

Daten und Methoden zur Analyse von dreidimensionalen Landschaftsstrukturen

ULRICH WALZ, SEBASTIAN HOECHSTETTER & NGUYEN XUAN THINH, Dresden

Keywords: GeoInformatics, landscape structure, landscape metrics, Lidar, 3D analysis

Abstract: *Data and methods for the analysis of three-dimensional landscape structures.* Landscape metrics can provide valuable information about the characteristic features of a landscape section. This information can be used for the purpose of environmental monitoring as well as for issues of ecological modeling. So far, however, only two spatial dimensions are considered in this methodological framework, whereas elevation is largely ignored. Therefore, this study tries to promote the enhancement of common landscape metrics, in particular the integration of aspects of the third dimension. Adjusting the calculation routines of established 2D-metrics for the “true” surface geometries of landscape elements and the adoption of roughness parameters from the field of surface metrology prove to be promising approaches. Moreover, the focus is on high-quality digital elevation and surface models (DEM/DSM) from airborne laser scanning, which are a precondition for a meaningful 3D-analysis of landscapes.

Zusammenfassung: Landschaftsstrukturmaße dienen zur Quantifizierung der Ausprägung der Landschaftsgestalt für Zwecke des Monitorings, aber auch als Eingangsparameter in ökologische Modelle. Bisher findet dabei jedoch meist nur die flächenhafte (zweite) Dimension der Landschaft Berücksichtigung. In diesem Beitrag geht es um die Erweiterung von Landschaftsstrukturmaßen um Aspekte der dritten Dimension. Als viel versprechende methodische Ansätze erweisen sich dabei die Berechnung gängiger 2D-Strukturmaße mit realen Geometrien sowie der Einsatz von Parametern aus der Oberflächen-Messtechnik (Surface Metrology). Voraussetzung sind jedoch Höhen- und Oberflächenmodelle aus dem Airborne-Laserscanning, auf deren Auswertung der Fokus dieses Beitrages liegt.

1 Die dritte Dimension der Landschaftsstruktur

Die „Landschaftsstruktur“, oder anders ausgedrückt das „Muster“ oder „Mosaik“ einer Landschaft, ergibt sich nach einem in der Landschaftsökologie inzwischen weit verbreiteten Ansatz aus der Zusammensetzung und Anordnung diskreter Landschaftselemente („Patches“) (FORMAN 1995). Indizes zur Landschaftsstruktur („landscape metrics“, „Landschaftsstrukturmaße“) quantifizieren über mathemati-

sche Formeln diese räumlichen Muster. Ziel einer solchen Analyse mit Indizes ist es, die Struktur einer Landschaft auf der Basis von flächen-, form-, randlinien-, diversitäts- und topologiebeschreibenden Kennzahlen objektiv zu erfassen, zum Zwecke des Monitorings zu dokumentieren oder als Eingangsparameter für landschaftsökologische Simulationsmodelle zur Verfügung zu stellen.

Bisherige Landschaftsstrukturmaße berücksichtigen allerdings meist nur die flächenhafte (zweite) Dimension der Landschaft. Ökologisch bedeutsame dreidimen-

sionale Strukturen wie die Höhenausprägungen der einzelnen Landschaftselemente oder Höhendifferenzen zu benachbarten Patches werden bisher nicht oder kaum einbezogen, ebenso die Differenzierung der Höhenstruktur (Textur) innerhalb einer Nutzungsklasse. Darüber hinaus liefern vorhandene Landschaftsstrukturmaße insbesondere in Landschaften mit ausgeprägtem Relief ungenaue, von der Realität z.T. stark abweichende Werte, da sie nur die Fläche in ihrer zweidimensionalen Ausprägung berücksichtigen. Dabei werden nicht die realen Oberflächen und Randlängen der Landschaftselemente in die Berechnung einbezogen, sondern deren Projektion auf eine horizontale Fläche.

Die Geomorphologie als klassische Disziplin zur Untersuchung der formbildenden Prozesse der Erdoberfläche bietet zwar zahlreiche Ansätze zur Erfassung und Klassifikation des Georeliefs (z. B. DIKAU & SCHMIDT 1999, PIKE 2000, WILSON & GALLANT 2000); eine Anwendung von geomorphologischen Reliefparametern wie Kurvaturen, Exposition oder Hangneigung auf kategoriale Landschaftsmuster ist jedoch mitunter problematisch und eine Einbindung in das oben erwähnte Konzept der Beschreibung von Landschaftsmosaiken mit Strukturmaßen nicht immer möglich.

Ähnliches gilt für andere Techniken. Auf einfache methodische Herangehensweisen zur Oberflächenanalyse im Rahmen von Vegetationsuntersuchungen verweist bereits BEASOM (1983), komplexere Ansätze dazu finden sich z. B. bei DORNER et al. (2002). Einfache Moving Window-Algorithmen zur Quantifizierung der Geländeform schlagen McNAB (1992) und BLASZCZYNSKI (1997) vor. In den allgemeinen Kanon der vielfach erprobten Landschaftsstrukturmaße haben jedoch auch diese Konzepte bisher keinen Eingang gefunden.

In einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierten Untersuchung wird daher der Frage nachgegangen, wie die dritte Dimension durch geeignete Maßzahlen und Methoden in der Landschaftsstrukturanalyse berücksichtigt werden kann. In diesem Beitrag stehen die Ana-

lyse von digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen und die methodische Herangehensweise zur Integration der dritten Dimension in Landschaftsstrukturmaße im Mittelpunkt.

Folgende Situationen sind denkbar, in denen die Integration von 3D-Aspekten in die Strukturanalyse als sinnvoll erscheint (s.a. Abb. 1):

- Berechnung der „realen“ Flächen und Umfänge von Landschaftselementen bzw. Distanzen zwischen Objekten auf der Grundlage von Digitalen Höhenmodellen (DHM);
- Berücksichtigung von Oberflächen (einschl. Vegetation, Gebäude, ..) auf der Grundlage von Digitalen Oberflächenmodellen (DOM), z. B. aus Airborne-Laserscanning-Daten;
- Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Landschaftselementen;
- Höhenstrukturen innerhalb der Nutzungsklassen bzw. einzelnen Patches (Struktur der Kontraste, z. B. über Texturfilter auf Grundlage des DOM).

Beispiele für die Anwendung solcher 3D-Landschaftsstrukturmaße in der Landschaftsökologie können Methoden der Landschaftsbewertung für die Raumplanung, die Habitatmodellierung oder die Untersuchung funktionaler Aspekte von Forstbeständen in Abhängigkeit von ihrer Oberflächenstruktur sein. So haben bereits zahlreiche Studien gezeigt, dass die topographischen Eigenschaften und Oberflächencharakteristika eines Landschaftsraumes für viele ökologische Funktionen einen zentralen Faktor darstellen. Bei SWANSON et al. (1988) sind beispielsweise die unterschiedlichen Auswirkungen von Oberflächenformen auf Boden- und Lufttemperatur, Bodenfeuchte, Stoff- und Energieströme sowie Organismen beschrieben. OKE (1978) betont vor allem die Bedeutung der Geländeform auf Mikro- und Mesoklima und stellt die Effekte der Oberflächenrauigkeit auf Luftbewegung und Windgeschwindigkeit dar. BAILEY (2004) verweist auf die Rolle des Reliefs bei der physischen Differenzierung von Ökosystemen. Auch der große Einfluss des

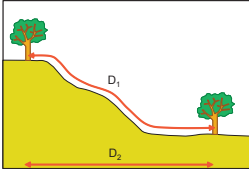
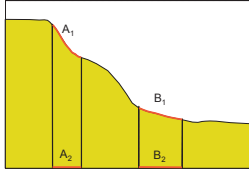
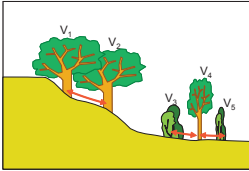
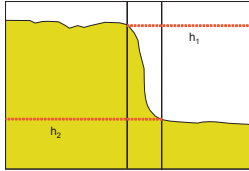
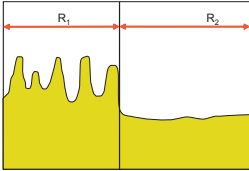
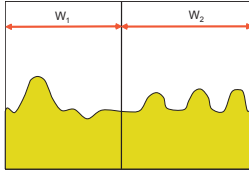
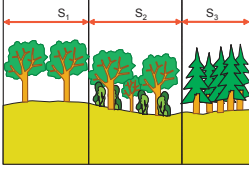
 <p><i>Methode:</i> Berechnung realer Distanzen</p> <p><i>Anwendung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Habitatmodelle ▪ Biotopverbund <p>a) Objekte in Hanglage</p>	 <p><i>Methode:</i> Berechnung realer Flächen und Umfänge</p> <p><i>Anwendung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Habitatmodelle ▪ Biotopverbund ▪ Charakterisierung Landschaftsstruktur allg. <p>b) Flächen in Hanglage</p>
 <p><i>Methode:</i> Objektvolumen, relative Lage im Raum</p> <p><i>Anwendung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grünvolumen ▪ Charakterisierung Landschaftsstruktur allg. ▪ Siedlungsstrukturen <p>c) Einzelobjekte</p>	 <p><i>Methode:</i> Quantifizierung von Höhengradienten</p> <p><i>Anwendung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Barriere-/Isolationswirkung, ▪ Lebensraumgrenzen ▪ Stepstone-Strukturen, Habitatmodelle ▪ Landschaftsstrukturanalyse (z.B. für contrast metrics) <p>d) Höhenunterschiede</p>
 <p><i>Methode:</i> Quantifizierung der Oberflächenrauigkeit</p> <p><i>Anwendung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kaltluft-/Wasserabfluss ▪ Schadstoffausfällung ▪ Landschaftsästhetik/-diversität ▪ Erosionsmodelle ▪ Habitatmodelle <p>e) Oberflächenstruktur</p>	 <p><i>Methode:</i> Identifizierung wiederkehrender Reliefmuster, 3D-Texturen</p> <p><i>Anwendung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erosion ▪ Kaltluft-/Wasserabfluss ▪ Lebensraumstrukturen, Wanderrouten (Zoologie) <p>f) Reliefmuster</p>
 <p><i>Methode:</i> Quantifizierung Bestandesstruktur (z.B. von Wäldern)</p> <p><i>Anwendung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewirtschaftungsgeschichte ▪ Biodiversität <p>g) Innere Struktur</p>	

Abb. 1: Situationen, die die Integration von 3D-Aspekten in die Landschaftsstrukturanalyse erfordern.

Geländes auf die Ausbildung von Vegetationsgradienten war bereits Gegenstand vieler Untersuchungen (z. B. SEBASTIÁ 2004). Eine Zusammenfassung der vielfältigen Aspekte des Zusammenhangs zwischen topographischen Eigenschaften und weiteren Landschaftsfunktionen findet sich z. B. bei FLORINSKY (1998).

Die Anwendung von herkömmlichen 2D-Landschaftsstrukturmaßen mit realen Oberflächen und von Oberflächenindizes kann beispielsweise für Habitatmodelle und Bewertungsfragen im Falle von Biotopverbundsystemen relevant sein.

2 Höheninformationen zu Oberfläche und Topographie

Die Gewinnung von Relief- und Oberflächeninformationen für Auswertungen im Landschaftsmaßstab ist nur durch fernerkundungsgestützte Verfahren rationell möglich. In diesem Bereich konnten in den vergangenen Jahren enorme technische Fortschritte erzielt werden. Mittlerweile stehen insbesondere in Deutschland nahezu flächendeckend digitale Geländedaten in hoher geometrischer Auflösung zur Verfügung. Als Quellen entsprechender Höheninformationen kommen in Frage:

- *Amtliche Höhendaten*, meist in einer räumlichen Auflösung von 20 Meter. Diese Daten haben den Vorteil einer flächendeckenden Verfügbarkeit. Dem stehen die Nachteile einer relativ geringen horizontalen und vertikalen Auflösung gegenüber. Eine Wiederholbarkeit ist meist nur innerhalb sehr langer Zeiträume (mehrere Jahre) gegeben. Informationen zur Vegetation und zu Gebäuden können diesen Daten nicht entnommen werden.
- *Höhendaten aus flugzeuggestützten Laser-Aufnahmen (Lidar)*. Aus der Laufzeit der Signale und der Lichtgeschwindigkeit wird die Entfernung zum Ort der Streuung berechnet. Durch die Auswertung von First- und Last-Pulse Daten wird es möglich, Gelände und Oberflächenmodelle abzuleiten. Daten aus dem Airborne Laserscanning (ALS) stehen mittlerweile

für viele Bereiche Deutschlands zur Verfügung. So wurde beispielsweise Baden-Württemberg komplett beflogen. In anderen Bundesländern wird die Abdeckung sukzessive erweitert, da solche Daten die Grundlage für die Ableitung des DGM5 der Landesvermessungsämter sind. Trotzdem sind als Nachteile die weiterhin nicht flächendeckende Verfügbarkeit, die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Befliegungen und die unterschiedliche Qualität der Aufnahmen anzuführen. Eine multitemporale Auswertung ist nur in den seltensten Fällen durchführbar.

- *Radardaten aus Satellitenaufnahmen*. Ab Mitte des Jahres 2007 werden voraussichtlich hoch auflösende Höhendaten aus dem europäischen Raumfahrtprogramm zur Verfügung stehen. Bisherige Satelliten wie ERS-1/2 SAR, JERS-1, Radarsat oder Envisat lieferten eine geometrische Auflösung von 18–100 Metern. Der Radar-Satellit TerraSAR-X wird Höhendaten mit einer räumlichen Auflösung von bis zu einem Meter liefern. Damit wird der Anwendungsbereich des Airborne Laserscanning (ALS) erreicht. Der wesentliche Vorteil der satellitengestützten Erhebung liegt in der Möglichkeit, auch zeitliche Veränderungen zu erfassen, da der Satellit multitemporale Aufnahmen mit einer Wiederholrate von 2–4 Tagen gestattet. Wenn auch eine solch hohe Aufnahmefrequenz für Auswertungen auf Ebene der Landschaft kaum relevant ist, so können dennoch Vergleiche zwischen Vegetationsperiode und Nicht-Vegetationsperiode interessante neue Aspekte eröffnen. Bisher waren solche Vergleiche kaum möglich, da solche Aufnahmen meist für die Erfassung der Geländeoberfläche konzipiert werden und daher laubfreie Vegetation als günstig erachtet wird. Daher werden ALS-Szenen in der Regel aus singulären Aufnahmen gewonnen, die außerdem meist außerhalb der Vegetationsperiode durchgeführt werden.

Trotz der guten Verfügbarkeit kann festgestellt werden, dass die Möglichkeiten sol-

cher Daten in der ökologischen Forschung bislang nur unzureichend genutzt werden. Ein Grund hierfür kann in der schwierigen methodischen Beherrschbarkeit dieser sehr großen Datensätze und dem hohen Informationsgehalt gesehen werden. Wir untersuchten daher die Anwendbarkeit verschiedener Datengrundlagen vor dem Hintergrund der entwickelten Methodik für die 3D-/4D-Landschaftsstrukturanalyse.

3 Testgebiete und Datengrundlagen

Als Testgebiete sollten Landschaften in suburbanen Räumen mit jeweils ausgeprägtem Relief, aber unterschiedlichen naturräumlichen Voraussetzungen dienen. Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungsverläufe der Landnutzung in Ost- und Westdeutschland wurden ein Untersuchungsraum in Sachsen (Nationalparkregion Sächsische Schweiz) und ein weiterer in Südwestdeutschland (Schwäbische Alb) ausgewählt. In beiden Regionen wurden jeweils 25 km² große Testgebiete abgegrenzt (Abb. 2).

Die Testfläche Bad Urach ist durch sehr starke Reliefunterschiede im Bereich des Albtraufs sowie eine Nutzungsmischung aus Wäldern im (Steil-)Hangbereich, großflächige Streuobstwiesen im Unterhangbereich, Siedlungen und Suburbansierungsprozesse im Talraum und Ackerflächen auf

der Hochfläche gekennzeichnet. Im Bereich der Sächsischen Schweiz, die durch zumeist landwirtschaftlich genutzte Ebenheiten, überwiegend bewaldete Sandsteinfelsgebiete – durchzogen von Schluchten, Tafelbergen und schroffen Felswänden – sowie das Elbtal geprägt ist, wurden zwei unterschiedlich strukturierte Testflächen ausgewählt: Die Testfläche Rosenthal, die vergleichsweise geringe Reliefunterschiede aufweist und neben einem geringen Anteil Ackerflächen hauptsächlich waldbestanden ist. Die Testfläche Rathen umfasst dagegen mit einem Ausschnitt des Elbtals und den angrenzenden Hang- und Felsbereichen ein stark bewegtes Relief, wenn auch die absoluten Höhenunterschiede mit ca. 120 m geringer als in Bad Urach ausfallen. Die Nutzung setzt sich aus Acker- und Grünlandflächen, Wald- und Fels- sowie Siedlungsbereichen zusammen.

Datengrundlagen in den Testgebieten

Um die entwickelten Methoden und Indizes auf ihre Eigenschaften und ihre Sensitivität hin überprüfen zu können, wurde ein Set verschiedener realer und künstlich generierter Höhenmodelle zusammengestellt, durch die sich eine Bandbreite an 3D-Situationen abbilden lässt. Als reale Höhenmodelle dienten dazu Ausschnitte aus unterschied-

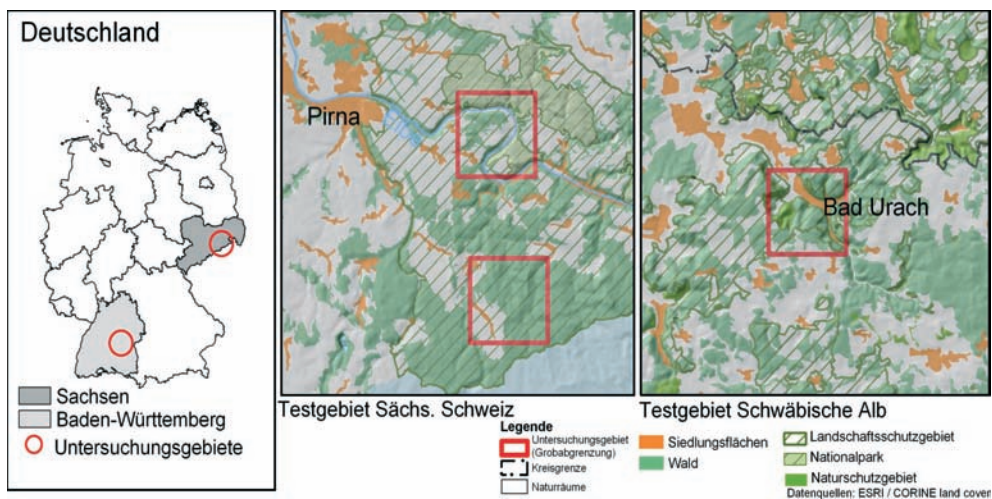


Abb. 2: Lage der Testgebiete.

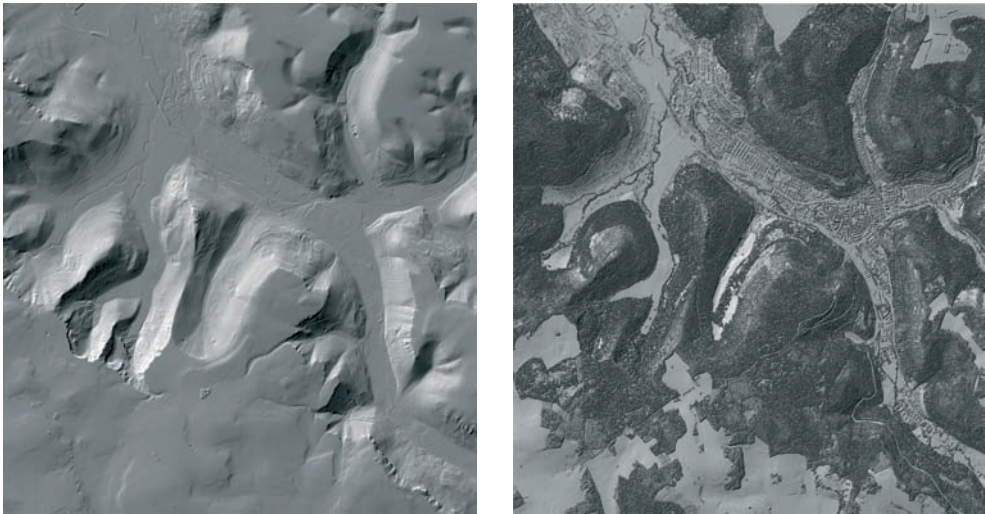


Abb. 3: Gelände- und Oberflächenmodell für das Testgebiet Bad Urach aus Airborne Laserscanning-Daten.

lich stark reliefierten Bereichen Digitaler Gelände- und Oberflächenmodelle aus dem Airborne Laserscanning sowie dem amtlichen Digitalen Geländemodell (*DGM20*) der Landesvermessungsämter. Für die Sächsische Schweiz stammen die Laserscanner-Daten aus einer Befliegung mit dem Sensorsystem *Falcon* der Firma Toposys im April 2005. Dabei wurden optische Bilddaten und Lasermessungen simultan erfasst (TROMMLER & CSAPLOVICS 2006). Im Bereich Bad Urach konnten vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg Aufnahmen mit dem Laserscanner ALTM 1225 der Firma Optech vom Februar 2002 bezogen werden. Aufgenommen wurden jeweils First- und Last-Pulse-Daten. Die Punktdichten lagen dabei in der Sächsischen Schweiz bei 6 Punkten pro m^2 , während für die Aufnahme im Testgebiet Urach vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg ein mittlerer Punktabstand von 1,5 m angegeben wird.

Im Gegensatz zu Auswertungen beispielsweise von BLASCHKE et al. (2004), die für die Ableitung von Informationen zu dreidimensionalen Vegetationsstrukturen direkt die First- und Last-Pulse-Daten verwendeten, wurden von uns zunächst Gelände- und Oberflächenmodelle auf Rasterbasis erstellt (vgl. Abb. 3). Durch die TU Dresden (Insti-

tut für Photogrammetrie und Fernerkundung), wurden die Rohdaten mit der Software SCOPE aufbereitet. Zum Vergleich wurde für Bad Urach zusätzlich am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung eine Triangulation der Punktdaten zu einem Höhenmodell durchgeführt.

Das abgeleitete Oberflächenmodell lässt unterschiedliche Dichtestrukturen erkennen (Abb. 4). Es sind sowohl einzelne Gehölz- und Baumstrukturen, lockere Baumwiesen in wahlloser (Streuobstwiese) und reihenweiser Anordnung (Obstplantage) ableitbar. Auch Waldbereiche lassen sich bereits visuell in Wälder mit geschlossener oder differenzierter Höhenstruktur unterteilen, Aufforstungen und Lichtungen sind erkennbar. Eine weitere Gruppe bilden die Siedlungsbereiche, in denen sich ebenfalls unterschiedliche Dichtegrade feststellen lassen.

Für die beiden Untersuchungsgebiete stehen weitere Bild- und Kartendatensätze zur Verfügung, die zur nachfolgenden Bearbeitung in eine homogene und einheitliche GIS-Datenbasis überführt wurden. Dazu gehören aktuelle Daten zur Flächennutzung aus dem Amtlich-Topographischen Informationssystem (ATKIS), Bilddaten für das Untersuchungsgebiet „Sächsische Schweiz“, Ortholufbilder aus dem Jahr

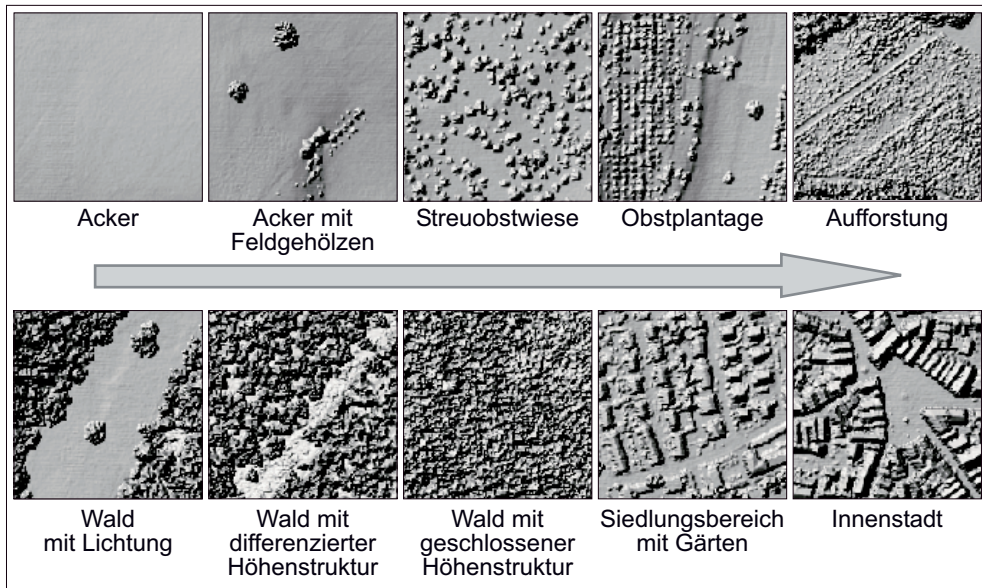


Abb. 4: Höhen und Dichtestrukturen unterschiedlicher Lebensräume.

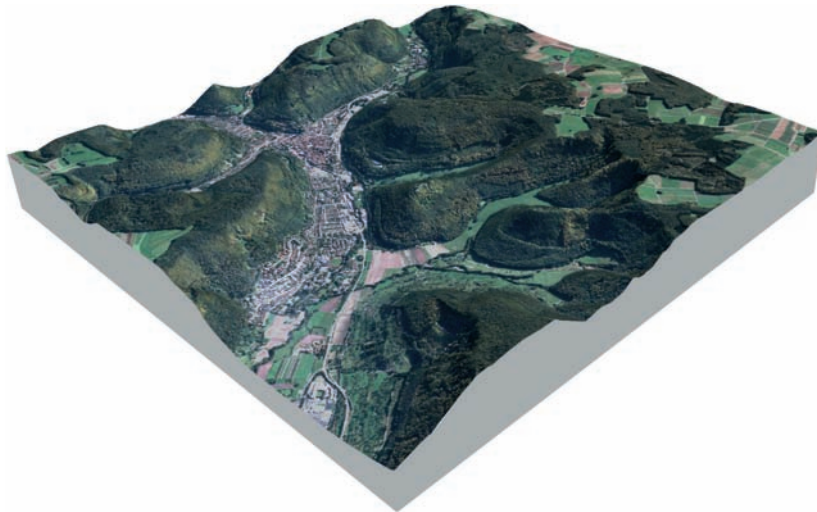


Abb. 5: 3D-Landschaftsmodell für Bad Urach, generiert aus Airborne-Laserscanner-Daten und einer Quickbird-Satellitenaufnahme.

1997, eine IKONOS-Satellitenbild-Szene aus dem Jahr 2001 und eine digitale, multispektrale Aufnahme der flugzeuggestützten Kamera *Falcon* aus dem Jahr 2005, sowie für das Gebiet Bad Urach eine Quickbird-Satelliten-Aufnahme vom 12. 10. 2006. Zur Visualisierung der Geländeeigenschaf-

ten konnten damit 3D-Landschaftsmodelle erstellt werden (Abb. 5).

Zum Test der entwickelten Methoden wurden weiterhin bestimmte Reliefsituationen künstlich nachgestellt und simuliert; z. B. wurden dreidimensionale Wellen unterschiedlicher Frequenz generiert. So ließen

sich Reaktionen der zu entwickelnden Analysemethoden auf eine bestimmte Abfolge von „Rücken“ und „Tälern“ untersuchen. Durch Kombination verschiedener trigonometrischer Funktionen konnten außerdem „Dome“ bzw. „Kuppeln“ erzeugt werden, die sich z. B. als Verkörperung von Forstbeständen variierender Dichte nutzen ließen (HOECHSTETTER et al. 2006).

Darüber hinaus kamen Rasteroberflächen unterschiedlicher fraktaler Dimension beim Methodentest zur Anwendung. Solche Oberflächen können als Repräsentation von Reliefs unterschiedlicher Rauigkeit aufgefasst werden. Zur Erzeugung fraktaler Oberflächen wurde das frei verfügbare Geo-Informationssystem Landserf (WOOD 2005) verwendet.

4 Methoden und GIS-Werkzeuge

Für eine adäquate Bearbeitung der beschriebenen Fragestellung ist eine Erweiterung des gebräuchlichen GIS-Instrumentariums notwendig. Die in Geo-Informationssystemen wie dem weit verbreiteten ArcGIS von ESRI (ESRI 2005) implementierten Standard-Werkzeuge erwiesen sich nur zum Teil praktikabel für eine Umsetzung der notwendigen Methoden. Zu diesem Zweck wurde die in ArcGIS eingebettete Entwicklungsumgebung für VBA (Visual Basic for Applications) und Python-Skripte genutzt. Als flexibles und vielseitiges Werkzeug gerade zur Analyse von digitalen Geländemodellen hat sich jedoch das Programmpaket Matlab (MathWorks 2005) erwiesen. Die speziell auf Matrixoperationen zugeschnittenen Funktionen und der modulare Programmaufbau erlauben eine Umsetzung vergleichsweise komplexer Methoden. Als Nachteil des Programmpakets ist die lange Rechenzeit bei großen Datensätzen zu nennen.

4.1 2D-Strukturmaße mit realen Geometrien

Viele gängige Landschaftsstrukturmaße basieren auf den Werten der Flächengrößen und Umfänge der einzelnen Patches (z. B.

Form-Index (SHI), Größte Fläche (LPI, Gesamtfläche (TA)) oder auf räumlichen Distanzen (z. B. Nachbarschaftsmaße wie Proximity (PROX)). In gängigen GIS-Verfahren werden die räumlichen Daten auf eine planimetrische Bezugsfläche projiziert und auf dieser Basis die Werte für Flächen und Distanzen abgeleitet (Abb. 1b). Für einen gleichmäßig geneigten Hang mit einer tatsächlichen Hanglänge von 100 m und einem Neigungswinkel von 10° ergibt sich bei einer Breite der Fläche von ebenfalls 100 m eine planimetrische Fläche von 0,985 ha und eine Hanglänge von 98,5 m. Für einen solchen Hang mit einer Neigung von 30° ist der Unterschied schon deutlich größer: Die projizierte Fläche beträgt nur noch 8,6 ha bzw. die Hanglänge 0,866 m. Mit zunehmender Hangneigung werden die tatsächlichen Flächen und Distanzen unterschätzt. Insbesondere in stark reliefiertem Gelände handelt es sich also keinesfalls um einen vernachlässigbaren Unterschied. Bei der Anwendung solcher Maße beispielsweise für Artverbreitungsanalysen, Habitatmodelle oder die Untersuchung eines Biotopverbundes kann dies von erheblicher Bedeutung sein.

In einem ersten Schritt wurden daher Methoden und Werkzeuge für gebräuchliche Geo-Informationssysteme entwickelt, die automatisch die realen Umfänge und Flächeninhalte von Vektordaten auf der Basis eines Höhenmodells berechnen. Zur Berechnung der realen Fläche eines Polygons, beispielsweise einer Nutzungseinheit, aus den Rasterdaten des Höhenmodells bestehen mehrere Möglichkeiten:

- Die Berechnung aus der Hangneigung, die zuvor mittels Moving-Window-Technologie auf der Basis des Raster-Höhenmodells berechnet wurde. Die reale Oberfläche einer Rasterzelle lässt sich mit Hilfe des Kehrwerts des Cosinus der Hangneigung ableiten.
- JENNESS (2004) schlägt eine kompliziertere, aber exaktere Methode vor, die ebenfalls auf einem Moving-Window-Ansatz beruht. Dabei werden in einer 3×3 -Nachbarschaft aus den diagonalen und ortho-

gonalen Zellnachbarn 8 Dreiecke jeweils aus den Höhenwerten der Zellmittelpunkte gebildet. Zur Berechnung der realen Oberfläche der mittleren Zelle des Analysefensters müssen die jeweiligen Anteile der 8 Dreiecke summiert werden.

- Die Berechnung aus einem TIN (Triangulated Irregular Network) (ESRI 2005).

Die Ableitung der realen Oberflächenwerte dient nicht nur als Basis für die Analyse mit konventionellen 2D-Landschaftsstrukturmaßen, es können darüber hinaus neue Indizes gebildet werden. So bezeichnet NOGAMI (1995) den dimensionslosen Quotienten aus realer und projizierter Fläche als einen Indikator für die generelle „Steilheit“ des Geländes.

Die Aussage und Relevanz sowohl der Anwendung von 2D-Landschaftsstrukturmaßen mit realen Oberflächen als auch von Oberflächenindizes, wie die des von NOGAMI vorgeschlagenen in landschaftsökologischen Modellen, sind noch zu überprüfen.

4.2 Methoden der Oberflächen-Messtechnik

In Materialwissenschaften und Molekularphysik kommen Methoden zur Messung der Eigenschaften und Muster von Oberflächenstrukturen im Nano-Bereich zum Einsatz (engl. „Surface Metrology“). Mithilfe dieser Parameter lassen sich in numerischer Form Aussagen über die „Qualität“ von Oberflächen treffen. So können beispielsweise Abschätzungen über die „Rauigkeit“ oder die Heterogenität einer Höhenwertverteilung erfolgen. Auf diese Weise können z. B. durch Fehler im Herstellungsprozess von optischen Linsen hervorgerufene Abweichungen der tatsächlichen Oberfläche von der ursprünglich vorgesehenen beschrieben werden (BENGTSSON 1991).

Eine Übertragung dieses Konzepts auf die Landschaftsebene wurde bereits von MCGARIGAL & CUSHMAN (2005) vorgeschlagen, da sich durch einen Transfer dieser Indizes auf andere Maßstabebenen auch Landschaftsausschnitte auf ihre Oberflächen- und Reliefeigenschaften hin unter-

sucht werden können (Precision Devices 1998, SROUT et al. 1993). Die Surface Metrology-Indizes bieten die Möglichkeit, die im Höhen- oder Oberflächenmodell eines Landschaftsausschnittes enthaltene Information in hoch aggregierter Form als Zahlenwert anzugeben. Das kann für bestimmte Anwendungen von großem Nutzen sein, wie z. B. Betrachtungen zur Erosionsanfälligkeit von landwirtschaftlichen Flächen oder die Implementierung der Oberflächenrauigkeit als Parameter in die Habitat- oder Diversitätsmodellierung.

Zur Bereitstellung hoch aggregierter numerischer Information über die Oberflächenstruktur von Landschaftselementen wurden die folgenden Surface Metrology-Indizes als Matlab-Skripte (MathWorks 2005) implementiert und auf Landschaftsausschnitte angewendet:

- *Average Surface Roughness (Ra)* („Mittlere Rauigkeit“): Berechnet die mittlere absolute Abweichung der Höhenwerte von der Mittelwertsebene.
- *Root-Mean-Square Deviation of the Surface (Sq)* („Mittlere quadratische Abweichung der Oberfläche“): Modifizierung von Ra. Berechnet die mittlere quadratische Abweichung der Höhenwerte von der Mittelwertsebene.
- *Tenpoint-Height of Surface (Sz)* („Höhe von zehn Extrempunkten der Oberfläche“): Mittelwert der absoluten Höhen der fünf höchsten „Gipfel“ und der fünf tiefsten „Täler“.
- *Density of Summits (Sds)* („Dichte der Gipfel“): Anzahl der Gipfel pro Fläche; als Gipfel werden lokale Maxima des Höhenmodells definiert.
- *Skewness of Topography Height Distribution (Ssk)* („Schiefe der Höhenwertverteilung“): Maß für die Asymmetrie der Oberflächenabweichungen von der Mittelwertsebene. Gauß-Verteilungen der Höhenwerte resultieren im Wert 0.
- *Kurtosis of Topography Height Distribution (Sku)* („Kurtosis der Höhenwertverteilung“): Charakterisiert die Streubreite der Höhenwertverteilung. Gauß-Verteilungen besitzen einen Sku-Wert von 3.

Allerdings sind mit solchen aggregierten Maßzahlen auch Probleme verbunden. So sind aus einem Index wie der Average Surface Roughness zwar Informationen über die Intensität und die Ausprägung von Höhenwertabweichungen bzw. über die Heterogenität des Reliefs zu entnehmen; wie diese Abweichungen innerhalb einer Landschaftseinheit räumlich verteilt sind, lässt sich aus dem bloßen Indexwert jedoch nicht ablesen. Darüber hinaus resultieren komplementäre Oberflächenformen (Mulde/Kuppe) für diesen Index in identischen Zahlenwerten. Für komplexere ökologische Fragestellungen wird also eine Kombination mehrerer Surface Metrology-Parameter bzw. eine Anpassung einzelner Berechnungsvorschriften als sinnvoll erachtet.

5 Ergebnisse aus den Fallstudien

5.1 Landschaftsstrukturmaße mit realen Geometrien

Bei der Berechnung gängiger Strukturmaße mit realen Oberflächengeometrien stand besonders die Frage im Vordergrund, inwiefern diese um die Höheninformation korrigierten Maße von planimetrisch ermittelten („2D“-)Strukturindizes abweichen und somit eine messbare Verbesserung darstellen. Dieser Vergleich zwischen 2D- und 3D-Berechnungsansatz wurde für reale Landschaftsausschnitte der Testgebiete unter Verwendung von ATKIS-Landnutzungsdaten und Höhenmodellen unterschiedlicher Auflösung sowie einige Kombinationen aus simulierten Höhenmodellen und Landschaftsmosaiken durchgeführt.

Besonders für Flächenmaße (Patch Area, Landscape Area) ergaben sich dabei zum Teil deutliche Abweichungen. Für einzelne Landschaftselemente in den Hangbereichen des Elbtales in der Sächsischen Schweiz weist die Oberfläche für den dreidimensionalen Berechnungsfall um bis zu 60% größere Werte auf. Ähnliches gilt für die Umfänge der Patches. Im Bereich der Bad Urach liegen die Abweichung bei maximal 25% (Umfang) bzw. 34% (Fläche) (s. Abb. 6). Die Unterschiede zeigten sich

dabei in stärkerem Maße für die geometrisch hochaufgelösten Laserscanning-Höhenmodelle, die ein hohes Maß an Information über die Relief-Variabilität innerhalb der Landschaftselemente bereitstellen.

Auch für die Formindizes ergaben sich messbare Differenzen zwischen den beiden Berechnungsmodellen. Da diese Strukturmaße allerdings sowohl von den Umfängen als auch den Flächeninhalten der Patches abhängen, ergibt sich kein eindeutiger Trend. Zum Beispiel lagen die 3D-Shape-Indizes für die Sächsische Schweiz im Fall des verwendeten Laserscanning-Höhenmodells in einem Bereich von etwa $\pm 10\%$ im Vergleich zu den entsprechenden 2D-Indizes, in Bad Urach sogar nur bei 8%. Auf die Gesamtlandschaft bezogen mitteln sich die Unterschiede auf 1,0 (Abb. 6). Der Shape-Index gibt das Verhältnis des tatsächlichen Umfangs eines Landschaftselements zum Umfang eines Quadrates gleicher Fläche an. Bei Einbeziehung der dritten Dimension können sich Umfang und Fläche in unterschiedlichem Maße gegenüber den 2D-Geometrien verändern. Dadurch erklären sich die sowohl positiven als auch negativen Änderungen im Vergleich zum 2D-Shape-Index.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Berechnung von Landschaftsstrukturmaßen auf der Basis realer Geometrien besonders in stark reliefiertem Gelände und für geometrisch hoch aufgelöste Datengrundlagen zu teilweise deutlich abweichenden Index-Werten für die einzelnen Landschaftselemente im Vergleich zum planimetrischen Fall führt. Dies lässt den Schluss zu, dass die Berücksichtigung des Reliefs in solchen Fällen verbesserte Analyseergebnisse der Landschaftsstruktur ermöglicht und für die Verbesserung ökologischer Modelle eine hohe Relevanz besitzt. Dies gilt besonders für organismenzentrierte Untersuchungen im Bereich der Habitatmodellierung oder bei Betrachtungen zum Biotopverbund. Für Untersuchungen, die sich nur auf einen Landschaftsausschnitt als Ganzes beziehen und Mittelwerte verwenden, ist der Einfluss dagegen in vielen Fällen sicher vernachlässigbar.

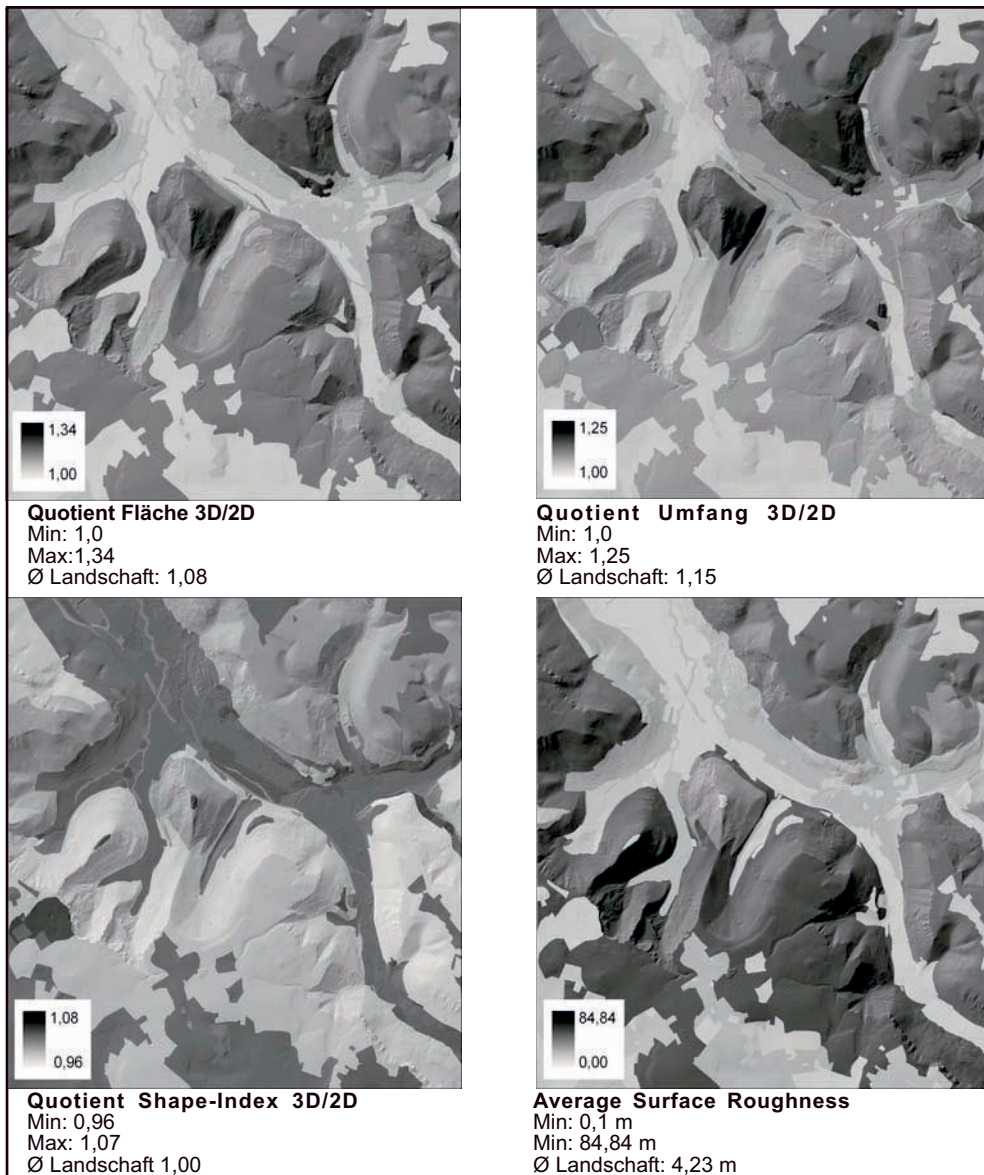


Abb. 6: Ergebnisse der Berechnung von Indizes auf Basis realer Flächen und Umfänge (Berechnungsgrundlage: Laserscanner-DTM mit einer Auflösung von 2,5 m).

5.2 Indizes der Oberflächen-Messtechnik

Die beschriebenen Indizes aus dem Bereich der Oberflächen-Messtechnik wurden in entsprechender Weise auf reale und künst-

liche Landschaftsausschnitte angewendet und auf ihre Aussagekraft hin untersucht.

Besonders das Rauigkeitsmaß „Average Surface Roughness“ erwies sich dabei als gut geeignete Möglichkeit zur Quantifizierung der Relief-Variabilität innerhalb ein-

zelter Landschaftselemente (Abb. 6). Für das Untersuchungsgebiet Bad Urach ergibt sich eine differenzierte Wertespanne von 0,1–84,8 m. Im Ergebnis heben sich unterschiedlich strukturierte Landschaftsbereiche wie Streuobstwiesen, Wälder, Siedlungen u.ä. deutlich voneinander ab.

Dieser Parameter eröffnet das Potenzial, stark kondensierte Information in numerischer Form über die Rauigkeit von Patches bereitzustellen. Diese Information kann wiederum eine Ergänzung von Landschaftsstrukturanalysen darstellen, da sie eine Charakterisierung von Landschaftsmosaiken hinsichtlich der Bewegtheit des zugrunde liegenden Geländes erlaubt.

Die Untersuchungen in realen und simulierten Landschaften wiesen darauf hin, dass sich durch Anwendung der Surface Metrology-Indizes steile und „raue“ Geländebereiche gut von eher flachen und „glatten“ Elementen unterscheiden lassen. Diese Index-Gruppe stellt daher einen aussagekräftigen und zugleich einfachen Ansatz zur Erweiterung des bestehenden Kanons an Landschaftsstrukturmaßen um die dritte Dimension dar (vgl. HOECHSTETTER et al. 2006, HOECHSTETTER & WALZ 2006).

6 Ausblick

Die bisherigen Recherchen, Untersuchungen und methodischen Ansätze haben gezeigt, dass ein hoher Bedarf an der Weiterentwicklung von Landschaftsstrukturmaßen unter Einbeziehung der dritten Dimension besteht. Gerade im Bereich der ökologisch orientierten Planung werden Modelle und Indikatoren benötigt, die valide Aussagen zum Zustand und der Veränderung von Ökosystemen durch anthropogen verursachte Eingriffe liefern können. Der Struktur der Landnutzung kommt dabei eine Schlüsselposition zu. Dabei ist bekannt, dass die dritte Dimension im Sinne von Höhenstrukturen der Oberfläche und des Reliefs bei der Analyse und Charakterisierung funktional-ökosystemarer Zusammenhänge wesentlich sein kann. Umso erstaunlicher ist es, dass bisher kaum Anstrengungen unternommen wurden, Landschaftsstruktur-

maße um die dritte Dimension zu erweitern. Gründe dafür liegen sicherlich zum einen in der bisher mangelnden Verfügbarkeit von entsprechenden (genauen) Daten und zum anderen auch an der nach wie vor geringen Verbreitung von entsprechenden GIS-Werkzeugen in gängigen Software-Programmen. In der theoretischen und methodischen Weiterentwicklung der Thematik 3D-Landschaftsindizes dürfte vor diesem Hintergrund ein erhebliches Innovationspotenzial liegen. Im Datenbereich stehen mit den aus Airborne Laserscanning-Daten gewonnenen Höhenmodellen und zukünftig auch mit den TerraSAR-X-Daten notwendige Informationen zur Oberfläche und ihrer Struktur zur Verfügung. Die Entwicklung geeigneter Methoden und Werkzeuge zur Anwendung entsprechender 3D-Indizes sowie die Überprüfung deren Aussagekraft ist damit ein wichtiges Ziel der Forschungen.

Wie die bisherigen Arbeiten dokumentiert haben, kann dabei durchaus auf bekannte und angewandte Methoden aufgebaut werden, die damit eine Grundlage für die 3D-Landschaftsstrukturanalyse bieten. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit den entwickelten Parametern Verbesserungen im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen erzielen lassen. Alleine die Berücksichtigung der „realen“ Oberfläche kann in Situationen mit ausgeprägtem Relief zu stark abweichenden Werten der Landschaftsstrukturmaße gegenüber den Berechnungsmethoden ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Geometrien führen. Aber auch die Berücksichtigung der Oberflächenstrukturen (z. B. Gehölze, Waldoberfläche u. a.) beispielsweise mittels Surface Metrology-Indizes zeigt erhebliches Anwendungspotenzial.

Gerade hier werden für die Fortsetzung der Forschungsarbeiten methodische Anknüpfungspunkte gesehen. So konnte die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Wavelet-Analysen für die Fragestellung bisher nur angearbeitet werden. Die Wavelet-Analyse zeichnet sich jedoch bereits jetzt als ein mächtiges Werkzeug zur Analyse von Sprungstellen in Höhendaten ab, beispielsweise zur Auffindung bestimmter Strukturen wie linienförmigen Erhebungen (Säu-

me). Weitere Ansatzpunkte für methodische Forschungsarbeiten sind die Texturanalyse (z. B. mittels Fourier-Transformation, vgl. COUTERON et al. 2006) und Morphologische Moving-Window-Algorithmen. Letztere sind im Rahmen des Forschungsprojektes bereits als Matlab-Script und ArcGIS-Tool implementiert worden. Eine vertiefende Überprüfung der Aussagekraft und Verknüpfung mit anderen Methoden steht jedoch noch aus. So wäre beispielsweise eine Kombination von Moving-Window-Maßen wie z. B. dem Landform Index (LFI) (MCNAB 1992) und klassischer Lakunaritätsanalyse zur Analyse des Musters von „Gipfeln“ und „Senken“ in einem Höhenmodell denkbar.

Es besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf zur Stabilität der einzelnen methodischen Ansätze in unterschiedlichen räumlichen Situationen. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit für konkrete ökologische Fragestellungen und der Validität der jeweiligen Aussage der Maße sind Fallstudien in unterschiedlichen thematischen Bereichen notwendig. Als Beispiele wurden bereits die Forstwirtschaft und der Naturschutz insbesondere bei Habitatmodellen und Biotop-Netzwerken genannt. Nicht zuletzt ist für eine gute Anwendbarkeit und Erprobung auch die technische Aufbereitung solcher Methoden als leicht einsetzbare Werkzeuge, beispielsweise als Erweiterung für ein GIS, Voraussetzung.

Danksagung

Die Verfasser danken MARCO TROMMLER von der TU Dresden für die Unterstützung und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Vorhabens.

Literatur

BAILEY, R.G., 2004: Role of Landform in Differentiation of Ecosystems at the Mesoscale (Landscape Mosaics). – Draft Paper, 10/29/2004; vgl.: www.fs.fed.us/institute/news_info/role_of_landform2.pdf

- BEASOM, S.L., 1983: A technique for assessing land surface ruggedness. – *Journal of Wildlife Management* **47**: 1163–1166.
- BENGTSSON, A., 1991: On three-dimensional measurement of surface roughness. – Chalmers University of Technology, Göteborg.
- BLASCHKE, T., TIEDE, D. & HEURICH, M., 2004: 3D-Landscape Metrics to Modelling Forest Structure and Diversity Based on Laser-Scanning Data. – In: THIES, M., KOCH, B., SPIECKER, H. WEINACKER, H. (eds.): Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, “Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment.” – International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. (http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/BLASCHKE.pdf)
- BLASZCZYNSKI, J.S., 1997: Landform characterization with geographic information systems. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **63**(2): 183–191.
- COUTERON, P., BARBIER, N. & GAUTIER, D., 2006: Textural ordination based on Fourier spectral decomposition: a method to analyze and compare landscape patterns. – *Landscape Ecology* **21**(4): 555–567.
- DIKAU, R. & SCHMIDT, J., 1999: Georeliefklassifikation. – In: SCHNEIDER-SLIWA, R., SCHAUB, D. & GEROLD, G. (Hrsg.): *Angewandte Landschaftsökologie – Grundlagen und Methoden.* – 217–244.
- DORNER, B., LERTZMAN, K. & FALL, J., 2002: Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis. – *Landscape Ecology* **17**(8): 729–743.
- ESRI, 2005: ArcGIS 9.1. ESRI Inc.
- FLORINSKY, I.V., 1998: Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. – *Progress in Physical Geography* **22**(1): 33–60.
- FORMAN, R.T.T., 1995: Some general principles of landscape and regional ecology. – *Landscape Ecology* **10**(3): 133–142.
- HOECHSTETTER, S., THINH, N.X. & WALZ, U., 2006: 3D-Indices for the Analysis of Spatial Patterns of Landscape Structure. – In: KREMMERS, H. & TIKUNOV, V. (Hrsg.): *InterCarto-InterGIS 12. International Conference on Geoinformation for Sustainable Development.* – Deutsche Gesellschaft für Kartographie, Berlin, 108–118.
- HOECHSTETTER, S. & WALZ, U., 2006: Werkzeuge und Methoden zur Analyse von dreidimensionalen Landschaftsstrukturen. – In: WITTMANN, J. & MÜLLER, M. (Hrsg.): *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften. Workshop Leipzig 2006.* – Shaker Verlag, Aachen, 235–244.

- JENNESS, J.S., 2004: Calculating landscape surface area from digital elevation models. – *Wildlife Society Bulletin* 32(3): 829–839.
- MathWorks, 2005: MATLAB 7.1.0. – Natick, Massachusetts.
- MCGARIGAL, K. & CUSHMAN, S.A., 2005: The Gradient Concept of Landscape Structure. – In: WIENS, J. & MOSS, M. (Hrsg.): *Issues and Perspectives in Landscape Ecology*. – Cambridge University Press, Cambridge, 112–119.
- MCNAB, W.H., 1992: A topographic index to quantify the effect of mesoscale landform on site productivity. – *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1100–1107.
- NOGAMI, M., 1995: Geomorphometric measures for digital elevation models. – *Z. Geomorphologie Suppl.* 101: 53–67.
- OKE, T.R., 1978: *Boundary Layer Climates*. – Cambridge University Press, Cambridge, 158–189.
- PIKE, R.J., 2000: Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis. – *Progress in Physical Geography* 24(1): 1–20.
- Precision Devices Inc., 1998: *Surface Profile Parameters*. vgl.: <http://www.predev.com/smg/pdf/SurfaceRoughness.pdf>
- SEBASTIÁ, M.-T., 2004: Role of Topography and Soils in Grassland Structuring at the Landscape and Community Scales. – *Basic and Applied Ecology* 5: 331–346.
- STOUT, K.J., SULLIVAN, P.J., DONG, W.P., MAINSAH, E., LUO, N., MATHIA, T. & ZAHOUANI, H., 1993: The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions. – In: European Community Contract No 3374/1/0/170/90/2. University of Birmingham, Birmingham.
- SWANSON, F.J., KRATZ, T.K., CAINE, N. & WOODMANSEE, R.G., 1988: Landform Effects on Ecosystem Patterns and Processes. – *BioScience* 38(2): 92–98.
- TROMMLER, M. & CSAPLOVICS, E., 2006: Geoinformationsnetzwerke für die grenzüberschreitende Nationalparkregion Böhmisches-Sächsische Schweiz. – In: STROBL, J. et al. (Hrsg): *Angewandte Geoinformatik 2006*. – Wichmann, Heidelberg, 657–662.
- WILSON, J.P. & GALLANT, J.C., 2000: *Terrain Analysis: Principles and Applications*. – John Wiley & Sons Inc. John Wiley & Sons Inc.
- WOOD, J., 2005: *Landserf 2.2*. London.

Anschriften der Autoren:

Dr. ULRICH WALZ,
e-mail: u.walz@ioer.de

Dipl.-Geoökol. SEBASTIAN HOECHSTETTER
e-mail: s.hoechstetter@ioer.de

PD Dr. habil. NGUYEN XUAN THINH
e-mail: ng.thinh@ioer.de

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden

Manuskript eingereicht: Februar 2007
Angenommen: April 2007