

LWF

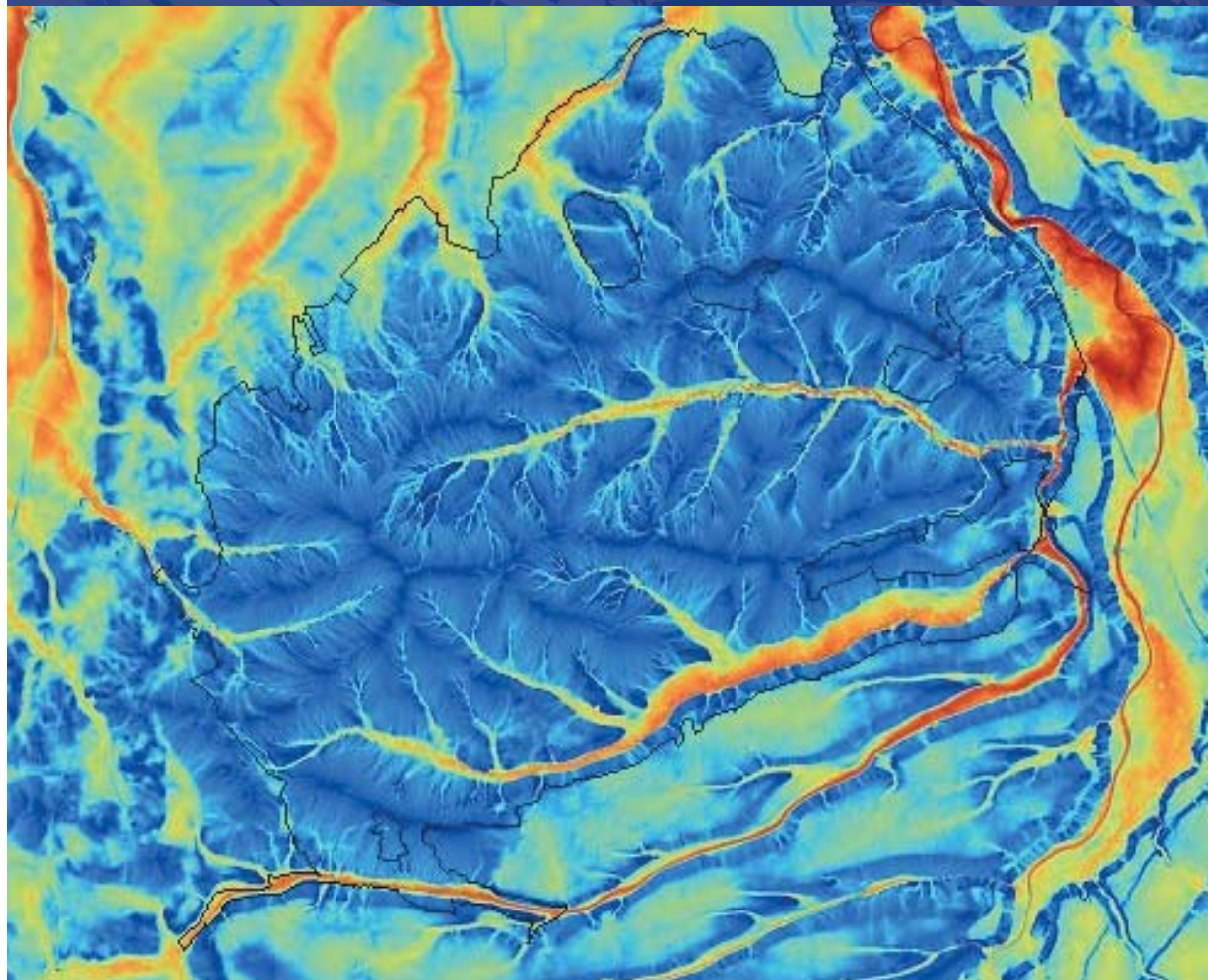
WISSEN

51

Erfassung von Wald-Lebensraumtypen in FFH-Gebieten

Fernerkundung am Taubenberg und im Angelberger Forst

BAYERISCHE
FORSTVERWALTUNG



Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Erfassung von Wald- Lebensraumtypen in FFH-Gebieten

Fernerkundung am Taubenberg
und im Angelberger Forst

Impressum

Titelseite: Dargestellt ist der Bodenfeuchteindex für das Gebiet um den Taubenberg. Das Rasterbild wurde mit dem OpenSource-GIS SAGA erstellt. Im dimensionslosen Wert des Indexes ist die Größe des Einzugsgebiets und die Steilheit des Geländes berücksichtigt. Dadurch wird die Wassermenge und die Verweildauer des Wassers erfasst. Je größer das Einzugsgebiet und je flacher der engere Bereich eines Punktes im Gelände ist, desto höher ist der Indexwert (rot), je kleiner das Einzugsgebiet und je steiler die nähere Umgebung ist, desto niedriger ist der Indexwert (blau).

ISSN 0945 – 8131

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, sowie fotomechanische und elektronische Wiedergabe nur mit Genehmigung des Herausgebers. Insbesondere ist eine Einspeicherung oder Verarbeitung der auch in elektronischer Form vertriebenen Broschüre in Datensystemen ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig.

Herausgeber und Bezugsadresse:	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) Am Hochanger 11 85354 Freising Tel.: +49 (0) 81 61/71-4881 Fax: +49 (0) 81 61/71-4971
E-mail:	poststelle@fo-lwf.bayern.de www.lwf.bayern.de
Verantwortlich:	Olaf Schmidt, Leiter der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Verfasser:	Birgit Kleinschmit, Helge Walentowski, Michael Förster, Michael Fischer, Rudolf Seitz, Paul Kraft, Angela Schlutow, Michael Bock
Redaktion:	Joachim Hamberger, Alexandra Wauer
Layout:	design@gerd-rothe.de
Druck:	Lerchl Druck, Freising
Auflage:	1.000

© Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Januar 2006

Abstract

Practical experiences on the use of remote sensing for the detection of forest habitat types in Natura 2000 areas

A case study from the Bavarian forests “Angelberger Forst” and “Taubenberg”

Keywords: NATURA 2000, forest habitat types, remote sensing, GIS-modelling

In the context of the EC Habitats Directive (Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora), nature conservation authorities face a growing demand for effective and competitive methods for determination, mapping, assessment, monitoring and reporting of conservation status of habitats or species 'of Community interest'.

Therefore high resolution satellite based remote sensing data (ASTER and SPOT5) and true colour-stereoscopic aerial photographs were acquired, analysed, and interpreted in order to determine actual forest habitat types which are listed on Annex I of the EC Habitats Directive. The approach was carried out at two Sites of Community Interest, “Angelberger Forst” (SCI no. 7829-301) and “Taubenberg” (SCI no. 8136-302), situated in the pre-alpine area in Bavaria. This procedure was chosen to identify the different benefits of these methods and to find a ranked application from the coarse scale (biogeographic level) to a fine scale (single habitat types).

Additionally, the presented research study compared three GIS-based modelling approaches (rule-based method with applied Bavarian woodland types, multivariate technique of cluster analysis, and a fuzzy logic approach) for the purpose of detecting potential habitat types. The results of these modeling approaches were combined with the high resolution satellite data to determine actual forest habitat types, which were used as support for the stereoscopic interpretation of the aerial photographs.

The outcomes of the combined modelling and satellite based classification and the aerial photograph interpretation were subsequently compared to the terrestrial mapped habitat areas within the SCI's. The results show that these techniques are a valuable support in mapping and monitoring NATURA2000 forest habitats within and outside of the declared boundaries of NATURA2000 sites.

However, there are some points which should be discussed in the context of NATURA2000. It can be stated that mapping forest habitat types can only be successful with colour infrared imagery (aerial photographs or satellite based). Moreover, a good GIS-data basis as ancillary information for the interpretation process is crucial. Because a forestry site map is not available area-wide for all NATURA 2000 sites, the existence of a high resolution Digital Elevation Model and of very detailed soil maps is of a high importance for all of the methods described.

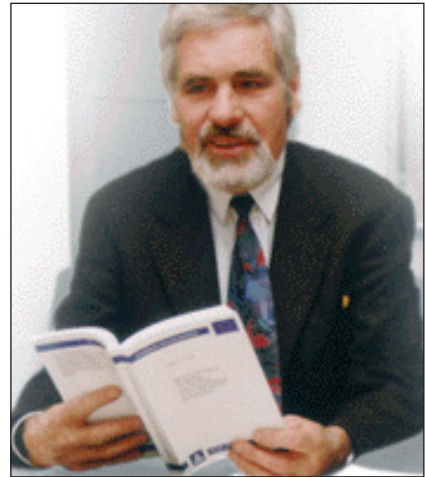
Another promising way of improving the results is the use of very high resolution remote sensing data. Therefore, QuickBird satellite data were acquired during 2004 and will be analysed for the detection of habitat types in the near future.

Inhaltsübersicht

Impressum	2
Abstract	3
Inhaltsübersicht	4
Vorwort	5
1. Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen	6
1.1 Motivation und Zielstellung	6
1.2 Testgebiete	7
1.3 Inhaltliche Projektkonzeption	8
1.3.1 Potenzial-Modellierung auf Basis von verschiedenen Ansätzen	8
1.3.2 Kartierung des Ist-Zustandes mit verschiedenen Fernerkundungstechnologien	9
2. GIS-Modellierung der potenziellen FFH-Wald-Lebensraumtypen	10
2.1 Verwendete Standards	10
2.2 Modellierung mit Hilfe des Modells BERN unter Einbeziehung von Fuzzy Logic	11
2.2.1 Modellansatz	11
2.2.2 Grundlagendaten	12
2.2.3 Modellanwendung und Ergebnisse	13
2.3 Modellierung mit Hilfe der Clusterbildung von Reliefparametern	14
2.3.1 Reliefanalyse	15
2.3.2 Clusteranalyse	16
2.3.3 Modellanwendung und Ergebnisse	16
2.4 Modellierung mit regelbasiertem Expertenwissen	18
2.4.1 Erarbeitung des Expertenwissens	18
2.4.2 Schema der Modellierung	18
2.4.3 Modellanwendung und Ergebnisse	19
2.5 Nutzen-Kosten-Analyse der geprüften Methoden	19
3. Potenziale der mittel- und hochauflösenden Fernerkundung	21
3.1 Pre-Processing	22
3.2 Klassifikationsmethodik	22
3.3 Auswertungsergebnisse der Sensoren ASTER und SPOT5	23
3.4 Kombination der Ergebnisse der Modellierung und der Fernerkundung	24
4. Potenziale der Luftbildinterpretation	26
4.1 Verwendete Daten	26
4.2 Methodik	26
4.3 Ergebnisse aus dem Testgebiet „Taubenberg“	27
4.4 Ergebnisse aus dem Testgebiet „Angelberger Forst“	29
4.5 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	30
5. Diskussion der Projektergebnisse	33
6. Zusammenfassung	35
7. Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick	36
8. Literatur	37

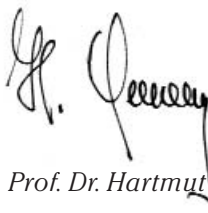
Vorwort

Mit der „FFH-Richtlinie“ (Directive 92/43/EWG) und dem Schutzgebietsnetz NATURA 2000 hat sich der Rat der Europäischen Gemeinschaften ebenso fachlich anspruchsvolle wie finanziell aufwendige Ziele gesteckt. Für Flächen in der Größenordnung von 10% der Gesamtfläche Europas soll danach ein Verschlechterungsverbot im Sinne der „Berner Konvention“ des Europarats von 1979 durchgesetzt und praktiziert werden. Damit die darin geforderte „Erhaltung der europäischen wildlebenden Pflanzen und Tiere und ihrer natürlichen Lebensräume“ nicht im Deklamatorischen stecken bleibt, wurde europaweit ein Kontroll- und Berichtssystem etabliert, das in sechsjährigem Turnus detaillierte Berichte über mögliche Veränderungen bezüglich des „günstigen Erhaltungszustandes“ im Sinne der Detailziele für die einzelnen Schutzgebiete einfordert.



Dass eine so gewaltige, in Teilen neuartige und dabei hochspezielle Aufgabe so rationell wie möglich und unter Einsatz aller verfügbaren technologischen Hilfen durchgeführt werden muss, versteht sich von selbst. Die neueste Generation höchstauflösender Fernerkundungssatelliten (z.B. QuickBird, IKONOS) verspricht Daten zu liefern, die wesentliche Ansprüche des geforderten Monitoring erfüllen können. Da sowohl Aufgabenstellung als auch zum Einsatz zu bringende Daten neuartig sind, empfiehlt es sich, die verfügbaren Auswertungsverfahren für die gegenwärtig aktuellen Ziele und mit den besten verfügbaren Daten in Pilotprojekten zum Einsatz zu bringen, um Verfahrensoptimierungen zu erreichen, aber auch, um mögliche Schwierigkeiten und Engpässe besser einschätzen zu lernen, bevor großflächig operationell damit gearbeitet wird. Solche Tests wurden anderenorts für Offenlandbiotope in Angriff genommen, fehlten aber bisher noch weitgehend für Wälder, obwohl sehr viele FFH-Gebiete der kontinentalen biographischen Region Waldgebiete umfassen.

Die hier vorgelegte Studie trägt dazu bei, diese Lücke zu schließen. Als Wissenschaftler, der Daten und/oder Verfahren einem Eignungstest unterzieht, wünscht man sich einerseits gute und verlässliche Vergleichsdaten und Verfahrensalternativen zu Validierungszwecken; andererseits sollten die Testdaten dem angestrebten Standard möglichst gut entsprechen. Die zweitgenannte Forderung war für die hier dokumentierte Untersuchung insofern nicht ganz erfüllt, als die bestellten QuickBird-Daten nicht rechtzeitig für die – termingebundenen – Arbeiten verfügbar waren, so dass mit Ersatzdaten gearbeitet werden musste. Wenn trotzdem eindrucksvolle positive Ergebnisse erzielt wurden, so spricht das erst recht für die vorgeschlagenen Verfahren und für die eigentlich vorgesehenen – besseren – Daten. Es ist auf jeden Fall sinnvoll, die Untersuchung mit dem „richtigen“ Datensatz auch noch zu Ende zu führen. Die beim vorgelegten Praxistest noch nicht überwundene Schwierigkeit der Fernerkundung mit optischen Sensoren - die Wetterabhängigkeit der Aufnahmen, die strikt termingebundenes Arbeiten erschwert - wird sich mit der neuen höchstauflösenden Sensorgeneration (u. a. WorldView, OrbView 5 oder Pleiades) und dem Vormarsch der digitalen Luftbildkameras (u. a. DMC und ADS) durch häufiger Überflüge und bessere Datenverfügbarkeit erheblich reduzieren. Es kommt nun darauf an, die fälligen nächsten Schritte zu einem gesamteuropäischen Monitoringsystem in diese Richtung zu tun.



Prof. Dr. Hartmut Kenneweg
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Landschaftsplanung

1 Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen

Für die Wald-Lebensraumtypen des Anhangs I und die Wald-Arten des Anhangs II der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (kurz: „FFH-RL“; 92/43/EWG) ist in Bayern eine beschleunigte Erfassung der Schutzobjekte in den FFH-Gebieten geplant („Kartierinitiative“). Der LWF obliegt dabei die fachliche Steuerung. In diesem Gesamtkontext wurden mehrere unterstützende Projekte und Teilinitiativen gestartet:

- ◆ Der Praxistest Fernerkundung (Angelberger Forst und Taubenberg – Laufzeit von Oktober 2004-Juli 2005; FÖRSTER et al. 2005);
- ◆ das Informationssystem Hochgebirgsstandorte (Bayer. LWF; FH Weihenstephan, ehem. FOD Oberbayern-Schwaben; Projektbeginn: März 2004; Projektabschluss: September 2006; BINNER et al. 2005);
- ◆ die Pilotstudie Schachen/Reintal (ehem. Forstdirektion Oberbayern-Schwaben; Projektbeginn: September 2004; Projektabschluss: Juni 2005; FISCHER et al. 2005);
- ◆ mögliche web-GIS-Lösungen für NATURA2000 (Bayer. LWF; Projektbeginn: Juli 2004; Projektabschluss: Oktober 2005; CANALEJO ALONSO 2004).

Die verschiedenen Initiativen bauen auf den bisher erarbeiteten Grundlagen der Länder, des Bundes sowie der EU auf (BURKHARDT et al. 2004; European Commission 2003; European Commission 2005) und sollen diese optimal unterstützen. Die Gesamt-Aufgabenstellung beinhaltet, zunächst die Kartierung (und später die Bewertung) der Wald-Lebensraumtypen in den FFH-Gebieten möglichst effizient zu gestalten und günstige Voraussetzungen für die kommenden Monitoring-Aufgaben zu erreichen. Eine besonders zu beachtende Herausforderung bei allen Projekten stellen Gebiete ohne, mit nicht verfügbarer oder mit nur grober Information aus forstlicher Standortkartierung und Forsteinrichtung (z. B. Nicht-Staatswald und Alpenraum) dar.

Um auf Basis fundierter wissenschaftstheoretischer Methoden eine praxistaugliche Anwendung zu entwickeln, arbeiteten Forst- und Umweltverwaltung, Hochschulen, NATURA 2000-Kartierern und Planungsbüros eng zusammen. Ganz bewusst wurden für den „Praxistest Fernerkundung“, über den im folgenden berichtet wird, Partner aus mehreren Bundesländern hinzugezogen, da alle relevanten

Daten und Erhebungsmodalitäten auf nationaler Ebene abzustimmen sind. Der erste Nationale Bericht (Durchführungsbericht gemäß Art. 17 der FFH-RL) wird im Jahr 2007 fällig.

1.1 Motivation und Zielstellung

Die Motivation für den Praxistest ergab sich aus zwei Hauptgründen:

- ◆ Erstens soll die Kartierung der Wald-Lebensraumtypen (LRT) in den FFH-Gebieten landesweit möglichst rasch durchgeführt werden (s.o.). Dabei muss ein einheitlicher, solider Qualitätsstandard gewährleistet sein (**objektiv**). Der Einsatz von GIS und Fernerkundungstechnologie soll den Kartieraufwand im Gelände reduzieren, indem die Aussagekraft der Kartiergrundlagen (vor allem die „vorläufige Lebensraumtypenkarte“) abgesichert bzw. verbessert wird (**ökonomisch**).
- ◆ Zweitens können die aus Art. 11 der FFH-RL (Überwachung des Erhaltungszustandes) und Art. 17 FFH-RL (Durchführungsbericht) erforderlichen Langzeit-Beobachtungen (Monitoring) nur mit Unterstützung von Fernerkundungstechnologie, so weit wie möglich **automatisiert**, bewältigt werden.

Die Zielstellung war, am Beispiel einer Fallstudie herauszuarbeiten, inwieweit Fernerkundungs- und GIS-Technologien für die Kartierung der Wald-Lebensraumtypen als auch für die Bewertung ihres Erhaltungszustandes dazu beitragen können, den Zeit- und Kostenaufwand für Freilandhebungen zu verringern und dauerhaft nachvollziehbare Grundlagen zu liefern. Der Praxistest Fernerkundung sollte deshalb die vielschichtigen Möglichkeiten, aber auch die Grenzen des Technologie-Einsatzes verdeutlichen. Die Technologie-Seite des Praxistestes beinhaltete drei Komponenten:

- ◆ Modellierung der **Naturpotenziale** aus vorhandenen digitalen Umweltinformationen mit Hilfe von GIS-Werkzeugen;
- ◆ Erfassung des **Ist-Zustandes** von Natur und Landschaft – Erkennung und Abgrenzung der Wald-Lebensraumtypen mit Fernerkundungs-Daten;
- ◆ Vergleich von **Naturpotenzial und Ist-Zustand**.

1.2 Testgebiete

Für den Praxistest Fernerkundung wurden unter folgenden Vorgaben zwei Testgebiete ausgewählt:

- ◆ Hoher Waldflächenanteil; ausgeprägte Mischung von Wald-Lebensraumtypen gem. Anh. I FFH-RL und „sonstigem Lebensraum“;
- ◆ Wald-Lebensraumtypen-Kartierung bereits abgeschlossen;
- ◆ Gebiete mit sowohl laubbaum- als auch nadelbaumdominierten Wald-Lebensraumtypen;
- ◆ unterschiedliche Verfügbarkeit von Zusatzdaten (verschiedene „Schwierigkeitsgrade“);
- ◆ Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten.

Die Wahl fiel auf die Testgebiete „Angelberger Forst“ und „Taubenberg“, beide im sehr abwechslungsreich strukturierten Alpenvorland gelegen (siehe Abbildung 1).

Der **Angelberger Forst** (FFH-Gebiet Nr. 7829-301, Regierungsbezirk Schwaben) liegt mit seinen 640 ha im Naturraum „Donau-Iller-Lech-Platte (D64)“ und im Wuchsgebiet 12.7 „Mittelschwäbisches Schotterriedel- und Hügelland“. Das zum Großteil in der submontanen Höhenstufe liegende Waldgebiet ist natürlicherweise von der Buche dominiert („Die Buchenperle des Unterallgäu“). An FFH-Wald-Lebensraumtypen gem. Anh. I der FFH-RL sind dort die Hügellandformen von Hainsimsen-Buchen-

wald (*Luzulo-Fagetum*, LRT 9110) und Waldmeister-Buchenwald (LRT 9130) verbreitet. Auf den wechselfeuchten Standorten findet man den edellaubbaumreichen Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwald (*Stellario-Carpinetum*, LRT 9160) und auf den nassen Standorten Erlen-Eschenwälder (*Pruno-Fraxinetum*, *Carici-remotae-Fraxinetum*, beide gehören zum LRT*91E0). Die Verteilung und die Abfolgen der Wald-Lebensraumtypen können als übersichtlich bezeichnet werden, sie folgen den beiden Gradienten Bodenfeuchte und Säure-/Basenversorgung. Der Grad der Nutzungsüberprägung ist einfach zu erkennen: je höher der Nadelbaumanteil im Hügelland, umso stärker die Nutzungsüberprägung. Faunistische Besonderheiten sind Vorkommen von Bechsteinfledermaus und Großem Mausohr (Arten des Anhangs II der FFH-RL). Die allgemeine Datenverfügbarkeit ist in dem Staatsforstgebiet gut.

Der **Taubenberg** (FFH-Gebiet Nr. 8136-302, Regierungsbezirk Oberbayern) liegt im Naturraum „Südliches Alpenvorland“ (D66) und im Wuchsgebiet 14.4 „Oberbayerische Jungmoräne und Molassevorberge“. Der bis knapp 900 m aufragende „Eckpfeiler zwischen Inn- und Isargletscher“ (GRADMANN 1931) hat eine Größe von 1.847 ha und befindet sich zu zwei Dritteln in Besitz der Stadt München und zu einem Drittel in privater Hand. Die Datenverfügbarkeit ist dadurch kompliziert. Als dominierender Lebensraumtyp ist dort der Waldmeister-Buchenwald (LRT 9130) in tannenreicher Ausbildung anzu-

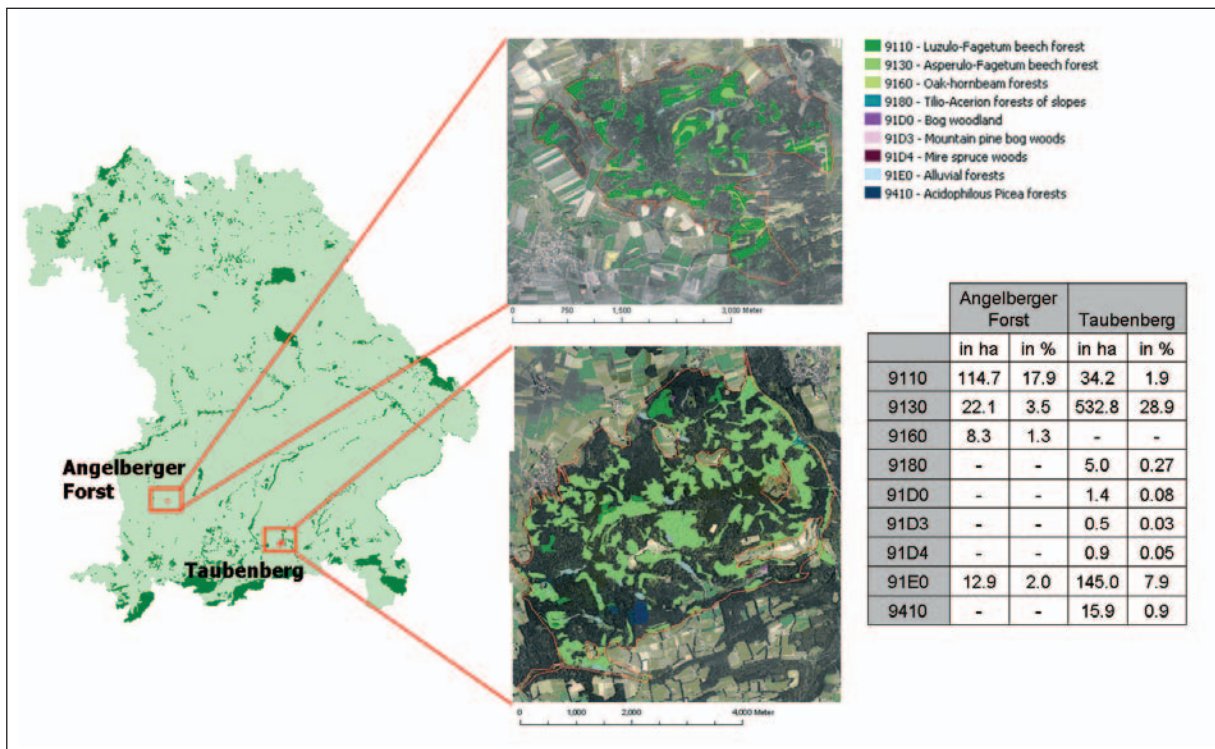


Abb. 1: Lage der Testgebiete mit ihrer Waldlebensraumtypen-Ausstattung

treffen. Daneben kommen Hainsimsen-Buchenwald (LRT 9110, ebenfalls tannenreich), Schlucht- und Hangmischwälder (LRT *9180), Moorwälder (LRT *91D0), Erlen- und Eschenwälder an Fließgewässern (LRT *91E0) sowie bodensaure Nadelwälder (LRT 9410) vor. Eine hohe naturschutzfachliche Bedeutung erhält das Gebiet auf Grund eines beachtlichen Anteils der Tanne in den Wald-Lebensraumtypen 9110, 9130 und 9410 (vgl. WALENTOWSKI et al. 2005). Der Taubenberg weist ein ausgeprägtes Meso- und Mikrorelief auf (unterschiedlich verwitterungsresistente Gesteine der Oberen Süßwassermolasse, periglaziale Fließerden). Daraus resultieren starke Unterschiede hinsichtlich Exposition/Hangneigung, Gelände- und Mikroklima, Humusformen, Basen- und Nährstoffversorgung. Ein erhöhter Nadelbaumanteil ist nicht unbedingt nutzungs-, sondern teilweise auch standörtlich bedingt. Als faunistische Besonderheit kommen in dem Gebiet Schwarzstorch, Auerhuhn, Sperlingskauz, Schwarzspecht, Neuntöter, Uhu sowie das Haselhuhn vor.

1.3 Inhaltliche Projektkonzeption

Folgende Grundannahmen lagen dem Projekt zugrunde:

- ◆ **GIS- und Fernerkundungs-Technologien** bieten ein enormes Einsatzpotenzial sowohl für die Erfassung der Lebensraumtypen (Unterstützung der terrestrischen Kartierung) als auch für die späteren Monitoring-Aufgaben (Überwachung und Berichtspflicht).
- ◆ Da es bei späteren Monitoring-Aufgaben auch um eine **größere Skalenebene** (Biogeographische Region) geht, sind auch geringer auflösende Fernerkundungsdaten von Interesse.

- ◆ Die verschiedenen zum Einsatz gekommenen Ansätze und Technologien sollen **auf die Gesamtfläche übertragen** werden können.

Folgende Fragestellungen ließen sich daraus ableiten:

- ◆ Welche **prioritären Wald-Lebensraumtypen** (Art. 1d FFH-RL) lassen sich sicher und effizient modellieren (besondere Überwachungsvorgaben gem. Art. 11 FFH-RL)?
- ◆ Mit welchen **Fernerkundungsdaten/-technologien** lässt sich der Ist-Zustand der Lebensraumtypen in welcher Genauigkeit erfassen und bewerten?
- ◆ Was braucht man als **Minimum an Datengrundlagen**, um auf einen bestimmten Informationsstand zu kommen?

1.3.1 Potenzial-Modellierung auf Basis von verschiedenen Ansätzen

In Bayern sind nicht alle geeigneten Datengrundlagen flächig verfügbar bzw. bezahlbar. Auch ist die Aussagekraft der verschiedenen Datengrundlagen an sich, aber auch abhängig von den Regionen, unterschiedlich einzuschätzen. Für die Modellierung der Naturpotenziale ging es zunächst darum, alle nutzbaren Umweltinformationen zusammenzustellen (Tabelle 1).

Die Konzeption sah vor, auf Basis der vorhandenen Datengrundlagen verschiedene Modellierungsansätze unter folgenden Prämissen zu testen:

- ◆ Welche Ansätze kommen in Betracht?
- ◆ Welche Daten benötigen sie?
- ◆ Wie aufwändig und wie zuverlässig sind sie?

Drei Verfahren wurden getestet, verglichen und im Hinblick auf die jeweiligen Einsatzmöglichkeiten diskutiert:

	Angelberger Forst	Taubenberg
Kartierte Lebensraumtypen	vorhanden	im Wald vorhanden
Digitales Geländemodell (DGM)	vorhanden (DGM 25)	vorhanden (DGM 5 und DGM 25)
Klimadaten	Klimaatlas Bayern	Klimaatlas Bayern
Konzeptbodenkarte	vorhanden	vorhanden
Forstliche Standortkartierung	vorhanden	teilweise vorhanden
Forstliche Betriebskarte	vorhanden	nicht vorhanden
Managementplan	vorhanden	nicht vorhanden

Tab. 1: Liste der vorhandenen Geodaten; wegen des Privatwald-Anteils im Testgebiet Taubenberg sind dort die verfügbaren Informationen geringer.

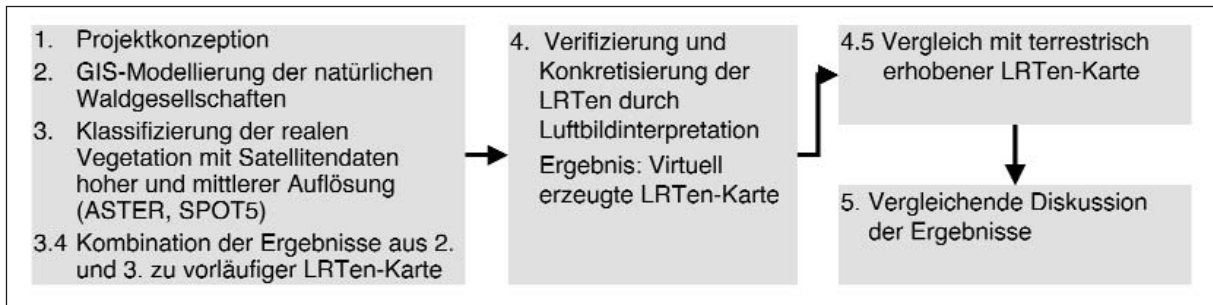


Abb. 2: Ablauf des Projektes mit jeweiliger Kapitelnummer im Projektbericht

- ◆ GIS-Modellierung mit multivariaten statistischen Verfahren auf Basis von metrischen Reliefparametern (Firma SciLands, Göttingen),
- ◆ GIS-Modellierung mit dem BERN-Modell auf Basis von Fuzzy Logic (Firma Ökodata, Berlin),
- ◆ GIS-Modellierung auf Basis von regelbasiertem Expertenwissen (LWF; TU Berlin).

Satellitendaten:

- ◆ ASTER mit Infrarotkanal (15 m) vom 19.09.2004 für den Taubenberg,
- ◆ SPOT5 mit Infrarotkanal (5 m) vom 07.09.2004 für den Angelberger Forst,
- ◆ QuickBird (0,6 m PAN) für 2005 geordert.

Luftbilddaten:

- ◆ Echtfarben-Luftbilder, Bodenauflösung: 40 cm, Maßstab: 1 : 12.400 aus dem Jahr 2003.

Der Gesamt-Ablauf des Projektes ist in Abbildung 2 wiedergegeben.

Die Ergebnisse des Projektes wurden schließlich am 19. Juli 2005 auf einem Abschluss-Workshop in Freising vorgestellt.

1.3.2 Kartierung des Ist-Zustandes mit verschiedenen Fernerkundungstechnologien

Für die Testgebiete wurde ein Vergleich der Einsatzmöglichkeiten verschiedener Fernerkundungstechnologien durchgeführt. SPOT und ASTER-Satellitendaten wurden automatisch klassifiziert und gescannte Echtfarben-Luftbilder visuell stereoskopisch ausgewertet. Folgendes Datenmaterial stand zur Verfügung:

2 GIS-Modellierung der potenziellen FFH-Wald-Lebensraumtypen

Um die Ausstattung eines FFH-Gebietes an Wald-Lebensraumtypen in ihrer landschaftstypischen Ausprägung abschätzen zu können, ist zunächst eine raumbezogene Modellierung auf Basis von natürlichen Waldgesellschaften notwendig. Informationen zu den regional und standörtlich in Betracht kommenden Waldgesellschaften als Ausdruck der spezifischen Wuchsbedingungen finden sich in WALENTOWSKI et al. (2004).

Zur detaillierten Bestimmung der potenziellen natürlichen Vegetation eines Gebietes existieren darüber hinaus eine Vielzahl von Methoden (GARMAN 2004; SCHUHMACHER et al. 2004; WEHRLI et al. 2005). Sogar die Änderungen von Klimabedingungen auf die Waldtypenverteilung wurden mit solchen Modellen erprobt (LINDNER et al. 1997). Die genannten Ansätze sind hochkomplexe deterministische Modelle, die eine Vielzahl von Eingangsinformationen und Felduntersuchungen erfordern. Für den praktischen Einsatz von Modellen innerhalb des NATURA2000-Prozesses ist es von großer Wichtigkeit, einfache und robuste Modelle zu verwenden, deren Einsatz speziell hinsichtlich der Validierung und Kalibrierung in einem überschaubaren Rahmen möglich ist. Deshalb wurden ausschließlich indikatorgesteuerte Modelle mit einem einfachen Regelwerk verwendet. Ähnliche Ansätze wurden unter anderem schon im Harz (JANSEN et al. 2002) und im Alpengebiet (FISCHER 2002; FISCHER et al. 2005) getestet. Die Integration dieser Regeln kann allerdings mit Hilfe verschiedene Strukturen erfolgen, die unterschiedliche mathematische Voraussetzungen verwenden. Um Sicherheit zu gewinnen, welches Modell die potenzielle natürliche Waldgesellschaft (pnW) am sichersten wiedergibt, wurden drei Modelle (siehe Abbildung 3) an

zumindest einem der zwei Testgebiete angewandt:

- ◆ Einbeziehung der Experteninformation zu Lebensraumtypen durch ein **Regelwerk**,
- ◆ Einbeziehung der Experteninformation durch **Fuzzy-Logic**,
- ◆ Einbeziehung der Experteninformation durch eine **Clustering von Relieftypen** und deren Zuordnung zu Lebensraumtypen.

Grundvoraussetzung der Anwendung aller Modelle ist die Verbindung von Geofaktoren, wie Bodeninformationen oder Höhendaten, mit Expertenwissen zu jenen Standortfaktoren, unter denen eine Waldgesellschaft vorkommt. Diese Verbindung kann wiederum über die Ableitung von Parametern aus den Geodaten (z. B. Relieftypen aus dem Höhenmodell) oder über deren direkte Zuordnung geschehen. Die Modelle ermittelten jeweils Wald-Lebensraumtypen gem. Anhang I der FFH-Richtlinie. Der „Wald-Lebensraumtyp“ ist nicht analog zur pflanzensoziologischen Einheit der „Waldgesellschaft“. Oft sind in einem LRT mehrere Waldgesellschaften aggregiert (z. B. im Lebensraumtyp 9130 – Waldmeister-Buchenwald die Waldgesellschaften *Galio-Fagetum*, *Hordelymo-Fagetum*, *Aposerido-Fagetum*, *Galio-Abietetum*).

2.1 Verwendete Standards

Die drei Modelle sollten innerhalb der Studie weitgehend vergleichbar in der Erarbeitung der Resultate sein. Deshalb wurden vor der Bearbeitung der Testgebiete bestimmte Standards vereinbart.

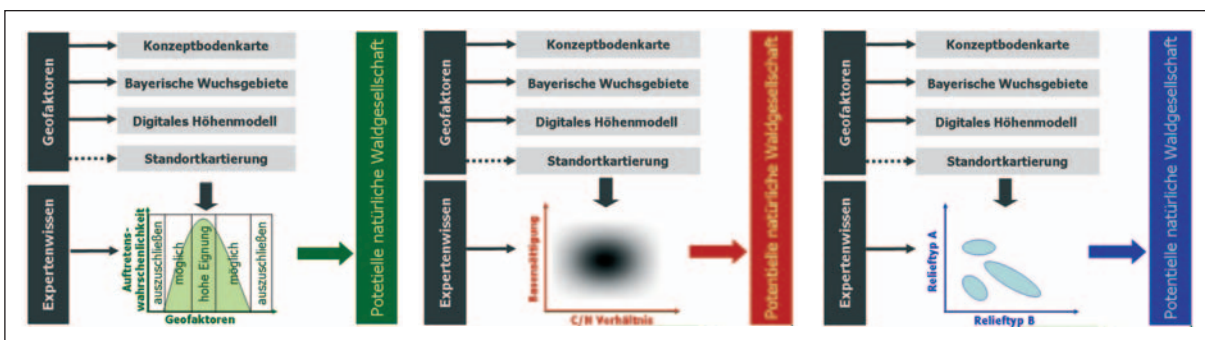


Abb. 3: Die drei verwendeten Modelltypen im Vergleich

- ◆ Um die Modellierung ausschließlich auf die Fernerkundungs- und Geodaten zu gründen, wurde die Bearbeitung ohne Kenntnis der Vor-Ort-Bedingungen durchgeführt.
- ◆ Die Bearbeiter konnten auf die gleichen Grundlagen des Expertenwissens zurückgreifen. Für diesen Versuch waren dies hauptsächlich die vegetationskundlichen Übersichtswerke von WALENTOWSKI et al. (2004) und OBERDORFER (1992).
- ◆ In Projekttreffen mit allen Beteiligten wurden die Zwischenergebnisse den Kartierern der jeweiligen Gebiete vorgestellt und diskutiert. So konnten die Bearbeiter ihre Ergebnisse evaluieren und grobe Fehlinterpretationen korrigiert werden.

Für die Modellierung wurden hauptsächlich ein digitales Geländemodell (DGM 5 bzw. DGM 25), die Konzeptbodenkarte 1:25.000 sowie die forstliche Standortkartierung verwendet (siehe Kapitel 1.3.1).

2.2 Modellierung mit Hilfe des Modells BERN unter Einbeziehung von Fuzzy Logic

Zur Ermittlung ökosystemarer Zusammenhänge zwischen den biotischen Komponenten (Vegetationsformen und Bodenorganismengesellschaften) und anthropogenen Schadstoffeinträgen wurde das folgende BERN-Modell (Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions) auf der Basis empirischer Erhebungen im Nord- und Ostdeutschen Tiefland, Hügelland und Bergland entwickelt und validiert, inzwischen jedoch auf den Freistaat Bayern anwendbar ausgeweitet (SCHLUTOW und HÜBENER 2005). Obwohl das Modell einen prognostischen Charakter hinsichtlich der dynamischen Entwicklung der Pflanzengesellschaften hat, wurde es im Rahmen dieses Projektes nur zur Ermittlung der potenziellen natürlichen Vegetation verwendet. Eine Anwendung hinsichtlich der Änderung der Wachstumsbedingungen, z. B. durch anthropogene Schadstoffeinträge u.a. im Rahmen des NATURA-2000-Monitorings ist jedoch möglich.

2.2.1 Modellansatz

Durch Anpassung an das standortspezifische harmonische Gleichgewicht von Nährstoffen (C:N:Ca:Mg+K), Wasser, Licht und Wärme sowie durch Ausprägung stabiler Konkurrenzbeziehungen der Arten bildeten sich natürliche bzw. halbnatürliche Pflanzengesellschaften heraus. Diese

sind in Bayern (und darüber hinaus) umfassend in der Literatur dokumentiert (OBERDORFER 1957; OBERDORFER 1992; WALENTOWSKI et al. 2004), so dass die Angaben zu ihrer Struktur und zu dem vorgefundenen Standort für die Bioindikation der Standorteigenschaften im kaum beeinflussten Zustand genutzt werden können. Hohe indikatorische Bedeutung haben dafür insbesondere die naturnahen bzw. halbnatürlichen Wald- und Graslandgesellschaften, da ihr Konkurrenz-Gleichgewicht über lange Zeit bei gleich bleibendem Nutzungseinfluss bestehen bleibt und somit die Pflanzengesellschaft auch langfristig als Bioindikator Gültigkeit hat.

GLAVAC (1996) bezeichnet den Zusammenhang zwischen Standorttyp und Pflanzengesellschaft als „*Unschärferelation*“. Auf Grund der Entwicklung der Fuzzy-Logik von ZADEH (1978) steht ein mathematisches Instrumentarium zur Verfügung, mit dem „unscharfe Relationen“ (fuzzy relations) mathematisch exakt beschrieben werden, ohne dass ein nicht erfüllbarer Anspruch auf deterministische Präzision erhoben würde. Die Definition einer unscharfen Relation zwischen Standortfaktoren und der Pflanzengesellschaft dieses Standortes ist der mathematische Grundansatz des BERN-Modells. Der Grad der Erfüllung einer unscharfen Bedingung wird nach ZADEH (1978) auch die Möglichkeit (*possibility*) der Variablen x , die Bedingung B zu erfüllen, genannt. Der Wert der Möglichkeit von „ x erfüllt B “ wird durch eine Möglichkeitsverteilungsfunktion (MVf) $p(x)$ mit dem Wertebereich $[0..1]$ wiedergegeben. Damit existiert eine quantitative unscharfe Bedingung für die Existenz einer Pflanzenart in Abhängigkeit von einem Standortfaktor. Standortfaktoren wirken in der Regel aber nicht unabhängig voneinander. Um mehrere exogene Faktoren zu berücksichtigen, werden die unscharfen Bedingungen der Einzelfaktoren kombiniert, um eine Aussage zu machen, welchen Bereich des funktionalen n -dimensionalen Raumes die Pflanzenart einnehmen kann. Dazu müssen alle Standortfaktoren innerhalb des physiologischen Potenz-Bereiches der Art liegen. Die real existierenden Kombinationen von Standortfaktoren werden zu Standorttypen zusammengefasst. Ihnen wird die Pflanzengesellschaft als Indikator zugeordnet, die den höchsten Zugehörigkeitsgrad zu dieser Faktorenkombination aufweist. Für einen Stamm-Standortstyp entsteht auf diese Weise ein fünfdimensionales Bild der Verteilung der zu erwartenden natürlichen und halbnatürlichen Pflanzengesellschaft mit ihren Zugehörigkeitsgraden zu den Zustandsparametern Bodenfeuchte, Basensättigung, C/N-Verhältnis, Kontinentalität (=Trockenheitsindex) und Länge der Vegetationszeit.

2.2.2 Grundlagendaten

Die Stamm-Standortsformen-Klassifizierung erfolgte anhand der Kombination folgender typisierter kaum veränderlicher Stamm-Standortfaktoren („formationsprägende Faktoren“ im Sinne von SUCCOW und JOOSTEN (2001) zu Stamm-Standortsformengruppen:

- ◆ *Relieftypen* als Kombination aus Neigungsgrad und Exposition (Strahlungsintensität),
- ◆ *Bodenformentypen* als Kombination aus Bodenformengruppen und Substrat- bzw. Ausgangsgesteinsgruppen,
- ◆ *Klimaregionaltypen* als Kombination aus Niederschlag, Temperatur, DEMARTONNE-Index (= hygri-scher Kontinentalitätsindex), Jahrestemperaturspanne, Länge der Vegetationszeit.

Als leicht veränderliche Zustandsparameter der Stamm-Standortsformentypen wurden die Parameter aufgenommen und klassifiziert, die anthropogene Einflüsse innerhalb eines Stamm-Standortformentyps innerhalb von wenigen Jahren bis Jahrzehnten verändern können:

- ◆ *Bodenwasserhaushalt* wurde mit einem Relativwert (0...1) versehen, der sich aus der Kombination von Grund- und/oder Haft-/Stauwassereinfluss sowie der nutzbaren Feldkapazität ergibt und den Feuchtgrad des Bodens charakterisieren soll.
- ◆ *Nutzungstyp*: Die selten oder/und extensiv genutzten Nutzungstypen Wald, Mähwiesen, Weiden (einschließlich Heiden), Sümpfe und Moore wurden eingegeben.
- ◆ *C/N-Verhältnis* wurde in der Humusschicht und/oder in den obersten 10 cm des obersten Mineralbodenhorizontes ermittelt (vgl. SCHLUTOW 2003).
- ◆ Basensättigung, d. h. der Anteil der Kalzium-, Kalium-, Magnesium- und Natrium-Ionen an der

gesamten Kationenaustauschkapazität (in %) wurde für jeden Horizont gesondert bis in eine Tiefe, bei der die aktuelle Haupt-Durchwurzelungszone endet (enthält 85 % der Wurzeltracht der dominanten Arten), gemessen (vgl. SCHLUTOW 2003).

- ◆ *Humusform*: als ein Summenindikator für C/N und Basensättigung im Oberboden (unter Berücksichtigung von Jahresdurchschnittstemperatur und Feuchte) wurde auch die Humusform an den Erhebungsstandorten aufgenommen. Dabei ergab sich an weitgehend unbeeinflussten Standorten ein harmonisches Nährstoffgleichgewicht.

In der Datenbank wurden die Parameterwerte bzw. -spannen aufgenommen, die typisch sind für die natürlichen weitgehend unbeeinflussten harmonischen Gleichgewichtszustände der Parameter untereinander. Der weitaus überwiegende Teil der 28.907 ausgewerteten Aufnahmen naturnaher weitgehend unbeeinflusster Standorte, die vor 1960 aufgenommen wurden (ELLENBERG 1996; OBERDORFER 1957; OBERDORFER 1992; PASSARGE 1964; PASSARGE und HOFMANN 1968; SCHMIDT et al. 2003; SUCCOW und JOOSTEN 2001), enthielt klassifizierte oder verbal beschreibende Angaben zu den Standortparametern. Substrattyp, Hydromorphietyp, Bodentyp, Humusform und Klima-/Höhenstufe, die i. d. R. bei der Beschreibung von Vegetationsaufnahmen mit genannt wurden, sind an den wenig oder nicht veränderten Standorten gute Informationsquellen zur Abschätzung von Bodenfeuchte, Basensättigung und C/N-Verhältnis im Oberboden der Aufnahme-Standorte. Aus WALENTOWSKI et al. (2004) konnten für Bayern diese Angaben verifiziert bzw. parametrisiert werden.

Für alle Stamm-Standortsformentypen wurden die bioindikatorisch charakteristischen natürlichen und halbnatürlichen Stamm-Vegetationsformen, die

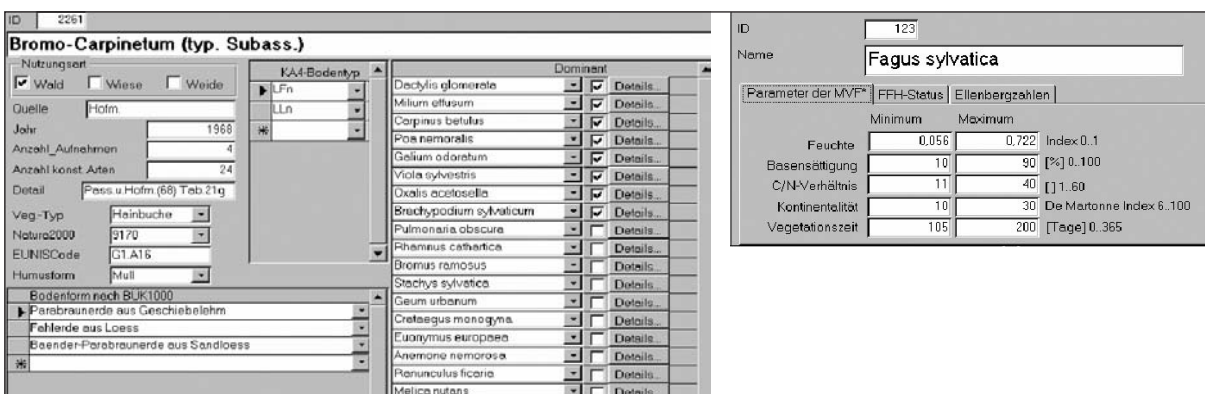


Abb. 4: Auszug eines Eingabeformulars mit dem Beispiel für eine Pflanzengesellschaft (links) und Eingabeformular einer konstanten Pflanzenart, ihrer Standortoptima und ökologischen Nischenbreite (rechts)

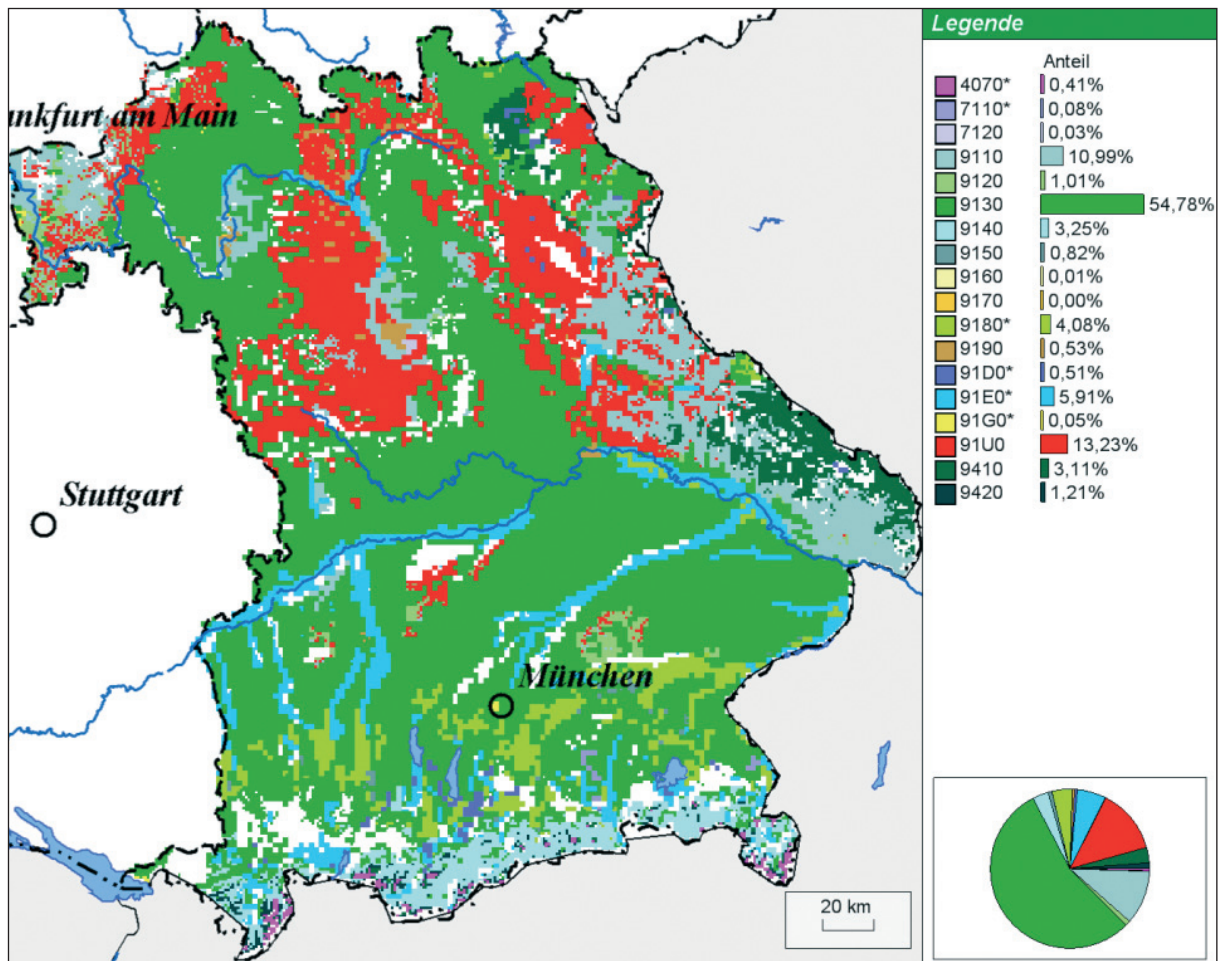


Abb. 5: Potenzielle FFH-Lebensraumtypen Bayerns, ermittelt aus dem Verschnitt der Bodenübersichtskarte BÜK 1000, dem GTOPO 30 des U.S. – Geological Survey (USGS) und den Klimadaten des deutschen Wetterdienstes (DWD) 1950-1980

vor der Industrialisierungswelle ab 1960 aufgenommen und beschrieben wurden, in eine Datenbank aufgenommen und die ihnen angehörenden hochsteten Arten (konstante Dominanzarten + sonstige konstante Arten) zugeordnet (Abbildung 4 - links). Für alle 1.050 Pflanzenarten, die bisher in Auswertung der Vegetationsaufnahmen und zugehörigen Messwerten von Standortparametern in der Datenbank erfasst wurden, werden die ökologischen Nischenbreiten (= Breite der Bereiche beidseits des Optimums bis zu den absoluten Pessima) angegeben für die leicht veränderlichen Standortparameter (Abbildung 4 - rechts).

2.2.3 Modellanwendung und Ergebnisse

Ermittlung potenzieller FFH-Gebiete in Bayern

Aus kartierten Stamm-Standortfaktoren für eine Region oder ein Bundesland wie Bayern kann nun

das Vorkommen der potenziellen natürlichen Stamm-Vegetationsform modellgestützt ermittelt werden, aus der wiederum eine Zuordnung der Fläche zu einem potenziellen FFH-Lebensraumtyp möglich ist (Abbildung 5).

Ermittlung der potenziellen natürlichen Waldgesellschaften und deren hochsteter Dominanz- und Charakterarten

Aus der forstlichen Standortkartierung bzw. ersatzweise aus der Verschneidung von digitalen Bodenformenkarten, Reliefkarten (digitales Geländemodell) und Klimakarten kann mit Hilfe des BERN-Modells eine Abschätzung der zu erwartenden Wald-, Grünland- oder Moorpflanzen-Gesellschaft erfolgen (Abbildung 6).

Ausblick - Ableitung des ökologischen Erhaltungszustandes

Auf Grund dieser Prognose lassen sich die Pflanzenlisten ausgeben, die hochstet zu erwarten sind.

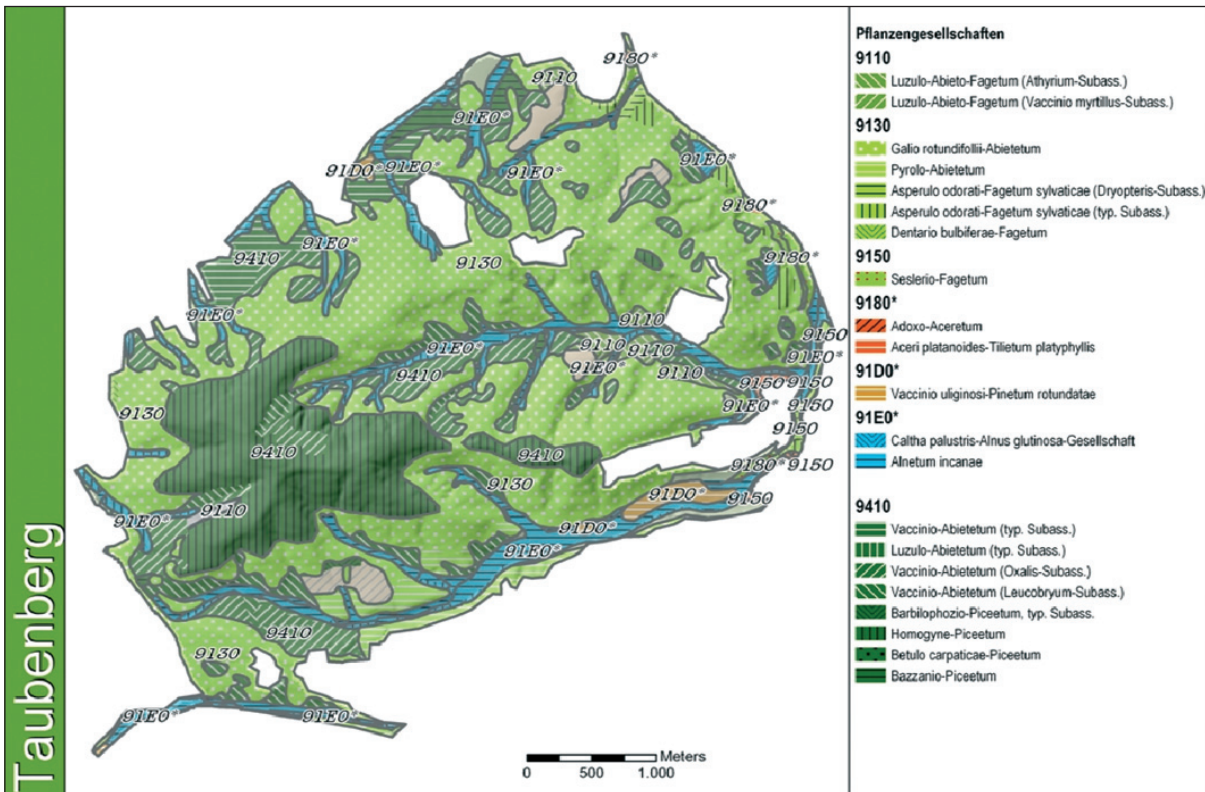


Abb. 6: Modellgestützte Prognose der Waldgesellschaften mit den größten Zugehörigkeitsgraden zu den Naturraumtypen im Testgebiet Taubenberg

Kartierungsfehler lassen sich so einschränken. Sind aber offensichtlich die zu erwartenden hochsteten Arten nicht am Stichprobenstandort zu finden, muss eine Standortveränderung (durch Stoffeinträge oder Bodenwasseränderungen) stattgefunden haben. In diesen Fällen kann durch Kartierung der vor Ort befindlichen Pflanzenarten an einem homogenen Standort und der kaum veränderlichen Standorteigenschaften (Bodenform, Bodenwasserform, Klimaregionalform, Reliefform und Expositionsform) durch das BERN-Modell der ökologische Erhaltungszustand abgeleitet werden.

Aus dem aktuellen Arteninventar wird der von allen vorgefundenen Arten gemeinsam besetzte Bereich der betrachteten veränderlichen Standortfaktoren errechnet, indem aus den Nischenbreiten der Arten vom Modell das größte Minimum und das kleinste Maximum ermittelt werden. Die Nischenbreiten der vorgefundenen Arten können natürlich nur als Indikatorbereiche für die Bodenschicht ausgewertet werden, in der die Art ihre Hauptwurzeltracht ausbreitet. Besonders an Waldstandorten ist eine differenzierte schichtweise Ermittlung der Indikatorwerte unerlässlich, um nicht zu Trugschlüssen zu kommen. Gleichzeitig ermittelt das Modell die Stamm-Vegetationsform aus den angegebenen Stammeigenschaften. Das

Modell stellt nun die Distanz (=Abweichgrad) zwischen dem harmonischen Gleichgewichtszustand des Stammstandorttyps (Referenzzustand) und dem aktuellen Zustand (Erhaltungszustand) dar. Weiterhin lassen sich aus diesen Daten Parameter der Biodiversitätsveränderungen berechnen.

2.3 Modellierung mit Hilfe der Clusterbildung von Reliefparametern

Das Relief steuert zentrale ökologische Wirkungsgefüge wie Mikroklima und Wasserhaushalt, initiiert Abtragungsvorgänge oder beeinflusst Art und Mächtigkeit der Bodendecke. Es ist daher eine der wichtigsten Größen im Naturhaushalt. Durch die Verfügbarkeit von hochauflösenden Digitalen Geländemodellen (DGM) mit kleinen Rasterweiten und durch die Entwicklung von Reliefparametern, die Prozesse im Naturhaushalt abbilden, ist es inzwischen möglich, potenzielle Standorte von bestimmten Waldgesellschaften in einer hohen Genauigkeit zu modellieren. Diese Datenquelle besteht aus einem regelmäßigen Gitter einzelner Rasterzellen. Jede dieser Rasterzellen repräsentiert einen Geländeausschnitt mit einer bestimmten Flächengröße

z. B. von 25 m² bei einer Rasterweite von 5 m. Jede Zelle besitzt einen Höhenwert¹. Für jede dieser Rasterzellen können zahlreiche metrische Informationen über den Standortfaktor Relief abgeleitet werden. Dies beginnt mit einfachen Faktoren wie etwa der Hangneigung oder der Exposition und erstreckt sich bis zu komplexen Faktoren und Indices, die ganze Prozesse wie etwa die Bodenerosion abbilden. Voraussetzung ist natürlich eine gewisse Abhängigkeit der zu modellierenden Gesellschaft von Faktoren, die vom Relief beeinflusst werden. Erste Ansätze dazu werden im Folgenden beschrieben.

2.3.1 Reliefanalyse

Im Lauf der letzten zwei Jahrzehnte hat sich die Reliefanalyse als eine stark spezialisierte Disziplin der Geoinformatik entwickelt. Die Anwendungsmöglichkeiten sind allerdings längst nicht ausgeschöpft. Gerade im Bereich der Umweltwissenschaften können andere Fachrichtungen wie die Hydrologie (z. B. Hochwasserforschung), die Bodenkunde oder die Forstwissenschaften von der Entwicklung von zahlreichen Reliefparametern in Zukunft stark profitieren. Für die hier vorgestellte Modellierung von Wald-Lebensraumtypen (LRT) wurden ausgewählte Reliefparameter berechnet, die nun kurz beschrieben werden:

Lokale Reliefparameter

Die Berechnung lokaler Reliefparameter erfolgt auf der Basis eines Höhenwertes (Rasterzelle) und der Höhenwerte der direkten Nachbarschaft im DGM.

- ◆ *Neigung* der Erdoberfläche in Richtung der Exposition: Die Neigungsstärke (Hangneigung) wird in Altgrad, Gon, Prozent oder im Bogenmaß angegeben.
- ◆ *Konvergenz-/Divergenzindices* geben das Maß der Konvergenz (Zusammenstreben) bzw. Divergenz (Streuung) des Abflusses auf der Erdoberfläche an. Jede Rasterzelle erhält einen Wert, der angibt, ob und in welchem Maße abfließendes Wasser auf mehrere Nachbar-Rasterzellen verteilt wird oder von mehreren Nachbar-rasterzellen erhalten wird. Die maximale Divergenz ergibt sich, wenn der Abfluss in acht verschiedene Richtungen weitergegeben wird, wobei die Expositionen der Nachbar-Rasterzellen von der betrachteten Rasterzelle wegzeigen. Die

maximale Konvergenz ergibt sich, wenn aus den acht Nachbar-Rasterzellen Wasser bezogen wird, wobei die Expositionen der Nachbar-Rasterzellen genau auf die betrachtete Rasterzelle zeigen. Bei divergierendem Abfluss ergibt sich ein positiver Indexwert, bei konvergierendem Abfluss ein negativer. Ist der Wert gleich Null, weisen die Expositionen der acht Nachbarrasterzellen in die gleiche Richtung.

- ◆ *Querwölbung* beschreibt im Gegensatz zur Horizontal- und Vertikalwölbung immer die stärkste Wölbung einer Oberflächenform (hier die Kanten der Höhengsprünge) und ist somit unabhängig von der Hangneigung.

Komplexe Reliefparameter

Zur Berechnung der komplexen Reliefparameter wie Höhe über Tiefenlinie oder Einzugsgebietsgröße müssen größere räumliche Zusammenhänge als die direkten Nachbarrasterzellen im DGM berücksichtigt werden.

- ◆ *Höhe über Tiefenlinie* ist ein Maß für die relative Höhe [in m] jeder Rasterzelle über ihrer zugehörigen Tiefenlinie. Eine Rasterzelle gehört zu derjenigen Tiefenlinie, die bei hypothetischen Abflussbedingungen (undurchlässige Oberfläche) den über der Rasterzelle gefallenen Niederschlag erhält. Die Tiefenlinie beginnt dort, ab wo sich das Abflussgeschehen linear abspielt, eine Rasterzelle ihre gesamte Abflussspende also an nur noch eine tieferliegende Rasterzelle weitergibt. Die Tiefenlinien selbst erhalten den Wert Null, alle anderen Rasterzellen einen positiven Wert, je nach ihrem Vertikalabstand zur Tiefenlinie. Es entsteht somit ein Bild der relativen Höhenlage. Diese Größe 'Höhe über Tiefenlinie' ist zur Analyse des Prozessgeschehens eines Landschaftsausschnittes wesentlich bedeutender als die absolute Höhenlage.
- ◆ *Bodenfeuchteindex* stellt ein Maß für die theoretische Durchfeuchtung des Bodens dar. Er errechnet sich einerseits aus dem komplexen Relieffaktor 'Einzugsgebietsgröße', also der Größe, die proportional zur ankommenden Wassermenge angenommen wird. Als weiterer Faktor geht die Neigung jeder Rasterzelle in die Berechnung ein. Diese kann als Größe für die Fließgeschwindigkeit bzw. die Verweildauer des abfließenden Wassers betrachtet werden.
- ◆ *Potenzieller topographischer Strahlungsgenuss* gibt die Energiemenge an, die innerhalb einer bestimmten Zeitspanne (hier ein Jahr) direkt auf die Erdoberfläche trifft. Bewölkungsverhältnisse und Streuungen (z. B. von gegenüberlie-

¹ DGM, deren Rasterzellen einen größeren Geländeausschnitt als 625 m² repräsentieren, also mit Rasterweiten über 25 m, sind für solche Untersuchungen nur bedingt geeignet.

genden Talflanken) werden hierbei jedoch nicht berücksichtigt. Dieser Reliefparameter geht also hinsichtlich seiner Aussagekraft (z. B. für das Mikroklima und Bodenfeuchteverhältnisse) bei weitem über solche simple Reliefparameter wie „Sonn- und Schatthang“ oder einer Klassifizierung der Exposition hinaus. Die Berücksichtigung von Bewölkungsverhältnissen ist potenziell auch möglich – z. B. unter Einbeziehung von Klimamodelldaten.

2.3.2 Clusteranalyse

Ausgewählte morphometrische Reliefparameter werden mit Hilfe der Clusteranalyse ermittelt. Ziel bei diesem multivariaten statistischen Verfahren ist es, die Objekte (hier Rasterzellen) so zu Gruppen (Clustern) zusammenzufassen, dass die Objekte in einer Gruppe möglichst ähnlich und die Gruppen untereinander möglichst unähnlich sind. Im hier verwendeten nicht-hierarchischen Gruppierungsverfahren wurden zwei sich ergänzende Verfahren kombiniert. Das *iterative Minimaldistanz-Verfahren* nach FORGY (1965) teilt in einer ersten Näherung die Flächeneinheiten in eine vom Bearbeiter festgesetzte Anzahl von Gruppen auf. Das Ergebnis dieses vorläufigen, iterativen Minimal-Distanzverfahrens wird anschließend der *hill-climbing-Routine* nach RUBIN (1967), einem Austauschverfahren zur Optimierung der Cluster-Lösung, übergeben. Die Cluster-Varianz (mittlere quadratische Abweichung aller morphometrischen Flächeneigenschaften vom jeweiligen Cluster-Centroid) gibt Auskunft über den Grad der Homogenität einer Gruppe. Die Summe der Cluster-Varianzen, die Zielfunktion, wird zum Maß für die Güte der erzielten Cluster-Lösung. Dieses Austauschverfahren wird solange fortgesetzt, bis die Zielfunktion ein Minimum annimmt.

Es ist anzumerken, dass es sich bei diesem Verfahren nicht um ein geostatistisches Werkzeug handelt, räumliche Zusammenhänge (der Rasterzellen) also dabei unberücksichtigt bleiben. Das Verfahren der Clusteranalyse

verlangt die fachliche Beurteilung des Bearbeiters. Dieser muss entscheiden, wie viele und welche Eingangsgrößen dem Verfahren übergeben werden, wie viele Ergebniscluster produziert werden sollen und ob nachträgliche Zusammenfassungen oder Unterteilungen einzelner Cluster nötig sind. Lediglich die verbleibende Restvarianz bietet einen Anhaltspunkt für die statistische Qualität einer erzeugten Clusterlösung. Diese rechnerische Qualität kann jedoch einer fachlichen Beurteilung völlig konträr gegenüberstehen.

2.3.3 Modellanwendung und Ergebnisse

Für die Modellierung mit der eben vorgestellten Methode wurden im Gebiet Taubenberg Lebensraumtypen ausgewählt, die auf Grund ihrer Definition besonders geeignet schienen. Als ein Beispiel sei hier der prioritäre Lebensraumtyp *9180 (Schlucht- und Hangmischwälder) vorgestellt (Abb. 7). Auf Grund der Kenntnisse der Standortansprüche des LRT *9180 (Vorkommen nur in sehr steilem Gelände, vorwiegend auf Nagelfluh der Oberen Süßwassermolasse) wurden als Reliefparameter zur Modellierung ausgewählt:

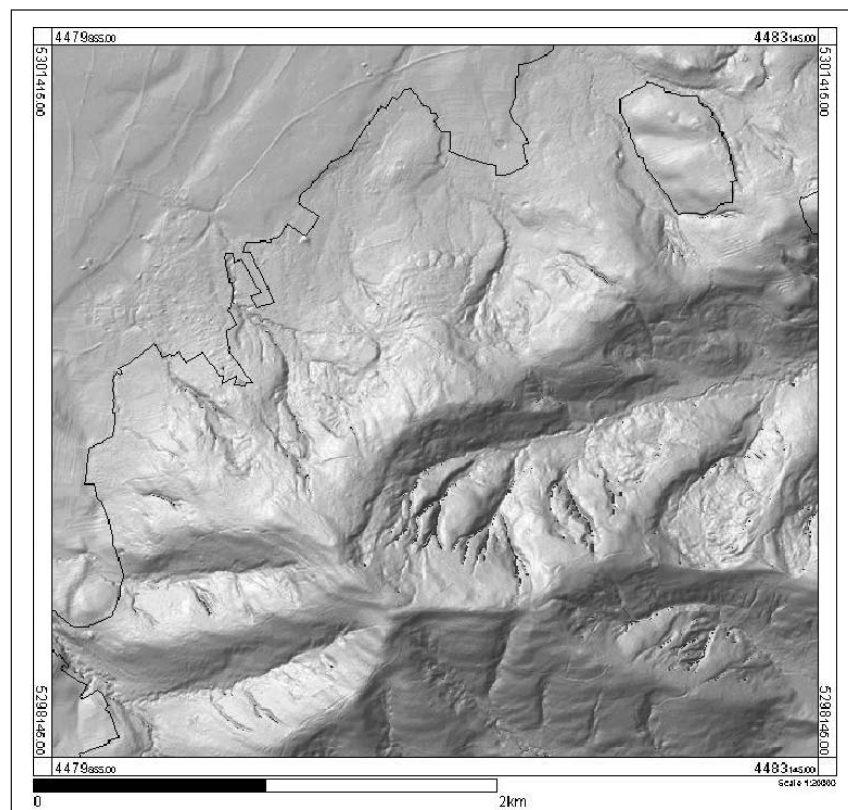


Abb. 7: Ausschnitt aus dem Testgebiet Taubenberg mit Grenze der Kartierung und modellierten Flächen des LRT *9180 (Schlucht- und Hangmischwälder)

- ◆ Konvergenz-Divergenzindex,
- ◆ Jahressumme potenzieller Strahlungsgenus.

Nach Rücksprache wurde schließlich eine Clusterlösung gewählt, die am besten zu den im Gebiet kartierten Flächen passte. Es liegt in der Natur des Verfahrens, dass mehr Flächen als potenzielle Standorte ausgewiesen wurden. Dass es an potenziellen Standorten dann nicht zur Ausbildung des modellierten LRT kam, kann vielfältige Gründe haben, die nicht Gegenstand der Modellierung waren.

Die in der Abbildung dargestellten Flächen weisen folgende Eigenschaften auf:

- ◆ Konvergenz- / Divergenzindex im Mittel -26.03. Dies weist auf deutlich konvergente Standorte wie Rinnen und Tälchen hin. Der Oberflächenabfluss besitzt bereits ausgeprägt linearen Charakter.
- ◆ Jahressumme potenzieller Strahlungsgenus: 902 kWh/m² im Mittel, im Gesamtgebiet des Ausschnittes beträgt die Jahressumme im Mittel ca. 1.524 kWh/m² bei einer Standardabweichung von etwa 100 kWh/m² (Zum Vergleich: Das Jahresmittel für Deutschland liegt bei ca.

1.034 kWh/m²). Es handelt sich also um für das Gebiet deutlich mit direkter Sonneneinstrahlung unterversorgte Flächen.

Für eine sicherere Auswahl der Reliefparameter und verlässlichere Modellierung soll hier noch die Methode der Varianzanalyse erwähnt werden. Dieses Verfahren kann in bereits kartierten Flächen „geeicht“ werden. Für Relief- und andere metrische Parameter (z. B. Klimadaten, Bodeneigenschaften) wird ermittelt, ob sie in bestimmten Klassen (hier kartierte LRT-Flächen) in typischen, statistisch fassbaren Mustern vorkommen. Ist dies der Fall, können solche Parameter in nicht kartierten Räumen dazu hergenommen werden, um mit echten geostatistischen Verfahren wie „region growing“ neue Flächen zu bilden. In diesen Flächen kommen dann die relevanten Parameter in entsprechenden Mustern vor. Eine solche Modellierung könnte zu einer wesentlichen Verbesserung und Zeitersparnis führen, da die Erkennung relevanter Parameter einem automatischen Verfahren überlassen wird.

Natürliche Waldgesellschaft		KBK	Substrat	Relieftyp	DGM
LRT gem. FFH-Richtlinie		Zuordnung der Konzeptbodenkarte	Übergangs-/Hochmoor Tal-/Niedermoore Auenablagung Niederterrasse Sand Schiefer Ton, Mergel (oberflächennah) Lehm, Feinlehm Nagelluh, Molasse	Talflüge Mulde, Senke Schatthang Steilhang Sonnhang Kuppenlage	Hangform Exposition Hangneigung Höhenlage
BUCHENWÄLDER					
9110	Luzulo-Fagetum, kollin-submontane Höhenform	5-56b	M M M	M M M M M	
9110	Luzulo-Fagetum, montane Höhenform	5,9a,10b,22b,26,37,40c,56	M		
9130	Galio odorati-Fagetum, kollin-submontane Höhenform	5,9a,10b,22b,26,37,40c,56	M M	M M M M	
9130	Galio odorati-Fagetum, montane Höhenform	5,9a,10b,22b,26,37,40c,56	M M		
9130	Hordelymo europaei-Fagetum	10b,22b,26,37,40c,56	M	M M M	N,S st
9150	Carici albae-Fagetum	40c,41,44b		W M W M	kv S st
EICHENMISCHWÄLDER					
9170	Galio sylvatici-Carpinetum	10b,22b,26,37,40c,56,60,71	M M M	M M M M	kv,kv S
EDELLAUBBAUMWÄLDER					
9180	Aceri-Tilietum	40c,41,44b		W M W	S st
9180	Fraxino-Aceretum	40c,41,44b	W	W M	N st
9180	Adoxo moschatellinae-Aceretum	5,9a,10b,22b,26,37,40c,56,60,71	M M M M	M M M M M	kv N,S st
TANNENWÄLDER					
9130	Galio rotundifolii-Abietetum	5,9a,10b,22b,26,37,40c,56,41,44b	M M M	M M M M	kv N,S
9130	Pyrolo secundariae-Abietetum	5,9a,10b,22b,26,37,40c,56,41,44b	M M M	M M M	kv N,S
9410	Vaccinio vitis-idaea-Abietetum	5-56b	M M M	M M M	kv,kv
9410	Luzulo luzuloidis-Abietetum	5-56b	M M M M	M M M	kv N,S
KIEFERNWÄLDER TROCKENER STANDORTE					
nein	Erico-Pinetum, Alpenvorlandsrasse	5-56b,60,71	M W M M M	W M M	kv,kv S
BIRKEN-KIEFERN-FICHTEN-MOORWÄLDER					
91D4	Bazzanio trilobatae-Piceetum	78	W	M W	kv
91D2	Vaccinio uliginosi-Pinetum sylvestris	78	W	W M W	kv,kv S
91D3	Vaccinio uliginosi-Pinetum rotundatae	78	W	M W	kv
ERLEN-BRUCHWÄLDER					
nein	Carici elongatae-Alnetum glutinosae	65c,78	W	W M	kv
SUMPF- UND BACHAUENWÄLDER					
91E0	Pruno padis-Fraxinetum	5,9a,10b,22b,26,37,40c,56,60,71,65c,78	M M M M M	W M M	kv
91E0	Circaeae alpinae-Alnetum glutinosae	alle außer 78	M M M M	M M	kv
91E0	Carici remotae-Fraxinetum	10b,22b,26,37,40c,56	M	M W	kv
FLUSSAUENWÄLDER					
91E0	Salicion albae	60,71,10b,22b,26,37,40c,56	W M M	W	kv
91E0	Alnetum incanae	60,71,10b,22b,26,37,40c,56	W M M	W	kv

Tab. 2: Bayerisches Wuchsgebiet 14 als Beispiel für die Zuordnung der natürlichen Waldgesellschaften

2.4 Modellierung mit regelbasiertem Expertenwissen

Mit Hilfe einer leicht nachvollziehbaren regelbasierten Methode wird die potenzielle natürliche Vegetation für Wuchsräume mit einheitlicher regionaler natürlicher Waldzusammensetzung ermittelt (WALENTOWSKI et al. 2002; WALENTOWSKI et al. 2004). Für die in diesen Gebieten möglichen Waldgesellschaften wurde eine Zuordnung der Standorteignung nach Bodensubstrat, Relieftyp, Wasserhaushalt und standortbedingten Zusatzmerkmalen erstellt.

Ähnlich wie die auf Fuzzy Logic bezogene Methode des Modells BERN (siehe Kapitel 2.2) geht auch diese Methode von einem Standortoptimum für die jeweiligen Standortfaktoren und einer ökologischen Nischenbreite aus. Daher werden Bereiche mit einer hohen, möglichen und auszuschließenden Standorteignungen für den jeweiligen Parameter definiert, ohne jedoch unscharfe Grenzen einzubeziehen.

2.4.1 Erarbeitung des Expertenwissens

Für die Erkennung der Wald-Lebensraumtypen gemäß Anh. I der FFH-Richtlinie (kurz LRT) wurde zunächst eine Vorauswahl getroffen, ob das Vorkommen einer natürlichen Waldgesellschaft in Abhängigkeit von bestimmten Geologie-, Boden- und Substrattypen sehr wahrscheinlich (W) oder generell möglich (M) ist (siehe Tabelle 2 beispielhaft für Wuchsgebiet 14).

Bodeninformationen

Zur Integration von Bodeninformationen wurde die Konzeptbodenkarte 1 : 25.000 (KBK 25) genutzt. Sie wird vom Bayerischen Geologischen Landesamt aus vorhandenen Unterlagen mit unterschiedlicher Aussagekraft abgeleitet, durch Geländebegehungen und Übersichtskartierungen ergänzt und gegebenenfalls korrigiert. Hinsichtlich der Grenzgenauigkeit und Informationssicherheit kann die KBK 25 den Standard der bisher veröffentlichten Bodenkarten nicht erreichen. In den Legendeneinheiten verbergen sich teilweise eine größere Anzahl an Bodenleit- und -begleitformen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Somit war eine eindeutige Ableitung hoher Standorteignung nur sehr selten zu gewährleisten.

Im Testgebiet Angelberger Forst lagen darüber hinaus digitale Informationen der forstlichen Standortkartierung vor. Auch diese wurden als Substratinformationen oder standortbezogene Zusatzinformationen in die Modellierung integriert. Da auf die forstliche Standortkartierung in Bayern nur im

Bereich des Staatsforstes zugegriffen werden kann, wurden Modellierungen mit und ohne diese Datengrundlage durchgeführt und verglichen (siehe Kapitel 3.4).

Informationen aus dem Höhenmodell

Auch hier wurde das Expertenwissen in Form von verschiedenen Relieftypen in die Modellierung integriert. Dabei wurden die aus dem Höhenmodell abgeleiteten Informationen über Höhenlage, Hangneigung (st – für steil), Exposition und Hangform (konvex - kv, konkav - kx, eben) speziellen bevorzugten Relieftypen (wie Tallage, Mulden, Schatt- und Sonnhänge, Kuppenlagen) zugeordnet.

Über die Einstufung von wahrscheinlichem oder möglichem Vorkommen hinaus wurden auch Standortfaktoren definiert, unter denen das Vorkommen einer natürlichen Wuchsgesellschaft auszuschließen war.

2.4.2 Schema der Modellierung

Die Geodaten wurden auf Grund der bestehenden Standorteignung über Bedingungen nach folgendem Schema kombiniert (siehe Abbildung 8):

1. Modellierung des wahrscheinlichen Vorkommens des LRT (W) und der auszuschließenden Standorte (A): Dabei wurde beispielsweise ausgeschlossen, dass Moorbücher (LRT *91D0 und seine Subtypen *91D2, *91D3) auf einer Braunerde vorkommen, während ihr Vorkommen auf Moorböden wahrscheinlich ist.
2. Modellierung der möglichen Vorkommen (M) des LRT: Als Beispiel ist das Vorkommen eines Hainsimsen-Buchenwaldes (LRT 9110) sowohl auf verschiedenen Relieftypen (Sonnhang, Kuppenlage, Steilhang) als auch für unterschiedliche Substrattypen (z. B. Sand, Feinlehm) möglich. Diese Geofaktoren schließen sich nicht räumlich aus. Daher kann ein Standort auf Grund eines oder mehrerer Parameter als potenzieller LRT in Frage kommen. Wenn dies der Fall war, wurde die Anzahl der Auftretensmöglichkeiten summiert.
3. Die berechneten Standorteignungen wurden nun kombiniert. Ein potenzieller LRT wurde für einen Standort zunächst danach gewählt, wo das Auftreten wahrscheinlich (W) ist. An Standorten ohne W wurde der LRT mit der größten Anzahl von Auftretensmöglichkeiten (M) verwendet.
4. In jeder Rasterzelle wird der dominierende LRT als potenzielle natürliche Waldgesellschaft ausgewiesen. Das Resultat ist ein flächendeckender Datensatz der pnW.

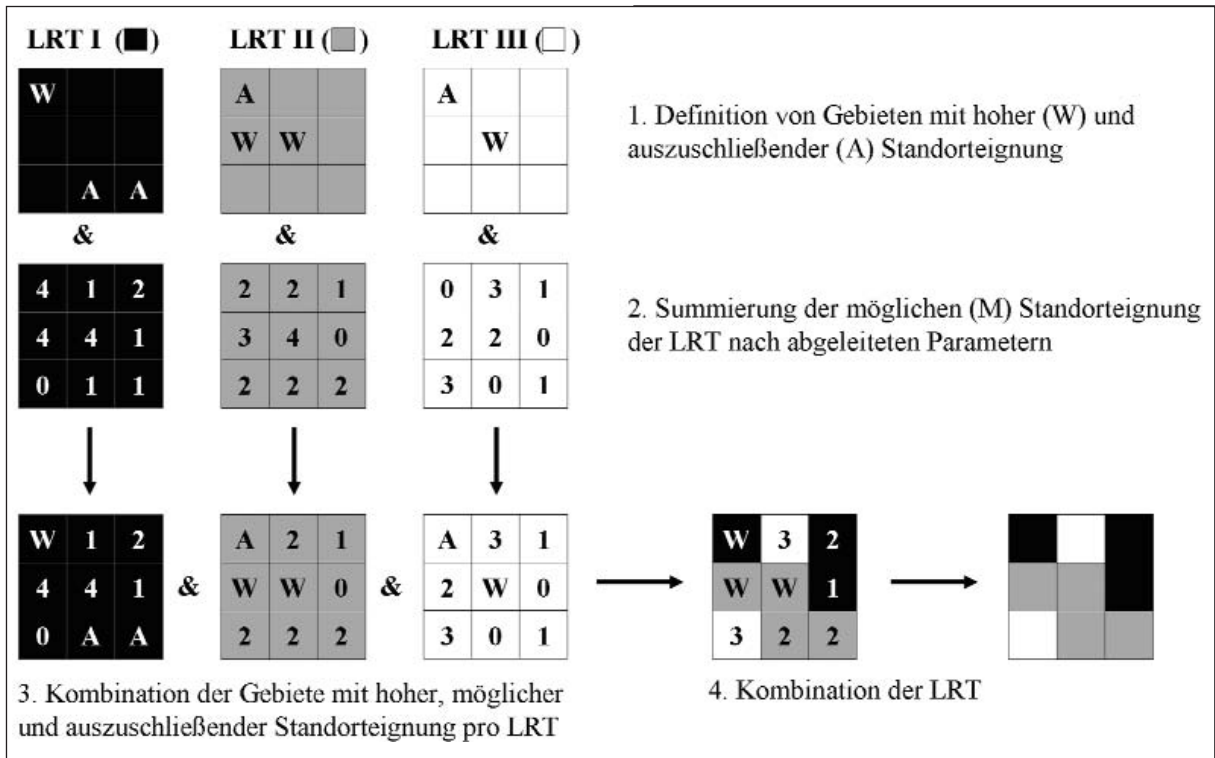


Abb. 8: Schema der regelbasierten Modellierung

2.4.3 Modellanwendung und Ergebnisse

Das Modell wurde auf die beiden Testgebiete angewandt. Dabei wurde ein flächendeckender Datensatz mit potenziellen natürlichen Waldgesellschaften für die beiden Testgebiete Taubenberg und Angelberger Forst erzeugt. Da auf ähnlichen Grundlagendaten aufgebaut, wies dieses Modell keine gravierenden Unterschiede in den hauptsächlich vorkommenden Lebensraumtypen zu der Fuzzy Logic Methode auf. Im Angelberger Forst dominieren danach die Buchenwaldgesellschaften (LRT 9110, LRT 9130) mit kleinen Bereichen von Auwäldern (LRT *91E0) in den feuchten Tallagen. Auf sehr kleiner Fläche wurde im Angelberger Forst ein Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwald (LRT 9160) modelliert.

Am Taubenberg ist die Anzahl der modellierten natürlichen Waldgesellschaften auf Grund der komplexeren Relief- und Bodenverhältnisse sowohl beim Fuzzy Logic Modell als auch beim regelbasierten Ansatz wesentlich größer (siehe Abb. 6 in Kapitel 2.2.3). Trotzdem dominieren auch hier Buchenwälder. Größere Bereiche des Taubenbergs werden auf Grund der extremeren pedologischen Verhältnisse (Sonderstandorte mit Podsolierung und hoher Bodenfeuchte) als bodensaure Nadelwälder (LRT 9410) ausgewiesen. Auch am Taubenberg werden die feuchten Tallagen als Auwälder (LRT

*91E0) erkannt. Auf Moorböden setzen sich in beiden Modellierungen die Moorwaldtypen (LRT *91D0) durch. In extrem steilen Bereichen werden Schlucht- und Hangmischwälder (LRT *9180) erkannt.

Da die Ergebnisse in Gebieten ohne forstliche Standortkartierung nicht immer eindeutig ausfallen, könnten für manche Flächen auch mehrere potenzielle LRTen angegeben werden (die dann bei der Kartierung im Gelände geprüft werden müssen). Mehrfachnennungen sollten eine Angabe der Modellierungssicherheit beinhalten (siehe Kapitel 5). Bei der Kombination der LRTen würde dann neben dem dominierenden LRT auch eine nachgeordnete Gruppe als LRT in Frage kommen.

2.5 Nutzen-Kosten-Analyse der geprüften Methoden

Um die Effizienz der Modellierungsansätze zu testen, wurden die aufgewendeten Zeitressourcen für sie dokumentiert.

Die Methode mittels **multivariater Clusteranalyse** (hier mit Ergebnissen der Reliefanalyse) Waldlebensraumtypen zu modellieren, eignet sich besonders gut für prioritäre Lebensraumtypen. Flächig verbreitete Buchenwald-LRT, die durch das

Nährstoffdargebot des Bodens differenziert sind, könnten dagegen nur unter Einbeziehung von zuverlässigen Angaben zur Basensättigung im Oberboden modelliert werden. Hochauflösende Daten dazu stehen in der Fläche nicht zur Verfügung. Um potenzielle prioritäre LRT in einer guten Vorhersagequalität zu modellieren, wurde ausschließlich auf die hochauflösende Datengrundlage des DGM zurückgegriffen. Die Ergebnisse ließen sich mit einem verhältnismäßig geringen Aufwand erzielen. So wurden die Berechnungen für die exemplarischen LRT für diese Pilotstudie in weniger als 40 Arbeitsstunden ermittelt. Diese Methode, die für die Modellierung von Reliefeinheiten für die Zwecke der Bodenkartierung auf Geodaten übertragen wurde, wurde inzwischen in den verschiedensten Maßstabsebenen angewendet. Sie kann auf bewährte Werkzeuge der Geoinformatik und der Reliefanalyse zurückgreifen und stellt ein hohes Maß an Effizienz zur Verfügung.

Für das **Fuzzy Logic Modell** und das **regelbasierte Modell** wurden die Aufgaben in einmalige Aufgaben (z. B. Erstellung einer Vegetationsdatenbank) und wiederkehrende Aufgaben (z.B. Kalibrie-

rung der Daten zu den vorliegenden Daten des Testgebietes) unterteilt (Tab. 3). Obwohl diese Zeitdokumentation nur einen sehr begrenzten Überblick über die geleistete Arbeit bietet und ein direkter Vergleich nur sehr bedingte Aussagen zulässt, können zumindest einige Tendenzen abgeleitet werden. Der regelbasierte Ansatz scheint eine größere Effektivität bei der Entwicklung der Grundlagen zu benötigen (165 h), während der Fuzzy Logic Ansatz die wiederkehrenden Aufgaben schneller bewältigen kann (24 bis 40 h). Dies ist sicherlich in der stärkeren Automatisierung des Fuzzy Logic Ansatzes innerhalb des Modells BERN begründet. Für eine Modellierung von NATURA 2000-Gebieten scheint deshalb dieser Ansatz vorteilhafter, speziell weil die Entwicklung auch eine Aussage über die Änderung des Ökosystems und deren Auswirkung auf die Pflanzengesellschaften im Rahmen eines Monitorings treffen kann. Dem gegenüber ist die regelbasierte Methode in eine weit verbreitete GIS-Software eingebettet (mit dem ArcGIS Model Builder), während das Modell BERN ein separates Softwarepaket ist.

	Benötigte Zeit (in Stunden)	
	regelbasiert	Fuzzy Logic
Einmalige Aufgaben		
Entwicklung der mathematischen und botanischen Basis Technische Umsetzung des Modells	35	30
Aufbereitung der Vegetationsdatenbank	130	160
Wiederkehrende Aufgaben (für jedes Gebiet)		
Validierung und Kalibrierung für die Testgebiete	30-40	8-24
Kartographische Aufbereitung der Resultate	16	16
Summe	211 - 221	214 - 230

Tab. 3: Aufgewendete Zeit für den regelbasierten und den Fuzzy Logic Modellierungsansatz

3 Potenziale der mittel- und hochauflösenden Fernerkundung

Die Einbeziehung von Fernerkundungsdaten zu Kartierung, Bewertung und Monitoring von Lebensraumtypen nach Anh. I der FFH-Richtlinie anhand spezifischer Qualitätsparameter (beschrieben u.a. in BURKHARDT et al. 2004; DRACHENFELS et al. 2005; FISCHER 2002; FISCHER et al. 2005) ist eine immer häufiger geforderte (GRANKE et al. 2004; LANG und LANGANKE 2005) Methode. In forstlichen Fragestellungen wird die satellitengestützte Fernerkundung für viele Anwendungsfelder, etwa Totholzerkennung, Inventurerhebung, Schädlingsprävention oder Analyse von Trockenfolgeschäden, verwendet. Dabei sind als Voraussetzung für eine erfolgreiche Verwendung der Daten das Vorhandensein von Spektralinformationen im infraroten Bereich und eine je nach Anwendung ausreichende geometrische Auflösung zu nennen. Die Aufstellung von BLASCHKE und FELBERMEIER (2003) in Tabelle 4 gibt einen guten Überblick über die Erkennungsgenauigkeit der Sensoren IRS (23 m), SPOT4 (5 m) und IKONOS (1 m) für forstliche Standardparameter.

Innerhalb des Praxistests wurde vorrangig die Möglichkeit von Sensoren im Bereich der geometrischen Auflösung von 5 m bis 15 m in Kombination mit Modellierungsergebnissen (siehe Kapitel 2) als Hilfestellung zur **Erfassung** erprobt. Dafür wurden die modellierten potenziellen natürlichen Waldgesellschaften mit den Ergebnissen der Klassifikation kombiniert (siehe Kapitel 3.4). Die Haupt- (H), Neben- (N) und Pionierbaumarten (P) der BAZ_{pot}

müssen mit einem bestimmten Mindestanteil (H > 30 %; H + N > 50; H + N + P > 70%) an der Kronenschirmfläche vorkommen, damit ein Bestand mit der BAZ_{ist} als Lebensraumtyp kartiert wird (SSYMANK et al. 1998; LANG et al. 2004).

Eine Erkennung von Vegetationsmerkmalen, wie sie von der LANA und der FCK zur **Bewertung** des „günstigen Erhaltungszustandes“ eines Wald-Lebensraumtyps gefordert werden (BURKHARDT et al. 2004 sowie http://www.bfn.de/03/030306_akwald.htm; MÜLLER-KROEHLING et al. 2004), sind nur mit sehr hochauflösenden Daten oder stereoskopischer Auswertung zu erbringen. Genauere Tests, die neben der Erfassung auch die Komponente der Bewertung mittels Fernerkundung beinhalten, werden demnächst stattfinden. Für den Taubenberg wurden dazu QuickBird-Aufnahmen vom 14. Juli 05, für den Angelberger Forst vom 11. August 05 geordert. Im Projekt „Informationssystem Hochgebirgsstandorte“ (BINNER et al. 2005) werden zur Zeit digitale, stereoskopische Farb-Infrarotbilder 1 : 10.000 aus einer Befliegung vom 20.6.2005 getestet.

Die Ergebnisse der diversen Studien sollen zudem gebündelt in ein standardisiertes **Monitoring** einfließen, das von einer grobmaßstäbigeren Erkennung von Änderungsmerkmalen auf Ebene der Biogeographischen Region bis hinab zur terrestrischen Erkennung von speziellen Merkmalen eines Lebensraumtyps in einem FFH-Gebiet gestaffelt ist (siehe Abb. 9 - rechts).

	23 m Auflösung	5 m Auflösung	1 m Auflösung
Kleinste erkennbare Baumart	Baumgruppen (mind. 30 m breit)	markante Altbäume; Trupps	Einzelbaum ab Stangenholz
Wald	möglich	gut	gut
Lücken	möglich	gut	gut
Baumarten	Nadel / Laub	Nadel / Laub / Latsche	Nadel / Laub / Latsche
Mischung	schwierig	gut	gut
Beschirmung	schwierig	geschlossen / licht – räumig / offen	geschlossen / licht / räumig / lückig / durchbrochen
Schäden	eventuell Totholz	eventuell Totholz	stehendes / liegendes TH
Alter	nicht möglich	schwierig (nur im Nadelwald)	gut (Dickung Stangen- / Altholz)

Tab. 4: Möglichkeiten der forstlichen Erkennung mit mittel- und hochauflösenden Fernerkundungsdaten (verändert nach BLASCHKE und FELBERMEIER 2003)

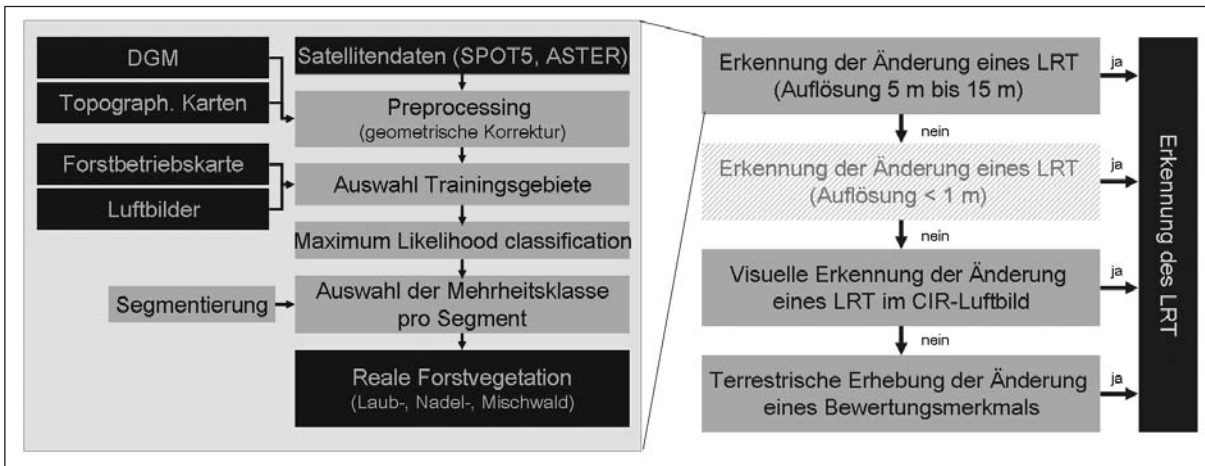


Abb. 9: Workflow der Erkennung der Änderung von LRTen in der Auflösung von 5 m bis 15 m als Teil eines gestuften Erkennungsverfahrens von FFH-Wald-Lebensraumtypen und deren Erhaltungszustand; da eine Erkennung mit sehr hoch aufgelösten Satelliten (< 1 m) nicht Teil des Projektes war, ist diese in der Graphik nur angedeutet.

Den Ablauf der Prozessierung der Satellitendaten zeigt Abbildung 9 (links). Um eine mögliche Übernahme der Methoden innerhalb der Forstverwaltung zu gewährleisten, wurden dafür Standardmethoden verwendet, die mit vorhandener GIS-Software (z. B. über den ArcGIS Image Analyst) zu verarbeiten sind. Die Satellitendaten der Sensoren SPOT5 und ASTER wurden für die Aufgabenstellung als geeignet identifiziert. Mit einer geometrischen Auflösung von 5 m (SPOT5) und 15 m (ASTER) und vorhandenen spektralen Bändern im nahen Infrarotbereich verfügen die Daten über die erforderlichen Voraussetzungen zur Walderkennung. Im Gegensatz zu sehr hochauflösenden Satellitendaten und Luftbildern sind sie leicht verfügbar und bieten eine kosteneffektive Hilfestellung, speziell bei flächendeckenden Erhebungen innerhalb eines gestuften Detektionsverfahrens beim NATURA 2000-Monitoring (Anforderungen gem. DocHab-04-03/03 rev.3).

3.1 Pre-Processing

Die Szenen von SPOT5 (Aufnahmedatum: 07.09.04 – Angelberger Forst) und ASTER (Aufnahmedatum: 19.09.04 – Taubenberg) wurden im Herbst 2004 aufgenommen. Für Vergleichszwecke wurde eine weitere ASTER-Szene vom Angelberger Forst (14.08.00) verwendet. Da die SPOT5 Szene als höher aufgelöster panchromatischer Kanal (5 m) und geringer aufgelöste multispektrale Bänder geliefert wurden, wurde zunächst ein pan-sharpening durchgeführt. Von den zur Verfügung stehenden Methoden des pan-sharpenings wiesen die Resultate des Wavelet-single-band-Verfahrens die geringsten Abweichungen zu den spektralen Werten des multispektralen Originals auf. Dies deutet

auf eine sehr genaue Co-registrierung der Sensoren von SPOT5 hin und wird bei dieser Voraussetzung für den Rechenprozess empfohlen (TERHALLE 2005). Es wurde daher zum weiteren Vorgehen verwendet.

Sowohl die ASTER als auch die SPOT5 wurden mit Hilfe des DGM georeferenziert. Da in den weiteren Prozessierungsschritten eine Kombination mit anderen Geodaten durchgeführt wird, wurde bei den Szenen jeweils auf Subpixelgenauigkeit (ASTER < 15 m; SPOT5 < 5 m) geachtet. Da innerhalb der Gebiete erhebliche Höhenunterschiede vorhanden sind, war eine topographische Normalisierung erforderlich. Deshalb wurde eine Minnaert-Korrektur durchgeführt (KLEINSCHMIT und COENRADIE 2005). Die Ergebnisse wurden anhand von Fallbeispielen auf Plausibilität geprüft. Dabei wurden anhand der forstlichen Betriebskarte eindeutig zu identifizierende Buchenbestände gleichen Alters auf verschiedenen Hangexpositionen verwendet.

3.2 Klassifikationsmethodik

Auf der Basis von gescannten und georeferenzierten Echtfarbenluftbildern und forstlichen Betriebskarten wurden Trainingsgebiete von allen vorhandenen Baumarten, Mischungsarten und Altersstrukturen aufgenommen. Da diese Mischung in Kombination mit unterschiedlichem Kronenschluss, Beschattungseffekten und variierendem Zwischen- und Unterstand nicht alle Klassen mit einer hinreichenden Genauigkeit für die folgende Anwendung erkennen ließ, wurden die Klassen schrittweise aggregiert (siehe Abb. 10). Mit Hilfe dieser kombinierten Trainingsgebiete wurde eine Maximum Likelihood Klassifikation durchgeführt. Das Resultat wurde mit Hilfe der Ergebnisse aus

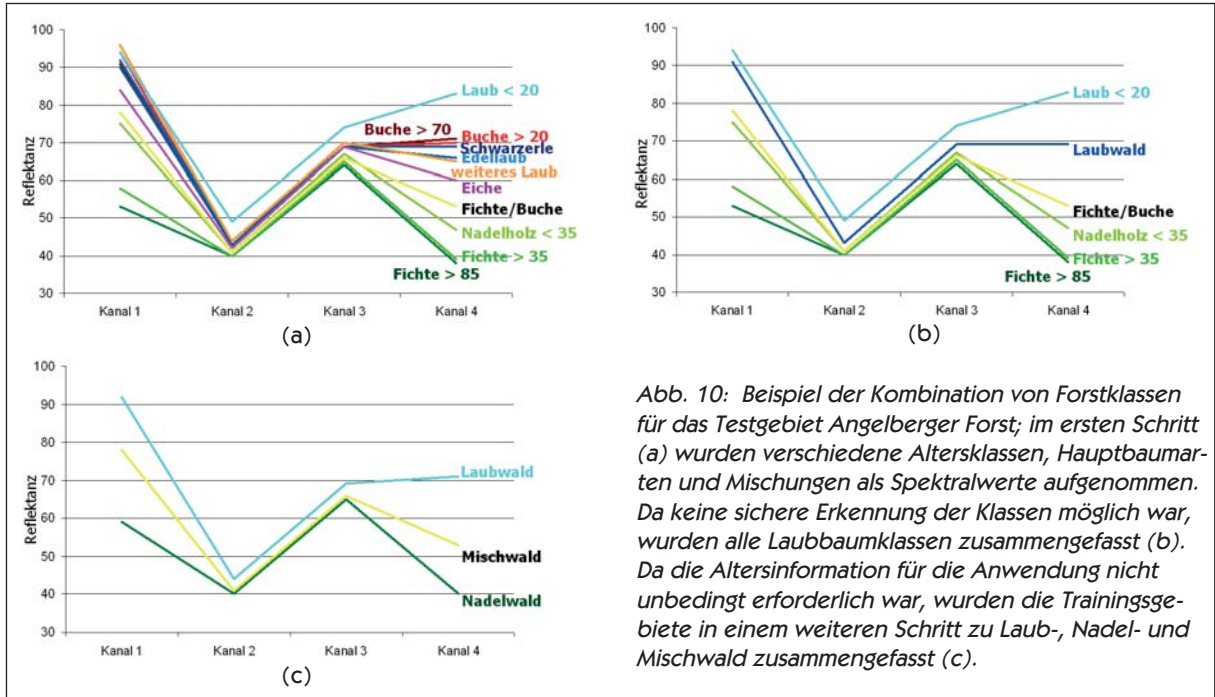


Abb. 10: Beispiel der Kombination von Forstklassen für das Testgebiet Angelberger Forst; im ersten Schritt (a) wurden verschiedene Altersklassen, Hauptbaumarten und Mischungen als Spektralwerte aufgenommen. Da keine sichere Erkennung der Klassen möglich war, wurden alle Laubbaumklassen zusammengefasst (b). Da die Altersinformation für die Anwendung nicht unbedingt erforderlich war, wurden die Trainingsgebiete in einem weiteren Schritt zu Laub-, Nadel- und Mischwald zusammengefasst (c).

der terrestrischen Kartierung und lokalem Wissen der Forstbehörden validiert.

Für das Testgebiet Angelberger Forst wurden die Klassen Laub-, Nadel- und Mischwald erkannt, während für das Testgebiet Taubenberg die Klassen Laub-, Nadel- ohne Tanne, Nadel- mit Tanne und Mischwald detektiert wurden. Das Resultat stimmt mit den Erfahrungen von BLASCHKE und FELBERMEIER (2003) überein (siehe Tabelle 4). Die Szenen wurden mit der Software eCognition 4 segmentiert. Den entstandenen Segmenten wurde die Mehrheitsklasse zugeordnet. So entstand ein homogeneres Gesamtbild, das sich leichter für die anschließende Kombination mit den Modellierungsergebnissen und die Luftbildauswertung verwenden ließ.

3.3 Auswertungsergebnisse der Sensoren ASTER und SPOT5

Die Ergebnisse der Klassifikation können für das Testgebiet Angelberger Forst für die Sensoren ASTER und SPOT5 gegenüber gestellt werden (siehe Abbildung 11). Ein genauer statistischer Vergleich ist auf Grund des zeitlichen Abstands der Szenen von mehr als vier Jahren nicht möglich, aber es ist zu beobachten, dass für die SPOT5-Szene mit höherer geometrischer Genauigkeit auch ein detaillierteres Resultat möglich ist. Dies liegt auch an einer genaueren Segmentierung.

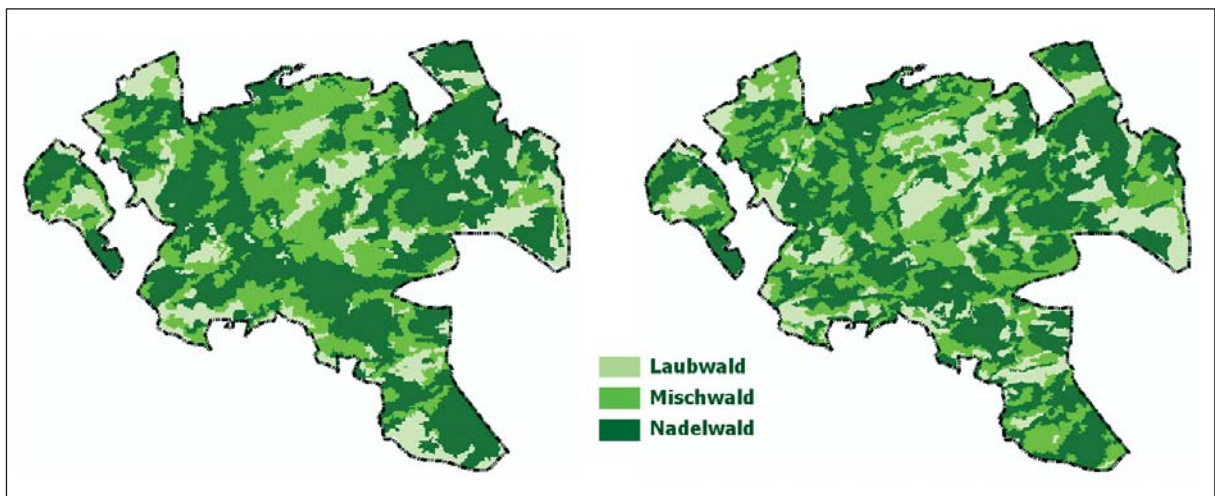


Abb. 11: Klassifikation von ASTER (links) und SPOT5 (rechts) im Testgebiet Angelberger Forst

3.4 Kombination der Ergebnisse der Modellierung und der Fernerkundung

Die Resultate der Modellierungen wurden mit den Klassifikationen der Testgebiete in Bezug gesetzt. In der Waldlebensraumtypen-Karte wurde der Lebensraumtyp nur dort ausgewiesen, wo die klassifizierte reale Vegetation mit der potenziellen natürlichen Vegetation des modellierten Lebensraumtyps korrespondiert (siehe Abbildung 12). Ein Beispiel wäre die Erkennung einer potenziellen natürlichen Buchenwaldgesellschaft, die nicht als Lebensraumtyp ausgewählt wird, wenn das Klassifikationsergebnis das Gebiet als Nadelwald ausweist.

Die Resultate wurden mit den terrestrisch kartierten Wald-Lebensraumtypen der Testgebiete verglichen (siehe Tabelle 5). Ein großer Teil der kartierten Lebensraumtypen konnte auch von dem mit der Klassifikation kombinierten Modell erkannt werden. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn

Satellitendaten mit hoher geometrischer Auflösung (SPOT5) verwendet wurden (verwendet im Angelberger Forst). Die regelbasierte und die Fuzzy Logic Methode erzielten im Vergleich zur terrestrischen Kartierung ähnliche Ergebnisse. Mit der Ausnahme von *Luzulo-Fagetum* (LRT 9110) wurden beim Fuzzy Logic Ansatz jedoch leicht bessere Werte erreicht. Ein zusätzlicher und wichtiger Faktor ist die Verwendung der forstlichen Standortkartierung (FSK). Wenn diese verwendet wurde, waren die Resultate in der Regel besser. Dies wundert nicht, da speziell die Bodeninformationen in einer höheren geometrischen und inhaltlichen Auflösung vorliegen. Es wurde deutlich, dass sowohl das Fuzzy Logic Modell als auch das regelbasierte Modell dazu tendieren, Lebensraumtypen mit sehr speziellen und kleinräumigen Standortansprüchen zu unterschätzen (z. B. Auenwälder - LRT *91E0 sowie Hang- und Schluchtwälder - LRT *9180).

Der LRT der Hang- und Schluchtwälder (LRT *9180) wurde von der multivariaten Clustering-

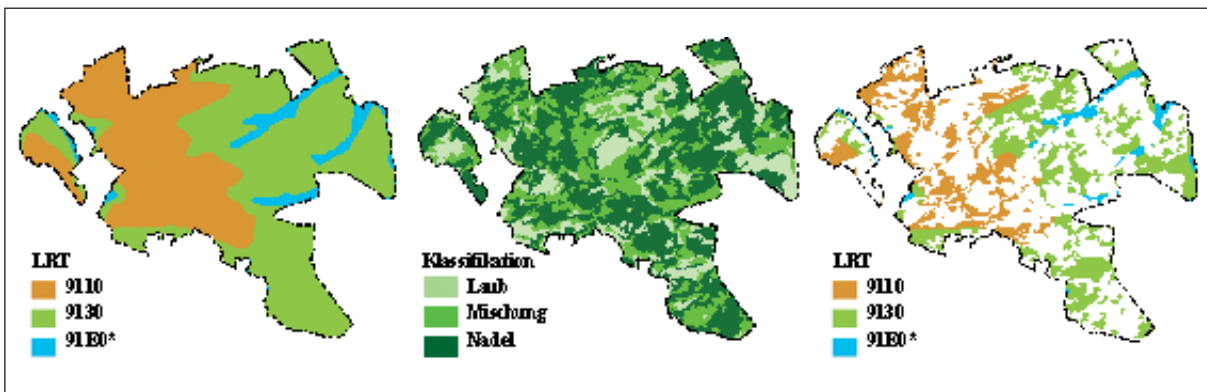


Abb. 12a: Modelliertes Lebensraumtypen-Potenzial (links), reale Vegetation, klassifiziert mit SPOT5 Daten (Mitte) und Kombination zu einer Wald-Lebensraumtypen-Karte (rechts) für den Angelberger Forst (Beispiel der Fuzzy Logic Methode)

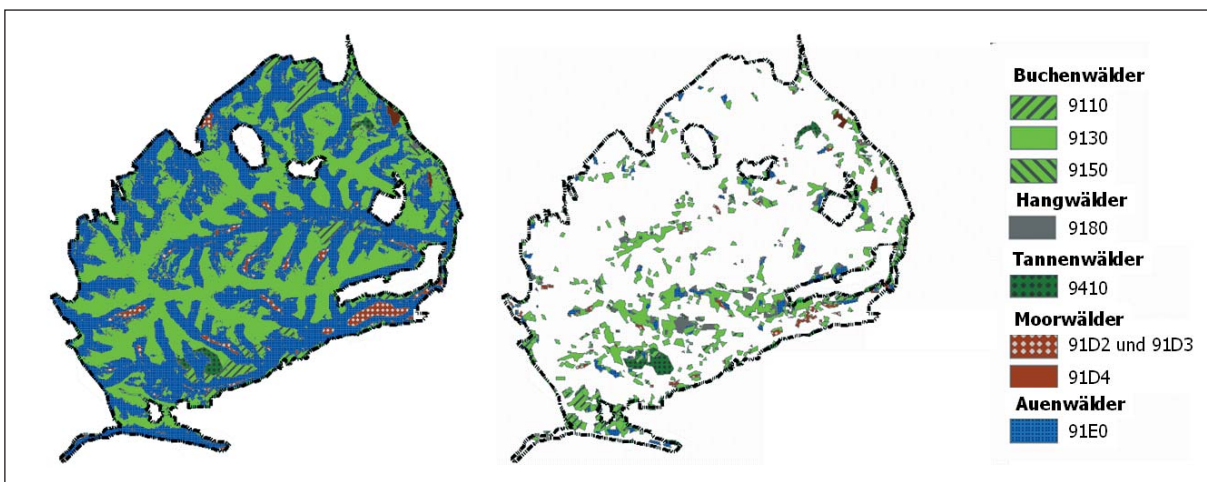


Abb. 12b: Modelliertes Lebensraumtypen-Potenzial (links) und vorläufige Wald-Lebensraumtypenkarte (rechts) für den Taubenberg (Beispiel der regelbasierten Methode)

technik wesentlich besser erkannt. Hier wurden 80 % der Gebiete erkannt, während regelbasierte und Fuzzy Logic Methode nur 40 % der Gebiete erkennen konnten. Innerhalb dieses Projektes wurde das multivariate Clustering nur für diesen Lebensraumtyp angewandt. Trotzdem ist davon auszugehen, dass dieser Modellierungsansatz

besonders in reliefbestimmten Gebieten wie dem Alpenraum besonders erfolgreich angewendet werden kann.

Lebensraumtyp	Regelbasierte Methode			Fuzzy Logic Methode			Clustering der Relieftypen Taubenberg ohne FSK (in %)
	Angelberger Forst mit FSK (in %)	Angelberger Forst ohne FSK (in %)	Taubenberg ohne FSK (in %)	Angelberger Forst mit FSK (in %)	Angelberger Forst ohne FSK (in %)	Taubenberg ohne FSK (in %)	
9110	95.4	92.3	62.5	68.0	60.3	72.4	n.v.
9130	70.6	66.0	76.9	74.8	72.0	92.3	n.v.
*9180	n.v.	n.v.	40.0	n.v.	n.v.	40.0	80.0
9410	n.v.	n.v.	66.7	n.v.	n.v.	66.7	n.v.
*91D2 – *91D4	n.v.	n.v.	80.0	n.v.	n.v.	85.7	n.v.
*91E0	91.7	58.8	46.2	75.0	53.3	73.1	n.v.
9160	88.2	73.9	n.v.	86.7	n.v.	n.v.	n.v.

Tab. 5: Exemplarischer Vergleich der drei Modellansätze mit den Ergebnissen der terrestrischen Kartierung; der Angelberger Forst wurde mit und ohne die forstliche Standortkartierung verglichen. „n.v.“ steht für „nicht verfügbar“, da der Lebensraumtyp in dem jeweiligen Gebiet nicht existiert oder der Lebensraumtyp aus Gründen der Modellbeschränkungen nicht modelliert wurde.

4 Potenziale der Luftbildinterpretation

4.1 Verwendete Daten

Für die beiden Testgebiete lagen vom Bayerischen Landesamt für Vermessung und Geoinformation Echtfarben-Luftbilder im Maßstab 1:12.400 mit einer Bodenauflösung von 0,4 m und einer Scanauflösung von 317 dpi vor. Die Bilder vom Taubenberg wurden am 10.06.2003, jene vom Angelberger Forst am 07.05.2003 aufgenommen.

Im Gegensatz zu den für das FFH-Gebiet Angelberger Forst vorhandenen Luftbildern erwiesen sich die Luftbilder für das FFH-Gebiet Taubenberg als äußerst kontrastarm (vgl. Abbildung 13). Zusätzlich waren in dem Bildmaterial beider Gebiete störende Artefakte aus dem Scanprozess vorhanden, die die Interpretation zum Teil beeinträchtigten.

4.2 Methodik

Mit Hilfe der visuellen stereoskopischen Luftbildinterpretation wurden die Potenziale des Luftbildeinsatzes bei der Kartierung von FFH-Lebensraumtypen untersucht. Die GIS-Modellierung auf der Basis von digitalem Geländemodell, Konzeptbodenkarte und Standortskarte liefert potenzielle Lebensraumtypen (Soll). Die Fernerkundung liefert über die Satellitenbildklassifizierung und die Luftbildinterpretation das Ist. Stimmen Soll und Ist

überein, handelt es sich um einen FFH-Lebensraumtyp. Flächen, auf denen Soll und Ist nicht zusammenpassen, werden als „Sonstiger Lebensraum“ ausgeschieden.

Die Satellitenbildklassifizierung liefert eine grobe vorläufige Lebensraumtypenkarte, die die Interpretation der Luftbilder verfeinert. Die Möglichkeiten der Ausscheidung von Baumarten auf dem Luftbild gehen über die Möglichkeiten mit Satellitendaten (SPOT und ASTER) weit hinaus. Des Weiteren erlaubt die Luftbildinterpretation eine Ausformung der automatisiert gelieferten Polygone, die der Realität besser entsprechen. Interpretieren, die das Gebiet nicht kannten, werteten die Luftbilder aus. Damit wurde verhindert, dass Kontextwissen aus der terrestrischen Kartierung mit in die Interpretation einfließen konnte. Das Ergebnis ist eine vorläufige Lebensraumtypenkarte. Zum Vergleich wurde noch eine „Null-Variante“ mit reiner Luftbildinterpretation hinzugezogen. Somit wurden vier Varianten ausgewertet:

1. Reine Luftbildinterpretation;
2. Luftbildinterpretation auf der Basis der Standortskarte;
3. Luftbildinterpretation auf der Basis der Modellierung der potenziellen Lebensraumtypen (ohne Standortskarte); da zum Zeitpunkt der Kartierung nur die Ergebnisse der regelbasierten Modellierung vorlagen, wurden diese verwendet.

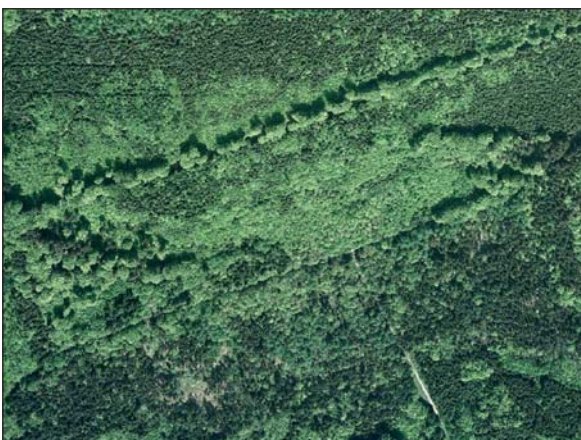


Abb. 13: linkes Bild: Echtfarbenbild aus dem Testgebiet Angelberger Forst; rechtes Bild: Echtfarbenbild aus dem Testgebiet Taubenberg; die Unterscheidung von Laubbäumen (hellgrün) und Nadelbäumen (dunkelgrün) ist auf dem linken Bild auf Grund seiner deutlich besseren Kontrastierung wesentlich zuverlässiger möglich.

4. Luftbildinterpretation auf der Basis der unter Zuhilfenahme der Standortskarte modellierten potenziellen Lebensraumtypen.

Die Erhebung forstlicher Parameter aus Luftbildern stellt hohe Anforderungen an den Interpreten. Allein die Ansprache von Form, Struktur und Reflexion der Baumkrone im räumlichen Bild ermöglicht deren hinreichend sichere Baumartenbestimmung. Die dreidimensionale Wahrnehmung des Bildes erleichtert die Ansprache von Baumart und Altersphase erheblich (HILDEBRANDT 1996).

Die digitalen Luftbilder wurden daher unter Verwendung der Software Stereo Analyst für ArcGIS 9.0 interpretiert. Dabei können gleichzeitig an zwei Bildschirmen verschiedene Datengrundlagen zum selben Objekt angezeigt und bearbeitet werden (siehe Abb. 14). Darüber hinaus wurden zur Vereinfachung der Lebensraumtypenansprache die digitalen Höhengichtlinien der Topographischen Karte 1:25.000 (TK25)² am Bildschirm einblendet. Die Interpretation der Echtfarbenorthophotos im Angelberger Forst erfolgte auf Grund technischer Probleme anstelle der ursprünglich

dafür vorgesehenen ArcGIS-Version des Stereo Analyst mit ArcView GIS 3.3.

Zur Abgrenzung einzelner LRTen konnte im Rahmen der Pilotstudie aus Zeitgründen kein eigenständiger neuer Interpretationsschlüssel für die Kartierung von LRTen aus Echtfarben-Luftbildern erstellt werden. Die Delinierung erfolgte in Anlehnung an bestehende CIR-Luftbildschlüssel (AFL 1998; AFL 2003) sowie auf Grund von Expertenwissen der Interpreten. Die Ergebnisse lassen sich damit subjektiv und methodisch nicht auf andere Gebiete übertragen. Für eine erste kritische Aussage zum Einsatz von Farb-Luftbildern zur Kartierung von FFH-Lebensraumtypen sind die Ergebnisse auswertbar.

4.3 Ergebnisse aus dem Testgebiet „Taubenberg“

Das verwendete Bildmaterial vom Taubenberg schloss auf Grund seiner Kontrastarmut (siehe Abbildung 13, rechtes Bild) eine sichere Differenzierung der Baumarten innerhalb der Baumartengruppen „Nadelholz“ und „Laubholz“ nahezu aus.

² Quelle: Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation

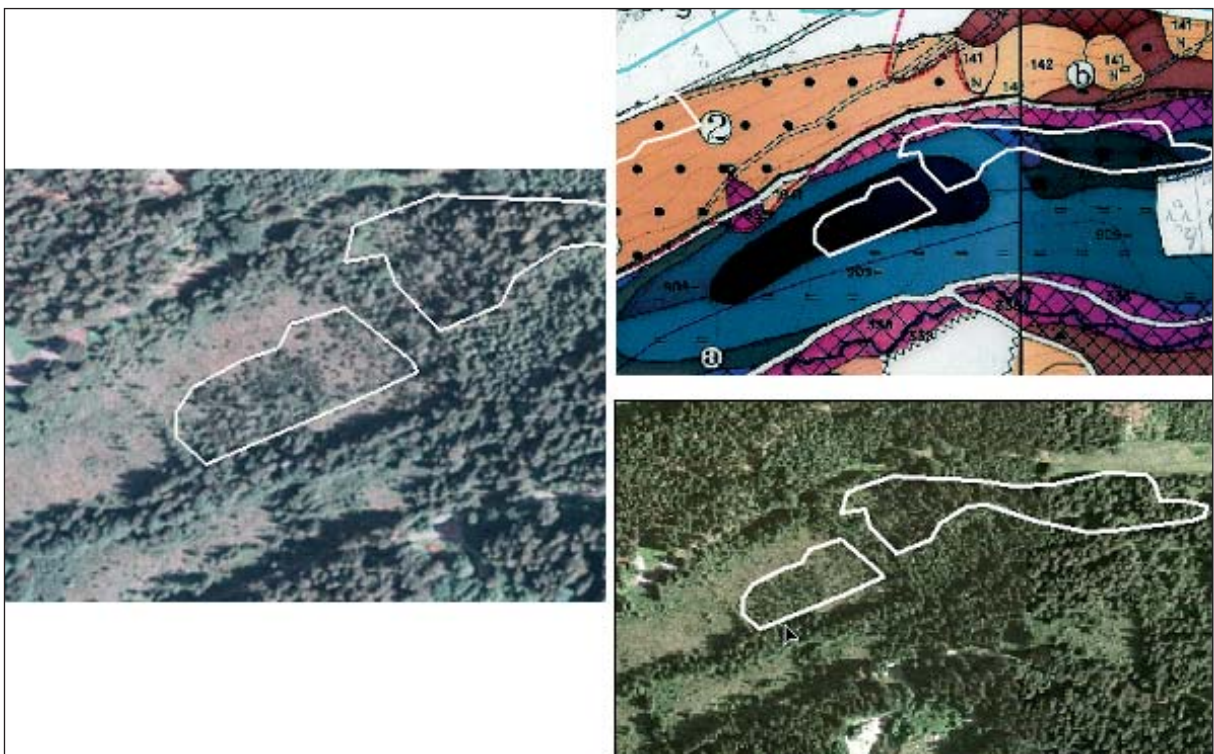


Abb. 14: Beispiel für zwei Ansichten desselben Objektes, das der Stereo Analyst auf zwei Monitoren parallel anzeigt. Linkes Bild: stereoskopische Anaglyphenabbildung einer Moorfläche mit der entsprechenden Abgrenzung als Lebensraumtyp (weiße Linie); rechtes Bild: die Abgrenzung im Stereobild (weiße Linie) wird automatisch auf eine georeferenzierte Standortskarte übertragen (oben) oder kann alternativ dazu im Orthophoto auf ihre Lagegenauigkeit überprüft werden (unten).

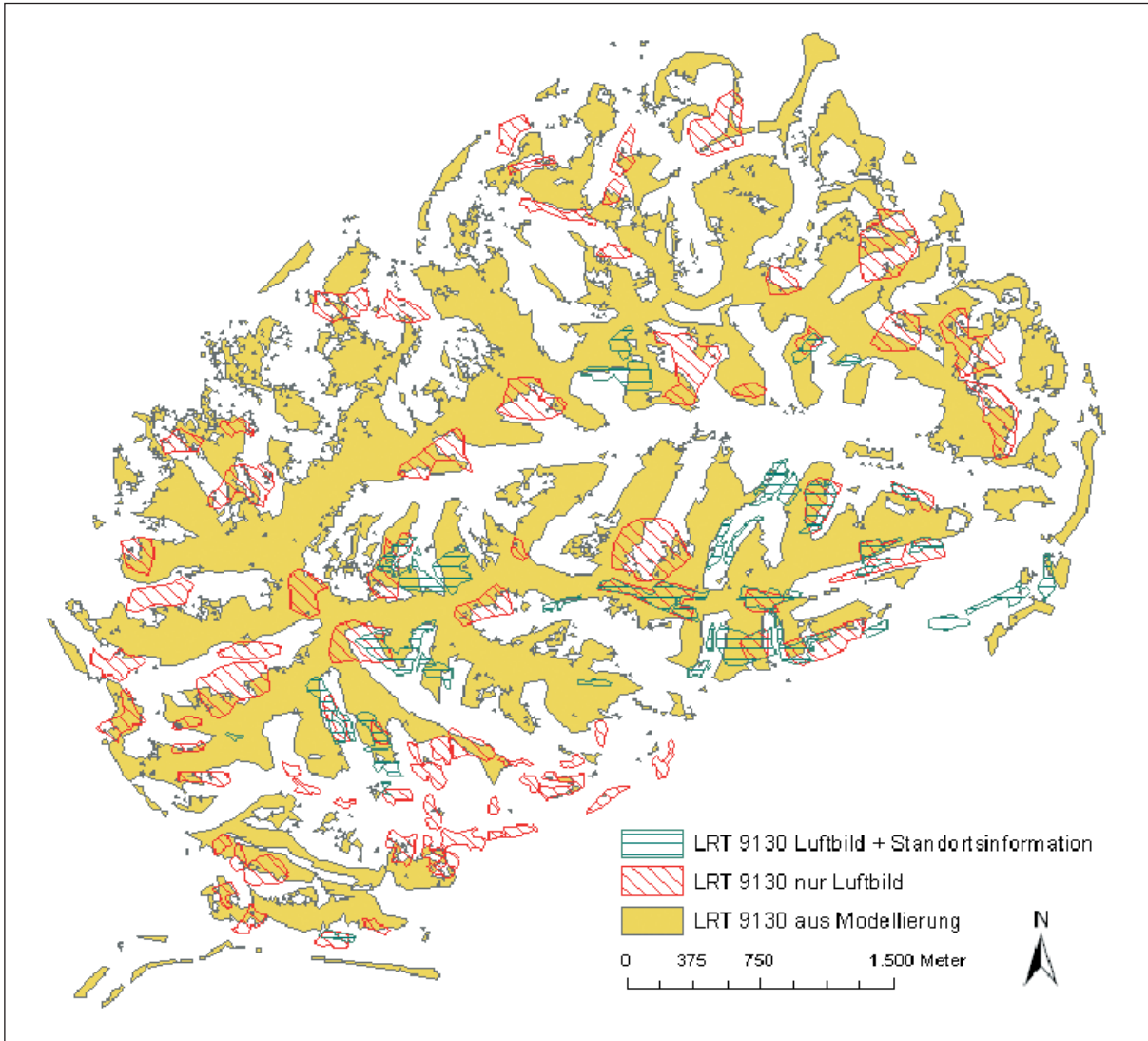


Abb. 15: Ergebnisse der Luftbildinterpretation mit und ohne Information aus den Ergebnissen der forstlichen Standortserkundung (Luftbildkartiervarianten 1 und 2); im Vergleich dazu die aus der Modellierung stammenden Ergebnisse

Dies ist im vorliegenden Fall besonders nachteilig, da im FFH-Gebiet Taubenberg

- ◆ Wälder des Lebensraumtyps 9130 (Waldmeister-Buchenwald) mit sehr hohen Tannenanteilen,
- ◆ bodensaure Fichtenwälder (LRT 9410) sowie
- ◆ hohe Flächenanteile von prioritären, bachbegleitenden Erlen-Eschenwäldern (LRT *91E0) vorkommen.

Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden exemplarisch am Beispiel der laut Modellierungsergebnis am häufigsten auftretenden Lebensraumtypen 9130 (Waldmeister-Buchenwald) mit der Kartiervariante 1 und 2 dargestellt (Abbildung 15).

Die regelbasierte Modellierung für das Testgebiet Taubenberg ergab bedeutende Flächenanteile

für den Lebensraumtyp 9130 (Waldmeister-Buchenwald). So wurde dieser Lebensraumtyp auf fast allen Geländeerhebungen modelliert. Auf Grund der vorliegenden Echtfarben-Luftbilder konnte die Abgrenzung der vielfach tannenreichen Wälder (WALENTOWSKI et al. 2005) nicht zuverlässig vorgenommen werden und stimmt somit nur in Einzelfällen mit den Ergebnissen aus der forstlichen Standortserkundung überein. Die Erkennung dieses LRT auf dem Luftbild stellt eine große Schwierigkeit dar, da ein großer Anteil an Wäldern mit hohem Tannenanteil diesem LRT zugeordnet wurde. Erkennung von Tannen, speziell Jungwuchs, ist ohne Informationen über das spektrale Verhalten im Infrarotbereich nicht möglich. Die Modellierung stellte erwartungsgemäß die Senken und Einhänge des Testgebietes als Lebensraumtyp *91E0 dar. Auf

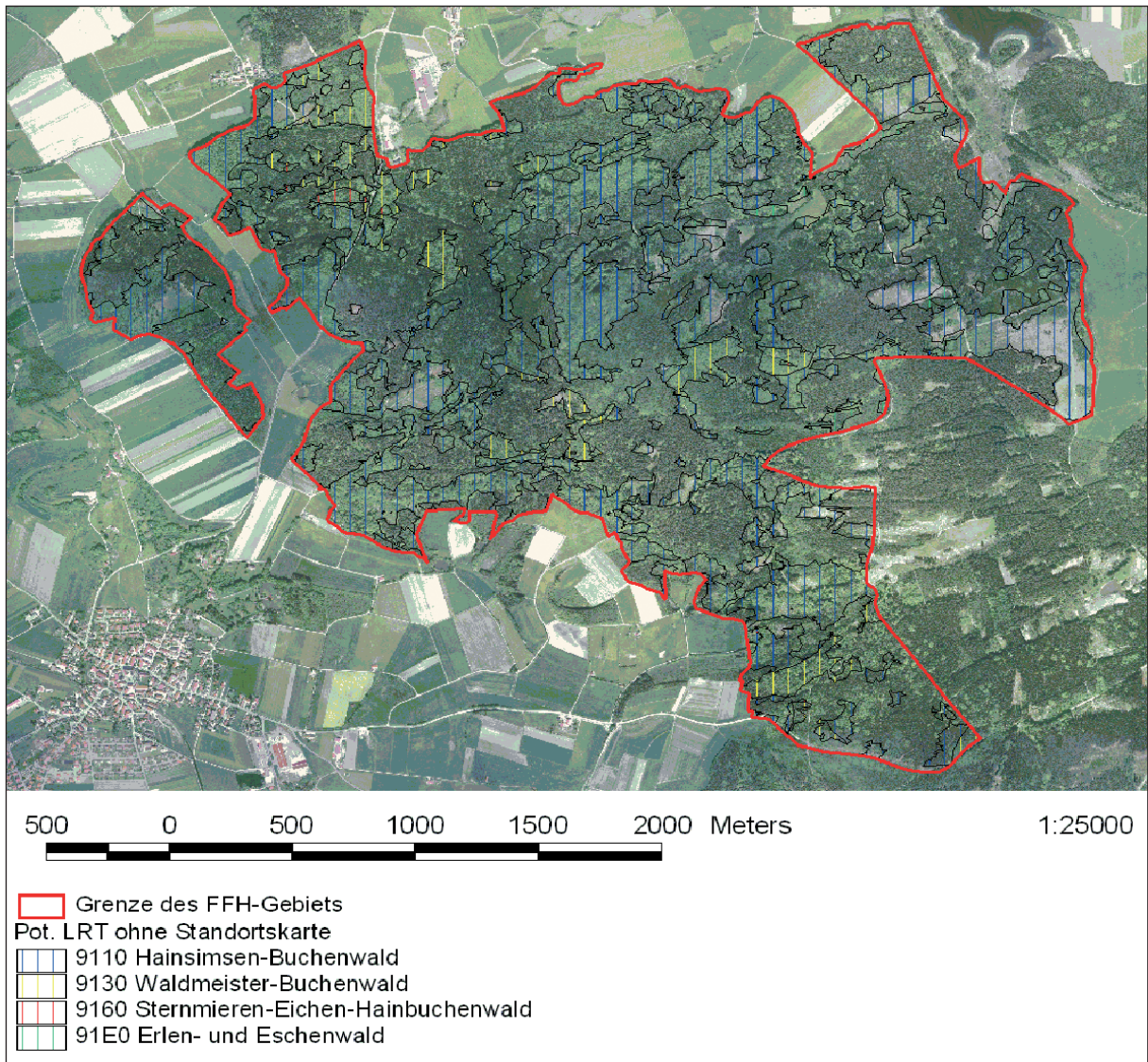


Abb. 16: Luftbild mit überlagerten Ergebnissen der Modellierung der potenziellen Wald-Lebensraumtypen ohne Einbeziehung der Standortkarte

Grund des kontrastschwachen Luftbildmaterials konnte von Seiten der Luftbildinterpretation keine Differenzierung zwischen den einzelnen Laubbaumarten vorgenommen werden, so dass unter Verwendung des Luftbildes allein nahezu keine Flächen abgegrenzt wurden. Die Verwendung der Standortkarte ergab Hinweise auf potenzielle *91E0-Lebensraumflächen.

4.4 Ergebnisse aus dem Testgebiet „Angelberger Forst“

Für den Angelberger Forst werden im Folgenden exemplarisch die Ergebnisse der Kartiervariante drei, Luftbildinterpretation auf der Basis der Modellierung der potenziellen Lebensraumtypen (ohne

Standortkarte, mit Satellitenbildklassifizierung), vorgestellt. Abbildung 16 zeigt die Lage der modellierten vorläufigen Lebensraumtypen.

Ein Ausschnitt der Überlagerung der modellierten vorläufigen Lebensraumtypen mit den Ergebnissen nach der Luftbildinterpretation ist in Abbildung 17 zu sehen. Die sowohl horizontal als auch vertikal gestreiften Bereiche liegen dort, wo Modellierung/Satellitenbildklassifizierung und Luftbildinterpretation übereinstimmen.

Die vorläufige Lebensraumtypenkarte (Abbildung 18) soll abschließend anhand eines terrestrischen Begangs zur endgültigen Lebensraumtypenkarte überarbeitet werden. Ziel des beschriebenen Vorgehens ist es, diesen Begang auf ein Minimum zu reduzieren.

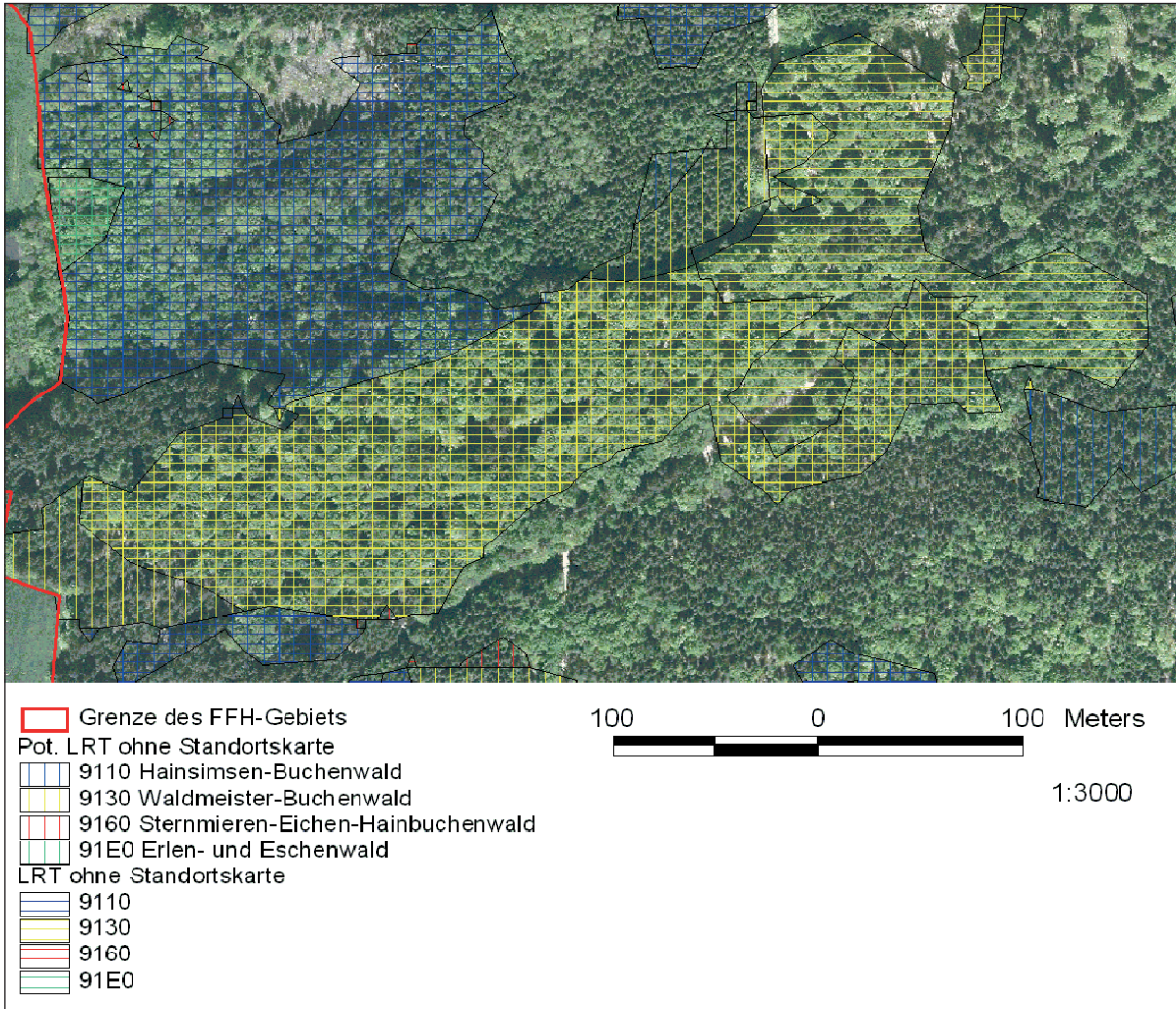


Abb. 17: Vorläufige Lebensraumtypen (horizontal gestreift) nach Interpretation der potenziellen Lebensraumtypen (vertikal gestreift) auf dem Luftbild; die sowohl horizontal als auch vertikal gestreiften Bereiche liegen dort, wo Modellierung und Luftbildinterpretation übereinstimmen.

4.5 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Zur Evaluierung der Ergebnisse wurden die Resultate der Kartierung mit den bereits durchgeführten terrestrisch kartierten Lebensraumtypen verglichen. Wie oben beschrieben, litt die Luftbildinterpretation insbesondere am Taubenberg unter schlechtem Luftbildmaterial. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse können in der Zukunft durch den Einsatz von Farb-Infrarotbildern erheblich verbessert werden. Abbildung 19 zeigt einen Vergleich zwischen einem Echtfarben- und einem Farb-Infrarotbild.

Wie die Abbildung 20 zeigt, verbesserte die Einbeziehung von Daten aus der Standortkartierung oder der modellierten Lebensraumtypen die Interpretationsergebnisse.

Die Lebensraumtypen 9110 (Hainsimsen-Buchenwald) und 9130 (Waldmeister-Buchenwald) differenzieren sich durch die Nährstoffversorgung der Böden. Daher sind sie auf dem Luftbild nicht zu unterscheiden. Die Modellierung der Nährstoffverhältnisse mit dem Digitalen Geländemodell und der Konzeptbodenkarte ist nicht möglich. Daher ist die Standortkartierung in diesem Fall der Modellierung auf der Basis von Digitalem Geländemodell und Konzeptbodenkarte weit überlegen.

Der LRT 9160 Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwald kommt im Angelberger Forst nur in sehr kleinflächiger, eher untypischer Ausprägung (untere Erfassungsschwelle) vor, ein Spezialfall, der die Interpretation auf dem Luftbild kaum ermöglicht. Die bachbegleitenden Erlen-Eschenwälder (LRT *91E0) konnten weitgehend nur mit Standortkarte und/oder Modellierung kartiert werden. Gerade

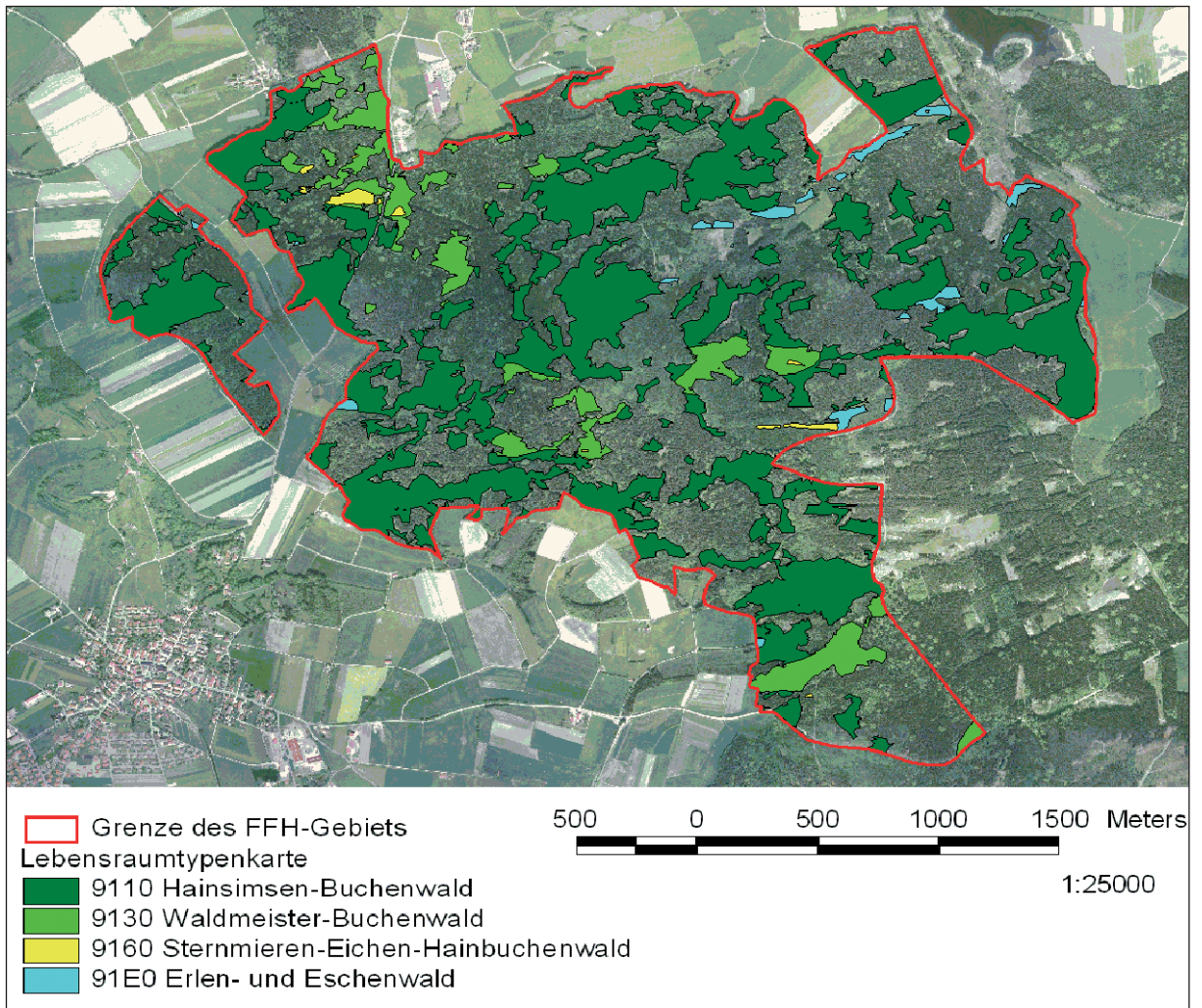


Abb. 18: Vorläufige Lebensraumtypenkarte für den abschließenden Begang



Abb. 19: Gegenüberstellung der Differenzierbarkeit von Baumarten im Farbinfrarot-Luftbild³ (links) und im Echt-farben-Luftbild⁴ (rechts); während sich im Farbinfrarot-Luftbild deutlich dunkle Partien (Nadelholz) und helle Partien (Laubholz) voneinander abheben, zeigt sich diese Differenzierung im Echt-Farb-Luftbild nicht.

³ Quelle: Befliegung im Auftrag der Staatsforstverwaltung

⁴ Quelle: Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation

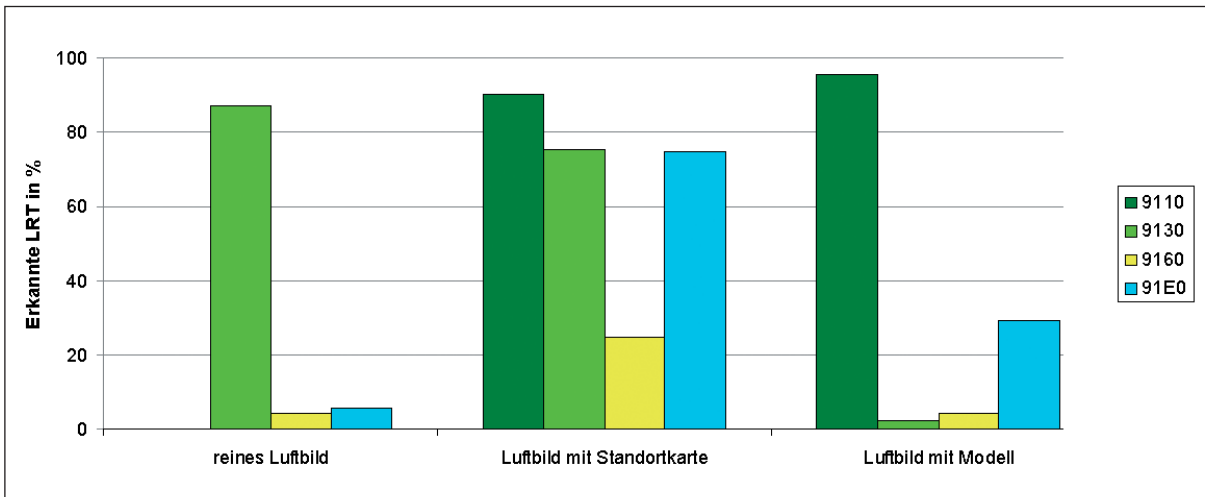


Abb. 20: Erkennung der LRT mit verschiedenen Hilfsmitteln (Angelberger Forst); bei der Bewertung des reinen Luftbildes wurde der LRT 9110 nicht erkannt.

hier lässt der Einsatz von Farb-Infrarotluftbildern eine Verbesserung erwarten.

Fazit ist, dass die im Testgebiet Angelberger Forst durchgeführte Modellierung mit einem mittel auflösenden Oberflächenmodell (DGM 25: Gitterweite 50 m) zwar eine Verbesserung gegenüber der reinen Luftbildinterpretation erbrachte, aber keine ausreichend sicheren Ergebnisse (Abbildung 20).

Technisch ermöglicht die GIS-gestützte stereoskopische Interpretation digitaler Luftbilder die Abgrenzung und Interpretation von Lebensraumtypen vor dem Hintergrund einer GIS-Umgebung. Dadurch werden die erfassten Informationen direkt in einer vordefinierten Datenbankstruktur abgelegt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Abgrenzung im stereoskopischen Luftbild, die gleichzeitig auf

ihre Plausibilität hin überprüft werden kann (z. B. in der Standortkarte) als auch z. B. auf ihre Lagegenauigkeit (Orthophoto) hin. Eine differenzierte Aussage über die mögliche Flächenleistung bei der digitalen stereoskopischen Luftbildinterpretation kann aus den vorhandenen Arbeiten noch nicht abschließend abgeleitet werden. Dies wird derzeit im Rahmen des Projektes „Informationssystem Hochgebirgsstandorte“ geprüft.

Insgesamt ermöglicht die stereoskopische Luftbildkartierung unter Einbeziehung von Zusatzdaten die Erstellung einer vorläufigen Lebensraumtypenkarte, die als Ausgangsbasis für einen effizienten terrestrischen Begang herangezogen werden kann.

5 Diskussion der Projektergebnisse

Die Resultate dieser Pilotstudie zeigten Möglichkeiten des Einsatzes von GIS-Modellierung und unterschiedlicher Fernerkundungsauswertungen von Wald-Lebensraumtypen im Kontext von NATURA 2000. Diese Methoden unterstützen die terrestrische Kartierung effektiv. Dies ist sowohl innerhalb als auch außerhalb der Grenzen der heute ausgewiesenen NATURA 2000 Gebiete möglich.

Abweichungen zwischen Modell und Realität sind sicherlich vor allem der Tatsache geschuldet, dass sich nur sehr wenige Teile des europäischen Waldes heute noch in einem natürlichen Zustand befinden (UNEP WORLD CONSERVATION MONITORING CENTRE 2000). Der Wald wird seit langer Zeit von Menschen für ökonomische, touristische oder Jagdzwecke genutzt, um nur einige offensichtliche anthropogene Einflüsse zu nennen. Neben Abwandlungen durch Nutzungseinflüsse sind weitere unsichere Eingangsgrößen zu nennen, z. B. Walddynamik sowie standörtliche und arealgeographische Variabilität. Trotzdem wird in der Modellierung von einer konkreten „natürlichen Baumartenzusammensetzung“ ausgegangen, und zwar von einer Waldgesellschaft in der Optimalphase, die auf einem in einer konkreten Höhenstufe eines Wuchsgebietes für sie typischen Standort wächst.

Der gedachte Zustand der potenziellen natürlichen Vegetation wird im vorgestellten Ansatz mit der Realität in Bezug gesetzt, indem die Modellierungsergebnisse („es wäre eine Baumartenzusam-

mensetzung BAZ_{pot} zu erwarten“) mit den Fernerkundungsklassifikationen („aktuelle Baumartenzusammensetzung BAZ_{ist} “) in Übereinstimmung gebracht wird (vgl. Kap. 3).

Die hier vorgestellte Studie zielte auf eine möglichst genaue Wiedererkennung der im Gelände kartierten Lebensraumtypen. Mit diesem Ziel verbinden sich gleich mehrere Schwierigkeiten. Zum einen sind die Lebensraumtypen in der Realität nicht immer klar voneinander oder von Nicht-Lebensraum zu unterscheiden. Die Übergänge sind oft über die Mischung der Haupt-, Neben- und Pionierbaumarten nur graduell zu registrieren. In schwierigen Fällen können selbst bei Einbeziehung von Bodenvegetation und Bodenmerkmalen bei der terrestrischen Kartierung Abgrenzungsprobleme auftreten („Kontinuums-/Diskontinuums-Problematik“, vgl. DOBLER 2005). Aus diesem Grunde ist die Verwendung der terrestrischen Kartierungsergebnisse als Validierungsgrundlage für die modellierten Grenzen nur bedingt möglich.

Besonders die hinsichtlich ihrer BAZ_{ist} , ihrer Flächengröße oder Ausformung nahe der unteren Erfassungsschwelle liegenden Lebensraumtypen sind mit Methoden der Fernerkundung (sowohl satellitenbasiert als auch Luftbild) nur schwer zu erkennen. Andererseits bietet die Fernerkundung in genau diesem Problem eine wesentlich größere Objektivität als dies von einer terrestrischen Kartierung zu erwarten ist.

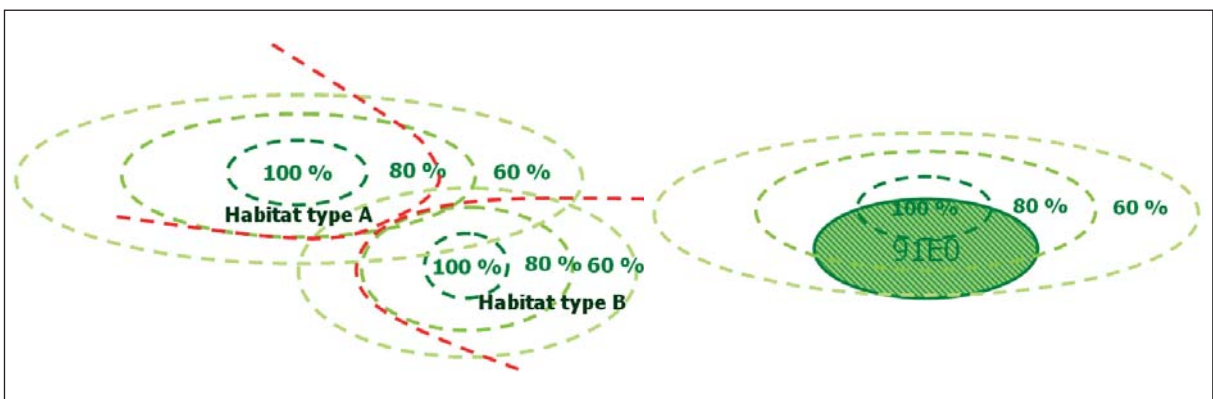


Abb. 21: Anstatt von scharfen Grenzen für einen Lebensraumtyp könnten die Modellierungs- und Fernerkundungsansätze Flächen mit einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit berechnen (linke Abbildung – grüne Linien). Innerhalb dieser Wahrscheinlichkeiten können Kartierer dann die Lebensraumtypen vor Ort abgrenzen (linke Abbildung – rote Linien).

Die erklärten Schwierigkeiten mit GIS- und Fernerkundungsansätzen sind also zum Teil darauf zurückzuführen, dass versucht wurde, eine Methode anzuwenden, die nicht auf diese komplexen Rahmenbedingungen ausgerichtet war. Für den im Bericht besprochenen Ansatz wäre es also durchaus sinnvoll, nicht mit fest definierten Grenzen, sondern mit Wahrscheinlichkeiten, unter denen ein bestimmter Lebensraumtyp zu erwarten ist, zu arbeiten (siehe Abbildung 21). Dieser Ansatz befände sich in einem stärkeren Einklang mit der Ökoton-Theorie (HILL et al. 2005). Ausgehend von diesen Wahrscheinlichkeiten könnten terrestrische Kartierer genauer den konkreten Habitattyp suchen und anhand der lokalen Gegebenheiten (z. B. auch administrative Grenzen) eine konkrete Begrenzung des Lebensraumtyps durchführen. Das regelbasierte Modell und das Fuzzy Logic Modell könnten solche Auftretenswahrscheinlichkeiten ohne Probleme in ihren Rechenablauf implementieren.

Einer der vielversprechendsten Wege der Verbesserung der Resultate ist die Verwendung von sehr hoch aufgelösten Fernerkundungsdaten mit Auflö-

sungen im Submeter-Bereich. Ansätze mit Quick-Bird-Daten (FRICK et al. 2005) und den HRSC Luftbildern (GÄHLER et al. 2004) lieferten sehr detaillierte und genaue Klassifikationen. Darüber hinaus könnte eine direkte Einbindung von Zusatzinformationen in den Auswertungsprozess der Fernerkundung die Ergebnisse wesentlich verbessern.

Die Modellierungsergebnisse vom Taubenberg (und der hier nicht dargestellten angrenzenden Mangfall-Aue) zeigen, dass fein auflösende Oberflächenmodelle (DGM 5 mit Gitterweite von 5 bis 10 m) in Kombination mit aussagekräftigen Reliefparametern zumindest eine überzeugende digitale Ableitung von Schluchten, Mooren und Auen ermöglichen (vgl. 2.3.3).

Eine kombinierte Anwendung der getesteten Methoden stellt mit Sicherheit den Schlüssel zur Bereitstellung von wertvollen Vorab-Informationen über NATURA 2000-Gebiete dar, in denen keine zuverlässigen Informationen aus forstlicher Standortkartierung, Waldinventur oder Biotopkartierung vorliegen.

6 Zusammenfassung

In dem als Pilotstudie angelegten Vorhaben wurde getestet, wie durch Modellierung des Naturpotenzials mit digitalen Werkzeugen und durch Erfassung der aktuellen Vegetation mit Fernerkundung eine terrestrische Kartierung der Wald-Lebensraumtypen in FFH-Gebieten unterstützt werden kann. Verglichen wurden drei verschiedene Modellierungsansätze sowie der Einsatz von SPOT5- und Aster-Satellitendaten sowie von Farb-Luftbildern.

Je nach vorliegenden digitalen Daten, Landschafts- und Habitatstrukturen sollten gezielt die jeweils geeignetsten Technologien eingesetzt bzw. kombiniert werden. Am erfolgversprechendsten erwies sich ein „modulares System“.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die getesteten Verfahren einen bedeutenden Beitrag für eine sichere und effiziente terrestrische Kartierung darstellen. Dies gilt insbesondere für

- ◆ Gebiete mit schlechter Daten-Ausgangslage (vor allem ohne forstliche Standortkartierung) und schwieriger Begehbarkeit (z. B. Alpenraum, Privat- und Körperschaftswald),
- ◆ Vorkommen von prioritären Lebensraumtypen (LRT *9180 - Hangmischwälder, LRT *91 D0 - Moorwälder, LRT *91E0 - Erlen-Eschenwälder an Fließgewässern). Diese Lebensraumtypen lassen sich auf Grund ihrer spezifischen Standortbindung gut generieren und haben gemäß Art. 1d und auch bei der Überwachung gemäß Art. 11 FFH-RL eine besondere Bedeutung.

Für die genannten Fälle sollte in möglichst aktuelle und genaue Geofachdaten (z. B. engmaschiges DGM), Fernerkundungsdaten (CIR-Luftbilder und/oder hochauflösende Satellitendaten) und eine entsprechende Datenhaltung und -pflege investiert werden.

Um den im europäischen Netzwerk Natura 2000 immens wichtigen Informationsaustausch zu pflegen, wurden bzw. werden wichtige Ergebnisse auf Workshops, nationalen und internationalen Tagungen mit Postern, Vorträgen, Abstracts in Tagungsbänden vorgestellt und diskutiert (z. B. AGIT-Salzburg (FÖRSTER et al. 2005c), ForestSAT 2005 in Borås - Schweden (FÖRSTER et al. 2005b), GFÖ Regensburg 2005 (FISCHER et al. 2005), ASFV Benediktbeuren 2006. Exzerpte wurden in englischer Sprache online veröffentlicht (FÖRSTER et al. 2005a; WALENTOWSKI et al. 2005).

7 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Besondere Einsatzpotenziale von GIS und Fernerkundung werden in der Bewertung des günstigen Erhaltungszustandes der Schutzobjekte und in der Langzeit-Beobachtung von Veränderungen innerhalb und außerhalb der NATURA 2000-Gebiete liegen (Art. 17 FFH-RL; DocHab-04-03/03 rev.3). Effizienzsteigerung ist bei allen Parametern und Indikatoren zu erwarten, die sich auf Habitatstruktur (Kronendach) und Landschaftsstruktur beziehen.

Derzeit existieren seitens des Bundesamtes für Naturschutz Bemühungen, die Ergebnisse aus diversen EU-Projekten zum Themenkreis „Indikatoren, Landschaftsbewertung, Monitoring“ (z. B. Bio-Assess, EON 2000+, SPIN, EuMon, ALARM, EU/LIFE) auf der einen, die Ansätze in den einzelnen Bundesländern auf der anderen Seite zu einem schlüssigen und ganzheitlichen Rahmenkonzept auf nationaler Ebene zusammen zu führen. Vor allem für eine von der EU-Habitat-Kommission geforderte Erfassung, Bewertung und Langzeitbeobachtung der Schutzobjekte auf Ebene der Biogeographischen Region werden noch geeignete Parameter, Referenzwerte sowie ein Stichprobendesign benötigt, damit Deutschland den 2007 fällig werdenden Nationalen Bericht (Art. 11 FFH-RL) liefern kann.

Es ist dringend notwendig, die Erfahrungen des Praxistestes Fernerkundung, dem Informationssystem Hochgebirgsstandorte (BINNER et al. 2005) und der Pilotstudie Schachen/Reintal (FISCHER et al. 2005) zu evaluieren und mit den vorhandenen Datenressourcen an der LWF zu einem Gesamtpaket zu verknüpfen. Aus der Synthese sind folgende Fragen zu beantworten:

- ◆ Wie soll das Monitoring auf Schutzobjekts- und Gebiets-Ebene mit dem Monitoring auf Biogeographischer Ebene ineinander greifen?

- ◆ Auf welcher Skalen-Ebene und für welche Bewertungsmerkmale ist der Einsatz von automatisierten Verfahren mit höchstauflösenden Satelliten-Daten ökonomisch?
- ◆ Ist die dreidimensionale Luftbilddauswertung mit dem Stereo-Analyst auch für großflächige Erhebungen und Bewertungen eine geeignete Technologie?
- ◆ In welcher Form können Erhebungen von Monitoring-Daten an Waldklimastationen, Bodendauerbeobachtungsflächen und Daten der Bundeswaldinventur in ein Stichproben-Design für weit verbreitete Wald-Lebensraumtypen eingebracht werden ?
- ◆ Wie ist das Monitoring von prioritären Wald-Lebensraumtypen zu gestalten?
- ◆ Wie können Informationen bestehender Datenbanken im Hinblick auf die Monitoring-Anforderungen verbessert und optimiert werden?
- ◆ In welcher Form soll die klimainduzierte Wald-dynamik in das Monitoring einfließen?

Konkrete Verbesserungen hinsichtlich Informationsbereitstellung und Qualitätssicherung sollten sich künftig aus der Verknüpfung von GIS mit Vegetationsdatenbanken (Workshop „Vegetationsdatenbanken und Monitoring am 22.-24.02.2006 in Bremen; <http://www.fh-weihenstephan.de/fw/homepages/ewald/webseite/default.htm>) und einem verstärkten Einsatz von Web-GIS (CANALEJO ALONSO 2004) ergeben.

8 Literatur

- AFL (1998): Luftbild- Interpretationsschlüssel - Bestimmung der natürlichen Altersklasse von Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild (CIR-Luftbild). LÖBF-Mitteilungen, Recklinghausen (1), S.45-49
- AFL (2003): Luftbildinterpretation: Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturellen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. Schriftenreihe des Landesforstpräsidiums Sachsen, Pirna, 48 S.
- BINNER, S.; EWALD, J.; ROGG, S. (2005): Die ökologische Interpretation geologischer Karten mit Hilfe der Datenbank bayerischer Bergwälder und terrestrisch kartierter Standortskarten. *Waldoekologie online* 2, S.114 – 125
http://www.lwf.uni-muenchen.de/afsv-online/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft2-10.pdf
- BLASCHKE, T.; FELBERMEIER, B. (2003): Satellitendaten für die Forstwirtschaft - Nutzeranforderungen der forstlichen Praxis und Potenzial der optischen Satellitenfernerkundung. *Forstliche Forschungsberichte* 196, S.93-108
- BURKHARDT, R.; ROBISCH, F.; SCHRÖDER, E. (2004): Umsetzung der FFH-Richtlinie im Wald - Gemeinsame bundesweite Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz (LANA) und der Forstchefkonferenz (FCK). *Natur und Landschaft* 79(7), S.316-323
- CANALEJO ALONSO, J. A. (2004): Mit einem Klick das Revier im Blick. *LWF Aktuell* 47, S.21-23
<http://www.lwf.bayern.de/veroeffentlichungen/lwf-aktuell/47-10.php>
- DOBLER, G. (2005): Die Forstliche Vegetationskunde wissenschaftstheoretisch hinterfragt. *Waldoekologie online* 2, S.59-67
http://www.lwf.uni-muenchen.de/afsv-online/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft6-10.pdf
- DRACHENFELS, O. et al. (2005): Empfehlungen zur Bewertung des Erhaltungszustandes der FFH-Lebensraumtypen: Moore und Heiden. *Natur und Landschaft* 80(11), S.484-488
- ELLENBERG, H. (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. Ulmer, Stuttgart, 1096 S.
- EUROPEAN COMMISSION (2005): *Assessment, monitoring and reporting of conservation status - Preparing the 2001-2007 report under Article 17 of the Habitats Directive*. DG Env. B2/AR D (2004), Brüssel
- EUROPEAN COMMISSION, D.X. (2003): *Interpretation Manual of European Union Habitats - EUR 25*. Doc. Habitat 99/5 EN, Brüssel
- FISCHER, M. (2002): *Mapping and Evaluation of NATURA 2000 Habitats in Alpine Regions*. MSc Dissertation, Birkbeck College, University of London, 50 S.
- FISCHER, M.; SEITZ, R.; STANGL, J.; KOCH, M. (2005): Kartierung und Bewertung von NATURA-2000-Gebieten im Hochgebirge. – *AFZ/DerWald* 12, S.623-624
- FISCHER, M.; FÖRSTER, M.; KLEINSCHMIT, B.; SEITZ, R.; WALENTOWSKI, H. (2005): Comparison of three modelling approaches of Potenzial natural forest habitats for monitoring NATURA 2000 areas in Bavaria, 35th Annual Conference of the Ecological Society of Germany, Switzerland and Austria. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*, Regensburg, 335 S.
- FORGY, E.W. (1965): Cluster Analysis of Multivariate Data: Efficiency versus Interpretability of Classifications (abstract.). *Biometrics* 21, S.768
- FÖRSTER, M.; KLEINSCHMIT, B.; WALENTOWSKI, H. (2005a): Comparison of three modelling approaches of potential natural forest habitats in Bavaria, Germany. *Waldökologie Online* (2), S.126-135
http://www.lwf.uni-muenchen.de/afsv-online/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft2-11.pdf
- FÖRSTER, M.; KLEINSCHMIT, B.; WALENTOWSKI, H. (2005b): Monitoring NATURA 2000 forest habitats in Bavaria by the use of ASTER, SPOT5 and GIS data – an integrated approach. In: H. Olsson (Hrsg.), *ForestSat*. Swedish National Board of Forestry, Borås, Schweden, S.21-25

- FÖRSTER, M.; KLEINSCHMIT, B.; WALENTOWSKI, H. (2005c): Nutzung unterschiedlicher FE-Sensoren zum Monitoring von Biodiversität in NATURA 2000-Waldgebieten des Alpenvorlandes. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Hrsg.), AGIT - Angewandte Geoinformatik. Wichmann, Salzburg, Österreich, S. 165-170
- GARMAN, S.L. (2004): Design and evaluation of a forest landscape change model for western Oregon. *Ecological Modelling*, 175(4), S.319-337
- GLAVAC, V. (1996): Vegetationsökologie. Fischer, Jena
- GRADMANN, R. (1931): Süddeutschland, Band 2 - Nachdruck der 1. Aufl. durch die Wiss. Buchges. Darmstadt (1977). Wiss. Buchges. Darmstadt, 553 S.
- GRANKE, O.; SCHMIEDINGER, A.; WALENTOWSKI, H. (2004): Konzept und Schlüsselkriterien für die Bewertung der Biodiversität von Wald-Lebensräumen in Deutschland. *Waldökologie online* 1, S. 25-28 http://www.lwf.uni-muenchen.de/afsv-online/docs/literatur/waldoekologie_online.html
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Landespflanzung und Vegetationskartierung. Wichmann Verlag, Heidelberg
- HILL, R.A.; GRANICA, A.; SMITH, G.M.; SCHARDT, M. (2005): Characterization of alpine treeline ecotones: an operational approach? In: H. Olsson (Hrsg.), *ForestSat 2005*. Swedish National Board of Forestry, Borås, Schweden, S. 74-78
- JANSEN, M. et al. (2002): Modelling of natural woodland communities in the Harz mountains. In: JANSEN, M.; JUDAS, M.; SABOROWSKI, J. (Hrsg.), *Spatial Modelling in Forest Ecology and Management*. Springer, Berlin, S. 162-175
- KLEINSCHMIT, B.; COENRADIE, B. (2005): Entwicklung von Methoden zum Monitoring von Trockenheitsfolgeschäden unter Nutzung von hochauflösenden Fernerkundungsdaten. TU-Berlin, Berlin
- LANG, A.; WALENTOWSKI, H.; LORENZ, W. (2004): Kartieranleitung für die Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Bayern. 5. Auflage, 233 S., München und Freising http://www.lwf.bayern.de/veroeffentlichungen/sonstige_veroeffentlichungen/natura_2000/02.php
- LANG, S.; LANGANKE, T. (2005): Multiscale GIS tool for site management. *J. Nature Conservation* 13, S. 185-196
- LINDNER, M.; BUGMANN, H.; LASCH, P.; FLECHSING, M.; CRAMER, W. (1997): Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 84 (1-2), S. 123-135
- LONG, J.N.; DEAN, T.J.; ROBERTS, S.D. (2004): Linkages between silviculture and ecology: examination of several important conceptual models. *Forest Ecology Management*, 200 (1-3), S. 249-261
- MÜLLER-KROEHLING, S.; FISCHER, M.; GULDER, H.J. (2004): Arbeitsanweisung zur Fertigung von Managementplänen für Waldflächen in NATURA 2000-Gebieten. – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 57 S. + Anlagen, Freising http://www.lwf.bayern.de/veroeffentlichungen/sonstige_veroeffentlichungen/natura_2000/01.php
- OBERDORFER, E. (1957): *Süddeutsche Vegetationsgesellschaften* 10. Jena, 564 S.
- OBERDORFER, E. (1992): *Süddeutsche Pflanzengesellschaften (Tabellenband)*. Jena / Stuttgart / New York, 580 S.
- PASSARGE, H. (1964): *Vegetationsgesellschaften des nordostdeutschen Flachlandes I. Pflanzensoziologie* (13)
- PASSARGE, H.; HOFMANN, G. (1968): *Vegetationsgesellschaften des nordostdeutschen Flachlandes II. Pflanzensoziologie* (16)
- RUBIN, J. (1967): Optimal Classification into Groups: An Approach for Solving the Taxonomy Problem. *J. Theoretical Biology* 15, S. 103-144
- SCHLUTOW, A. (2003): Entwicklungspotenziale für naturschutzfachlich bedeutsame Grünlandvegetation nach Auflassung von ackerbaulicher Intensivnutzung. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* (42), S. 15-44
- SCHLUTOW, A.; HÜBENER, P. (2005): Ermittlung von aktuellen Regenerierungspotenzialen naturnaher Ökosysteme mittels Bioindikation. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 44, S. 27-79
- SCHMIDT, P. et al. (2003): Erstellung einer Übersichtskarte der potenziell-natürlichen Vegetation M 1 : 50 000 von Deutschland sowie Erfassung und vegetationskundliche Erhebungen naturnaher Wälder als Grundlage für nationale und internationale Naturschutzplanungen. Sachsen, TU Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften und Biologie, Tharandt und Dresden

- SCHUHMACHER, S.; BUGMANN, H.; MLADENOFF, D.J. (2004): Improving the formulation of tree growth and succession in a spatially explicit landscape model. *Ecological Modelling*, 180 (1), S.175-194
- SSYMANK, A.; HAUKE, U.; RÜCKRIEM, C.; SCHRÖDER, E. (1998): Das europäische Schutzgebietssystem NATURA 2000. BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und der Vogelschutz-Richtlinie. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 53, S.1-560
- SUCCOW, M.; JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 622 S.
- TERHALLE, U. (2005): Sensor Merge in ERDAS IMAGINE unplugged, 4. Leica Geosystems Geospatial Imaging User Group Meeting, Fürstentfeldbruck
- UNEP WORLD CONSERVATION MONITORING CENTRE (2000): European Forests and Protected Areas: Gap Analysis, UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge
- WALENTOWSKI, H.; GULDER, H.J.; KÖLLING, C.; EWALD, J.; TÜRK, W. (2002): Die regionale natürliche Waldzusammensetzung Bayerns. LWF-Berichte 32, Freising, 99 S.
<http://2004.lwf.bayern.de/lwfbericht/32/index.htm>
- WALENTOWSKI, H.; EWALD, J.; FISCHER, A.; KÖLLING, C.; TÜRK, W. (2004): Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns. Geobotanica, Freising, 441 S.
- WALENTOWSKI, H.; FISCHER, M.; SEITZ, R. (2005): Fir-dominated forests in Bavaria. *Waldökologie online* (2), S. 18-39
http://www.lwf.uni-muenchen.de/afsv-online/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft2-7.pdf
- WEHRLI, A.; ZINGG, A.; BUGMANN, H.; HUTH, A. (2005): Using a forest patch model to predict the dynamics of stand structure in Swiss mountain forests. *Forest Ecology and Management*, 205 (1-3), S. 149-167
- ZADEH, L.A. (1978): Fuzzy Sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and fuzzy systems* 1, S.3-28