

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.

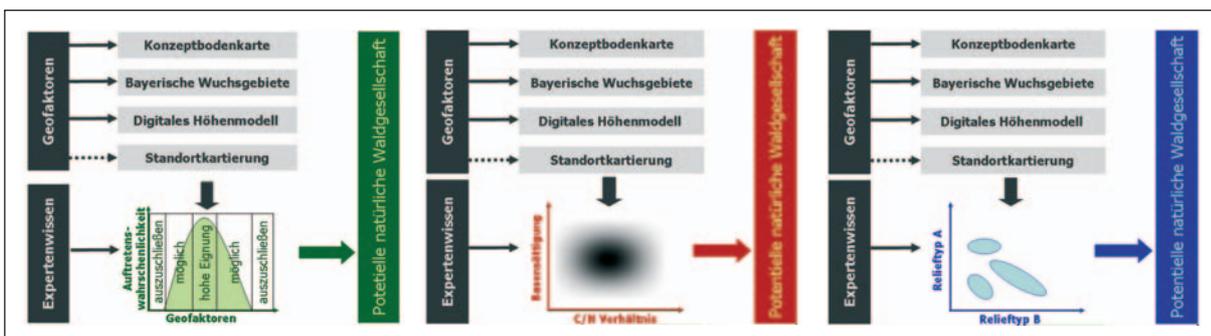


Abb. 3: Die drei verwendeten Modelltypen im Vergleich

- ◆ 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

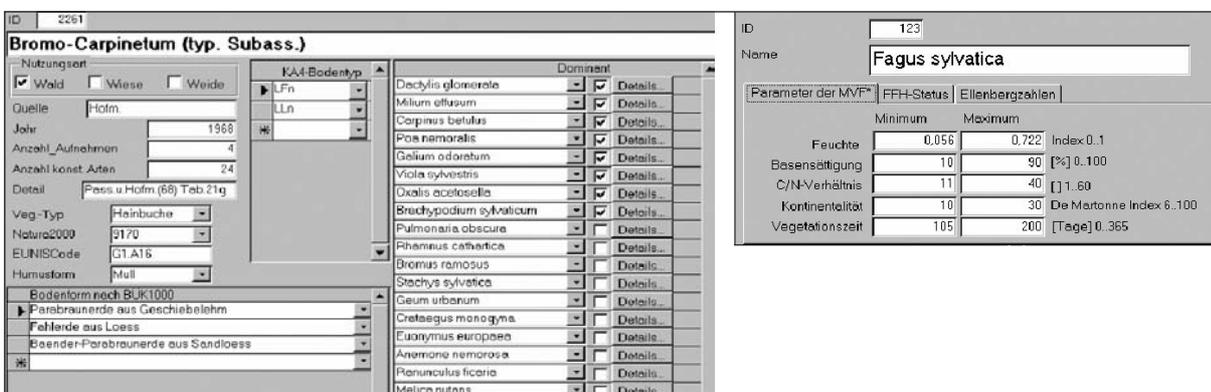


Abb. 4: Auszug eines Eingabeformulars mit dem Beispiel für eine Pflanzengesellschaft (links) und Eingabeformular einer konstanten Pflanzenart, ihrer Standortoptima und ökologischen Nischenbreite (rechts)

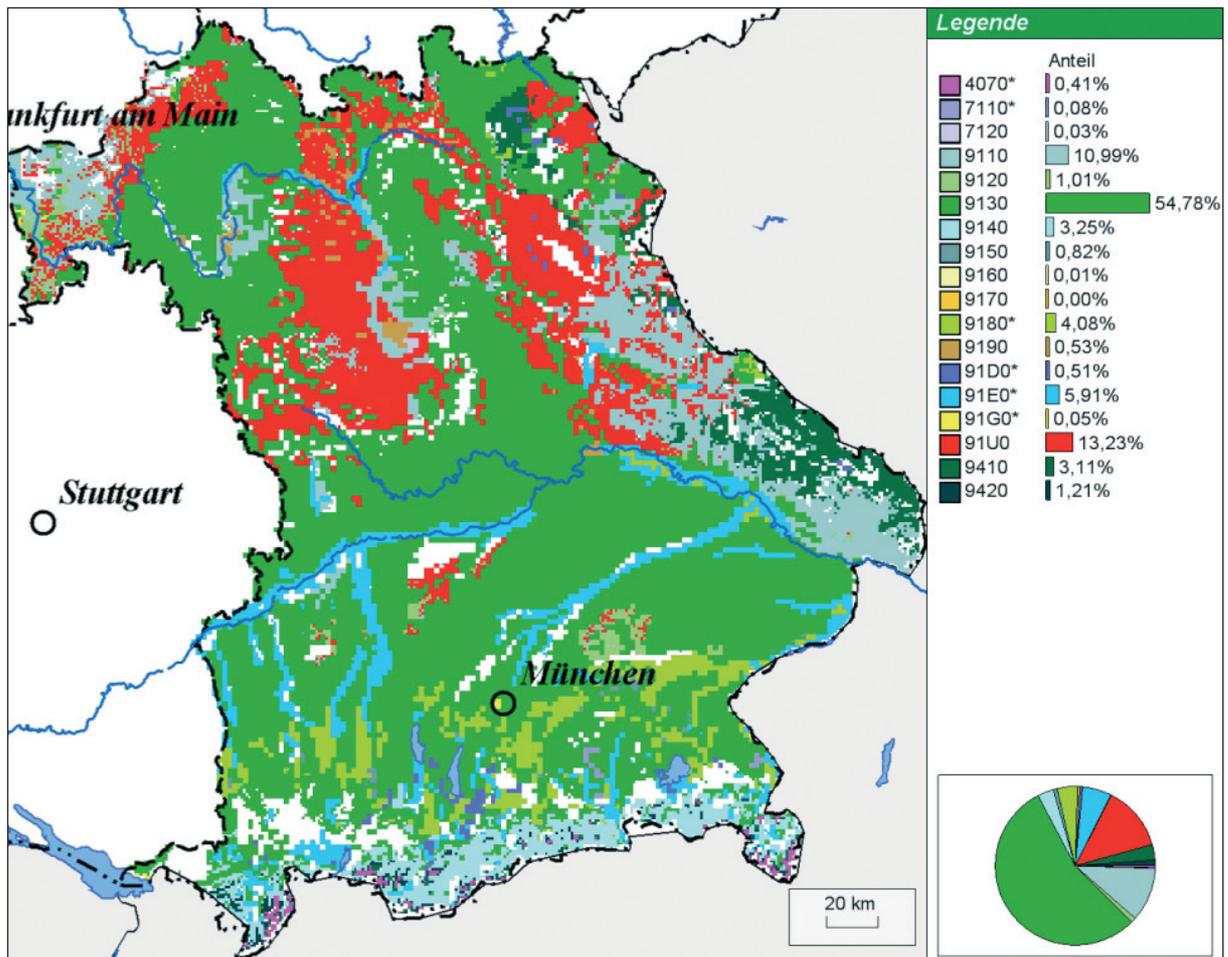


Abb. 5: Potenzielle FFH-Lebensraumtypen Bayerns, ermittelt aus dem Verschnitt der Bodenübersichtskarte BÜK 1000, dem GTOPO 30 des U.S. – Geological Survey (USGS) und den Klimadaten des deutschen Wetterdienstes (DWD) 1950-1980

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.

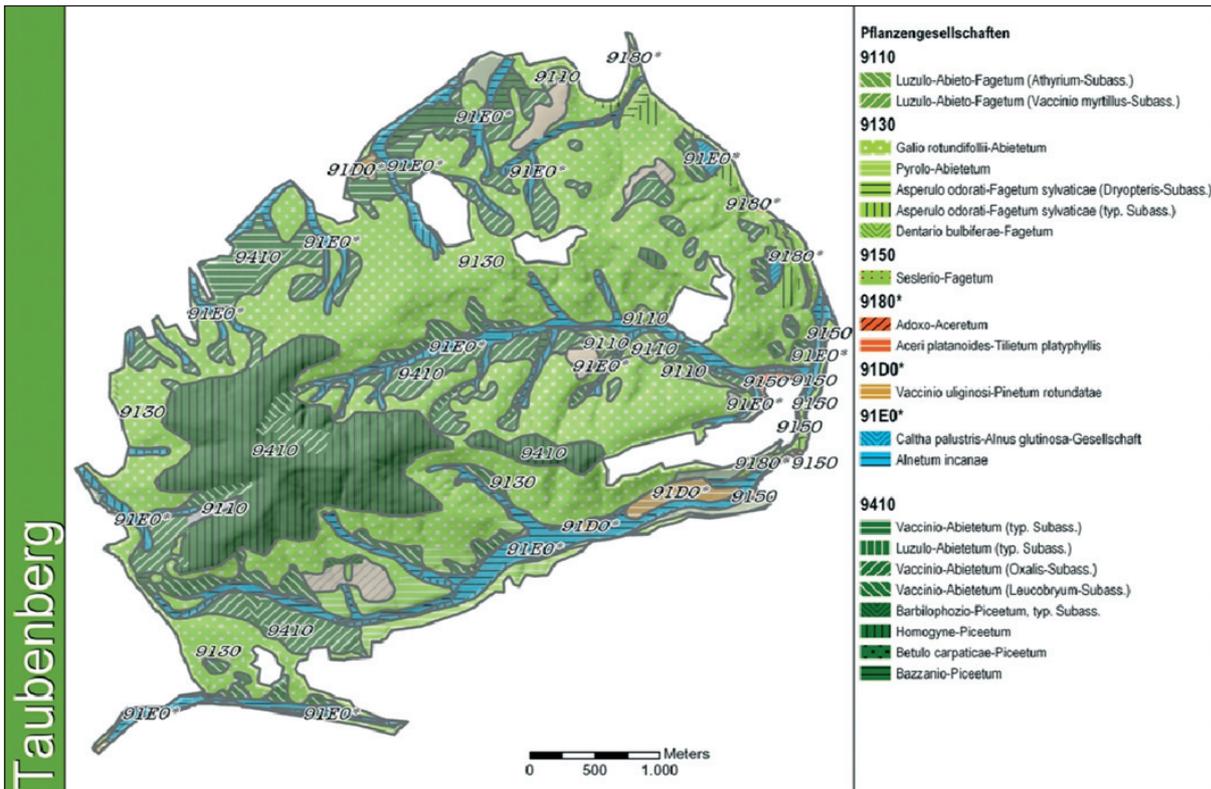


Abb. 6: Modellgestützte Prognose der Waldgesellschaften mit den größten Zugehörigkeitsgraden zu den Naturraumtypen im Testgebiet Taubenberg

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:

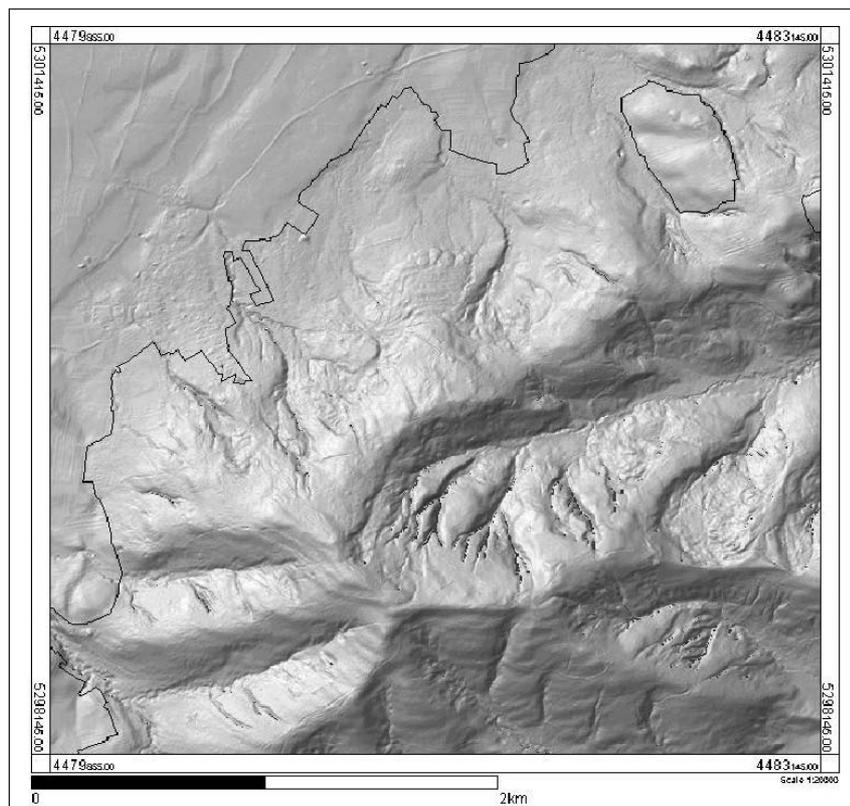


Abb. 7: Ausschnitt aus dem Testgebiet Taubenberg mit Grenze der Kartierung und modellierten Flächen des LRT *9180 (Schlucht- und Hangmischwälder)

- ◆ 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	Talflage 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,kx 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 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,kx
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	M W	M M kv,kx 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,kx 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	M W M	kv
91E0	Circaeae alpinae-Alnetum glutinosae	alle außer 78	M 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 Moorwälder (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.

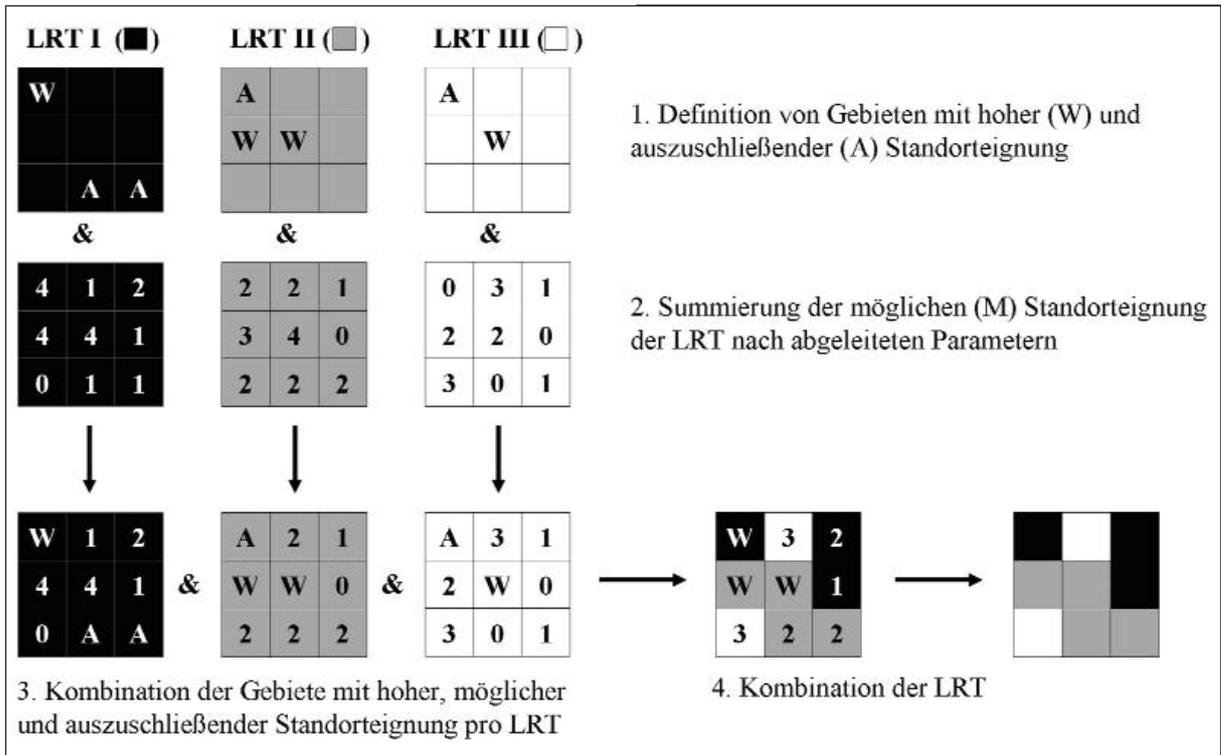


Abb. 8: Schema der regelbasierten Modellierung

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 Maßstabebenen 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