

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 145 (1994)
Heft: 4

Artikel: Computergestützte Simulationen der räumlichen Verbreitung naturnaher Waldgesellschaften in der Schweiz
Autor: Kienast, Felix / Brzeziecki, Bogdan / Wildi, Otti
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-766591>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Computergestützte Simulation der räumlichen Verbreitung naturnaher Waldgesellschaften in der Schweiz

Von Felix Kienast, Bogdan Brzezicki und Otto Wildi

FDK 181.1: 182; UDK 519.256: 910.1*1*3

1. Problemstellung und Ziele

Vegetationskarten sind unentbehrliche Hilfsmittel für die botanische Grundlagenforschung, den Waldbau und die Naturschutzplanung. In neuerer Zeit werden sie auch immer häufiger für räumliche Risikoabschätzungen von möglichen anthropogen bedingten Vegetationsveränderungen gebraucht, so zum Beispiel für die Abschätzung der möglichen Auswirkungen einer globalen Klimaänderung auf die Vegetation. Vegetationskarten basieren je nach Verwendungszweck und Massstab auf sehr unterschiedlichen Vegetationsklassifikationen. Sie stellen zum Beispiel die in einem kartierten Gebiet festgestellte aktuelle Vegetation dar, oder, wie in der Waldstandortskartierung üblich, die naturnahe Waldvegetation. Letztere ist in der vom Menschen über Jahrhunderte geprägten Kulturlandschaft Mitteleuropas allerdings oft schwierig zu bestimmen (Bohn, 1981; Dierschke, 1974; Wildi und Krüsi, 1992; Stumpel und Kalkhoven, 1978). In der traditionellen Feldkartierung ist es denn auch oft üblich, im Analogieschluss von möglichst ungestörten, naturnahen Flächen auf die zu kartierenden Gebiete zu schliessen. Dies erfolgt häufig über die Krautschicht, welche – vor allem in Wäldern – recht oft eine gute Näherung der naturnahen Vegetation ergibt.

Für das Gebiet der Schweiz liegen keine flächendeckenden, nach einheitlichem Schlüssel durchgeführte Feldkartierungen der naturnahen Waldvegetation im Massstabsbereich von 1:50 000 bis 1:100 000 vor, und es ist angesichts des erheblichen Kartieraufwandes auch mittelfristig nicht mit solchen zu rechnen. Für Risikoanalysen im Zusammenhang mit globalen Veränderungen werden jedoch flächendeckende Angaben über die naturnahe Waldvegetation im erwähnten Massstabsbereich benötigt. Nun existieren aber für die Schweiz viele landesweit erhobene, digital verfügbare Karten von sekundären Standortsfaktoren (Walter, 1960) wie Relief, Klima, Boden, Muttergestein. Basierend auf der Erkenntnis, dass die naturnahe Vegetation aufgrund dieser Standortsfaktoren mit einiger Sicherheit abgeschätzt werden kann (Etter, 1943;

Keller, 1978, 1979a, b; Lienert, 1982; Fischer, 1990a, b) sollte es deshalb möglich sein, Vegetationskarten der naturnahen Waldvegetation mittels Simulationstechnik abzuleiten.

Das Hauptziel der hier beschriebenen Untersuchung ist es denn auch, aufgrund verfügbarer empirischer Daten (pflanzensoziologische Aufnahmen) ein einfaches Wahrscheinlichkeitsmodell zwischen Standortfaktoren und naturnahen Waldgesellschaften herzuleiten und anschliessend die naturnahe Waldvegetation flächendeckend für die ganze Schweiz zu simulieren. Damit soll ein kostengünstiges, rasch anwendbares Instrument geschaffen werden, das unter anderem für folgende Zwecke eingesetzt werden kann:

- Unterstützung von traditionellen Feldkartierungen.
- Regionale und nationale Planungshilfe für Naturschutz und Waldbau.
- Regionale und nationale Risikoabschätzungen von möglichen Vegetationsveränderungen, die als Folge von postulierten Klimaänderungen eintreten könnten.

Die Simulation von Vegetationskarten wurde zuvor schon von Box (1981), Enders (1979) und Strahler (1981) realisiert. Binz und Wildi (1988) führten solche Versuche für die MAB-Testregion Davos durch. Der Durchbruch im Bereich der Geographischen Informationssysteme (GIS) und die Verfügbarkeit digitaler Karten auf regionaler und nationaler Ebene ermöglichen heute Simulationsexperimente für erheblich grössere Gebiete (Davis und Goetz, 1990; EAFV, 1988; Monserud und Leemans, 1992; Pastor und Broschardt, 1990). Es ist klar, dass die hier verwendeten statistischen Beziehungen zwischen Standortfaktoren und naturnahen Waldgesellschaften nicht die Dynamik der zeitlichen Entwicklung von Waldbeständen wiedergeben. Zu diesem Zweck müssen andere Modellansätze angewendet werden, etwa die Sukzessionsmodellierung nach Shugart *et al.* (1992a, b) oder Martin (1992). Für den zentraleuropäischen Raum existieren dazu ausgetestete Modelle (Kienast, 1991; Kienast und Kuhn, 1989; Wissel, 1992), die in Zukunft mit statistischen Regressionsmodellen kombiniert werden können.

2. Datenmaterial und Methode

Die Herstellung der digitalen Vegetationskarten erfolgte in vier Schritten (*Abbildung 1*), nämlich (a) dem Aufbereiten von landesweit verfügbaren Standortdaten mittels eines GIS (landschaftsökologische Datenbasis), (b) der mathematischen Formulierung eines Wahrscheinlichkeitsmodells «Naturnahe Waldvegetation – Standort» mittels empirischer Daten, (c) des Modelltests für ausgewählte Gebiete anhand von existierenden Feldkartierungen und (d) der Simulation für das ganze Gebiet der Schweiz.

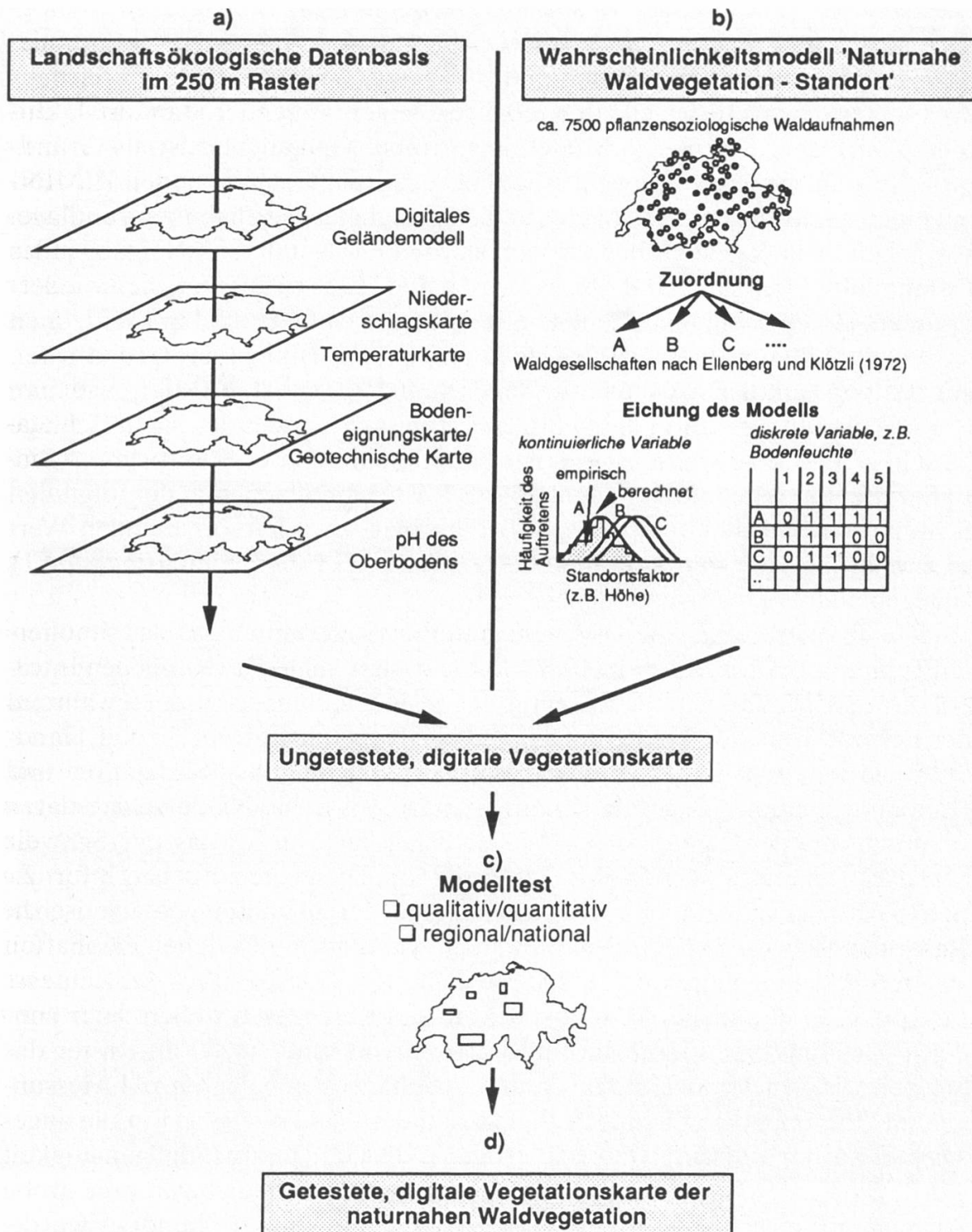


Abbildung 1. Die Herstellung digitaler Vegetationskarten (d) mittels Simulationsmodell (b), landschaftsökologischer Datenbasis (a) und GIS-Technologie.

2.1 Landschaftsökologische Datenbasis (Abbildung 1a)

Für eine landesweite Simulation der Vegetation ist es nötig, über flächen-deckend erhobene, digitale Daten möglichst vieler prägender Standortsfaktoren zu verfügen. Für die im Modell angestrebte Genauigkeit ist als Grundraster das für die ganze Schweiz erhältliche, digitale Geländemodell RIMINI mit einer Auflösung von 250 m die zur Zeit geeignetste verfügbare Grundlage. Ausgehend von diesen Höhenpunkten wurden Exposition und Neigung jedes Datenpunktes berechnet. Das Relief wird dabei etwas zu ausgeglichen wiedergegeben, indem steile Gebiete flacher und flache Gebiete an den Randzonen der Hügel steiler erscheinen. Das Höhenmodell RIMINI ist das Grundraster, auf das sich sämtliche zusätzlichen landschaftsökologischen Daten, wie zum Beispiel die Monats- und Jahresmittel der Temperatur oder der Niederschläge beziehen. Die sogenannten «overlay-Funktionen» der GIS-Software ARC/INFO dienen dabei dazu, jedem 250-m-Rasterpunkt den aus den digitalen Karten (zum Beispiel Temperatur, Niederschlag usw.) hervorgehenden Wert zuzuweisen. Im jetzigen Zeitpunkt verfügen wir über die in der *Abbildung 1a* angegebenen Geoinformationen.

Die Temperaturangaben (Monatsmittelwerte) stammen aus der simulierten Temperaturkarte von Bär (1989). Diese basiert auf einer räumlichen Interpolation der Monatsmitteltemperaturen von 36 Klimamessstationen während der Periode von 1931 bis 1970. Eingehende Tests mit Karten, die auf Handinterpolation und Expertenwissen beruhen, zeigen, dass Simulation und Handinterpolation gut übereinstimmen (Bär, 1989). Die Niederschlagsdaten stammen aus der digitalisierten Niederschlagskarte des Atlas der Schweiz (Tafel 12), einer räumlichen Handinterpolation. Die geotechnischen Informationen sind der in digitaler Form vorliegenden, vereinfachten geotechnischen Karte der Schweiz 1:200 000 entnommen, während die Bodeneigenschaften aus der Bodeneignungskarte 1:200 000 stammen. Die qualitativ schlechteste Interpolation räumlicher Daten ist bei der pH-Karte festzustellen. Hier handelt es sich um eine räumliche Interpolation von rund 10 000 im Raster des Schweizerischen Landesforstinventars systematisch angelegten pH-Messungen im Oberboden von heutigen Waldbeständen (EAFV, 1988). Für die angestrebte Kartenauflösung (etwa 1:50 000–1:200 000) und Modellgenauigkeit wurde die Karte aber in der Datenbank belassen, da sie lediglich für die grobe Aussage «basenarm», «mittel», «basenreich» eines Punktes benötigt wurde. Zudem verwenden wir in der hier vorgestellten Arbeit nur die bewaldeten 1-km-Punkte des Landesforstinventars, wo der verwendete Wert in den meisten Fällen der exakten Messung des pH entspricht. Beim Boden-pH handelt es sich um den einzigen primären Standortsfaktor nach Walter (1960), der in die Modellierung eingeht. Die anderen Standortsfaktoren sind nach Walter (1960) sekundäre Faktoren. Sowohl Auflösung als auch Genauigkeit der Eingangsdaten erlauben in gewissen Fällen nicht, zwischen zonalen und azonalen,

das heisst in der Regel kleinräumig auftretenden Gesellschaften, zu unterscheiden. Aus modelltheoretischen Gründen wurden aber in der vorliegenden Version keine Gesellschaften *a priori* ausgeschlossen.

2.2 Wahrscheinlichkeitsmodell «Naturnahe Waldvegetation – Standort» (Abbildung 1b)

Die abhängige Variable im Modell «Naturnahe Waldvegetation – Standort» ist eine der 71 nach *Ellenberg* und *Klötzli* (1972) beschriebenen Waldgesellschaften. Obwohl dieses Klassifikationssystem gewisse Mängel aufweist (*Keller*, 1975), ist es in der Schweiz weit verbreitet und sowohl in der Forst- und Naturschutzpraxis als auch in der forstlichen Standortskartierung akzeptiert (*Lienert*, 1982, *Burnand et al.*, 1990). Zudem stehen für die Überprüfung des Modells verschiedene Karten zur Verfügung, die mittels traditioneller Feldmethoden erhoben wurden.

Die Wahl des Modelltyps richtet sich nach der Art der abhängigen Variablen, der Waldgesellschaft. Diese Variable ist eine diskrete Grösse und nimmt eine der willkürlich gewählten Nummern der Waldgesellschaften nach *Ellenberg* und *Klötzli* (1972) an. In einem solchen Fall versagen konventionelle regressionsanalytische Methoden. Als Alternative schlagen verschiedene Autoren Wahrscheinlichkeitsmodelle vor, die für jede Kombination von unabhängigen Standortsfaktoren angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit die berücksichtigten Waldgesellschaften vorkommen können (*Wrigley*, 1985). Aus der Palette von statistischen Möglichkeiten wurde das Bayes-Modell gewählt, das von *Fischer* (1990 a, b) erfolgreich zur Simulation von Pflanzengesellschaften verwendet wurde. Eine detaillierte Übersicht der Modellgrundlagen geben *Brzeziecki et al.* (1993).

Für die Eichung des Modells liegt eine umfangreiche Datenbasis von Vegetationsaufnahmen aus natürlichen oder naturnahen Waldstandorten vor (*Sommerhalder et al.*, 1986; *Wohlgemuth*, 1992). Rund 3500 Aufnahmen entstammen dieser Datenbank, während 4000 weitere Aufnahmen aus der Literatur und durch systematische Beprobung von standortkundlichen Karten gewonnen wurden. Auf diese Weise konnten die von *Ellenberg* und *Klötzli* (1972) vorgeschlagenen Waldgesellschaften mit empirischen Daten dokumentiert und zur Kalibrierung des Modells verwendet werden. Dieser für die Modellqualität entscheidende Schritt ist in *Brzeziecki et al.* (1993) detailliert wiedergegeben. Wichtig sind dabei die bei pflanzensoziologischen Aufnahmen vermerkten Angaben über die Standortbedingungen, unter welchen die betreffenden Einheiten beobachtet wurden (Tabellenkopf). Mit Hilfe der geographischen Koordinaten der Aufnahmen konnten ferner verschiedene andere ökologische Kenngrössen bestimmt werden, die nicht im Feld erhoben wurden (zum Beispiel klimatische Eigenschaften). Es ist klar, dass nur solche

Standortparameter ins Modell eingehen können, die landesweit und flächen-deckend verfügbar sind. Witterungsextreme zum Beispiel, die einen wichtigen Einfluss auf die Verbreitung von Pflanzen haben, können nicht berücksichtigt werden.

Für jede diskrete Variable (bodenphysikalische Parameter, Neigung, Exposition) wurden nun sogenannte Zuordnungsmatrizen hergeleitet, bei denen «0» bedeutet, dass eine bestimmte Vegetationseinheit unter den betreffenden Bedingungen nicht auftritt, und «1» bedeutet, dass sie auftreten kann. Die Zuordnungsmatrizen ermöglichen es, an jedem geographischen Punkt das Spektrum möglicher Waldgesellschaften zu eruieren. Da die ökologischen Randbedingungen der meisten Vegetationstypen eher breit gewählt wurden, sind an den meisten geographischen Punkten mehrere Vegetationseinheiten möglich. Eine Rangfolge der Auftretenswahrscheinlichkeiten dieser verbliebenen Gesellschaften wird anschliessend mittels der kontinuierlichen Variablen wie Temperatur, Niederschläge, Höhe ü.M. und pH des Oberbodens berechnet.

2.3 Vegetationskarte und Modelltest (Abbildungen 1c und 1d)

Für ausgewählte Gebiete wurde das Modell mittels Feldkartierungen getestet und in einem iterativen Prozess durch Einbezug zusätzlicher empirischer Daten verbessert (*Abbildung 1c*). Zur Karte der simulierten naturnahen Waldvegetation gelangt man schliesslich, indem das geeichte Modell auf sämtliche Gitterpunkte eines beliebigen Gebietes innerhalb der Schweiz angewendet und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens aller Vegetationseinheiten bestimmt wird. In den meisten Fällen wird man sich mit der Angabe der an jedem Punkt wahrscheinlichsten, zweitwahrscheinlichsten und drittwahrscheinlichsten Einheit begnügen.

Die grafische Darstellung der simulierten Karte kann auf jedem GIS oder Grafikprogramm erfolgen. Die räumliche Auflösung der simulierten Vegetationskarten ist prinzipiell frei wählbar, grösste Auflösung ist der 250-m-Raster. Die Auflösung wird grundsätzlich dem Anwendungszweck und der Rechenkapazität angeglichen. Da viele Eingangsgrössen (Geotechnische Karte, Bodeneignungskarte) lediglich in der Auflösung des Massstabs 1:200 000 digital vorliegen, müssen simulierte Detailkarten im Massstab 1:10 000 bis 1:25 000 vorsichtig interpretiert werden. Falls eine Simulation in diesem Massstab erwünscht ist, müssen die Eingangsgrössen auf den entsprechenden Massstab abgestimmt werden, das heisst detaillierte Karten digital erfasst werden.

3. Resultate

3.1 Die simulierte naturnahe Waldvegetation der Schweiz

Eine landesweite Simulation der naturnahen Waldgesellschaften erfolgte im 250 x 250-m-Raster. Für Übersichtskarten der ganzen Schweiz kann aber durchaus der 1-km-Raster benützt werden. Dies bedeutet, dass jeder 16. Gitterpunkt des 250-m-Netzes systematisch ausgewählt wird. Bei der resultierenden Karte handelt es sich also nicht um eine generalisierte Karte, sondern um eine Stichprobe aus dem ganzen Punktenetz. Aus Kostengründen kann an dieser Stelle keine Farbdarstellung aller simulierten Gesellschaften wiedergegeben werden. Eine solche liegt aber Brzeziecki *et al.* (1993) bei.

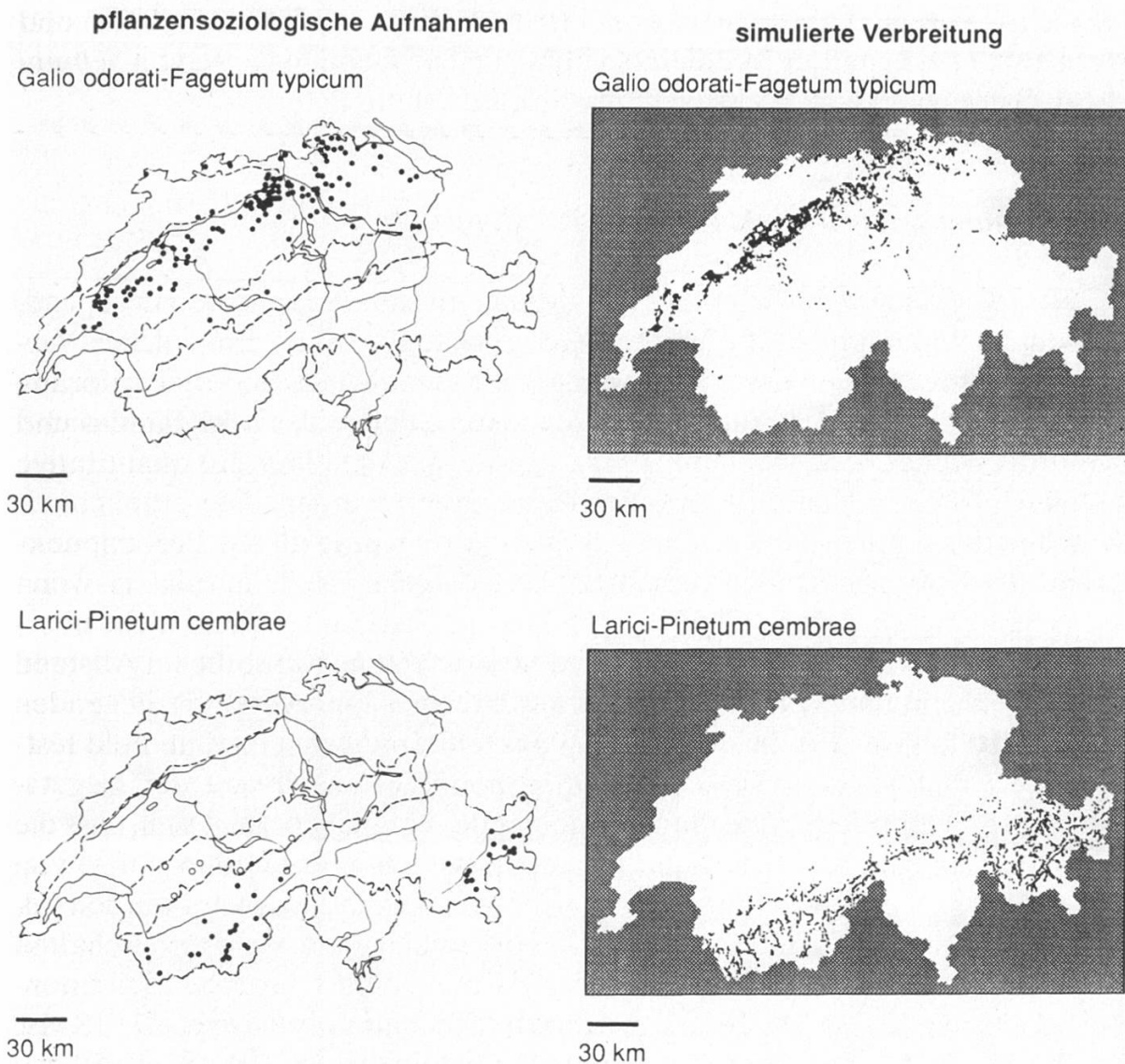


Abbildung 2. Räumliche Verbreitung der von Ellenberg und Klötzli (1972) ausgewerteten pflanzensoziologischen Aufnahmen zweier Waldgesellschaften und simulierte geographische Verteilung der gleichen Waldgesellschaften. Die simulierte Verbreitung gibt alle potentiell waldfähigen Punkte des 1-km-Rasters wieder, wo die betreffende Einheit in höchster Priorität vorkommt.

Stellvertretend werden in diesem Aufsatz chorologische Karten zweier Waldgesellschaften wiedergegeben (*Abbildung 2*). Diese Karten bieten die Möglichkeit, das Modell einem Plausibilitätstest zu unterziehen, indem die geographische Verbreitung von pflanzensoziologischen Aufnahmen bestimmter Gesellschaften (*Abbildung 2, links*) mit der simulierten Verbreitung optisch verglichen werden. Im Falle des typischen Waldmeister-Buchenwaldes (*Galio odorati-Fagetum typicum*) ist die Übereinstimmung zwischen simulierter Verbreitung und beobachteten Punkten gut, und die von Ellenberg und Klötzli (1972) geäußerte Vermutung, dass grosse Flächen des heute landwirtschaftlich genutzten Mittellandes von dieser Einheit eingenommen würden, bestätigt sich. Offenbar erfüllen weite Teile des Mittellandes die im Modell formulierten Standortbedingungen für diese Waldgesellschaft. Sowohl die Plausibilitätstests als auch Vergleiche mit der auf Expertenwissen beruhenden pflanzensoziologischen Kartierung der Schweiz nach *Béguin et al.* (1978) und *Hegg et al.* (1993) und der auf Feldbegehungen beruhenden Karte von *Schmid* (1944–50) zeigen, dass das Modell plausible Resultate liefert.

3.2 Quantitativer Test des Modells

Für Regionen der Schweiz, die bereits flächendeckend kartiert sind, konnte die Modellqualität quantitativ abgeschätzt werden. Ein solcher Vergleich erfolgte für den Kanton Obwalden mit einer Waldstandortkartierung im Massstab 1:50 000 (Lienert, 1982) sowie für Gebiete des Mittellandes und des Juras (Keller, 1982; *Richard*, 1965). Als Beispiel soll hier der quantitative Vergleich für den Kanton Obwalden beschrieben werden. Die Ähnlichkeit zwischen der simulierten Karte und der Feldkarte wurde an 631 Probenpunkten mittels Kontingenztafel geschätzt. Das Vorgehen ist dann zulässig, wenn die räumliche Autokorrelation der Punkte ein bestimmtes Mass nicht überschreitet (Davis und Goetz, 1990). Diese Voraussetzung ist für die im Abstand von 250 m entlang von Nord-Süd-Transekten (1 km Abstand) liegenden Punkte erfüllt. Werden die an den 631 Punkten simulierten bzw. im Feld festgestellten Waldgesellschaften auf dem generalisierten Niveau der Vegetationsgürtel (Definition siehe unten) miteinander verglichen, zeigt sich, dass die Simulation in nur 5 % aller Fälle um mehr als einen Vegetationsgürtel von den tatsächlichen Beobachtungen abweicht. Als Vegetationsgürtel wurden folgende von Ellenberg und Klötzli (1972) vorgeschlagenen Waldgesellschaften zusammengefasst: Gruppe 1 (submontan): Einh. 7, 9, 13; Gruppe 2 (tiefmontan): Einh. 8, 12, 14, 15, 26, 32; Gruppe 3 (hochmontan): Einh. 17, 18, 19, 20, 22, 24, 46, 53, 56; Gruppe 4 (montan-subalpin): Einh. 21, 48, 49, 50, 51; Gruppe 5 (subalpin): Einh. 55, 57, 60, 71). Werden die simulierte und die mit Feldmethoden hergestellte Karte auf dem Niveau der Gesellschaft verglichen, zeigen sich die in der *Tabelle 1* dargestellten Verhältnisse. Bei diesem Vergleich

wurden nur Klimax- und klimaxnahe Gesellschaften verglichen, seltene Gesellschaften auf extremen Standorten wurden ausgeschlossen (total 17 % der Punkte). Der Grad der Übereinstimmung schwankt von Gesellschaft zu Gesellschaft. Im Durchschnitt trifft die Gesellschaft erster Priorität (wahrscheinlichste Gesellschaft) in 46 % aller Fälle die «richtige» Gesellschaft, bei Einbezug der 2. und 3. Priorität steigt die Treffergenauigkeit auf rund 65 % respektive 80 % an.

Tabelle 1. Vergleich zwischen beobachteter und simulierter Verbreitung von Klimax oder klimaxnahen Waldgesellschaften im Kanton Obwalden. Die Stichprobenpunkte liegen in 250-m-Abständen entlang von Nord-Süd-laufenden Transekten (Abstand 1 km). Die Überprüfung zwischen Simulation und Felderhebung erfolgte an den jeweils gleichen geographischen Punkten.

Waldgesellschaft	beobachtet	simuliert			Summe «Treffer»	Proz. Anteil «Treffer»
	<i>n</i>	Priorität			Σ	%
		1	2	3		
Galio-Fagetum typicum	11	3	3	3	9	81,8
Milio-Fagetum	23	10	4	3	17	73,9
Pulmonario-Fagetum typicum	27	8	6	2	16	59,2
Cardamino-Fagetum typicum	59	19	21	5	45	76,3
Carici-Fagetum typicum	5	2	1	1	4	80,0
Abieti-Fagetum typicum	119	57	29	21	107	89,9
Abieti-Fagetum polystichetosum	16	10	2	1	13	81,2
Aceri-Fagetum	2	0	1	0	1	50,0
Bazzanio-Abietetum	15	5	2	1	8	53,3
Equiseto-Abietetum	30	6	3	4	13	43,3
Adenostylo-Abietetum	51	21	15	6	42	82,4
Sphagno-Piceetum calamagrost.	133	93	13	11	117	88,0
Piceo-Adenostyletum	33	6	7	5	18	54,5
Σ	524	240	107	63	410	
%		45,8	20,4	12,0	78,2	

3.3 Anwendungsbeispiel: Wie «naturnah» ist der Schweizer Wald?

Das Modell bietet die Möglichkeit, die aktuelle Waldvegetation mit der simulierten naturnahen Vegetation zu vergleichen und den Grad der Naturnähe des Schweizer Waldes zu evaluieren. Ähnliche Vergleiche wurden für den Kanton Zürich im Zusammenhang mit der standortkundlichen Kartierung der Wälder durchgeführt (*Amt für Raumplanung Kt. Zürich*, 1984). Die Basis zur Abschätzung der aktuellen Waldvegetation bildet in der vorliegenden Untersuchung das regelmässige Probenetz des Schweizerischen Landesforstinventars im 1-km-Raster (EAFV, 1988). Dieses liefert für jeden Waldpunkt Angaben über die Basalfläche verschiedener Baumarten (BHD > 12 cm) in der Baumschicht. Diese aktuelle Baumartenzusammensetzung wurde der

naturnahen Baumartenzusammensetzung gegenübergestellt. Letztere wurde nach Ellenberg und Klötzli (1972, Anhang C IV) und Amt für Raumplanung Kt. Zürich (1984) bestimmt, indem jeder Waldgesellschaft die von den zitierten Autoren postulierten, natürlicherweise dominierenden Baumarten zugeordnet wurde. Der Vergleich beschränkt sich folglich auf die Baumschicht. Er konnte an rund 10 000 Waldpunkten durchgeführt werden, an denen sowohl vom Landesforstinventar als auch von der Simulation auswertbare Daten vorlagen. Die Bewertungskriterien sind in den Tabellen 2 bis 4 jeweils detailliert aufgeführt.

In einem ersten Schritt wurde der Nadel- bzw. Laubholzanteil jener rund 6800 Waldpunkte im 1-km-Netz untersucht, die nach Simulationsmodell einer Waldgesellschaft zwischen Nr. 1 und Nr. 46 nach Ellenberg und Klötzli (1972) zuzuordnen sind (Laubmischwälder und im Fall der Einheit 46 submontaner Vertreter der Fichten-Tannen-Wälder). Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Vegetationszone mittels simulierter Einheit höchster Priorität richtig getroffen wird, liegt im Testgebiet Obwalden bei 80 % und dürfte für das gesamte Untersuchungsgebiet etwa zwischen 70 und 90 % liegen. Die Verfichtung im Laubmischwaldgürtel betrifft rund 20 % der im LFI enthaltenen Waldstichproben (*Tabelle 2*, Kategorie «Basalfläche Fichte > 75 %»). Werden nebst Fichte auch andere, nicht naturnahe Nadelholzarten berücksichtigt, steigt der Anteil naturferner Bestände auf rund 40 % (*Tabelle 3*, Kategorie «Basalfläche Nadelbäume > 75 %»). Die Tanne gehört dabei bei mindestens zwei Einheiten (Nr. 20 und 46) zur natürlichen Artengarnitur und wird in den Berechnungen für diese Gesellschaften nicht als naturfern angenommen. Naturnahe Bestände sind aufgrund des Vergleichs mit rund 30 % an den vom LFI untersuchten Waldpunkten vertreten (*Tabelle 4*). Die räumliche Verbreitung der naturnahen bzw. naturfernen Wälder ist der *Abbildung 3* zu entnehmen. Diese Verbreitungsmuster sind immer in Relation zum Verbreitungsmuster aller untersuchten Waldpunkte zu setzen (*Abbildung 3, oben*). Auffällig ist der relativ hohe Anteil naturnaher Waldpunkte im nördlichen Jura und im Kanton Tessin. Im Fall des Tessins ist dieser hohe Anteil auf die an vielen Probepunkten herrschende Dominanz der vom Menschen eingeführten (und heute als naturnah bewerteten) Kastanie zurückzuführen. Bei den naturfernen Beständen ist keine offensichtliche räumliche Häufung auf bestimmte Gebiete zu verzeichnen. Eine gewisse Konzentration ergibt sich in den Voralpenbereichen, wo die Fichte von Natur aus wegen des Samenpotentials der nahen montanen und subalpinen Fichtenwälder auch in tieferen Lagen bedeutend ist.

Tabelle 2. Naturferne Bestände mit generell zu hohem Fichtenanteil.

Total auswertbare Waldpunkte (1-km-Netz LFI)	... davon als Laubmischwald simuliert (Einh. 1–46 nach Ellenberg und Klötzli, 1972)		... davon LFI-Punkte mit Basalfläche «Fichte» von ...							
			0–75 %		> 75 %		> 95 %		100 %	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
10393	6793	100	5401	79,5	1392	20,5	708	10,5	555	8,2

Tabelle 3. Naturferne Bestände mit generell zu hohem Nadelholzanteil.

Total auswertbare Waldpunkte (1-km-Netz LFI)	... davon als Laubmischwald simuliert (Einh. 1–46 nach Ellenberg und Klötzli, 1972)		... davon LFI-Punkte mit hohem Anteil an Nadelhölzern							
			0–75 %		> 75 %		> 95 %		100 %	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
10393	6793	100	3994	58,4	2799	41,2	1554	22,9	1261	18,6

* bei Einheiten 20 und 46 exklusive Tanne

Tabelle 4. Naturnahe Bestände mit hohem Laubholzanteil.

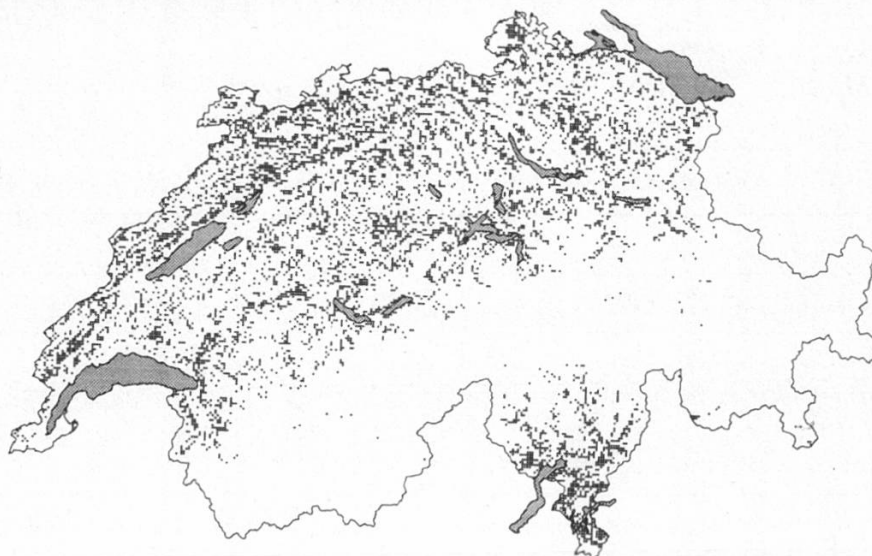
Total auswertbare Waldpunkte (1-km-Netz LFI)	... davon als Laubmischwald simuliert (Einh. 1–46 nach Ellenberg und Klötzli, 1972)		... davon LFI-Punkte mit geringem Nadelholzanteil*	
	n	%	n	%
10393	6793	100	1928	28,4

* Basalfläche von Fichte, Tanne, Lärche, Föhre, Arve und übrige Nadelhölzer kleiner als ... :
 10 % bei Einheiten 1–7; 9–11; 13–17; 21–44
 25 % bei Einheiten 8, 12, 18, 19
 25 % bei Einheiten 20, 46 (exklusive Tanne)

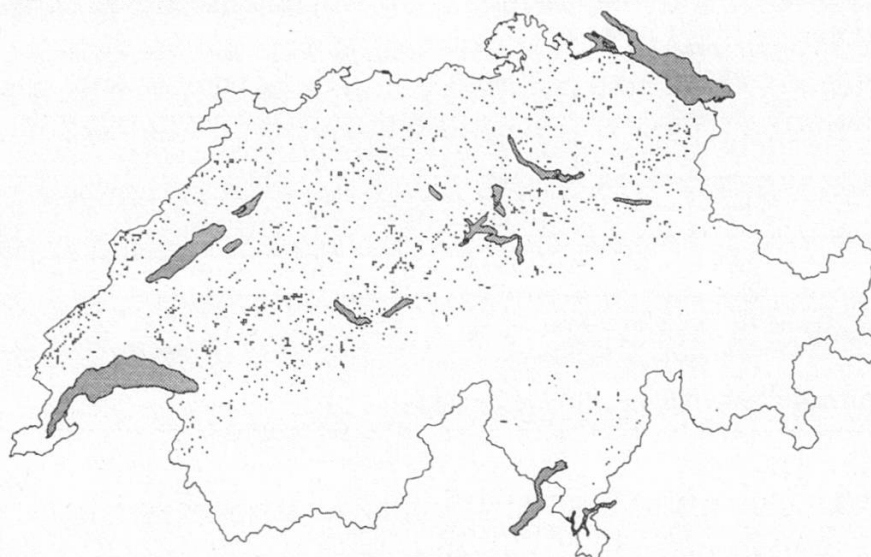
4. Folgerungen und Diskussion

Bis vor wenigen Jahren war die traditionelle Vegetationskartierung die einzige Methode, räumliche Vegetationsmuster kartographisch darzustellen (Van der Zee und Huizing, 1988). Der technische Durchbruch im Bereich der

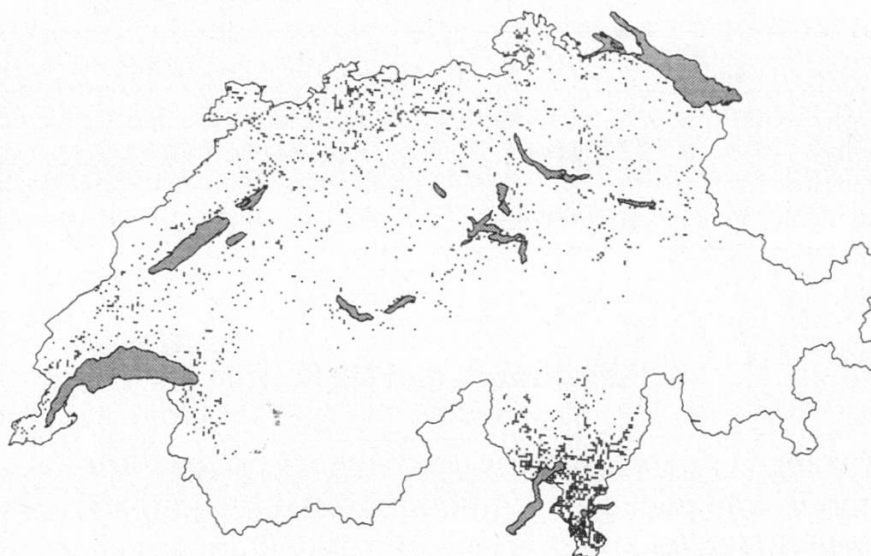
a) Bewaldete Punkte des Landesforstinventars (LFI) mit simulierter Waldgesellschaft Nr. 1–46 nach Ellenberg und Klötzli (1972)



b) ... davon naturferne Punkte



c) ... davon naturnahe Punkte



Geographischen Informationssysteme erlaubt es heute, solche Karten digital zu erfassen (Johnson, 1990; McCune und Allen, 1985). Die digitale Erfassung von traditionell hergestellten Vegetationskarten mittels EDV ist aber kaum als wissenschaftlicher Durchbruch zu werten; erleichtert wird mit einer Digitalisierung lediglich der Datenzugriff und die einfachere Integration in Planungsdokumente. Eine neuartige, für Vegetationskunde und Risikoanalyse interessante GIS-Anwendung ist hingegen die EDV-gestützte Herstellung von *simulierten* Vegetationskarten. Grössere Gebiete können so mit einer akzeptablen Genauigkeit simuliert werden, und die resultierenden Vegetationskarten bilden die Basis für standortkundliche Detailkarten sowie Risikoanalysen umweltbedingter Veränderungen. Beim hier vorgestellten Simulationsmodell liegt die Wahrscheinlichkeit, die «richtige» Vegetationseinheit zu treffen, zwischen 50 und 80 %. Diese Treffergenauigkeit ist verglichen mit Arbeiten von Davis und Goetz (1990), Binz und Wildi (1988) sowie Fischer (1990a, b) als gut einzustufen. Eine erfolgreiche Simulation setzt allerdings voraus, dass

- eine grosse empirische Datenbasis an Vegetationsaufnahmen (relevés) und deren Zuordnung zu Vegetationseinheiten existiert,
- digitale Karten verschiedener wichtiger Standortsfaktoren vorliegen,
- Zusammenhänge zwischen Vegetationstypen und Standortsfaktoren bestehen.

Das Simulationsmodell ersetzt die Feldkartierung in keiner Art und Weise, kann sie aber bedeutend unterstützen, wie etwa die momentan durchgeführten Waldstandortskartierungen der Kantone Bern, Freiburg und Appenzell Innerrhoden zeigen.

Das 250-m-Gitternetz ist für die meisten Detailkartierungen zu grob, und eine grössere Auflösung der Inputdaten für lokale und regionale Simulationen wäre wünschenswert, zum Beispiel mit einem Höhenmodell im 25-m-Raster oder mit Bodenkarten im Massstab 1:25 000. Was die Verbesserung des Modells «Naturnahe Waldvegetation – Standort» betrifft, ist zu vermerken, dass für gewisse Gesellschaften und Regionen noch recht grosse Datenlücken bestehen, deren Schliessung verbesserte Simulationen erwarten liesse. Verbes-

Abbildung 3. Räumliche Verbreitung naturnaher und naturferner Waldbestände in der Schweiz (1-km-Rasterpunkte des schweizerischen Landesforstinventars, LFI).

- (a) alle nach LFI bewaldeten Punkte, für die das Modell eine natürlicherweise von Laubhölzern oder der Weissstanne dominierte Gesellschaft simuliert (Einheiten Nr. 1–46; Ellenberg und Klötzli, 1972).
- (b) ... davon naturferne Punkte: alle LFI-Waldpunkte, für die das Modell eine natürlicherweise von Laubhölzern oder der Weissstanne dominierte Gesellschaft simuliert, die Fichten aber eine Basalfläche von > 75 % einnehmen.
- (c) ... davon naturnahe Punkte: alle LFI-Waldpunkte, für die das Modell eine natürlicherweise von Laubhölzern oder der Weissstanne dominierte Gesellschaft simuliert und die Nadelhölzer einen geringen Anteil an der Basalfläche einnehmen.

serungen sind aber auch durch den Einbezug anderer Standortparameter zu erwarten. Solchen «neuen» Eingangsgrössen fehlt allerdings häufig der nationale Kontext, und die Daten sind oft nicht auf landesweiter Basis digital verfügbar.

In der jetzigen Form und der 250-m-Auflösung ist das Modell in der Lage, als Planungsinstrument auf regionalem bis nationalem Niveau eingesetzt zu werden (Standortskunde, naturnaher Waldbau, Naturschutz und Landschaftsplanung). Als Beispiel zu dieser Anwendung dient im vorliegenden Aufsatz die Bestimmung des Naturnähegrades der LFI-Probepunkte. Es konnte gezeigt werden, welche und wieviele Punkte des LFI-Probenetzes aufgrund des Modelles heute in naturnahem bzw. naturfernem Zustand sind. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen darf angenommen werden, dass das Modell auch in der Lage ist, als Instrument zur Risikoanalyse eingesetzt zu werden und Vegetationskarten zu produzieren, bei denen wichtige Standortparameter manipuliert werden (zum Beispiel die Jahresdurchschnittstemperatur). Die Vergleiche zwischen Vegetationsmodell und Landesforstinventardaten beziehen sich allerdings ausschliesslich auf die Baumschicht. Modellseitig beruht der Vergleich auf gutachterisch postulierten Baumarten, die in den verschiedenen Waldgesellschaften natürlicherweise dominieren (Ellenberg und Klötzli, 1972). Diese Zuordnung wäre in künftigen Arbeiten sicher noch zu hinterfragen.

Résumé

Simulation électronique de la distribution spatiale de la végétation forestière proche de l'état naturel

Un modèle de probabilité a été développé sur la base de données phytosociologiques issues de 7500 relevés. Il permet de reproduire mathématiquement les interactions s'exerçant entre la végétation forestière proche de l'état naturel et différents facteurs écologiques. Les unités végétales sont calquées sur la classification de la végétation forestière établie par Ellenberg et Klötzli (1972). Le modèle a été couplé avec un système d'information géographique et une banque de données sur l'écologie du paysage; il contient 12 paramètres importants (climat [2], topographie [3], sol et géologie [7]) recueillis sur un réseau de 250 x 250 m s'étendant sur l'ensemble du pays. La carte infographique de la végétation forestière en Suisse qui en est résultée a été comparée pour certaines régions choisies à cet effet avec une carte des stations établie selon des méthodes classiques. Les données de ces deux sources concordent dans 50 à 80 % des cas au niveau de l'association végétale. Les différences dépendent de la région géographique et de l'unité phytosociologique analysées dans le test. Le modèle de simulation spatiale se prête aux applications suivantes:

- (a) Assistance lors de la cartographie classique de la végétation (travaux préparatifs, établissement d'une clé).
- (b) Instrument de planification régionale et nationale destinée à la sylviculture naturelle et à la protection de la nature.
- (c) Banque de données pour l'estimation, à l'échelle régionale et nationale, des risques de modifications végétales engendrées par les activités humaines (par exemple l'effet des changements climatiques escomptés).

Le présent article fait l'analyse du modèle et d'un exemple d'application. Il s'agit d'une approche visant à estimer le degré de proximité de l'état naturel des 6800 points de l'inventaire forestier national placés dans l'hypothétique ceinture de forêt mixte. La comparaison entre la végétation réelle et la végétation simulée (espèces arborescentes dominantes) montre que parmi les points de l'IFN, 20 % possèdent une trop grande proportion de résineux et 30 % peuvent être classés parmi les écosystèmes proches de l'état naturel. Le deuxième exemple s'appuie sur des simulations permettant d'analyser dans quelle mesure la forêt suisse pourrait se modifier à long terme sous l'influence d'un réchauffement climatique. Cet exemple présente aussi diverses évaluations des risques.

Traduction: *Monique Dousse*

Literatur

- Amt für Raumplanung des Kantons Zürich*, 1984. Kommentar zur Vegetationskundlichen Kartierung der Wälder im Kanton Zürich, Forstkreis 7. 48 S., Anhang.
- Bär, H.*, 1989. Kartographische Darstellungen von Wetter- und Klimadaten. Diplomarbeit Univ. Zürich. 107 S.
- Béguin, C., Hegg, O., Zoller, H.*, 1978. Kartierung der Vegetation der Schweiz nach einem Kilometer-Raster. *Geographica Helvetica* 33: 45–48.
- Binz, H. R., Wildi, O.*, 1988. Das Simulationsmodell MaB-Davos. Schlussber. Schweiz. MaB-Programm Nr. 33. Bundesamt für Umweltschutz, Bern.
- Bohn, U.*, 1981. Vegetationskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200 000 – Potentielle natürliche Vegetation – Blatt CC 5518 Fulda. Schriftenr. Vegetationskunde (Bonn-Bad Godesberg) 15: 1–330.
- Box, E. O.*, 1981. *Macroclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modelling in Phytogeography*. Junk, The Hague.
- Brzeziecki, B., Kienast, F., Wildi, O.*, 1993. Simulated map of the potential natural forest vegetation of Switzerland. *J. Veg. Science* 4: 499–508.
- Burnand, J., Hasspacher, B., Stocker, R.*, 1990. *Waldgesellschaften und Waldstandorte im Kanton Basel-Landschaft*. Verlag Kanton Basel, Liestal.
- Davis, F. W., Goetz, S.*, 1990. Modeling vegetation pattern using digital terrain data. *Landscape Ecology* 4: 69–80.
- Dierschke, H.*, 1974. Zur Abgrenzung von Einheiten der heutigen potentiell natürlichen Vegetation in waldarmen Gebieten Nordwestdeutschlands. In: Tüxen, R. (ed.) *Tatsachen und Probleme der Grenzen in der Vegetation*, pp. 305–325. Verlag J. Cramer, Lehre.
- Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV)*, 1988. Schweiz. Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Ber. 305. 375 S.
- Ellenberg, H., Klötzli, F.*, 1972. *Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz*. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw. 48: 388–930.
- Enders, G.*, 1979. *Theoretische Topoklimatologie Nationalpark Berchtesgaden*. Forschungsbericht des Nationalparks Hl. Berchtesgaden. 92 S.

- Etter, H., 1943. Pflanzensoziologische und bodenkundliche Studien an schweizerischen Laubwäldern. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw. 23: 5–132.
- Fischer, H. S., 1990a. Simulating the distribution of plant communities in an alpine landscape. *Coenoses* 5: 37–43.
- Fischer, H. S., 1990b. Simulation der räumlichen Verteilung von Pflanzengesellschaften auf der Basis von Standortskarten. Dargestellt am Beispiel des MaB-Testgebietes Davos. Diss. ETH Nr. 9202.
- Hegg, O., Béguin, C., Zoller, H., 1993: Atlas schutzwürdiger Vegetationstypen der Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern.
- Johnson, L. B., 1990. Analyzing spatial and temporal phenomena using geographical information systems. *Landscape Ecology* 4: 31–43.
- Keller, W., 1975. *Quercus-Carpinetum calcareum* Stamm 1938 *redivivum*? Vegetationskundliche Notizen aus dem Schaffhauser Reiat. Schweiz. Z. Forstw. 126: 729–749.
- Keller, W., 1978. Einfacher ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw. 54: 1–98.
- Keller, W., 1979a. Una chiave di feracità auxometrica semplice per i soprassuoli forestali delle regioni al sud delle Alpi. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw. 55: 181–232.
- Keller, W., 1979b. Ein Bestimmungsschlüssel für die Waldgesellschaften der Schweiz. Schweiz. Z. Forstw. 130: 225–249.
- Keller, W., 1982. Die Waldgesellschaften im 2. Aargauer Forstkreis. Waldwirtschaftsverband des 2. Aargauischen Forstkreises. Aarau. 42 (unpubl. Karten 1:5000 beim Kreisforstamt 2, Aarau).
- Kienast, F., 1987. FORECE – A forest succession model for southern central Europe. Oak Ridge National Laboratory. Environmental Science Division. ORNL-TM/10575. Publ. 1989: 1–73.
- Kienast, F., 1991. Simulated effects of increasing atmospheric CO₂ and changing climate on the successional characteristics of Alpine forest ecosystems. *Landscape Ecology* 5 (4): 225–238.
- Kienast, F., Kuhn, N., 1989. Simulating forest succession along ecological gradients in southern Central Europe. *Vegetatio* 79: 7–20.
- Lienert, L., (ed.) 1982. Die Pflanzenwelt in Obwalden. Ökologie. Kant. Oberforstamt OW, Sarnen.
- Martin, P., 1992. EXE-A climatically sensitive model to study climate change and CO₂ enhancement effects on forests. *Aust. J. Bot.* 40: 717–735.
- Monserud, R. A., Leemans, R., 1992. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological Modelling* 62: 275–293.
- McCune, B., Allen, T. F. H., 1985. Will similar forests develop on similar sites? *Can. J. Bot.* 63: 367–376.
- Pastor, J., Broschardt, M., 1990. The spatial pattern of a northern conifer-hardwood landscape. *Landscape Ecology* 4 (1): 55–68.
- Richard, J.-L., 1965. Extraits de la carte phytosociologique des forêts du canton de Neuchâtel. *Beitr. Geobot. Landesaufn. Schweiz* 47: 1–48.
- Schmid, E., 1944–50. Vegetationskarte der Schweiz. Massstab 1:200 000. Verlag Hans Huber, Bern.
- Shugart, H. H., Leemans, R., Bonan, G. B., 1992a. A systems analysis of the global boreal forest. Cambridge University Press. Cambridge. 565 p.
- Shugart, H. H., Smith, T. M., Post, W. M., 1992b. The potential for application of individual-based simulation models for assessing the effects of global change. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 23: 15–38.
- Sommerhalder, R., Kuhn, N., Biland, H.-P., von Gunten, U., Weidmann, D., 1986. Eine vegetationskundliche Datenbank der Schweiz. *Botanica Helvetica* 96: 77–93.
- Strahler, A. H., 1981. Stratification of natural vegetation for forest and rangeland inventory using Landsat digital imagery and collateral data. *Int. J. Rem. Sens.* 2: 15–41.
- Stumpel, A. H. P., Kalkhoven, J. T. R., 1978. A vegetation map of the Netherlands, based on the relationship between ecotopes and types of potential natural vegetation. *Vegetatio* 37: 163–173.
- Van der Zee, D., Huizing, H., 1988. Automated Cartography and Electronic Geographic Information Systems. In: Küchler, A. W., Zonneveld, I. S. (eds.) *Vegetation mapping*, pp. 163–189. Kluwer, Dordrecht.
- Walter, H., 1960. Einführung in die Phytologie. Band III. Grundlagen der Pflanzenverbreitung, 1. Teil: Standortlehre. Stuttgart.

- Wildi, O., Krüsi, B., 1992. Revision der Waldgesellschaften der Schweiz: Wunsch oder Notwendigkeit? Schweiz. Z. Forstw. 143: 37–47.
- Wissel, C., 1992. Modelling the mosaic cycle of a Middle European Beech Forest. Ecological Modelling 63: 29–43.
- Wohlgemuth, Th., 1992. Die vegetationskundliche Datenbank. Schweiz. Z. Forstw. 143: 22–36.
- Wrigley, N., 1985. Categorical Data Analysis for Geographers and Environmental Scientists. Longman, New York.

Gedruckt mit Unterstützung der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.

Verfasser: Dr. Felix Kienast, Dr. Bogdan Brzeziecki und PD Dr. Otto Wildi, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.