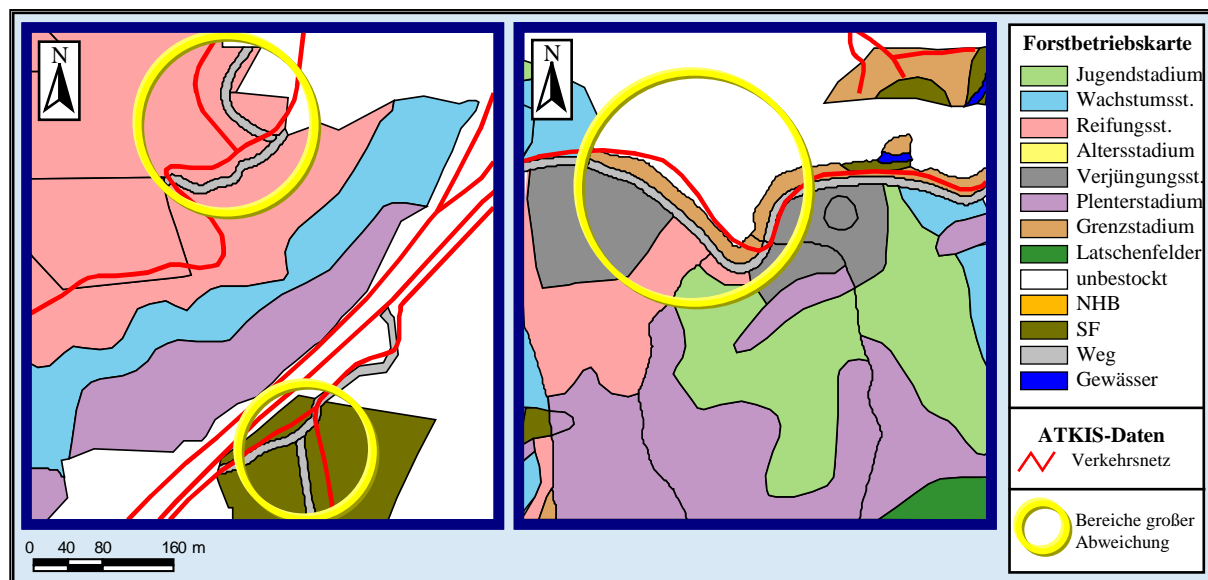


Abb. 3.7: Beispiele für Unstimmigkeiten zwischen der digitalen Forstbetriebskarte und den ATKIS-Daten. Ausschnitte aus den Daten des Forstamts Oberammergau. Die beobachteten Unterschiede im Verlauf des Wegenetzes betragen hier bis zu 40 m.

Ein visueller Abgleich mit den Orthophotos als Referenz ließ erkennen, daß in diesem Fall die Fehler nicht einem Datensatz allein zuzuordnen sind. Sowohl in den Daten der digitalen Forstbetriebskarte als auch in den ATKIS-Daten sind Unterschiede zu den Luftbildern erkennbar, welche in der Abbildung 3.8 anhand zweier Beispiele gegenübergestellt werden.

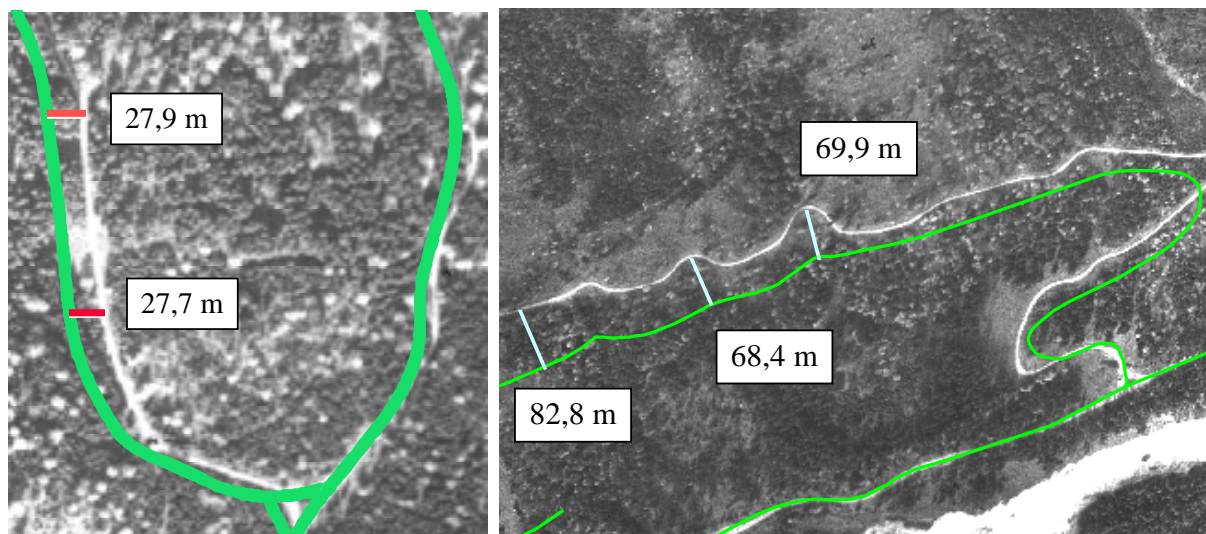


Abb. 3.8: Beispiele für Lageungenauigkeiten: Das Wegenetz der Forstbetriebskarte (links) und das der ATKIS-Daten (rechts), beide in grün, sind zusammen mit den Orthophotos als Referenzgrundlage dargestellt.

Im linken Bild werden bei der Überlagerung des digitalen Orthophotos mit dem Wegenetz der Forstbetriebskarte Abweichungen in einer Größenordnung von 28 m deutlich. Im rechten Bild, einem Vergleich zwischen dem Verkehrsnetz der ATKIS-Daten mit dem darunterliegenden Orthophoto, betragen die Lagefehler zwischen 70 und 80 m.

Bei der Beurteilung der geometrischen Fehler muß auch die erfassungsabhängige Generalisierungsproblematik beachtet werden (vgl. dazu Kap. 3.3.3.4). Diese stellt ein Problem dar, welches innerhalb eines GIS durch die Verwendung von Daten unterschiedlicher Quellen und Erfassungsmethoden zum Tragen kommen kann. Besonders der Vergleich mit dem ATKIS-Datensatz (s. Abb. 3.8, rechts) verdeutlicht dieses Problem, das erst durch die hypothetische Maßstabsfreiheit in einem GIS in Erscheinung tritt (vgl. Kap. 3.3.3.4). Der Erfassungsmaßstab der ATKIS-Daten liegt bei 1 : 25 000. Deshalb ist, im Vergleich zu den Orthophotos (dargestellt im Maßstab 1 : 10 000), eine Glättung der Straßenkurven als Folge der Generalisierung zu erkennen. Andererseits lassen sich aber Abweichungen, wie z.B. an den gerade verlaufenden Straßenabschnitten in Abbildung 3.8 (rechte Seite), nicht durch die Generalisierungswirkung bzw. den Erfassungsmaßstab erklären. Hierbei handelt es sich eindeutig um Ungenauigkeiten, die in der Erfassungsmethode begründet sein müssen.

Einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der maßstabsabhängigen Auswirkung von Lagefehlern liefern bereits die physikalischen Grenzen des menschlichen Sehvermögens. Ein Objekt

muß, unter Voraussetzung optimaler Bedingungen (Lichtquelle, Kontrastunterschiede, Eigenfarbe), mindestens 0,09 mm groß sein⁵, um es als solches erkennen zu können (Bos 1990). In der Kartographie werden jedoch in der Praxis Grenzwerte festgesetzt, welche doppelt so hoch liegen (Bos 1990). Übertragen auf die Maßstabsabhängigkeit von Fehlern bedeutet dies, daß im Falle der Forstbetriebskarte im Erfassungsmaßstab 1 : 10 000 Fehler erst ab einer Größenordnung von ca. 2 m überhaupt faßbar sind. Bei den ATKIS-Daten im Maßstab 1 : 25 000 sind Fehler kleiner als 5 m nicht zu erkennen und können deshalb auch außer Acht gelassen werden.

Bezieht man sich auf die Qualitäts-Richtlinien des U.S. Geological Survey, wie sie für die Verwendung von Geo-Daten hinsichtlich ihrer Lagegenauigkeit aufgestellt wurden (vgl. Kap. 3.3.1), so erfüllen beide der hier miteinander verglichenen Datensätze nicht diese Anforderungen. Sowohl bei der Forstbetriebskarte als auch bei den ATKIS-Daten liegen mehr als 10% aller gemessenen Lageabweichungen über dem hierfür abhängig vom Maßstab ermittelten Grenzwert von ca. 8,47 m bei der FBK und von 12,7 m bei den ATKIS-Daten.

In Tabelle 3.4 werden abschließend die Ergebnisse der Lagegenauigkeitsprüfung der einzelnen Datensätze, die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt wurden, gegenübergestellt.

Tab. 3.4: Berechnung der Lagefehler für die Datensätze der Forstbetriebskarte und der ATKIS-Daten (Angaben in m). Referenzgrundlage bildeten jeweils Orthophotos.

	Maximale Differenz		Gesamt-RMS		RMS-min		RMS-max	
	x- Richtung	y- Richtung	x- Richtung	y- Richtung	x- Richtung	y- Richtung	x- Richtung	y- Richtung
FBK	44,5	40	9,54	7,74	0,02	0,01	42,13	36,77
ATKIS	28,1	74,9	11,17	15,06	0,66	0,26	29,7	65,18

⁵ Diese Objektgröße läßt sich aus der Entfernung des Betrachters zum Objekt, i.d.R. 30 cm (= Leseentfernung), und dem Winkel zwischen Auge und den Abgrenzungen des Objekts ableiten. Damit ein Mensch mit normalen Sehvermögen ein Objekt erkennen kann, muß dieser Winkel mindestens 1 Winkelminute betragen (BOS 1990).

Zieht man den Gesamt-RMS-Fehler als Vergleichsgröße heran, so läßt sich zusammenfassend sagen, daß die Forstbetriebskarte eine höhere Lagegenauigkeit aufweist als die Daten der ATKIS-Vorstufe.

Eine Beurteilung, welche Daten aufgrund ihrer Qualität bei der Erstellung der GIS-Eingabeparameter zur Bestimmung der Baumartenzusammensetzung herangezogen werden können, wird in den Kapiteln 4.5.1.1.1, 4.5.1.2.6 und 4.5.1.2.7 gegeben.

3.3.4.4 Überprüfung der Waldinventur-Daten

Zur Überprüfung der Richtigkeit der Information der einzelnen Inventurpunkte eignen sich, wie in Kap. 3.3.2 dargestellt, raumbezogene Analysen bzw. Verschneidungen mit anderen Daten gleichen Inhalts in Form von Plausibilitätsuntersuchungen. Dies ermöglicht eine Überprüfung der Attributgenauigkeit durch Aufdeckung von Widersprüchen anhand unabhängig voneinander aufgenommener, redundanter Information aus verschiedenen Datensätzen. So wurde z.B. das digitale Geländemodell (DGM) mit den Höhen- und Expositionsangaben aus den Inventurdaten des FoA Oberammergau verschnitten. Die Höhendaten des DGMs wurden vorab so aggregiert, daß sie mit der Höhenstufeneinteilung der Inventurdaten aus der Tabelle „Inventur-Kreis“ übereinstimmten. Bei der anschließenden Verschneidung wurden die Punkte ausgewiesen, deren Angaben stark voneinander abwichen (s. Abb. 3.9). Diese wurden überprüft und dort, wo die Abweichung nicht durch die Art der Datenstruktur und die unterschiedliche Abbildungsschärfe zu erklären war, im Sinne einer Anpassung an das DGM korrigiert.

Weiterhin konnten anhand einer stichprobenartigen Überprüfung des Inventur-Datensatzes fehlende Attributeinträge in der Sachdatentabelle festgestellt werden, die sich durch Widersprüche in den Flächenanteilen der einzelnen Baumarten bemerkbar machten. Ursache hierfür waren Fehler bei der Datenübermittlung von der Forsteinrichtungsdatenbank (DB2) zum Projekt-GIS Oberammergau, die aufgrund falscher Sachdatenselektion beim Auslesen der Daten aus der zentralen Datenbank auftraten. Durch ein rechtzeitiges Erkennen noch vor Verwendung der Daten konnten falsche

Rückschlüsse aus den vorgenommenen Datenanalysen vermieden werden - Fehler, die später nicht mehr nachzuvollziehen oder erkennbar gewesen wären.

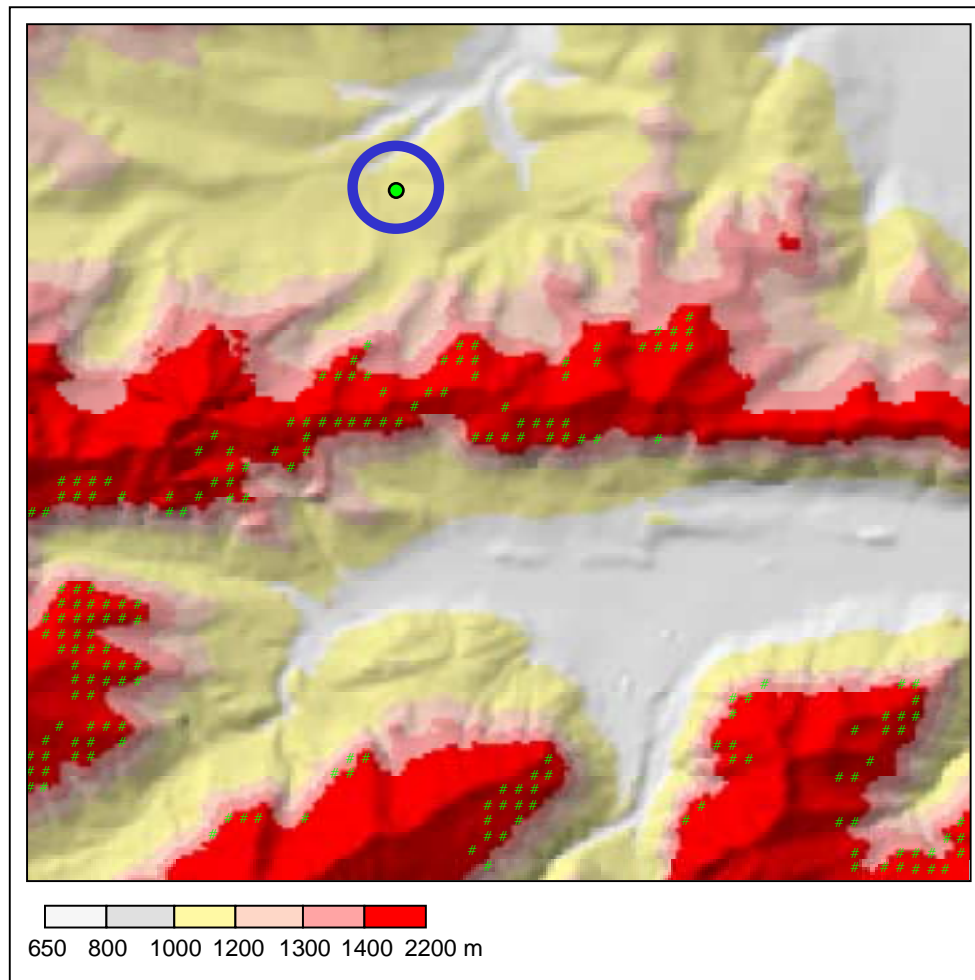


Abb. 3.9: Attributierungsfehler im Inventurdatensatz, die durch die Überlagerung der Inventurpunkte auf das DGM sichtbar werden. Dargestellt sind in grün alle Inventurpunkte, die Höhenangaben von mehr als 1400 m aufweisen. Im Vergleich mit dem DGM wird die falsche Kodierung eines Punktes (mit einem blauen Kreis markiert) besonders deutlich, da er im Höhenbereich knapp über 1000 m liegt.

3.3.4.5 Überprüfung des Digitalen Geländemodells (DGM 25)

Um die Höhenangaben eines DGMs zu überprüfen, kommen mehrere Möglichkeiten in Betracht (vgl. Kap. 3.3.2). Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus dem DGM ein Höhenlinien- bzw. Isohypsenbild berechnet und mit den Originalhöhenlinien der amtlichen Topographischen Karte im Maßstab 1 : 25 000 (TK25, Blattnr. 8431 und 8432) verglichen. In Abbildung 3.10 ist ein Ausschnitt einer, aus dem DGM berechneten Beleuchtungsmaske zu sehen. Hier sind Fehler in der Höhenkodierung zu erkennen, die sich im Bild als Streifenstrukturen in Spalten- und in Zeilenrichtung darstellen. In einem vergrößerten Ausschnitt sind nun die Isohypsen, welche aus dem DGM berechnet wurden und die Höhenlinien aus der TK25 dem Bild überlagert. Dabei wird für die ansonsten insgesamt gut übereinstimmenden Höhenlinien in einem Bereich eine regelrechte Überkreuzung der Linien deutlich.

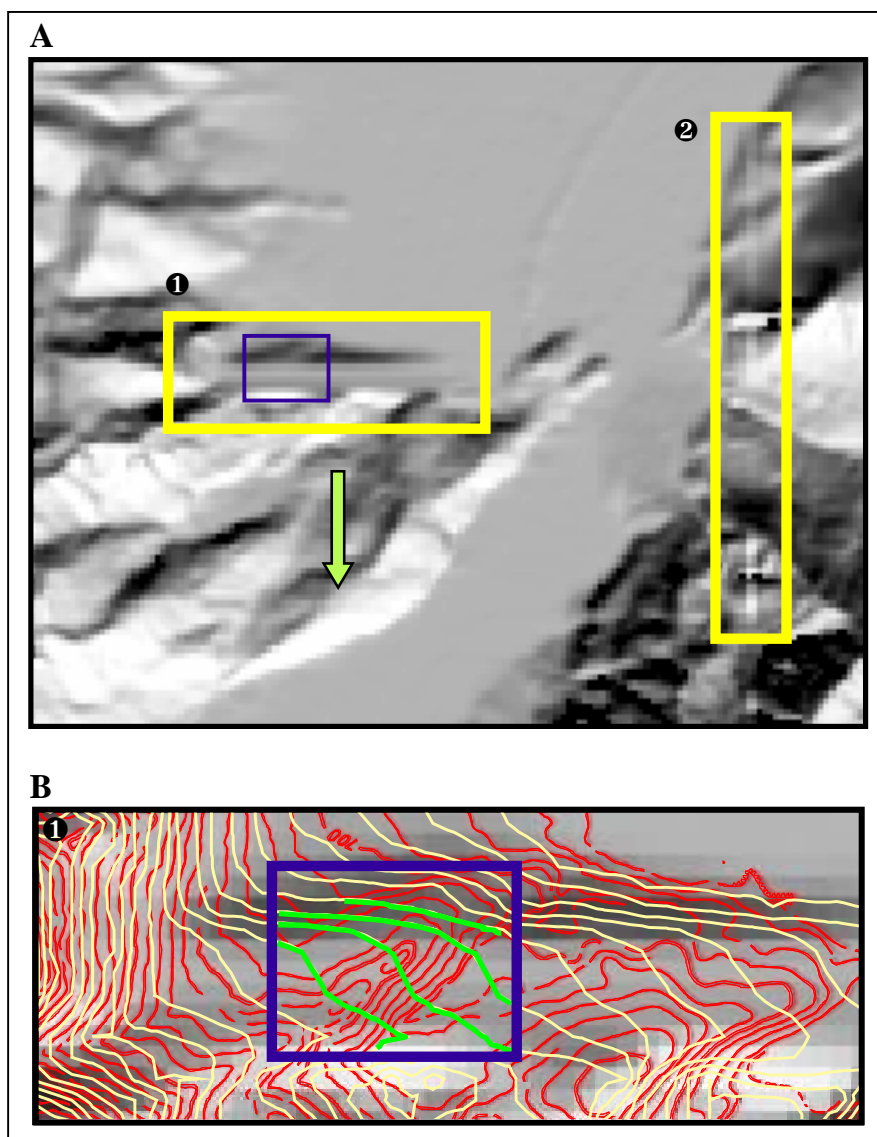


Abb. 3.10: **A:** Beispiele für Fehler des Digitalen Geländemodells, die als Streifenstrukturen in Zeilen- (❶) und in Spaltenrichtung (❷) sichtbar werden (gelbe Kästen). Dadurch kommt es auch zur fehlerhaften Ableitung von Höhenlinien aus dem DGM. **B:** Vergleich zwischen den Höhenlinien berechnet aus dem DGM (gelb) und den Höhenlinien aus der TK25 (rot). Die extrem fehlerhaften Überschneidungsbereiche sind mit grüner Farbe hervorgehoben.

Trotz dieser Fehler zeigte die Überprüfung der Daten eine insgesamt gute Übereinstimmung des digitalen Geländemodells mit den Angaben der Topographischen Karte. Die vereinzelt im DGM auftretenden Fehler lagen größtenteils außerhalb des

Untersuchungsgebietes des FoA Oberammergau und konnten deshalb vernachlässigt werden.⁶

Das digitale Geländemodell zeichnete sich ferner durch unterschiedliche numerische Präzision und Ausprägung des Wertebereichs innerhalb des Datensatzes aus. Deutlich wird dies durch die Bildung eines Differenzbildes zwischen den Original-Höhenwerten des DGMs und den zu Ganzen Zahlen konvertierten Höhenwerten, wie es in Abbildung 3.11 dargestellt ist. So sind in Teilen des Untersuchungsgebietes die Höhen mit einem bis zu zwei Dezimalstellen genauen Zahlenwertebereich angegeben. Für andere Gebiete dagegen liegen die Höhendaten nur als Ganze Zahlen vor. Die Ursache dieser Abweichungen war aus der Beschreibung des Datensatzes nicht ersichtlich und konnte auch durch Nachfrage beim Urheber, dem BLVA, nicht geklärt werden. Vermutlich ist es auf unterschiedliche Bearbeiter und ergo auf unterschiedliches Vorgehen bei der Generierung des digitalen Geländemodells zurückzuführen. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fragestellungen waren diese Präzisionsunterschiede allerdings nicht von Bedeutung, da Höhenangaben im Meter-Bereich für die durchgeführten Untersuchungen ausreichend sind. Fraglich ist, ob die Erweiterung des Zahlenbereichs eine präzisere Datengrundlage darstellt oder nur das Ergebnis einer Berechnungsprozedur ist und eine Genauigkeit der Höhenangaben vortäuscht, die tatsächlich nicht existiert bzw. aus den Datenquellen nicht abzuleiten ist. Eine andere Auslegung würde bedeuten, daß es sich bei den Ganzen Zahlen um aufgerundete Höhenwerte handelt, was dann einer tatsächlich geringeren Präzision in den Höhenangaben gleichkäme. Durch Datendokumentation und Bereitstellung der Meta-Daten zur DGM-Generierung hätten diese Fragen sehr schnell geklärt werden können.

⁶ In Kap. 3.3.2 sind Verfahren dargestellt, die bei einer notwendigen Korrektur fehlerhafter Abschnitte zum Einsatz kommen können.

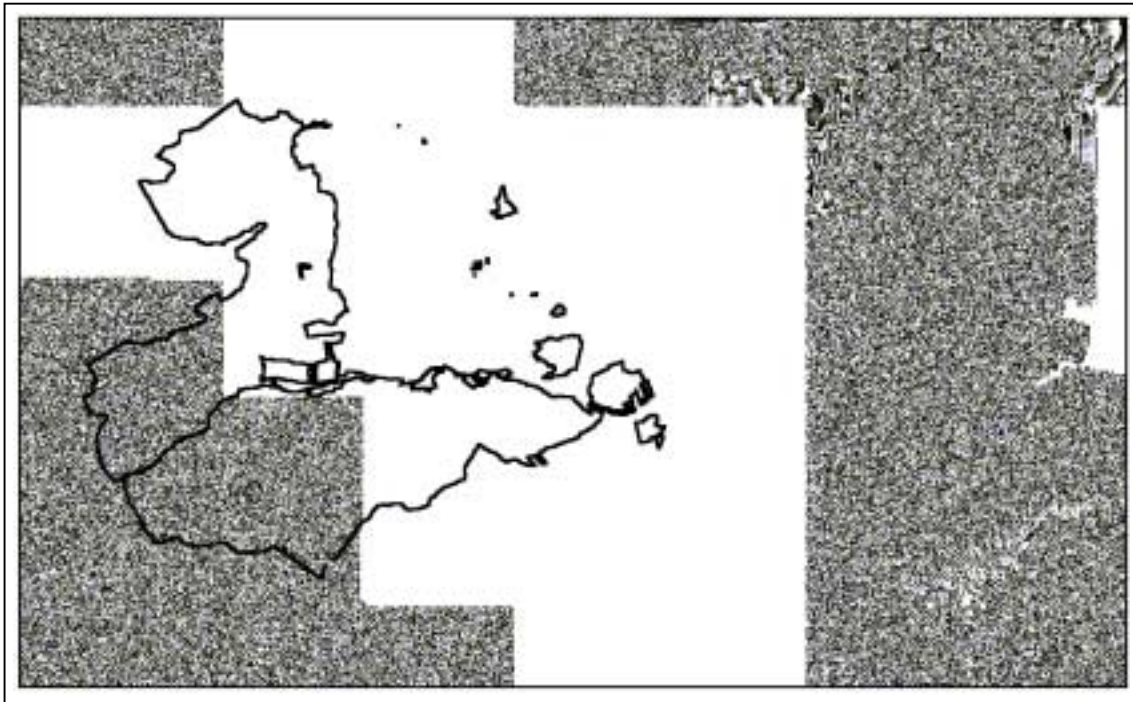


Abb. 3.11: Unterschiedliche numerische Genauigkeiten im DGM-Datensatz. In den weißen Bereichen sind Angaben zur Höhe nur als ganze Zahlen vorhanden. Für die restlichen Bereiche liegen die Höhenwerte mit einer bis zu zwei Dezimalstellen höheren numerischen Präzision vor. Die Grenze des FoA Oberammergau ist zur Orientierung in schwarz überlagert.

4. INTEGRIERTE ANALYSE MITTELS FERNERKUNDUNG UND GIS FÜR FORSTLICHE FRAGESTELLUNGEN

Wie einleitend erwähnt (s. Kapitel 1.2) besteht ein Hauptziel dieser Arbeit darin, mit Hilfe von Fernerkundung und GIS ein Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, spektrale und thematische (Zusatz-)Informationen zu kombinieren. Aus der Synergie dieser Systeme soll eine Verbesserung der Auswertemöglichkeiten zur Ableitung forstlich relevanter Parameter entstehen. Dabei hat es sich als unbedingt erforderlich erwiesen, sämtliche Informationen, die es zu integrieren galt, vorab einer Qualitätskontrolle zu unterziehen (vgl. Kap. 3.3). Die Ergebnisse dieser Qualitätsprüfung bilden also die Grundlage dafür, ob, in welcher Form und mit welchem Ziel die Daten für eine Integration von Fernerkundung und GIS herangezogen werden.

4.1 Grenzen herkömmlicher Verfahren

In der Verarbeitung raumbezogener Daten gingen Fernerkundung und GIS lange Zeit getrennte Wege. Gründe hierfür waren zum einen sicherlich die jeweils verschiedenen Anwendungsfelder, zum anderen das Vorherrschen unterschiedlicher Datentypen innerhalb der einzelnen Systeme. So ist bis heute die GIS-Welt eng mit dem Gedankengebäude der Vektordaten verbunden, wohingegen die digitale Fernerkundung von Natur aus rein rasterorientiert ist. Diese jeweils unterschiedliche Philosophie im Umgang mit raumbezogenen Daten fand ihre Entsprechung in getrennten Softwareentwicklungen etablierter Anbieter, was die Teilung beider Systeme unterstrich.

Der Wunsch, die Klassifizierungsergebnisse von Fernerkundungsdaten zu verbessern sowie die Entwicklung hin zu immer höherauflösenden Satellitenbilddaten machen aufgrund der Grenzen, die hierbei den traditionellen Verfahren gesetzt sind (SRINIVASAN & RICHARDS 1990), den Einsatz neuer Methoden in der Bildverarbeitung erforderlich.

Die multispektralen Bilddaten herkömmlicher operationeller Fernerkundungssysteme, wie Landsat TM, SPOT oder IRS-1C, werden seit mehr als zwei Jahrzehnten anhand gut etablierter statistischer Methoden klassifiziert. Die *Maximum-Likelihood*-Methode gehört dabei zu den am häufigsten verwendeten Standardverfahren (SRINIVASAN & RICHARDS 1990,

LILLESAND & KIEFER 2000). Bei den traditionellen, auf Auswertung der spektralen Signaturen der zu differenzierenden Objekte ausgerichteten und auf Pixelebene arbeitenden Verfahren, bestehen bei der Klassifizierung vegetationsbestandener Flächen jedoch häufig Probleme, aufgrund der Überlappung von Vegetationsklassen mit ähnlichen Reflexionsverhalten. So korrelieren spektrale Reflexionsmerkmale oft stark und eine hohe Kovarianz ist eher die Regel als die Ausnahme (s. LILLESAND & KIEFER 2000), weshalb durch eine allein auf spektrale Signaturanalyse gestützte Klassifizierung meist kein befriedigendes Ergebnis erreicht werden kann (vgl. z.B. SEPEHRY et al. 1998).

Mit dem Aufkommen geometrisch sehr hochauflösender digitaler Bilddaten⁷ einer neuen Generation von optischen Satellitensystemen, bei denen die Pixelgrößen nun im Bereich zwischen 1 und ca. 6 Meter liegen (Ikonos/IRS-1C PAN), stehen herkömmliche, pixelbasierte multispektrale Klassifizierungsverfahren gegenwärtig vor einem zusätzlichen Problem: Mit zunehmender geometrischer Auflösung ist eine starke Erhöhung in der Streuung der Pixelstatistik zu verzeichnen, was dazu führt, daß in vielen Fällen eine statistisch sinnvolle Auswertung nicht mehr möglich ist (KENNEWEG et al. 1991). Durch die hohe Auflösung wird ein höheres Detailreichtum in den Bilddaten erreicht. Dies führt dazu, daß ein mittels eines herkömmlichen Sensors aufgenommener „Waldpixel“ mit einer räumlichen Auflösung von 30 m (Landsat-TM) sodann in einzelne spektrale Bestandteile wie Baumkronen, Schattenbereiche, Boden und Bodenbedeckung unterteilt wird (s. Abb. 4.1). Die spektrale Variabilität innerhalb einer



Abb. 4.1: Darstellung des Verhältnis eines Waldobjekts zu der Bildelementgröße des Landsat- und IKONOS-Sensors im multi-spektralen (MS) und panchromatischen (Pan) Bereich. (weitere Erläuterungen s. Text)

⁷ engl. Very High Resolution (VHR)

Klasse „Wald“ ist somit viel größer, als die spektralen Unterschiede zu den restlichen zu differenzierenden Klassen. Die Fülle an unterschiedlicher Grauwertinformation, die zur Charakterisierung der Klasse Wald herangezogen werden muß, führt dazu, daß eine ausreichend präzise Klassentrennung im spektralen Merkmalsraum aufgrund der Varianz in der Pixelstatistik nicht mehr erreicht werden kann. Zieht man z.B. den neuen sehr hochauflösenden Ikonos-Satelliten zum Vergleich heran, so wird ein Landsat-Pixel anhand 900 Bildelementen im panchromatischen und ca. 56 Pixeln im multispektralen Bereich charakterisiert, was den gewaltigen Zuwachs an Information deutlich macht.

Im Bereich der Fernerkundung wird zudem immer deutlicher, daß Bildverarbeitung, die sich auf die Verwendung einer einzigen Datenquelle stützt, nicht effizient funktioniert (s. u.a. BALSAVIAS & HAHN 1999, KOCH et al. 1994, SRINIVASAN & RICHARDS 1990). Es müssen vielmehr Daten unterschiedlicher Sensoren und Quellen im Sinne eines „multi-source“-Ansatzes nach RICHARDS & JIA (1999) erschlossen werden.

Eine weitergehende Trennung von Objektklassen ähnlicher Reflexionseigenschaften und somit eine mögliche Verbesserung der Klassifikationsergebnisse kann nach HILDEBRANDT (1996) und KOCH et al. (1994) durch folgende Ansätze erreicht werden:

- einen multitemporalen und multisensoralen Ansatz, d.h. dem Heranziehen mehrerer Aufnahmen unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkts (Verbesserung in der Unterscheidung von Vegetationseinheiten aufgrund phänologischer Zyklen und der damit verbundenen Veränderungen der spektralen Reflexionseigenschaften) und die Kombination von Datensätzen unterschiedlicher Aufnahmesysteme
- Einbeziehung von Textur- und Strukturparametern (z.B. Berücksichtigung der Pixelnachbarschaft als objektbeschreibendes Merkmal (EBIS-Klassifikator))
- Einbeziehung nichtspektraler Zusatzdaten (z.B. durch die Einführung topographischer oder thematischer Zusatzinformation).

Die hier aufgelisteten Verfahren können allerdings das Problem der spektralen Konfusion verschiedener Klassen immer nur teilweise lösen (vgl. hierzu HILDEBRANDT 1996, STOLZ 1998). Der erfolgversprechendste Ansatz ist jedoch der zuletzt genannte, da er den großen Vorteil besitzt, neben der spektralen Information noch zusätzliche Parameter im

Klassifizierungsprozeß mitberücksichtigen zu können, wodurch weitere, spektral unabhängige Entscheidungskriterien zur Verfügung stehen.

Eine grundlegende Verbesserung kann trotz des vorprogrammierten Scheiterns statistischer Auswerteverfahren bei sehr hochauflösenden Satellitenbilddaten, dann erreicht werden, wenn nicht mehr pixelbezogene, sondern vielmehr *objektorientierte* Ansätze herangezogen werden, bei denen einzelne Pixel rechnergestützt zu sinnvollen größeren Einheiten zusammengefaßt werden.

Der Lösungsansatz muß daher eine **objekt- und wissensbasierte Integration von Fernerkundung und GIS** sein.

4.2 Verfahren zur Integration von FE und GIS im Überblick

In der Literatur begegnet man dem Begriff „Integration“ im Zusammenhang mit Fernerkundung (FE) oder Geo-Informationssystemen (GIS) immer häufiger. Dabei wird dieses Schlagwort auf sehr unterschiedliche Weise ausgelegt. Es soll daher zunächst ein Überblick über die verschiedene Verwendung dieses Begriffes im Hinblick auf die verfolgten Ansätze gegeben werden.

Die „Integrations“-Verfahren lassen sich, je nach Art und Grad des Integrationsprozesses, in drei Gruppen einteilen:

- Satellitenbilddaten als GIS-Datenquelle
- GIS-Daten zur Unterstützung der Bildverarbeitung und der Klassifizierung von Satellitenbildern
- Umfassende Integration von Fernerkundung und GIS (Integration in Anlehnung an den Begriff der „data fusion“)

4.2.1 Satellitenbilddaten als GIS-Datenquelle

Eine der einfachsten Formen, Fernerkundung und Geo-Informationssysteme miteinander zu kombinieren, ist die Verwendung von geokodierten Satellitenbilddaten als Hintergrundinformation bei der Darstellung von Vektordatensätzen. Es handelt sich hierbei um eine rein visuelle und graphische Kombination zweier Datentypen und nicht um eine „Integration“ zweier Verfahren im eigentlichen Sinne. Zwar stellen hier die Fernerkundungsdaten eine wichtige Informationsquelle dar, die z.B. für den visuellen Abgleich mit dem Vektordatenbestand eines GIS und somit zur Aktualisierung und Extraktion thematischer Informationen verwendet werden kann, der integrative Prozeß wird jedoch durch den Bearbeiter selbst vorgenommen, der die Datensätze miteinander abgleicht, Veränderungen wahrnimmt und daraufhin den Vektordatenbestand im GIS, falls erforderlich, aktualisiert.

Die Verwendung von *klassifizierten* Satellitenbildern, als Quelle thematischer Information oder als weitere Datenebene in raumbezogenen Modellierungen innerhalb eines GIS, stellt

eine weiter fortgeschrittene Form des Zusammenwirkens von FE und GIS dar, die unter der Bezeichnung „Integrations-“ Verfahren bereits in zahlreichen Arbeiten Eingang gefunden hat. TROTTER (1991) unterstreicht die zunehmend große Beachtung, welche das Potential digitaler Fernerkundungsdaten als primäre Informationsquelle für Geo-Informationssysteme anfangs der neunziger Jahre gewonnen hat.

Beispiele für die Einbindung von Fernerkundungsdaten und ihre Nutzung in Kombination mit anderen Datenquellen liegen vor z.B. im Bereich der Raumplanung (FORESMAN & MILLETTE 1997), der Landschaftsanalyse oder Landnutzungsplanung hinsichtlich aktueller Nutzungsverteilung und flächendeckender Bestandsaufnahme (z.B. BERHE 1992, Borg et al. 1999, ZHOU 2000), in der Analyse von Nutzungsänderungen (JACOBS & STIES 1995) oder in der Bestimmung des Bodenerosionsgefährdungspotentials in Form von Information über die aktuelle Oberflächenbedeckung und dem Schutzerfüllungsgrad der Vegetationsdecke (JÜRGENS & FANDER 1992, PILESJÖ 1992, REUSING et al. 2000). Fernerkundungsdaten werden aber auch bei der Bestimmung der Luftverschmutzung (WILLIAMS 1995) oder bei Schneeschmelz-Abflußmodellierungen (BRÜSCH 1996) integriert. Weiterhin finden die aus Satellitenbilddaten abgeleiteten Waldkartierungen Eingang in großräumige Waldinformationssysteme, z.B. zur Reduktion des terrestrischen Stichprobenumfangs innerhalb einer forstlichen Großrauminventur (DEES et al. 1998).

4.2.2 GIS-Daten zur Unterstützung der Klassifizierung von Satellitenbildern

Umgekehrt können die in einem GIS eingebauten Daten zur Verbesserung bzw. zur Unterstützung der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten herangezogen werden.

Dies kann auf verschiedene Weise geschehen. In Anlehnung an HUTCHINSON (1982) sollen hier die Möglichkeiten zur Einbindung von GIS-Daten in Klassifizierungsverfahren von Satellitenbildern in drei Ansätze unterteilt werden:

- Stratifizierung („*stratification*“)
- Modifikation des Klassifizierungsprozesses („*classifier modification*“)
- Klassifikations-Optimierung („*postclassification sorting*“)

Stratifizierung:

Ziel des ersten Ansatzes ist es, eine Bildszene in Straten zu teilen, die sodann einfacher bzw. genauer zu klassifizieren sind, da die Varianz an Klassen durch die Stratenbildung eingegrenzt ist. Somit wird die Verwechslung bzw. spektrale Konfusion zwischen spektral ähnlichen Objekten, die im Gesamtbild vorhanden sein kann, verringert. Die Kriterien, die zur Stratifizierung herangezogen werden, sollten die Abweichungen der spektralen Charakteristik der Objekte in signifikanter Art und Weise beschreiben (HUTCHINSON 1982).

Zur Stratifizierung von Datensätzen, z.B. bei der Klassifizierung von Vegetationseinheiten, werden sehr häufig *Digitale Geländemodelle* (DGM) verwendet. Hierbei wird eine Unterteilung des Datensatzes in Bereiche mit bestimmten Höhenstufen vorgenommen, wodurch die zu differenzierenden, potentiell vorkommenden Vegetationstypen eingegrenzt werden können (vgl. hierzu z.B. STRAHLER 1981). Andere Arbeiten verwenden als Stratifizierungsbasis zur Ableitung von Vegetationstypen weitere vom DGM abgeleitete Parameter wie Hangneigung und Exposition sowie zusätzliche thematische Informationen, wie geologische Karten (DAVIS & GOETZ 1994).

Ein weiteres Beispiel für diesen Ansatz sind Maskierungen von Datensätzen, die in gewisser Weise auch Stratifizierungen des Bildmaterials darstellen. Thematische Informationen, wie die Abgrenzungen bestehender Karten, können verwendet werden, um vor der eigentlichen

Klassifizierung des Bildmaterials eine Maskierung des Bilddatensatzes in Hauptgruppen (z.B. Wasser-, Wald- und „Nichtwald“-Flächen) vorzunehmen. Dadurch können nun Teile des Bildmaterials getrennt voneinander bearbeitet und anhand spektraler Merkmale weiter klassifiziert werden. Die Maskierung von Daten ermöglicht es auch, Fehlklassifizierungen von spektral kaum oder nicht trennbaren Vegetationsformen, wie z.B. die Verwechslung von bestimmten Waldtypen mit Vegetationsformationen landwirtschaftlicher Nutzung, durch eine vorherige Trennung in eine Wald- und „Nichtwald“-Maske auszuschließen.

Das Problem der Stratifizierung ist, daß scharfe, explizite Grenzen zur Teilung in kleinere Einheiten verwendet werden und keine allmählichen Übergänge simuliert werden können, so daß immer nur diskrete Felder entstehen. Die gewählte Grenzziehung hat deshalb einen sehr hohen Einfluß auf die Ergebnisse der Klassifizierung.

Modifikation des Klassifizierungsprozesses:

Die zweite Möglichkeit, GIS-Daten zur Verbesserung der Klassifizierung von Satellitenbilddaten heranzuziehen, besteht in der Verwendung thematischer Information als eine Art zusätzliches Band direkt bei der Klassifizierung. Allerdings ist ihr Einsatz aufgrund der unterschiedlichen Natur der Daten beschränkt, da es sich bei den meisten GIS-Datensätzen im Vergleich zur spektralen Information der Sensordaten (kontinuierliche Daten), um diskrete, in Klassen eingeteilte Daten handelt. Im Rahmen der traditionellen, auf statistischen Merkmalen aufbauenden Klassifikationsverfahren, wie z.B. dem oft verwendeten *Maximum-Likelihood*-Klassifikators, können solche thematischen GIS-Daten nicht verwendet werden, da sich hieraus keine brauchbaren Statistiken ableiten lassen, auf deren Basis sich eine Diskriminierung von anwendungsspezifischen Klassen stützen könnte. Außerdem muß bei diesen Klassifikatoren das Kriterium der Normalverteilung der Daten erfüllt sein.

Eine gewisse Möglichkeit zur Nutzung thematischer Information innerhalb traditioneller, pixelbasierter Klassifikationsverfahren bietet der Einsatz eines *Box-* oder *Parallelepiped-*Klassifikators. Dabei werden Grenzwerte sowohl für die einzelnen Spektralkanäle des Sensors als auch für zusätzliche „künstliche“ Bänder mit thematischer Information (die in einem GIS abgelegt sein können) festgelegt, innerhalb welcher die analysierten Bildelemente einer vorgegebenen Klasse zugeordnet werden. Im zweidimensionalen Merkmalsraum ergeben sich dadurch rechteckige Felder, die diesem Verfahren auch seinen

Namen gaben. Diese im Prinzip einfache Methode besitzt den Nachteil, daß mitunter beträchtliche Lücken zwischen den einzelnen, anhand signifikanter oberer und unterer Grenzwerte definierten „Boxen“ entstehen können und es damit zu einer Nicht-Klassifizierung der betreffenden Bildelemente kommt. Probleme entstehen auch bei der häufig eintretenden Überlappung von Objektklassen, da Klassen mit einer hohen Korrelation nicht ausreichend anhand des rechteckigen Entscheidungsfeldes beschrieben werden können und somit eine Differenzierung nicht möglich ist (vgl. hierzu RICHARDS & JIA 1999, LILLESAND & KIEFER 2000).

In einer Reihe weiterer wissenschaftlicher Arbeiten werden thematische Informationen eines GIS-Datensatzes verwandt, um eine gesicherte Auswahl von Referenzflächen (Trainingsgebieten) für eine überwachte, multispektrale Klassifizierung von z.B. Waldvegetationseinheiten (SEPEHRY et al. 1998), Feldfrüchten (ORTIZ et al. 1997, WILLIAMS 1995) oder allgemeinen Landnutzungsklassen (RHEIN 1999) vorzunehmen. KUNZ (1999) erreichte z.B. im Rahmen seines „integrativen“ Ansatzes eine Verbesserung der Satellitenbildklassifikation einer Landsat TM-Szene durch eine automatisierte Auswahl von Trainingsgebieten aus den topographischen Elementen eines ATKIS-DLM200-Datensatzes im Maßstab 1:200 000. Anders als bei herkömmlicher Vorgehensweise im Rahmen rechnergestützter Klassifizierungen, konnten so die Nachteile der subjektiven Interaktion durch den Bearbeiter und die daraus resultierende eingeschränkte Nachvollziehbarkeit bei der Ergebnissfindung vermieden werden.

Klassifikations-Optimierung:

Der letzte Ansatz beinhaltet die Verwendung von GIS-Daten *nach* einer bereits erfolgten multispektralen Klassifizierung von Fernerkundungsdaten. Mit Hilfe thematischer Information, z.B. aus topographischen Karten, kann eine Reklassifizierung des Ergebnisses erfolgen und somit eine nachträgliche Verbesserung durch eine Trennung von Klassen, die geringe spektrale Unterschiede aufweisen, erreicht werden (BÄHR & VÖGTLE [Hrsg.] 1998). Auch können Zusatzinformationen, wie z.B. in Form einer historischen Agrar(Anbau)-Datenbank, zur Validierung und interaktiven Korrektur einer Klassifizierung von Feldfrüchten verwendet werden. Derartige Zusatzinformation zum Anbau von landwirtschaftlichen Produkten erlauben Rückschlüsse auf die gegenwärtig angebaute Feldfrucht (ORTIZ et al. 1997).

4.2.3 Umfassende Integration von FE und GIS

Diejenigen „Integrations“-Verfahren, die sowohl eine Verwendung von GIS-Datensätzen zur Unterstützung der Bildverarbeitung wie auch, in entgegengesetzter Richtung, eine Aktualisierung des GIS-Datenbestandes anhand Fernerkundungsdaten vorsehen, stellen im Vergleich zu den beiden anderen, oben erwähnten Verfahren die *umfassendere* Integrationsstufe in der Bearbeitung raumbezogener Daten dar. Dabei kann die Definition des Begriffes „data fusion“, die von einer EARSeL-(European Association of Remote Sensing Laboratories) Arbeitsgruppe festgelegt wurde, als Vorlage dienen. Durch die Verbindung („fusion“) von Daten unterschiedlicher Quellen soll ein Informationsgewinn von „höherer Qualität“ erreicht werden, wobei dieser Qualitätsanspruch von der jeweiligen Anwendung abhängt (WALD 1999).

Hier soll der Begriff „data fusion“ in Anlehnung an BALTSAVIAS & HAHN (1999) allerdings noch weitergefaßt und als „system integration“ verstanden werden, was bedeutet, daß verschiedene Systemkomponenten zusammengeführt werden, die eng miteinander kooperieren und letztendlich zu einem besseren Ergebnis führen, das ohne diese „Kooperation“ nicht zustande gekommen wäre.

Ein solcher umfassender Integrationsgrad von Fernerkundung und GIS befindet sich nach BALTSAVIAS & HAHN (1999) jedoch noch in den Anfängen oder ist aufgrund von Limitierungen in der derzeit verfügbaren Auswertesoftware kaum zu erreichen (vgl. z.B. JANSSEN 1994).

Beispiele zur engeren Verknüpfung von FE und GIS findet man in den Arbeiten von SKIDMORE (1990), SKIDMORE et al. (1991) und SRINIVASAN & RICHARDS (1990). Darin werden Verbesserungen der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten (Landsat TM-Daten) mit Hilfe von Zusatzdaten nicht spektraler Art und unter Verwendung *wissensbasierter* Methoden vorgestellt. Dabei werden jedoch lediglich pixelbasierte Verfahren angewandt, die alle nach den Regeln der *Booleschen-Logik* arbeiten und daher bei der Entscheidungsfindung nur diskrete Wertefelder bzw. scharf abgegrenzte Wertebereiche berücksichtigen, was den sich kontinuierlich verändernden Parametern nicht gerecht wird. Auch ist eine Aktualisierung des GIS-Datenbestandes aufgrund der pixelweisen Vorgehensweise stark eingeschränkt.

STOLZ (1998) bringt bei einer *wissensbasierten* Landnutzungsklassifikation mit besonderer Differenzierung von landwirtschaftlichen Nutzungsflächen innerhalb eines pixelbasierten Verfahrens bereits *Fuzzy-Logik* zum Einsatz, wodurch zumindest das Problem der diskreten Wertefelder behoben werden kann (vgl. Kap 4.3.2).

HINTON (1999) wiederum, verfolgt in der Integration von Fernerkundung und GIS keinen pixelbasierten, sondern einen objektorientierten Ansatz. Innerhalb vordefinierter Grenzen homogener Gebiete erfolgt hierbei die Klassifizierung von Radarbildern anhand der Statistik der Grauwertinformation der Bildelemente. Zur Abgrenzung werden allerdings bestehende Objektgrenzen eines GIS-Vektordatensatzes vorausgesetzt, wie z.B. die administrative Parzellierung von Waldbeständen. Die Statistiken der Bildelemente können als Attribute des jeweiligen Polygons gespeichert und für die nachfolgende Klassifizierung verwendet werden. Das Ergebnis der Klassifizierung kann dann zur bestehenden Attributtabelle der Vektordatensätze hinzugefügt werden.

Die zur Erreichung einer umfassenden Integration von FE und GIS notwendigen Verfahren unter Nutzung neuer sehr hochauflösender Bilddaten sind den o. e. Arbeiten deutlich geworden. Zielführend sind aller Voraussicht nach objektorientierte Ansätze unter Verwendung von *Fuzzy-Logik*, durch welche eine Einbindung von Wissen im Sinne einer Etablierung *Wissensbasierter Systeme* erfolgen kann (vgl. Kap. 4.3.2).

4.3 Wissensbasierte Systeme

In der visuellen Auswertung von Bilddaten werden die für die spezielle Fragestellung relevanten Informationen abhängig von der Erfahrung des jeweiligen Interpreten erfaßt. Dabei fließen neben dem Hintergrundwissen des Bearbeiters sowohl spektrale, textuelle und Form-Merkmale, aber v.a. auch Nachbarschaftsbeziehungen (Kontext) in die Auswertung mit ein. Die Art und Weise, wie der Mensch, nach integrativer Betrachtung des gesamten Bildinhalts, die Identifikation und Klassifikation bzw. Interpretation von Objekten vornimmt, wird „assoziativ“ genannt. Nachteil eines solchen Vorgehens ist, daß die Entscheidungen nach intuitiver und subjektiver Beurteilung getroffen werden und somit nur eingeschränkt nachvollziehbar und reproduzierbar sind. In der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse liegt dagegen u.a. der Vorteil objektiver, computergestützter Verfahren, denen dann aber die „kognitive Erfahrung“ des menschlichen Interpreten fehlt (SCHNEIDER et al. 2000).

Aus diesen Gründen gehen in der Bildanalyse von Fernerkundungsdaten die Bestrebungen bei der Entwicklung von Auswerteverfahren dahin, die Vorteile beider Methoden zu verknüpfen. Die computergestützten Verfahren sollen die Entscheidungsfindung eines menschlichen Interpreten möglichst nachempfinden. Die Einbindung von Wissen bzw. die Entwicklung von *Wissensbasierten Systemen* innerhalb der Bildverarbeitung steckt allerdings nach wie vor in den Anfängen und verläuft langsamer, als zunächst erwartet worden ist (vgl. BILL 1999b und BALTSAVIAS & HAHN 1999).

4.3.1 Definition und Aufbau

Wissensbasierte Systeme, die aus dem Forschungsgebiet der *Künstlichen Intelligenz (KI)* stammen, stellen zusammen mit der Objektorientierung neue, zukunftsweisende Entwicklungsrichtungen in der digitalen Bearbeitung raumbezogener Information dar. Werden KI-Technologien in Geo-Informationssysteme eingebunden, so spricht man auch von „Intelligenten Geo-Informationssystemen“ (IGIS), welche die Anwendungsmöglichkeiten und den Nutzen konventioneller Methoden erheblich erweitern (vgl. dazu COULSON et al. 1991 und FERRIER & WADGE 1997).

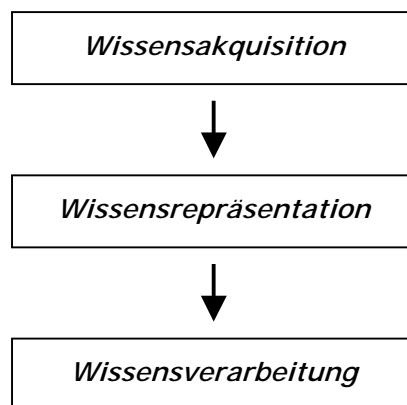
Wissensbasierte Systeme ermöglichen, unter Einbeziehung und Nutzung von Wissen und Erfahrungen, die Lösung komplexer Probleme durch computergestützte Nachahmung menschlichen Verhaltens.

In Anlehnung an STREIT (1999) kann man dabei im wesentlichen zwei Arten von Wissen unterscheiden:

Theoretisches Wissen: setzt sich aus Fakten, Tabellen, Regeln, Formeln und dem Wissen über Gesetzmäßigkeiten und Lösungsmethoden zusammen und wird meist aus der Literatur gewonnen.

Praktisches Wissen: bezeichnet unvollständiges, vages Wissen, das auf Heuristiken oder „Faustregeln“ beruht, wie auch auf Erfahrungs- und Intuitionswerten, die zu den Problemlösungsstrategien eines Fachexperten zählen.

Die einzelnen Schritte, die zur Realisierung eines *Wissensbasierten Systems* führen, sind:



Bei der **Wissensakquisition** erfolgt die Erfassung und die Strukturierung des Wissens über einen bestimmten Anwendungsbereich bzw. die Gewinnung an Information über das zu lösende Problem. Der anwendungsspezifische Wissenserwerb kann direkt vom Fachexperten vorgenommen werden oder indirekt in Wechselwirkung zwischen Fachexperten und Systembediener von statten gehen. Dabei ergeben sich verschiedene Möglichkeiten des Wissenstransfers und der Wissensstrukturierung, die sich in Form von Interviews, Diskussionsrunden, Erfahrungsaustausch, Studium der Fachliteratur, etc.

vollziehen können (BILL 1999b, STREIT 1999). Der Prozeß des Wissenserwerbs ist in der Regel der zeitaufwendigste, schwierigste (FERRIER & WADGE 1997, STREIT 1999, WHARTON 1989) und zudem oft unterschätzte (SCHOLLES 1999) Teil bei der Implementierung eines *Wissensbasierten Systems*.

Bei der **Wissensrepräsentation** wird Wissen in einer formalisierten, für das jeweilig verwendete Computerprogramm auswertbaren Form dargestellt. Die Formalisierung des Wissens kann mit Hilfe von semantischen Netzen, „frames“ oder Produktions-Regeln erfolgen (GOODCHILD & KEMP [Hrsg.] 1990):

- Anhand semantischer Netze lassen sich hierarchische und stark vernetzte Wissenstrukturen v.a. graphisch gut darstellen. Wissen kann hier in Form gerichteter Graphen, als Satz von Knoten, die beliebige Objekte, Ereignisse oder Sachverhalte repräsentieren, organisiert werden. Die inhaltlichen Beziehungen zwischen den zusammengehörigen Knoten werden anhand von Kanten bzw. Verknüpfungssträngen dargestellt. (BILL 1999b, GOODCHILD & KEMP [Hrsg.] 1990, STREIT 1999).
- „Frames“ vereinen verschiedene Eigenschaften von Objekten oder Objektklassen in einem Rahmen (BILL 1999b). Attribute, welche die Objekte beschreiben, werden hierbei als „slots“ bezeichnet (GOODCHILD & KEMP [Hrsg.] 1990).
- Produktions-Regeln bilden die häufigste Wissensrepräsentationsmethode im Zusammenhang mit raumbezogenen Anwendungen. Die Regeln bestehen aus zwei Teilen: einer Bedingung bzw. Prämisse und der daraus resultierenden Aktion bzw. Schlußfolgerung. Die Aktion wird ausgeführt, wenn die Bedingung erfüllt ist. Die Beziehungen zwischen den einzelnen Tatsachen wird so anhand von „Wenn-Dann-Aussagen“ beschrieben (BILL 1999b, GOODCHILD & KEMP [Hrsg.] 1990).

Bei der **Wissensverarbeitung** wird das in der sog. „*Wissensbasis*“ gespeicherte Wissen, das (in einem 2. Schritt) in eine digital verarbeitbare Form transformiert wurde, anhand geeigneter Verfahren zur Lösung fachspezifischer Probleme herangezogen. Dabei werden aus den vorhandenen Fakten und aufgrund der gegebenen Zusammenhänge Schlüsse

gezogen und somit neues Wissen ermittelt. Dieser Schlußfolgerungsmechanismus wird auch „*Inferenz-Mechanismus*“ genannt (BILL 1999b).

4.3.2 Expertensysteme

Expertensysteme stellen einen derzeit expandierenden Zweig *Wissensbasierter Systeme* dar (BILL 1999b, COULSON et al. 1991) und sind speziell in den Geo- und Umweltwissenschaften deren wichtigster Anwendungsbereich (STREIT 1999). *Expertensysteme* sind dazu bestimmt, das Spezialwissen in einem Computerprogramm so zu implementieren, daß die Problemlösungsfähigkeit und das Entscheidungsverhalten von Fachexperten nachgebildet werden kann. Sie sollen die Bewältigung von Aufgaben ermöglichen, deren Schwierigkeitsgrad normalerweise ein signifikantes Spezial- oder Expertenwissen erfordert (DAUME 1999). Die Unterstützung des Anwenders bei der Lösung eines Problems erfolgt dabei meist in speziellen und sehr eng begrenzten Bereichen (SCHOLLES 1999, STREIT 1999). Kennzeichnend für *Expertensysteme* im Vergleich zu anderen *Wissensbasierten Systemen* ist eine explizite, beschreibende und deutliche Darstellung von Wissen, die Rückschlüsse auf die verwendeten Eigenschaften und Beziehungen zur Charakterisierung des Objekts erlaubt (BÄHR & VÖGTLE [Hrsg.] 1998). In den meisten Fällen handelt es sich bei *Expertensystemen* nämlich um regelbasierte Systeme, in denen das Wissen eines bestimmten Anwendungsbereichs in Form von Regeln, auch Produktionsregeln genannt (s. vorheriges Kapitel), repräsentiert und formalisiert wird. Die Regeln in der Grundform von:

Wenn <Bedingung> *dann* <Schlußfolgerung>

können auch komplexer Natur sein, indem mehrere Bedingungen durch logische Operatoren wie *und* bzw. *oder* verknüpft werden.

Ein Vorteil regelbasierter Expertensysteme ist, daß das Wissen hierbei klar strukturiert ist und deshalb Entscheidungen nachvollziehbar bleiben. Außerdem sind das anwendungsspezifische Wissen, in seiner Gesamtheit als sogenannte Wissensbasis, und die Verfahren zur Nutzung des Wissens, die sogenannte Problemlösungskomponente, voneinander getrennt (BÄHR & VÖGTLE [Hrsg.] 1998, COULSON et al. 1991, STREIT 1999), so

daß die einzelnen Komponenten ausgetauscht werden können und das Regelwerk leicht an die jeweiligen Bedingungen anzupassen ist (WHARTON 1989).

Nach FERRIER & WADGE (1997) muß jedes „gute“ Expertensystem in der Lage sein, mit Unsicherheit und Unbestimmtheit umzugehen, da nahezu jedes Fachgebiet Daten enthält, die von Natur aus ungenau, unvollständig oder nicht meßbar sind.

Wissen, das zur Unterstützung der Analyse und Auswertung von FE-Daten herangezogen werden kann, liegt außerdem häufig in Form vom vagem Wissen (sog. „Praktisches Wissen“, s. Kap. 4.3.1) vor, das nur anhand linguistischer Parameter formuliert werden kann, wobei zur Beschreibung eines Merkmals oftmals adjektivische oder adverbiale Attribute, wie z.B. *groß, stark, sehr, wenig, meistens, fast*, etc. verwendet werden. Ein *Expertensystem* sollte in der Lage sein, mit dieser Form von Wissen umzugehen, so daß ein qualitatives Schlußfolgern auch auf Basis solcher unscharfer Information möglich ist, damit das Schlußfolgerungsverhalten dem eines menschlichen Experten näherkommt.

In den stark prozedural orientierten, heute gängigen GIS- und FE-Verfahren ist die Bearbeitung und Speicherung von unvollständiger, unsicherer und ungenauer Information nicht realisiert (vgl. dazu u.a. BILL 1999b). Eine Möglichkeit zur Einbindung dieser Art von Wissen in die Bearbeitung von Fernerkundungsdatensätzen bietet die Verwendung der *Fuzzy-Logik*.

Fuzzy Logik kann als Erweiterung der konventionellen *Boolschen Logik* verstanden werden, die es ermöglicht Werte zwischen 0 und 1, also zwischen absolut wahr und absolut falsch, zu definieren. Die Theorie der *Fuzzy Logik* wurde von Dr. LOTFI ZADEH in den 60ziger Jahren eingeführt, als Mittel um die Ungewißheit der natürlichen Sprache zu modellieren. *Fuzzy Logik* umschreibt den Übergang einer diskreten Sichtweise zu einer kontinuierlichen Betrachtungsform in denen keine scharfe Grenzen mehr gibt.

4.4 Das angewandte Verfahren

4.4.1 Die Bildverarbeitung mit *eCognition*

Mit Hilfe des Bildanalyseverfahrens *eCognition* der Firma *Delphi2 Creative Technologies* konnte das im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Ziel, die Integration von Fernerkundung und GIS, umgesetzt werden. Das Programm, das voraussichtlich im August 2000 auf dem Markt erscheinen wird, stand als Beta-Version zur Verfügung. Die Ergebnisse der Analysen, die während des Projektzeitraums mit *eCognition* erstellt wurden, dienten auch als Funktionstest dieses Programms im Hinblick auf eine mögliche Bearbeitung forstlich relevanter Fragestellungen.

eCognition folgt einem objektorientierten und multiskalaren Bildverarbeitungskonzept. In einem ersten Schritt werden homogene Bildobjekte beliebiger Auflösung in einem automatisierten, als fraktal-hierarchisch bezeichneten Segmentierverfahren extrahiert, welche dann in einem weiteren Schritt klassifiziert werden können.

4.4.1.1 Segmentierung

Ziel der Segmentierung ist es, sich durch die Extraktion von Objekten der visuellen Auswertung eines menschlichen Interpreten anzunähern, indem die Bildelemente (Pixel) zu „sinnvollen“ Einheiten zusammengefaßt werden. „Sinnvoll“ bedeutet in diesem Zusammenhang, daß die in der realen Welt vorkommenden Formen durch Abgrenzung von Teilbereichen der Bilddaten, die einen räumlichen Zusammenhang aufweisen, wiedergegeben werden sollen.

Eine ausführliche Beschreibung des Segmentierverfahrens findet man bei BAATZ & SCHÄPE (2000). Es handelt sich hierbei um ein „region merging“ Verfahren, wodurch die gebildeten Bildobjekte paarweise zu größeren Objekten zusammengefaßt werden. Dabei spielen die lokalen Beziehungen zu den umgebenden Gebieten eine entscheidende Rolle.

Das Anwachsen der jeweiligen Objekte erfolgt, ausgehend vom Einzelpixelobjekt, simultan über das ganze Bild. Das verfolgte Prinzip zielt auf eine Minimierung der durchschnittlichen Heterogenität der Bildobjekte, abhängig von ihrer Größe über das gesamte Bild. Daher werden diejenigen Objekte miteinander verbunden, bei denen der Zuwachs an Heterogenität am geringsten bleibt. Die zulässige Heterogenitätsgrenze innerhalb eines zu

bildenden Objekts kann durch die Festlegung eines Toleranz-Schwellenwerts (*scale parameter*) von dem Bearbeiter bestimmt werden, was indirekt zur Festsetzung der durchschnittlichen Objektgröße führt (BAATZ et al. 1999, BAATZ & SCHÄPE 2000). Die Möglichkeit, Bildobjekte in jeder beliebigen Größe extrahieren zu können, ist wichtig, um sie an die jeweilige Fragestellung oder das Datenmaterial anpassen zu können.

Die Heterogenität, auf die sich die Segmentierung stützt, kann neben der spektralen Information des Bildmaterials auch zusätzlich anhand von Formmerkmalen beschrieben werden. Letztere erfassen die Abweichung von einer Idealform und sorgen dafür, daß v.a. bei stark texturierten Daten (Radar oder hochauflösende Bilddaten) weiche Kanten oder mehr oder weniger kompakte Formen erzeugt werden (BAATZ & SCHÄPE 2000).

Grundstrategie von *eCognition* ist es, durch wiederholtes Segmentieren, unter verschiedenen Einstellungen, Ebenen mit Bildobjekten unterschiedlicher Auflösung aufzubauen, die miteinander semantisch verbunden sind und gleichzeitig dargestellt werden (s. Abb. 4.2). Dadurch entsteht ein hierarchisch aufgebautes Netz von Objekten unterschiedlicher Auflösung, in welchem Objekte höherer Auflösung die Unterobjekte von Objekten geringerer Auflösung sind. Dies bedeutet, daß bei der Segmentierung die Grenzen der Oberobjekte immer respektiert werden. Die hierarchische Objektstruktur hat zur Folge, daß jedes Bildobjekt neben seiner Nachbarschaft auch seine Ober- und Unterobjekte „kennt“, so daß Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten formuliert werden können, die als zusätzliches Merkmal zur Auswertung zur Verfügung stehen (BAATZ et al. 1999).

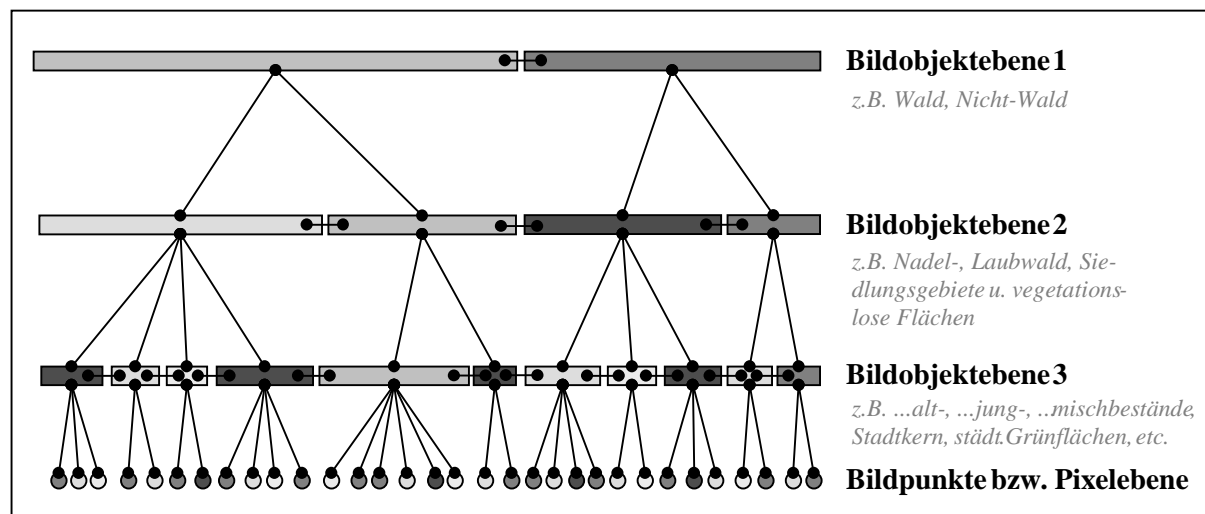


Abb. 4.2: Hierarchisches Netz aus Bildobjekten unterschiedlicher Auflösung (nach Delphi2, eCognition, verändert)

4.4.1.2 Klassifizierung

Nach erfolgter Segmentierung können den hieraus erstellten „Objektprimitiven“ anhand von *Fuzzy-Logik-Zugehörigkeitsfunktionen* oder eines *Nearest Neighbour*-Klassifikators Klassen zugeordnet werden (BAATZ & SCHÄPE 2000). Der dabei verwendete **objektorientierte Ansatz** besitzt gegenüber pixelbasierten Verfahren den großen Vorteil, daß neben der spektralen Information auch Form- und Texturmerkmale zur Beschreibung der Klassen herangezogen werden können. Außerdem können über die Nachbarschaftsbeziehungen auch Kontextmerkmale zur Differenzierung der einzelnen Objekte verwendet werden, was einer menschlichen Wahrnehmung bei der Erkennbarkeit von Objekten (anhand Informationen aus deren Umfeld) nahe kommt. Aufgrund des **multiskalaren Aufbaus** von *eCognition* können darüber hinaus noch die Beziehungen zu Objekten, die sich unterhalb bzw. oberhalb in der Hierarchie der Bildobjektebenen befinden, zur Verbesserung der Klassifikation miteinbezogen werden.

Die Zugehörigkeit eines Bildobjekts zu einer bestimmten Klasse wird anhand einer Reihe von Kriterien, die zur Charakterisierung dieser Klasse hilfreich sind, festgelegt. Dem Objekt wird dabei letztlich die Klasse zugewiesen, die den höchsten Zugehörigkeitswert erreicht hat. Die einzelnen Merkmale bzw. Kriterien, die anhand von Zugehörigkeitsfunktionen allesamt zur Beschreibung einer Objektklasse in Form von Regeln herangezogen werden, lassen sich anhand von *Fuzzy-Operatoren* verbinden, so daß komplexere

Merkmalsbeschreibungen formuliert werden können. Dabei wird ein neuer Wert, nämlich der Grad der Zugehörigkeit eines Objekts zu einer bestimmten Klasse (die durch die einzelnen Kriterien beschrieben wurde) ermittelt. Folgende Operatoren stehen hierbei zur Verfügung:

- and (min):* Fuzzy Logik „und“-Operator unter Verwendung der Minimum-Funktion
- and (*):* Fuzzy Logik „und“-Operator unter Verwendung der Multiplikation
- or (max):* Fuzzy Logik „oder“-Operator unter Verwendung der Maximum-Funktion
- mean (arithm):* Fuzzy Logik „und“-Operator unter Verwendung des arithmetischen Mittelwertes
- mean (geo):* Fuzzy Logik „und“-Operator unter Verwendung des gewichteten Mittelwertes

Wie unterschiedlich sich die verschiedenen Operatoren auf die Ermittlung des endgültigen Zugehörigkeitswertes auswirken, wird anhand des folgenden Beispiels deutlich:

Beispiel: Beurteilung der Eignung der Objekte 1-3, aufgrund der Standortskriterien Höhe ü. NN (A) und Exposition (B) einer bestimmten Vegetationsklasse (z.B. Nadelwald) anzugehören. Dabei ergeben sich folgende Zugehörigkeitswerte:

Kriterium A = {(Objekt 1; 0,9), (Objekt 2; 0,4), (Objekt 3; 0,1)}
(Höhe ü. NN)

Kriterium B = {(Objekt 1; 0,2), (Objekt 2; 0,5), (Objekt 3; 0,75)}
(Exposition)

Bei der Kombination der einzelnen Zugehörigkeitswerte für ein spezifisches Objekt ergeben sich, je nach Verwendung der oben beschriebenen Operatoren, folgende Gesamt-Zugehörigkeitswerte:

$$A \text{ „and (min)“ } B = \{(\text{Objekt 1; } 0,2), (\text{Objekt 2; } 0,4), (\text{Objekt 3; } 0,1)\}$$

$$A \text{ „and (*)“ } B = \{(\text{Objekt 1; } 0,18), (\text{Objekt 2; } 0,2), (\text{Objekt 3; } 0,075)\}$$

$$A \text{ „or (max)“ } B = \{(\text{Objekt 1; } 0,9), (\text{Objekt 2; } 0,5), (\text{Objekt 3; } 0,75)\}$$

$$A \text{ „mean (arth)“ } B = \{(\text{Objekt 1; } 0,55), (\text{Objekt 2; } 0,45), (\text{Objekt 3; } 0,425)\}$$

$$A \text{ „mean (geo)“ } B = \{(\text{Objekt 1; } 0,42), (\text{Objekt 2; } 0,45), (\text{Objekt 3; } 0,27)\}$$

Bei Verwendung des „and“-Operators, der einer logischen *Intersektion* bzw. der *Schnittmenge* (\cap) entspricht, wird das Ergebnis vom kleinsten, in einem Objekt vorkommenden Fuzzy-Zugehörigkeitswert bestimmt (z.B. für Objekt 1 der des Kriteriums „Exposition“). Der „and“-Operator tendiert somit zu einer vorsichtigen Schätzung der Zugehörigkeit. „And“-Operationen werden dann eingesetzt, wenn beide oder mehrere Kriterien erfüllt sein sollen, damit die Annahme zutrifft. Nach BOTHE (1993) erfolgt unter Verwendung dieser Durchschnittsoperatoren eine zu pessimistische Beurteilung, da bei einer zu negativen Bewertung eines Kriteriums keine Korrektur bzw. Kompensation durch die Bewertungen der anderen Kriterien möglich ist.

Der fuzzy „or“-Operator verhält sich andererseits, wie eine logische *Vereinigung* (\cup), bei der die endgültige resultierende Zugehörigkeit vom höchsten (Maximum) aller, in die Operation miteinfließenden Werte bestimmt wird (s.o.). Das Ergebnis wird bei dieser Art von Verknüpfung wiederum **nur von einem**, in diesem Falle jedoch höchsten Wert aller zur Beschreibung der gesuchten Klasse herangezogenen Kriterien bestimmt.

Um dies zu umgehen, können die einzelnen Werte anhand eines multiplikativen Faktors (*and (*)*) oder durch Mittelwertbildung („mean“) verknüpft werden, so daß das Endergebnis durch alle Zugehörigkeitswerte der einzelnen Kriterien beeinflußt wird.

Bei der Bildung des Produkts aus zwei Zugehörigkeitswerten (*and (*)*) kommt es jedoch zu einer Unterschätzung der Werte, da Werte kleiner 1 miteinander multipliziert werden, so daß das Ergebnis immer kleiner oder gleich dem kleinsten

bei der Operation beteiligten Zugehörigkeitswert sein wird (BONHAM-CARTER 1996), wie auch an obigem Beispiel zu sehen ist.

4.4.2 Ansatz zur Integration von FE und GIS (Ablauf)

Der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewählte Ansatz sieht *eine umfassende Integration* von Fernerkundung und GIS vor, die sich in verschiedenen Bearbeitungsebenen vollzieht. Dabei wurde u.a. das im vorangegangenen Kapitel beschriebene *objektbasierte* Bildverarbeitungsprogramm verwendet.

In Abbildung 4.3 ist der Verfahrensablauf schematisch dargestellt, wodurch die verschiedenen Verbindungen zwischen Fernerkundung und GIS, den beiden Systemen zur Bearbeitung raumbezogener Information, deutlich werden und in dem die einzelnen Integrationsschritte erkennbar sind.

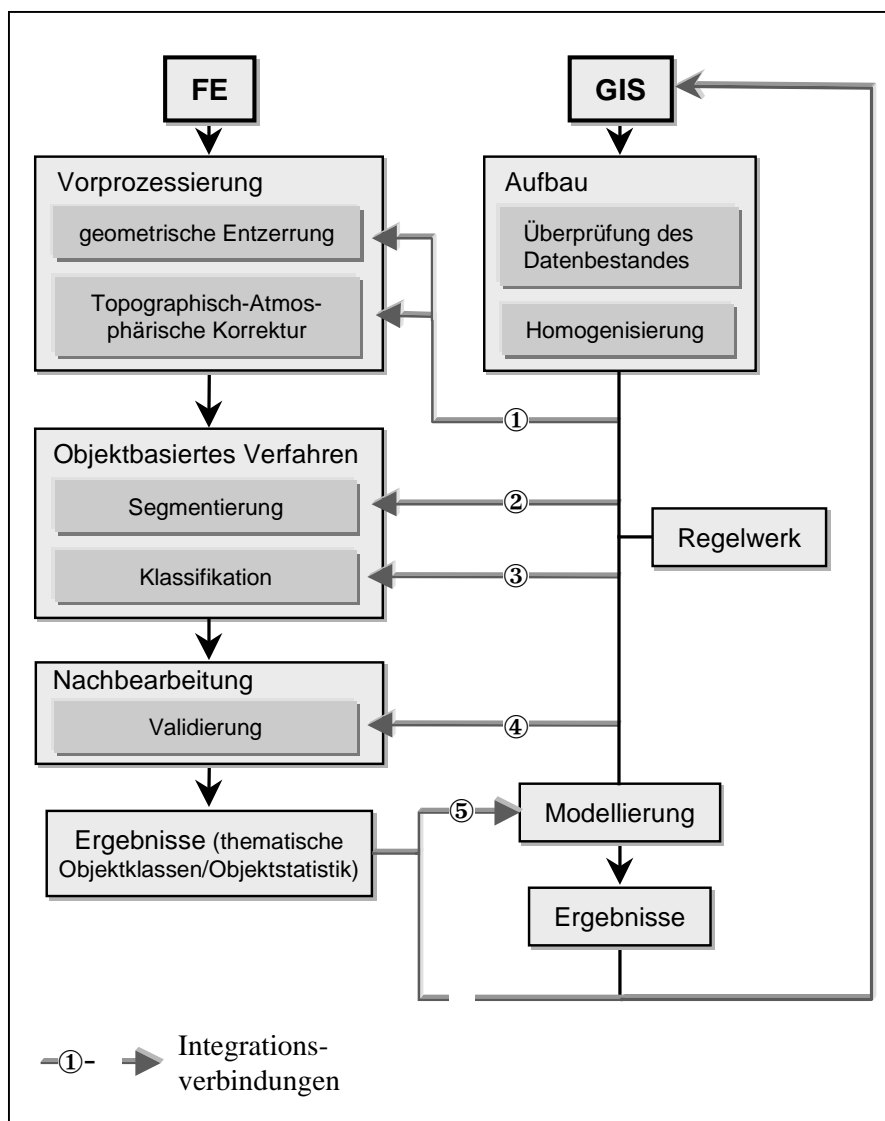


Abb.4.3: Ablaufschema des mehrstufigen Integrationsverfahrens. Die Integration vollzieht sich vor (① ②), während (③) und nach (④ ⑤) der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten.

So wird als erstes, nämlich bereits bei der *Vorprozessierung* von Fernerkundungs-Daten, Geländeinformation verwendet, um atmosphärische und topographische Einflüsse zu korrigieren und somit Fehlzusweisungen bei Klassifizierungen aufgrund der Verfälschung des spektralen Signals gleicher Objekte zu minimieren. Hierzu wurde das Programm ATCOR3 (RICHTER 1997) eingesetzt. Darüber hinaus können die Höhenangaben aus dem digitalen Geländemodell (DGM) für eine genaue Georeferenzierung der Daten in x , y , z , unter Beseitigung der Lageverzerrungen, die auf Geländehöhenunterschiede zurückgehen, einbezogen werden.

Beide Verfahren gehören zu den fernerkundlichen Standardverfahren (vgl. u.a. McCORMICK (1997), RICHARDS (1999), RICHTER (1997), SCHOWENGERDT (1997)) und sind insbesondere im alpinen Bereich unerlässlich. Eine ausführliche Beschreibung der bei der *Vorprozessierung* verwendeten Verfahren ist bei DE KOK (2000) zu finden, der im Rahmen des hier dargestellten Projekts den fernerkundlichen Teil bearbeitete.

Außerdem werden in dem hier beschriebenen *wissensbasierten Analyseverfahren* die raumbezogenen thematischen Daten, die im GIS gespeichert sind, nach ihrer Überprüfung hinsichtlich thematischer wie geometrischer Fehler, verwendet und zwar:

- vor der Klassifizierung der Fernerkundungsdaten (②): z.B. als Grenzen bestimmter, administrativer Einheiten (Bestandesgrenzen in der Forstbetriebskarte), die direkt in die Verarbeitung der Bilddaten miteinfließen (s. Kap.4.6.2), so daß neben den spektralen Merkmalen noch andere Informationen als Abgrenzungsmerkmal für die Segmentierung von Objekten verwendet werden können.
- direkt bei der Klassifizierung (③): als zusätzliche Entscheidungskriterien für die Zuordnung von Objektklassen mit Hilfe von aus dem GIS-Datensatz abgeleitetem Wissen, das in Form eines Regelwerks formalisiert ist, z.B. zur Beschreibung des standörtlichen Potentials bei der Bestimmung der Baumartenzusammensetzung (s. Kap. 4.5.1.3).
- nach der Klassifizierung: zur Validierung der Ergebnisse ④, bevor diese für weitere Modellierungen verwendet werden ⑤ (s. Kap. 4.5.2) oder in den digitalen GIS-Datenbestand zurückgeführt werden , um z.B. die forstliche Datenbasis zu erweitern (s. dazu Kap.4.6.2).

Der integrative Prozeß verläuft hierbei also in beide Richtungen:

- Zum einen werden GIS-Daten zur Unterstützung der Analyse von Fernerkundungsdaten verwendet. Ziel ist es eine Verbesserung in der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Klassifizierungsergebnisse zu erreichen sowie auch neue Informationen zu gewinnen, die allein auf Basis der Fernerkundungsdaten nicht zu erlangen gewesen wären.

- Zum anderen werden die gewonnenen Ergebnisse wiederum, zusammen mit weiterer, aus den Fernerkundungsdaten abgeleiteter Information, wie es z.B. verschiedene statistische Merkmale aus dem Bilddatensatz sein können, nicht nur als eine weitere Datenebene in GIS-Modellierungen verwendet (vgl. Kap. 4.2.1), sondern auch, was noch entscheidender ist, zur Aktualisierung des GIS-Datenbestandes herangezogen.

Damit sind die Kriterien für eine *umfassende Integration* (vgl. Kap 4.2.3) von Fernerkundung und GIS erfüllt. Der zuletzt genannte Aspekt wird allerdings erst durch die Verwendung eines objektbasierten Verfahrens bei der Bildanalyse möglich (s. dazu Kap. 4.1).

Die wichtigste Komponente des hier verfolgten mehrstufigen Integrationsansatzes ist das implementierte *Wissensbasierte System*, dessen schematischer Aufbau in Abbildung 4.4 dargestellt ist.

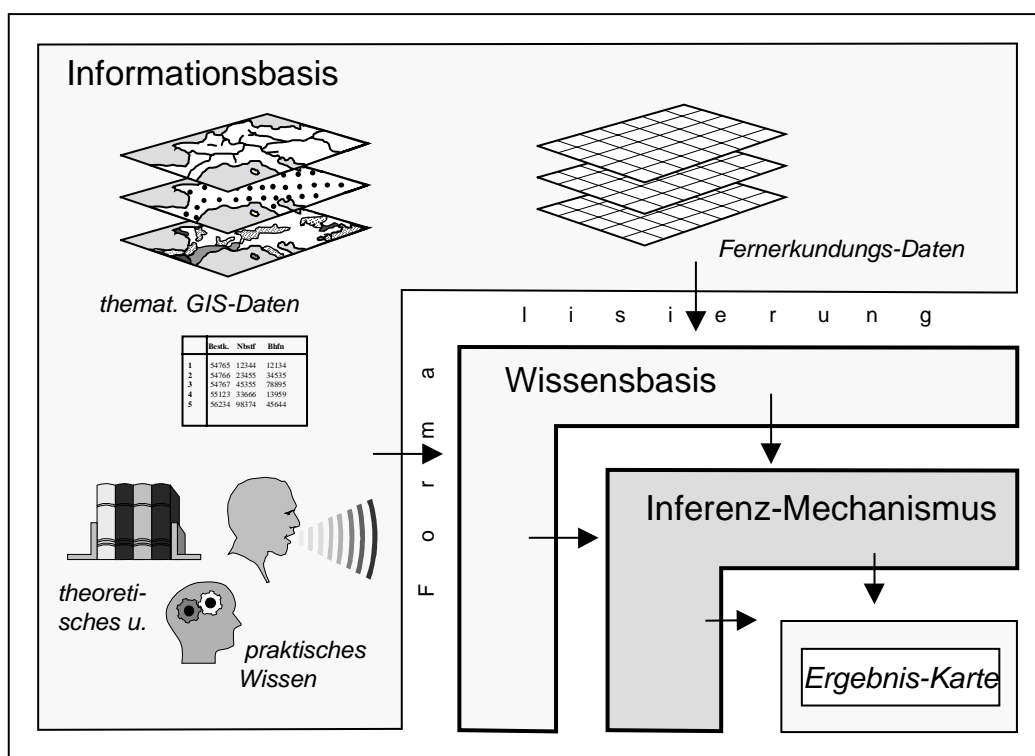


Abb. 4.4: Aufbau der Wissensbasierten Bildanalyse-Komponente

Das Kernstück bilden hierbei das Regelwerk bzw. das in der Wissensbasis enthaltene formalisierte Wissen und die zur Umsetzung der Regeln benötigte Inferenz-Mechanismus (s. Kap. 4.3.1).

Das Wissen wurde dabei aus der sogenannten Informationsbasis gewonnen, in welcher der Datenbestand des Projekt-GIS Oberammergau einschließlich der vorliegenden Fernerkundungsdaten (s. Kap. 3.2.3) sowie theoretisches und praktisches Expertenwissen (s. Kap. 4.5.1.1.2) enthalten sind.

Das *Wissensbasierte System*, in diesem Falle in Form eines regelbasierten *Expertensystems*, ermöglicht eine direkte Verknüpfung zwischen den beiden, bisher getrennt agierenden Instrumenten Fernerkundung und GIS. Es ist diese Komponente, in der sich die Integration von GIS und FE am deutlichsten zeigt und auch umsetzen läßt, da bei der Transformation in Regelvorschriften die bislang existierenden Grenzen verschwinden.

Bei der Aufstellung eines Regelwerks bzw. zur Schaffung der für das Expertensystem benötigten Wissensbasis müssen folgende Schritte beachtet werden:

Aufgabe:

1. Definition der Aufgabenstellung: klare Formulierung des zu erreichenden Zieles, zu deren Lösung ein Expertensystem benötigt wird. Wo liegen die Probleme bei herkömmlichen Verfahren, warum lassen sich gewisse Klassen nicht unterscheiden?

Wissensakquisition:

2. Erstellung eines Modells des Untersuchungsgegenstands: Anhand welcher Kriterien läßt sich das Untersuchungsobjekt charakterisieren und welche Eigenschaften ermöglichen eine Unterscheidung zu anderen Objekten? Welche Beziehungen zu anderen Objekten und räumlichen Abhängigkeiten gibt es? → Nachahmung des Expertenwissens/ Wie läßt sich das Wissen strukturieren?
3. Informationsrecherche: Welche Informationen stehen im Datenbestand zur Beschreibung des Untersuchungsobjekts zur Verfügung bzw. welche Daten sind zusätzlich erforderlich?

4. Vorbereitung bzw. Erstellung der Datensätze, welche die Einflußfaktoren darstellen

Wissensrepräsentation:

5. Formalisierung der gesammelten Information zu Regelvorschriften, Festlegung der Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen (Erstellung der *Wissensbasis*)

Wissensverarbeitung:

6. Verknüpfung der Einzelaussagen bzw. Regeln
7. Schlußfolgerung unter Anwendung der Regeln → *Inferenzprozeß*

Verifizierung:

8. Überprüfung des Ergebnisses und eventuelle Justierung und Editierung der Regelvorschriften.

Besonders wichtig ist hierbei, daß der Regelsatz so übersichtlich und so wenig komplex wie möglich gehalten wird, damit die getroffenen Entscheidungen nachvollziehbar und der Einfluß der einzelnen Faktoren bei der Klassenfindung erkennbar bleiben. Der Regelsatz kann dahingehend editiert werden, daß diejenigen Parameter, die für eine Entscheidungsfindung irrelevant waren, gelöscht oder durch solche zusätzlichen Kriterien ergänzt werden, die zu einer besseren Differenzierung der Klassen beitragen. Somit kann der große Vorteil von regelbasierten Systemen auf Basis von *Fuzzy-Logik*, nämlich die klare Strukturierung von Wissen, gewahrt bleiben (vgl. Kap. 4.3.2).

Das Regelwerk bildet die Schnittstelle, die den Wissensseintrag und die Wissensseinbindung in die Klassifikation leistet. Der Aufbau eines solchen Regelwerks und der Einsatz eines Expertensystems soll hier anhand eines Beispiels zur Ableitung der Baumartenzusammensetzung in Waldbeständen erläutert werden.

4.5 Anwendungsbeispiel: Baumartenzusammensetzung

Die Bestimmung der Baumartenzusammensetzung in Waldbeständen alpiner Regionen zählt zu den wichtigen forstlichen Parametern, die Auskunft darüber liefern, wie gut diese Bestände eine Schutzfunktion erfüllen und ob diese auch weiterhin als gesichert gelten kann. So hat z.B. die Tanne für die Funktionstüchtigkeit und Selbstregulierungskraft des Bergmischwaldes eine große Bedeutung (vgl. MAYER & OTT 1991).

Zusammen mit anderen, meist standortsspezifischen Kriterien kann man anhand der Baumartenzusammensetzung auf die Stabilität eines Bestandes schließen. Da sich die Stabilität im Laufe des Bestandeslebens ändern kann (z.B. Überalterung, fehlende Verjüngung, hoher Wildverbiß) ist eine ständige Aktualisierung dieses Merkmals bzw. des Gefährdungsgrades einzelner Bestände (vgl. auch AMMER & SEITZ 2000) von hohem forstpolitischen Interesse. Inwieweit diese Einschätzung mit Hilfe von Fernerkundungs-Information geleistet werden kann, ist daher eine für die forstliche Praxis wichtige Frage.

Eine differenzierte Unterscheidung der Baumartenzusammensetzung in Waldgebieten ist bei herkömmlichen Fernerkundungsverfahren aufgrund der spektralen Ambiguitäten der einzelnen Klassen nur bedingt möglich (vgl. Kap.4.1). Will man daher eine Verbesserung der Klassifizierung erreichen und dem Dilemma klassischer Bildverarbeitungstechniken bei der Verwendung sehr hochauflösender Fernerkundungsdaten wirksam entgegen, so müssen neue Verfahren eingesetzt werden, zu denen auch der hier verwendete und bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Ansatz zählt.

Im alpinen Raum ist ein besonders enger Zusammenhang zwischen spezifischen naturräumlichen Bedingungen und dem Auftreten bestimmter Vegetationstypen gegeben. Die Gesamtheit aller Standortfaktoren wie Klima, Wasser, Gestein, oberflächennaher Untergrund und Relief, aber auch die biotischen Gegebenheiten wie Wildbesatz, Bestockung, anthropogene Einflüsse, Schädlinge, etc. bestimmen die Eignung eines Lebensraums zum Erhalt der Schutzfunktionfähigkeit. Der Leitgedanke war deshalb, die Gesetzmäßigkeiten und Wechselwirkungen für das Vorkommen bestimmter Vegetationsformationen in Form eines Regelwerks hinreichend genau zu beschreiben und als Grundlage für die wissenschaftliche Klassifizierung zu verwenden. Dazu wurden die hierfür notwendigen Zusatzdaten mit Hilfe des GIS aufbereitet und konnten so, zusammen mit den Fernerkundungsdaten, als zusätzliche Entscheidungskriterien für die Zuordnung

von Objektklassen unter Einsatz des aufgestellten Regelwerks in die Klassifizierung von Baumarten miteinbezogen werden.

Bei den verwendeten Fernerkundungsdaten handelte es sich um digitale Orthophotos mit einer ursprünglichen Auflösung von 80 cm und eine multispektrale SPOT-Szene (20 m), die beide auf eine Bodenauflösung von 5 Meter resampelt wurden.

Um die Auswirkung der Verwendung von GIS-Zusatzdaten auf die Klassifizierung der FE-Daten beurteilen zu können, wurden die FE-Bilddaten vorab rein anhand ihrer spektralen Merkmale und den hieraus abgeleiteten Parametern wie Textureigenschaften klassifiziert. Die Bearbeitung und Vorprozessierung der FE-Daten sowie eine Aufstellung der Unterschiede des verwendeten objektbasierten Verfahren gegenüber herkömmlichen pixelbasierten Klassifizierungsansätze ist in der Arbeit von DE KOK (2000) zu finden.

4.5.1 Das Regelwerk

Das Regelwerk ist das Bindeglied zwischen Fernerkundung und GIS und formalisiert in diesem Fall die Gesetzmäßigkeiten für das Vorkommen gewisser Vegetationsformationen. In einem ersten Schritt muß hierbei, entsprechend des in Kap. 4.4.2 dargestellten Ablaufschemas zum Aufbau eines regelbasierten *Expertensystems*, die aufgabenspezifische Akquisition von Wissen erfolgen.

4.5.1.1 Wissensakquisition

Das für den Aufbau des Regelwerks nötige „Wissen“ wurden aus verschiedenen Quellen abgeleitet (s. Abb. 4.5). Zum einen wurden die Informationen durch Auswertung der Daten aus der Forsteinrichtungsdatenbank erworben, zum anderen wurden diese aus Literatur und Expertenwissen zusammengetragen. Abbildung 4.5 zeigt den Ablauf der Erstellung der Wissensbasis bzw. des „Fuzzy-Regelwerkes“, das zur Bestimmung der Baumartenzusammensetzung anhand von Fernerkundungsdaten herangezogen wurde und nun im Einzelnen in den folgenden Kapiteln erläutert wird.

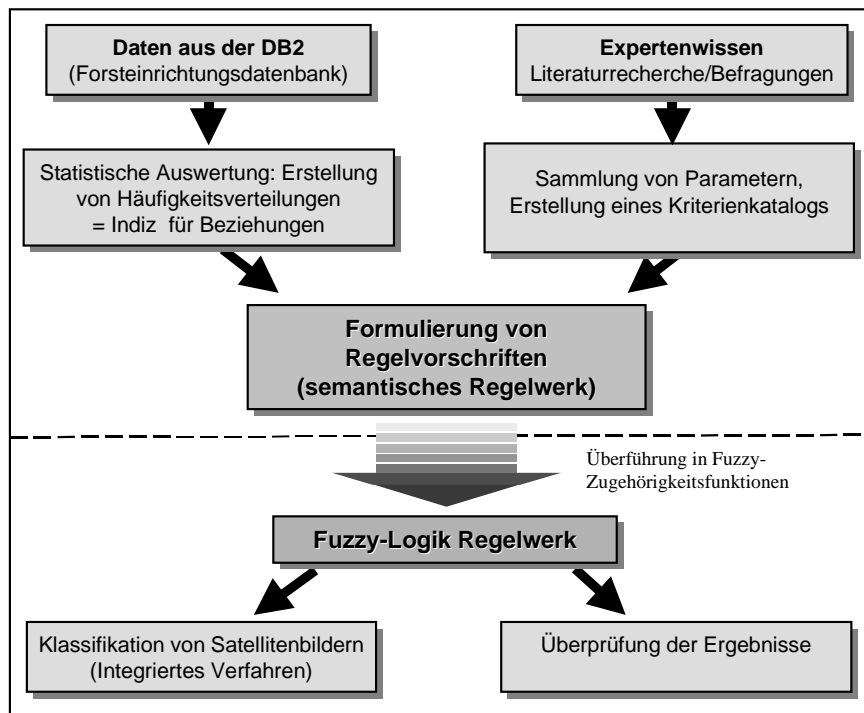


Abb.4.5: Ablaufschema für die Erstellung eines Regelwerkes

4.5.1.1.1 Auswertung der Daten aus der Forsteinrichtungsdatenbank

In den Daten der Forsteinrichtungsdatenbank, speziell in den Daten der Stichprobeninventur, finden sich u.a. Informationen über die Baumartenverteilung und –zusammensetzung, die statistisch ausgewertet wurden. Dabei war es zuerst notwendig, eine Verknüpfung zwischen den Sachdaten der DB2 und den räumlichen Daten zu erstellen. Erst nachdem ein räumlicher Bezug hergestellt wurde, konnten Abfragen hinsichtlich einer gezielten Auswahl der Daten erfolgen, um z.B. eine Trennung nach Baumarten zu erreichen und auch um die an einem Inventurpunkt vorherrschende Baumart zu ermitteln.

In einem zweiten Schritt wurden nun die so neu gewonnenen Informationen mit anderen GIS-Datenlayers, wie z.B. den aus dem DGM abgeleiteten Geländeparametern Höhe und Exposition, verschnitten. Die Ergebnisse wurden für die einzelnen, nach Auswertung der Stichprobeninventur im Untersuchungsgebiet vorkommenden Baumarten (s. Abb. 4.6) ausgewertet und anschließend Häufigkeitsverteilungen berechnet. Dabei wurden zum einen

die Baumarten unabhängig von ihrem jeweiligen Anteil untersucht, zum anderen wurde nur die am jeweiligen Inventurpunkt vorherrschende Baumart bei der Untersuchung berücksichtigt.

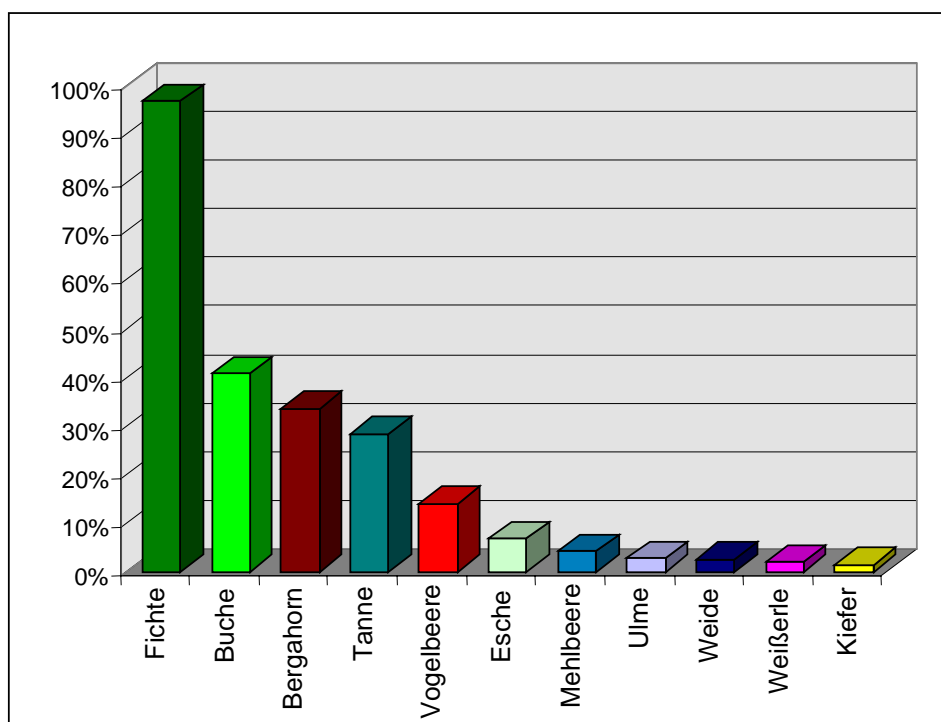


Abb. 4.6: Absolutes Vorkommen der Hauptbaumarten an den Inventurpunkten im Untersuchungsgebiet

Durch das Eingrenzen der Stichproben sollte gewährleistet werden, daß nur diejenigen Bäume bei der Ermittlung von Standorteigenschaften erfaßt werden, die Dauergesellschaften bilden und deshalb flächig bedeutsam genug sind, um Rückschlüsse zur Formulierung von Regelvorschriften zu erlauben. Das sporadische Vorkommen einer Baumart außerhalb ihrer natürlichen Verbreitungsgrenze, dann meist nur im Nebenbestand oder in schlecht wüchsiger bzw. verkrüppelter Form, darf nicht als Hinweis auf einen für die entsprechende Baumart typischen Standort bewertet werden (s. u.a. OTT et al. 1997).

Bei der Ermittlung der Baumartenverteilung in Bezug auf die Reliefparameter Höhe und Exposition wurden alle im Untersuchungsgebiet gelegenen Inventurpunkte einbezogen. Dabei wurde die Höhenverteilung der einzelnen Baumarten unter Berücksichtigung des entsprechenden Anteils an der Gesamtzahl der Inventurpunkte in der jeweiligen Höhenklasse berechnet. Das gleiche gilt für die Beziehung zwischen den Hauptbaumarten

und der Exposition. Auch hier wurde der Anteil der jeweiligen Klasse an der Gesamtzahl der Inventurpunkte pro Expositionslage ermittelt. Desweiteren wurde anhand der Inventurdaten die Wirkung der Exposition auf die Höhenverteilung der Baumarten untersucht. Auf diese Weise konnte die aus der Literatur bekannte Verschiebung der Höhenstufen an sonnseitigen Hangstandorten bestätigt und für die Erstellung einer neuen Regelvorschrift verwendet werden.

Die Tatsache, daß die Aufnahmepunkte der Stichprobeninventur aufgrund ihrer Bestimmung nicht wieder aufgefunden werden müssen und daher nicht, wie es bei einer permanenten Stichprobeninventur der Fall ist, exakt markiert sind, stellt für diese Untersuchung kein Problem dar. Zum einen besteht durch den verwendeten Ansatz nicht die Notwendigkeit exakte Wertebereiche künstlich abzugrenzen, da die Möglichkeit bestand, fließende Übergänge zu simulieren. Zum anderen wurden die Daten lediglich als Anhaltswerte benötigt, um die Regelvorschriften an die Verhältnisse im Untersuchungsgebiet anzupassen.

Im folgenden ist die Beziehung ausgewählter Baumarten zu den Reliefparametern Höhe und Exposition als Ergebnis der Auswertung der Daten aus der Forsteinrichtungsdatenbank dargestellt.

Baumart Fichte:

Die Auswertung aller Inventurpunkte im Bereich des Untersuchungsgebietes hinsichtlich der Höhenverteilung, ergab einen relativ hohen Anteil der Baumart Fichte in fast allen Höhenlagen und zwar unabhängig ob diese dort generell (blaue Kurve, Diagramm links in Abb. 4.7) oder gegenüber anderen Baumarten vorherrschend (rosa Kurve) auftritt. In beiden Fällen konnten Inventurpunkte, an denen die Fichte vorkommt, noch in Höhen bis zu ca. 1760 m ermittelt werden. Ab einer Höhe ü. NN von 1630 m erscheint die Fichte, abgesehen von der Latsche, als alleinige Baumart.

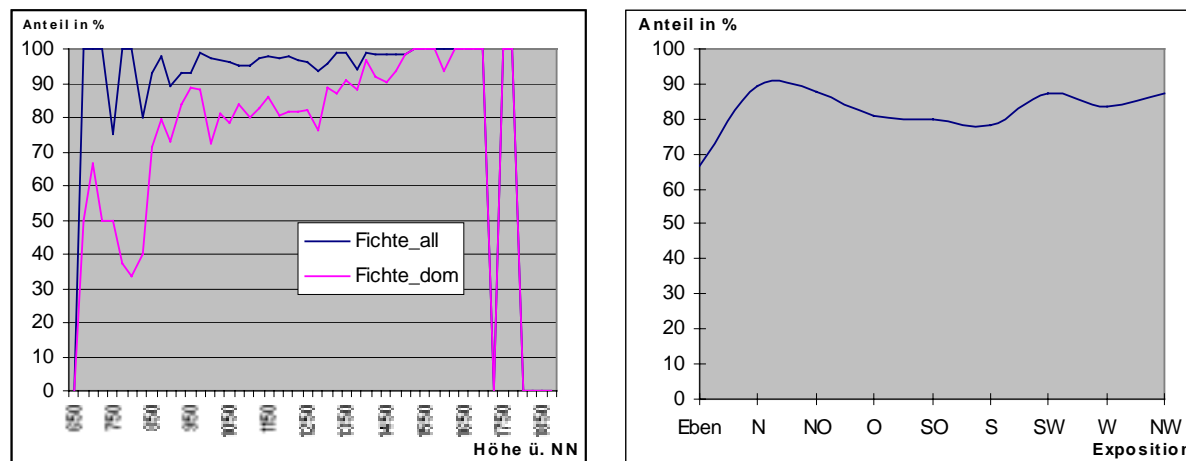


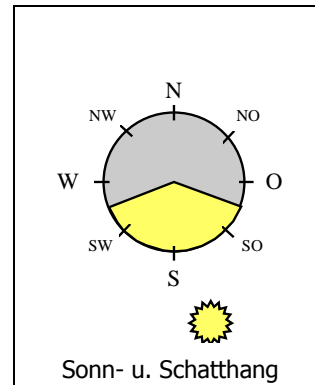
Abb.4.7: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Fichte

Bezüglich der Exposition (Abb. 4.7, rechtes Diagramm) läßt sich keine deutliche Tendenz bzw. Präferenzlage für das Vorkommen der Baumart Fichte ableiten. Die Kurve verläuft relativ flach und zeigt geringe Abweichungen zwischen den einzelnen, pro Expositionsklasse berechneten prozentualen Anteilen an der Gesamtzahl der dort vorkommenden Inventurpunkte. So liegt der Wert bei nördlich exponierten Standorten bei 89%, wohingegen bei südlichen Expositionen noch 78% aller dort aufgenommenen Probeflächen der Inventurpunkte mit Fichte als dominanter Baumart bestockt sind.

Das Ergebnis der Untersuchung zum Einfluß der Exposition auf die Höhenverteilung der Baumart Fichte ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Hierfür wurden die Inventurpunkte, in denen die Baumart Fichte vorherrscht, mit Exposition und Höhe ü. NN verschnitten. Beide Ergebnisse wurden miteinander verknüpft, um für jede Expositionsklasse die niedrigste und die maximal erreichte Höhe für das Vorkommen der Fichte zu ermitteln.

Tab. 4.1: Beziehung zwischen der Höhenverteilung der Baumart Fichte und der Exposition

Exposition	Höhe (min)	Höhe (max)
N	754 m	1659 m
NO	846 m	1616 m
O	696 m	1654 m
SO	656 m	1697 m
S	779 m	1762 m
SW	895 m	1648 m
W	893 m	1636 m
NW	694 m	1630 m



Das höchste Vorkommen der Baumart Fichte wurde somit für Südlagen ermittelt. Die Verschiebung der Höhengrenze zu den kühleren Nordhängen beträgt hier bis zu 100 m.

Baumart Buche:

In Abbildung 4.8 wird die Höhenverteilung der Inventurpunkte, an denen die Baumart Buche auftritt anhand einer Überlagerung mit den Daten des digitalen Geländemodells deutlich. Sowohl im oberen zweidimensionalen Teilbild, das einen Überblick über das Untersuchungsgebiet darstellt, als auch in den beiden unteren, auszugsweisen 3D-Darstellungen ist zu erkennen, daß keiner der ermittelten Inventurpunkte oberhalb 1400m über NN liegt.

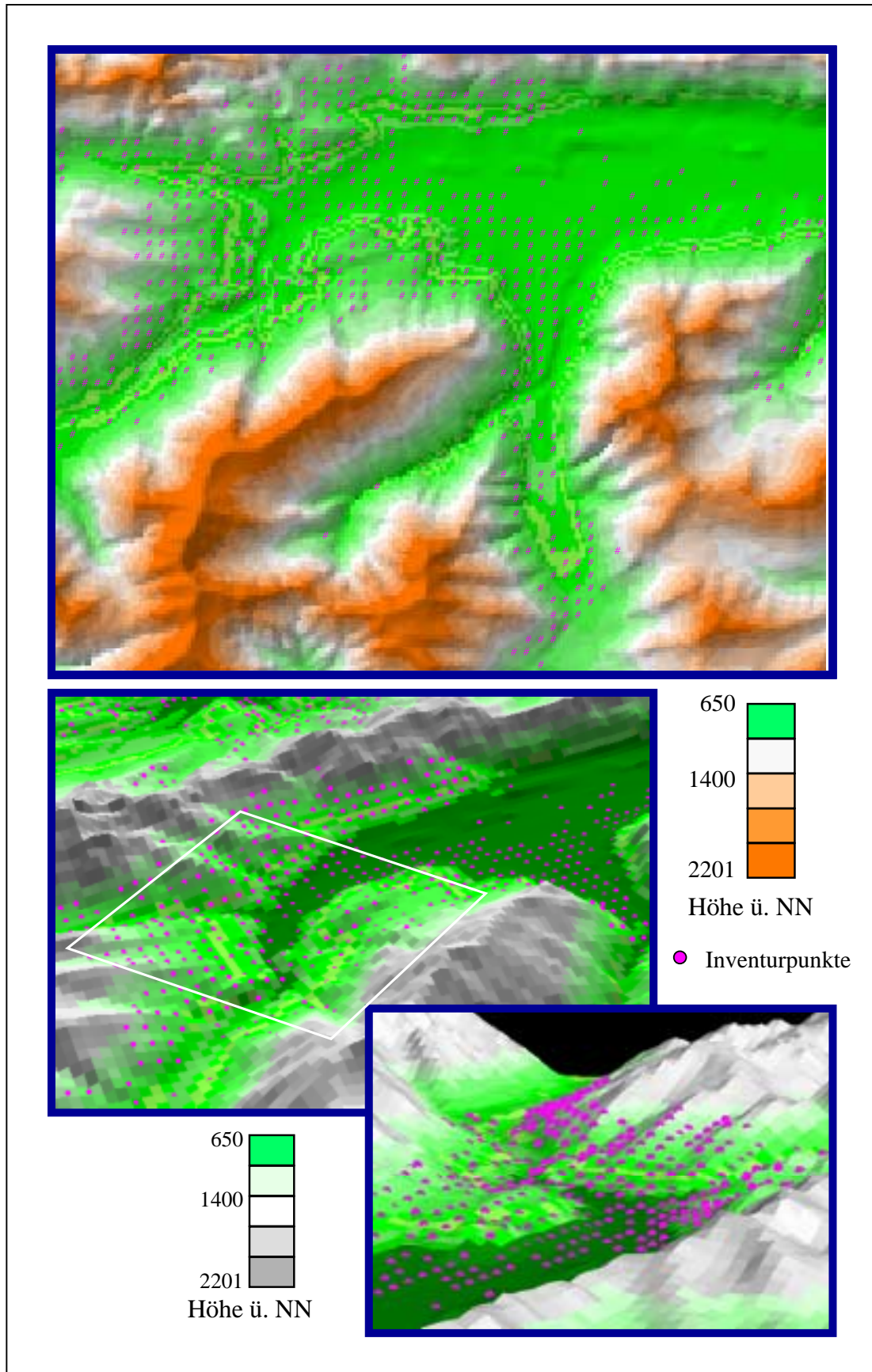


Abb. 4.8: Höhenverteilung der Inventurpunkte mit Vorkommen der Baumart Buche

Betrachtet man nun die Höhenverteilung aller im Untersuchungsgebiet vorhandenen Inventurpunkte (grüner Kurvenverlauf in Abb. 4.9, links), so nimmt die Anzahl der Inventurpunkte, an denen die Baumart Buche vorkommt, ab einem Höhenbereich von 1300 m deutlich ab, um bei 1450 m gegen 0 zu gehen. In der Häufigkeitsverteilung der Stichproben, in denen die Baumart Buche vorherrscht (rosa Kurvenverlauf), ist ebenfalls ein kontinuierlicher Rückgang ab 1300 m zu verzeichnen, wobei aber die Höhengrenze hier schon bei 1418 m erreicht wird.

Im rechten Diagramm der Abbildung 4.9 wird die Beziehung zwischen der Baumart Buche und dem Geländeparameter Exposition veranschaulicht. Bei dieser Verknüpfung wurden, wie auch im vorangegangenen Beispiel der Baumart Fichte, nur die Inventurpunkte berücksichtigt, in denen die Baumart Buche vorherrscht. Wenn man den Anteil der jeweiligen Klasse an der Gesamtzahl der Inventurpunkte pro Expositionslage berücksichtigt, so zeigt sich ein Maximum in süd- bis südöstlichen Lagen.

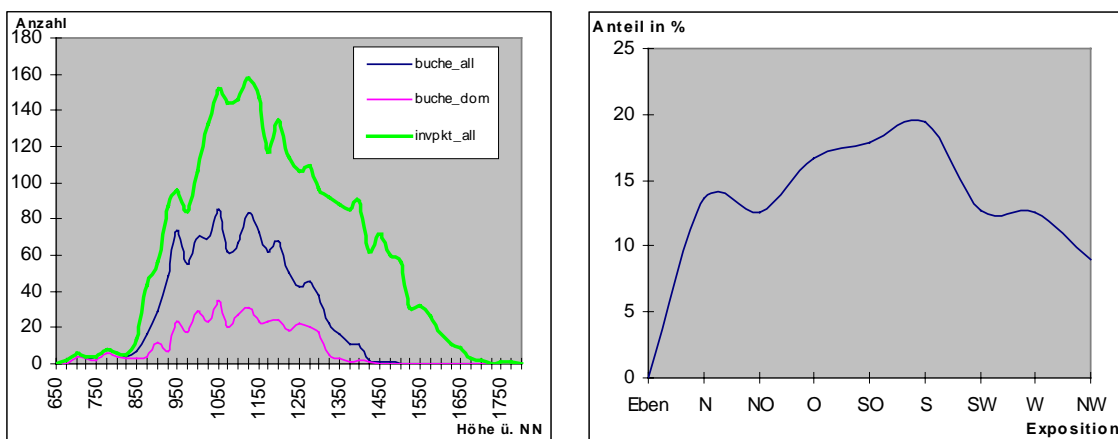
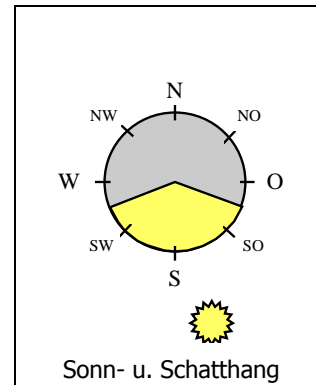


Abb. 4.9: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Buche

Der Einfluß der Exposition auf die Höhenverteilung der Baumart Buche ist Tabelle 4.2 zu entnehmen. Es wird deutlich, daß die größten Höhenwerte in Südlagen erreicht werden. Das gilt sowohl für die Inventurpunkte, an denen die Buche überhaupt vorkommt, als auch für diejenigen, an denen sie die Hauptbaumart bildet.

Tab. 4.2: Beziehung zwischen der Höhenverteilung der Baumart Buche und der Exposition

Exposition	Höhe (min)	Höhe (max)
N	754 m	1309 m
NO	708 m	1344 m
O	696 m	1299 m
SO	683 m	1399 m
S	678 m	1418 m
SW	940 m	1381 m
W	909 m	1285 m
NW	935 m	1298 m



Baumart Kiefer

Für die Baumart Kiefer ergibt sich (unter Berücksichtigung des entsprechenden Anteils an der Gesamtzahl der Inventurpunkte der jeweiligen Höhenklasse) eine Höhenverteilung mit einem Maximum bei 675 m und einer Obergrenze bei 1579 m (Abb. 4.10, Diagramm blaue Kurve). Bei den Inventurpunkten mit Kiefer als vorherrschender Baumart beschränkt sich dagegen die Höhenverteilung auf Bereiche zwischen 1109 und 1490 m (rosa Kurvenverlauf).

Die Schwerpunkte der Exposition (Abb. 4.10 rechtes Diagramm), hier wiederum ausgedrückt als prozentualer Anteil der mit Kiefern dominierten Bestände an der Gesamtzahl der innerhalb einer Expositionsklasse vorkommenden Inventurpunkte, lassen ein deutliches Maximum der Kiefer auf SW- und W-Hängen erkennen.

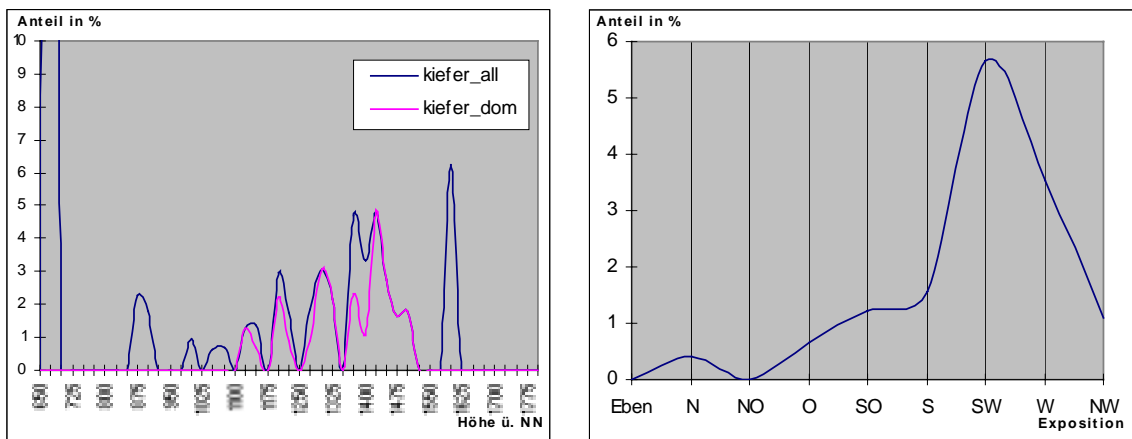


Abb. 4.10: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Kiefer

Baumart Tanne

Die Verteilung der Baumart Tanne bezüglich der Höhe ist in Abbildung 4.11 (linkes Diagramm) dargestellt. Die ermittelte Obergrenze der Bereiche, in denen die Tanne dominierend auftritt oder mindestens mitherrscht (rosa Kurvenverlauf), liegt bei ca. 1580 m und ist nur unwesentlich niedriger als die Höhengrenze, in denen sie laut Stichprobeninventur unabhängig von ihrem prozentualen Anteil vorkommt (blauer Kurvenverlauf). Dort liegen die Werte zwischen 1585 – 1630 m. Die ersten Tannen-vorkommen treten in Höhenbereichen um 920 m bzw. um 850 m auf.

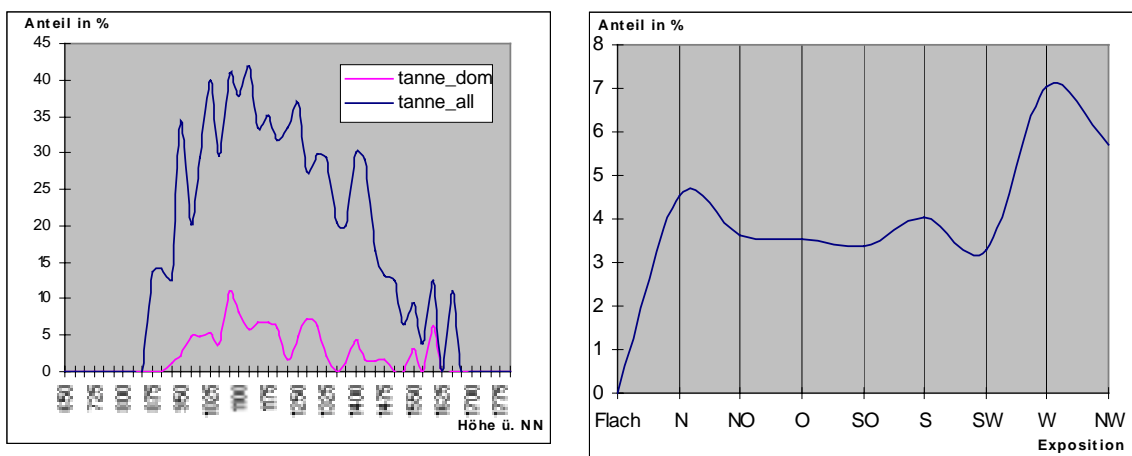


Abb. 4.11: Höhen- und Expositionsverteilung der Baumart Tanne

Die aus einem Vergleich der Diagramme (Abb. 4.9-4.11) erkennbaren Unterschiede in der Höhenverteilung zwischen Buche und Tanne (die Tanne geht deutlich höher hinauf) läßt sich auch aus Abbildung 4.12 ablesen. Diese Abbildung entstand durch Überlagerung der Inventurpunkte, an denen Buche bzw. Tanne vorkommen, mit dem digitalen Geländemodell. Die Höhenbereiche sind farblich so angelegt, daß Gebiete bis 1400 m in hellgrünen bis grünen Tönen erscheinen und mit zunehmender Höhe in braune Töne übergehen.

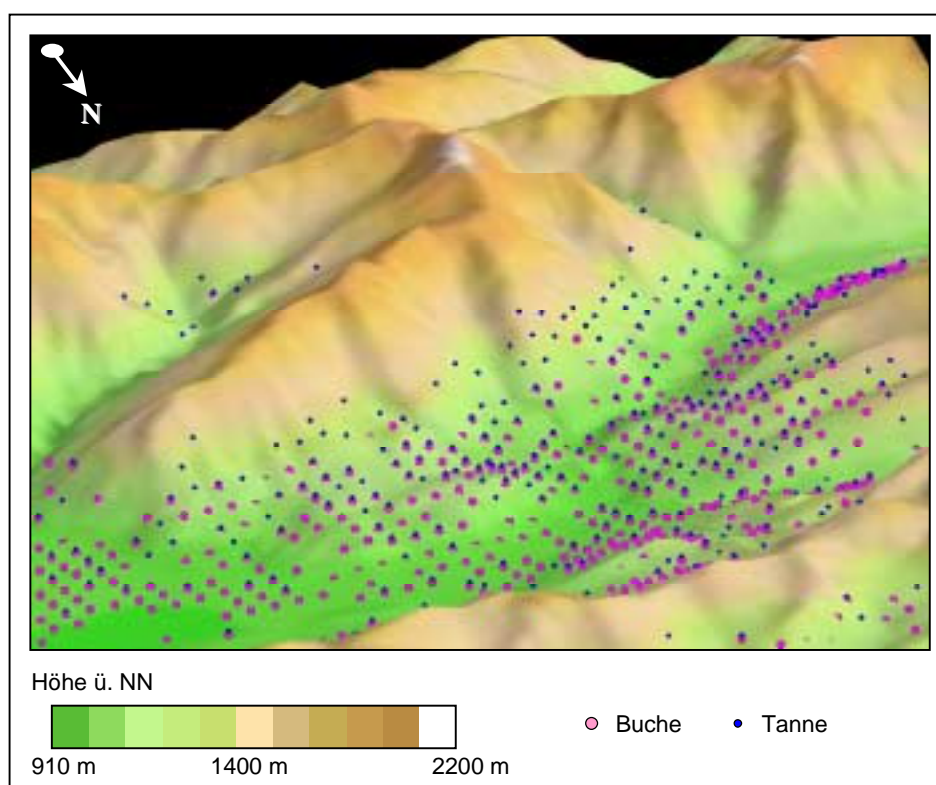
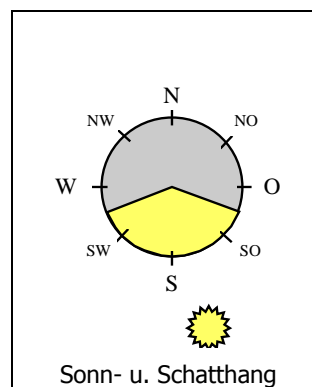


Abb. 4.12: 3-dimensionale Visualisierung der Höhenverteilung der Inventurpunkte mit Vorkommen der Baumart Buche und Tanne. Blick auf die nordexponierte Seite des Kreuzspitz-Gebirgskammes im zentralen Bereich des USG mit dem Tal der Linder im vorderen Bildteil.

In Bezug auf die Exposition (s. Abb. 4.11, rechtes Diagramm) ist eine Hauptverbreitung der Baumart Tanne in west- und nördlichen Lagen zu erkennen. Die Zusammenhänge zwischen der Exposition und der Höhenverteilung werden aus Tabelle 4.3 ersichtlich. Im Gegensatz zur Buche erreichen Standorte, in denen die Tanne dominierend auftritt bzw. mindestens mitherrscht, an nord-, west- und nordwestexponierten Hängen ihre größte Höhenverbreitung, was mit den bekannten Standortansprüchen der Tanne (Schattenertragnis und Feuchtigkeitsansprüche) (s. Kap. 4.5.1.1.2) übereinstimmt.

Tab. 4.3: Beziehung zwischen der Höhenverteilung der Baumart Tanne und der Exposition

Exposition	Höhe (min)	Höhe (max)
N	920 m	1581 m
NO	967 m	1283 m
O	959 m	1273 m
SO	978 m	1423 m
S	962 m	1386 m
SW	1004 m	1297 m
W	975 m	1548 m
NW	935 m	1448 m



4.5.1.1.2. Auswertung der Literatur und des Expertenwissens

Wie in Abbildung 4.5 (s. Kap. 4.5.1.1) dargestellt, besteht die 2. Säule der zur Erstellung von Regeln notwendigen Information, d.h. das Expertenwissen, aus einer Auswertung der Literatur bzw. aus mündlichen Mitteilungen. Bei beiden Quellen handelt es sich meist um sehr allgemein gefaßte Aussagen, die keine genauen Grenzwerte wiedergeben, was das Formalisieren des Wissens erschwert. Als Beispiel seien die Angaben zur Höhenstufengliederung der verschiedenen Waldstandorte genannt. Diese hängt neben der Exposition ganz wesentlich auch vom vorliegenden Substrat (laubwaldfördernde Unterlage (= karbonathaltig) und nadelwaldfördernde Unterlage (Silikatgestein)).

Es wurde ein Kriterienkatalog erstellt, der aufgrund des modularen Aufbaus des Expertensystems beliebig erweitert werden kann. Ziel ist auch hier, Vorschriften zu formulieren, welche die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der einzelnen Geofaktoren so umfassend beschreiben, daß auf diese Weise die Waldstandorte im einzelnen charakterisiert und differenziert werden können.

Nachfolgend soll dazu nun ein Überblick über die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Baumarten gegeben werden und zwar in der Reihenfolge ihres anteiligen Vorkommens (s. Abb. 4.6, Kap.4.5.1.1.1). Die der Literatur entnommenen Beschreibungen, stellen sowohl die Baumarten selbst als auch die Vegetationseinheiten und Mischungsformen vor, die

diese bilden. Berücksichtigt sind hierbei nur die wichtigsten Merkmale, die für eine Abgrenzung zu anderen Baumarten relevant erschienen.

Die Angaben beziehen sich auf folgende Literaturquellen: SCHRETZENMAYR (1990), OBERDORFER (1983), EWALD (1997), BAYER. STAATSFORSTVERWALTUNG [Hrsg.] (1997), MAYER & OTT (1991) und OTT et al. (1997).

Baumart Fichte (*Picea abies* L.):

Die Fichte ist die im Untersuchungsgebiet Oberammergau am häufigsten verbreitete Baumart (s. Kap.4.5.1.1.1) und ist von Natur aus nur ab 800-900m Höhe über NN bestandsbildend. Sie meidet sehr arme und trockene Böden, wird jedoch auf reichen Böden häufig von Rotfäule befallen. Aufgrund ihrer großen ökologischen Amplitude kommt sie in Einzelmischung auch in tieferen Lagen vor und kann dort auch reine natürliche Bestände bilden, wenn z.B. Tanne und Buche aufgrund lokalklimatischer oder edaphischer Extreme nicht wettbewerbsfähig sind (stark saure, vergleyte Rohhumusböden, Moorrandwald, Kaltluft-Dolinen, etc.).

Die Fichte wird durch nadelbaumfördernde Unterlagen, wie basenarme Gesteine (Silikatgesteine, Flysch), und den sich hieraus entwickelten Böden begünstigt (s. Kap. 4.5.1.2.5). An sehr schneereichen, v.a. schattenseitigen Standorten leidet die Fichte unter dem Schneeschimmelpilz (*Herpotrichia nigra*). Für den Anwuchs benötigt die Fichte wesentlich mehr Licht als z.B. die Tanne. In höheren Lagen (hochmontane – subalpine Stufe) ist sie zum Aufwachsen auf genügend Wärme und direkte Sonneneinstrahlung angewiesen. In den Alpen liegt ihre Höhengrenze (markanteste Charakteristik) bei südlicher Exposition 1900 m über NN.

Baumart Buche (*Fagus sylvatica* L.):

Die Buche liegt in der Verbreitung im Untersuchungsgebiet an zweiter Stelle (s. Kap.4.5.1.1.1). Sie ist auf den kräftigsten Böden bestandesbildend und findet sich auch im subalpinen Gebüsch und auf Weiden ein. Die Buche liebt luftfeuchte Lagen (bevorzugt Hanglage) und gleichbleibend bodenfrische, gut drainierte, lockere, warme und gut durchwurzelbare Böden (z.B. mittelgründige Lehmböden). Besten Wuchs zeigt sie auf frischen, basenreichen Böden. Die Buche meidet Blockfelder, sehr trockene, staunasse oder regelmäßig überflutete Standorte. Sie fehlt daher in der Baumartenpalette des

ursprünglichen Auwaldes. Wichtige Mischbaumarten der Buche sind im Verzahnungsbereich zu Schluchtwäldern der Bergahorn und die Esche sowie auf kalkreichen Sonderstandorten die Eibe und die Elsbeere. In den mittleren Lagen der süddeutschen Mittelgebirge und der Alpen tritt die Tanne, in den höheren Lagen die Fichte als Mischbaumart zur Buche. Ihre Verbreitungsgrenze liegt in den Nord-Alpen bei 1500m.

Baumart Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.):

Der Bergahorn gehört zur Gruppe der Edellaubhölzer (zusammen mit Esche und Bergulme). Er stellt eine typische Baumart der Schatthang- und Schluchtwälder dar und ist überdies auch in den Buchenmischwäldern des Gebirges vertreten. Die vom Bergahorn dominierten Standorte sind luftfeuchte Standorte auf konsolidierten, grobblockigen Schutthalden (Blockhalden-Schluchtwald) mit ganzjährig ausgeglichener Wasserversorgung. Generell werden frische, kalkhaltige, tiefgründige, nährstoff- und basenreiche Böden bevorzugt. Auf diesen Standorten findet man neben dem Bergahorn auch Esche und Ulme in wechselnden Anteilen. Extrem nasse und schwere Böden oder Staunässe werden jedoch gemieden. Im Jugendstadium kann der Bergahorn Schatten ertragen, jedoch steigen mit zunehmenden Alter die Lichtansprüche. Der Bergahorn ist gegen Steinschlag sehr unempfindlich und vermag sogar Standorte mit periodischen Überschüttungen zu besiedeln (Bachschutt oder Hangschutt), was durch seine Fähigkeit, Stammverletzungen sehr gut ausheilen zu können, begünstigt wird. Auf Kalkschotterböden ist er oft auch als Pionierbaum vertreten. In den Alpen liegt die Höhengrenze des Bergahorns etwas über der der Buche bei ca. 1640m.

Baumart Tanne (*Abies alba* MILL.):

Die Tanne ist ein typischer Mischwaldbaum des Gebirges. Sie ist duldsam, kann aufgrund ihrer geringen Lichtansprüche lange im Schatten anderer Bäume ausharren und sich später zu mächtigen Bäumen entwickeln. Als typischer Pfahlwurzler ist die Tanne, aufgrund ihrer bescheidenen Ansprüche an die Bodendurchlüftung und ihrer hohen mechanischen Wurzelenergie, in der Lage, schwere, staunasse und extrem saure Böden zu besiedeln. Sie erschließt sogar Pseudogleye, deren geringer Lufthaushalt keiner anderen Nadelbaumart eine Durchwurzelung erlaubt. Die Tanne wurzelt von allen Nadelbaumarten am tiefsten. Ihre Ansprüche an die Feuchtigkeit, Wärme und Tiefgründigkeit des Bodens sind wiederum höher als die von Fichte oder Kiefer. Da die Tanne überdies äußerst empfindlich auf

Trockenperioden reagiert, sind optimale Standorte durch gute Wasserversorgung, hohe Luftfeuchtigkeit und geringe Spätfrostgefahr gekennzeichnet. Frische, tiefgründige und tonreiche Braunerden entsprechen ihren Ansprüchen am besten. Die obere Verbreitungsgrenze im Gebirge ist hauptsächlich durch die Sommerwärme bedingt und fällt nach Norden hin stark ab. In den bayerischen Alpen steigt sie bis auf 1600 m über NN.

Baumart Vogelbeere (*Sorbus aucuparia* L.):

Die Vogelbeere stellt zwar keine großen Ansprüche an den Boden, zeigt jedoch eine Vorliebe für humusreiche Böden. Aufgrund ihrer hohen Standortsamplitude gedeiht sie sogar auf nährstoffarmen, bodensauren Standorten, in Hochmooren und auf Kalkstandorten. Aufgrund ihres geringen Wärmebedarf ist sie im Gebirge bis nahe der Baumgrenze zu finden. Insgesamt bevorzugt sie eher kühlere Gebiete und reagiert empfindlich auf längere sommerliche Trockenheit. Optimales Wachstum wird auf frischen bis feuchten, lockeren, leicht sauren Humusböden erreicht. Standorte mit Staunässe meidet die Vogelbeere. Auf Pseudogleyböden wurzelt sie verhältnismäßig flach. Die Vogelbeere ist von der subalpinen Waldgrenze bis in Tieflagen verbreitet. Sie ist in allen Höhenlagen frosthart und widerstandsfähig gegen Schnee, Schneebewegungen und Steinschlag. Sie gilt als Pionierbaumart und benötigt Licht oder zumindest Halbschatten. In der Jugend sehr schattenverträglich, benötigt sie jedoch zur weiteren Entwicklung und Samenreife viel Licht. Im subalpinen Bereich ist sie oft der einzige Laubbaum. Für die (oberbayerischen) Alpen wird ihre natürliche Höhengrenze mit 1980m bis 2000m angegeben.

Baumart Esche (*Fraxinus excelsior* L.):

Die Esche bevorzugt kräftige, frischfeuchte, humose Böden mit hoher biologischer Aktivität und Stickstoff-Nachlieferung. Am weitesten verbreitet und bestandsbildend ist sie in Auen- und Schluchtwäldern, in krautreichen Laubmischwäldern, an Bächen und Flüssen, an steinige Hängen, v. a. der Tieflage, auf sickerfeuchten, nährstoff- und basenreichen Ton- und Lehmböden. Sie stellt eine wertvolle Mischbaumart auf gewässernahen Standorten dar. Im Bergland ist sie häufig vergesellschaftet mit den anderen Edellaubhölzern Bergahorn und Ulme zu finden. Durch ihre hohe Verjüngungspotenz kann die Esche sogar ärmere und trockene (Kalk-)Standorte besiedeln, entwickelt dort aber nur mindere Holzqualität. In der Jugend ist die Esche schattenertragend, benötigt für ihr weiteres

Wachstum dann jedoch Licht. Die weithin als windfest charakterisierte Baumart ist in den Alpen bis zu einer Höhe von 1360m verbreitet.

Baumart Mehlbeere (*Sorbus aria* L.):

Die Mehlbeere ist auf flachgründigen, sonnseitigen Lagen besonders verbreitet. Sie bevorzugt mäßig frische bis trockene, basenreiche Böden, ist insgesamt anspruchslos und anpassungsfähig und erträgt hohe Temperaturen sowie Trockenheit. Als wärmeliebende Baumart ist sie auf schattseitigen Lagen der hochmontanen und subalpinen Stufe nicht standortgemäß. Am Nordrand der Alpen ist die Mehlbeere häufig in der montanen Stufe zu finden. Die Angaben zur Höhengrenze in den Alpen variieren (je nach Autor) zwischen 1560m (OBERDORFER 1983) und 1700m (Bayer. Staatsforstverwaltung [Hrsg.] 1997).

Baumart Ulme (*Ulmus glabra* HUDS. / *U. montana* WITH.):

Als typische Mischbaumart der kollinen und montanen Stufe bevorzugt die Bergulme nährstoffreiche und besonders frische Böden, während steinige und trockene Berghänge gemieden werden. Auf Grundwassersenkungen wird meist mit Gipfeldürre reagiert. Ulmen bilden selten geschlossene Bestände, sondern sind meistens einzeln im Wald eingesprengt. In Schlucht- und Hangwäldern sind sie häufig zusammen mit Esche und Bergahorn zu finden. Zusammen mit dem Bergahorn besiedelt die Bergulme auch hochmontane, steile Hänge, auf denen das geologische Substrat oft in Form von Hangschutt vorliegt. Die Bestände liegen dabei häufig am Hangfuß steiler Felspartien. Wie auch der Bergahorn ist die Ulme gegen Stammverletzungen durch Steinschlag resistenter als die Klimaxbaumarten. Als tiefwurzelnde Baumart, die auch dichte Böden gut aufschließt, stellt sie hohe Ansprüche an die Nährstoff- und Wasserversorgung des Bodens. In den Alpen ist sie in den mittleren Gebirgslagen bis zu einer Höhe von 1380m zu finden. In den letzten Jahrzehnten jedoch ist die Ulme durch den Ulmensplintkäfer in weiten Teilen fast völlig ausgefallen bzw. abgestorben.

Baumart Weide (*Salix spec.* L.):

Die Baumart Weide wird aus forstwirtschaftlicher Sicht im Rahmen der Stichprobeninventur nicht näher unterschieden. Meistens handelt es sich im Hochgebirgsraum um die Silberweide (*Salix alba*). Diese kommt hauptsächlich in Ebenen bis in mittlere Gebirgslagen vor, an Fluß- und Bachufern, in Auwald-Säumen gegen Altwasser sowie an Quellgebieten

und nassen Stellen, wo sie bestandsbildend ist. Sie bevorzugt periodisch überschwemmte, nährstoff- und basenreiche Standorte.

Baumart Weißerle /Grauerle (*Álnus incána L.*):

Die Grauerle ist vom Auwald (dort auch bestandsbildend) bis an Hochgebirgsbäche verbreitet. Sie besiedelt Überschwemmungsland, Geschiebe und Schuttkegel, ist sehr lichtbedürftig, absolut frosthart, salzverträglich und nahezu unempfindlich gegenüber Trockenheit. Sie bevorzugt sickernasse (frische), nährstoff- und basenreiche, meist kalkhaltige, locker-durchlüftete, vorwiegend kiesig-sandige Böden. Staunässe wird eher gemieden. Ein natürliches Vorkommen stellt der Alpenraum dar. Dort ist sie auch auf mäßig steilen Hängen mit starker Tendenz zu Rutschungen (auf Mergel oder tonreichen Kalken) zu finden, wobei für den notwendigen Wasserhaushalt der Hangwasserzug eine wichtige Rolle spielt. In den Alpen kann die Grauerle bis 1400m hoch steigen.

Baumart Kiefer (*Pínus sylvéstris L.*):

Die Kiefer kommt als lichtfordernde Baumart u.a. auf armen, sandigen und felsig-steinigen Böden vor. Charakteristisch sind die geringen Ansprüche an Nährstoffgehalt und Frische des Bodens. Aufgrund der hohen Niederschläge im bayerischen Randalpengebiet kommen für das Vorkommen der Baumart Kiefer nur Böden mit extrem geringer Speicherkapazität (humusarme Fels- und Skelettböden, sehr flachgründige Rendzinen, etc.) in Betracht. Die Artengruppe der Karbonat-Kiefernwälder kommt nur auf den trockensten Bergmischwaldstandorten in thermisch begünstigten Gebieten und v.a. in den Föhntälern vor. Kiefern-Gesellschaften bzw. -Bestände sind auf steile, südseitige Hanglagen mit Dolomit oder Hartkalken als Grundgestein beschränkt, auf denen es durch geringe Mineralbodenmächtigkeit zu Trockenphasen kommt. Die Höhengrenze wird mit 1600m angegeben.

4.5.1.2 Definition der Einflußfaktoren auf die Baumartenzusammensetzung und Erstellung der hierfür notwendigen GIS-Datenlayer

Die in den vorangegangenen Kapiteln 4.5.1.1.1 und 4.5.1.1.2. dargestellten Baumartenbeispiele sollten zeigen, wie die Auswertung der Daten aus der Forsteinrichtung einerseits und das verbal aufbereitete Expertenwissen andererseits, die Basis für den als nächstes folgenden Schritt darstellen: die Umsetzung dieser Information in digitale Datensätze. Dazu ist es notwendig, diejenigen Einflußkriterien festzulegen, die für eine weitere Differenzierung hilfreich sein können. In erster Linie sind dies:

- die Höhe über NN
- die Exposition und Hangneigung
- die geomorphologischen Aspekte
- die spezifischen klimatischen Ereignisse (Föhn einfluß)
- die geologische Unterlage
- die verfügbaren Standortskriterien (edaphische Faktoren)
- das Gewässernetz

Bei den festgelegten Einflußkriterien handelte es sich um Daten, die bereits im bestehenden GIS für das Untersuchungsgebiet Oberammergau enthalten waren oder mittels diesem erstellt werden konnten. Der Aufbau einer solchen zentralen Datenbasis wurde bereits in Kapitel 3 ausführlich besprochen. Die ausgewählten Einflußfaktoren werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

4.5.1.2.1 Höhe über N.N

Einer der Faktoren, welche die natürliche Baumartenzusammensetzung in Hochgebirgsregionen stark beeinflussen, ist die Höhe ü. NN und die damit zusammenhängenden klimatischen Bedingungen. Dazu zählen sowohl das höhenabhängige Temperaturgefälle als auch die mit steigender Höhe zunehmende Niederschlagsmenge sowie unterschiedliche Feuchte- und Strahlungsverhältnisse.

Neben den klimatischen Ursachen für eine höhenbedingten Vegetationszonierung wirken sich auch Faktoren wie Untergrund, Exposition, Geländeneigung und -form auf die vertikale Verbreitung einzelner Baumarten im Gebirge aus. Ein Beispiel einer solchen Höhenstufengliederung der Vegetation für die Bayer. Alpen ist in Abbildung 4.13 gegeben. Die Höhenstufen werden dabei anhand der Schlußwaldgesellschaft charakterisiert. Die Grenzen der einzelnen Höhenstufen sind dabei über die Obergrenzen von Baumarten festgelegt, da Bäume als langlebigste, konkurrenzkräftigste und biomassereichste Elemente die standörtlichen Einflüsse am besten widerspiegeln (OZENDA 1988).

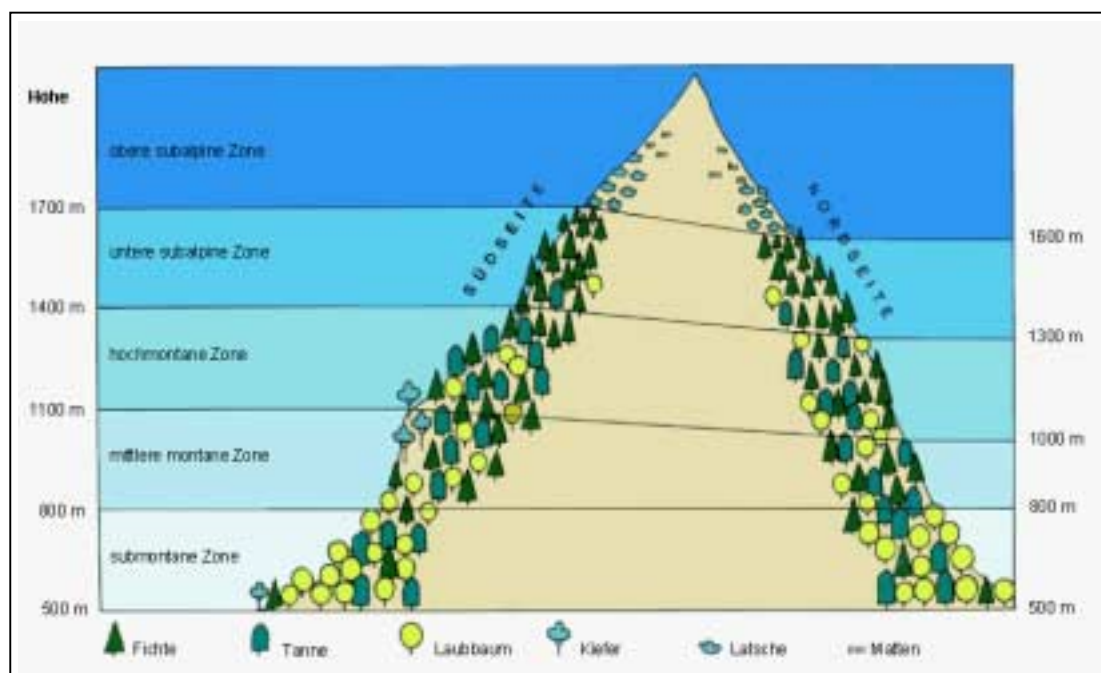


Abb. 4.13: Natürliche Waldzusammensetzung im bayerischen Hochgebirge (vereinfacht) (STMELF 1987)

Mit zunehmender Höhe treten die wärmeliebenden Baumarten sukzessiv zurück. OZENDA (1988) zieht in den nördlichen Randalpen die Obergrenze der Baumart Buche als Hauptkriterium zur Abgrenzung der montanen von der subalpinen Höhenstufe heran. Ist die Buche in Alt-Beständen zumindest mitherrschend, so befindet man sich nach OTT et al. (1997) mit Sicherheit unterhalb der hochmontanen Nadelwaldstufe. In der hochmontanen Stufe zeigen die Buchen zunehmend gedrungene, krüppelige Wuchsformen und kommen gegen Ende dieser Höhenstufe nur noch einzelbaumweise vor (OTT et al. 1997). Die hochmontane Stufe geht dann in die von Fichten dominierte subalpine Stufe über, in der die Tanne nur noch anfangs vereinzelt beigemischt ist. Das in dieser Höhenstufe

herrschende kalte Hochlagenklima schließt die Baumarten Buche und Tanne aus (MAYER & OTT 1991).

Für die spezifischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet Oberammergau (Ammergauer Alpen) gibt Tabelle 4.4 eine Höhenstufenzonierung wieder. Die Zahlenwerte stellen die maximal erreichte Obergrenze von Baumarten dar und geben unabhängig von den Expositionsverhältnissen einen repräsentativen Querschnitt einiger nach Gipfeln benannter Bergmassive von Nord nach Süd folgend wieder. Dabei befindet sich die hier aufgelistete Daniel-Gruppe bereits auf österreichischem Staatsgebiet im äußersten Süden der Ammergauer Alpen und somit außerhalb des eigentlichen Untersuchungsgebietes.

Die Obergrenze der montanen Stufe wird von den letzten Vorkommen der Baumart Buche gebildet und steigt zusammen mit dem klimatischen Gradienten von den äußeren Ketten im Norden nach innen zu allmählich an (EGGENBERGER 1994).

Tab. 4.4: Aktuelle Obergrenzen von Einzelbuchen und geschlossenen Fichten- und Latschenbeständen in nördlichen, zentralen und südlichen Bereichen der Ammergauer Alpen. Angaben in Metern nach KOEGEL (1923) und EGGENSBERGER (1994) (aus EGGENSBERGER 1994).

	Klammspitz-/ Hochplatte-Gr.	Kreuzspitz- Gruppe	Daniel- Gruppe	
Buche	1440	1550	1550	Obergrenze der hochmontanen Stufe
Fichte	1840	1850	1960	
Latsche	1920	1990	2100	Obergrenze der subalpinen Stufe

Nach EGGENSBERGER (1994) wird die subalpine Stufe nach oben von den Latschenbeständen begrenzt, da diese höher hinaufzusteigen vermögen als die unter Frostrocknis leidende Fichte.

Als eine entscheidende Datenquelle zur Ableitung des Geofaktors Höhe wurde im Projekt-GIS Oberammergau das *Digitale Geländemodell* (DGM) (s. Kap. 3.3.3.3) verwendet. Dabei war eine Stratifizierung in Höhenstufen, wie sie in verschiedenen Untersuchungen zur Unterstützung der Klassifizierung von Vegetationseinheiten z.T. eingesetzt wird (vgl. Kap. 4.2.2), nicht notwendig, da im Rahmen des angewandten Verfahrens mit fließenden Übergängen gearbeitet werden konnte. Dadurch konnten die Nachteile einer in der Natur

de facto nicht vorkommenden scharfen Grenze umgangen werden und die Höhenbereiche, in denen eine bestimmte Vegetationsform ihre Verbreitung findet, fließend gestaltet werden, wie es an einem Beispiel in Kapitel 4.5.1.3 gezeigt wird.

4.5.1.2.2 Exposition und Hangneigung

Die Exposition spielt bezüglich der Besonnung von Standorten eine wichtige Rolle und bestimmt zusammen mit der Hangneigung den Faktor Wärme. Die Wärme stellt einen Minimumfaktor für das Wachstum von Bäumen dar. Im Gegensatz zu tieferen Lagen wird mit zunehmender Höhe die direkte Sonneneinstrahlung für den Wärmegewinn wichtig (OTT et al. 1997).

Die Unterschiede in Exposition und Hangneigung wirken sich erheblich auf die Höhenverbreitung der Waldgesellschaften aus (vgl. dazu EWALD 1997, MAYER & OTT 1991, OTT et al. 1997, OZENDA 1988). Je nach Expositionslage kommt es zu einer Verschiebung der Höhengrenze um 50 – 100 m, was an wärmebegünstigten Sonnhängen im Vergleich zu den kühleren Schatthängen ein Höhersteigen wärmebedürftiger Baumarten bedeutet.

Exposition und Hangneigung beeinflussen auch den Verjüngungserfolg der einzelnen Baumarten mit ihren unterschiedlichen Licht- und Wärmebedürfnissen. Die abschirmende und somit beschattende Wirkung des Bestands ist nämlich je nach Hangneigung und Exposition unterschiedlich. Setzt man gleiche Kronenüberschirmung voraus, so ist die Beschattung am Südhang geringer als in der Ebene (MAYER & OTT 1991), was sich auf die Bodenerwärmung und damit auf die Verjüngung auswirkt.

Weitere Faktoren, die in direktem Zusammenhang zur vorherrschenden Expositionslage und Hangneigung stehen, sind Höhe, zeitliche Dauer sowie Kriech- und Gleitbewegungen der Schneedecke, welche die (Über-)Lebensfähigkeit der Bäume, insbesondere der Verjüngung, beeinflussen.

Exposition und Hangneigung wurden aus dem für das Untersuchungsgebiet Oberammergau vorliegenden DGM mittels der Arc/Info-Routinen „aspect“ und „slope“ berechnet.

4.5.1.2.3 Geomorphologische Aspekte

Auch die Geländeform wirkt sich auf die Baumartenzusammensetzung aus. Sie beeinflusst u.a. das Lokalklima und darüber den Verlauf der Waldgrenze und die Höhenstufung der einzelnen Waldgesellschaften. Hierbei spielt auch das Kleinrelief eine wichtige Rolle.

Die Reliefformen (Kuppen- oder Muldenlagen) stehen z.B. in engem Zusammenhang mit der Akkumulation oder dem Abgang von Schnee. In feuchten und spät ausapernden Geländevertiefungen, Mulden und Runsen, in denen der Schneepilz besonders gute Lebensbedingungen findet, gelingt die Verjüngung von Nadelbäumen nur selten, weshalb man diese Lagen auch als nadelbaumfeindliche Kleinstandorte bezeichnet (OTT et al. 1991). Flache Geländerücken liefern hingegen meist günstigere Bedingungen für das Aufkommen von Nadelholz-Verjüngung.

Die Kenntnis der Geländeform kann auch, zusammen mit Informationen zum geologischen Substrat, Hinweise auf vernäbte Stellen liefern, welche ein Aufwachsen bestimmter Baumarten erschweren.

Die Geomorphologie spielt weiterhin bei der Differenzierung von Waldsonderstandorten⁸, mit ihrer jeweils charakteristischen Baumartenzusammensetzung, eine wichtige Rolle. Hierzu zählen z.B. die *Hangschuttwälder* (auf Schutthalden am Hangfuß und im Übergang von steilen Felswänden in flachere Hänge). Auf ihnen herrschen Edellaubwälder aus Bergahorn, Bergulme und Esche vor, die Verletzungen durch Steinschlag gut auszuheilen vermögen und deshalb auf diesen labilen Sonderstandorten Dauergesellschaften ausbilden (EWALD 1997). Ähnliches gilt für die ebenfalls von Edellaubhölzern bestockten *Schluchtwälder*.

Die Informationen zur Geländeform wurden im Rahmen dieser Arbeit aus dem DGM als Primärdatenquelle abgeleitet. Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung des DGMs konnten für diese Untersuchungen allerdings nur Formen des Meso- bzw. Makroreliefs

⁸ Waldsonderstandorte sind nach OTT et al. (1997) Standorte, welche durch einen bestimmten, sehr stark wirkenden Faktor ausschlaggebend geprägt werden, wie z.B. Wälder auf Schutthalden, in Lawinenzügen oder auf Hochmooren. Es handelt sich hierbei um azonale Standortstypen, welche auf kleineren Flächen vorkommen.

berücksichtigt werden, womit die oben beschriebenen Einflüsse des Kleinreliefs vernachlässigt werden mußten.

Die Geländeform konnte anhand von Parametern, wie der Krümmung der Geländeoberfläche in Streich- (in Bezug auf die Horizontale) und Fallrichtung (in Bezug auf die Vertikale), die mittels eines Konvexitäts- bzw. Konkavitätsindex (ESRI [Hrsg.] 1999) berechnet wurde, beschrieben werden. Abbildung 4.14 zeigt einen Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet, in dem konvexe und konkave Bereiche mit Hilfe einer dreidimensionalen Darstellung visualisiert werden.

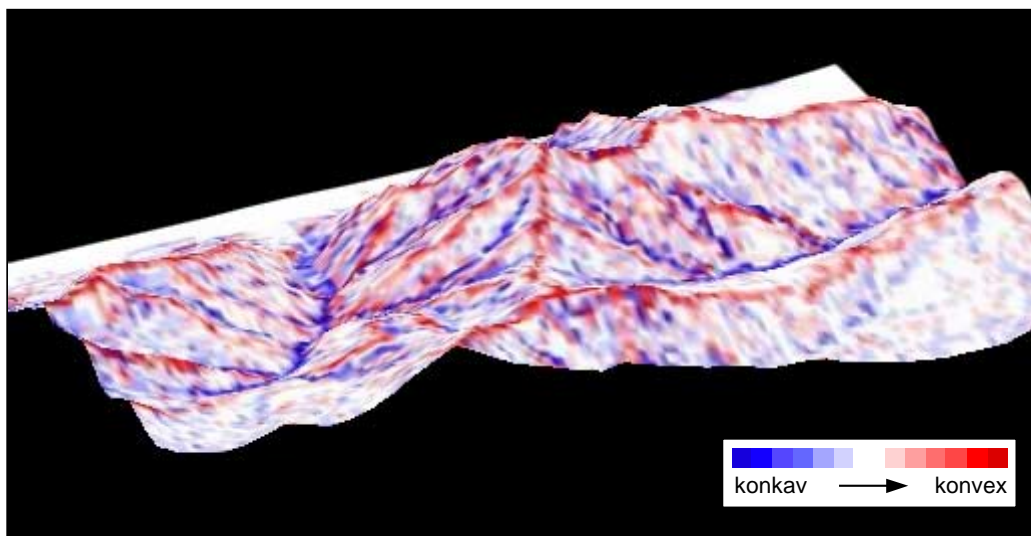


Abb. 4.14: Konvexe und konkave Geländeformen unterschiedlichen Intensitätsgrades

Da die Geländeform auch in engem Zusammenhang mit der Hangneigung steht, wurde diese zur Bestimmung von Steilwänden und ebenen Lagen herangezogen.

4.5.1.2.4 Spezifische klimatische Ereignisse

Eine klimatische Besonderheit des Bayerischen Alpenraums stellt der Föhn dar. Dieser kann als eine absinkende Luftströmung definiert werden, die bei der Überströmung eines Gebirges oder Hochplateaurandes auf dessen Leeseite auftritt (SEIBERT 1993) und dort zu einer deutlichen Lufterwärmung und zum Rückgang der relativen Luftfeuchtigkeit führt. So ist der Föhn hauptsächlich dafür verantwortlich, daß es in dem durch hohe Niederschläge und kühle, mit der Höhe rasch abnehmende Temperaturen gekennzeichneten Klima des

bayerischen Hochgebirges, an den Prallhängen von Föhngassen trotzdem zur Verbreitung trocken-warmer Vegetationsgesellschaften wie etwa den Schneeheide-Kiefernwäldern kommen kann.

Aufgrund des großen Einflusses, den der Föhn als klimatisches Ereignis auf die Baumartenzusammensetzung hat, wurde diese Information in der Klassifizierung mitberücksichtigt. Dazu wurde mit Hilfe der im GIS vorhandenen Analysemöglichkeiten versucht, die von den Föhnereignissen betroffenen Gebiete zu modellieren, d.h. Merkmale zu erarbeiten, die das darzustellende komplexe Phänomen so gut wie möglich in einer idealisierten, vereinfachten sowie berechenbaren Form charakterisieren. Als primäre Informationsquelle wurde auch hierfür das Digitale Geländemodell des Untersuchungsgebiets herangezogen.

Im Alpenraum bilden ausgedehnte Täler, die sich von Süden nach Norden erstrecken, reliefbegünstigte Durchgänge, sogenannte Föhngassen, in denen die warmen Luftmassen nach Norden geleitet werden. Dort zeigt sich die Föhnwirkung am deutlichsten. Daher wurden in einem ersten Schritt aus dem DGM Täler ermittelt, die in N-S-Richtung verlaufen. Neben einem nach Norden geöffneten Tal mußte außerdem eine bestimmte Mindestgröße des Tales gegeben sein. Für jede Rasterzelle des DGMs wurde deshalb neben der Fließrichtung die Fließakkumulation berechnet. Diejenigen Zellen mit den höchsten Werten stellen hierbei die Haupttäler im abgeleiteten Talsystem dar, welche mit Hilfe empirisch festgelegter Schwellwerte erfaßt werden konnten. Um die vorherrschende Fließrichtung eines Haupttals zu ermitteln, wurde zusätzlich ein Majoritätsfilter mit einer Fenstergröße von 7x7 Pixeln iterativ eingesetzt.

Für die Ermittlung der Gebiete, die im Wirkungsraum eines Föhntals liegen, wurden Wassereinzugsgebiete im mesoskaligen Bereich ($\geq 60 \text{ km}^2$) berechnet und daraus diejenigen ausgewählt, die in unmittelbarer Nähe, d.h. direkt angrenzend oder in einer Entfernung von bis zu 1000 m zur Mittellinie des Föhntals liegen. Anders als bei einer einfachen Entfernungsberechnung (buffer-Operation), bei der die Festlegung des Einflußbereiches willkürlich erfolgt, wurde in diesem Fall der Grenzverlauf entlang von Wasserscheiden gelegt, was der natürlichen Abgrenzung von Gebieten, die im Einflußbereich von Föhnströmungen liegen, sehr nahe kommt.

In Abbildung 4.15 ist eine solche Föhnwindgasse dargestellt, die auf dieser Basis für das Untersuchungsgebiet Oberammergau ermittelt wurde.

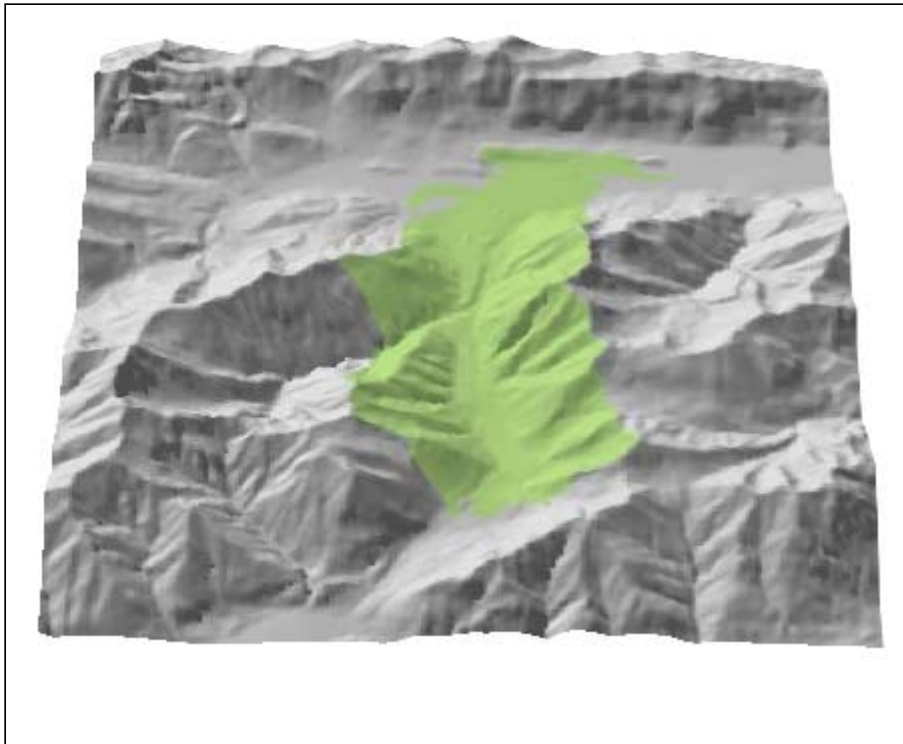


Abb.4.15: Beispiel einer Föhnwindgasse im Untersuchungsgebiet Oberammergau (grün unterlegt)

4.5.1.2.5 Geologische Unterlage

Auch die geologische Unterlage besitzt eine differenzierende Wirkung auf die Baumartenzusammensetzung. So können aufgrund der unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften des geologischen Ausgangsmaterials Unterschiede in der Ausbildung von Vegetationstypen entstehen. Basen- und kalkreiche Gesteine (z.B. Kalke, Dolomite, Molasse, mäßig tonige, skelettreiche Moränen, etc.) bilden „laubbaumfördernde“ Unterlagen und begünstigen z.B. das Vorkommen der Buche, wohingegen Silikatgesteine und Flysch mit stärkerer Podsolierungsneigung sowie tonreiche Schiefer und verdichtete, skelettarme Moränen, „nadelbaumfördernde“ Unterlagen bilden und eher Fichte und Tanne begünstigen (MAYER & OTT 1991, OTT et al. 1997).

In Bezug auf die Höhenverteilung der Baumarten bewirken z.B. stark saure Gesteine eine tendenziell tiefer liegende Grenze (MAYER & OTT 1991). So liegt z.B. die Obergrenze der hochmontanen Höhenstufe auf Silikatgestein kaum über 1200 m ü. NN, während im Kalkalpin die Grenze oft erst bei 1500 m ü. NN erreicht wird (OTT et al. 1997).

Einen Überblick über die im Bayerischen Alpenraum und speziell im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gesteinsformationen sowie über deren chemische und physikalische Eigenschaften gibt Tabelle 4.5. In dieser Zusammenstellung sind die Gesteine in Anlehnung an EWALD (1997) und KUHNERT (1967 a+b) in Substratgruppen eingeteilt, die ein jeweils ähnliches Verhalten hinsichtlich ihres Einflusses auf die Bodenbildungsprozesse sowie auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt zeigen.

Tab. 4.5: Standortkundliche Gruppen geologischer Ausgangssubstrate in den Bayerischen Alpen. Die blau beschrifteten Gesteinsformationen kommen im Untersuchungsgebiet Oberammergau vor (nach EWALD 1997 und KUHNERT (1967 a+b), verändert)

Gruppe	Gesteinstyp, Merkmale	Beispiele
1. Karbonatgesteine großer Reinheit	Kalke und Dolomite, silikatarm, sehr gut gepuffert	
1.a. Kalke	CaCO ₃ -reich, vorw. chemisch durch Kalklösung verwitternd, widerständig	Platten-, Oberrät-, Wetterstein-, Alp. Muschel-, Hierlatz-, Dogger-, Kössener, Schratten-, Raibler, Dachstein-, Aptychen-Kalk
1.b. Dolomite	MgCO ₃ -reich, vorw. durch physikalischen Zersatz verwitternd. Gut wasserdurchlässiges, klüftiges Gestein.	Haupt-, Ramsau/Wetterstein-, Raibler Dolomit
2. Mergelig-tonige Gesteine	Mischgesteine aus Kalzit (CaCO ₃) und feinklastischem Ton, rasch verwitternd, oft wasserstauend und rutschgefährdet, zu toniger Bodenart verwitternd, mäßig rasch versauernd. Bildung von tiefgründigen, nährstoffreichen und wasserhaltefähigen Böden. Die tonige Bodenart und die Undurchlässigkeit des Gesteins bedingen i.d.R. oberflächennahen Wasserstau, der schon bei geringer Hangverflachung v.a. in Senken und Rinnen vernäbte Stellen verursacht und zur Bildung von Pseudogleyen, Hanggleyen und Mooren führt.	Kössener Schichten, Lias-Fleckenmergel, Flysch-Mergel (Zementmergel, Piesenkopfschichten, Tristelschichten, Gault-Tonschiefer), Partnachschiechten, Aptychen-Mergel, Allgäuschichten, Cenoman-Mergel, mergelige Molasse
3. Sandig-grusige Gesteine	Kieselsäurereiche Gesteine (Kieselkalke, Sandsteine), Grauwacken, Breccien, Feinkonglomerate (Bindemittel SiO ₂ oder CaCO ₃), durch Lösung des Bindemittels und Zersatz rasch zu sandiger Bodenart verwitternd, rasch versauernd. Bildung von tiefgründigen, gut durchlüfteten Böden.	Flysch-Sandsteine (Reiselsberger Sandstein, Hällritzer-, Bleicherhornserie, Quarzit-Grauwacke), Lias- und Dogger Kieselkalk, Radiolarit, Grün-sandstein, Raibler Sandstein, Alpiner Buntsandstein, sandig-kiesige Molasse
4. Lockergesteine	nicht verfestigte glazigene und periglaziale Sedimente (chem. heterogene Sammelgruppe), leicht erodierbar	Gehängeschutt, Fern- und Lokalmoränen, Schwemmkegel, fluvioglaziale Schotter, rezente Alluvionen, Staubeckensedimente
5. Moore	Organogen, unter rezenten Feuchtbedingungen entstanden, i.d.R. vernäbt	Anmoor, Flach-, Übergangs- und Hochmoor

Die Daten zur geologischen Unterlage wurden aus den Geologischen Karten Blattnr. 8431 und 8432 des Geologischen Landesamtes im Maßstab 1:25000 digital erfaßt.

4.5.1.2.6 Verfügbare Standortskriterien: Edaphische Faktoren

Als weiteres Einflußkriterium auf die Baumartenzusammensetzung spielen die edaphischen Faktoren eine wichtige Rolle. Für das Untersuchungsgebiet lagen jedoch keine flächigen Informationen über die Bodenverhältnisse vor. Lediglich für das Einzugsgebiet des Giessenbachs standen detaillierte Standortdaten zur Verfügung, die vom Wasserwirtschaftsamt erhoben worden waren. Um eine unterschiedliche Informationsdichte im Untersuchungsgebiet zu vermeiden, mußten diese Daten für die Untersuchungen unberücksichtigt bleiben (vgl. Kap 3.3.3.3).

Die Datengrundlage basierte daher ausschließlich auf den im Rahmen der Stichprobeninventur im Hochgebirge erhobenen Informationen, die allerdings auch nur punktuell vorlagen (s. Kap. 3.2.3.1.2). Da dieser Einflußparameter jedoch als sehr wichtig erachtet wurde, wurde er dennoch für die Analysen herangezogen. Eine Interpolation der Daten auf die Fläche erfolgte dabei allerdings nicht, da aufgrund der Erfassungsmethode und –bestimmung eine solche Übertragung von Punktinformationen auf die Fläche nicht zulässig gewesen wäre. Die Daten wurden vielmehr in ihrer ursprünglichen Struktur belassen und bei den Analysen im Sinne einer allmählichen Steigerung der Erwartungssicherheit berücksichtigt, je näher sich ein Objekt an einem Inventurpunkt mit den dort erhobenen Standortmerkmalen befand.

Die im USG Oberammergau vorkommenden und der Stichprobeninventur zu entnehmenden Standortseinheiten für das Hochgebirge sind:

- Blockböden (über 1400 m)
- trockene bis mäßig trockene Standorte (> 1400 m)
- mäßig frische bis frische Standorte (> 1400 m (Schattseiten))
- mäßig frische bis frische Standorte (> 1400 m (Sonnseiten))
- Oxigleye (> 1400 m (Schattseiten))
- Oxigleye (> 1400 m (Sonnseiten))
- Block – Humusböden (< 1400 m)
- Block – Lehmböden (< 1400 m)
- flachgründige, trockene Rendzinen (< 1400 m)
- flachgründige, mäßig trockene bis mäßig frische Rendzinen (< 1400 m)
- mittelgründige, lehmig tonige Standorte (< 1400 m)
- tiefgründige Standorte (< 1400 m)

- Oxigleye (< 1400 m)
- Gleye (< 1400 m)
- Anmoorgleye (< 1400 m)
- Rendzinen in Tallagen
- schwach verbraunte Rendzinen in Tallagen

4.5.1.2.7 Das Gewässernetz

Das Gewässernetz spielt bei der Ermittlung von uferbegleitender Vegetation sowie von Waldsonderstandorten in Überflutungsbereichen mit Bachschuttablagerungen eine wichtige Rolle.

Für das Untersuchungsgebiet stand das digitale Gewässernetz aus den ATKIS-Daten und das Gewässernetz aus der digitalen Forstbetriebskarte zur Verfügung. Wegen der höheren Lagegenauigkeit im Vergleich zum ATKIS-Datensatz (s Kap. 3.3.4.3) wurden die Informationen der Forstbetriebskarte genutzt.

4.5.1.3 Erstellung der Wissensbasis: Wissensformalisierung und -repräsentation

Nach Festlegung der Einflußfaktoren und der Erstellung der hierfür notwendigen GIS-Datensätze erfolgte die Parametrisierung des Wissens in eine für den Rechner verwertbare Form (s. Ablauf, Kap. 4.4.2).

Der hier gewählte Ansatz sieht die Verwendung von Fuzzy-Logik zur Formalisierung des Wissens vor. Aus den gesammelten Informationen wurden Regeln formuliert, welche dann schrittweise in einen *Fuzzy*- Regelsatz überführt wurden.

Die herkömmliche *Boolesche Logik* kann Sachverhalte, die sich durch räumliche Unschärfen auszeichnen, nur unzureichend behandeln. Im Falle der Untersuchung der Baumartenzusammensetzung müssen Sachverhalte bzw. natürliche Phänomene beschrieben werden, die durch fließende, allmählich ineinander übergreifende Übergänge

gekennzeichnet sind. Für solche Verhältnisse ist die eindeutige *boolsche* Klassenzuordnung (0 oder 1) ungeeignet. Kontinuierliche Merkmalsänderungen werden durch *Fuzzy-Logik*-Ansätze treffender beschrieben (vgl. dazu BOTHE 1993).

Das verwendete Verfahren erlaubt es, *Fuzzy*-Regelsätze aufzubauen, anhand derer aus vorhandenen GIS-Datenbeständen „a-priori“-Erwartungen einer Klassenzugehörigkeit berechnet werden können. Bei der Klassifikation der Fernerkundungsdaten wird mit Hilfe der *Fuzzy-Logik*-Zugehörigkeitsfunktionen für jedes klassifizierte Objekt die Erwartungssicherheit berechnet, mit der es der zugewiesenen Klasse angehört. Dieses „a-priori“-Wissen ermöglicht eine Überprüfung der Klassenzugehörigkeit und erlaubt eine Justierung der in der Klassifikation verwendeten Parameter.

Das Programm *eCognition* bietet die Möglichkeit, die *Fuzzy*-Zugehörigkeitsfunktionen anhand der gewählten Funktionsgleichung graphisch festzulegen und den Kurvenverlauf interaktiv zu verändern.

Die Erstellung der einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen, die das formalisierte Wissen der jeweiligen Einflußfaktoren darstellen, soll hier anhand der Bestimmung der Baumart Kiefer exemplarisch aufgezeigt werden. Die Gesamtheit der Zugehörigkeitsfunktionen bzw. Regeln, die untereinander mit je nach Fragestellung unterschiedlichen Operatoren verknüpft werden können (s. Kap. 4.4.1.2), beschreibt schließlich die gesuchte Klasse und führt dazu, daß ein Objekt dieser Klasse zugeordnet wird, wenn die Regelvorschrift erfüllt ist.

Beispiel der Regelvorschrift zur Bestimmung der Baumart Kiefer

Zur Definition der Zugehörigkeitsfunktionen werden nicht-lineare, „s-förmige“ Kurvenverläufe herangezogen, die den Einfluß naturräumlicher Faktoren am besten adaptieren sowie für die Handhabung räumlicher Daten in geographischen Datensets am häufigsten verwendet werden (STOLZ 1998). Außerdem besitzt diese Funktionsgrundform den Vorteil, daß sie keine scharfen Knickpunkte besitzt. Beispiele von Zugehörigkeitsfunktionen für das Vorkommen der Baumart Kiefer in Abhängigkeit einzelner Geofaktoren sind in den Abbildungen 4.16 und 4.17 zu sehen.

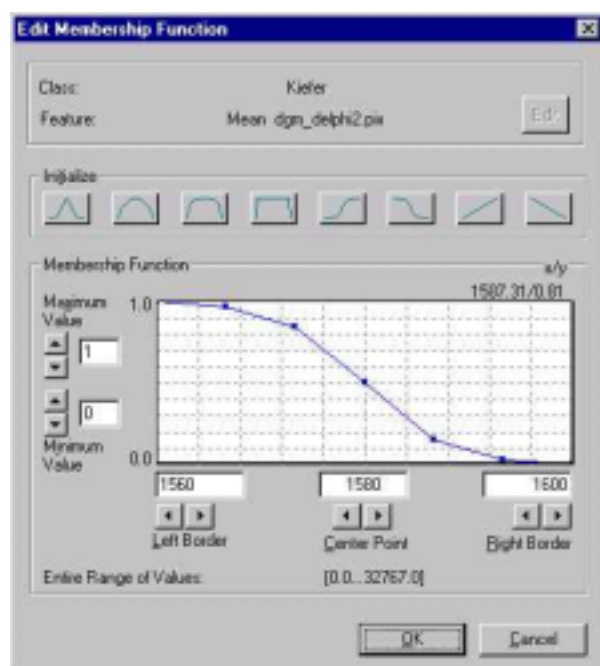


Abb. 4.16: Zugehörigkeitsfunktion für die Klasse Kiefer bezüglich der Höhenverteilung

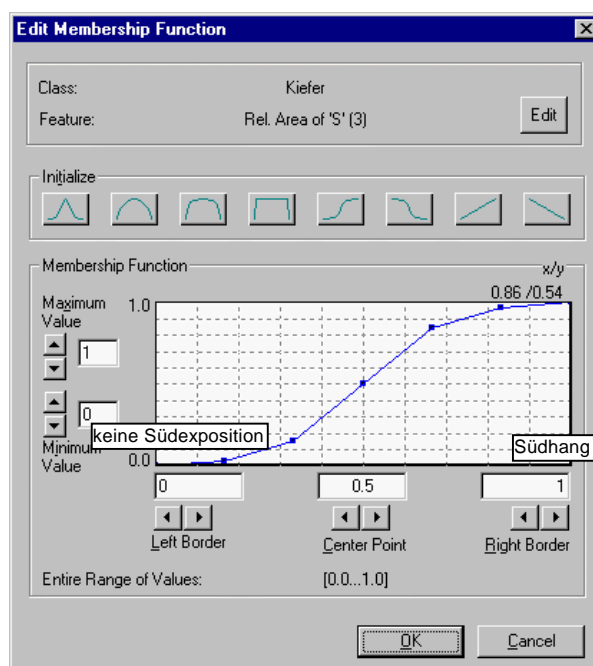


Abb. 4.17: Zugehörigkeitsfunktion für die Klasse Kiefer bezüglich des Vorkommens an südexponierten Hanglagen (Erläuterungen s. Text)

Die Zugehörigkeitsfunktion der Baumart Kiefer in Bezug auf die Höhe (Abb. 4.16) zeigt nach Auswertung der Daten aus der Literatur und der abgeleiteten Informationen aus den Daten der Forsteinrichtung einen abnehmenden Verlauf ab einer Höhe ü. NN von 1560 m, um dann bei 1600 m gegen Null zu gehen. Die Abbildung verdeutlicht, inwieweit eine kontinuierliche natürliche Merkmalsänderung, wie die klimabedingte Höhenstufengliederung im alpinen Raum, simuliert werden kann, ohne dabei scharfe Grenzen festlegen zu müssen. Bei 1560 m ist die Sicherheit, daß ein Waldobjekt der Klasse „Kiefer“ angehört, noch mit 100% (bzw. Zugehörigkeitswert 1) gegeben. Bei 1580 m sinkt die Erwartungssicherheit bereits auf 50 % (=Zugehörigkeitswert 0,5).

Auch bei der Definition der Beziehung der Baumart Kiefer zum Vorkommen auf südexponierten Lagen (Abb. 4.17) wird ein Grad der Zugehörigkeit definiert, der zwischen 0 und 1 liegt. Befindet sich ein Objekt „hauptsächlich“ in südexponierten Lagen (also nahe dem Zugehörigkeitswert 1), so ist die Sicherheit, daß dort die Klasse Kiefer vorkommt, sehr groß. Anhand von Fuzzy Logik können solche linguistischen Merkmalsbeschreibungen formalisiert und für die rechnergestützte Klassifikation, im Sinne des integrierten Verfahrens, verwendet werden.

Zur Definition bzw. Charakterisierung der Baumart Kiefer werden im wesentlichen folgende Kriterien verwendet:

- **Höhe:** die Höhengrenze wird bei 1600 m erreicht
- **Exposition:** Vorkommen in S-, SW- und W-Lagen mit unterschiedlicher Gewichtung
- **geomorphologische Aspekte:** keine Muldenlagen
- **spezifische klimatische Ereignisse:** im Einflußbereich typischer Föhnlagen
- **geologische Unterlage:** vorwiegend auf Kalk- und Dolomitgestein, nicht auf tonigen Substratgruppen (s. Tab. 4.5)
- **edaphische Standortfaktoren:** flachgründige, trockene bis mäßig trockene Standorte, vorwiegend mit Rendzinen
- **spektrale Eigenschaften des Bilddatensatzes.**

Die einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen bezüglich dieser Einflußfaktoren werden unter Verwendung der Fuzzy-Operatoren „and“ und „or“ miteinander verbunden (s. Kap. 4.4.1.2).

4.5.2 Ergebnis der Wissensverarbeitung

Zu welcher Erweiterung der Klassifikation die Hinzunahme zusätzlicher, GIS-gestützter forstlicher Information führt, wie es im vorhergehenden Kapitel beispielhaft für die Kiefer dargestellt wurde, zeigt Abbildung 4.18. Während auf der linken Seite diejenigen Objektklassen abgebildet sind, die in klassischer Weise allein aus Fernerkundungs-Daten abgeleitet werden können, verdeutlicht die rechte Bildhälfte, welche Verfeinerung der Klassifizierung durch die Integration von FE und GIS-Daten auf der Basis des vorgestellten Regelwerkes erreichbar ist.

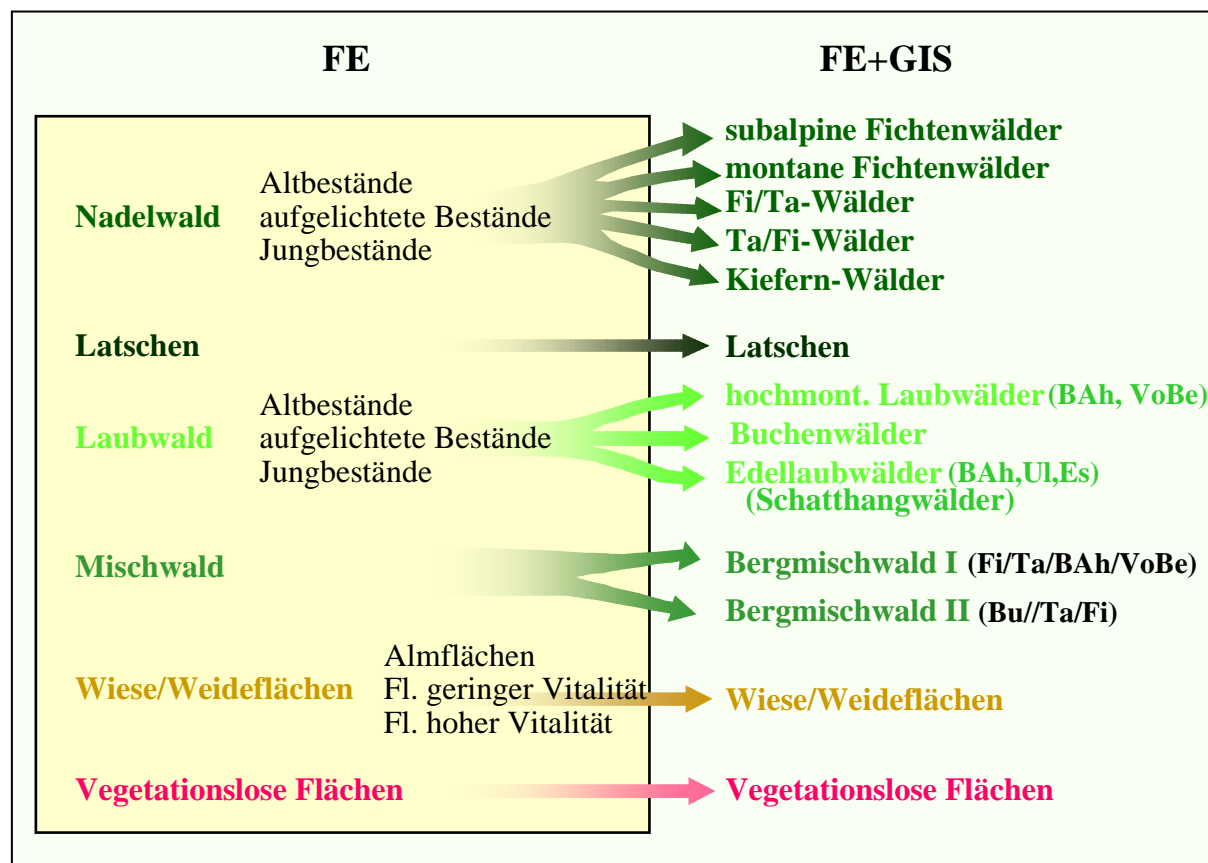


Abb. 4.18: Klassifikationsergebnisse a) ausschließlich auf der Basis der FE
b) unter Hinzunahme von GIS

Eine Verbesserung der Klassifizierungsgenauigkeit ergibt sich selbst dann, wenn nicht bis auf Baumarten-Ebene getrennt wird, schon allein deshalb, weil typische Klassifizierungsfehler (Verwechslungen) aufgrund spektraler Überschneidungen mit Hilfe der Zusatzinformation aufgedeckt und korrigiert werden können. Damit werden Klassifizierungsergebnisse erzielt, die für die forstliche Praxis ausgesprochen relevant sind (z.B. für Monitoring-Aufgaben).

Die Abbildungen 4.19 - 4.21 zeigen für Ausschnitte des Untersuchungsgebiets das Ergebnis einer Plausibilitätsüberprüfung. Hierbei werden dem rein anhand der spektralen Information der Fernerkundung gewonnenen Klassifizierungsergebnis (vgl. dazu DE KOK 2000), die als falsch klassifiziert erkannten Objekte gegenübergestellt. Diese konnten aufgrund des Einsatzes des Regelwerks, welches das standörtliche Potential für das Vorkommen einer Baumart beschreibt, identifiziert werden. Inwieweit die Plausibilitätsüberprüfung mit den tatsächlichen Gegebenheiten übereinstimmt, zeigt ein Vergleich mit IR-Luftbildern.

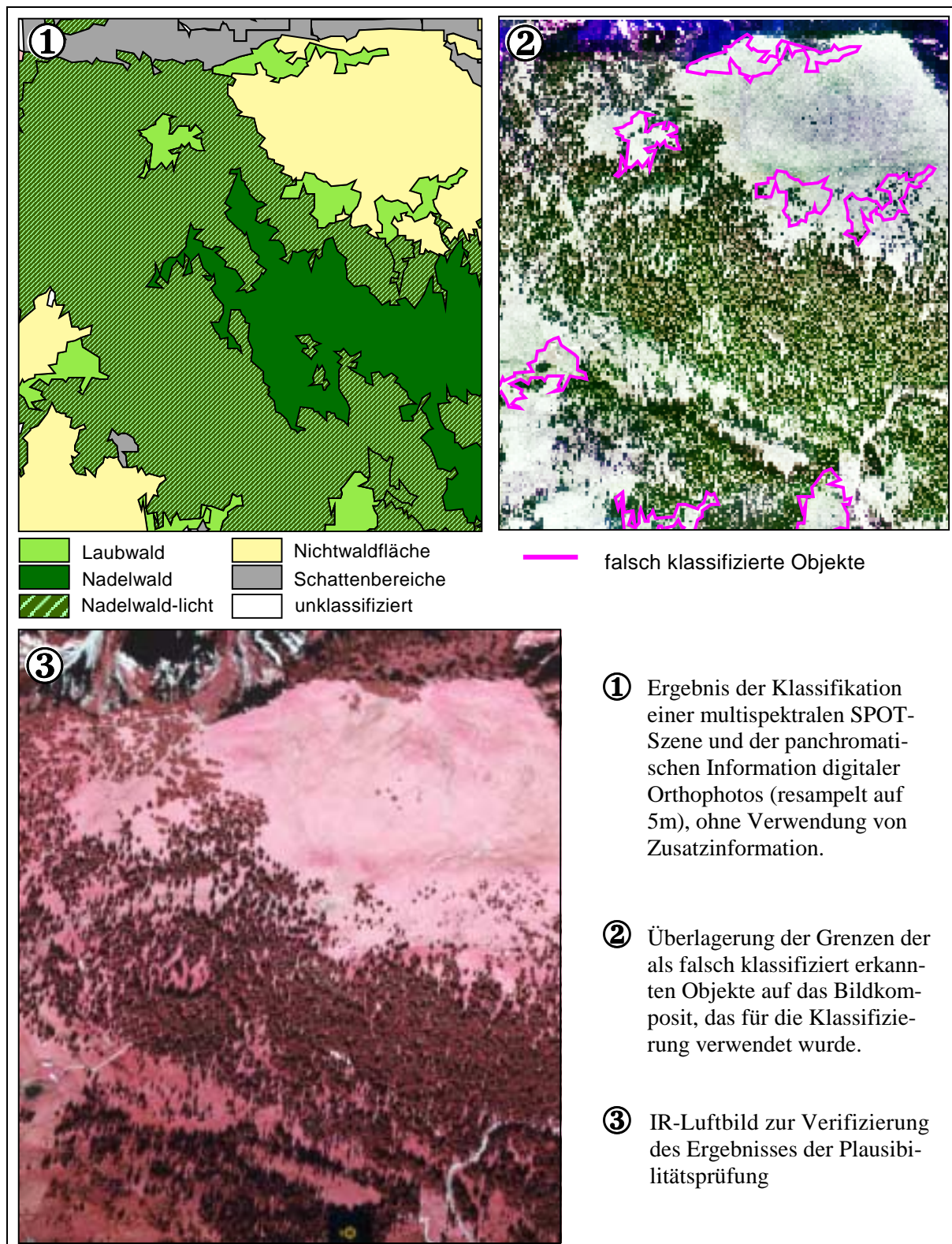


Abb.4.19: Beispiel aus der Plausibilitätsüberprüfung der in der reinen Satellitenbildklassifikation (①) als Laubwald klassifizierten Flächen mit Hilfe des regelbasierten Ansatzes. Die ermittelten und in rosa markierten Flächen (②) liegen oberhalb 1700m und somit außerhalb der im Regelwerk für Laubbäume festgelegten Höhengrenze. Bei den als falsch klassifiziert erkannten Objekten handelt es sich, wie ein Abgleich mit dem IR-Luftbild (③) zeigt, z.T. um aufgelockerte Nadelwaldbestände bzw. um Wiesen- und Almflächen, die aufgrund ihrer hohen Reflexion im IR-Spektralbereich zu Verwechslungen mit der spektralen Signatur von Laubbeständen führten.

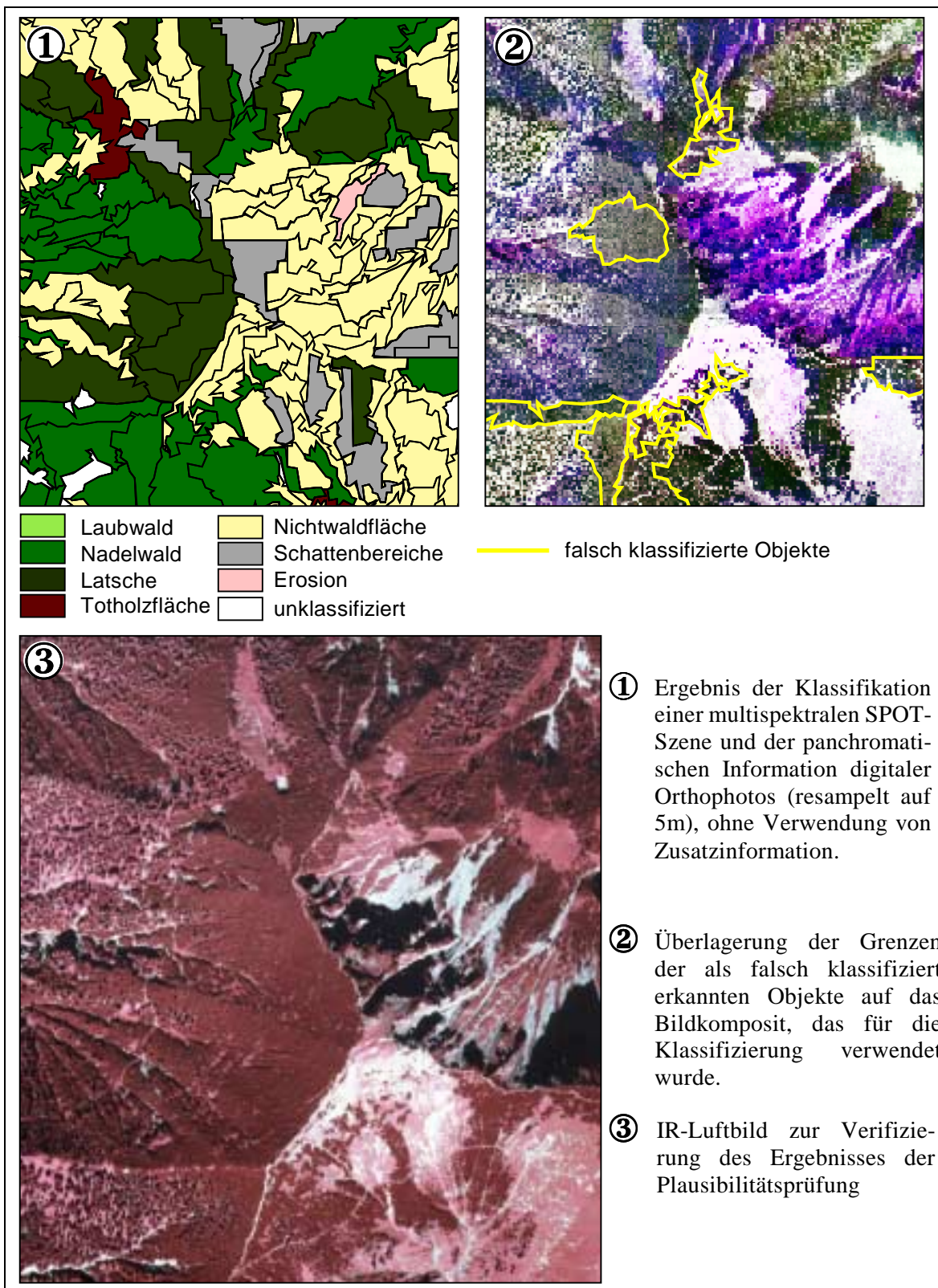


Abb. 4.20: Beispiel aus der Plausibilitätsüberprüfung der als Nadelwald klassifizierte Flächen unter Verwendung des regelbasierten Ansatzes. Bei den in ② gelb markierten Flächen handelt es sich, wie ein Vergleich mit dem IR-Luftbild (③) zeigt, eindeutig um Latschenbestände, die hauptsächlich aufgrund des nicht erfüllten Höhenkriteriums als falsch klassifiziert erkannt wurden. Die Sicherheit des Vorkommens geschlossener Nadelwaldbestände ist nämlich ab einer Höhe >1700 m zunehmend geringer.

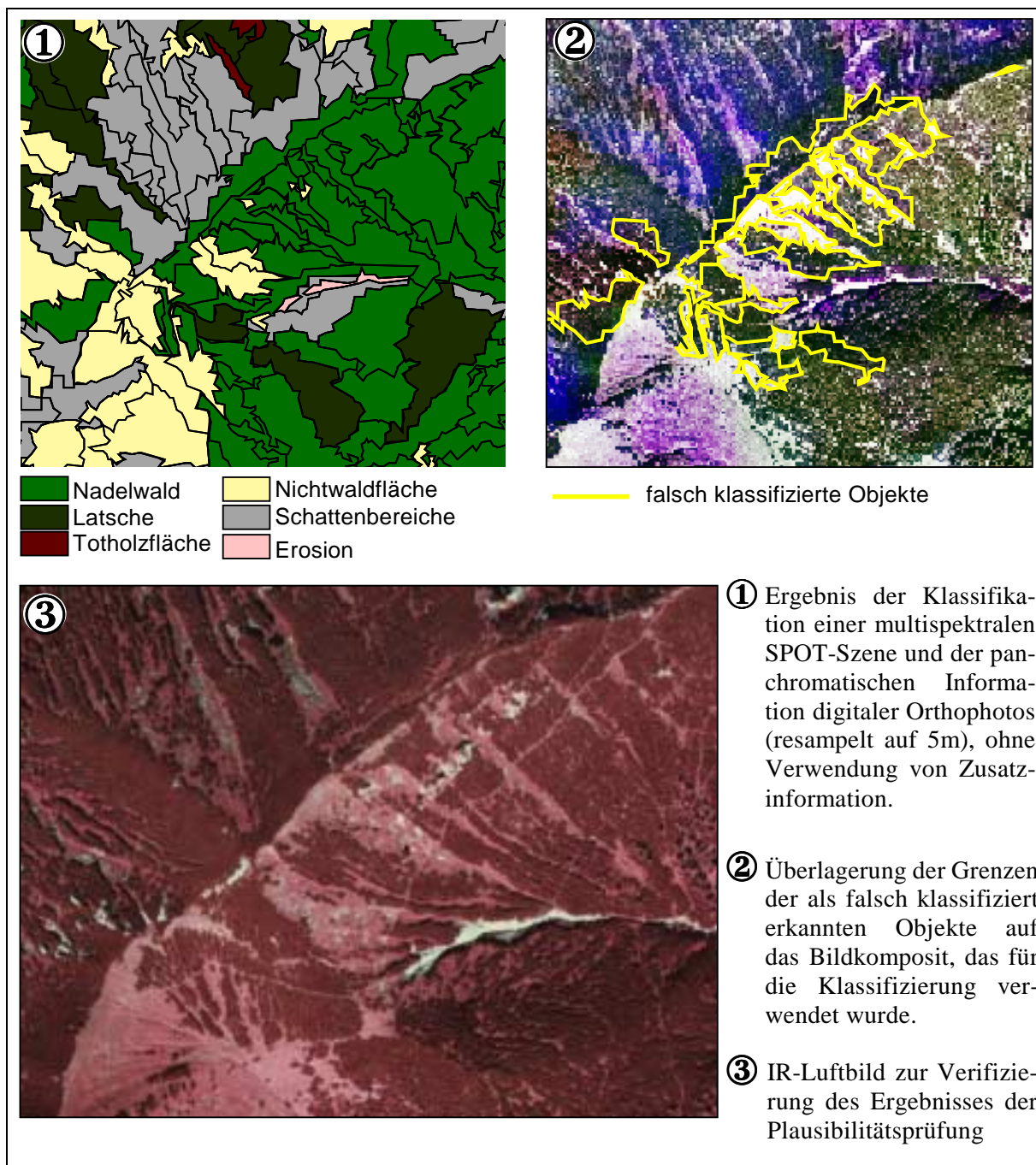


Abb. 4.21: Beispiel aus der Plausibilitätsüberprüfung der als Nadelwald klassifizierten Flächen unter Verwendung des regelbasierten Ansatzes. Die als falsch klassifiziert erkannten und in gelb markierten Flächen ② liegen im Höhenbereich zwischen 1780 und 1850 m und somit außerhalb der im Regelwerk für Nadelwälder festgelegten Verbreitungshöhenlinie. Hierbei handelt es sich, wie ein Vergleich mit dem IR-Luftbild (③) zeigt, eindeutig um Latschenbestände.

4.6 Erstellung und Aktualisierung von GIS-Datenbeständen

Neben dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Einsatz von GIS-Daten zur Unterstützung der Fernerkundungsauswertung, ist als zweites, wesentliches Merkmal des integrativen Prozesses, die Möglichkeit zu nennen, aus der Fernerkundung abgeleitete Information weiterführend zu verwenden und zwar zur:

1. Erstellung neuer Datengrundlagen mit der Möglichkeit, sie als GIS-Datenbestände zu verwalten
2. Erweiterung und Gewinnung neuer Informationen und deren Rückführung in vorhandene GIS-Datenbestände unter Wahrung bereits bestehender administrativer Einheiten
3. Aktualisierung von bereits existierenden Grenzen

4.6.1 Erstellung neuer Datengrundlagen

Innerhalb des verwendeten wissens- und objektbasierten Ansatzes (vgl. Kap. 4.5.1) werden als erstes aus den kalibrierten Fernerkundungsdaten, mittels eines automatisierten Segmentierungsverfahrens von *eCognition*, homogene Bildobjekte gebildet, denen wiederum Klassen zugeordnet werden können.

Zur Bearbeitung und Verwaltung dieser neu gebildeten Objekte mit ihrer spektralen und thematischen Information in einem GIS, müssen diese, als Rasterbild vorliegenden Daten, in einen Vektordatensatz umgewandelt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Klassifikationsverfahren, bei denen die Objekte einer Klasse keine individuellen Merkmale besitzen, ist hierbei das Entscheidende, daß jedes Objekt seine eindeutige Identifikationsnummer behält, und somit die Informationen über die spektralen Eigenschaften eines jeden Objekts, wie auch die Angaben aus der Klassifikation, in Form einer Tabelle gespeichert werden können. Es werden also Attributtabelle mit den Möglichkeiten zu Datenbankabfragen erstellt, was der Datenverwaltung in einem GIS-Umfeld gleicht.

In Abbildung 4.22 ist ein Ausschnitt eines mit *eCognition* segmentierten Bildes dargestellt, das unter Verwendung einer Aufnahme eines SPOT-Satelliten vom 21.06.98 und digitaler Ortholuftbilder vom 1.10.96 erstellt und u.a. zur Bestimmung der Baumartenzusammensetzung verwendet wurde.

Das Vorhandensein detaillierter Attributinformation zu jedem der hier in Abbildung 4.22 mit blauen Linien umrandeten Objekte, ist anhand eines Beispiels dargestellt. Zusätzlich zu dem Klassifizierungsergebnis sind zu jedem Objekt sowohl Informationen über die einzelnen, zur Beschreibung der jeweiligen Klasse herangezogenen GIS-Zusatzdaten gespeichert (s. Kap. 4.5.1.2) als auch die spektralen Informationen, der bei der Segmentierung verwendeten Bilddaten (einschließlich Texturparameter), weiterhin Formmerkmale (z.B. in Bezug auf die Größe, Umfang, Asymmetrie, etc.) und Informationen zu den topologischen Beziehungen (z.B. relative Kantenlänge zu benachbarten Objekten einer anderen Klasse). Durch Anklicken eines Objektes, kann dieses selektiert und die zugehörige Information eingesehen werden.

Im konkreten, in Abbildung 4.22 dargestellten Beispiel handelt es sich um ein Objekt, dem die Klasse "Wiese" mit einem Zugehörigkeitswert von 51,96% zugeordnet wurde⁹. Die zweitbeste Klassenzuweisung ist in diesem Fall die Klasse "Strauchvegetation" mit 24,3 % Zugehörigkeit. Weiterhin werden die Informationen geliefert, daß das Objekt auf einer Durchschnittshöhe von 916 m ü. NN liegt, es sich beim Ausgangssubstrat um Hauptdolomit handelt und es einen normalisierten Vegetationsindexwert (NDVI) von 208 (=hohe Vitalität) und einen Helligkeitswert von ca. 207 besitzt, um hier nur einige zu nennen.

⁹ Die Zugehörigkeit zur Klasse Wiese ergibt sich aus der Gesamtheit aller Zugehörigkeitswerte, die in Bezug auf die einzelnen Geofaktoren und spektralen Eigenschaften ermittelt werden. Unter Verwendung eines Fuzzy „and“-Operators (s. Kap. 4.4.1.2) werden die einzelnen Regelprämissen miteinander verknüpft, was bedeutet, daß die Regelprämisse bzw. der Einflußfaktor mit dem kleinsten Wert ausschlaggebend für die Endzuordnung ist. In diesem Fall, stammt der Zugehörigkeitswert von 51,96% aus der Beurteilung der spektralen Eigenschaften der SPOT-Satellitenbilddaten. Auch wenn alle anderen Faktoren (z.B. Höhe, Exposition, geologische Unterlage, etc.) höhere Grade der Zugehörigkeit zur Klasse "Wiese" aufweisen, sind sie schon aus dem Grund, daß sie keinerlei Restriktionen für das Vorkommen dieser Klasse darstellen, für die Gesamtbeurteilung und letztendlich für die Klassenzuweisung weniger entscheidend, als der Faktor, der den geringsten Zugehörigkeitswert besitzt. Die Vorteile, die die Angabe von Zugehörigkeitsgraden im Vergleich zu herkömmlichen Klassifizierungsmethoden besitzt, wurden in Kap. 3.3.2 besprochen.

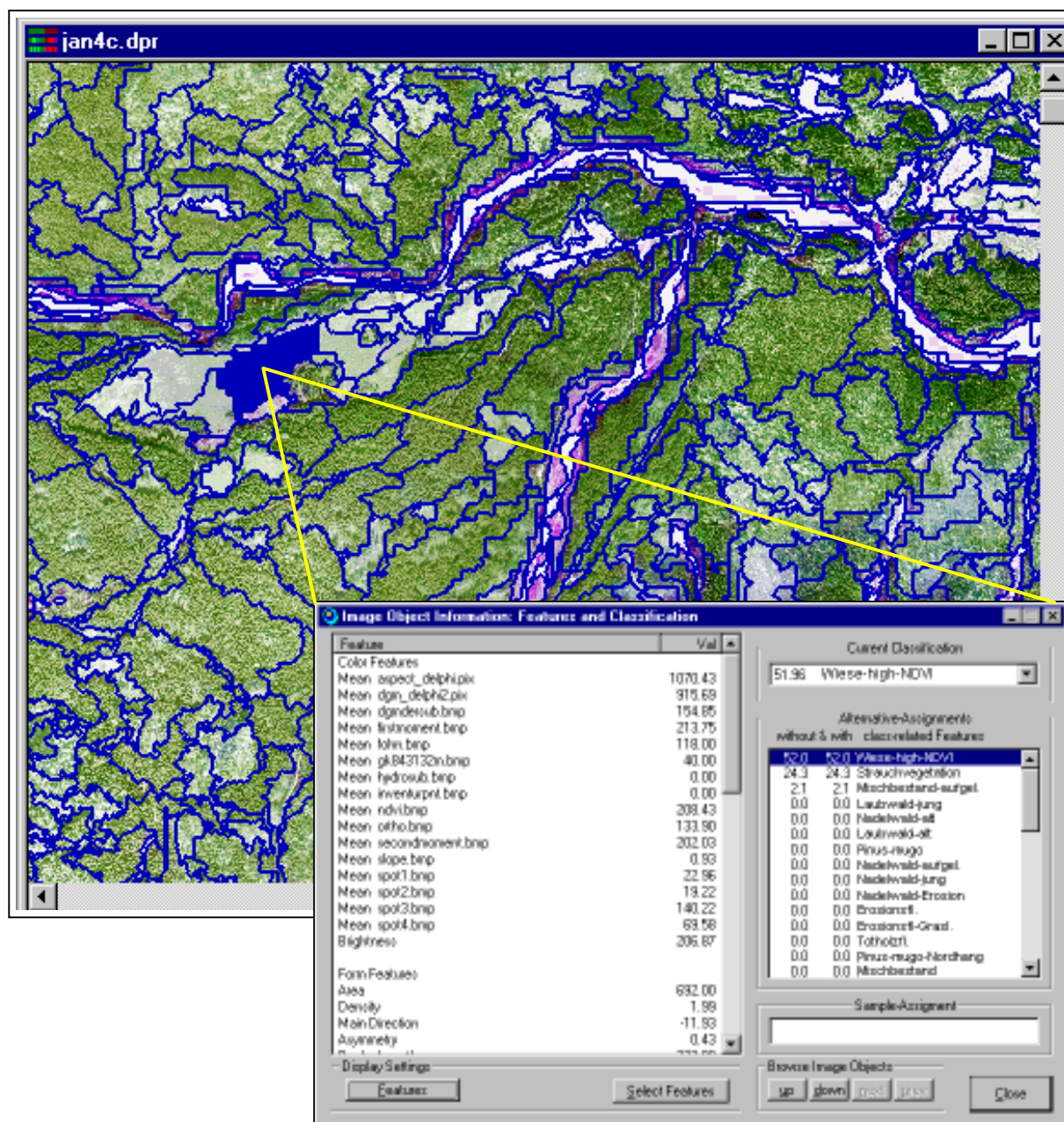



Abb. 4.22: Segmentiertes Bild, erstellt aus einer multispektralen SPOT-Satellitenszene vom 21.06.98 und der panchromatischen Information digitaler Ortholuftbilder vom 01.10.96. Die in blau dargestellten Objektgrenzen umgeben homogene, räumlich zusammenhängende Bildobjekte. Die zum ausgefüllt blau gekennzeichneten Objekt gehörige Merkmalstabelle wird exemplarisch dargestellt. Im linken Rahmen erscheinen die Attributwerte aus den einzelnen GIS-Zusatzdaten (z.B. Mittelwerte der Exposition, der Höhe, die geolog. Unterlage, etc.) sowie die spektralen Werte der einzelnen Satellitenbänder oder der hiervon abgeleitete Vegetationsindex für das markierte Objekt. Im rechten Rahmen ist die dem Objekt zugewiesene Klasse und der Prozentsatz ihrer jeweiligen Zugehörigkeit zu erkennen (weitere Erläuterungen s. Text).

Die verfügbare und in tabellarischer Form gespeicherte Attributinformation ist die Voraussetzung zum Aufbau eines GIS-Datenbestandes, was v.a. bei nicht vorhandenen flächigen Informationen (z.B. Bestandsaufnahme von Waldflächen im Privatwald) von großem Nutzen sein kann.

4.6.2 Erweiterung bestehender Datensätze

Das eingesetzte objektorientierte Verfahren erlaubt es weiterhin, bestehende GIS-Datensätze für den Aufbau einer Objektebene bei der Segmentierung zu verwenden, so daß die Grenzen dieser thematischen Einheiten übernommen werden. Da es sich um ein multiskalares Verfahren unter Verwendung eines hierarchischen Netzwerks handelt (s. Kap. 4.4.1.1), werden die Grenzen von Objekten einer höheren Hierarchiestufe bei der Festlegung weiterer Objektebenen unterhalb derselben respektiert.

Verwendet man z.B. die Grenzen der Waldbestände aus der Forstbetriebskarte als Objektebene bei der Segmentierung weiterer Unterobjekte, so bleiben diese verwaltungstechnischen Einheiten mit den dazugehörigen Bestandeskennziffern erhalten. Da somit weiterführende Analysen und Auswertungen innerhalb von Grenzen bestehender Bezugseinheiten stattfinden, können bereits existierende GIS-Daten (wie in diesem Fall die Daten aus der Forsteinrichtung) aktualisiert oder erweitert werden.

Abbildung 4.23 veranschaulicht die Vorgehensweise und das Prinzip der Aktualisierung und Erweiterung eines vorhandenen GIS-Datenbestandes. Der obere Teil stellt einen Ausschnitt aus der Forstbetriebskarte und der entsprechenden Attributtabelle mit Informationen aus der Forsteinrichtungsdatenbank dar. Für den in der Karte selektierten Bestand (rot umrandet) können über die Bestandeskennziffer (*Bestandp-ID* Feld) die jeweiligen Einträge in der Attributtabelle (gelb unterlegt) abgefragt werden. Im gezeigten Beispiel handelt es sich um einen Bestand im Jugendstadium (JS). Der mittlere Abschnitt der Abbildung 4.23 (Bild ) zeigt das Ergebnis einer Segmentierung die mit Hilfe der multispektralen Information einer SPOT-Satellitenszene und der Information panchromatischer Ortholuftbilder, **innerhalb** bestehender Bestandesgrenzen aus der Forstbetriebskarte erstellt wurde. Die Bestandesgrenzen bleiben somit als Grenzen von Objekten einer höheren Hierarchiestufe erhalten. Die Attributinformation zu diesen Objekten umfaßt, wie

bereits in Kapitel 4.6.1 dargestellt, neben dem Klassifizierungsergebnis, Informationen zu den standörtlichen Eigenschaften und, wie die zugehörigen Tabelle zeigt, auch spektrale Angaben, z.B. daß es sich im konkreten Fall um ein Waldobjekt mit einem niedrigen Rückstrahlungswert (NDVI) handelt. Mit Hilfe eines gemeinsamen Feldes, welches die Identitätsnummern enthält (*Bestandp-ID* Feld), können die einzelnen Attributinformationen sowohl der Forstbetriebskarte als auch des segmentierten Bildes verknüpft und zu einer einzigen Tabelle vereinigt werden, wie sie im unteren Drittel der Abbildung 4.23 zu sehen ist.

Das Zusammenführen von spektraler Information aus der Bildstatistik von Fernerkundungsdaten und der Information eines bestehenden GIS-Datenbestandes unter Schaffung einer zentralen Datenbank, stellt eine direkte Schnittstelle zwischen der Fernerkundungsauswertung und den Geo-Informationssystemen dar.

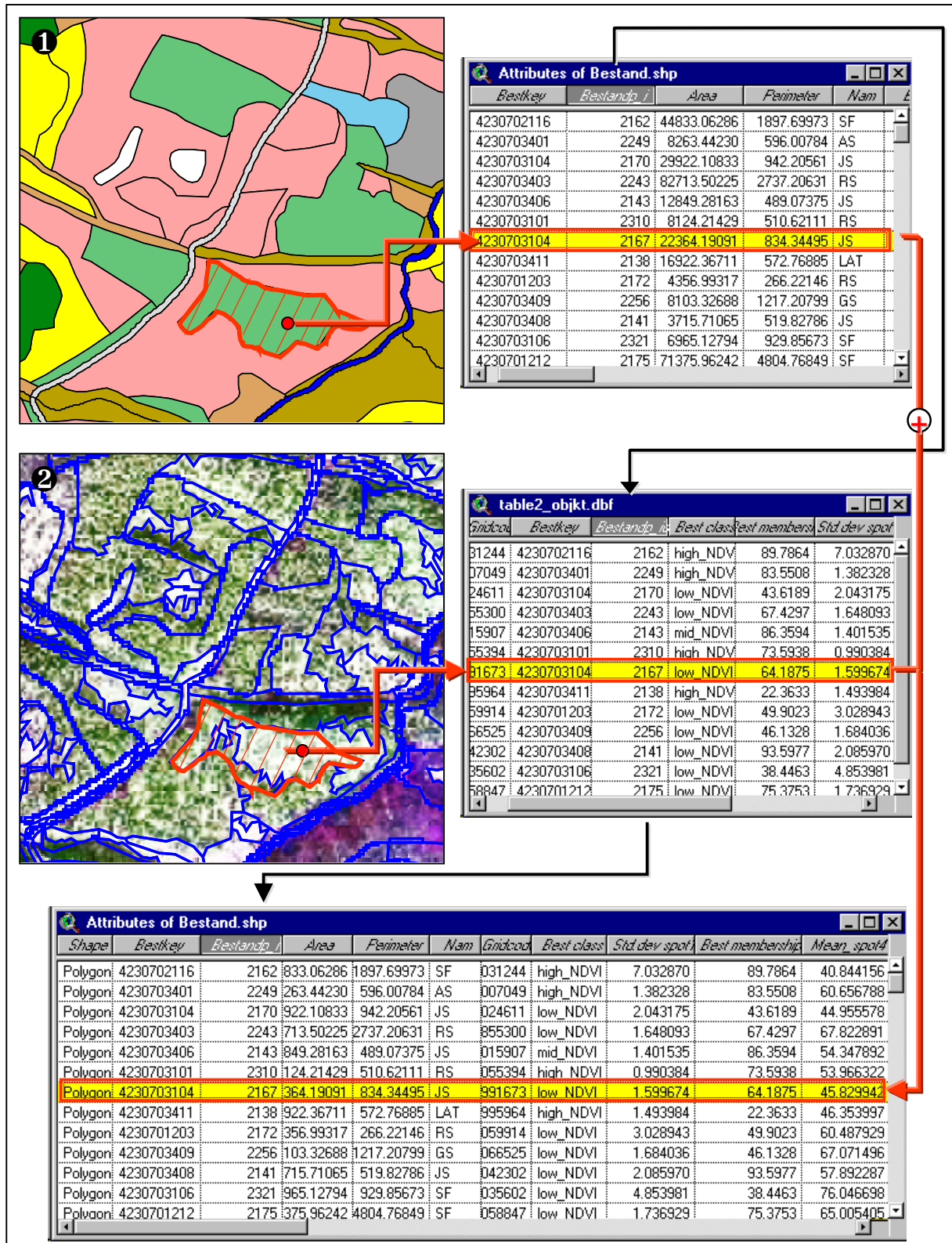


Abb. 4.23: Aktualisierungsstrategie unter Verwendung bestehender forstlicher Datenstrukturen (① Ausschnitt aus der Forstbetriebskarte, ② Objekte aus dem Segmentierungsverfahren von eCognition mit den jeweiligen Attributtabelle(n)) (weitere Erläuterungen s. Text).

Der hier beschriebene Segmentierungsansatz mit objektorientierter Datenstruktur bringt zusätzlich den Vorteil, daß z.B. die als homogene Flächen dargestellten GIS-Objekte (Waldbestände der FBK) näher unterschieden werden können.

In Abbildung 4.24 zeigen die beiden oberen Bilder Ausschnitte der im Rahmen der Forsteinrichtung erhobenen Daten in Form der Forstbetriebskarte und einer thematischen Darstellung der für die einzelnen Bestände erhobene Bestandsform, die in der zentralen Datenbank (DB2) nur als Attributmerkmal enthalten ist. Diese Informationen beziehen sich jeweils auf die Gesamtfläche eines Bestandes.

Mit Hilfe des im Rahmen der Arbeit implementierten objektbasierten Verfahrens ist es nun möglich, eine zusätzliche Informationsebene zu erreichen. So können z.B., wie die Überlagerung der anhand des Segmentierungsverfahrens ermittelten Objektgrenzen auf ein Orthophoto unter Berücksichtigung bestehender Planungseinheiten zeigt (Bild ④), Unterschiede in der Vegetationsbedeckung innerhalb der Grenzen der als Jugendstadium (s. Bild ①) klassifizierten Fläche festgestellt und lokalisiert werden.

Wie sich im Bildteil ④ leicht nachvollziehen läßt, können mit Hilfe des Segmentierungsverfahrens innerhalb eines Bestandes Unterschiede in der Bestockungsdichte oder in der Konzentration von Mischbaumarten dargestellt werden. Auch der Vergleich der beiden Sachdatentabellen macht den Informationsgewinn durch die Segmentierung (gelbe Bereiche) deutlich. So kann hier die inhomogene Fläche in mehrere Untereinheiten differenziert werden, wie z.B. geschlossene und lichte Nadelwald-Altbestände, Weideflächen mit hoher und niedriger Rückstrahlung (NDVI), etc.

Genauso kann innerhalb bestehender administrativer Grenzen z.B. die Überprüfung von Verjüngungsmaßnahmen erfolgen oder es können Veränderungen eines vormals homogenen bzw. geschlossenen Waldbestandes, die auf biotische (Käferbefall) oder abiotische (Sturmwurf, Lawinen...) Ursachen zurückgehen, erkannt und als Information in der Forstdatenbank abgelegt werden.

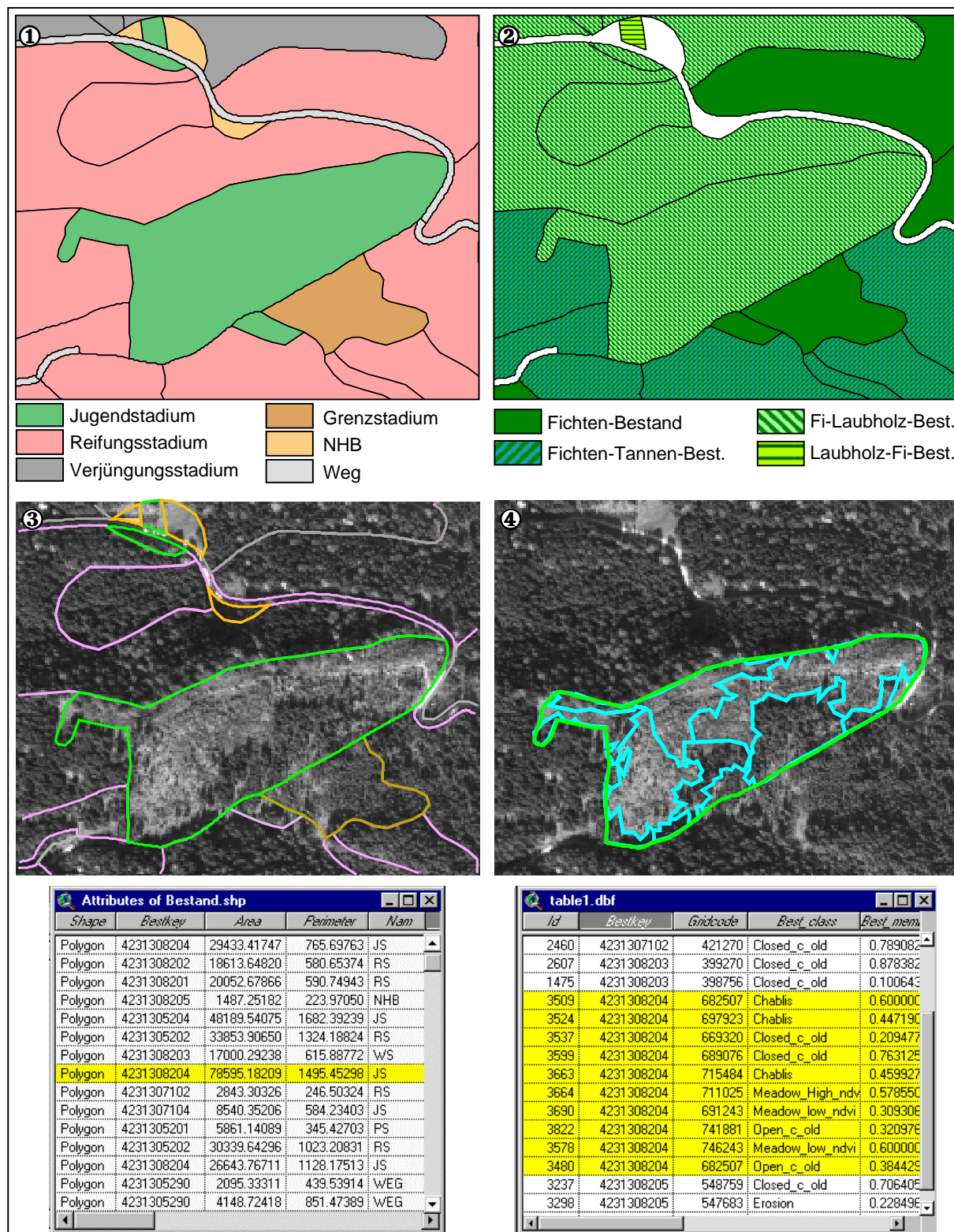


Abb. 4.24: Das verwendete Segmentierungsverfahren ermöglicht zusätzlichen Informationsgewinn: ① Ausschnitt aus der Forstbetriebskarte, ② Kartenmäßige Darstellung einer in Attributform im Datenbestand der Forsteinrichtungsdatenbank DB2 vorgehaltenen Information über die Bestandsformen der einzelnen Bestände; ③ Grenzen der Waldbestände aus der FBK (zugehörige Attributtabelle unterhalb abgebildet), überlagert auf ein digitales Orthophoto; ④ Objekte aus dem Segmentierungsverfahren von *eCognition* (hellblau) innerhalb der Grenze eines Waldbestandes aus der FBK (grün) mit der dazugehörigen Sachdatentabelle (weitere Erläuterungen s. Text).

4.6.3 Aktualisierung von Grenzverläufen

Durch das hier vorgestellte *eCognition* Segmentierungsverfahren wird nicht nur die Aktualisierung der thematischen Information innerhalb bestehender Grenzen möglich. Wie die Beispiele in Abbildung 4.25 zeigen, können unter Verwendung aktueller Fernerkundungsdaten auch Aktualisierungen von Bestandesgrenzen erfolgen und Lagegenauigkeiten in vorhandenen Datenbeständen festgestellt und korrigiert werden.

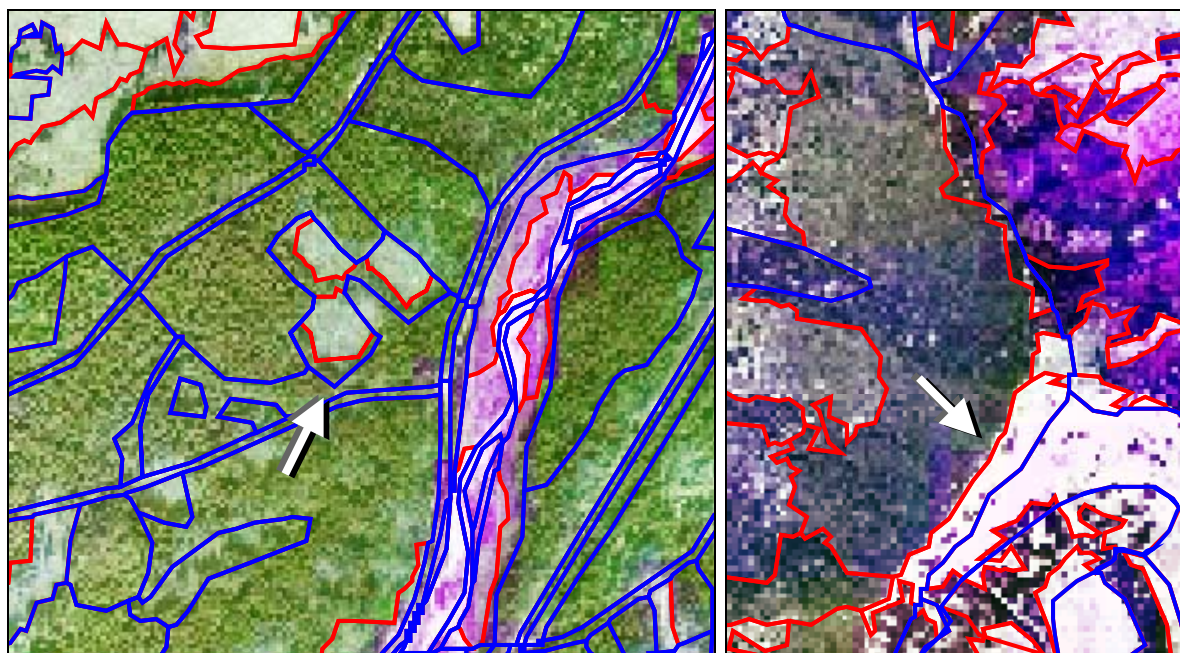


Abb. 4.25: Aktualisierung der Bestandesgrenzen der Forstbetriebskarte. In blau sind die Original-Bestandesgrenzen dargestellt, in rot die anhand des *eCognition* Segmentierungsverfahrens ermittelten Grenzen. Die weißen Pfeile verdeutlichen besonders markante Unterschiede.

Dies hat zur Folge, daß bei Feststellung veränderter Grenzverläufe, die sich z.B. durch plötzlich eingetretene Schadereignisse (Sturmwurf) ergeben können oder, wie in Abbildung 4.25 dargestellt, auf vorangegangenen, ungenauen Grenzziehungen beruhen, keine digitale Neuerfassung erfolgen muß, da die aus der Segmentierung hervorgegangenen, neuen Objektgrenzen bei Bedarf nunmehr interaktiv durch einfache Selektion am Bildschirm übernommen werden können.

5. DISKUSSION UND SCHLUßFOLGERUNGEN

Wie in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt werden konnte, erlaubt die **mehrstufige, objekt- und wissensbasierte** Integration von Fernerkundung und GIS eine deutliche Verbesserung der Auswertung von Bilddaten bzw. die Verarbeitung hoch bis sehr hochauflösender Satellitenbilddaten.

5.1 Aufbau eines forstlichen GIS

5.1.1 Der Nutzen für die Forstverwaltung

In der forstlichen Praxis treffen häufig gestiegene Anforderungen und Erwartungen an das klassische Informationssystem der Forsteinrichtung zusammen, mit ökonomisch erzwungenen Extensivierungen, die sich z.B. in einer Erhöhung der Flächenleistung bei der Forsteinrichtung äußern. Sollen dennoch Qualität und Aktualität der forstlichen Information erhalten bzw. sogar gesteigert werden, wie dies etwa zur Beurteilung der Anfälligkeit oder Gefährdung von Schutzwaldbeständen (im Hinblick auf Schneebewegungen, Lawinen, etc.) erforderlich ist, sind Verfahren notwendig, die kritische Entwicklungen wie die Entmischung der natürlichen Baumartenzusammensetzung, Überalterung oder zunehmende Lückigkeit der Bestände (vgl. AMMER 1989; STMELF 1987,1993; AMMER ET AL. 2000) rechtzeitig und nachprüfbar dokumentieren.

Wie Expertenbefragungen auf unterschiedlichen Forstverwaltungsebenen ergaben (s. ALPS 2000), wäre schon allein die Bereitstellung von Satellitenbildern für den Forsteinrichter ein hilfreiches Instrument. BLASCHKE (2000) macht deutlich, daß damit die Begangsplanung wesentlich erleichtert werden kann, da auf der Grundlage ausgewählter Satellitenbilder eine effektive Vorausscheidung der Bestände erfolgen kann.

Aber nicht nur die Bereitstellung von Fernerkundungsdaten, auch die Verfügbarkeit über topographische Informationen und Geländeparametern (wie z.B. Höhe, Neigung, Exposition, Morphologie, etc.) oder die bisher nur in Tabellenform aus der

Forsteinrichtungsdatenbank (DB2) vorgehaltenen Informationen der vorangegangenen Forsteinrichtung sowie der Stichprobeninventur könnten, innerhalb eines GIS, als Weiserwerte von großer Hilfe sein. Darauf weisen nicht zuletzt die Erhebungen zu den Nutzeranforderungen an die Fernerkundung hin (s. BLASCHKE 2000).

Bisher werden die Daten aus der DB2 im wesentlichen nur für forstamtsübergreifende Auswertungen verwendet (s. Kap. 3.2.3.1), nicht jedoch auf Forstamts- bzw. Bestandesebene. Mit den in einem GIS zur Verfügung stehenden Mitteln der Visualisierung sowie den Datenabfrage- und Analysemöglichkeiten, können z.B. in Kombination mit der ebenfalls im GIS integrierten Forstbetriebskarte neue Informationen auf lokaler Ebene gewonnen werden, die sich für die Forsteinrichtung unmittelbar praktisch auswirken. Setzte man z.B. diese neu gewonnenen Informationen bei der Ausscheidung von Beständen als Teil der Beganggrundlage mit ein, könnten z.B. die Begangszeiten verkürzt werden, weil die Begangsschwerpunkte gezielt auf kritische Bereiche — wie z.B. Verjüngungsflächen oder funktionsgestörte Schutzwälder — gelegt werden (vgl. hierzu auch BAUER 2000).

Ein weiterer, ganz entscheidender Vorteil von Geo-Informationssystemen besteht darin, daß Entscheidungen transparenter werden. Anders als bei analogen Verfahren, in denen meist nur das fertige, interpretierte Produkt in Form einer thematischen Karte zur Verfügung steht, können durch die digitale Archivierung der Daten innerhalb eines GIS, sämtliche Attribute der jeweiligen Geometrie-Daten sowie die Informationen, die in den Fachdatenbanken enthalten sind, abgefragt und für aktuelle Fragestellungen leicht auf anschauliche Weise dargestellt werden. Es kann festgestellt werden, welche Grundinformationen zur Verfügung stehen und auf welche Weise das präsentierte Ergebnis zustande gekommen ist.

Dem Einsatz eines Geo-Informationssystems im Rahmen der Forsteinrichtung unter stärkerer Einbeziehung der verschiedenen Fachdaten wie auch der weiteren mittlerweile zur Verfügung stehenden digitalen Geo-Datensätze sollte deshalb größere Beachtung zuteil werden.

5.1.2 Notwendigkeit der Qualitätsanalyse von Daten

Der synergistische Einsatz der beiden Systeme Fernerkundung und GIS erfordert ein hohes Maß an Qualität der in den Untersuchungen einbezogenen Datensätze. Bei der Überprüfung der Daten stellte sich heraus, daß die bereits in digitaler Form vorliegenden GIS-Basisdatensätze der Fachbehörden nicht die erwarteten Genauigkeiten – weder in geometrischer noch in thematischer Hinsicht – aufwiesen (s. Kap. 3.3.4).

Dieser Zustand stellt vor allem im Blick auf die vom Endnutzer geforderte und heute bereits verfügbare räumliche Auflösung mit der damit möglichen verbesserten Detailerkennbarkeit und exakteren Lagebeziehung durch die neuen hochauflösenden Satellitenbilddaten eine wesentliche Einschränkung der Analysemöglichkeiten dar. Mit dem Aufkommen der neuen Generation von Satellitenbildern, die eine räumliche Auflösung zwischen 1-5m aufweisen und deren erster operationeller Vertreter der IKONOS Sensor der Fa. Space Image Caterra ist, werden nämlich auch höhere Anforderungen an die Qualität bestehender GIS-Daten gestellt. Unter Verwendung herkömmlicher Satellitenbilddaten dagegen, die z.B. im Falle des Landsat-TM-Sensors eine Auflösung von 30 m besitzen, kam bislang nur ein relativ kleiner Untersuchungsmaßstab in Frage, so daß Lageabweichungen, die bei der Forstbetriebskarte in der Größenordnung von 30 – 40 m oder bei den ATKIS-Daten von bis zu ca. 65 m lagen, nicht so sehr ins Gewicht fielen.

Bei den vom Landesvermessungsamt (BLVA) bereitgestellten amtlichen ATKIS-Daten handelte es sich um Daten der ATKIS-Vorstufe, bei denen in Bayern auf eine Neuerfassung der Daten zugunsten einer schnellen Verfügbarkeit verzichtet wurde. Diese Informationen, die auf Grundlage der bestehenden TK25 erfaßt wurden, weisen neben Digitalisierungsfehlern auch Ungenauigkeiten auf, die auf eine mangelhafte Aktualität der verwendeten Datengrundlage zurückzuführen sind (vgl. Kap. 3.3.3.1).

Dieser Zustand könnte sich durch eine Fortführung dieser ersten Erfassungsstufe der ATKIS-Daten verbessern. Diese sogenannten ATKIS-DLM 25/1-Daten, lagen jedoch für das Untersuchungsgebiet bis zum Ende der Untersuchung nicht vor. DLM 25/1-Daten werden nach Angaben des BLVA vor der ersten Aktualisierung auf die Geometrie von Orthophotos transformiert (KOLLMUß 1999), so daß eine Verbesserung in der geometrischen Lagegenauigkeit zu erwarten ist. Auch für ihre weitergehende Fortführung, zur Erfassung der meisten topographischen Veränderungen, ist ein Abgleich mit digitalen Orthophotos

vorgesehen. Dem gesetzlichen Auftrag der Vermessungsverwaltungen, nämlich dem Nutzer Grunddaten zu liefern, die einen einheitlichen Raumbezug nach der Verknüpfung der digitalen Fachdaten mit den amtlichen Basisdaten garantieren (BLVA 1999), könnte somit in Zukunft Rechnung getragen werden.

Die Genauigkeit des Datenbestands aus der Forsteinrichtung genügt den Anforderungen für bestehende Planungs- und Betriebsabläufe der Forstverwaltung. Zieht man aber eine Verknüpfung und einen Austausch mit anderen Datensätzen in Betracht, so stellen sie sich als unzureichend dar, vor allem, wenn man die oben erwähnte Nutzung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten erwägt. Ein Abgleich mit anderen Datensätzen und die Schaffung eines einheitlichen Raumbezugs sollte daher dringend erfolgen. Für Fragen der Schutzwaldsanierung bzw. ein Schutzwaldmonitoring beispielsweise, ist die Integration und Vernetzung verschiedener bestehender Datensätze zur Ableitung der benötigten Flächeninformation und zur Verbesserung der Aussageschärfe erforderlich. Dabei wird auch der Aufbau von Datensammlungen zunehmend wichtiger.

In einer Zeit, in der immer mehr digitale Datensätze zur Verfügung stehen, bleibt die Überprüfung der Daten hinsichtlich ihrer thematischen wie geometrischen Richtigkeit auch in Zukunft ein wichtiger, ja entscheidender Aspekt. Die Kenntnis über die Qualität der Daten versetzt den Anwender bzw. Entscheidungsträger in die Lage, über die Verlässlichkeit der einzelnen Datensätze urteilen zu können. Weiterhin ermöglicht sie ihm die Abschätzung, in welchem Maße und für welche Fragestellung die einzelnen Daten verwendet werden können, bzw. wie zuverlässig die abgeleiteten Informationen sind.

Eine genaue Beschreibung der Datensätze, im Sinne einer Metainformation, die u.a. Angaben über Erfassungsmethode, -zeitpunkt sowie Genauigkeit beinhaltet, wie sie in Kapitel 3.3.3.3 gefordert wurde, ist deshalb unerlässlich, stellt zum gegenwärtigen Zeitpunkt aber eher die Ausnahme dar (vgl. u.a. auch BALTSAVIAS & HAHN 1999; BILL 1999; BUHMANN & WIESEL 1998; LOTHER 1999). Oft sind die mitgeführten Angaben zu generell gehalten, wie etwa im Falle der Daten der ATKIS-Vorstufe. Allgemeine, bayernweite Qualitätsangaben, die keine Rückschlüsse auf die im jeweiligen Untersuchungsgebiet tatsächlich herrschenden Lagefehler zulassen, erlauben keine wirkliche Aussage über die Genauigkeit des vorliegenden Datensatzes.

Die Defizite in der geometrischen und inhaltlichen Homogenität und Kompatibilität der Datensätze, die im ersten Teil dieser Arbeit, mit dem Aufbau eines Projekt-GIS für das Untersuchungsgebiet Oberammergau aufgezeigt werden konnten, sind kennzeichnend für den momentanen Zustand der Geo-Datenlandschaft. Solange keine einheitlichen Qualitätsstandards oder die bereits erwähnten Beschreibungen in Form von Metadaten zur Norm werden, bleibt ein schneller und unkomplizierter Zugang zur Information verwehrt.

Auch die Fülle unterschiedlicher Datenformate, die mit der wachsenden Verfügbarkeit digitaler Datensätze einhergeht, stellt ein Problem dar. Eine Standardisierung von Import- bzw. Export-Formaten für den Datenaustausch ist daher in Zukunft zwingend erforderlich. Nach BILL (1999b), BURROUGH & McDONNELL (1998) und BUHMANN & WIESEL (1998) beherrschen in diesem Zusammenhang zwei Themen die aktuellen Entwicklungen im GIS-Umfeld: „Open GIS“ und „Interoperabilität“. Hierbei spielt das "Open GIS-Consortium (OGC)" (www.opengis.org) eine wichtige Rolle. Dieses hat es sich zur Aufgabe gemacht, eine Standardisierung von Schnittstellen für Geodaten voranzutreiben, so daß ein direkter Datenaustausch, ohne vorangehende Umkonvertierung bzw. Transformation von einem Datenformat ins andere, ermöglicht wird. Für den Anwender bedeutet dies einen besseren Zugriff auf die Daten und somit eine größere Verfügbarkeit und Verbreitung von Information.

Die besonderen Eigenschaften der Geo-Informationen, die, einmal digital erfaßt, für zahlreiche Anwendungen vielseitig nutzbar wird, erzwingen eine inter- und multidisziplinäre Zusammenarbeit. Nur so kann eine koordinierte, standardisierte Datenhaltung erfolgen, die eine umfassende Nutzung von Geo-Informationen zur Lösung raumbezogener und gesellschaftsrelevanter Probleme erlaubt, eine Doppeldatenerfassung vermeidet und folglich Kosten reduziert.

5.2 Integration von Fernerkundung und GIS

Aufgrund der Einschränkungen und Probleme, die sich bei der Bearbeitung höher auflösender Satellitenbilddaten unter Verwendung herkömmlicher Verfahren ergeben (s. Kap. 4.1), ist ein Umdenken in der Bearbeitung raumbezogener Daten erforderlich. Der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte integrative Ansatz unter Einsatz wissens- und objektbasierter Methoden soll dazu einen Beitrag liefern.

Wie anhand von Beispielen ausgewählter Studien in Kapitel 4.2 dargelegt werden konnte, ist die Anzahl der Klassifizierungsansätze, in denen GIS-Daten als unterstützende Zusatzinformation verwendet werden – z.B. unter Einsatz von Digitalen Geländemodellen, topographischen Informationen oder anderen digitalen thematischen Vorinformationen – in den letzten Jahren gestiegen. Bis dato gibt es aber nur wenige Verfahren, wie u.a. auch BALSAVIAS & HAHN (1999) feststellen, die einen *umfassenden* Integrationsansatz implementieren. Ein *umfassender* integrativer Prozeß verläuft im Gegensatz zu traditionellen Verfahren in beide Richtungen, d.h. zum einen werden aus dem GIS die hier abgeleiteten Informationen interaktiv mit den Fernerkundungsdaten verknüpft und zwar an unterschiedlichen Positionen des Verfahrensablaufes, so auch bereits während des Klassifikationsprozesses und zum anderen, werden die Ergebnisse der Klassifikation von Fernerkundungsdaten im Sinne einer Aktualisierung der GIS-Daten eingesetzt (vgl. Kap. 4.2.3).

Daß die Zusammenführung von Fernerkundung und GIS zunehmend an Bedeutung gewinnt, zeigt sich nicht zuletzt an der steigenden Anzahl der GIS- und Fernerkundungskongresse die dieses Thema zum Gegenstand haben (z.B. DGPF-, ISPRS- und EARSeL-Tagungen der letzten Jahre).

5.2.1 Wissensbasierte Analyse

Als Maßstab für den Erfüllungsgrad automatisierter Verfahren wird bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten auch in Zukunft das Leistungsvermögen des Interpreten herangezogen werden müssen (SCHNEIDER et al. 2000). In diesem Sinne ist der Einsatz

Wissensbasierter Systeme als Bestandteil moderner Auswerteverfahren zu sehen (vgl. Kap. 4.5).

LILLESAND & KIEFER (2000) betrachten daher die Zusammenführung von Fernerkundung und GIS unter Verwendung *wissensbasierter* Methoden als ein aktives Feld der derzeitigen Forschung. BALTSAVIAS & HAHN (1999) wiesen allerdings darauf hin, daß Expertenwissen und darauf gründende Modelle zur Beschreibung natürlicher Phänomene gegenwärtig nur sehr schwach in Verarbeitungsverfahren von Fernerkundungsbildern eingebunden sind.

Zur Formalisierung des Wissens werden verschiedene Ansätze verfolgt. So z.B. die Verwendung von *Neuronalen Netzen*, die bei der Klassifikation von Bilddaten eine größere Breite an Eingangsdaten erlauben. Diese benötigen nämlich, im Gegensatz zur traditionell häufig verwendeten *Maximum-Likelihood* Methode, keine *Gauss'sche* statistische Verteilung der Trainingsdaten (vgl. Kap. 4.1). *Neuronale Netze* erlauben deshalb die Verwendung spektraler, textueller und topographischer Informationen (z.B. Hangneigung und Exposition) bei der Klassifizierung (s. LILLESAND & KIEFER 2000). Nach SEGL (1998) versteht man unter *Neuronalen Netzen* nichtparametrische Verfahren, die im Gegensatz zu problemspezifischen Modellansätzen universelle Regressionsmodelle zur Beschreibung der Klassifizierungsfunktionen verwenden.

In der Literatur wird ferner häufig auf den Einsatz von *semantischen Netzen* für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten hingewiesen (z.B. GROWE 1999, KUNZ 1999). Diese besitzen den Vorteil, daß sie sehr flexibel und beliebig erweiterbar sind. Nachteil hierbei ist jedoch der zeitaufwendige und umständliche Aufbau der Netzwerke, weshalb BALTSAVIAS & HAHN (1999) sie für kommerzielle Systeme und damit für einen Einsatz in der Praxis als ungeeignet erachten.

Auch Ansätze, die auf die *Evidenz*-Theorie von *DEMPSTER-SHAFER* zurückgehen (SHAVER 1976) werden zur Strukturierung von Wissen verwendet. Beispiele hierfür sind die Untersuchungen von SKIDMORE et al. (1991) und SRINIVASAN & RICHARDS (1990), die, wie bereits in Kapitel 4.2.3 dargestellt, pixelbasiert arbeiten. Die auf der *Evidenz*-Theorie basierenden Verfahren erlauben es, Daten unterschiedlicher Natur in die Klassifizierung von Fernerkundungsbildern miteinzubeziehen. Für jede Klasse werden Evidenzen berechnet, die sich aus den verfügbaren Zusatzdaten (Höhe, Temperatur, Hangneigung, etc.) und den sich hierauf beziehenden Regelvorschriften ableiten lassen und eine Art Wahrscheinlichkeit

des Vorkommens einer bestimmten Klasse darstellen. Dabei erhalten die einzelnen Evidenzen bezüglich der Zusatzdaten eine Wichtung, die – wie es STOLZ (1998) formuliert – entweder einen positiven oder einen negativen Verdacht ausdrücken. Nachteil ist, daß die Ableitung von Evidenzen diskrete, scharf begrenzte Wertefelder erfordert, wobei die Frage nach der Eignung immer nur mit "ja" oder "nein" beantwortet werden kann, so daß keine Übergangsbereiche, in denen z.B. ein Faktor allmählich seine Gültigkeit verliert, zugelassen sind (STOLZ 1998).

Auch wenn sich die Wahl der zu verwendenden Methode i.d.R. nach den zur Verfügung stehenden Technologien und dem Zugang zu entsprechenden Programmentwicklungen richten wird, sind die Vorzüge regelbasierter Expertensysteme unter Verwendung von *Fuzzy-Logik*, wie sie hier im Rahmen dieser Arbeit angewendet wurden, offensichtlich: denn zusätzlich zu der oben erwähnten Möglichkeit, Datensätze verschiedener Quellen in die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten zu integrieren, bietet der hier gewählte Ansatz, folgende weitere Vorteile:

- Im Falle von mehrfachen und komplexen Klassenbeschreibungen, kann jeder einzelne Schritt des Klassifikationsentscheidungsprozesses zurückverfolgt und im Detail angepaßt werden (etwa im Gegensatz zur Verwendung *Neuronaler Netze*).
- Die für natürliche Prozesse typischen, sich kontinuierlich verändernden Parameter können beschrieben werden. Übergangsbereiche sind modellierbar und der Nachteil, scharf begrenzte Wertebereiche verwenden zu müssen, kann vermieden werden.
- Dadurch ergibt sich auch mehr Spielraum bei der Formulierung von Regeln. Es müssen keine Werte bzw. Wertebereiche exakt festgelegt werden, was den zusätzlichen Vorteil mit sich bringt, daß sich Ungenauigkeiten im Datensatz innerhalb bestimmter Grenzen nicht stark auswirken.
- Linguistische Parameter bei der Beschreibung eines Merkmals, wie z.B. häufig, sehr, etc. können in Regelvorschriften eingebaut werden, auch wenn es sich um unscharf formulierte Informationen handelt (vgl. Kap. 4.3.2). Dies erlaubt u.a. praktisches Expertenwissen in die Analyse miteinzubeziehen.

Entscheidend bei der Verwendung von Expertensystemen ist die Strukturierung des Wissens und die Erstellung von Modellen. Das zu untersuchende Phänomen wird anhand von Eigenschaften, Beziehungen und räumlichen Zusammenhängen beschrieben, abstrahiert und computertechnisch verarbeitbar formalisiert.

Hier liegt allerdings auch der zentrale Kritikpunkt an den Expertensystemen, die aus dem Forschungsfeld der „Künstlichen Intelligenz“ stammen: Das Wissen wird nach SCHOLLES (1999) auf Fakten und Regeln reduziert, die Intelligenz auf meßbare Eigenschaften eingeengt und die Komplexität menschlichen Interaktionsverhaltens ebenso wie Intuition und sinnliche Anteile menschlicher Erfahrung ignoriert. Bei dieser Kritik sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, daß Expertensysteme als ein den Gutachter *unterstützendes* und nicht als ein ihn *ersetzendes* Instrument verstanden werden müssen. Weiterhin ist die Entwicklung eines Expertensystems ohne die Erfahrung von Experten nicht möglich. Solange ein Problem und die Vorgehensweise zu seiner Lösung nicht vollständig beschrieben werden können, bedarf es der Entscheidungsfindung des Interpreten; vollautomatische Expertensysteme sind alleine nicht zielführend (s. SCHOLLES 1999, ZHU et al. 1998).

Auch wenn sie zum Einsatz prädestiniert erscheinen, dürften sich nach Auffassung SCHOLLES (1999) im Umweltbereich die wenigsten Expertensysteme tatsächlich in Anwendung befinden. Dies liegt darin begründet, daß bei Pilotprojekten meist der Aufwand der Vorstrukturierung von Wissen und der Aufbau von Modellen — eine zentrale Voraussetzung für die Eignung eines solchen Systems — unterschätzt werden.

Im Idealfall sollten Regelvorschriften statistisch abgeleitet werden, was nicht immer möglich ist. Deshalb sind in den meisten Fällen Regeln heuristischer Natur, geschätzt aus dem "Wissen" oder "Gespür" eines Experten (SKIDMORE et al. 1991). Im Rahmen dieser Studie wurde zum Aufbau des Regelwerks zur Bestimmung der Baumartenzusammensetzung insofern ein kombinierter Ansatz bei der Ableitung der Regeln angewendet, als durch die umfangreiche forstliche Datensammlung (Forsteinrichtungsdatenbank) und dank der Analysemöglichkeiten im GIS bei der Verschneidung mit anderen Geo-Daten, wichtige Indikatoren statistisch abgeleitet werden konnten, die zur notwendigen Anpassung des aus der Literatur gewonnenen oder von Experten übermittelten Wissens an die konkreten Bedingungen im Untersuchungsgebiet, verwendet wurden.

Expertensysteme, wie sie im Rahmen dieser Arbeit z.B. zur Bestimmung der Baumartenzusammensetzung zum Einsatz kamen, tragen nicht nur zur Verbesserung der Qualität der bei der Auswertung von Satellitenbildern erzielten Ergebnisse bei. Sie dienen, wie DAUME (1999) hervorhebt, auch zur Wissenssicherung des Erfahrungsschatzes individueller Experten und garantieren damit deren allgemeine Verfügbarkeit und deren Transfer. Außerdem wird die Abhängigkeit der Qualität eines Ergebnisses vom Kenntnisstand und der Erfahrung des einzelnen Interpreten relativiert.

5.2.2 Objektbasierter Ansatz

Ein entscheidender Aspekt, der im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich zur Implementierung eines Expertensystems umgesetzt wurde, ist die objektorientierte Vorgehensweise. Dabei ist die Notwendigkeit der Anwendung objektbasierter Methoden v.a. durch das Aufkommen sehr hochauflösender Satellitenbilddaten der neuen Sensorgeneration begründet. Die Vorteile, die objektorientierte Verfahren gegenüber pixelbasierten Verfahren aufweisen, wurden ausführlich in Kapitel 4.1 besprochen. Dabei wurde u.a. deutlich, daß der verwendete objektorientierte Ansatz die Möglichkeit bietet, neben spektralen und Kontextinformationen in Form von Nachbarschaftsbeziehungen, auch Formmerkmale in die Klassifikation miteinzubeziehen. Schließlich wurde auch die Rückführung der Ergebnisse aus der integrativen Auswertung der Fernerkundungsdaten in das GIS erst durch den objektorientierten Ansatz ermöglicht.

Im Erreichen dieses Zieles liegt denn auch die Bedeutung und der Nutzen des Einsatzes dieses Verfahrens in der forstlichen Praxis. So wurde durch die Möglichkeit, bei der Auswertung der Fernerkundungsdaten die administrativen Grenzen der Waldbestände mit ihren eindeutigen Bestandeskennziffern beizubehalten, die Voraussetzung zur direkten Einbindung der gewonnenen Ergebnisse in die Datenstrukturen der Bayer. Staatsforstverwaltung geschaffen. Damit stehen sie dort für bestehende Betriebs- und Planungsabläufe zur Verfügung. Das hier vorgestellte Verfahren erlaubt es, bestehende Datensätze zu erweitern und zusätzliche Parameter, seien sie statistischer, bildanalytischer oder thematischer Natur, aufzunehmen.

Klassische Bildverarbeitungsverfahren unter Nutzung herkömmlicher Satellitenbilddaten, wie z.B. IRS-1C, Landsat und SPOT, waren bislang nur für großräumige Erhebungen im Forstbereich (u.a. zur Trennung in Wald-/ Nicht-Wald-Flächen und zur Unterscheidung der Waldflächen in Nadel-, Laub- und Mischwald) einsetzbar. Für kleinräumigere Analysen (etwa zur Schutzwaldsanierung) ist dagegen ein kombinierter objektorientierter Ansatz unter Verwendung von höher auflösenden Fernerkundungsdaten unter Einbeziehung von Zusatzinformation nötig, der eine stärkere Differenzierung z.B. in der Baumartenzusammensetzung erzielt.

Nachfolgend sollen nochmals die Vorteile, die sich durch den hier implementierten wissens- und objektbasierten Ansatz für den forstlichen Bereich ergeben (auch hinsichtlich Kosten- und Zeitersparnis) dargestellt werden:

- Auf der Grundlage höher auflösender Satellitenbilddaten kann die Flächenabgrenzung forstlich interessanter Objekte automatisiert ablaufen, wobei der Nutzer zudem die Möglichkeit besitzt, in das Vorgehen einzugreifen und das Ergebnis interaktiv, z.B. durch das Zusammenfassen von Objekten, zu steuern. Dadurch werden die stark zeit- und kostenaufwendigen Digitalisierungsarbeiten und die im Rahmen der Forsteinrichtung vorangehende Erstellung von Begangspausen, mit dem Zeichnen von Bestandesgrenzen, reduziert.
- Auch bei Flächen außerhalb des Staatswaldes, für die kaum gesicherte und aktuelle Informationen vorliegen, könnten Erhebungen schnell und kostensparend erfolgen. Vor allem eine automatisierte Abgrenzung von Waldbeständen hätte hier, aufgrund der im Privatwald oft fehlenden Planungseinheiten und Datenstrukturen größere Bedeutung. Im Hinblick auf die Schutzwaldsanierung könnten auf diese Weise Informationen über die Beeinträchtigung der Schutzwirksamkeit auch außerhalb des Staatsforstes erfaßt, frühzeitig erkannt und regelmäßig überprüft werden.
- Die direkte Verbindung mit einem GIS, stellt eine wichtige Voraussetzung zur Schaffung eines neuen GIS-Datensatzes bzw. zur Aktualisierung und Erweiterung eines bestehenden Datensatzes dar.
- Das objektbasierte Verfahren von *eCognition* stellt für jedes Objekt nicht nur Angaben über die Klassenzugehörigkeit sondern auch eine Reihe weiterer

Attributinformation zur Verfügung. Jedes Objekt ist eindeutig identifizierbar, besitzt also eine Identifikationsnummer, die es ermöglicht, beliebige Attributinformation zu speichern. Dadurch können räumliche Analysen und Abfragen, wie sie von GIS bekannt sind, durchgeführt werden. So kann z.B. die Zuverlässigkeit der Klassenzuordnung bzw. die Aussagesicherheit der Satellitendaten lokalisiert und zusammen mit den ebenfalls als Attributinformation zur Verfügung stehenden Alternativen, abgeglichen und visualisiert werden. (s. Kap. 4.6).

- Die als homogene Flächen dargestellten GIS-Objekte (Waldbestände der FBK) können weiter differenziert werden. So können innerhalb der Grenzen eines Bestandes, Unterschiede in der Vegetationsbedeckung festgestellt und, was noch entscheidender ist, nun auch lokalisiert werden. Dank der tabellarischen Struktur des Datenbestandes kann diese Information in der Forstdatenbank abgelegt werden.

Wie gut die Ableitung thematischer Information aus den Bilddaten gelingt, hängt im starken Maße auch von der Verfügbarkeit, der Qualität und den Eigenschaften der Eingangsdaten ab. So hätten in der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe eines geometrisch höher auflösenden DGMS, sicherlich die Geländebeziehungen besser modelliert werden können, so daß Formen des Kleinreliefs wie z.B. Schluchten, Gräben und Mulden, etc. erfaßt und deren Einfluß auf die Baumartenzusammensetzung hätten berücksichtigt werden können. Ebenso wäre die Verfügbarkeit über flächige Informationen zu den Bodenverhältnissen von Vorteil gewesen, da diese, gerade im alpinen Raum, häufig einem sehr kleinräumigen Wechseln unterworfen sind.

Festzuhalten bleibt, daß mit Hilfe der im Rahmen dieses Forschungsvorhaben integrierten Datensätze eine signifikante Verbesserung der Klassifizierung von Baumarten erreicht werden konnte. Entscheidend hierbei war der Aufbau eines Modells, der die Gesetzmäßigkeiten und Wechselbeziehungen der einzelnen Baumarten mit den Geo-Faktoren beschrieb. Je stärker der Zusammenhang zwischen der Vegetation und den standörtlichen Bedingungen ist, desto einfacher ist es, Regelvorschriften für ihre Verbreitung zu definieren.

Im alpinen Raum ist das Auftreten von Vegetationstypen besonders stark an spezifische naturräumliche Bedingungen gebunden. Im Flachland dagegen, auch oder gerade wegen des dort stärker ausgeprägten anthropogenen Einflusses und der vorwiegend ökonomischen Zielsetzungen bei der Nutzung von Wäldern, sind die Zusammenhänge oft weniger stark ausgebildet. Andererseits fallen dort auch die Probleme weg, die im alpinen Raum aufgrund des stark reliefierten Geländes auftreten und die eine Auswertung von Fernerkundungsdaten erschweren, diese aber auch, wegen der schlechten Zugänglichkeit, notwendig machen.

Eine Kombination zwischen spektraler und thematischer Information im Sinne eines synergistischen Einsatzes von Fernerkundung und GIS bringt dort, wo herkömmliche Analyse-Verfahren an ihre Grenzen stoßen, eine Lösung.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Dem Bergwald kommt in den Bayerischen Alpen eine besonders große Bedeutung zu. Die Erhaltung stabiler und intakter Waldbestände ist für eine effiziente Erfüllung der Schutzfunktionen hinsichtlich Lawinen, Steinschlag oder sonstigen Erosionsvorgängen ebenso unerlässlich, wie für die Wahrnehmung der Aufgaben im Bereich des Wasserschutzes. Beeinträchtigungen dieser Schutzfunktionen können auf mehrere biotische (Schädlingsbefall oder Wildverbiss) wie abiotische (z.B. Sturmwurf) Ursachen zurückgehen, sind aber stets von großer Brisanz. Um so wichtiger erscheint es, instabile Zustände rechtzeitig erkennen zu können, weshalb flächenhafte Informationen über Zustand und Gefährdung der Wälder stets aktuell verfügbar sein müssen. Die Fernerkundung, vor allem mit der Verfügbarkeit neuerer hochauflösender Satellitenbilder, bietet für diese Problematik einen Lösungsweg.

Die Verwendung dieser sehr hochauflösenden Fernerkundungsbilder einer neuen Generation optischer Sensoren, sowie die besonderen orographischen Verhältnisse in hochalpinen Regionen, erfordern allerdings neuartige Auswertemethoden, die über die konventionellen Klassifikationsverfahren hinausgehen.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit lag im Aufbau eines forstlichen GIS aus Datenbeständen der Bayerischen Staatsforstverwaltung sowie aus zusätzlichen, für das Untersuchungsgebiet Oberammergau vorhandenen Fachdaten. Dabei wurde besonderer Wert auf die Überprüfung der geometrischen so wie der thematischen Genauigkeit der im GIS integrierten Datensätze gelegt. Es konnte gezeigt werden, welche Fehlerquellen bei der Verwendung von Geo-Informationssystemen gemeinhin bestehen. Vor allem die Datensätze der Forsteinrichtung sowie die Daten des Landesvermessungsamtes (ATKIS-Vorstufe, DGM) erwiesen sich als wichtige Quellen von Geo-Informationen und wurden deshalb ausführlich untersucht. Dabei wurden bei der Forstbetriebskarte im Vergleich zu den Orthophotos als Referenzgrundlage, Lageabweichungen in einer Größenordnung von ca. 40 m festgestellt; bei den ATKIS-Daten traten Lagefehler auf, die bis zu 75 m betrug. Auch wenn die bestehenden Ungenauigkeiten bisher den Anforderungen der einzelnen Fachbehörden genügten, so muß in Zukunft, besonders unter Berücksichtigung der Verwendung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten und der Zusammenführung von

Daten aus unterschiedlichen Quellen, dringend ein Abgleich und die Schaffung einer einheitlichen Referenzgeometrie erfolgen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Arbeit bestand darin, eine Methode zu entwickeln, die es erlaubt, zwei verschiedene Systeme für raumbezogene Analysen, wie es Fernerkundung und Geo-Informationssysteme sind, zusammenzuführen, um aus dieser Synergie eine Verbesserung der Auswertemöglichkeiten zur Ableitung forstlich relevanter Parameter zu erreichen. Als Lösungsansatz wurde im Rahmen dieser Arbeit eine **objekt- und wissensbasierte** Integration von Fernerkundung und GIS implementiert, durch die auch die Bearbeitung hochauflösender Satellitenbilddaten erst ermöglicht wurde.

Im Gegensatz zu traditionellen Verfahren handelte es sich hierbei, um *eine umfassende Integration* von Fernerkundung und GIS, die sich auf mehreren Bearbeitungsebenen vollzog. Die hierzu erstellte zentrale GIS-Datenbasis wurde zur Unterstützung der Bildverarbeitung vor, bei und nach der Klassifizierung verwendet. So wurden z.B. die thematischen Zusatzinformationen in Form von Regelwerken, die u.a. aus dem aufgestellten forstlichen GIS und der Formulierung von Expertenwissen abgeleitet wurden, direkt in die Klassifizierung als zusätzliche Entscheidungskriterien miteinbezogen.

Aus der Summe aller Regeln im Regelwerk wurde die Wissensbasis gebildet, ein Modell, das im konkreten Fall der Untersuchung zur Charakterisierung der Baumartenzusammensetzung herangezogen wurde und einen „a priori“ Erwartungszustand für die Fernerkundungsdaten-Analyse vorgibt, der bei der Zuordnung der Baumarten in die einzelnen Klassen berücksichtigt wird. Die Wechselbeziehungen der verfügbaren Geofaktoren, die allesamt das standörtliche Potential beschreiben und sich auf das Vorkommen einer bestimmten Baumart auswirken, wurden anhand von Fuzzy-Logik Zugehörigkeitsfunktionen formalisiert, die mit Hilfe des eCognition Bildverarbeitungsprogramms aufgestellt wurden. Fuzzy Logik eignet sich im Gegensatz zur herkömmlichen Booleschen Logik zur Beschreibung von Sachverhalten bzw. natürlichen Phänomenen, die durch fließende, allmähliche Übergänge (Merkmalsänderungen) gekennzeichnet sind.

Die Hinzunahme von Zusatzinformation konnte das Problem der Mehrdeutigkeit spektraler Signaturen, die keine ausreichend genaue Trennung einzelner Vegetationsklassen zulassen, deutlich verringern. Mit Hilfe des **wissens- und objektbasierten** Verfahrens konnte auf diese Weise eine Erweiterung der Klassenauswahl gegenüber einer auf rein spektraler

Information basierten Klassifizierung erreicht werden. So konnten z.B. Nadelwälder in subalpine und montane Fichtenwälder, Fichten/Tannen- bzw. Tannen/Fichtenwälder sowie Kiefernwälder unterschieden werden. Laubwälder konnten in hochmontane Laubwälder (mit den vorherrschenden Baumarten Vogelbeere und Bergahorn), Buchenwälder sowie Edellaub- und Schatthangwälder untergliedert werden.

Nicht zuletzt erlaubt das hier angewandte integrative Verfahren, die Ergebnisse aus der Interpretation der Fernerkundungsdaten in die bestehende Datenstruktur des GIS zurückzuführen. Ein Vorteil des verwendeten objektbasierten Verfahrens gegenüber herkömmlicher Verfahren besteht nämlich darin, daß die räumlichen Objekte aus der Bildverarbeitung eindeutige Identitätsnummern und topologische Beziehungen erhalten und ihnen eine Attributtabelle mit den jeweiligen spektralen, statistischen sowie auch thematischen Information zugeordnet werden kann. Geltende administrative Einheiten (z. B. Bestandesgrenzen der Forstbetriebskarte) können direkt in die Verarbeitung der Bilddaten miteinfließen, wobei deren Kennziffern übernommen werden. Dadurch kann eine schnelle und unproblematische **Aktualisierung** oder **Erweiterung** bestehender Datenbestände erreicht werden. Die als homogene Flächen in der FBK dargestellten GIS-Objekte (z.B. Waldbestände) können mit Hilfe der objektorientierten Analyse von Fernerkundungsbildern weiter differenziert werden; so können z.B. Altersunterschiede oder unterschiedliche Vegetationsbedeckungen (Kahl- oder vergraste Flächen) lokalisiert werden und als Information in der bestehenden Forstdatenbank abgelegt werden. Schließlich bleiben durch die tabellarische Struktur der Attributinformationen, die Möglichkeiten zu Datenabfragen gegeben, wie sie generell in einem GIS-Umfeld vorhanden sind.

Durch die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse eröffnen sich für die Anwendung der hier vorgestellten Analyseverfahren gerade im forstlichen Bereich interessante, praxisorientierte Möglichkeiten, die u.a. für Monitoringsaufgaben im Bereich der Schutzwaldbewirtschaftung kostengünstig eingesetzt werden können.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- ALDINGER, E., BAYER, J., BUTZ, H. & GEISEL, M. (1996): Anwendung von FOGIS in der Standorts-, Waldbiotop- und Waldfunktionenkartierung.- In: AFZ/DerWald, Heft 10, S. 540 - 542.
- ALPS (2000): Inventur und Beobachtung der Schutzwälder in alpinen Regionen – Nutzungsmöglichkeiten hochauflösender Satellitendaten in der Bayerischen Staatsforstverwaltung. MOMS-Pilotprojekt ALPS, gefördert durch das DLR (FKZ: 50EE9610) und der Bayerischen Staatsforstverwaltung (FKZ: V43), Projektendbericht,. (unveröfftl.)
- AMMER, U. (1989): Der Wald im Bayerischen Alpenraum - Situation, Tendenzen, Prognosen In: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT [Hrsg.] (1989): Schutz vor Wildbächen und Lawinen - Auswirkungen der Waldschäden. Informationsberichte Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft, Nr.4, München, S. 11 –28.
- AMMER, U. & SEITZ, R. (2000): Untersuchungen zur Bedeutung von Nutzungs- und Pflegeeingriffen zur Aufrechterhaltung der landeskulturellen Leistungen von Bergwaldbeständen im Alpenraum. –INTERREG II –Endbericht. 84 S. (unveröfftl. Forschungsbericht).
- AMMER, U., DETSCH, R. & SEITZ, R. (2000): Untersuchungen zur Bedeutung von Nutzungs- und Pflegeeingriffen zur Aufrechterhaltung der landeskulturellen Leistungen von Bergwaldbeständen im Alpenraum. In: Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2000 – Villach/Österreich, Band 2, S. 5-16.
- AMMER, U., BURSCHEL, P. & FABIAN, P. et al. (1990): Zustand und Gefährdung des Bergwaldes – Ergebnisse eines Rundgesprächs, Kommission für Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften / Paul Parey, Hamburg, Berlin, Band 40, 123 S.
- AMMER, U., MÖBMER, E.-M. & SCHIRMER, R. (1985): Vitalität und Schutzbefähigung von Bergwaldbeständen im Hinblick auf das Waldsterben. In: Forstw. Centralblatt, Jg. 104, Heft 2, S. 122-136.

- ARONOFF, S. (1995): Geographic Information Systems: A management perspective. 294 S. (WDI Publications, Ottawa, Canada).
- BAATZ, M., SCHÄPE, A. (2000): Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, TH. & GRIESEBNER, G. [Hrsg]: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, S. 12 – 23.
- BAATZ, M., LESSING, R., ROTT, T. & SCHÄPE, A. (1999): Objektorientierte, fraktal-hierarchische Auswertung von Fernerkundungsdaten. In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 17 „Fernerkundung und Ökosystem-Analyse“, S.27-35.
- BÄHR, H.-P. & VÖGTLE, TH. [Hrsg.] (1998): Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. 3., völlig Neubearb. und erw. Aufl.- Wichmann Verlag Heidelberg 360 S.
- BALTSAVIAS, E. & HAHN, M. (1999): Integration of image analysis and GIS. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999, S. 12 – 19.
- BANKO, G., BURGER, H. & SCHNEIDER, W. (1998): Forstliche Anwendungsmöglichkeiten hochauflösender Satellitenbilddaten. In: VGI 3/98, S. 149 – 155.
- BAUER, A. (2000): Möglichkeiten zur Extensivierung der Forsteinrichtung im Hochgebirge durch Einsatz moderner Techniken der Luftbilddauswertung. Dissertation, Technischen Universität München, 188 S.
- BAUMGARTNER, A. (1999): Automatische Extraktion von Straßen aus Luftbildern. In: Albertz, J. & Dech, S. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), Bd. 7: Photogrammetrie und Fernerkundung – Globale und lokale Perspektiven. Vorträge. 18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF; 15. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. 14. – 16. Oktober 1998 TUM; S. 377 – 384.

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT [Hrsg.] (1990): Schneebewegungen und Lawinentätigkeit in zerfallenden Bergwäldern - Fallstudie für den Landkreis Oberallgäu.- Informationsberichte Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft. München; Nr. 3; 300 S.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT [Hrsg.] (1989): Schutz vor Wildbächen und Lawinen - Auswirkungen der Waldschäden- Informationsberichte Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft ; Nr.4, München, 236 S.
- BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT (BLVA) [Hrsg.] (1999): Informationen des Bayer. Landesvermessungsamtes zur Abgabe von Daten aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem ATKIS. München, Stand 01.02.1999.
- BAYERISCHE STAATSFORSTVERWALTUNG [Hrsg.] (1997): Handbuch zur Sanierung von Schutzwäldern im bayerischen Alpenraum. München, 233 S.
- BAYER. STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (STMELF) [Hrsg.] (1997): Bayerische Staatsforstverwaltung – Forstamt Oberammergau. Faltblatt, aktualisierter Nachdruck.
- BAYER. STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (STMELF) [Hrsg.] (1996): Forsteinrichtungs Dokumentation. Stand: 03.12.1996.
- BAYER. STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (STMELF) [Hrsg.] (1993): Der Schutzwald in den bayerischen Alpen: Funktionen – Zustand – Sanierung. Informationsbroschüre.
- BAYER. STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (STMELF) [Hrsg.] (1990): Richtlinien für die mittel- und langfristige Forstbetriebsplanung in der Bayerischen Staatsforstverwaltung (Forsteinrichtungsrichtlinien) - FER 1982/90
- BAYER. STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (STMELF) [Hrsg.] (1987): Der Wald im bayerischen Hochgebirge. 2. Aufl, 52 S.

- BERHE, D. (1992): Erfahrungen mit dem Einsatz von GIS und Fernerkundung zur Entwicklung einer kostengünstigen, ökologisch verträglichen Landnutzungsplanung, dargestellt am Beispiel Äthiopiens. In: Forstw. Centralblatt 111, S. 1 – 33.
- BILL, R. (1999a): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. 4., völlig Neubearb. und erw. Auflage. Herbert Wichmann Verlag Heidelberg. 454 S.
- BILL, R. (1999b): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. 2., völlig Neubearb. und erw. Auflage. Herbert Wichmann Verlag Heidelberg. 475 S.
- BINZENHÖFER, H. (1997): Problem der Einschätzung des Informationsverlustes bei der Kombination von Raster und Vektordaten. In: Karlsruher Geoinformatik-Report (KGR) 1/97, H.20, Jg. 11 S. 9 - 15 und <http://www.bio-geo.uni-karlsruhe.de/Buch/Aufsatz/HB/kgr-hb2.htm>
- BLASCHKE, R. (2000): Anforderungen der Bayerischen Staatsforstverwaltung. Teilbereich Nutzeranforderungen im Projektbericht: Inventur und Beobachtung der Schutzwälder in alpinen Regionen – Nutzungsmöglichkeiten hochauflösender Satellitendaten in der Bayer. Staatsforstverwaltung. Forschungsbericht der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft FKZ:50EE9610. (unveröffentl.)
- BLASCHKE, TH. (1997): Landschaftsanalyse und -bewertung mit GIS. Methodische Untersuchungen zu Ökosystemforschung und Naturschutz am Beispiel der bayerischen Salzachauen. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 243, Trier.
- BONHAM-CARTER, G. F. (1996): Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Elsevier Science, Kidlington, 398 S.

- BORG, E., BARUTH, B. & FICHELTMANN, B. (1999): Methoden und Verfahren der Fernerkundung für die Landschaftsplanung. In: Albertz, J. & Dech, S. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), Bd. 7: Photogrammetrie und Fernerkundung – Globale und lokale Perspektiven. Vorträge. 18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF; 15. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. 14. – 16. Oktober 1998 TUM; S. 325 – 332.
- Bos, E. S.(1990): Cartographic Symbol Design. Lecture-notes from the ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences) 85 S.
- BOTHE, H.-H. (1993): Fuzzy Logic: Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer-Verlag. 226 S.
- BRÜSCH, W. (1996): Das Snowmelt Runoff Model ETH (SRM-ETH) als universelles Simulations- und Prognosesystem von Schneeschmelz-Abflussmengen: Ein Beispiel der Integration von Satellitenfernerkundung und Geographischen Informationssystemen (GIS). Inaugural-Dissertation Universität Zurich. 166 S.
- BUCK, A., DE KOK, R., SCHNEIDER, TH., AMMER, U. (1999): Improvement of a forest GIS by integration of remote sensing data for the observation and inventory of "protective forests" in the Bavarian Alps. In: Procc. IUFRO Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring, June 1-3, Rogow, Poland.
- BUCK, A., DE KOK, R., SCHNEIDER, TH., AMMER, U. (1999): Integration von Fernerkundung und GIS zur Beobachtung und Inventur von Schutzwäldern in den Bayerischen Alpen. In: STROBL, J. & BLASCHKE, Th. [Hrsg.]: Angewandte geographische Informationsverarbeitung XI: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg ´99. S. 94 – 101.
- BUCK, A. (1996): Bestimmung des Bodenerosionspotentials mit Hilfe der Fernerkundung und digitaler Zusatzdaten im Landschaftsschutzgebiet der „Sächsischen Schweiz“. Dipl.-Arb., Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- BUHMANN, E. & WIESEL, J. (1998): GIS-Report `98: Software, Daten, Firmen. – Karlsruhe: Harzer Verlag, 204 S.

- BURROUGH, P.A. & McDONNELL, J. (1998): Principles of Geographical Information Systems. Oxford: Oxford University Press. 333 S.
- CASPARY, W. (1992): Qualitätsmerkmale von Geo-Daten. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Heft 7, 117 Jg.; S. 360 - 367.
- CASPARY, W. (1993): Qualitätsaspekte bei Geoinformationssystemen. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Heft 8/9, 118. Jg.; S. 444 – 450.
- CHENG, T. (1999): A Process-Oriented Data Model for Fuzzy Spatial Objects. Thesis Wageningen. ITC Publication Series, No. 68. 155 S.
- COULSON, R. N., LOVELADY, C. N., FLAMM, R. O., SPRADLING, S. L. & SAUNDERS, M. C. (1991): Intelligent Geographic Information Systems for natural resource management. In: TURNER, M. G. & GARDNER, R. H. (Hrsg.): Quantitative Methods in Landscape Ecology – The Analysis and Interpretation of landscape heterogeneity. S. 153 – 172.
- DAI, X. & KHORRAM, S. (1998): A hierarchical methodology framework for multisource data fusion in vegetation classification. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 18, S. 3697 – 3701.
- DAUME, S. (1999): Forstliche Expertensysteme: Assistenten oder Konkurrenten? In: AFZ/Der Wald, Heft 18, S. 950 – 952.
- DAVIS, F. W. & GOETZ, S. (1994): Modeling vegetation pattern using digital terrain data. In: Ripple, W. J. [Hrsg.]: The GIS Applications Book - Examples in Natural Resources: a compendium. Bethesda, M.D., S. 220 – 231.
- DEES, M., PELZ, D. R. & KOCH, B. (1998): Integrating satellite based forest mapping with Landsat TM in a concept of a large scale Forest Information System. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation Heft 4, S. 209 – 220.
- EGGENSBERGER, P. (1994): Die Pflanzengesellschaften der subalpinen und alpinen Stufe der Ammergauer Alpen und ihre Stellung in den Ostalpen. Berichte der Bayerischen Botanischen Gesellschaft zur Erforschung der heimischen Flora - Beiheft 8. München, 239 S.

- EHLERS, M. (1997): Rectification and Registration. In: STAR, J. L. & ESTES, J. E. & MCGWIRE, K. C. [Hrsg.]: Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing. Cambridge University Press. S. 13 - 26.
- ELLENBERG, H. (1986): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 4. Aufl., 989 S., Stuttgart.
- ELZAKKER V., C. & WORM V. D., J. (1990): Map purpose and use and their relation with map contents? Projection, Scale and accuracy. S. 1-11. In: Bos, E. S.(1990): Cartographic Symbol Design. Lecture-notes from the ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences) 85 S.
- ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE [Hrsg.] (1996): Using the ArcView Spatial Analyst: Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. 148 S.
- ESTES, J. E. & STAR, J. L. (1997): Research needed to improve remote sensing and GIS integration: conclusions and a look toward the future. In: STAR, J. L. & ESTES, J. E. & MCGWIRE, K. C. [Hrsg.]: Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing. Cambridge University Press. S. 176 - 203.
- EWALD, J. (1998): Subalpine Fichtenwälder in den Bayerischen Alpen: Ein standortkundlicher Überblick. In: AFZ/Der Wald, Heft 8, S. 406- 408.
- EWALD, J. (1997): Die Standortbindung der Waldgesellschaften der oberbayerischen Alpen – Ermittlung des Beitrages der Vegetationskunde zur Standortkartierung im Hochgebirge. Abschlußbericht zum Projekt B55 des Kuratoriums der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Lehrbereich Geobotanik der Forstwissenschaftlichen Fakultät der LMU München, unveröffentlicht, 138 S.
- FERRIER, G. & WADGE, G. (1997): An integrated GIS and knowledge-based system as an aid for the geological analysis of sedimentary basins. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 11, No. 3, 281-297.
- FLACK, J. (1995): Interpretation of Remotely Sensed Data Using Guided Techniques. Phd Thesis, School of Computer Science, Curtin University of Technology, Western Australia, 267 S.

- FOOTE, K. E. & HUEBNER, D. J. (1995): Error, Accuracy, and Precision. The Geographer's Craft Project, Department of Geography, University of Texas at Austin. In: <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/error/error.html>
- FOOTE, K. E. & HUEBNER, D. J. (1996): Managing Error. The Geographer's Craft Project, Department of Geography, University of Texas at Austin. In: http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/manerror/manerror_ftoc.html
- FORESMAN, T. W. & MILLETTE, T. L. (1997): Integration of remote sensing and GIS technologies for planning. In: STAR, J. L. & ESTES, J. E. & MCGWIRE, K. C. [Hrsg.]: Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing. Cambridge University Press. S. 134 - 157.
- FRANKLIN, J. & STEPHENSON, J. (1996): Integrating GIS and remote sensing to produce regional vegetation databases: attributes related to environmental modeling. In: Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html
- GLEMSER, M. (1999): Ein Ansatz zur Verarbeitung hybrider Daten und deren Genauigkeit. In: Albertz, J. & Dech, S. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), Bd. 7: Photogrammetrie und Fernerkundung – Globale und lokale Perspektiven. Vorträge 18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF; 15. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. 14. – 16. Oktober 1998 TUM; S. 309 – 316.
- GOODCHILD, M. F. (1994): Integrating GIS and remote sensing for vegetation analysis and modeling: methodological issues. In: Journal of Vegetation Science, Vol. 5, No. 5: 615-626.
- GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (1993) [Hrsg.]: Environmental Modeling with GIS. Oxford University Press, 488 S.

- GOODCHILD, M. F. & HUNTER, G. J. (1997): A simple positional accuracy measure for linear features. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol. 11 No. 3, S. 299 – 306 (aus Internet)
- GOODCHILD, M. F. & KEMP, K. K. [Hrsg.] (1990): NCGIA Core Curriculum in GIS. Unit 74: Knowledge based techniques. National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara CA.
- GREVE, K. (1996): Geo-Informationssystem oder Geographisches Informationssystem? - Die Bedeutung von GIS für die Geographie. In: Karlsruher Geoinformatik-Report 1/96. H.18, Jg.10 S.18-21 oder <http://www.bio-geo.uni-karlsruhe.de/Buch/Aufsatz/KG/kgr-kg0.htm>
- GROWE, S. (1999): Knowledge based interpretation of multisensor and multitemporal remote sensing images. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999, S. 130 – 138.
- GUDMANDSEN, P. [Hrsg.] (1998): Future Trends in Remote Sensing. Proceedings of the 17th EARSeL Symposium on Future Trends in Remote Sensing, Lyngby, Denmark, 17-19 June. 477 S.
- HAACK, B. (1998): Qualität von Geodaten – eine Betrachtung am Beispiel des digitalen Höhenmodells. In: Strobl, J. & Dollinger, F. [Hrsg.]: Angewandte geographische Informationsverarbeitung: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg '98. S. 123 – 134.
- HAUENSTEIN, P. (1993): Geographische Informationssysteme – Ein Überblick für Praktiker. In: Schweiz. Z. Forstwes., 144, 9: 703 – 721.
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann Verlag, Heidelberg, 676 S.
- HINTON, J. C. (1999): Image classification and analysis using integrated GIS. In: ATKINSON, P. M. & TATE, N. J. [Hrsg.]: Advances in Remote Sensing and GIS Analysis. S. 207 – 218.

- HÖHNE, A. (1996): Entwicklung und Aufbau des geographischen Informationssystems der LFV Baden-Württemberg (FOGIS).- In: AFZ/Der Wald, Heft 10, S. 535 - 538.
- HOFMANN, W. (1986): Wieder einmal: Das Digitale Gelände/Höhenmodell. In: Bildmessung und Luftbildwesen (BuL), Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 1, Jg. 54, S. 31f.
- HUNTER, G. J. (1998): Managing Uncertainty in GIS. In: NCGIA Core Curriculum in Geographic Information Science, <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u187/u1871.html>
- HUTCHINSON, C. F. (1982): Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 1, S. 123 – 130.
- IRMAY, M. (1993): Anwendung von Geographischen Informationssystemen (GIS) im Forstwesen: Aktivitäten und Ausblick. In: Schweiz. Z. Forstwes., 144 (1993) 9: 733-744.
- JACOBS, H. & STIES, M. (1995): Multitemporale Landnutzungsklassifizierung und Analyse der Nutzungsänderung im Oberrheingraben.- In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF), Heft 4, S. 160 – 173.
- JANSSEN, L. (1994): Methodology for updating terrain object data from remote sensing data: The application of Landsat TM data with respect to agricultural fields. Thesis Wageningen. 173 S.
- JANSSEN, L. L. F.; JAARMA, M. N. & VAN DER LINDEN, E. T. M. (1990): Integrating Topographic Data with Remote Sensing for Land-Cover Classification. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56, No. 11, S. 1503-1506.
- JIANG, B. (1996): Fuzzy Overlay Analysis and Visualization in Geographic Information Systems. Dissertation vorgelegt Universiteit Utrecht en ITC. 167 S.
- JIANG, H. & EASTMAN, J. R. (2000): Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol. 14 No. 2, S. 173 – 184

- JOOS, G., BALTZER, U. & KULLMANN, K.-H. (1997): Qualitätsmanagement beim Aufbau einer topographischen Grunddatenbank am Beispiel von ATKIS in Hessen. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Heft 4, 122 Jg.; S. 149 – 159.
- JÜRGENS, C. & FANDER, M. (1992): Soil erosion assesment and simulation by means of satellite remote sensing and ancillary digital data.- In: Geo-Informations-Systeme (GIS), Jg. 5, Heft 4, S. 27 – 31.
- KARTIKEYAN, B., SARKAR, A. & MAJUMDER, K. L. (1998): A segmentation approach to classification of remote sensing imagery. In: International Journal of Remote Sensing Volume 19 Number 9 June 1998, S. 1695 – 1709.
- KENNEWEG, H., FÖRSTER, B. & RUNKEL, M. (1991): Diagnose und Erfassung von Waldschäden auf der Basis von Spektralsignaturen. Abschlußbericht (Teil B6) im Rahmen des vom BMFT geförderten Verbundprojektes: „Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung“, TU-Berlin.
- KIIVERI, H. T. (1997): Assessing, representing and transmitting positional uncertainty in maps. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol. 11 No. 1, S. 33 – 52.
- KOCH, B. & FRITZ, R. (1998): Satelliten-Fernerkundung im Rahmen forstlicher Kartographie. In: AFZ/Der Wald, Heft 4, S. 164 – 166.
- KOCH, B., FÖRSTER, B. & SCHNEIDER, TH. (1994): Fernerkundung bei forstlichen und ökologisch orientierten Nutzungsplanungen. -In: AFZ, Heft 4, S. 160 - 164.
- KOLLMUß, H. (1999): ATKIS® - Fortführung. In: BAYER. LANDESVERMESSUNGSAMT [Hrsg.]: 13. Informationsveranstaltung der Bayer. Vermessungsverwaltung am Mittwoch, dem 21. April 1999 in der Technischen Universität München. München, 88 S.
- KUHNERT, CH. (1967a): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 8432, Oberammergau. Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 128 S.
- KUHNERT, CH. (1967b): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 8431, Linderhof. Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 99 S.

- KUNZ, D. (1999): Investigation of synergy effects between satellite imagery and digital topographic databases by using integrated knowledge processing. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999, S. 144 – 151.
- KURBEL, K. (1989): Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen. Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. 212 S.
- LAATSCH, W. & GROTTENTHALER, W. (1973): Labilität und Sanierung der Hänge in der Alpenregion des Landkreises Miesbach , 57 S. Herausgegeben vom Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- LAGACHERIE, PH. & HOLMES, S. (1997): Addressing geographical data errors in a classification tree for soil unit prediction. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol.11 No. 2, S. 183 –198.
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (2000): Remote Sensing and image interpretation. 4th ed. New York, Chichester, 724 S.
- LINDER, W. (1999): Geo-Informationssysteme: Ein Studien- und Arbeitsbuch. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 170 S.
- LOTHER, G. (1999): Qualitätssicherung für GIS-Daten am Beispiel des Geoinformationssystems der Bayerischen Staatsforstverwaltung. In: ZfV 9, S. 281 - 289.
- LOTHER, G. (1996): Kartographische Aspekte bei der Präsentation von GIS-Daten am Beispiel von Forstkarten. Unterlagen zum Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TUM, vom 25. – 28. März 1996, 19 S.
- LOTHER, G. & NEFT, R. (1994): Das forstliche Geo-Informationssystem (FORST-GIS) der Bayerischen Staatsforstverwaltung. In: Mitteilungsblatt DVW-Bayern 46, S. 309 – 325.

- MANDL, P. (1994): Räumliche Entscheidungsunterstützung mit GIS: Nutzwertanalyse und Fuzzy-Entscheidungsmodellierung. In: Salzburger Geographische Materialien H. 21, S. 463-473.
- MANDL, P. (1997): Fuzzy-System-Umgebungen als regelgesteuerte Simulationsmaschinen für Geographische Informationssysteme. <http://www.uni-klu.ac.at/groups/geogislab/gismodsim>
- MAYER, H. & OTT, E. (1991): Gebirgswaldbau - Schutzwaldpflege: Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz. 2., vollst. neu bearb. Aufl., Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 587 S.
- MCCORMICK, N. (1997): Preprocessing and spatial analysis of satellite imagery using the SILVICS software. Environmental Mapping and Modelling Unit, Space Applications Institute, Joint Research Centre, Ispra, Italy.
- MCGWIRE, K. & GOODCHILD, M. (1997): Accuracy. In: STAR, J. L. & ESTES, J. E. & MCGWIRE, K. C. [Hrsg.]: Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing. Cambridge University Press. S. 110 - 133.
- MCNOLEG, O. (1998): Guide to the successful use of Geographical Information Systems (Ten ways to say nothing with GIS). In: International Journal of Geographical Information Science, Vol. 12, No. 5, S. 429 – 430.
- MÖBMER, E.-M. (1985): Einflußfaktoren für die Blaikenerosion auf beweideten und aufgelassenen Almflächen im kalkalpinen Bereich der Landkreise Miesbach und Rosenheim. - Forstliche Forschungsberichte München Nr. 63, 137 S.
- OBERDORFER, E. (1983): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. 5., überarb. u. erg. Aufl.- Stuttgart, Ulmer Verlag, 1051 S.
- ONGSOMWANG, S. (1993): Forest Inventory, Remote Sensing and GIS for Forest Management in Thailand. Berliner geographische Studien, Bd. 38; Hrsg.: Hofmeister, B., Voss, F., Berlin, 272 S.

- ORTIZ, M. J., FORMAGGIO, A. R. & EPIPHANIO, J. C. N. (1997): Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS, and historical database. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 1, S. 95 – 105.
- OTT, E., FREHNER, M., FREY, H.-U. & LÜSCHER, P. (1997): Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Paul Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien, 287 S.
- OZENDA, P. (1988): Die Vegetation der Alpen im europäischen Gebirgsraum. 353 S., Stuttgart, New York.
- PETERSON, D. L. & RUNNING, S. W. (1989): Applications in forest science and management. In: ASRAR, G. [Hrsg.]: Theory and applications of optical remote sensing. Wiley Series in Remote Sensing. S. 429 - 473.
- PEYKE, G. (1996): Objektorientierte Geographische Informationssysteme - GIS, Internet und Geographie in Ihrer Wechselbeziehung. In: Karlsruher Geoinformatik-Report 1/96. H.18, Jg. 10, S. 2-4.
- PILESJÖ, P. (1992): GIS and Remote Sensing for Soil Erosion Studies in Semi-Arid Environments. Estimation of Soil Erosion Parameters at Different Scales. Lund, Sweden, 204 S.
- RHEIN, U. (1999): An automated approach for training data selection within an integrated GIS and Remote Sensing environment for monitoring temporal changes. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999, S. 154 – 159.
- REUSING, M., SCHNEIDER, TH. & AMMER, U. (2000): Modelling soil loss rates in the Ethiopian Highlands by integration of high resolution MOMS-02/D2-stereo-data in a GIS. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 21, No. 9, S. 1885 – 1896.
- RICHARDS, J. A. & JIA, X. (1999): Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Third Edition. Springer Verlag. 363 S.

- RICHTER, R. (1997): Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 5, S. 1099 – 1111.
- RIMSCHA, M. (1996): "Lügen" mit GIS - GIS als Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung. In: Karlsruher Geoinformatik-Report 2/96. H.19, Jg. 10, S. 2-4.
- ROTTMANN, M. & SCHREYER, G. (1991): Ein forstliches Geo-Informationssystem für die Bayerische Staatsforstverwaltung. In: AFZ, Heft 14, S. 732 – 736.
- SHAFER, G. (1976): A mathematical theory of evidence. Princeton Univ. Press, New Jersey.
- SCHERRER, H. U. (1993): Projekt zur flächenhaften Erfassung und Auswertung von Sturmschäden. - In: AFZ, Heft 14, S. 712 - 714.
- SCHLÜTER, W. & HOLUBA, K.-H. (1996): Kartenfertigung mit FOGIS bei den Forstdirektionen. - In: AFZ/Der Wald, Heft 10, S. 544- 546.
- SCHMITT, U. & SCHARDT, M. (1998): Large scale forest classification for topographic models. In: GUDMANDSEN, P. [Hrsg.] (1998): Future Trends in Remote Sensing. Proceedings of the 17th EARSeL Symposium on Future Trends in Remote Sensing, Lyngby, Denmark, 17-19 June. S. 293 – 296.
- SCHNEIDER, TH., DE KOK, R., BUCK, A. & MANAKOS, I. (2000): Objektorientierte Bildanalyse – Paradigmenwechsel in der thematischen Auswertung von Erdbeobachtungsdaten? In: Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz (Hrsg.): Landnutzungsplanung und Naturschutz: Aktuelle Forschungsberichte. Festschrift zur Emeritierung von Prof. Dr. Ulrich Ammer. S. 234 – 258.
- SCHNEIDER, TH., DE KOK, R., BUCK, A., AMMER, U. (2000): Monitoring des Schutzwaldes im Alpenraum – bringt der objektorientierte Ansatz den Durchbruch? In: Proceedings of the III International Symposium: Application of Remote Sensing in Forestry, Zvolen, Faculty of Forestry, Technical University, September 12-14, S. 73-82.
- SCHOLLES, F. (1999): Informationssysteme in der Raum und Umweltplanung. Institut für Landesplanung und Raumforschung, Universität Hannover. HTML-Dokument: http://www.laum.uni-hannover.de/ilr/lehre/lsv/lsv_XPS.htm

- SCHOWENGERDT, R. A. (1997): Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 2nd ed. Academic Press, 522 S.
- SCHRETZENMAYR, M. (1990): Heimische Bäume und Sträucher Mitteleuropas. Stuttgart, Enke Verlag, 223 S.
- SCHWARZ-V. RAUMER, H.-G. (1997): GIS-gestützte mehrkriterielle Bewertungsverfahren in der Stadtentwicklungsplanung. In: GIS (Geo-Informationssysteme: Zeitschrift für raumbezogene Information und Entscheidungen), Jg.10, Heft 6, S. 13 – 19.
- SEGL, K. (1998): Klassifizierung mit neuronalen Netzen. In: BÄHR, H.-P. & VÖGTLE, TH. [Hrsg.]: Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. 3., völlig Neubearb. und erw. Aufl.- Wichmann Verlag Heidelberg 360 S.
- SEIBERT, P. (1993): Der Föhn in den Alpen: Ein aktueller Überblick. In: Geographische Rundschau, Jg. 45, H. 2, S. 116 – 123.
- SEPEHRY, A., EJTEHADI, H. & HORVÁTH, F. (1998): Classification of main forest types integrating GIS and TM imagery by applying supplementary data: A case study in Vetyem, SW-Hungary. In: GUDMANDSEN, P. [Hrsg.]: Future Trends in Remote Sensing. Proceedings of the 17th EARSeI Symposium on future trends in remote sensing Lyngby/Denmark/17-19 June 1997. S. 297-304.
- SESTER, M. (2000): Knowledge acquisition for the automatic interpretation of spatial data. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol.14, No. 1, S. 1 – 24.
- SIEDE, W. (1991): Kartierung und Auswertung von Sturmschäden- Einsatz eines forstlichen Informationssystems.- In: AFZ, Heft 3, S. 126 - 129.
- SKIDMORE, A. K. (1989): An expert system classifies eucalypt forest types using Thematic Mapper data and a digital terrain model. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 10, S. 1449 – 1464.

- SKIDMORE, A. K., RYAN, PH. J., DAWES, W., SHORT, D. & O'LOUGHLIN, E. (1991): Use of an expert system to map forest soils from a geographical information system. In: International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 5, No. 4, S. 431-445.
- SMALTSCHINSKI, TH., BECKER, G. & HENTSCHEL, S. (1999): Aufbau und Nutzung eines GIS-gestützten Wegeinformationssystems in Thüringen. In: AFZ/Der Wald, Heft 3, S.115-116.
- SPORS, H.-J. (1996): Aufbau und Anwendungsmöglichkeiten eines raumbezogenen Forstlichen Informationssystems. Hrsg. Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung NRW (1996), LÖBF-Schriftenreihe, Band 7.
- SRINIVASAN, A. & RICHARDS, J. A. (1990): Knowledge-based techniques for multi-source classification. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 11, No. 3, S. 505 – 525.
- STANEK, H.; SMITH, N.; GIORDANO, A. (1995): Modellierung und Normierung von Datenqualität in GIS. In: Tagungsband AGIT 1995 vom 07.- 09.07.95 Salzburg.
- STAR, J. L. & ESTES, J. E. & MCGWIRE, K. C. [Hrsg.] (1997): Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing. Cambridge University Press. 225 S.
- STEFANAKIS, E., VAZIRGIANNIS, M. & SELLIS, T. (1999): Incorporating fuzzy set methodologies in a DBMS repository for the application domain GIS. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol.13, No.7, S. 657 – 675.
- STOLZ, R. (1998): Die Verwendung der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Ein methodischer Ansatz zur Verbesserung von Landnutzungsklassifikationen in mesoskaligen heterogenen Räumen, dargestellt am Einzugsgebiet der Ammer. Münchner Geographischer Abhandlungen, Reihe B, Bd. 26, 204 S.
- STRAHLER, A. H. (1981): Stratification of natural vegetation for forest and rangeland inventory using Landsat digital imagery and collateral data. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 2, No. 1, S. 15 - 41.

- STREIT, U. (1999): Skript zur Vorlesung: Einführung in die Geo-Informatik. Institut für Geoinformatik, Universität Münster (HTML-Dokument). <http://castafiore.uni-muenster.de/vorlesungen/geoinformatik>
- TEUFFEL Frhr. v., K. & KREBS, M. (1996): Geoinformationssysteme als Instrumente der forstlichen Betriebsführung. In: AFZ/Der Wald, Heft 10, S. 532-535.
- TRÄNKNER, H. & SIEDE, W. (1989): Das Forstliche Informationssystem FIS- Konzept und Aufbau. In: AFZ, Heft 40-41, S. 1086- 1089.
- TROTTER, C. M. (1991): Remotely-sensed data as an information source for geographical information systems in natural resource management: a review. In: International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 15, No. 2, S. 225 – 239.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY USGS [Hrsg.] (1999): United States National Map Accuracy Standards. National Mapping Program: Standards. In: URL: <http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/nmas647.html>
- United States Geological Survey USGS [Hrsg.] (1996): National Mapping Program – Technical Instructions. Standards for Digital Line Graphs. Part 2: Specifications. In: <http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/dlgstds.html>
- URBANSKI, J. A. (1999): The use of fuzzy sets in the evaluation of the environment of coastal waters. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol.13, No. 7, S. 723 – 730.
- VOSER, S. A. (1999): Konzeptdesign für die räumliche hybride Analyse. In: Albertz, J. & Dech, S. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), Bd. 7: Photogrammetrie und Fernerkundung – Globale und lokale Perspektiven. Vorträge 18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF; 15. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. 14. – 16. Oktober 1998 TUM; S. 301 – 308.
- WALD, L. (1999): Definitions and terms of reference in data fusion. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999, S. 2 – 6.

- WHARTON, S. W. (1989): Knowledge-based spectral classification of remotely sensed image data. In: ASRAR, G. [Hrsg.]: Theory and applications of optical remote sensing. Wiley Series in Remote Sensing. S. 548 – 577.
- WILLIAMS, J. (1995): Geographic Information from Space – Processing and Applications of Geocoded Satellite Images. Wiley-Praxis Series in Remote Sensing, Chichester, 210 S.
- WOODCOCK, C. E. & GOPAL, S. (2000): Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation. In: International Journal of Geographical Information Science, Vol. 14, No. 2, S. 153 –172.
- YE, R. (1995): Waldsimulation auf der Basis automatischer Luftbildmessung und unter Kontrolle von GIS. Mitteilungen der Abteilung für Forstliche Biometrie 95-1. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau. 110 S.
- ZADEH, L. A. (1965): Fuzzy Sets. In: Information and Control 8, S. 338 – 353.
- ZAUNSEDER, S. (1996): Objektorientierte Konzepte - ihre Umsetzung und ihre Vorteile. In: Karlsruher Geoinformatik-Report 1/96. H.18, Jg. 10 s. 26-28 und <http://www.bio-geo.uni-karlsruhe.de/Buch/Aufsatz/SZ/kgr-sz0.htm>
- ZHANG, J. & FOODY, G. M. (1998): A fuzzy classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery. In: International Journal of Remote Sensing Volume 19 Number 14, S. 2721 – 2738.
- ZHOU, M. (2000): Erosion Control and Reforestation in Loess Plateau in Shaanxi Province: A case study applying object-oriented image analysis approach and Landsat 7 ETM+data. Master's Thesis, Technical University of Munich.
- ZHU, X., HEALEY, R.G. & ASPINALL, R.J. (1998): A knowledge-based system approach to design of spatial decision support systems for environmental management. In: Environmental Management Vol. 22 , No. 1, S. 35-48.

LEBENS LAUF

ALLGEMEINES

Name: Alfred Buck
Geburtsdatum: 20. Juni 1969
Geburtsort: Managua (Nicaragua)
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig

AUSBILDUNG

Schulischer Werdegang:

März 1976 - Nov. 1984: Grundschule (Primaria) und Teil der Sekundarstufe bis zur 9. Klasse im "Colegio Alemán-Nicaragüense" (Managua)
Feb. 1985 - Dez. 1987: Besuch der "Humboldt-Schule" in San José, Costa Rica
Abschluss: Dez. 1986: Bachillerato Costarricense
Dez. 1987: Allgemeine deutsche Hochschulreife

Studium:

ab Okt. 1988: Studium der Geographie (Dipl.) an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen mit den Nebenfächern Geologie und Bodenkunde
März 1992 - März 1993: Auslandsstudium an der "Universidade Federal do Rio de Janeiro" (Brasilien), im Rahmen des IAS-Programms (DAAD - Stipendium)
ab März 1993: Fortführung des Geographie-Studiums an der Universität Tübingen
ab August 1995: Bearbeitung der Diplomarbeit als ersten Bestandteil der Diplomprüfung. Thema: "Bestimmung des Bodenerosionspotentials mit Hilfe von Fernerkundung und digitalen Zusatzdaten im Landschaftsschutzgebiet der Sächsischen Schweiz"
Dezember 1996: Studienabschluß, Diplom-Geograph
Juni 1997 – Jan. 2001: Promotionsstudium am Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz, TU München

Berufstätigkeit:

Juni 1997 – Dez. 2000: wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz, TU München. Durchführung des Projektes: "Inventur und Beobachtung der Schutzwälder in alpinen Regionen - Nutzungsmöglichkeiten von MOMS-02/P-Daten in der Bayer. Staatsforstverwaltung"