

Zur Verwendung von Landschaftsmasszahlen bei Wald- und Landschaftsinventuren: Überblick und Kritik

MICHAEL KÖHL UND KATJA OEHMICHEN

Keywords: Landscape indices; geographic window; geometric window; landscape inventory. FDK 524.6 : 585 : 587 : (430)

1. Einleitung

Während Waldinventuren in der Vergangenheit primär auf die Erfassung der Produktionsfunktion von Wäldern ausgerichtet waren und sich das Inventurobjekt auf das Waldareal beschränkte, müssen sie heute eine Fülle von Informationen zu den Vielfachfunktionen von Wäldern bereitstellen (BACHMANN *et al.* 1998). Dies erfordert integrierte Inventuransätze, die den Wald auch in seinem Beziehungsgefüge mit den ihn umgebenden Landschaftselementen darstellt. Der Übergang von Forstinventuren zu Landschaftsinventuren – wie er derzeit in der Schweiz vollzogen wird – ist somit eine logische Konsequenz des Paradigmenwechsels bei Waldinventuren.

Das Ergebnis von Waldinventuren sind Statistiken, die es ermöglichen, mit wenigen Kennwerten eine Waldsituation hinreichend zu beschreiben. Aufgrund ihrer intuitiven Verständlichkeit und der langen Erfahrung bei ihrer Interpretation finden diese Statistiken eine breite Akzeptanz. Allerdings bestehen nicht nur in Forstkreisen Unsicherheiten in der Auswahl geeigneter statistischer Masszahlen zur Beschreibung von Landschaften und deren Interpretation.

Eine Landschaft ist im weitesten Sinne ein Gebiet oder eine Umwelt, die als System von Systemen angesehen werden kann. Vom Standpunkt eines «Nutzers» hingegen ist Landschaft sowohl eine natürliche Resource als auch ein Gebilde für alltägliche Aktivitäten; Landschaft ist hier der Raum, der einen Beobachter umgibt. Für Landschaftsinventuren ergeben sich hieraus zwei komplementäre Ansätze: der eine identifiziert Landschaft als Umwelt und behandelt sie daher in einer gesamthaften Betrachtungsweise als Synthese eines Gebiets, der andere bezieht sich auf die Wahrnehmung der Landschaft durch einen Beobachter und somit auf einzelne Aspekte aus der Synthese einer Landschaft. Beide Ansätze legen starkes Gewicht auf die räumliche Struktur einer Landschaft als eine Manifestation ihrer internen Ordnung und der Interaktion zwischen verschiedenen Landschaftselementen.

Die Beschreibung der räumlichen Struktur einer Landschaft ist damit ein Schlüsselement jeder Landschaftsinventur. Analog zu Waldinventuren muss die räumliche Struktur anhand einiger weniger statistischer Masszahlen beschrieben werden, welche die Realität einerseits konsistent, effizient, erschöpfend und erwartungstreu abbilden, andererseits aber auch intuitiv verständlich sind. In der Landschaftsökologie werden solche Masszahlen zur Beschreibung von Landschaften als Landschaftsmasszahlen oder Landschaftsindizes bezeichnet. Dieser Beitrag stellt bekannte Landschaftsmasszahlen vor, diskutiert ihre Eignung im Rahmen von integrierten Wald- und Landschaftsinventuren und stellt «moving window»-Techniken als Möglichkeit zur kartenmässigen Darstellung von Landschaftsstrukturen dar.

2. Theoretische Grundlagen der Beschreibung von Landschaftsstrukturen

Eine neue Entwicklung in der Landschaftsökologie ist die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen räumlicher

Struktur und ökologischen Prozessen. Die Struktur (structure) der Landschaft wird nach FORMAN & GODRON (1986) definiert als: «... the distribution of energy, materials and species in relation to the sizes, shapes, numbers, kinds and configurations of landscape elements or ecosystems». Dieser Begriff ist im weiteren Sinne der räumliche Zusammenhang von Ökosystemen oder Elementen. Im engeren Sinne stellt die Struktur die Verteilung von Energie, Materialien und Arten im Verhältnis zu Grösse, Form, Anzahl, Arten und Zusammensetzung der Ökosysteme dar. Die anderen beiden grundlegenden Komponenten der Landschaftsökologie sind Funktion (function), also Wechselwirkungen zwischen den räumlichen Elementen in Form des Flusses von Energie, Materialien und Organismen, sowie Veränderung (change), womit die zeitliche Skala gemeint ist.

Die Landschaftsökologie beschäftigte sich in den vergangenen Jahren verstärkt mit quantitativen Methoden zur Beschreibung von räumlichen Verteilungsmustern, Flächenformen und der Fragmentierung flächiger Landschaftselemente. Die Bedeutung dieser Forschungsrichtung stellten TURNER & GARDNER (1991) wie folgt fest: «... landscape-level research requires new methods to quantify landscape patterns, compare landscapes, identify significant differences, and determine relationships of functional processes to landscape patterns...». Um Landschaften zu beobachten und zu bewerten, gibt es drei verschiedene Betrachtungsebenen: das Patch, die Klasse und die Landschaft. Diese sollen anhand eines Beispiels aus der Forstwirtschaft erklärt werden.

Patch

Das kleinste, je nach Betrachtungsniveau als weitgehend homogen anzusehende Einzelelement einer Landschaft ist das patch. Andere, synonym dazu verwendete Begriffe sind Fliese, Ökotop, Biotop, Physiotoptop, Geotop, naturräumliche Grundeinheit, Landschaftszelle, Standortraum, Nutzungseinheit, land unit oder auch landscape element. Beispielsweise könnte das ein erntereifer Fichtenaltbestand einer Unterabteilung sein (*Abbildung 1*).

Klasse

In der Klassen-Ebene werden alle Patches desselben Typs (bzw. Nutzungsklasse) zusammengefasst. Zum Beispiel wäre das die Klasse aller erntereifen Fichtenaltbestände der gesamten Landschaft (*Abbildung 2*).

Landschaft

Auf jeder unterschiedlichen Massstabsebene, angefangen von der individuen-spezifischen Sicht bis hin zu biogeographischen Arealen, besteht die Umwelt aus einem Mosaik von Patches, welches je nach räumlicher Anordnung und spezifischer Ausprägung als patch mosaic, patchiness oder spatial heterogeneity bezeichnet wird. Die Gesamtheit der Patches und patch mosaics stellt die Landschaft dar, welche ein «heterogeneous land area composed of a cluster of interacting ecosystem that is repeated in similar forms throughout» (GARDNER & TURNER 1991) ist. Auf das Beispiel der Forstwirtschaft bezogen bedeutet das, dass die «Waldlandschaft» aus einem Mosaik

von erntereifen Fichtenaltbestand-Patches bestehen könnte, die in der Klasse der erntereifen Fichtenaltbestände zusammengefasst sind. Des weiteren könnten diesem Mosaik die Klassen der Buchenjungwüchse, der Kiefernaltbestände und der Eichenvoranbauten zugehören. Wichtig ist, dass es keine absolute Grösse einer Landschaft gibt (MCGARIGAL & MARKS 1994), sondern dass solch eine Grösse eine Frage des Untersuchungsobjektes bzw. -zieles (phenomenon under investigation) ist. Diese Aussage trifft ebenso auf das Patch zu (Abbildung 3).

Von Bedeutung ist auch die Frage nach dem Betrachtungsmassstab. Der Begriff Skalierung (scale) hat verschiedene Bedeutungen und hängt von der Grösse des Untersuchungsgebietes (extent) und der räumlichen Auflösung der Daten (grain) ab. Extent beschreibt die zeitliche und räumliche Dimension der Daten und grain liefert die Grösse der kleinsten auflösbaren Einheit der Beobachtungen.

3. Beschreibung der Landschaftsindizes

Jede Landschaft besitzt ein ihr eigenes, charakteristisches Gefüge, über das sie identifiziert und beschrieben werden kann. Um die Struktur einer beliebigen Landschaft zu erfassen, gibt es eine Vielzahl statistischer Messgrössen, die sogenannten Landschaftsindizes (MCGARIGAL & MARK 1994¹; OEHMICHEN 2001; O'NEILL *et al.* 1988; WALZ 1999). Einzelne Landschaftsindizes beschreiben unterschiedliche Struktureigenschaften von Landschaften und können in acht Gruppen unterteilt werden:

- Flächenmasse (area metrics)
- Patch-Dichte Masse (patch density metrics)
- Kantenmasse (edge metrics)
- Formmasse (shape metrics)
- Kernflächenmasse (core area metrics)
- Nächster-Nachbar-Masse (nearest neighbor metrics)
- Diversitätsmasse (diversity metrics)
- Berührungs- und Einstreuungs-masse (contagion and interspersions metrics)

Für jede dieser acht Gruppen existieren mehrere Indizes. Teilweise stellt die begriffliche Trennung einzelner Indizes ein Problem dar; so sind zum einen bestimmte Indizes von verschiedenen Autoren mit geringfügigen Unterschieden bzw. Abweichungen definiert, zum anderen können verschiedene Indizes zu eng zusammenhängenden oder auch identischen Ergebnissen führen. Im Anschluss werden für jede der oben aufgeführten acht Gruppen kurz die abgebildeten Struktureigenschaften beschrieben.

3.1 Flächenmasse (area metrics)

Flächenmasse sind verhältnismässig einfache Landschaftsparameter, welche oft Grundlage bzw. Bezugseinheit für andere Indizes sind, wie beispielsweise die Gesamtlandschaftsfläche. Sie beschreiben die Landschaftszusammenstellung ohne räumlichen Bezug. Zu berücksichtigen sind die Patchgrösse und die Grösse der Landschaft (extent) als minimale und maximale Begrenzungen (Abbildung 4).

3.2 Patch-Dichte Masse (patch density metrics)

Zu dieser Gruppe der Landschaftsindizes zählen Patch-Dichte, -Anzahl, -Grösse und -Veränderlichkeit. Es werden Aussagen über die Vielfalt und Anzahl von vorhandenen Patches gemacht, jedoch ohne Angabe von Lage und Ort in der jeweili-

gen Landschaft. Diese Masse sind dazu geeignet, die Landschaftsgestaltung und -zusammenstellung wiederzugeben (Abbildung 5).

3.3 Kantenmasse (edge metrics)

In der Landschaftsökologie sind die Kantenmasse eine wichtige Bewertungsgrösse, da Übergangsbereiche zwischen ökologischen Raumeinheiten, die als Ökoton bezeichnet werden, ein grosses Lebensraumpotenzial bieten. Meist findet man in Ökotonen eine hohe geökologische Diversität, das heisst, ein vielfältiges Nahrungsangebot, ausreichend Deckung, günstige mikroklimatische Bedingungen und demzufolge auch viele verschiedene Organismen. Andererseits sind diese «Ökotonverbundbereiche» teilweise extrem sensibel, denn durch Randeffekte, wie Unterschiede der Lichtintensität und -qualität, Wind- und Sturmeinfluss kann das Mikroklima und die Störungsrate beträchtlich beeinflusst werden (Abbildung 6).

3.4 Formmasse (shape metrics)

Die Form von Landschaftselementen ist für bestimmte Fragestellungen sehr bedeutsam. So können beispielsweise Wechselwirkungen zwischen Patch-Form und -Grösse eine Vielzahl wichtiger ökologischer Prozesse beeinflussen. Grundsätzlich sind kompakte Formen wegen ihrer geringeren Randeffekte besser geeignet, Ressourcen zu bewahren. Zerlappte Formen hingegen können Umgebungsbeziehungen effektiver aufrechterhalten (Abbildung 7).

3.5 Kernflächenmasse (core area metrics)

Eine Kernfläche ist ein Gebiet innerhalb eines Patches, welches durch einen bestimmten Abstand zum Rand des Patches bzw. durch eine bestimmte Pufferbreite definiert ist. Kernflächenmasse werden von Wechselwirkungen zwischen Patch-Form und -Grösse sowie einer spezifischen Kantenbreite beeinflusst. Beispielsweise kann ein Patch gross genug für eine bestimmte Art sein, jedoch kann es andererseits durchaus nicht in der Lage sein, eine ausreichende Kernfläche anzubieten, da diese möglicherweise nicht weit genug vom Rand des Patches entfernt ist. Steigt die Kantenbreite an, so sinkt die Kernfläche (und umgekehrt) (Abbildung 8).

3.6 Nächster-Nachbar-Masse (nearest neighbor metrics)

Die Lage von Landschaftselementen ermöglicht es, Nachbarschaftsbeziehungen zu berechnen. Das einfachste Mass ist die Entfernung zweier Elemente, wodurch die Isolation eines Patches bestimmt werden kann. Auf der Basis der Patch-Berechnungen können Masse für Nutzungsklassen und ganze Landschaften berechnet werden (Abbildung 9).

3.7 Diversitätsmasse (diversity metrics)

Anhand der Diversitätsmasse wird die Landschaftskomposition, also die Vielfalt von Flächeneinheiten, quantifiziert. Die Messungen werden vom Reichtum (Anzahl der Patches) und der Gleichmässigkeit (Verteilung der Fläche auf die unterschiedlichen Patch-Typen) bestimmt (Abbildung 10).

3.8 Berührungs- und Einstreuungs-masse (contagion and interspersions metrics)

Der Berührungsindex kennzeichnet das Ausmass der Agglomeration oder Klumpung von Patches. Im Gegensatz dazu ist

¹ FRAGSTATS: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

der Einstreuungs- und Verteilungsindex ein Mass des Zusammenhanges zwischen Landschaftselementen und gibt die Unregelmässigkeit der Verteilung der einzelnen Patch-Typen an (*Abbildung 11*).

Viele der Indizes sind teilweise oder komplett redundant, da sie einen gleichen oder ähnlichen Aspekt der Landschaftsstruktur quantifizieren. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass vor der Berechnung der Indizes eine sinnvolle Auswahl getroffen wird. Bereits «ein halbes Dutzend Landschaftsstrukturmasse reicht aus, um die wichtigsten Struktureigenschaften von Landschaften zu beschreiben» (HERZOG *et al.* 1999). Des Weiteren sollten die Masszahlen folgende Eigenschaften aufweisen (O'NEILL *et al.* 1988):

- Der jeweilige Index sollte gleiche Strukturen in der Landschaft mit identischen Werten beschreiben.
- Der Index sollte unabhängig von bzw. unkorreliert mit anderen Indizes sein.
- Indizes sollten skaleninvariant, d.h. unabhängig, von der absoluten Fläche des Untersuchungsgebietes sein.

Die Analyse der Landschaft erfolgt auf drei Ebenen (MCGARIGAL & MARKS 1994):

1. Die erste Ebene (Patch) ist die der Einzelflächen (Patches) einer bestimmten Klasse. Auf dieser Ebene werden für alle Flächen bestimmte Formparameter abgeleitet und analysiert.
2. Die nächste Ebene (Klasse) repräsentiert die Gesamtheit von Einzelflächen der einzelnen Klassen oder Biotoptypen, die in einer Struktur vorkommen. Die Indizes dieser Ebene sollen Informationen über die mittlere Grösse, Form und Anzahl von Einzelflächen sowie über deren Verteilung liefern.
3. In der dritten Ebene (Landschaft) wird die Gesamtstruktur analysiert, indem die Ergebnisse auf Klassenebene zusammengefasst werden. Dazu eignen sich unter anderem Diversitätsindizes.

Die Berechnung mehrerer Landschaftsindizes (HERZOG *et al.* 1999) und die Anwendung eines hierarchischen Konzepts, das die Ebenen Patch, Klasse und Landschaft einschliesst (MCGARIGAL & MARKS 1994), führt nicht notwendigerweise zur einer hinreichenden Beschreibung der Struktureigenschaften einer Landschaft, da die Variabilität der Landschaft vom gewählten Massstab abhängt und nicht konsistent erfasst wird (HE *et al.* 2002; LEIMGRUBER *et al.* 2002). Landschaftsindizes arbeiten besonders bei stark strukturierten Landschaften unter Umständen oberhalb der kleinräumigen Variabilität und «glätten» Strukturunterschiede. Die Berechnung eines Index für eine Landschaft kann somit zu Defiziten führen, da ein Landschaftsindex an sich wenig über die Variabilität der Landschaft aussagt und damit Vergleiche und Schlussfolgerungen erschwert, wenn nicht gar unmöglich macht. Dieses Defizit kann ausgeglichen werden, indem Indizes nicht für die Gesamtheit einer Landschaft präsentiert werden, sondern die Diversität der Landschaft als Flächenmerkmal darstellen. Dies lässt sich durch die Erstellung von Karten realisieren, die Strukturmasse in ihrer räumlichen Dispersion abbilden. Hierbei werden Teilgebiete (sub-areas) aus dem Gesamtgebiet abgegrenzt und isoliert untersucht. Eine Möglichkeit zur Abgrenzung von Teilgebieten, auf die hier näher eingegangen werden soll, bieten die sogenannten Window-Konzepte.

4. Die Theorie der Windows

Window-Konzepte, die auch unter den Bezeichnungen Kernel, Masken oder Filter bekannt sind, werden vor allem in der digitalen Bildverarbeitung als Methode zur Charakterisierung

von räumlichen Informationen in ihrer Nachbarschaft angewendet (GONZALES & WOODS 1992). Die herkömmliche Form des Windows ist die eines Rechteckes mit einer Ausdehnung von n (Anzahl der Spalten) mal m (Anzahl der Reihen) Pixel. $n \cdot m$ -Windows werden auch als geometrische Windows bezeichnet. n und m sollten ungerade Zahlen sein, so dass immer ein Zentralpixel existiert. Der Informationsgehalt der $n \cdot m$ Pixel eines Windows wird auf das Zentralpixel projiziert.

Zur Analyse von Rasterdaten wird zumeist die «moving Window-Technologie» eingesetzt (*Abbildung 12*). Dabei wandert das Window pixelweise über das gesamte Bild. An jeder Position des Windows wird dem Zentralpixel der über die umgebenden Nachbarschaftspixel berechnete Wert zugeordnet und gleichzeitig gespeichert. Werden die errechneten Werte der Zentralpixel über einen Farbcode visualisiert, ergibt sich aus dem Originalbild ein neues Bild, dessen Informationsgehalt über den gewählten Berechnungsalgorithmus bestimmt wird.

Ein einfacher Projektionsalgorithmus ist die Berechnung des Mittelwertes aus den Werten der $n \cdot m$ Pixel, die vom Window eingeschlossen werden, und dessen Zuweisung zum Zentralpixel. Das moving Window führt hier zur Berechnung gleitender Mittelwerte über das gesamte Ausgangsbild. Zur Analyse der grossräumigen Landschaftsstruktur können innerhalb eines Windows Landschaftsindizes berechnet und dem Zentralpixel zugeordnet werden.

Die Grösse des Windows sollte generell so gewählt werden, dass die zu berechnenden Parameter «optimal» erfasst werden können. Somit hängt die Wahl der Ausdehnung des Windows vom Untersuchungsziel bzw. -zweck ab und ist nicht frei von Problemen. CHAVEZ & BAUER (1982) betonten beispielsweise: «... there is no constant rectangle ... size that provides the best results for every image because the optimum size is dependent on the «busyness» of the individual image».

Ein weiteres Problem bei der Anwendung der geometrischen ($n \cdot m$) Windows stellt der sogenannte «Randeffekt» dar. Berechnungen in Randnähe des Eingabebildes können zu inkorrekten Werten führen, da Nachbarschaftspixel fehlen. Dadurch ergibt sich ein Output-Bild, welches im Randbereich eine bestimmte Anzahl nicht analysierter Zeilen (nZ) und Spalten (nS) aufweist. In Abhängigkeit vom $n \cdot m$ -Pixel grossen Window können diese nach folgendem Grundsatz berechnet werden:

$$nZ = \frac{(n - 1)}{2} \quad \text{und} \quad nS = \frac{(m - 1)}{2}$$

In der Regel wird diesem «Randbereich» der Wert Null zugeordnet, damit die Grösse des Output-Bildes der des Input-Bildes entspricht.

Bei der Bewertung von Landschaften mit der geometrischen Window-Methode ist die generelle Reduzierung von Patches in die Grenzen des Windows zu berücksichtigen. Das heisst, der aktuelle «lokale Landschaftsausschnitt» wird in eine rechteckige Nachbarschaft von Pixeln gezwängt, welche durch die Masse des Windows vorgegeben ist. Daraus resultiert letztlich auch eine Beeinflussung der lokalen räumlichen Eigenschaften der analysierten Landschaft. Ist die Grösse des Windows deutlich kleiner als die durchschnittliche Ausdehnung der Patches, wird den Windows, die vollständig innerhalb eines Patches liegen, ein einheitlicher Wert zugewiesen. Abweichungen von diesem «Einheitswert» treten nur in Bereichen auf, in denen ein Window zwei oder mehr Patches überdeckt. In *Abbildung 13* wird dieser Effekt am Beispiel eines $3 \cdot 3$ geometrischen Windows veranschaulicht. Geometrische Windows können daher als Hilfsmittel zur Kantenerkennung eingesetzt werden, spiegeln aber das gesamte Spektrum der räumlichen Variabilität nur unzureichend wieder. Da

geometrische Windows die Nachbarschaft von Pixeln, nicht aber die Nachbarschaft von Patches analysieren, ist ihre Anwendbarkeit auf Fragen der Landschaftsökologie begrenzt. MERCHANT (1984) schlägt daher als Alternative zum geometrischen Window das geographische Window vor.

Im Gegensatz zur geometrischen Window-Methode ist die geographische Window-Methode ein Verfahren, bei dem das Patch und dessen benachbarte Patches untersucht werden. Dabei ist das Patch als eine Gruppe räumlich aneinandergrenzender Pixel definiert, die derselben Klasse angehören.

Die Ausgangsbasis des geographischen Windows ähnelt der des geometrischen Windows (Abbildung 14). Die Grundlage für Berechnungen bildet ein festgelegtes, den Untersuchungsanforderungen angepasstes, rechteckiges «Ausgangs-Window», welches $n \cdot m$ -Pixel gross ist. Nachdem die Ausdehnung dieses «Ausgangs-Window» festgelegt ist, expandiert das geographische Window solange, bis alle Patches, die durch das geometrische Window eingegrenzt wurden, vollständig erfasst sind. Wenn das «Ausgangs-Window» so gewählt ist, dass es vollständige Patches umfasst, dehnt sich das Window nicht aus. In diesem Falle entspricht das geographische Window dem geometrischen Window. Zu beachten ist auch, dass die Grösse des geographischen Windows nie kleiner wird als die des geometrischen Windows. Demzufolge ändern sich Form und Grösse des geographischen Windows dynamisch in Abhängigkeit von den Charakteristiken der betrachteten Landschaft. Durch diese «Anpassung» werden Patches einer Landschaft nie durch ein Window eingegrenzt, sondern immer vollständig in die Berechnungen einbezogen.

Im Folgenden sollen die Unterschiede, die aus der Anwendung der geometrischen und geographischen Windows auf einen Landschaftsausschnitt resultieren, am Beispiel der fraktalen Dimension verdeutlicht werden. Die fraktale Dimension ist ein Landschaftsindex aus der Gruppe der Diversitätsmasse, der die Komplexität der Ränder von Patches widerspiegelt. Mit Hilfe des Analyseprogramms CalcFracDim (OEHMICHEN & WILLKOMMEN 2001), das aus 8-bit (indizierten) RGB Bitmaps den Landschaftsindex der fraktalen Dimension berechnet, wurde ein Landschaftsausschnitt analysiert, der das Gebiet des Tharandter Waldes nahe Dresden umfasst. Der Ausgangsdatensatz war eine Bitmap-Datei, die drei Kanäle eines Ausschnitts einer Satellitenszene des Sensors Landsat TM in RGB-Ratio-Darstellung zeigt (siehe Abbildung 15a). Im Originalbild sind deutlich das zusammenhängende Waldgebiet des Tharandter Waldes mit einer landwirtschaftlich genutzten Zone in seinem Zentrum sowie die umliegenden landwirtschaftlichen Schlagflächen erkennbar.

In den Abbildungen 15c und 15d sind die Ergebnisse der Analyse mit $7 \cdot 7$ Pixel grossen geometrischen und geographischen Windows als Grauwertbilder dargestellt. Helle Grauwerte entsprechen einer hohen fraktalen Dimension. Die Auswertung mit geometrischen Windows führt zu einer starken Variation der fraktalen Dimension innerhalb des Waldgebietes, die vor allem durch Schneisen und Waldwege bedingt ist. Deutlich sind auch die scharfen Übergänge zwischen verschiedenen Landbedeckungsklassen erkennbar. Bei grösseren, zusammenhängenden Patches hingegen führt die Analyse mit geometrischen Windows zu einer geringen fraktalen Dimension, was besonders bei landwirtschaftlichen Schlagflächen im linken, oberen Quadranten des Bildausschnitts augenfällig ist. In weiten Bereichen unterscheidet sich das Grauwertbild in seiner räumlichen Dynamik kaum vom Originalbild und führt somit nur zu einem geringen Informationsgewinn.

Gänzlich anders stellt sich die Analyse mit geographischen Windows dar, bei der nicht starr an einer festen Grösse des Windows festgehalten, sondern die gesamte Ausdehnung von Patches, die im $7 \cdot 7$ Pixel grossen Ausgangsfenster enthalten

sind, berücksichtigt wird. Das Ergebnisbild zeigt daher gegenüber den geometrischen Windows grössere Flächen mit einheitlicher fraktaler Dimension. Besonders deutlich wird dies bei den zusammenhängenden Waldflächen, denen eine nahezu identische fraktale Dimension zugewiesen wird. Ebenso spiegelt die Analyse der landwirtschaftlichen Flächen die unterschiedliche fraktale Dimension wider und nicht, wie bei geometrischen Windows, deren Flächenausdehnung. Zusammen mit den fließenden Übergängen zwischen verschiedenen Patchklassen wird mit geographischen Windows eine bessere flächige Repräsentation der fraktalen Dimension der Landschaft realisiert.

Abbildung 15b zeigt die Unterschiede zwischen den Analyse-Ergebnissen mit geometrischen und geographischen Windows. Je heller die Grauwerte der Pixel desto grösser sind die Unterschiede, die zwischen beiden Window-Typen bei der Ermittlung der fraktalen Dimension erzielt wurden. Unterschiede treten vor allem in Randbereichen von Patches auf und veranschaulichen damit die unterschiedlichen Eigenschaften beider Windows: während geometrische Windows vor allem Wechsel zwischen Patchklassen erkennen, glätten geographische Windows in Randbereichen und stellen damit Landschaftsmasszahlen in ihrem räumlichen Kontext dar. Die Wahl des Window-Typs bestimmt bei der Analyse von Landschaftsstrukturen, ob die Nachbarschaftsbeziehungen von Pixeln oder von Patches untersucht werden, und hängt somit wesentlich vom Untersuchungsziel ab.

5. Diskussion

Landschaftsindizes stellen einen Methodenansatz dar, der über weite Bereiche von räumlichen Skalierungen angewendet werden kann. Der Ansatz birgt jedoch das Problem aller statistischer Masszahlen: wie kann eine quantitative Grösse in eine qualitative Aussage überführt werden? Während bei Waldinventuren ein relativ ausgeprägter Konsens über die Bewertung von statistischen Grössen wie Grundfläche, Hektarvorrat oder Volumenzuwachs besteht, ist die Bewertung von Landschaftsmasszahlen komplexer und widersprüchlicher.

Ein Problem hierbei bereiten die Landschaftsindizes selbst. Viele der beschriebenen Landschaftsindizes stellen redundante Informationen zur Verfügung (HAINES YOUNG & CHOPPING 1996; GILES & TRANI 1999), die durch multivariate statistische Methoden, z.B. Faktoranalysen, reduziert werden können (RITTERS *et al.* 1995; CAIN *et al.* 1997). Ein weiteres Problem liegt in der Eigenart einiger Landschaftsindizes für verschiedene Landschaftsmuster gleiche numerische Werte zu liefern. Dies soll an den folgenden beiden Beispielen veranschaulicht werden. Für jeweils zwei unterschiedlich strukturierte Landschaften werden identische Werte für den Index «Anzahl der Patches» (Abbildung 16) und den Index «Patchfläche» berechnet (Abbildung 17).

Landschaftsdaten liegen meist nicht in Form exakt vermessener Polygone sondern als räumlich aggregierte Daten, z.B. Rasterdaten, vor. Die Aggregation von räumlich expliziten Daten führt zwangsläufig zu einem Informationsverlust, der mit zunehmender Grösse der Zellen (Raster, Pixel) steigt. Bei der Analyse von Landschaftsstrukturen ist also neben der Grösse des Untersuchungsgebietes von entscheidender Bedeutung, ob der Massstab, der zur Erkennung kleinräumiger Unterschiede erforderlich ist, der verfügbaren räumlichen Auflösung der Landschaftsdaten entspricht. Der Aggregationsprozess führt sowohl zu einer Zunahme der Häufigkeit dominanter Landbedeckungsklassen bei gleichzeitiger Abnahme oder sogar Verlust von Klassen mit geringer räumlicher Ausdehnung als auch zu einer Veränderung der räumlichen Muster (GARDNER & O'NEILL 1991; O'NEILL *et al.* 1996; OBEY-



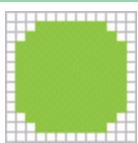
Abbildung 1: Patch.



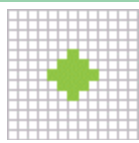
Abbildung 2: Klasse.



Abbildung 3: Landschaft.

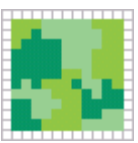


hoher Wert

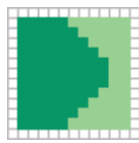


niedriger Wert

Abbildung 4: Index Fläche (area).



hoher Wert

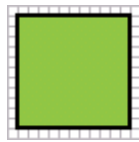


niedriger Wert

Abbildung 5: Index Anzahl der Patches (number of patches).



hoher Wert

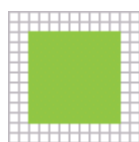


niedriger Wert

Abbildung 6: Index Gesamtkantenlänge (total edge).

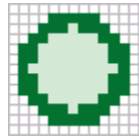


hoher Wert

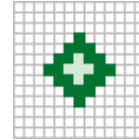


niedriger Wert

Abbildung 7: Formindex (shape).

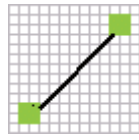


hoher Wert

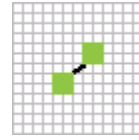


niedriger Wert

Abbildung 8: Kernfläche (core area).

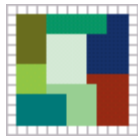


hoher Wert

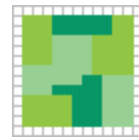


niedriger Wert

Abbildung 9: Index Nachbarschaftsentfernung (nearest-neighbor distance).

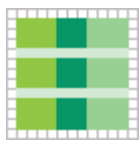


hoher Wert

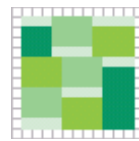


niedriger Wert

Abbildung 10: Anzahl unterschiedlicher Patch-Typen (patch richness).



hoher Wert



niedriger Wert

Abbildung 11: Einstreuungs- und Verteilungsindex (interspersation and juxtaposition index).

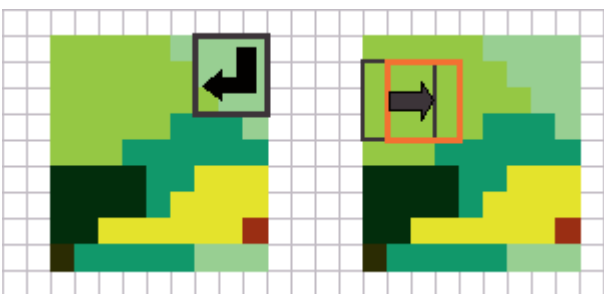


Abbildung 12: Die moving Window-Technologie.

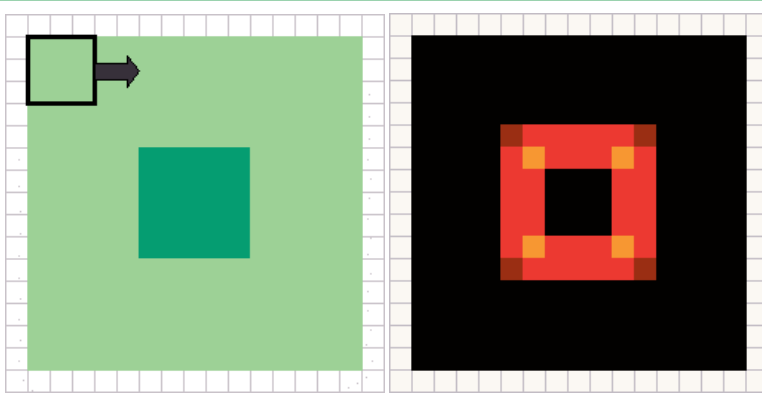


Abbildung 13: Beispiel einer Landschaftsbewertung mit einem 3 · 3 geometrischen Window.

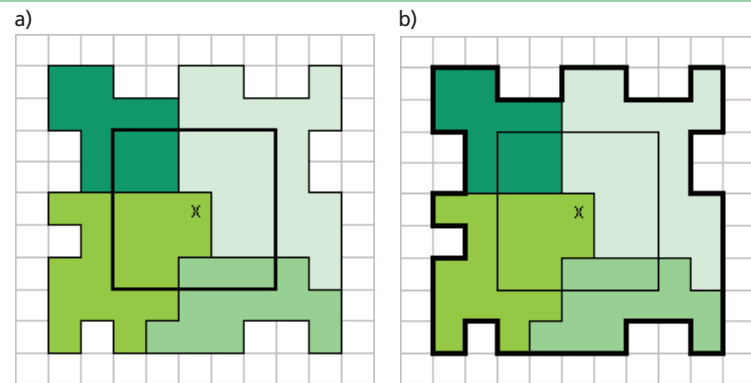


Abbildung 14: Die Patch-Erfassung des geometrischen Windows und des geographischen Windows.

(a) und (b) zeigen zwei Analysefenster, die denselben Landschaftsausschnitt berechnen, der aus vier verschiedenen Patches besteht. Grafik (a) zeigt ein 5 · 5-Pixel grosses geometrisches Window mit dem Zentralpixel X. In Grafik (b) ist das geographische Window dargestellt, welches sich über die Grenzen des geometrischen Windows hinaus ausgedehnt hat, so dass die vier Patches vollständig erfasst sind.

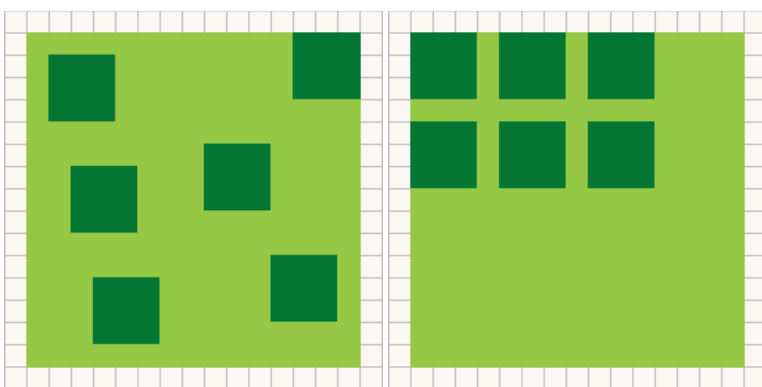


Abbildung 16: Index Anzahl der Patches (number of patches).

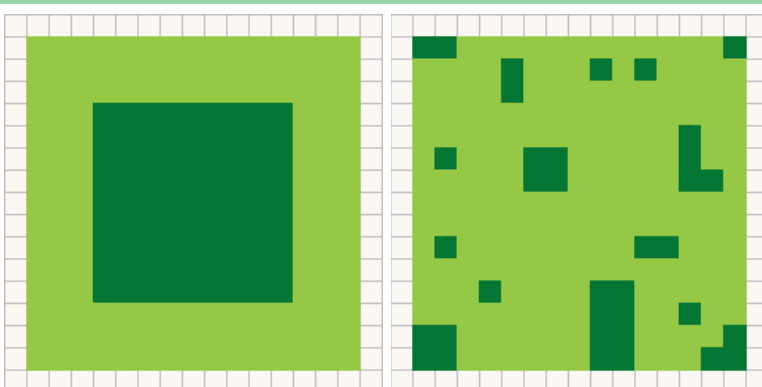


Abbildung 17: Index Patch-Fläche (patch area).

Abbildung 15: Tharandter Wald.

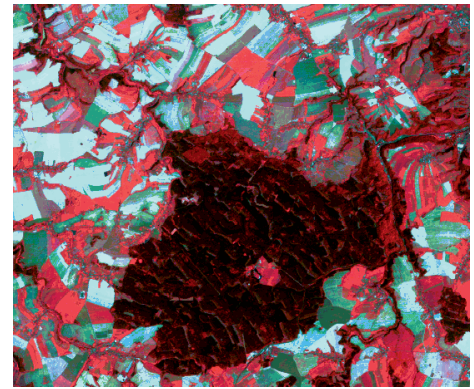


Abbildung 15a: Originaldatensatz (Landsat TM, Ratio-Darstellung).

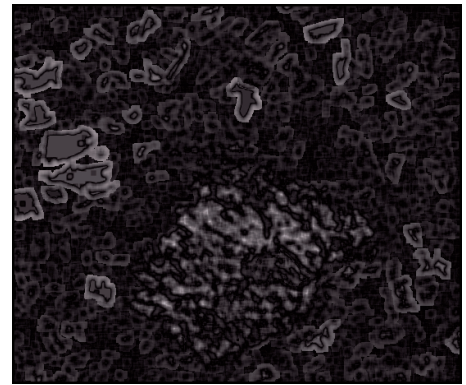


Abbildung 15b: Differenz zwischen geometrischem und geographischem Window.

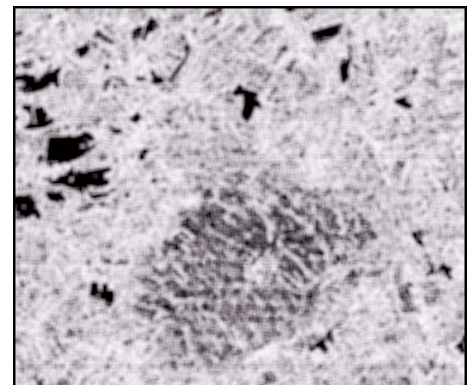


Abbildung 15c: Geometrisches Window (7 · 7).

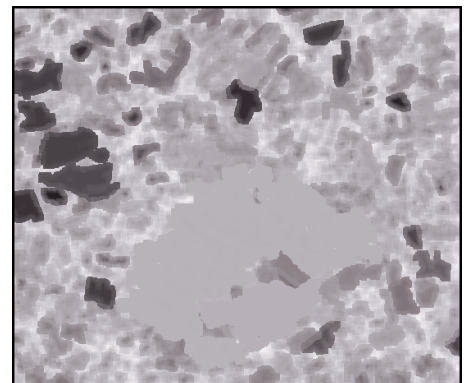


Abbildung 15d: Geographisches Window (7 · 7).

SEKERA & RUTCHEY 1997; HE *et al.* 2002; LEIMGRUBER *et al.* 2002). Vor der Verwendung eines Datensatzes zur Landschaftsanalyse muss *a priori* bestimmt werden, welche räumliche Auflösung zur Erfassung von Landschaftsstrukturen und Schwellenwerten erforderlich ist. O'NEILL *et al.* (1996) untersuchten die Massstabsproblematik zur Quantifizierung von regionalen Landschaftsmustern anhand von Fernerkundungsdaten der südöstlichen Vereinigten Staaten und empfehlen, dass Daten die zwei- bis fünffache räumliche Auflösung von zu erfassenden Landschaftscharakteristika haben sollten. Bei Verwendung von Fernerkundungsdaten sind zusätzlich Klassifizierungsfehler zu berücksichtigen (CONGALTON 1991; BODMER 1993; KELLENBERGER 1996a, 1996b), die zum Verlust kleinräumiger Strukturen und einseitigen Verzerrungen führen können.

Es ist unbestritten, dass die räumliche Anordnung von Landschaftselementen ökologische Prozesse innerhalb der Landschaft beeinflussen (FORMAN & GODRON 1986). Die Beschreibung der Beziehung zwischen Landschaftsmustern und ökologischen Prozessen erfordert die Integration von Methoden zur Analyse von Landschaftsmustern mit Methoden zur Beschreibung ökologischer Prozesse (OPDAM *et al.* 2002). Landschaftsmuster können wie oben gezeigt durch Landschaftsindizes quantifiziert werden, ökologische Prozesse werden durch Responsevariablen und Prozessraten, wie zum Beispiel Überlebenswahrscheinlichkeit, Vorkommen und Häufigkeit von Arten, beschrieben (FOREMAN & GODRON 1986; TURNER & GARDNER 1990; JONGMAN *et al.* 1995). Mit Hilfe statistischer Methoden werden Landschaftsindizes und Responsevariablen in Beziehung gesetzt. Landschaftsindizes werden damit einerseits zu Indikatoren für ökologische Prozesse in der Landschaft, andererseits eröffnet sich hiermit die Möglichkeit, die statistischen Beziehungen in Modellen umzusetzen und den Einfluss von Landschaftsveränderungen auf Ökosysteme zu prognostizieren. Landschaftsindizes wurden erfolgreich zur Vorhersage von Responsevariablen ökologischer Prozesse wie Häufigkeit, Vorkommen, Verteilung oder Überlebenswahrscheinlichkeit verwendet (SCHUMAKER 1996; FAHRIG 1998; METZGER 1998; MEYER *et al.* 1998; WIEGAND *et al.* 1999; RADELOFF *et al.* 2000). Auf den ersten Blick sind diese Ansätze viel versprechend und die zunehmende Qualität und Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten, geographischen Informationssystemen und leistungsfähigen Computern bilden die Basis für eine weite Verbreitung. Zum Teil gravierende Probleme bereiten aber die Randbedingungen, die zur Gültigkeit der Beziehungen zwischen Landschaftsindizes und ökologischen Prozessen erfüllt sein müssen. Damit einher gehen Komplikationen bei deren Übertragbarkeit auf beliebige landschaftsökologische Situationen (TISCHENDORF 2001).

Ökologische Prozesse in der Landschaft sind nicht linear mit Landschaftsindizes verknüpft (WITH & CRIST 1995), sondern weisen kritische Schwellenwerte auf. Während Veränderungen ober- oder unterhalb des Schwellenwerts geringe oder vernachlässigbare Auswirkungen haben, können bei deren Über- oder Unterschreitung dramatische qualitative Veränderungen auftreten (GARDNER *et al.* 1987). So hat die Waldrandlänge, die mit Kantenmassen (edge metrics) beschrieben wird, einen entscheidenden Einfluss auf die artspezifische Habitatqualität. Ein Unterschreiten der kritischen Waldrandlänge kann zu einem Artverlust, eine Überschreitung zu einer Verbesserung der Habitatqualität führen. Wird diese Betrachtung von einer auf eine Vielzahl von Arten ausgedehnt, kann sich hinter der quantitativen Veränderung eines Kantenmasses eine Veränderung der Artenzusammensetzung des untersuchten Gebietes verbergen. Diese Betrachtung lässt sich auf andere Landschaftsindizes ausdehnen. So kann die Fragmentierung einer Landschaft mit nur geringen Effekten für die Artenzusammensetzung voranschreiten und erst bei einer Zer-

schneidung von Korridoren oder einer drastischen Verkleinerung von Kernzonen zu einer Zerstörung von Habitaten führen. Da Arten auf Landschaftsveränderungen sehr verschieden reagieren, stellen Landschaftsindizes per se nur wenig bedeutungsvolle Informationen bereit. Qualitative Aussagen über Strukturen, Prozesse und Veränderungen sind erst möglich, wenn Landschaftsindizes ökologisch skaliert und mit Schwellenwerten verbunden werden (Vos *et al.* 2001). TISCHENDORF (2001) fand eine geringe Konsistenz der statistischen Beziehungen zwischen Landschaftsindizes und Responsevariablen zur Beschreibung von ökologischen Prozessen.

6. Schlussfolgerungen

Integrierte Waldinventuren werden zukünftig verstärkt Merkmale zur Beschreibung der räumlichen Struktur und Nachbarschaft von Wäldern aufnehmen müssen, um den geänderten Informationsbedürfnissen gerecht zu werden. Landschaftsindizes können hier eine Erfolg versprechende Erweiterung des Merkmalkatalogs darstellen, wenn unter anderem die folgenden Aspekte Beachtung finden, die helfen sollen, Fehlinterpretationen von Landschaftsmasszahlen zu vermeiden:

1. Vor der Herleitung von Landschaftsmasszahlen muss festgelegt werden, welche räumliche Auflösung die verwendeten Daten haben müssen. Entscheidend bestimmt wird die erforderliche räumliche Auflösung vom Detailierungsgrad, mit dem Landschaftsmuster beschrieben werden sollen, der kleinsten noch zu berücksichtigenden Patchgröße, dem tolerierbaren Fehler sowie Verteilungsmerkmalen der zu untersuchenden Landschaft.
2. Da ökologische Prozesse in einer Landschaft Gegenstand einer flächenhaften Betrachtung sind, führt die Kondensierung der Landschaftsstruktur in einem Untersuchungsgebiet auf einen Landschaftsindex zwangsläufig zu Inkonsistenzen. Eine flächige Darstellung und damit die Anwendung von Window-Techniken ist für die überwiegende Mehrheit von Fragestellungen unabdingbar.
3. Bei der Verwendung von klassifizierten Fernerkundungsdaten müssen die Klassifizierungsfehler in die Analyse einfließen.
4. Die Landschaftsindizes, die in einen Resultatbericht aufgenommen werden, sollten die Landschaftsstrukturen umfassend und erschöpfend beschreiben und frei von Redundanzen sein.
5. Werden Landschaftsindizes und Responsevariablen ökologischer Prozesse verknüpft, müssen die Bedingungen, für welche die Beziehungen aufgestellt wurden, sorgfältig untersucht und dokumentiert werden. Ebenso muss die Übertragbarkeit der Beziehungen für alle Teilflächen, in denen sie angewendet werden, geprüft werden.
6. Es besteht dringender Forschungsbedarf zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Landschaftsmustern und ökologischen Prozessen.

Zusammenfassung

Landschaftsmasszahlen wurden entwickelt, um die räumliche Struktur einer Landschaft mit Hilfe einfacher Kennwerte zu beschreiben. Der vorliegende Aufsatz gibt zunächst eine Übersicht über das Konzept und die Herleitung der gebräuchlichsten Landschaftsmasszahlen, die im Wesentlichen zur Auswertung von in Rasterformat vorliegende Flächendaten verwendet werden. Zur Erfassung der räumlichen Diversität einer Landschaft können Landschaftsindizes als gleitende Mittelwerte für Landschaftsausschnitte berechnet werden. Hierzu stehen zwei Varianten zur Verfügung: geometrische Fenster oder

Windows verwenden feste, aus wenigen Pixeln bestehende Landschaftsausschnitte während geographische Fenster eine variable Grösse aufweisen und den zu untersuchenden Landschaftsausschnitt an die Grösse von Landnutzungsklassen anpassen. Geometrische Windows reagieren sensitiv auf Grenzlinien und Übergänge zwischen Landschaftsklassen und geben im Gegensatz zu geographischen Windows die flächenhafte Diversität einer Landschaft nur unzureichend wieder.

Die Aussagekraft von Landschaftsmasszahlen per se ist begrenzt. Erst durch die Integration von Landschaftsmasszahlen und ökologischen Prozessen sind qualitative Aussagen über eine Landschaft möglich. Abschliessend werden Empfehlungen für die praktische Anwendung von Landschaftsindizes gegeben.

Summary

The application of landscape indices in forest and landscape inventories: review and critique

Landscape indices have been developed as a mean of describing the spatial structure of landscapes. This paper presents an overview of the concept and the approaches of the most commonly used landscape indices, which are mainly applied to spatial data in raster format. In order to describe the spatial diversity of a landscape, indices can be calculated as moving averages for sections of the landscape. This can be carried out using two concepts: geometric windows make use of fixed sections with low resolution, while geographic windows adapt the window size according to landcover or landuse classes. Geometric windows are sensitive to borderlines and changes between landcover or landuse classes, while geographic windows represent the spatial diversity of landscapes.

Taken alone, matrices provide only limited information on the content of landscape. Only the combination of landscape indices and underlying ecological processes can provide a sound basis for a qualitative evaluation. The paper concludes with a set of recommendations for practical applications of landscape indices.

Résumé

Utilisation d'indicateurs paysagers dans les inventaires forestiers et paysagers: aperçu et critique

Des indicateurs paysagers ont été développés afin de décrire la structure spatiale d'un paysage à l'aide de caractéristiques simples. Le présent article brosse les grandes lignes du concept et définit les principaux indicateurs utilisés dans l'interprétation des données spatiales au format matriciel. Le recensement de la diversité spatiale d'un paysage nécessite le calcul d'indicateurs paysagers qui constituent des valeurs moyennes mobiles pour des fenêtres de paysage. Il existe deux variantes de calcul: les fenêtres géométriques qui utilisent des portions de paysage fixes de quelques pixels, et les fenêtres géographiques qui adaptent la grandeur de la fenêtre en fonction des classes d'utilisation du territoire. Les fenêtres géométriques mettent en évidence les limites et les transitions entre les classes paysagères, tandis que les fenêtres géographiques permettent de représenter la diversité spatiale des paysages.

Les informations fournies par les indicateurs paysagers sont limitées. C'est pourquoi l'évaluation qualitative d'un paysage requiert la conjonction des indicateurs paysagers et des processus écologiques. Finalement, l'article donne des recommandations pour l'utilisation pratique des indicateurs paysagers.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Literatur

- BACHMANN, P., KÖHL, M., PÄIVINEN, R. (eds.), 1998: Assessment of Biodiversity for Improved Forest Planning, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 421 p.
- BODMER, H.C., 1993: Untersuchungen zur forstlichen Bestandeskartierung, Professur für Forsteinrichtung, ETH Zürich, 160 S.
- CAIN, D.H., RIITERS, K.H., ORVIS, K., 1997: A multi-scale analysis of landscape statistics, *Landscape Ecology* 12: 199–212.
- CHAVEZ, P., BAUER, B., 1982: An Automatic Optimum Kernel-Size Selection Technique for Edge Enhancement, *Remote Sensing of Environment* 12: 23–38.
- CONGALTON, R.G., 1991: A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment* 37: 35–46.
- FAHRIG, L., 1998: When does fragmentation of breeding habitat affect population survival? *Ecological Modelling* 105: 273–292.
- FORMAN, R.T.T., GODRON, M., 1986: *Landscape Ecology*, John Wiley & Sons, New York, Chichester, 619 p.
- GARDNER, R.H., O'NEILL, R.V., 1991: Pattern, process and predictability: the use of neutral models for landscape analysis, in: Turner, M.G., Gardner, R.H. (eds.), 1990: *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, Ecological Studies, Springer Verlag, Heidelberg: 289–307.
- GONZALES, R.C., WOODS, R.E., 1992: *Digital Image Analysis*, Addison-Wesley, Reading, 716 p.
- GILES, R.H., TRANI, M.K., 1999: Key elements of landscape pattern measures, *Environmental Management* 123: 477–481.
- HAINES YOUNG, R., CHOPPING, M., 1996: Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes, *Progress in Physical Geography* 20 (4): 418–445.
- HE, H.S., VENTURA, S.J., MLADENOFF, D.J., 2002: Effects in spatial aggregation approaches on classified satellite imagery, *International Journal of Geographical Information Science* 16 (1): 93–109.
- HERZOG, F., LAUSCH, A., MÜLLER, E., THULKE, H.-H., 1999: Das Monitoring von Landschaftsveränderungen mit Landschaftsstrukturmassen – Fallstudie Espenhain. – *IÖR-Schriften*, 29: 93–107, Dresden.
- JONGMAN, R.H.G., TER BRAAK, C.J.F., VAN TONGEREN, O.F.R., 1995: *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge, 299 p.
- KELLENBERGER, T., 1996a: Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten, *Remote Sensing Series*, 28, Geographisches Institut der Universität Zürich, 284 S.
- KELLENBERGER, T., 1996b: Classification of Temperate Forests in Switzerland with Multispectral Data: Effects of Ground Truth and Satellite Data Scaling on Classification, in: P.J. Kennedy (ed.): *Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring*; EC-Joint Research Center, EUR 17685 EN: 421–428.
- LEIMGRUBER, P., MC SHEA, W.J., SCHNELL, G.D., 2002: Effects of scale and logging on landscape structure in a forest mosaic, *Environmental Monitoring and Assessment* 74 (2): 141–166.
- MCGARIGAL, K., MARKS, B.J., 1994: FRAGSTATS. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, Version 2.0, Corvallis.
- MERCHANT, J.W., 1984: Using Spatial Logic in Classification of Landsat TM Data, *Proceedings of the Pecora IX Symposium*. 378–385, Sioux Falls, South Dakota.
- METZGER, J.P., 1998: Landscape structure changes and species richness in forest fragments of south Brazil, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Serie III – Sciences de la Vie – Life Sciences* 321 (4): 319–333.
- MEYER, J.S., IRWIN, L.L., BOYCE, M.S., 1998: Influence of habitat abundance and fragmentation on northern spotted owls in western Oregon, *Wildlife Monographs* 139: 5–51.
- OEHMICHEN, K., 2001: Vergleich von Landschaftsindizes unter besonderer Berücksichtigung des geometrischen- und geographischen Window-Konzeptes, Diplomarbeit, Professur Biometrie und forstliche Informatik der TU Dresden, Tharandt.
- OEHMICHEN, K., WILLKOMMEN, J., 2001: Anwenderdokumentation für das Programm CalcFracDim, interner Bericht, Professur Biometrie und forstliche Informatik der TU Dresden, Tharandt.
- OPDAM, P.F.M., FOPPEN, R., VOS, C., 2002: Bridging the gap between ecology and spatial planning in landscape ecology, *Landscape Ecology* 16: 767–779.

- OBEYSEKERA, J., RUTCHEY, K., 1997: Selection of scale for Everglades landscape models, *Landscape Ecology* 12 (1): 7–18.
- O'NEILL, R.V., KRUMMEL, J.R., GARDNER, R.H., SUGIHARA, G., JACKSON, B., DEANGELIS, D.L., MILNE, B.T., TURNER, M.G., ZYGMUNT, B., CHRISTENSEN, S.W., DALE, V.H., GRAHAM, R.L., 1988: Indices of landscape pattern, *Landscape Ecology* 7 (1): 153–162.
- O'NEILL, R.V., HUNSAKER, C.T., TIMMINS, S.P., JACKSON, B.L., JONES, K.B., RIITERS, K.H., WICKHAM, J.D., 1996: Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale, *Landscape Ecology* 11 (3): 169–180.
- RADELOFF, V.C., MLADENOFF, D.J., BOYCE, M.S., 2000: The changing relation of landscape patterns and jackpine budworm populations during an outbreak, *Oikos* 90 (3): 417–430.
- RIITERS, K.H., O'NEIL, R.V., HUNSAKER, C.T., WICKHAM, J.D., YANKEE, D.H., TIMMINS, S.P., JONES, K.B., JACKSON, B.L., 1995: A factor analysis of landscape pattern and structure metrics, *Landscape Ecology* 10: 23–39.
- SCHUMAKER, N.H., 1996: Using landscape indices to predict habitat connectivity, *Ecology* 77 (4): 1210–1225.
- TISCHENDORF, L., 2001: Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology* 16 (3): 235–254.
- TURNER, M.G., GARDNER, R.H. (eds.), 1990: *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, Ecological Studies, Springer Verlag, Heidelberg, 536 p.
- VOS, C., VERBOOM, J., OPDAM, P.F.M., BRAAK, C.J.F., 2001: Towards ecologically scaled landscape indices, *American Naturalist* 157 (1): 24–41.
- WIEGAND, T., MOLONEY, K.A., NAVES, J., KNAUER, F., 1999: Finding the missing link between landscape structure and population dynamics: a spatially explicit perspective, *American Naturalist* 154 (6): 605–627.
- WALZ, U. 1999: *Charakterisierung der Landschaftsstruktur mit Methoden der Satelliten-Fernerkundung und der Geoinformatik*, Dissertation an der TU Dresden, 191 S.
- WITH, K.A., CRIST, T.O., 1995: Critical thresholds in species responses to landscape structure, *Ecology* 76: 2446–2459.

Autoren

Prof. Dr. MICHAEL KÖHL und KATJA OEHMICHEN, Diplom-Forstwirtin, TU Dresden, Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik, Piennner Strasse 8, DE-01737 Tharandt.