

ARBEITSBERICHT

Institut für Weltforstwirtschaft

**Weiterentwicklung von Indikatoren zur Erfassung der Fragmentierung von
Wäldern unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit**

von

Katja Oehmichen und Michael Köhl



**Bundesforschungsanstalt
für Forst- und Holzwirtschaft**

und

**Zentrum Holzwirtschaft
Universität Hamburg**

Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg
Hausadresse: Leuschnerstr. 91, 21031 Hamburg
Postadresse: Postfach 80 02 09, 21002 Hamburg

Tel: 040 / 73962-100
Fax: 040 / 73962-480
Email: k.oehmichen@holz.uni-hamburg.de
m.koehl@holz.uni-hamburg.de
Internet: <http://www.bfafh.de>

Institut für Weltforstwirtschaft

**Weiterentwicklung von Indikatoren zur Erfassung der Fragmentierung von
Wäldern unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit**

von

Katja Oehmichen und Michael Köhl

Arbeitsbericht des Instituts für Weltforstwirtschaft 2006 / 2

Hamburg, Juli 2006

Vorwort

Die Fragmentierung von Wäldern wird als wichtiger Indikator zur Beschreibung der Habitatqualität von Waldlandschaften angesehen und wurde daher von der Ministerkonferenz zum Schutz der Wälder in Europa in die Liste der Pan-Europäischen Kriterien und Indikatoren zur nachhaltigen Waldwirtschaft aufgenommen. Bisher stehen allerdings keine operationellen Verfahren zur Beschreibung der Fragmentierung größerer Waldgebiete bereit. In der vorliegenden Studie werden Ansätze zur Erfassung der Waldfragmentierung untersucht und hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur Bereitstellung konsistenter und aussagekräftiger Informationen bewertet.

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Weltforstwirtschaft der Universität Hamburg im Rahmen des HS-Forschungsvorhabens 04HS064 „Weiterentwicklung von Indikatoren zur Erfassung der Fragmentierung von Wäldern unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit“, welches vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz finanziert wurde.

Herrn M. Schwörer, Frau S. Strich und Herrn B. Winkler danken wir für die Anregung zur Durchführung dieser Studie und ihr Interesse an den Ergebnissen. Herrn Diplom-Mathematiker J. Willkommen danken die Autoren ganz besonders für die Zusammenarbeit, die vielfältigen Anregungen, konstruktive Kritik und insbesondere die professionelle Unterstützung bei der Umsetzung der Berechnung der Fragmentierungsmaße. Ebenso sei Herrn Diplom-Forstwirt R. Köhler für die fundierte Beratung und das Einbringen langjährigen Wissens und Erfahrungen mit geographischen Informationssystemen gedankt.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
2. Ziele und Aufgabenstellung des Projekts	5
2.1. Einleitung	5
2.2. Hintergründe, Ziele und Aufgabenstellung	5
2.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	7
2.3.1. Begriffserklärungen	7
2.3.2. Stand der Forschung	8
3. Material und Methodik	11
3.1. Datenmaterial	11
3.1.1. Digitales Landschaftsmodell	11
3.1.2. Satellitendaten	13
3.1.3. Terrestrische Stichprobendaten	13
3.2. Methodik	14
4. Ergebnisse	19
4.1. Beschreibung der Waldzerschneidung mit der Effektiven Maschenfläche	19
4.2. Ergebnisse der Waldzerschneidungsanalyse basierend auf DLM- und Satelliten-	
daten	20
4.2.1. Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz	21
4.2.2. Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Brandenburg	22
4.3. Verwendung von terrestrischen Stichprobendaten zur Waldzerschneidungsanalyse	23
5. Diskussion	31
5.1. Diskussion der Ergebnisse	31
5.2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	32
Literaturverzeichnis	34
A. Abkürzungsverzeichnis	39
B. Abbildungsverzeichnis	40
C. Tabellenverzeichnis	41

1. Zusammenfassung

Die Zerschneidung und Fragmentierung von Wäldern ist nicht nur hinsichtlich der Störung von Ökosystemen und Habitaten bedenklich sondern zählt zu einer der wichtigsten Ursachen des Aussterbens von Arten und der Gefährdung biologischer Vielfalt. Neben dem Verlust von Flächen, der Habitatverkleinerung und der Änderung von Umfang-Flächen-Verhältnissen von Lebensräumen entstehen durch die Fragmentierung von Wäldern Ausbreitungsbarrieren für Tiere und Pflanzen, womit der genetische Austausch zwischen Populationen zwangsläufig behindert wird.

Die vorliegende Studie zeigt einen Verfahrensvorschlag auf, mit dem aufbauend auf verschiedenen Mustern der Waldbedeckung und deren räumlicher Verteilung Informationen zur Fragmentierung von Wäldern erfasst werden können. Mittels künstlicher Landschaftskonstellationen wurde aus einem Set von Landschaftsmaßzahlen deren Eignung als „Waldfragmentierungsindikator“ untersucht. Die Effektive Maschenfläche $MESH_{PI}$ wurde als ein aussagekräftiges Maß zur Quantifizierung der Fragmentierung von Wäldern identifiziert.

Anhand von zwei Untersuchungsgebieten wurde die Landschaftszerschneidung für verschiedene Datenquellen erhoben. Basierend auf den Daten des digitalen Landschaftsmodells erfolgte für den Wald eine repräsentative Analyse der Waldfragmentierung, die zu realitätsnahen und intuitiv verständlichen Ergebnissen geführt hat. Die Darstellung der Fragmentierung ist sowohl in numerischer als auch in Form von Karten umgesetzt worden. Für das Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz ist die Effektive Maschenfläche $MESH_{PI}$ mit $4,82\text{ km}^2$ größer als $MESH_{PI}$ von $2,12\text{ km}^2$ in Brandenburg, womit der Zerschneidungsgrad der Wälder und die Verteilung der Waldflächen widerspiegelt werden.

Im Gegensatz dazu haben die Auswertungen der Waldzerschneidung mit den vorliegenden Satellitendaten aufgrund deren waldspezifisch ausgerichteten Klassifizierung keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert. Terrestrische Stichprobenverfahren, wie die Bundeswaldinventur, sind zur Bewertung der Fragmentierung nur unzureichend geeignet, da sich durch die Aufnahmen der BWI keine Informationen zu Anzahl, Größe und Form einzelner Waldflächen herleiten lassen.

Abstract: Developing indicators for measuring the forest fragmentation in consideration of data availability

The ongoing fragmentation of forests causes disturbance in the ecosystems and is threatening the biological diversity. Beside from the loss of forest areas and reduction of habitat sizes it

introduces propagation barriers for plants and animals and thus hinders the genetic interchange between populations.

This study evaluates several indicators for measuring the forest fragmentation using specially crafted artificial landscapes. The Effective Mesh Area $MESH_{PI}$ emerged as the most appropriate measure since it delivered the best description of forest fragmentation for the various scenarios.

The Effective Mesh Area was used to evaluate the fragmentation of two test regions and led to realistic and intuitive understandable results. Based on the data of the digital landscape model $MESH_{PI}$ was calculated for a region in Rheinland-Pfalz and a second one in Brandenburg with 4.82 km^2 and 2.12 km^2 respectively, which realistically reflect the forest fragmentation in the two areas.

2. Ziele und Aufgabenstellung des Projekts

2.1. Einleitung

Die Fragmentierung von Wäldern hat bereits in prähistorischer Zeit eingesetzt, im Mesolithikum (9000 v. Chr.) und im Neolithikum (5000 v. Chr.) (KÜSTER (1991)). Waldflächen wurde gerodet und durch Felder und Siedlungen ersetzt, so dass die ehemals geschlossenen Wälder einerseits durch kleinflächige Mosaike unterschiedlicher Landnutzungsformen ersetzt und andererseits vielfältig genutzt wurden, beispielsweise zur Waldweide, als Nieder- und Mittelwald, zur Gerbrindegewinnung und zur Streunutzung. Durch das anthropogene Einwirken entwickelten sich vielfältige Waldstrukturen verbunden mit einer hohen Artenvielfalt, die Mitte des 19. Jahrhunderts ihren Höhepunkt erreichten. Jedoch blieben weder die Standort- und Artenvielfalt noch der enorme Strukturreichtum erhalten, da mit der Industrialisierungsphase von 1850 bis 1980 weltweit eine intensive Entwaldungsphase stattgefunden hat. Neben dem hohen Ausmaß der Waldfragmentierung waren naturnahe und standortgerechte Waldbestände zu Gunsten ertragreicher, großflächiger Reinbestände zurückgedrängt worden.

Die biologische Vielfalt der Wälder in Deutschland wird heutzutage nicht mehr durch Rodungen bedroht; laut den Ergebnissen der zweiten Bundeswaldinventur hat die Waldfläche in den alten Bundesländern in der Beobachtungsperiode von 1987-2002 um 54.000 Hektar (0,7 %) zugenommen (SCHMITZ ET AL. (2004)). Nach wie vor werden Wälder durch externe Belastungen wie Immissionen, Zerschneidungen, Grundwasserabsenkungen und überhöhte Schalenwildbestände in der Artenzusammensetzung und Bestandesstruktur in erheblichem Maße verändert. Dennoch ist der Wald im Vergleich zu anderen großflächigen Landschaftseinheiten, wie landwirtschaftlichen Flächen, Siedlungs- und Verkehrsflächen ein naturnaher Lebensraum mit hoher Vielfalt, den es zu erhalten gilt. Einen entscheidenden Beitrag dazu kann das vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz finanzierte Forschungsprojekt „Weiterentwicklung von Indikatoren zur Erfassung der Fragmentierung von Wäldern unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit“ leisten.

2.2. Hintergründe, Ziele und Aufgabenstellung

Während Wälder in der Vergangenheit primär zur Produktion von Holz gedient haben, erfüllen sie heute eine Fülle verschiedener Funktionen. Die nachhaltige Waldbewirtschaftung leistet neben der Erzeugung des umweltfreundlichen Rohstoffes Holz auch ihren Beitrag zur Verbesserung von Wasser, Luft, Boden und Klima. Zudem dienen die Wälder nicht nur als Lebensraum für Flora und Fauna sondern bieten auch vielfältigen Erholungs- und Freizeitraum für Menschen. Kritisch beobachtet wird die fortschreitende Fragmentierung von Wäldern, da diese

einerseits die Bewirtschaftung des Waldes erschwert und andererseits die Erfüllung der Schutz- und Erholungsfunktionen der Wälder beeinträchtigt und zudem zur Verkehrswertminderung von Waldgrundstücken führt. Die Zerschneidung von Wäldern ist nicht nur hinsichtlich der Störung ökosystemarer Zusammenhänge bedenklich sondern stellt insbesondere eine Gefährdung der biologischen Vielfalt dar, so ist die Habitateignung zusammenhängender, unzerschnittener Waldflächen beispielsweise von deren Größe und Einbindung in das Netz umgebender Landnutzungsklassen abhängig. Neben dem Verlust von Flächen und der Habitatverkleinerung, der Änderung von Umfang-Flächen-Verhältnissen von Lebensräumen entstehen durch die Fragmentierung von Wäldern Ausbreitungsbarrieren für Tiere und Pflanzen, womit der genetische Austausch zwischen Populationen zwangsläufig behindert wird. Dies führt längerfristig zum Verlust von Artenvielfalt und genetischer Vielfalt.

Der dringende Handlungsbedarf, um einer fortschreitenden Zerschneidung von Wäldern entgegenzuwirken, ist unumstritten. Somit ist die Erfassung sämtlicher Veränderungen und Verkleinerungen von Lebensräumen und bestehender sowie geplanter Trennelemente eine grundlegende Voraussetzung, um darauf basierend wirksame Maßnahmen ableiten zu können. Daher wurden im Nationalen Waldprogramm Deutschlands konkrete Zielstellungen formuliert, wobei Kapitel 4.2 „Biodiversität; Waldbewirtschaftung und Naturschutz“ die Aspekte der Waldzerschneidung aufgreift. Darin wird u. a. betont, dass unzerschnittene verkehrsarme Räume zu erhalten und zu fördern sind, die weitere Inanspruchnahme freier Landschaft durch Verkehrsstrassen auf ein unverzichtbares Mindestmaß begrenzt bleiben muss und Waldflächenverluste, insbesondere alter Waldstandorte, zu vermeiden und auszugleichen sind (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2003)). Das Referat 534 des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, verfolgt diese Ziele u. a. im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung weiter (BUNDESREGIERUNG (2002), BUNDESREGIERUNG (2004), BUNDESREGIERUNG (2005)). Dies erfordert Verfahren zur Beschreibung der Strukturdiversität in Wäldern, die Rückschlüsse auf das Zusammenwirken von Struktur und ökologischen Prozessen erlauben. Eine geeignete Herangehensweise zur Erfassung der Fragmentierung des Waldes und zur Erfolgskontrolle von Gegenstrategien bieten Indikatoren, mit denen „Waldfragmentierung“ gemessen werden kann. Dieses Projekt zeigt einen Verfahrensvorschlag auf, der aufbauend auf verschiedenen Mustern der Waldbedeckung und deren räumlicher Verteilung Informationen zur Fragmentierung von Wäldern liefert. Durch die Verknüpfung einzelner Merkmale von Waldflächen, wie beispielsweise Form, Größe und Waldrandlänge werden Aussagen über das Ausmaß der Zerschneidung möglich, aufgrund derer eine Bewertung des Zustandes und der Qualität des Lebensraumes Wald vorgenommen werden kann. Im Weiteren soll der zu entwickelnde Indikator mit unterschiedlichen Datensätzen, die entweder bereits vorliegen oder mit geringem Aufwand erhoben werden können, anwendbar sein.

2.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

2.3.1. Begriffserklärungen

Bis zum heutigen Zeitpunkt konnte keine einheitliche Definition für den Begriff „Landschaftszerschneidung“ gefunden werden. Einen großen Anteil daran hat die vielfältige Anwendung dieses Terminus, der entsprechend der unterschiedlichen Zielaussagen, die damit verbunden sind, variieren kann.

Nach FORMAN (1995) stellt die Fragmentierung einer Landschaft die räumliche Zerteilung eines Habitats, Ökosystems oder eines Landnutzungstyps in kleinere Einheiten dar. Neben der Auflösung räumlicher Zusammenhänge gehen auch funktionale Abhängigkeiten verloren, was sich in Form isolierter, inselartig in einer andersartigen Umgebung liegender kleinerer, unverbundener Biotopflächen widerspiegelt (AKADEMIE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE (1984)). FRITZ (1984) führte auf dem Gebiet der alten Bundesländer eine Erhebung unzerschnittener, relativ großflächiger Wälder durch, deren Komplexität durch Zerschneidung in Form von Straßen und Eisenbahnlinien beeinträchtigt wurde. Ergänzend dazu findet die Verkehrsdichte häufig Eingang als landschaftszerschneidende Komponente. So wird der zunehmende Rückgang vieler Wälder als Lebensraum für Wirbeltiere mit größeren Aktionsradien im Nationalen Waldprogramm Deutschlands (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2004)) mit der Zerschneidung durch Straßen und der Dichte des Straßenverkehrs begründet.

Die Zerschneidung von Landschaften kann einerseits geomorphologisch bedingt sein, z.B. durch Gebirgszüge, Täler, Seen und Flüsse, oder auch durch natürliche Ereignisse hervorgerufen werden. Dazu zählen Sturmwürfe, Insektenkalamitäten, Überflutungen, Feuer und Erschütterungen der Erdoberfläche. Andererseits kann die Zergliederung von Landschaften zu einem Großteil auf menschliches Einwirken zurückgeführt werden. Von solchen anthropogen geschaffenen linienhaften Landschaftsstrukturen, flächigen Hindernissen oder Materieströmen gehen Barriere-, Emissions- oder Kollisionseffekte auf andere Landschaftsstrukturen und Materieströme aus (GRAU (1998)). Neben linearen Elementen wie Straßen, Eisenbahnstrecken, Kanälen und Energiefreileitungen tragen technische Infrastrukturelemente, Bebauungen aber auch landwirtschaftliche Nutzungen zur Zergliederung von Landschaften bei. Eine weitere Folge sind indirekte Einwirkungen wie Immissionen, akustische und optische Störungen, Beeinflussungen des Wasserhaushaltes sowie Klimaveränderungen. Darüber hinaus werden zahlreiche natürliche Prozesse, wie Erosionen oder Überflutungen, durch menschliche Aktivitäten ausgelöst oder verstärkt.

Ein weiterer Aspekt bei der Beurteilung der Zerschneidung von Landschaften, hier speziell von Wäldern, ist die Betrachtungsebene. Angefangen bei der globalen Ausdehnung, z.B. Verteilung und Ursachen der globalen Waldfragmentierung (WADE ET AL. (2003)), über bestimmte Klimazonen, wie der borealen Waldzone (HAILA (1994)), geographische Regionen, z.B. räumliche Analysen des Holzeinschlages im Amazonas (READ (2003)) oder multitemporale Kartierung der Fragmentierung von Wäldern in Bolivien (MILLINGTON ET AL. (2003)), ausgewählte Landschaften oder Ökosysteme, u.a. Waldflächenerkennung über Landschaftss-

strukturmaße im Alberta Yellowhead Ecosystem, Kanada (FRANKLIN ET AL. (2002)) reicht diese bis hin zu regionalen, kleinräumigen Untersuchungen von Mikrohabitaten. Durch die damit gewählte Auflösungsebene, die zudem vom Datenmaterial abhängig ist, werden ebenso die Analysemöglichkeiten der Zerschneidung festgelegt, die bei kleinräumigen Untersuchungen entsprechend detaillierter sein können als bei globalen.

Die Begriffe Landschaftsfragmentierung und Landschaftszerschneidung werden oftmals synonym verwendet, wobei Fragmentierung eher die räumliche Zergliederung in Form flächiger Umwidmungen (z.B. zu Gewerbe- und Wohngebieten) beschreibt und Zerschneidung eher die Zertrennung durch ein Netz aus linienhaften und flächigen Nutzungen (z.B. Netz der Verkehrswege und Siedlungsflächen). Dabei stellt die Zerschneidung (oder Fragmentierung) den Prozess in Hinblick einer Veränderung der Landschaftsstruktur dar, während der Zerschneidungsgrad (oder Fragmentierungsgrad) das Ausmaß und somit den Zustand einer Landschaft wiedergibt (JAEGER (2003)).

2.3.2. Stand der Forschung

In der Wissenschaft und Politik hat sich der steigende Landschaftsverbrauch und die Landschaftszerschneidung seit Mitte der 1970er Jahre als flächendeckende Problematik etabliert (JAEGER (2003)). Das Bundeskabinett hat am 17. April 2002 die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie verabschiedet, in der der Indikator „Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ zum Monitoring der Flächeninanspruchnahme einer von 21 Schlüsselindikatoren ist (BUNDESREGIERUNG (2002)). Während im Vierjahreszeitraum von 1997 - 2000 täglich 129 ha in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgewandelt wurden, konnte für den Zeitraum von 2001 - 2004 ein Rückgang auf 115 ha/Tag verzeichnet werden (Abb. 2.1 ¹). Nach den Erhebungen des Statistischen Bundesamts 2005 entfallen davon 52 % auf Gebäude- und Freiflächen und 38 % auf Verkehrsflächen (STATISTISCHES BUNDESAMT, WIESBADEN (2005)). Als Zielstellung der Nachhaltigkeitsstrategie für das Jahr 2020 strebt die Bundesregierung eine Reduzierung der Flächeninanspruchnahme auf maximal 30 ha/Tag an. Durch diese Erhebungen werden zwar aktuelle Daten zum Landschaftsverbrauch aufgenommen, jedoch ermöglichen diese keine quantitativen Aussagen zur Zerschneidung von Landschaften.

Zum Schutz von Lebensräumen und der Erhaltung der biologischen Vielfalt wurde zudem ein Nachhaltigkeitsindikator für die Artenvielfalt aufgestellt. Der Gesamtindikator wird aus dem Verhältnis der Bestandesentwicklung 51 ausgewählter Vogelarten, die grundsätzlich die Entwicklung in der Gesamtlandschaft repräsentieren, hinsichtlich des für 2015 festgelegten Bestandeszielwertes abgeleitet (BUNDESREGIERUNG (2004), ACHTZIGER ET AL. (2003), PROJEKTGRUPPE NACHHALTIGKEITSINDIKATOR (2003)). Ein speziell auf den Wald zugeschnittener Indikator existiert in Deutschland noch nicht. Auch auf internationaler Ebene gibt es verschiedene Bestrebungen, Biodiversität und unzerschnittene Räume zu erhalten. So wurde 2003 vor dem Hintergrund einer gesamteuropäischen nachhaltigen Waldentwicklung auf der vierten Ministerkonferenz zum Schutz der Wälder in Europa (MCPFE) ein weiterentwickeltes und verbessertes Set gesamteuropäischen Indikatoren für nachhaltige Waldbewirtschaftung,

¹<http://www.bbr.bund.de/index.html?raumordnung/siedlung/siedlung.htm>, Stand: Mai 2006

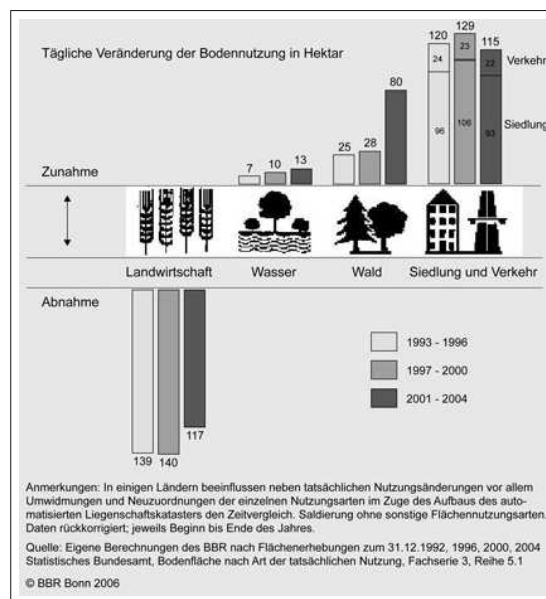


Abbildung 2.1: Tägliche Veränderung der Bodennutzung in Hektar (1993 - 2004)

bestehend aus sechs Kriterien, die alle forstlichen Funktionen abdecken (MCPFE, LIAISON UNIT VIENNA (2003)) angenommen. Das Kriterium 4, welches sich auf die „Erhaltung, Schutz und angemessene Verbesserung der biologischen Vielfalt in Waldökosystemen“ bezieht, wurde um den Indikator 4.7 „Landschaftsmuster“ ergänzt, der jedoch noch nicht operational ist.

Zur Erfassung der Struktur beliebiger Landschaften steht eine Vielzahl statistischer Messgrößen zur Auswahl, die als Landschaftsindizes bezeichnet werden (O'NEILL ET AL. (1988), MCGARIGAL und MARKS (1995), WALZ (1999)). Um die strukturelle Diversität zu charakterisieren, müssen verschiedene Merkmale analysiert werden. Dazu zählen u. a. Häufigkeit (z.B. Anzahl einzelner Flächen einer Landnutzungs-klasse), Art (z.B. Landnutzungs-klasse oder Vegetationsform), räumliche Anordnung der Flächen, Entfernungen zu benachbarten Flächen und Formparameter. Mit zunehmender Anzahl der Merkmale steigt die Zahl der Indikatoren, die zu deren Beschreibung erforderlich sind. Damit gehen Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit der Indikatoren zurück, zumal viele der statistischen Kenngrößen redundante Informationen zur Verfügung stellen (HAINES-YOUNG und CHOPPING (1996), GILES und TRANI (1999)), die durch multivariate statistische Methoden, z.B. Faktorenanalysen, reduziert werden können (RIITTERS ET AL. (1995), CAIN ET AL. (1997)). Da sowohl die Flächenstruktur als auch deren Zerschneidung komplexe Erscheinungen sind, ist deren Beschreibung durch einen einzelnen Index nicht möglich (RIPPLE ET AL. (1991), BASKENT und JORDAN (1995), DALE ET AL. (1995)). Somit ist die Auswahl der für die jeweilige Zielstellung einer Landschaftsanalyse geeigneten Indikatoren eine nicht triviale Aufgabe.

In einer Studie untersuchten TRAUB und KLEINN (1999) die Eignung zehn ausgewählter Indikatoren zur Erfassung der Flächenfragmentierung und strukturellen Diversität in drei unterschiedlich bewaldeten Gebiete Costa Rica's. Der Flächenanteil der größten Einzelfläche (LPI), der Landschaftsformindex (LSI) und der mittlere Formindex (MSI), der Randlinien und Anzahl

von Einzelflächen kombiniert, sind demnach gut zur Strukturanalyse geeignet. Die Bewertung der räumlichen Waldverteilung auf europäischer Ebene basierend auf verschiedenem Datenmaterial wurde mittels sieben Indikatoren durchgeführt, u. a. Einzelflächendichte (PD), Dichte der Randlinienlänge (ED), Gesamtkernflächenindex (TCAI), Landschaftsformindex (LSI), Mittlere Nachbarschaftsentfernung (MNN). Die unterschiedlichen Datenquellen haben die Strukturindizes stark beeinflusst, weshalb für großflächige Landschaftstrukturbewertungen mittels grob aufgelöster Daten einfache Indikatoren basierend auf, den Flächenverhältnissen der Landnutzungsklassen verwendet werden sollten (UTTERA ET AL. (2003)). Als ein Ergebnis des europäischen Projekts „Indicators for the monitoring and evaluation of forest biodiversity“ (BEAR) geht die Zusammenstellung von Indikatoren zur Erhebung von strukturellen Schlüsselparametern der Biodiversität von Wäldern hervor. Vorgeschlagene Indikatoren zur Bewertung der Waldfragmentierung sind hier die Größe der Waldflächen (Einzelflächen, absolute Waldfläche, prozentuale Waldfläche, Veränderungsrate) und Gesamtkantenlänge/Ökotonlänge (LARSSON ET AL. (2001), LARSSON (2001)). Einen anderen Ansatz verfolgte DAHM (2001), der die Länge von Waldrändern aus den terrestrischen Daten der ersten Bundeswaldinventur herleitete, um damit Rückschlüsse auf Randeffekte und in Verbindung mit der Waldfläche Aussagen zur durchschnittlichen Größe der Wälder zu ziehen. WADE ET AL. (2003) entwickelte eine Methode, mit der die natürliche und anthropogen bedingte, weltweite Waldfragmentierung beurteilt werden kann. Aus den Relationen der aneinandergrenzenden Kantentypen (Wald-, natürliche und anthropogene) zur Gesamtwaldrandlänge wird die Fragmentierung und die zusammenhängende Waldfläche berechnet. JAEGER (1999) untersuchte 19 verschiedene Zerschneidungsmaße hinsichtlich unterschiedlicher Eignungskriterien. Da fast keiner der Indizes den Ansprüchen an ein Zerschneidungsmaß gerecht wurde, entwickelte Jäger die Indikatoren effektive Maschenweite, Zerteilungsgrad und Zerstückelungsindex (JAEGER (1999)), die seit 2002 auch in der Geostatistik-Software FRAGSTATS integriert sind (MCGARIGAL ET AL. (2002)).

3. Material und Methodik

3.1. Datenmaterial

Für die vorliegende Studie wurden zwei Untersuchungsgebiete mit einer Fläche von ca. 614 km² (18 x 33 km) ausgewählt, die sich hinsichtlich der Waldstruktur, der Waldverteilung und des Anteils der Waldfläche an der Gesamtfläche unterscheiden. Das erste Untersuchungsgebiet liegt im Bundesland Rheinland-Pfalz und ist durch eine große, zusammenhängende Waldstruktur gekennzeichnet, welche zu einem Großteil durch den Pfälzer Wald abgedeckt ist. Der Waldanteil beträgt ca. 80 %. Das zweite Untersuchungsgebiet befindet sich in Brandenburg und ist durch einen höheren Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche wesentlich strukturierter. Die Waldfläche nimmt ungefähr 50 % der Fläche des Untersuchungsgebietes ein.

3.1.1. Digitales Landschaftsmodell

Die Grundlage für die Analyse der Fragmentierung beider Untersuchungsgebiete waren die Daten des Digitalen Landschaftsmodells (*DLM*), die vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie zur Verfügung gestellt wurden. Das *DLM* beschreibt die topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat auf Grundlage des Objektartenkatalogs des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (*ATKIS*). Der Informationsumfang des Basis-DLM orientiert sich am Inhalt der Topographischen Karte 1:25.000, weist jedoch eine höhere Lagegenauigkeit (± 3 m bis ± 15 m) für die wichtigsten punkt- und linienförmigen Objekte auf.

Die Basis für die Berechnung der Zerschneidungsmaße sind die zusammengefassten Geometrien, die einerseits aus den Landnutzungsklassen, deren Zerschneidungsgrad ermittelt werden soll, und andererseits aus den zerschneidenden Objekten selbst bestehen. Über die Attribute der Objektarten im *DLM*-Datensatz ist eine gezielte Selektierung der benötigten Daten möglich. Jedoch ist vor der Zusammenstellung der Daten die weitaus wichtigere Fragestellung zu klären, welche Daten „zerschneidend“ sind. Bei der Untersuchung der Fragmentierung von Wäldern stehen die anthropogen bedingten Zerschneidungsgeometrien im Vordergrund. Auch geogene Zerschneidungselemente, wie Flüsse einer bestimmte Breite oder Seen, können als Trennelemente wirken, allerdings gibt es über die Verwendung geomorphologisch hervorgegangener Zerschneidungsgrößen kontroverse Auffassungen, da diese bereits an faunistische Interpretationen gekoppelt sind (ESSWEIN und SCHWARZ-V. RAUMER (2004)).

Zunächst wurde eine Polygondatei erstellt, in der alle einzelnen Flächen der „unzerschnittenen“ Landnutzungsklassen enthalten sind (Tabelle 3.1). Aneinander grenzende Flächen derselben

Objektart wurden zu einer Fläche zusammengefasst. Diese als „Landnutzungsklassengeometrie“ bezeichneten Daten enthalten die Informationen der noch unzerschnittenen Flächen. Die Zerschneidungsgeometrie umfasst die als Trennelemente wirkenden Linien- und Flächenobjekte (Tabelle 3.2). Eine Einbindung der Linienobjekte in die Zerschneidungsgeometrie konnte durch Pufferung ebendieser realisiert werden. Als Pufferbreite wurde jeweils die Hälfte der im *DLM* angegebenen Straßen- bzw. Schienenbreite verwendet, so dass aus den Linien- Flächenobjekte entstanden sind. Insofern keine Angaben zur Breite verfügbar waren, wurde der für die Objektart vorliegende Minimalwert verwendet. Die in den beiden Geometrien enthaltenen Objektarten können in den zwei Untersuchungsgebieten voneinander abweichen.

DLM-Ebene		Objektart
veg01-f	4101	Ackerland
veg02-f	4102	Grünland
	4103	Gartenland
	4104	Heide
	4105	Moor, Moos
veg03-f	4107	Wald, Forst
	4108	Gehölz
veg04-f	4109	Sonderkultur
	4110	Brachland
	4199	Fläche z.Zt. nicht bestimmbar
veg05-f	4111	Nasser Boden
	4106	Sumpf, Ried
gew01-f	5112	Binnensee

Tabelle 3.1: Übersicht zu den Objektarten, die in der Landnutzungsklassengeometrie aggregiert sind (f = Flächenobjekte)

DLM-Ebene		Objektart
sie01-f	2101	Ortslage
sie02-f	2111	Wohnbaufläche
	2112	Industriefläche
	2113	Fläche gemischter Nutzung
	2114	Fläche besond. funktionaler Prägung
	2202	Freizeitanlage
gew01-f	5102	Kanal (Schifffahrt)
ver01-l	3101	Straße
	3105	Straßenkörper
ver02-l	3201	Schienenbahn
	3205	Bahnstrecke

Tabelle 3.2: Übersicht zu den Objektarten, die in der Zerschneidungsgeometrie aggregiert sind (f = Flächenobjekte, l = Linienobjekte)

Aus der Verschneidung der Landnutzungsklassengeometrie mit der Zerschneidungsgeometrie werden die Größenangaben der einzelnen Flächen ermittelt. Infolgedessen können die Zerschneidungsmaße berechnet werden.

3.1.2. Satellitendaten

Neben digitalen Geobasisdaten bietet die Satellitenfernerkundung eine alternative Datenbasis. Satellitendaten entfalten ihr Potential insbesondere bei der Bereitstellung aktueller flächendeckender Waldverteilungskarten und bei der automatisierten zielorientierten Auswertung. Das unterschiedliche Auflösungs-niveau der Daten ermöglicht ein breites Spektrum an Untersuchungsräumen, angefangen bei kleinräumigen, regionalen bis hin zu weltweiten Auswertungseinheiten. Dies spiegelt sich auch in der Vielzahl der Studien wider, bei denen Fernerkundungsdaten eingesetzt wurden, z.B. FRANKLIN ET AL. (2000) (Landsat), FULLER (2001) (Landsat), IVITS und KOCH (2003) (fusionierte Landsat ETM-IRS-Daten, QuickBird), UUTTERA ET AL. (2003) (Spot HRV, Landsat-TM, Landsat MSS (Datenbasis für CORINE Land Cover-Datensatz), IRS WiFS, NOAA AVHRR), LUNG und SCHAAB (2004) (Landsat), MILLINGTON ET AL. (2003) (Landsat), READ (2003) (IKONOS, Landsat-ETM), TISCHENDORF (2001) (Landsat-ETM), WADE ET AL. (2003) (NOAA AVHRR).

Die fernerkundungsbasierte Waldzerschneidungsanalyse für die beiden Untersuchungsgebiete wurde mittels multispektraler Landsat-ETM-Daten (modifizierte Auflösung von 25 m x 25 m je Pixel) und multispektraler QuickBird-Daten (Auflösung von 2,44 m x 2,44 m je Pixel) durchgeführt. Die Satellitendaten wurden durch ein Schwellenwertverfahren in die Objektklassen Wald und Nichtwald eingeteilt (OEHMICHEN (2006), OEHMICHEN und WILLKOMMEN (2004)). Danach erfolgte eine Umwandlung der Rasterdaten in Vektordaten, die als Berechnungsgrundlage der Fragmentierung der Wälder verwendet wurden.

3.1.3. Terrestrische Stichprobendaten

Die Beschreibung der Strukturdiversität von Wäldern bezieht sich immer auf die gesamte Fläche eines Untersuchungsgebietes. Insofern keine flächendeckenden Daten vorliegen, könnten die Zerschneidungsmaße aus terrestrischen Stichprobeninformationen geschätzt werden, wie beispielsweise der Bundeswaldinventur (BWI). Ein wichtiges Strukturelement der Wälder ist die Waldrandlänge, die mit den terrestrischen Aufnahmen der zweiten Bundeswaldinventur erhoben wurde und deren Aussagekraft als Fragmentierungsgröße validiert werden soll.

Die BWI wird nach einem terrestrischen Stichprobenverfahren mit gleichmäßig systematischer Stichprobenverteilung über das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt. Der Anordnung der Stichproben liegt ein 4 x 4 km-Gitternetz (Grundnetz) zugrunde, dass auf Wunsch der Bundesländer regional verdichtet werden konnte. Die Stichprobeneinheit dieser einstufigen Clusterstichprobe ist der Trakt, der eine quadratische Fläche mit einer Seitenlänge von 150 m umschließt. Sobald mindestens eine der vier Traktecken im Wald liegt, handelt es sich um einen Waldtrakt, dessen Daten erhoben werden. Es werden alle Waldränder im Umkreis von 25 m um Waldtraktecken eingemessen. Dabei wird die Art des Wald/Bestandesrandes erfasst, die entweder als Waldaußenrand (Abstand zur Grenzlinie des gegenüberliegenden Waldrandes mindestens 50 m), als Waldinnenrand (Abstand zur Grenzlinie des gegenüberliegenden Waldrandes zwischen 30 m und 50 m) oder Bestandesgrenze (zwischen unmittelbar aneinander grenzenden Beständen (bis 30 m Abstand) mit mindestens 20 m geringerer Bestandeshöhe

des vorgelagerten Bestandes) eingestuft werden. Bei Waldrändern der Kategorie Waldaußenrand wird zusätzlich das vorgelagerte Terrain erfasst, welches einer der folgenden Gruppen zugehört: bebaute Flächen (Siedlungs-, Verkehrs-, Gewerbeflächen), Acker, Wiesen und Weiden, Waldsukzession, Feuchtgebiet, Gewässer, Hochmoor, Felsflächen, Waldgrenze im Gebirge oder sonstige extensiv oder nicht genutzte Landflächen (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (HRSG.) (2001)). Wird die Waldrandlänge in Bezug zur Waldfläche gesetzt, ergibt sich daraus die durchschnittliche Größe der Wälder und somit kann eine Schätzung für den Zerschneidungsgrad hergeleitet werden.

3.2. Methodik

Bei der Beschreibung der Landschaftsfragmentierung in Form quantitativ-deskriptiver Methoden können nur solche Indikatoren ausgewählt werden, die bestimmte Eignungskriterien erfüllen. Sie sollten beispielsweise den aus Zerschneidungsprozessen hervorgegangenen Anstieg bzw. Verlust von Einzelflächen dokumentieren (Abb. 3.1 c). Ebenso nimmt die Fragmentierung einer Landschaft zu, wenn von einem großen Patch Fläche an ein kleineres Patch übergeben wird (Abb. 3.1 b).

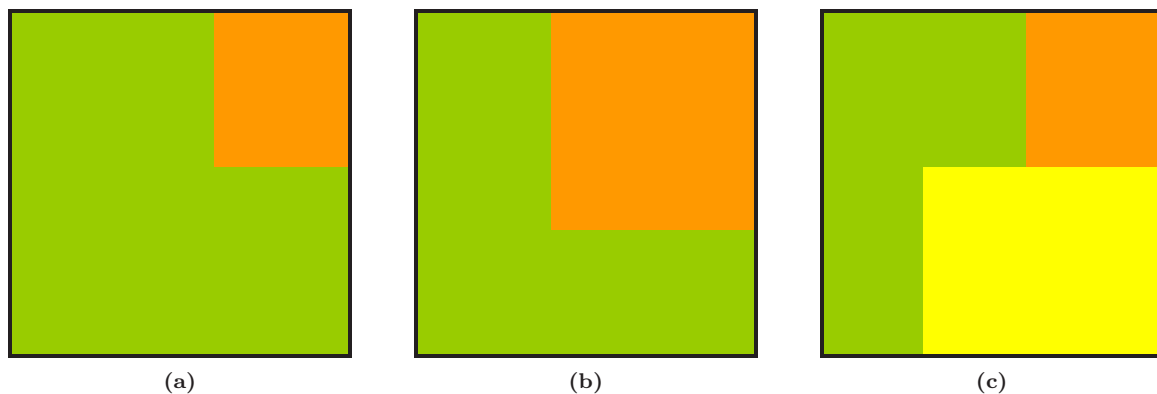


Abbildung 3.1: Zunahme der Fragmentierung der Ausgangslandschaft (a) durch Änderung von Flächenverhältnissen (b) und steigende Anzahl der Patches (c)

Weitere Anforderungen an ein Zerschneidungsmaß sind folgende (nach JAEGER (2003)): Anschaulichkeit und intuitive Verständlichkeit, mathematische Einfachheit, geringer (effizienter) Datenbedarf, Robustheit gegenüber der Berücksichtigung von Kleinstflächen, Skaleninvarianz, Ungleichbehandlung der fragmentierenden gegenüber den von der Fragmentierung betroffenen Flächen und Linien, gleichgerichtete Reaktion auf verschiedene Fragmentierungsphasen, Sensitivität für wichtige strukturelle Unterschiede zwischen Zerschneidungsmustern, Homogenität und Additivität (im mathematischen Sinn) sowie Interpretierbarkeit als Zerschneidungsmaß. Daneben kann der Fragmentierungsgrad einer Landschaft auch durch zusätzliche Merkmale eruiert werden, z.B. durch Nachbarschafts- und Distanzmaße, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Zur Analyse und Bewertung der Zerschneidung von Wäldern wurden die nachfolgend genann-

ten Maßzahlen ausgewählt, deren Eignung als „Waldfragmentierungsindikator“ anhand einer Simulationsstudie untersucht wurde:

1. Prozentualer Flächenanteil einer Landnutzungs-kategorie an Gesamtlandschaft (Area Proportion of the Land Cover, APL) $0 < APL \leq 100$

$$APL = \frac{A_{LC}}{A} \quad (3.1)$$

2. Dichte der Einzelflächen (Patch Density, PD), $PD > 0$

$$PD = \frac{n}{A} \quad (3.2)$$

3. Dichte der Randlinienlänge (Edge Density, ED),
 $ED_{min} = 0$ (Grenze zum Hintergrund wird nicht berücksichtigt), $ED > 0$

$$ED = \frac{e}{A} \quad (3.3)$$

4. Landschaftsformindex (Landscape Shape Index, LSI), $LSI \geq 1$

$$LSI = \frac{1}{4} \frac{e}{\sqrt{A}} \quad (3.4)$$

5. effektive Maschenweite (Effective Mesh Size, MESH), $0 < MESH \leq A$

$$MESH = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i^2 \quad (3.5)$$

6. Durchgängigkeitsindex (Patency Index, PI), $0 < PI \leq 1$

$$PI = \frac{A^v}{A} \quad (3.6)$$

7. Effektive Maschenfläche ($MESH_{PI}$), $0 < MESH_{PI} \leq A$

$$\begin{aligned} MESH_{PI} &= \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (PI_i A_i)^2 \\ &= \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (A_i^v)^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

mit n = Anzahl der Einzelflächen ($n \geq 1$, ohne Begrenzung, $n = 1$, wenn die Landschaft nur aus einer Fläche besteht), A_{LC} = Fläche der Landnutzungs-kategorie, A = Gesamtfläche, e = Randlinienlänge, A_i = i-te Einzelfläche, A^v = mittlere Sichtbarkeitsfläche.

Die erste Beurteilung der Indikatoren erfolgte mittels künstlicher Landschaftskonstellationen, um die Einsatzmöglichkeiten und Grenzbereiche der jeweiligen Indikatoren abzuleiten. Die

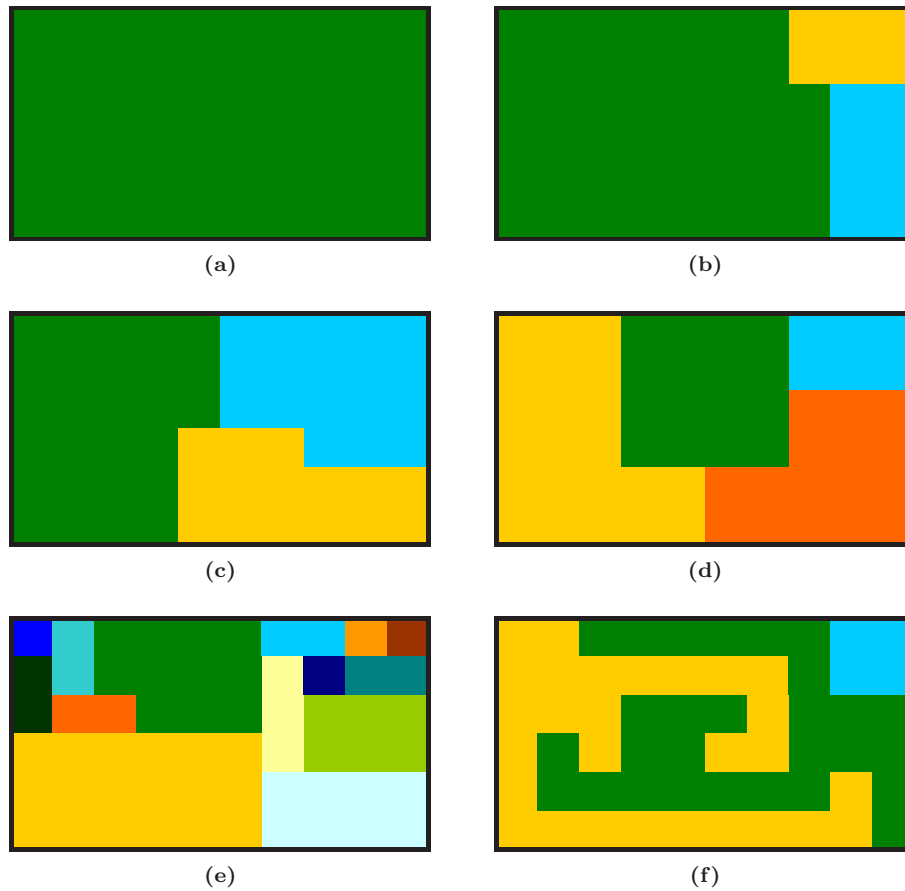


Abbildung 3.2: Landschaften a-f, für die das Indikatorenset berechnet wurde

Landschaft	n	APL (dunkelgrün)	PD	ED	LSI	MESH	MESH _{PI}
a	1	1,00	0,02	0,53	1,03	60,00	60,00
b	3	0,77	0,05	0,68	1,32	36,93	36,93
c	3	0,45	0,05	0,75	1,45	21,30	20,16
d	4	0,27	0,07	0,82	1,58	17,20	14,86
e	14	0,18	0,23	1,17	2,26	9,63	9,57
f	3	0,47	0,05	1,18	2,29	26,40	3,08

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Indikatoren für die Landschaften a-f

sechs Landschaften (Abb. 3.2) sind so konzipiert, dass die Fragmentierung von Landschaft a zu f zunimmt. Diese Entwicklung sollte demzufolge auch durch die Ergebnisse der einzelnen Indikatoren wiedergegeben werden (Tabelle 3.3).

Die Aussagekraft der Anzahl der Einzelflächen n ist relativ beschränkt, denn weder die Gesamtfläche der betrachteten Landschaft oder Einzelflächen, noch Kantenlängen oder Verteilungen sind mit diesem Parameter verbunden, sondern n erfasst alle Flächen unabhängig ihrer Größe. Für die Landschaften b, c und f ist n gleich groß, jedoch kann daraus kein Rückschluss auf

die Zerschneidung der Landschaften gezogen werden. Als Nachteil wirkt sich auch die fehlende Integration struktureller Unterschiede innerhalb der Landschaften aus. Für die Berechnung anderer Indikatoren ist n eine wichtige Eingangsgröße. Bei dem Vergleich von Landschaften gleicher Größe entspricht der Informationsgehalt von n dem der Dichte der Einzelflächen PD . Mit PD können grundlegende Aussagen zur räumlichen Strukturierung verschieden großer Landschaften gemacht werden, wobei kleine Werte auf große zusammenhängende Flächen und große Werte auf zergliederte kleinflächige Strukturen verweisen. Die Maßzahl APL dokumentiert die Zusammensetzung einer Landschaft in Form des prozentualen Flächenanteils der vorkommenden Landnutzungsklassen, die dann sinnvoll einzusetzen ist, wenn eine bestimmte Landnutzungsklasse speziellen Untersuchungen unterzogen werden soll. Beispielsweise ist der prozentuale Waldflächenanteil in Verbindung mit der quantitativen Beschreibung von Waldflächenstrukturen eine zentrale Größe, da die strukturelle Diversität der Waldflächenverteilung wesentlich vom Gesamtwaldanteil abhängt (TRAUB und KLEINN (1999)). Mit den Ergebnissen von $APL_{\text{dunkelgruen}}$ wird der dunkelgrüne Flächenanteil an den Landschaften repräsentiert, woraus sich aber keinerlei Aussagen zur Fragmentierung der dunkelgrünen Landnutzungsklassen und der Gesamtlandschaften herleiten lassen. Auch APL wird als Bezugsgröße für viele andere Indikatoren verwendet.

Die Randliniendichte ED und der Landschaftsformindex LSI basieren auf der Form von Einzelflächen und bilden Quotienten aus der Randlinienlänge und der Gesamtfläche (ED) bzw. dem Umfang eines Quadrates der Gesamtfläche (LSI). Durch die Beurteilung der Komplexität von Einzelflächen und Randlinienlänge ist die Maßzahl ED insbesondere zur Beschreibung von Flächenverteilungsmustern prädestiniert. Aus den Ergebnissen für ED und LSI geht ein Anstieg der Zerschneidung der simulierten Landschaften von Landschaft a bis f hervor, währenddessen diese Tendenz von der effektiven Maschenweite $MESH$ nur bis zur Landschaft c beibehalten wird. $MESH$ ist definiert als die Größe der Flächen, in die ein Untersuchungsgebiet zerteilt werden müsste, damit die Begegnungswahrscheinlichkeit für zwei Tiere genau so groß ist, wie im betrachteten Untersuchungsgebiet (JAEGER (2003)), wobei mit der Zunahme der Landschaftszerschneidung eine Abnahme der Werte des Indikators einhergeht. Den höchsten Zerschneidungsgrad weist die effektive Maschenweite der Landschaft e zu und wird bei d und f kleiner. Damit wird deutlich, dass $MESH$ die Fragmentierung basierend auf Flächengrößen berechnet und die Form von Flächen dabei keinen Einfluss haben. Die Zunahme der Fragmentierung wird ebenfalls von der modifizierten effektiven Maschenweite $MESH_{PI}$ wiedergegeben, die eine Weiterentwicklung der effektiven Maschenweite um den Durchgängigkeitsindex PI ist und auch die Form von Flächen berücksichtigt (SCHWARZ-VON RAUMER (2006)). Daneben gehen in die Berechnung von PI auch innerhalb einer Fläche liegende Hindernisse ein, die als Inselepolygone bezeichnet werden.

Anhand weiterer simulierter Landschaften (Abb. 3.2) kommen die genannten Stärken des Durchgängigkeitsindex PI zum Ausdruck. Während die drei Maßzahlen ED , LSI , $MESH$ für die Landschaften g und h identische Werte liefern, ist PI bereits bei der Landschaft g geringer als $MESH$. Durch die extreme Beeinträchtigung der Sichtbarkeit der Landschaft h, die durch die vier in die Landschaft hineinragenden Straßen hervorgerufen werden, zeigt PI deutlich geringere Werte, die eine realistische Abbildung der Fragmentierung darstellen. Die nachfolgenden Landschaften i und j, die sich durch den Zerklüftungsgrad der Randlinien unter-

scheiden, werden aufgrund der Überbewertung der Randlinienlänge der Landschaft j als stark fragmentiert bewertet. Auch in diesem Fall ist der Index PI derjenige, der ein der Realität adäquates Ergebnis liefert.

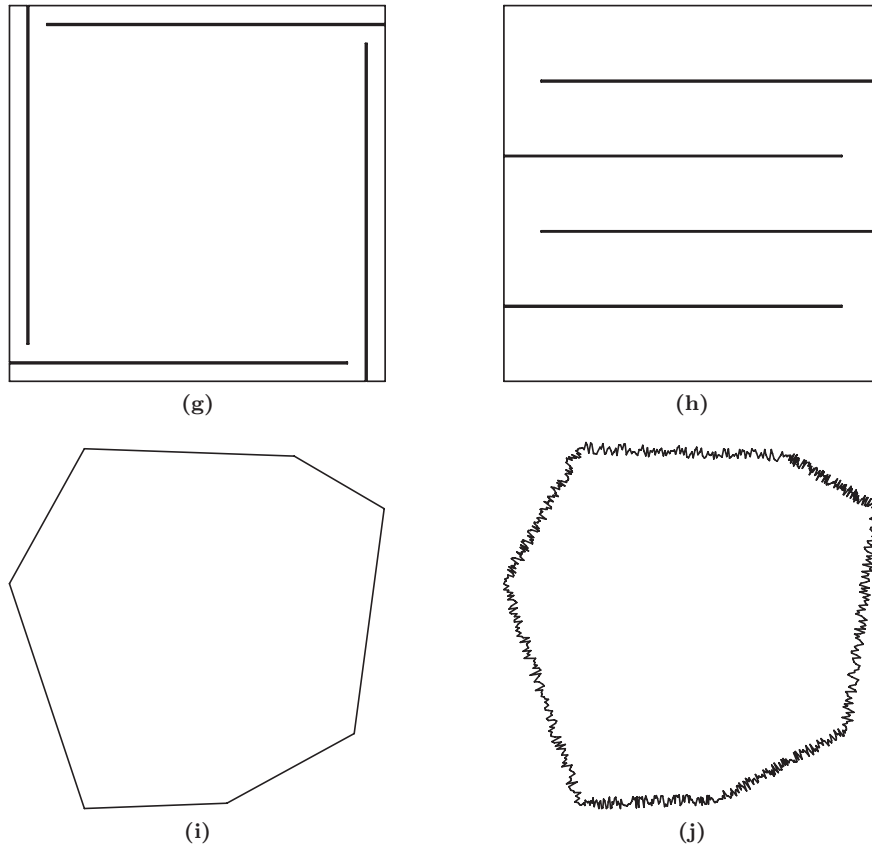


Abbildung 3.2: Landschaften g-j, für die die Indikatoren ED , LSI , $MESH$ und $MESH_{PI}$ berechnet wurden

Landschaft	ED	LSI	MESH	PI
g	11,20	2,80	1	0,67
h	11,20	2,80	1	0,21
i	4,29	0,93	0,76	0,76
j	13,80	3,01	0,76	0,74

Tabelle 3.4: Ergebnisse der vier Indikatoren für die Landschaften g-j

Aus der Simulationsstudie ist die Effektive Maschenfläche $MESH_{PI}$ als Parameter mit hohem Potential zur Analyse der Landschaftsfragmentierung hervorgegangen. $MESH_{PI}$ zeichnet sich durch die Eigenschaften aus, neben der Fläche auch die Form von Patches und Hindernissen innerhalb von Flächen in die Berechnung zu integrieren. Dadurch gelingt es, die Landschaftszerschneidung mit ihrer großen Vielfalt an Erscheinungsformen zu erfassen und quantitativ darzustellen.

4. Ergebnisse

4.1. Beschreibung der Waldzerschneidung mit der Effektiven Maschenfläche

Im Fokus des Projektes stand die Beschreibung der Fragmentierung von Landschaften durch einen Indikator oder eine Kombination geeigneter Indikatoren, deren Anzahl auf ein aussagekräftiges Minimum zu beschränken war. Somit wurden Maßzahlen, die redundante Ergebnisse liefern oder von geringer Aussagekraft sind, ausgeschlossen. Als Parameter mit hohem Potential zur Analyse und Bewertung der Fragmentierung von Landschaften ist der Index Effektive Maschenfläche $MESH_{PI}$ (SCHWARZ-VON RAUMER (2006)) aus der auf künstlichen Landschaftskonstellationen basierenden Simulationsstudie hervorgegangen.

Die Effektive Maschenfläche $MESH_{PI}$ ist eine Weiterentwicklung der Effektiven Maschenweite (JAEGER (2000)) um den Durchgängigkeitsindex PI und ist der Gruppe der Berührungs- und Einstreuungsmaße zuzuordnen. Die Grundlage für die Berechnung von PI bildet das Sichtbarkeitspolygon $P^v(P)$ (Abb. 4.1). Dieses ist definiert als die Menge aller Punkte, die von einem Punkt P aus „gesehen“ werden können. Die mittlere Sichtbarkeitsfläche A^v ergibt sich aus dem Durchschnitt der Flächen der Sichtbarkeitspolygone über alle Punkte P , die innerhalb des Polygons liegen. A^v wird für die Berechnung abgeschätzt, indem n zufällig gewählte Punkte untersucht werden. Als zuverlässiges Maß hat sich $n \geq 200$ erwiesen, da sich A^v für größere n kaum noch ändert. Für weitere Berechnungen von A^v wurde deshalb im Rahmen des Projektes $n = 200$ festgelegt. PI ist der Anteil der Sichtbarkeitsfläche an der Gesamtfläche A und wird mit

$$PI = \frac{A^v}{A} \quad (4.1)$$

berechnet.

Wenn der Durchgängigkeitsindex PI nicht nur für Einzelflächen berechnet werden soll, sondern auf Landschaftsebene angewandt wird, dann geschieht dies in Form der Effektiven Maschenfläche $MESH_{PI}$. Dafür wurde die Gleichung der Effektiven Maschenweite durch PI wie folgt modifiziert:

$$MESH_{PI} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (PI_i A_i)^2 \quad (4.2)$$

Wird PI entsprechend Gleichung 4.1 in Gleichung 4.2 ersetzt, folgt daraus:

$$MESH_{PI} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (A_i^v)^2 \quad (4.3)$$

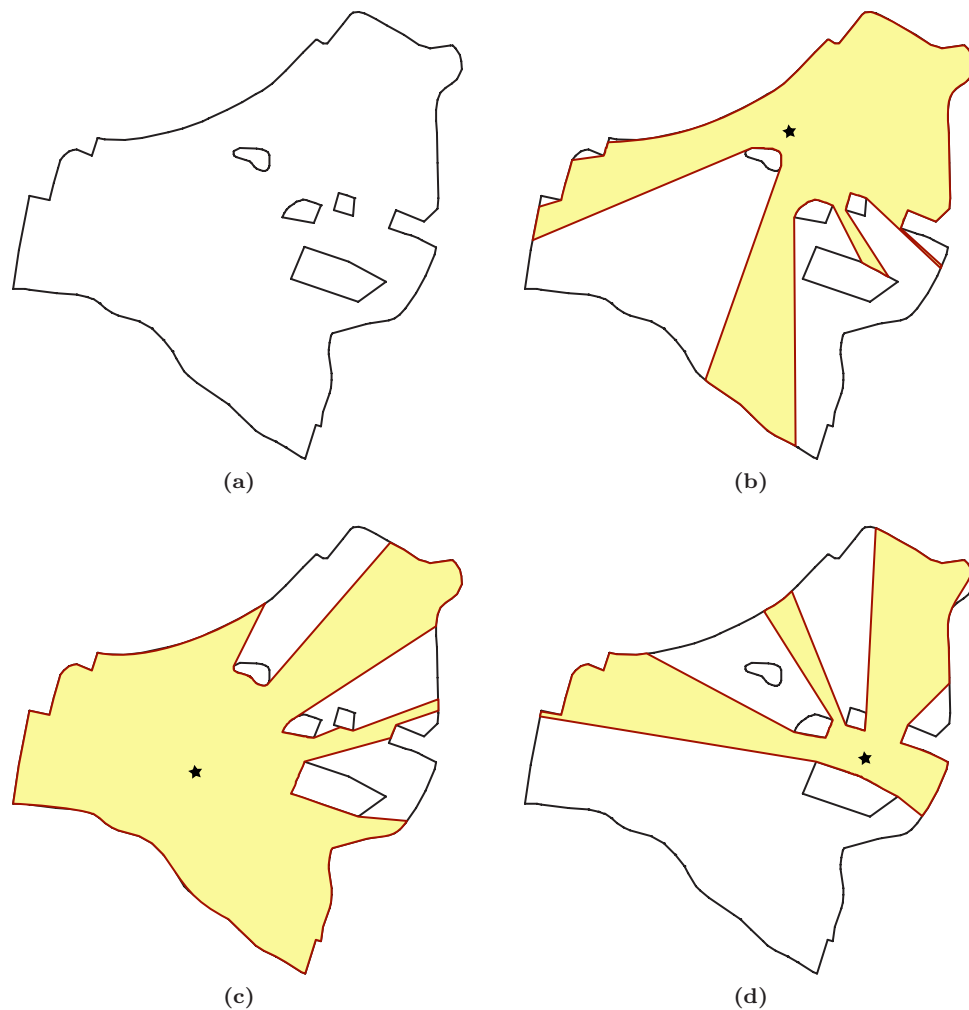


Abbildung 4.1: Beispielfläche (a) mit Sichtbarkeitspolygonen zu verschiedenen Punkten P (durch * dargestellt) (b-d)

4.2. Ergebnisse der Waldzerschneidungsanalyse basierend auf DLM- und Satellitendaten

Die Berechnung der Zerschneidungsmaße erfolgte auf Basis der Daten des Digitalen Landschaftsmodells (*DLM*) und der Satellitendaten (QuickBird, Landsat-ETM). Dabei wurde die Zerschneidung der Wälder für beide Untersuchungsgebiete anhand der Vektordaten der Objektart Wald des DLM (Wald-DLM) und der aus den Landsat-Daten klassifizierten Waldgebiete (Landsat-Wald) ermittelt. Für das Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz wurde außerdem der Zerschneidungsgrad der Wälder aus QuickBird-Daten erhoben (QuickBird-Wald). Eine weitere Zerschneidungsanalyse beider Gebiete wurde für die Objektarten Wald, Heide, Grünland, Sumpf, nasser Boden und Gehölz durchgeführt, die zu einer konformen Landnutzungsklasse zusammengefasst wurden (LaNuKla-DLM). Die Zusammenstellung dieser Landnutzungsklassen erfolgte vordergründig nach dem Kriterium, dass diese Flächen keiner intensiven Landnutzung

unterliegen und damit einen vergleichbaren „Natürlichkeitsgrad“ haben.

Neben der rein quantitativen Zerschneidungsbewertung ist durch die patchbezogene Berechnung des Durchgängigkeitsindex PI ebenso eine Visualisierung der Zerschneidung möglich. Dadurch können einerseits die konkreten Werte der „Durchgängigkeit“ farblich skaliert und in Form der Zahlenwerte den entsprechenden Einzelflächen zugewiesen werden und andererseits vermitteln diese Karten einen Überblick über die entsprechenden Untersuchungsgebiete und die Verteilung der Waldflächen, die Größe einzelner Waldgebiete und Formmaße. Im Weiteren ist auch die durch den Index PI dargestellte Beeinflussung von Hindernissen und Trennelementen innerhalb der Waldflächen grafisch abzulesen. PI ist von 0 %, was einer minimalen Sichtbarkeitsfläche bzw. Durchgängigkeit von null entspricht und in roten Farbtönen dargestellt wird, bis 100 %, was einer maximalen Sichtbarkeit bzw. Durchgängigkeit entspricht und in blauen Farbtönen dargestellt wird, skaliert.

4.2.1. Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

Die Ergebnisse der Zerschneidungsanalyse für das Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Der Wert der Gesamtfläche repräsentiert die Flächengröße des Waldes bzw. der konformen Landnutzungsklasse (LaNuKla). Daraus geht hervor, dass 84 % der Fläche des Untersuchungsgebietes von Wald bedeckt sind. Die verschiedenen Eingangsdaten führen zu sehr ähnlichen Angaben der Waldflächen, die zwischen 512 km^2 und 515 km^2 liegen. Deutliche Abweichungen zeigen die Ergebnisse der Flächenangabe des größten Patches. Während das größte Patch im DLM mit einer Fläche von 104 km^2 ungefähr 20 % der Gesamtwaldfläche einnimmt, umfasst das größte Waldgebiet innerhalb der Satellitendaten eine Fläche von 486 km^2 (Landsat) bzw. 482 km^2 (QuickBird) und somit 94 % der Gesamtwaldfläche. Diese Angaben entsprechen nicht der Realität, sondern sind einer nicht „durchgängigen Zerschneidungsgeometrie“ zuzuschreiben, so dass im Wesentlichen nur eine große, zusammenhängende Waldfläche ausgewiesen wurde, die sich fast vollständig über die gesamte Fläche des Untersuchungsgebietes erstreckt (Abb. 4.3 und 4.4). Auch durch die Differenz zwischen effektiver Maschenfläche und Maschenweite, die bei den Landsat-Daten 450 km^2 und den QuickBird-Daten 437 km^2 beträgt, wird diese Diskrepanz deutlich widerspiegelt. Ein intuitiv verständliches Ergebnis repräsentiert die effektive Maschenfläche von $4,82 \text{ km}^2$ für den Wald des DLM. Diese Angabe wird zudem durch einen visuellen Vergleich mit der Kartendarstellung bestätigt (Abb. 4.2).

	Wald (DLM)	Wald (Landsat)	Wald (QuickBird)	LaNuKla (DLM)
Gesamtfläche (km^2)	513,82	515,08	511,57	547,27
Fläche größtes Patch (km^2)	104,08	485,73	482,18	108,10
Effektive Maschenweite (km^2)	38,33	458,99	454,78	38,83
Effektive Maschenfläche (km^2)	4,82	8,71	18,22	13,62
Anzahl Patches	334	202	376	481

Tabelle 4.1: Zerschneidungsmaße für das Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

Spätestens die grafischen Darstellung der Ergebnisse der Waldzerschneidung mittels QuickBird-Daten wirft die Frage auf, warum diese hochauflösenden Satellitendaten weniger strukturiert

als die Landsat-Daten erscheinen (Abb. 4.4 und 4.3). Aufgrund der hohen Auflösung der Daten war eine Berechnung der Zerschneidungsmaße für die originale QuickBird-Szene in Abwägung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses rechentechnisch nicht umsetzbar. Dies ist erst durch eine Vereinfachung der Vektoren gelungen, was allerdings einer nicht adäquaten Wiedergabe der Geometrien entspricht. Folglich konnte damit das Potential der QuickBird-Daten nicht voll ausgeschöpft werden.

Die Bewertung der Ergebnisse für die LaNuKla nach DLM unterscheidet sich von denen des Waldes nach DLM durch eine um 33 km^2 größere Gesamtfläche, die durch die fünf weiteren Objektarten zur Waldfläche hinzugekommen sind. Infolge der Flächenzusammenlegung zu einer konformen Landnutzungsklasse sind für die Berechnungen des Durchgängigkeitsindex einheitlichere Eingangsdaten entstanden, da die Anzahl von Inselepolygonen, Hindernissen bzw. Trennelementen innerhalb einzelner LaNuKla-Flächen reduziert wurde. Demzufolge ist die effektive Maschenfläche auf $13,62 \text{ km}^2$ angestiegen.

4.2.2. Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Brandenburg

Die für das Untersuchungsgebiet Brandenburg ermittelten Ergebnisse der Zerschneidungsanalyse sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Die Gesamtwaldfläche verdeutlicht die um 150 km^2 geringere Waldfläche des brandenburgischen Untersuchungsgebietes, was mit einem Waldanteil von 59 % einer Waldfläche von 363 km^2 entspricht. Sowohl anhand der Fläche des größten Patches des Waldes nach DLM als auch der Kartendarstellung (Abb. 4.6) ist eine gleichmäßigere Flächengrößenverteilung im Vergleich zu Rheinland-Pfalz zu erkennen. Der Zerschneidungsgrad des Waldes nach DLM wird mit einer effektiven Maschenfläche von $2,12 \text{ km}^2$ angegeben. Damit ist der Wald fragmentierter als im Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz. Diese Aussage lässt sich ebenfalls mittels der Abbildungen 4.6 und 4.2 nachvollziehen. Die auf Basis der Landsat-Daten berechneten Werte zeigen denen der Satellitendaten im anderen Untersuchungsgebiet tendenziell ähnliche, nicht der Realität entsprechende Zerschneidungswerte, die durch eine nicht ausreichend erfasste Zerschneidungsgeometrie zu Stande gekommen sind. Daraus geht ein extrem großes Patch mit einer Flächengröße von 254 km^2 hervor, welches zwei Drittel des Gebietes abdeckt. Somit sind die in der vorliegenden Form als Eingangsdaten verwendeten Satellitendaten für eine Waldzerschneidungsanalyse nicht geeignet. Im Gegensatz dazu liefern die Ergebnisse der LaNuKla-Auswertungen anschauliche Zerschneidungswerte. Auch mit diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die LaNuKla-Fläche mit einer effektiven Maschenfläche von $3,56 \text{ km}^2$ fragmentierter als die des Untersuchungsgebietes Rheinland-Pfalz sind.

	Wald (DLM)	Wald (Landsat)	LaNuKla (DLM)
Gesamtfläche (km^2)	363,21	361,28	415,46
Fläche größtes Patch (km^2)	28,85	254,43	38,84
Effektive Maschenweite (km^2)	12,69	198,15	14,92
Effektive Maschenfläche (km^2)	2,12	0,59	3,56
Anzahl Patches	523	479	554

Tabelle 4.2: Zerschneidungsmaße für das Untersuchungsgebiet Brandenburg

4.3. Verwendung von terrestrischen Stichprobendaten zur Waldzerschneidungsanalyse

Von den durch die Bundeswaldinventur ermittelten Inventurmerkmalen ist lediglich die Waldrandlänge bzw. Waldrandlänge je Waldfläche als Kenngröße der Fragmentierung von Bedeutung. Damit verbunden ist die grundsätzliche Aussage, dass große Waldrandlängen auf fragmentierte Waldflächen rückschließen lassen und umgekehrt. Die Herleitung von Flächenverteilungen oder konkreten Flächengrößen einzelner Waldgebiete aus Stichprobeneinheiten, die für zahlreiche Zerschneidungsmaße als Berechnungsgrundlage erforderlich sind, kann durch die BWI nicht realisiert werden (DAHM (2001)). Eine zusätzliche Unsicherheit im Vergleich zur Verwendung flächendeckender Daten geht vom Stichprobenfehler der BWI-Daten aus. Aufgrund des steigenden Stichprobenfehlers bei kleinräumigen Untersuchungen sind Auswertungen nur bis auf Bundeslandebene statistisch abgesichert, was eine detaillierte Fragmentierungsanalyse einschränken würde. Wie die Beobachtungen zur Veränderung der Bodennutzung zeigen (siehe Kapitel 2.3.2), vollzieht sich der Prozess der Landnutzungsänderung und Flächeninanspruchnahme in kurzen Zeiträumen. Jedoch erlauben die Inventurintervalle der Bundeswaldinventur keine zeitnahe Darstellung von Waldveränderungen. Eine aktuelle Erhebung der Waldzerschneidung durch die BWI ist nur unzureichend gegeben. Ein temporärer Vergleich der Waldrandlängen setzt im Weiteren identische Aufnahmeverfahren voraus.

Die mit den Stichproben der *BWI* erhobenen Daten stellen einen Überblick über die Verteilung von Waldrändern nach Waldaußen-, Waldinnen- und Bestandesrand dar (SCHMITZ ET AL. (2004), SCHMITZ ET AL. (2005)). Die Kombinationen von Waldrändern und weiteren Merkmalen, wie Waldfläche, Waldrandexposition und vorgelagertem Terrain liefern Informationen zur Abschätzung der Waldfragmentierung und auch zur Bewertung des Ökosystems Wald. Jedoch können diese BWI-Ergebnisse nicht denen der Landschaftsindikatoren gleichgesetzt werden, da die Indikatoren bei der Bewertung der strukturellen Diversität Anzahl, Größe und Form einzelner Waldflächen berücksichtigen. Anzahl, Größe und Form einzelner Waldflächen werden allerdings durch die Aufnahmen der *BWI* nicht erfasst. Somit sind die terrestrischen Stichprobendaten der *BWI* im Vergleich zu digitalen Geodaten als Datengrundlage zur Untersuchung der Fragmentierung von Wäldern nicht geeignet.

Wald (DLM) - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

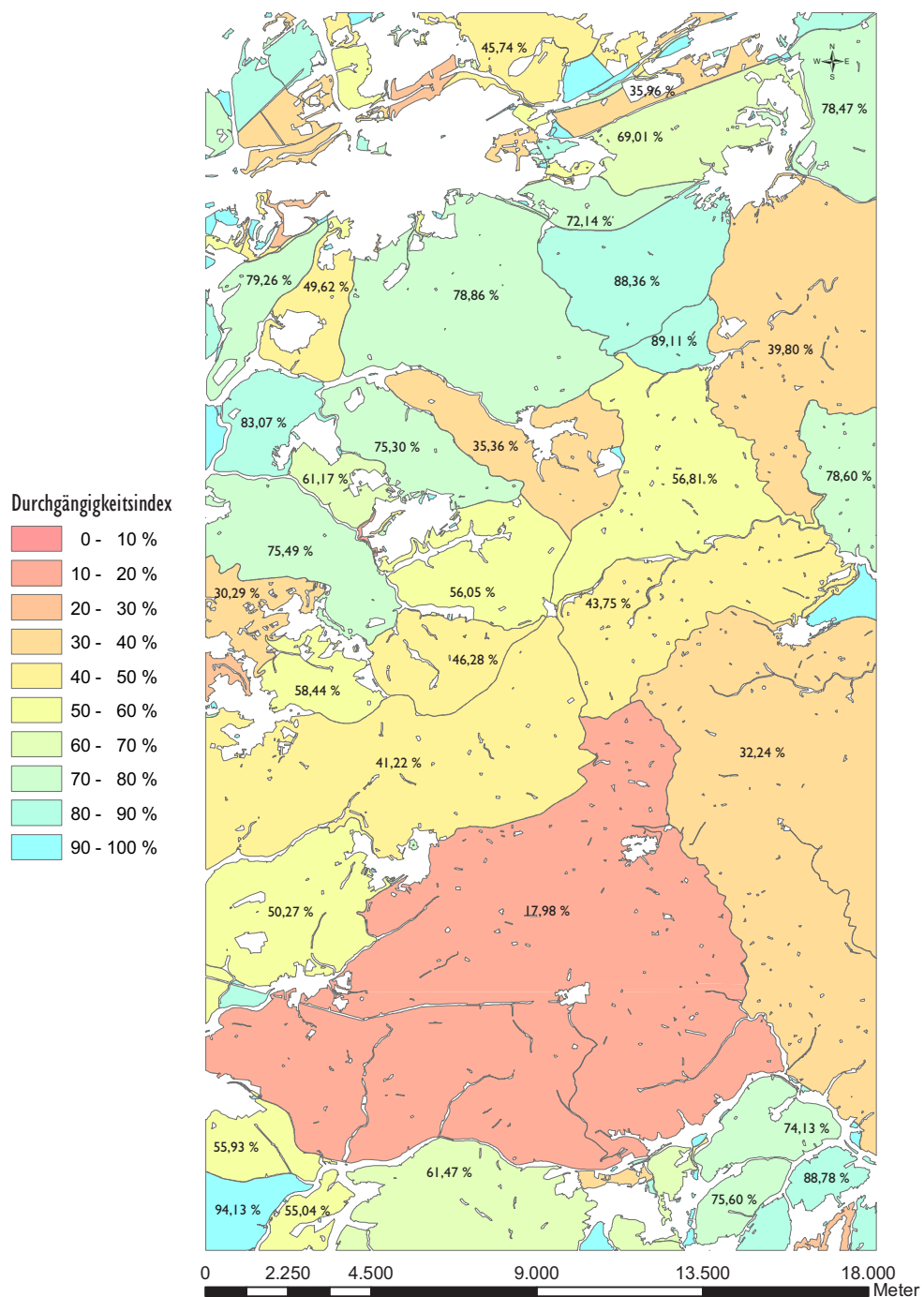


Abbildung 4.2: Durchgängigkeitsindex für Wald nach DLM - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

Wald (Landsat) - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

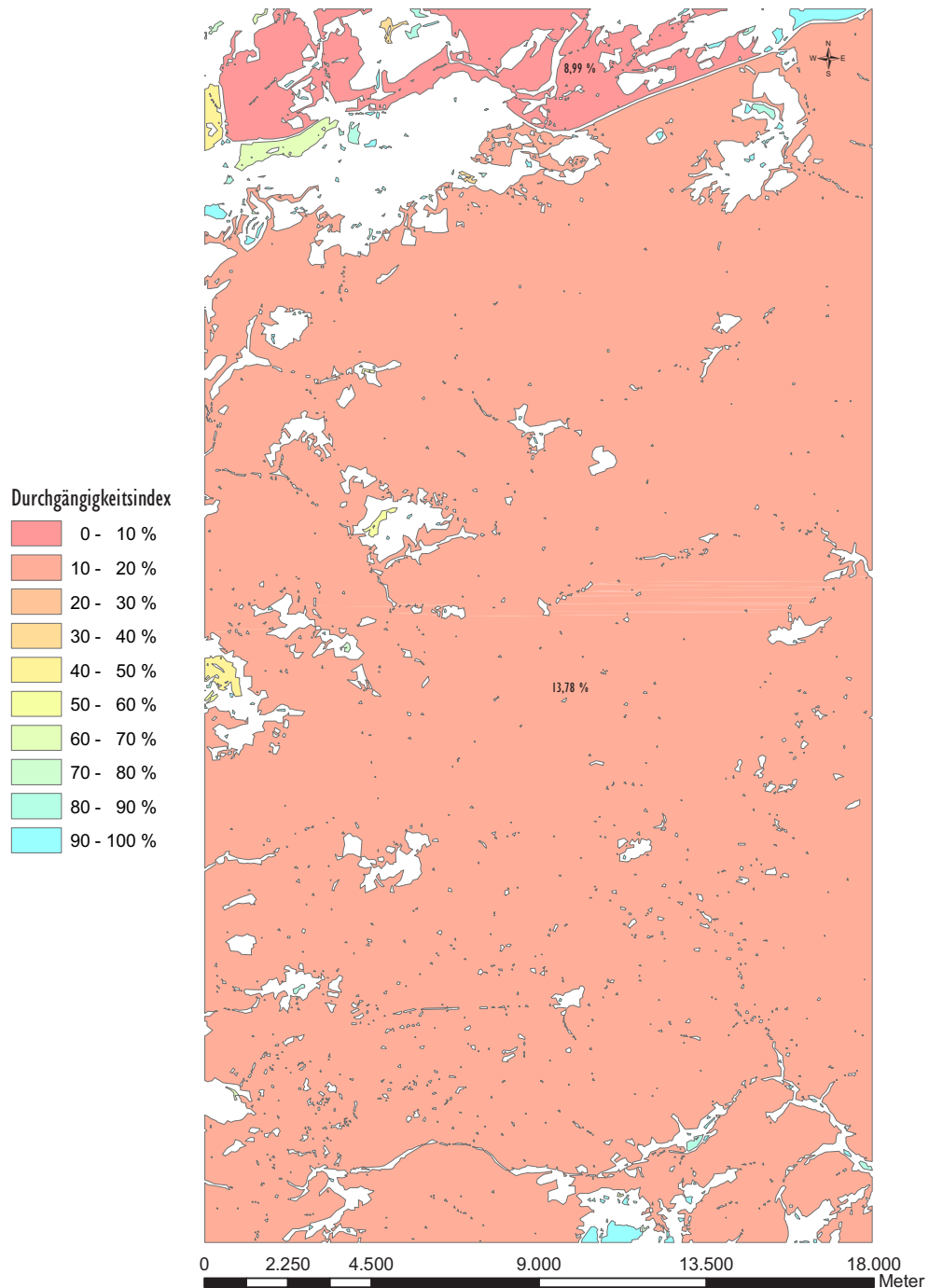


Abbildung 4.3: Durchgängigkeitsindex für Wald nach Landsat-Daten - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

Wald (Quickbird) - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

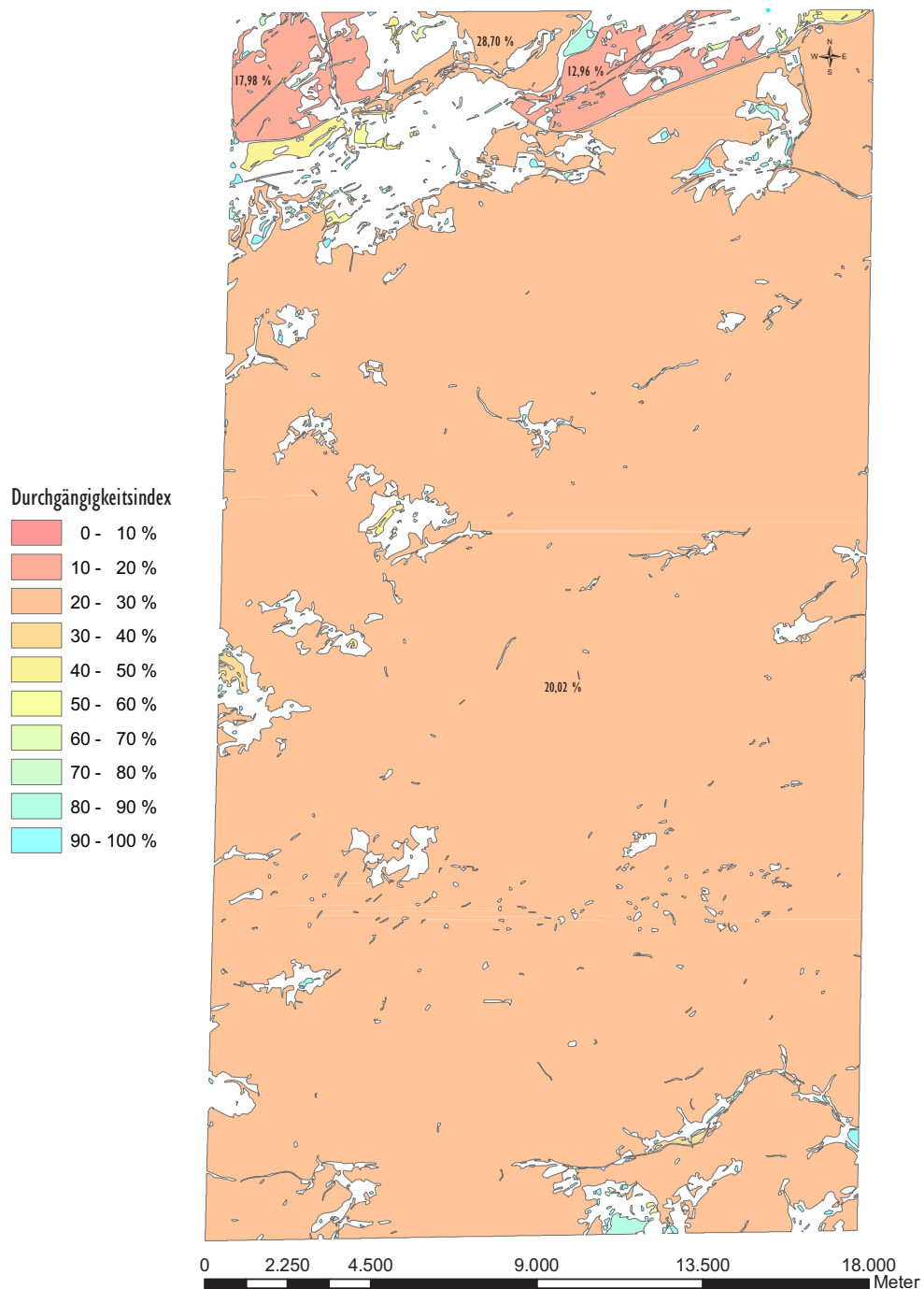


Abbildung 4.4: Durchgängigkeitsindex für Wald nach QuickBird-Daten - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

LaNuKla (DLM) - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

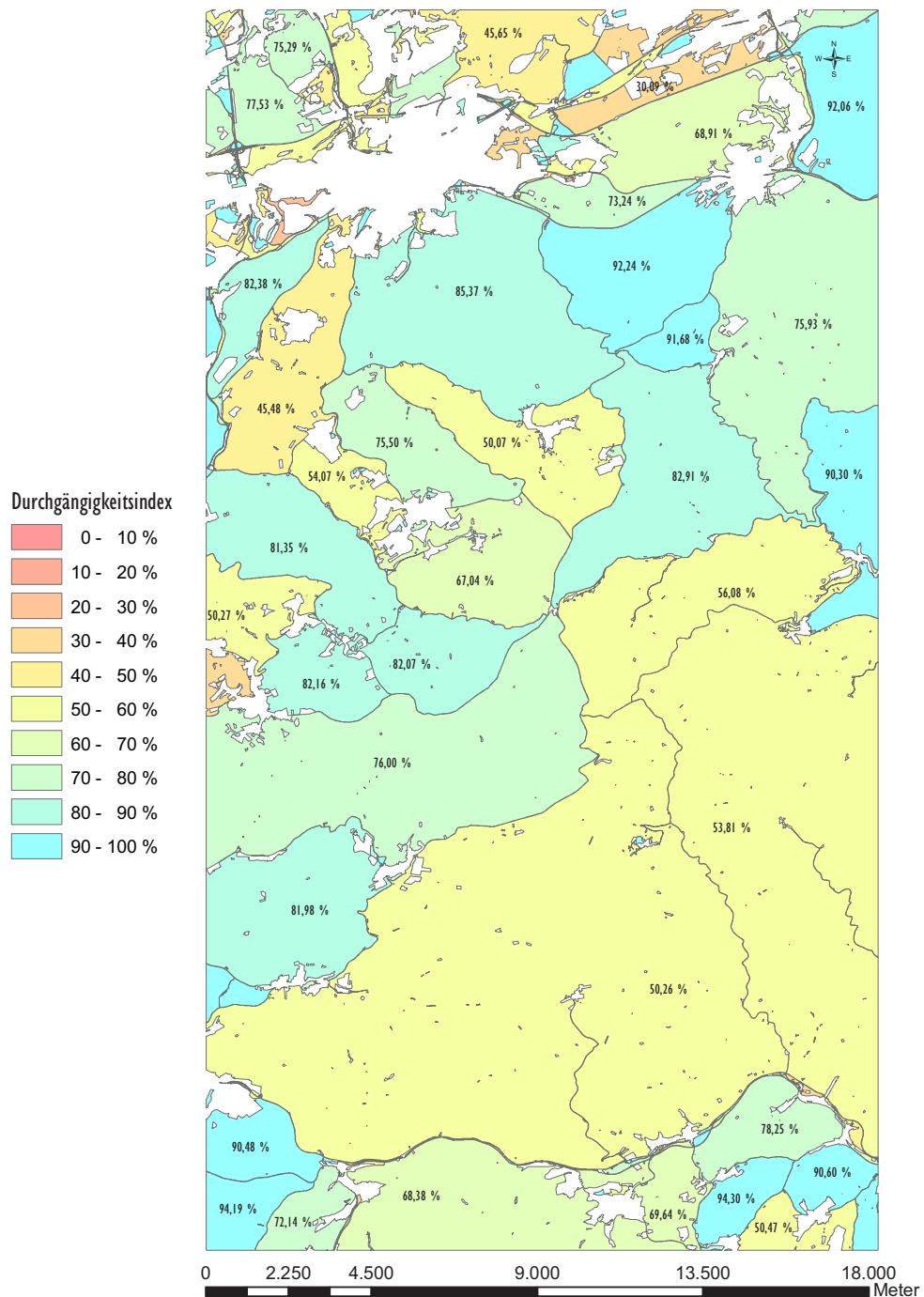


Abbildung 4.5: Durchgängigkeitsindex für LaNuKla nach DLM - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz

Wald (DLM) - Untersuchungsgebiet Brandenburg

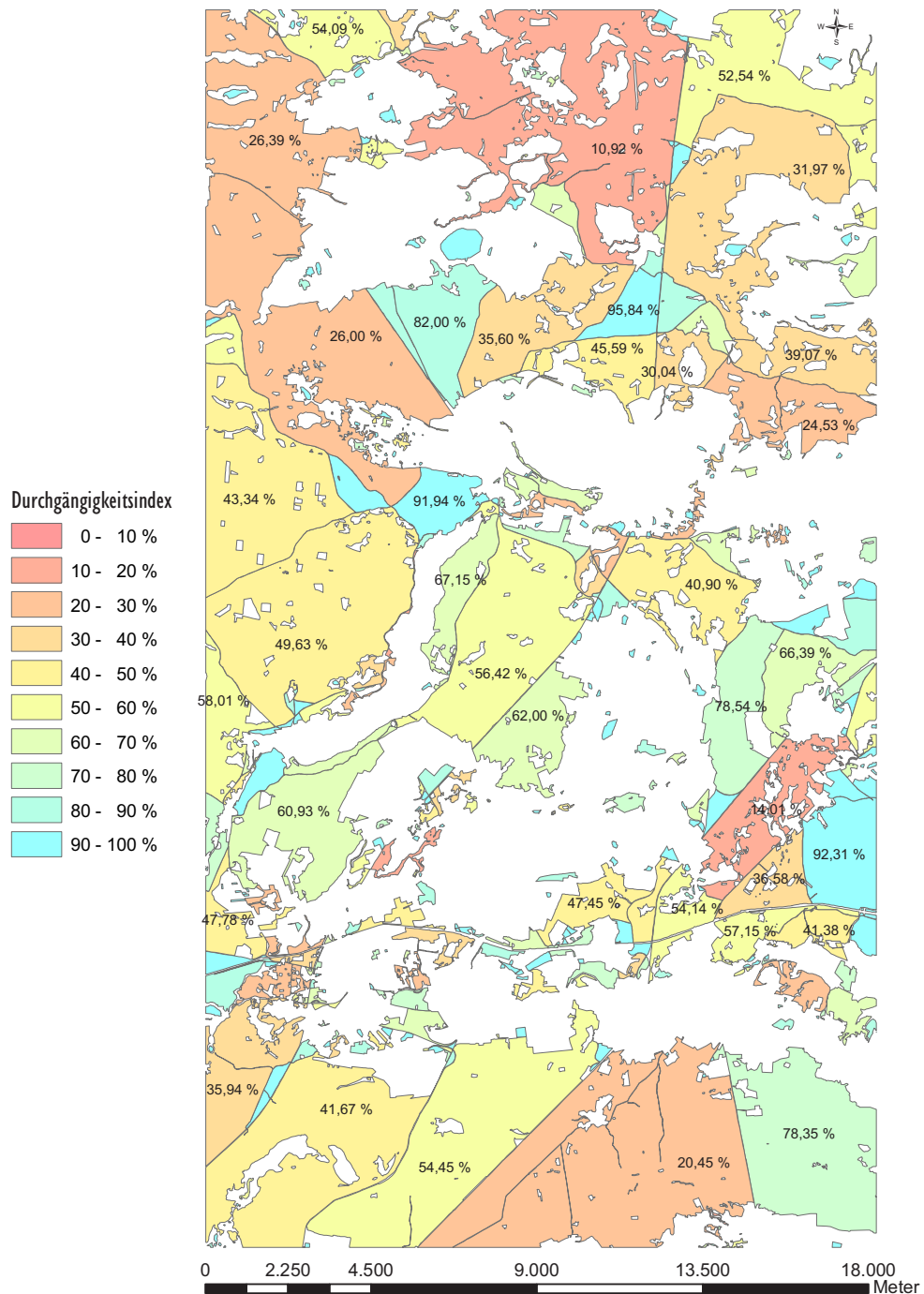


Abbildung 4.6: Durchgängigkeitsindex für Wald nach DLM - Untersuchungsgebiet Brandenburg

Wald (Landsat) - Untersuchungsgebiet Brandenburg

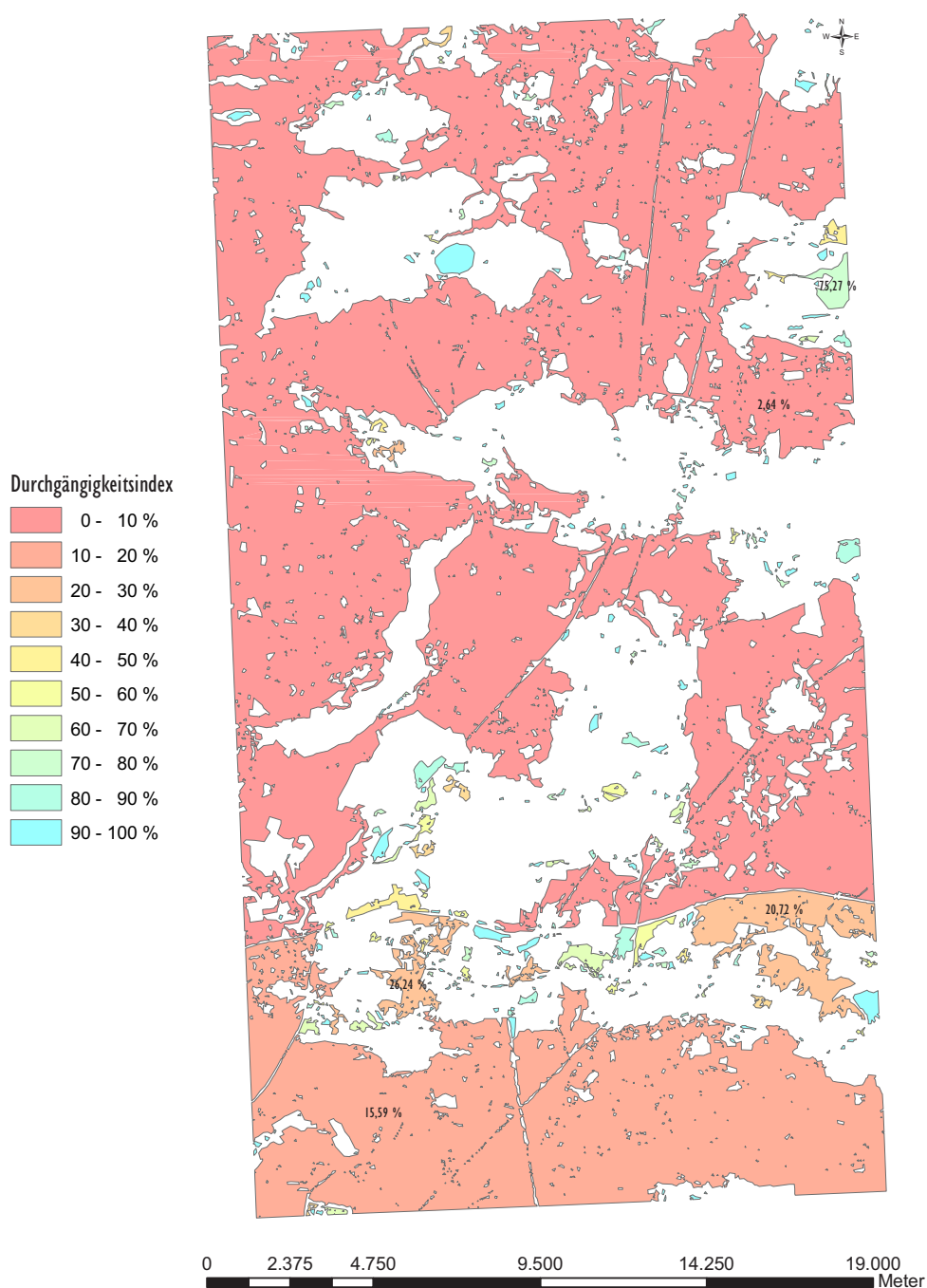


Abbildung 4.7: Durchgängigkeitsindex für Wald nach Landsat-Daten - Untersuchungsgebiet Brandenburg

LaNuKla (DLM) - Untersuchungsgebiet Brandenburg

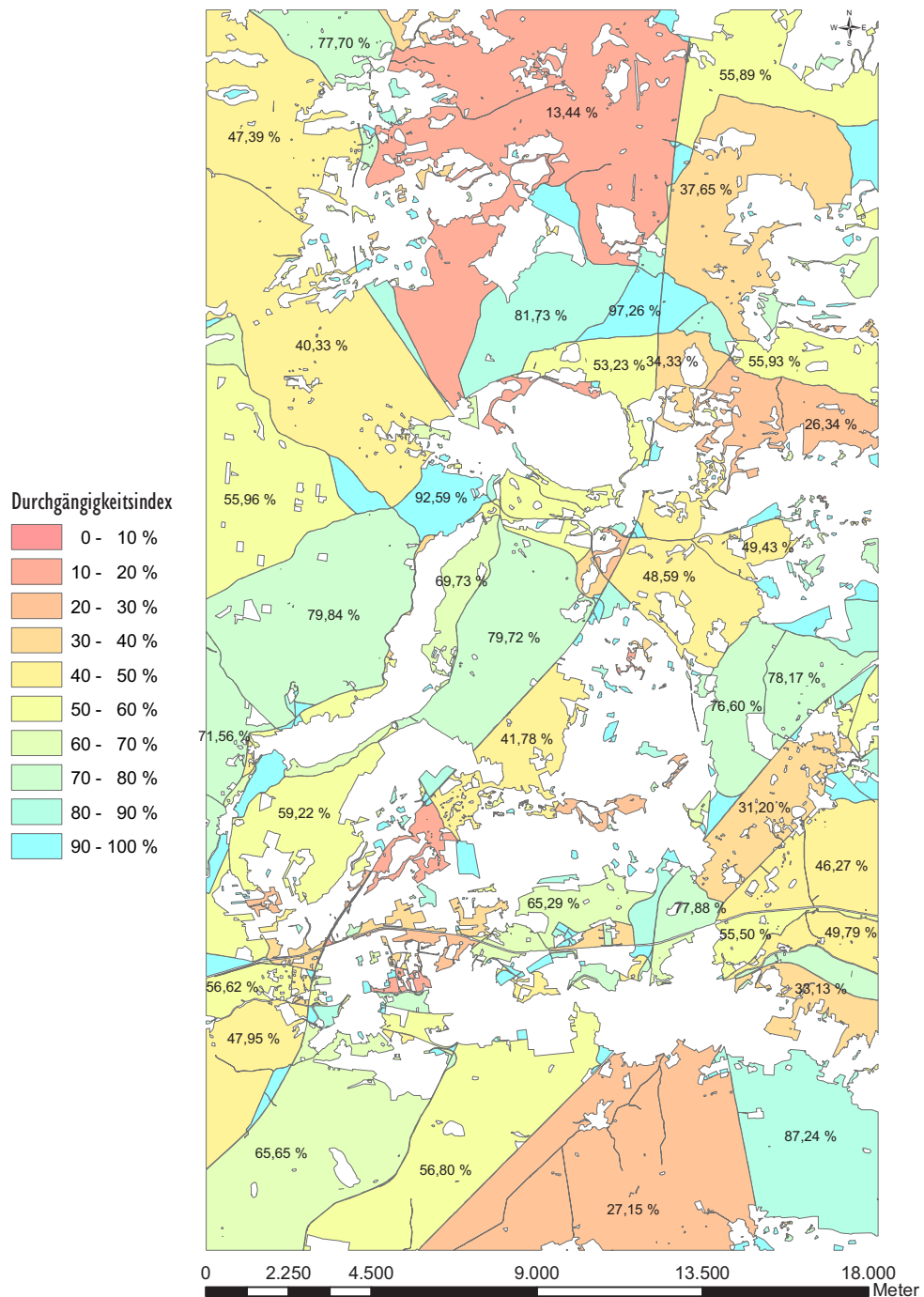


Abbildung 4.8: Durchgängigkeitsindex für LaNuKla nach DLM - Untersuchungsgebiet Brandenburg

5. Diskussion

5.1. Diskussion der Ergebnisse

Aus der Untersuchung der verschiedenen Zerschneidungsmaße ist die Effektive Maschenfläche $MESH_{PI}$ als ein wirkungsvoller Index zur Quantifizierung von Wäldern hervorgegangen. Sein Vorteil gegenüber anderen Landschaftsindikatoren ist die gleichzeitige Berücksichtigung von Fläche und Form der Patches als auch Hindernissen innerhalb von Flächen. Dies ermöglicht dem Index $MESH_{PI}$ die Landschaftszerschneidung mit ihrer großen Vielfalt an Erscheinungsformen wirklichkeitstreu zu erfassen und quantitativ darzustellen.

Bei der Ermittlung der effektiven Maschenfläche hat sich herausgestellt, dass bei geometrisch besonders komplexen Patches die Berechnung der mittleren Sichtbarkeitsfläche A^v mit 200 zufällig gewählten Punkten nicht ausreicht (Kapitel 4.1), um die tatsächliche Sichtbarkeitsfläche abzubilden. Ein Lösungsansatz hierfür ist die Verwendung einer höheren Punktzahl, die jedoch gleichzeitig mit einer erhöhten Rechenzeit verbunden ist. Mit einem optimierten Berechnungsalgorithmus wäre eine Reduzierung der Rechenzeit möglich, welcher zudem die Berechnungen des Durchgängigkeitsindex PI basierend auf hochauflösenden Fernerkundungsdaten ermöglichen würde. Damit kann eine zeitnahe Evaluierung der Fragmentierung von Wäldern und Landschaften mittels QuickBird-Daten und auch Luftbildern durchgeführt werden.

Von den verwendeten Ausgangsdaten zur Berechnung der Fragmentierung haben sich die Daten des Digitalen Landschaftsmodells (DLM) als geeignetste Grundlage zur Ermittlung von Ergebnissen der Zerschneidungsmaße erwiesen. Neben statistischen Kenngrößen wurden die Ergebnisse der Waldfragmentierung auch grafisch in Form von Karten dargestellt. Sowohl für den Wald als auch den um fünf Objektarten „erweiterten Wald“ (LaNuKla) ist mit den Daten des DLM eine repräsentative Analyse der Waldfragmentierung erfolgt, die zu anschaulichen und intuitiv verständlichen Ergebnissen führte. Im Gegensatz dazu haben die Auswertungen der Waldzerschneidung mit den vorliegenden Satellitendaten keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert. Die Ursache dafür ist die Klassifizierung dieser Daten, die nicht die Detektierung von Zerschneidungsgeometrien, wie linienförmigen Objekten, sondern eine optimale Walderkennung als Zielstellung hatte (OEHMICHEN (2006)). Für die Untersuchungen hinsichtlich der Waldzerschneidung sind umfassendere Klassifizierungsschritte der Satellitendaten vorzunehmen, um nicht zusammenhängende Waldgebiete zuverlässig voneinander trennen zu können. Damit einher geht die Ausweisung von Objekten, die zerschneidend bzw. als Trennelemente wirken. Der Fokus dieser Aufgabe ist dabei auf die adäquate Abbildung der Zerschneidungsgeometrie gerichtet, beispielsweise auf die Erkennung von Straßennetzen. Dies ist insbesondere bei Straßen, die durch Waldgebiete führen und die demzufolge vom Kronendach der Bäume überdeckt sind, eine anspruchsvolle Zielstellung. Eine Umsetzung dieser auf die Fragmentierung

von Wäldern ausgerichteten Klassifizierungsansätze hat den Vorteil, dass außer den Fernerkundungsdaten kein zusätzliches Datenmaterial notwendig ist und ein hoher Aktualitätsgrad erreicht werden kann.

Die Klassifizierung der Fernerkundungsdaten in die zu untersuchenden Objektklassen ist Voraussetzung zur Anwendbarkeit von Landschaftsindikatoren, wobei Klassifizierungsfehler bei der Datenanalyse berücksichtigt werden müssen (KÖHL und OEHMICHEN (2003)). Bei der Bewertung der struktureller Diversität von Wäldern kann diese Fehlerquelle zu verzerrten Ergebnissen und Fehlinterpretationen hinsichtlich Veränderungen von Strukturparametern führen (TRAUB und KLEINN (1999)).

Weitere Möglichkeiten für eine bessere Trennung der Waldgebiete und der Zerschneidungsgeometrien bieten objektbasierte Klassifizierungsmethoden (SAGISCHEWSKI ET AL. (2003), MEINEL und NEUBERT (2004), TRÖLTZSCH (2004)). Aber auch Stichprobenverfahren basierend auf Fernerkundungsdaten sind eine denkbare Alternative, wie beispielsweise das Area Frame Sampling (GALLEGO (1995), RICHARDS ET AL. (2000), AVIKAINEN und DELINCÉ (2003), IOST (2006), RIEDEL (2006)). Diese verschiedenen Ansätze würden die Einbindung von aktuellem Satellitendatenmaterial in die Zerschneidungsanalyse von Wäldern ermöglichen.

Terrestrische Stichprobenverfahren, wie die Bundeswaldinventur, sind zur Bewertung der Fragmentierung nur unzureichend geeignet, da sich durch die Aufnahmen der BWI keine Informationen zu Anzahl, Größe und Form einzelner Waldflächen herleiten lassen (DAHM (2001)).

5.2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit der Effektiven Maschenfläche $MESH_{PI}$ steht ein Parameter mit hohem Potential zur Analyse der Fragmentierung von Wäldern und Landschaften zur Verfügung. Die Berechnung dieses Zerschneidungsmaßes wurde für verschiedene Datenquellen durchgeführt, aus denen das digitale Landschaftsmodell als favorisierte Datengrundlage hervorgegangen ist. Die DLM-Daten, die eine objektartenspezifische Zusammenstellung der Eingangsdaten zur Berechnung der Landschaftsindikatoren ermöglichen, werden für das gesamte Bundesgebiet vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie bereitgestellt. Somit kann eine deutschlandweite Waldfragmentierungsanalyse anhand einheitlicher Daten durchgeführt werden.

Durch die Analyse der Zerschneidung von Wäldern werden Kenngrößen bereitgestellt, die als Beiträge zur Erfüllung nationaler und internationaler Verträge, Programme und Initiativen (z. B. Nachhaltigkeitsstrategie des Bundes (BUNDESREGIERUNG (2002), BUNDESREGIERUNG (2004), BUNDESREGIERUNG (2005)), Ministerkonferenz zum Schutz der Wälder in Europa (MCPFE, LIAISON UNIT VIENNA (2003)), Übereinkommen über die biologische Vielfalt (CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY (1992)), Monitoring von Landnutzungsveränderungen, Naturschutz (Natura 2000, FFH-Richtlinien)) verwendet werden und Instrumentarien für die Gestaltung und Durchführung der Nachhaltigkeits-, Forst- und Umweltpolitik sind. Durch die Integration der Landschaftszerschneidungsmaße in ein Set von Schlüsselindikatoren kann der fortschreitenden Fragmentierung entgegengewirkt werden, denn dadurch sind Möglichkeiten zum Monitoring und der Erfolgskontrolle gegeben.

Die vorgestellten Verfahren zur Erhebung des Zerschneidungsgrades erlauben eine Bewertung des Waldes in vielfältiger Hinsicht. Mit Hilfe dieser Werte werden Regionen identifiziert, die besonders von der Waldzerschneidung betroffen sind, und infolge dessen können entsprechende Maßnahmen zur Einschränkung der Fragmentierung festgelegt werden. In Bezug auf die fortschreitende Flächeninanspruchnahme durch Verkehrs- und Siedlungsflächen sind die Informationen zur Verteilung von Waldflächen unabdingbar, um eine akzeptable Raum- und Landnutzungsplanung durchzuführen. Standardisierte Erfassungs- und Bewertungskriterien, die mit Schwellenwerten für eine maximal verträgliche Zerschnittenheit von Landschaften hinterlegt sind und entsprechende Trennelemente und Zerschneidungswirkungen berücksichtigen, würden den Schutz unzerschnittener Räume wesentlich verbessern (JAEGER (2002), GRAU (2006)).

Die strukturelle Diversität kann durch Landschaftsindikatoren auch über die Grenzen des Waldes hinweg erfasst werden, woraus sich Aussagen zum Zustand und der Qualität von Landschaften als Lebensraum für Flora und Fauna ableiten lassen. Die Auswirkungen der Zerschneidung beeinflussen Habitate beispielsweise durch Verkleinerungen und Verlust von Lebensräumen und Kernbereichen, Verinselungseffekte und Änderung von Randeffekten (ROTH ET AL. (2006), KENTER (2006)). Die Effektive Maschenfläche $MESH_{PI}$ ermöglicht diese Habitatveränderungen im Kontext zu Landschaftsveränderungen zu erfassen und leistet damit einen Beitrag zur Habitatmodellierung.

Literaturverzeichnis

- ACHTZIGER, R., STICKROTH, H. und ZIESCHANK, R. (2003): F+E-Projekt „Nachhaltigkeitsindikator für den Naturschutzbereich“. *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt* **Sonderheft 1**: 138 – 142.
- AKADEMIE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE (1984): *Begriffe aus Ökologie, Umweltschutz und Landnutzung*. 3. auflage, 1994 Auflage. Laufen / Salzach.
- AVIKAINEN, J. und DELINCÉ, J. (2003): *LUCAS—Land Use/Cover Area Frame Statistical Survey, Technical Document Number 1 „Sampling Plan“*. Eurostat.
- BASKENT, E. Z. und JORDAN, G. A. (1995): Characterising spatial structure of forest landscapes. *Canadian Journal of Forest Research* **25**: 1830–1849.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2003): Nationales Waldprogramm Deutschland, 2. Phase, Vom Nationalen Forstprogramm zum Nationalen Waldprogramm. *Technischer Bericht*, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL). URL: <http://www.nwp-online.de> (Stand: Januar 2006).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2004): Nationales Waldprogramm - Ein gesellschaftspolitischer Dialog zur Förderung nachhaltiger Waldbewirtschaftung. URL: <http://www.nwp-online.de> (Stand: Januar 2006).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (HRSG.) (2001): Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II (2001 - 2002), 2. korrigierte, überarbeitete Auflage, Mai 2001.
- BUNDESREGIERUNG (2002): Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, Nachhaltigkeitsstrategie 2002. *Technischer Bericht*, Rat für nachhaltige Entwicklung. URL: <http://www.nachhaltigkeitsrat.de> (Stand: Januar 2006).
- BUNDESREGIERUNG (2004): Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, Fortschrittsbericht 2004. *Technischer Bericht*, Rat für nachhaltige Entwicklung. URL: <http://www.nachhaltigkeitsrat.de> (Stand: Januar 2006).
- BUNDESREGIERUNG (2005): Wegweiser Nachhaltigkeit 2005 - Bilanz und Perspektiven, Kabinettsbeschluss vom 10. August 2005. *Technischer Bericht*, Rat für nachhaltige Entwicklung.
- CAIN, D. H., RIITTERS, K. H. und ORVIS, K. (1997): A multi-scale analysis of landscape statistics. *Landscape Ecology* **12**: 199 – 212.

- CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY (1992): Convention on Biological Diversity. United Nations Environment Programme. URL: <http://www.biodiv.org> (Stand: Mai 2006).
- DAHM, S. (2001): Untersuchung über Waldrandlängen auf der Grundlage von Daten der ersten Bundeswaldinventur. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung, Eberswalde (nicht veröffentlicht).
- DALE, H. V., OFFERMAN, H., FROHN, R. und GARNER, R. (1995): Landscape characterization and biodiversity research. In BOYLE, T. J. B. und BOONTAWE, B. (Herausgeber), *Measuring and monitoring biodiversity in tropical and temperate forests*, IUFRO, S. 47 – 65.
- ESSWEIN, H. und SCHWARZ-V. RAUMER, H. G. (2004): Darstellung und Analyse der Landschaftszerschneidung in Bayern - Endbericht. *Technischer Bericht*, Institut für Landschaftsplanung und Ökologie, Universität Stuttgart.
- FORMAN, R. T. T. (1995): *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press.
- FRANKLIN, S. E., DICKSON, E. E., FARR, D. R., HANSEN, M. J. und MOSKAL, L. M. (2000): Quantification of landscape change from satellite remote sensing. *The Forestry Chronicle* **76**(6): 877 – 886.
- FRANKLIN, S. E., HANSEN, M. J. und STENHOUSE, G. B. (2002): Quantifying landscape structure with vegetation inventory maps and remote sensing. *The Forestry Chronicle* **78**(6): 866 – 875.
- FRITZ, G. (1984): Erhebung und Darstellung unzerschnittener, relativ großflächiger Wälder in der Bundesrepublik Deutschland. *Natur und Landschaft* **59**(7/8): 284 – 286.
- FULLER, D. O. (2001): Forest fragmentation in Loudoun County, Virginia, USA evaluated with multitemporal Landsat imagery. *Landscape Ecology* **16**: 627 – 642.
- GALLEGO, F. J. (1995): Sampling Frames of Square Segments. *Report EUR 16317*, Institute for Remote Sensing Applications, Joint Research Centre, 21020 Ispra (Varese) Italy. Office for Publications of the European Community, Luxembourg.
- GILES, R. H. und TRANI, M. K. (1999): Key elements of landscape pattern measures. *Environmental Management* **123**: 477 – 481.
- GRAU, S. (1998): Überblick über Arbeiten zur Landschaftszerschneidung sowie zu unzerschnittenen Räumen in der Bundes-, Landes- und Regionalplanung Deutschlands. *Natur und Landschaft* **73**(10): 427 – 434.
- GRAU, S. (2006): *Freiraum und Naturschutz. Die Wirkungen von Störungen und Zerschneidungen in der Landschaft*, Springer Verlag, Berlin, Tokio, New York., Kapitel 6 - Großflächige Analysen unzerschnittener Räume in Deutschland. S. 103 – 110.
- HAILA, Y. (1994): Preserving ecological diversity in boreal forests: ecological background, research and management. *Annales Zoologici Fennici* **31**: 203 – 217.

- HAINES-YOUNG, R. und 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.
- IÖST, A. (2006): *Untersuchung der Eignung logistischer Regressionsmodelle zur Klassifizierung von Fernerkundungsdaten und Kartierung verschiedener BWI-Zielgrößen*. Dissertation, Universität Hamburg (in Vorbereitung).
- IVITS, E. und KOCH, B. (2003): Optimierung der Erfassung der Biodiversität auf der Basis von Satelliten- und Luftbilder: ein Europäisches Landschaftskonzept. *IÖR-Schriften* (40).
- JAEGER, J. (1999): *Gefährdungsanalyse der anthropogenen Landschaftszerschneidung*. Dissertation, ETH Zürich, Department für Umweltnaturwissenschaften.
- JAEGER, J. (2000): Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology* **15**: 115 – 130.
- JAEGER, J. (2002): *Landschaftszerschneidung. Eine transdisziplinäre Studie gemäß dem Konzept der Umweltgefährdung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- JAEGER, J. (2003): *Handbuch Naturschutz und Landschaftspflege*, Ecomed-Verlag, Landsberg, Band 11. Ergänzungslieferung, Kapitel II-5.3 Landschaftszerschneidung.
- KENTER, B. (2006): *Multitemporal analysis of habitat suitability with different spatial information*. Dissertation, Universität Hamburg (in Vorbereitung).
- KÖHL, M. und OEHMICHEN, K. (2003): Zur Verwendung von Landschaftsmaßzahlen bei Wald- und Landschaftsinventuren. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **1**: 8 – 16.
- KÜSTER, H. (1991): Pflanzenreste aus einer Siedlung der ältesten Linienbandkeramik von Langenbach/Niederhummel. *Archäologie im Lkr. Freising* **2**: 77 – 80.
- LARSSON, T.-B. (Herausgeber) (2001): *Biodiversity Evaluation Tools for European forests, Ecological Bulletin*, Band 50. Blackwell Publications.
- LARSSON, T.-B., DIAS, S., PUUMALAINEN, J., RICHARD, D., TOMMERAS, B. A., WATT, A. und WOLFSLEHNER, B. (2001): Assessing forest biodiversity on a pan-European scale. *Technischer Bericht 7*, EU FAIR. URL: <http://www.algonet.se/bear/> (Stand: Mai 2006).
- LUNG, T. und SCHAAB, G. (2004): Change-detection in Western Kenya - The documentation of fragmentation and disturbance for Kakamega Forest and associated forest areas by means of remotely-sensed imagery. In *Proceedings of the ISPRS XXth Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey*, Band XXXV, Part B. URL: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/papers/174.pdf> (Stand: Dezember 2005).
- MCGARIGAL, K., CUSHMAN, S. A., NEEL, M. C. und ENE, E. (2002): FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program (Version 3.0). *Technischer Bericht*, University of Massachusetts, Amherst, USA. URL: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html> (Stand: Mai 2006).

- MCGARIGAL, K. und MARKS, B. J. (1995): Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. *Technischer Bericht*, U. S. Forest Service General Technical Report PNW: 351, Portland, OR, USA.
- MCPFE, LIAISON UNIT VIENNA (2003): Improved Pan-European Indicators for Sustainable Forest Management. *Technischer Bericht*, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe.
- MEINEL, G. und NEUBERT, M. (2004): A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. In *Proceedings XXth ISPRS Congress, Istanbul, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band XXXV-B4, S. 1097–1102. URL: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/506.pdf> (Stand: November 2005).
- MILLINGTON, A. C., VELEZ-LIENDO, X. M. und BRADLEY, A. V. (2003): Scale dependence in multitemporal mapping of forest fragmentation in Bolivia: implications for explaining temporal trends in landscape ecology and applications to biodiversity conservation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **27**(4): 289 – 299.
- OEHMICHEN, K. (2006): *Waldflächenkartierung durch ein kombiniertes Verfahren aus Satellitenfernerkundung und Bundeswaldinventur*. Dissertation, Universität Hamburg (in Vorbereitung).
- OEHMICHEN, K. und WILLKOMMEN, J. (2004): EstimateThreshold. Software (nicht veröffentlicht).
- O'NEILL, R. V., KRUMMEL, J. R., GARDNER, R. H., SUGIHARA, G., JACKSON, B. L., DEANGELIS, D. L., MILNE, B. T., TURNER, M. G., ZYGMUNT, B., CHRISTENSEN, S. W., DALE, V. H. und GRAHAM, R. L. (1988): Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology* **1**: 153 – 162.
- PROJEKTGRUPPE NACHHALTIGKEITSINDIKATOR (2003): Nachhaltigkeitsindikator für den Naturschutzbereich - Informationspapier zur Artenauswahl: Kriterien und Vorgehensweise. TU Freiberg. URL: http://www.ioez.tu-freiberg.de/arbeitsgruppen/ag_bio/NHI1.html (Stand: Januar 2006).
- READ, J. M. (2003): Spatial analyses of logging impacts in Amazonia using remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **69**(3): 275 – 282.
- RICHARDS, T., GALLEGO, J. und ACHARD, F. (2000): Sampling of forest cover change assessment at the pan-tropical scale. *International Journal of Remote Sensing* **21**(6-7): 1473–1490.
- RIEDEL, T. (2006): *Evaluierung alternativer Inventurdesigns für die Bundeswaldinventur*. Dissertation, Universität Hamburg (in Vorbereitung).
- RIITTERS, K. H., O'NEIL, R. V., HUNSAKER, C. T., WICKHAM, J. D., YANKEE, D. H., TIMMINS, S. P., JONES, K. B. und JACKSON, B. L. (1995): A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology* **10**: 23 – 29.

- RIPPLE, W. J., BRADSHAW, G. A. und SPIES, T. A. (1991): Measuring forest landscape patterns in the cascade range in Oregon, USA. *Biological Conservation* .
- ROTH, M., WATERSTRAAT, A. und KLENKE, R. (2006): *Freiraum und Naturschutz. Die Wirkungen von Störungen und Zerschneidungen in der Landschaft*, Springer Verlag. Berlin, Tokio, New York., Kapitel 7 - Zoologisch-ökologische Grundlagen - allgemeine Wirkungen von Zerschneidung und Störung. S. 143 – 150.
- SAGISCHEWSKI, H., KRÜGER, J., KOCH, B. und CHMARA, S. (2003): *Verfahrensentwicklung zur fernerkundungsbasierten Erstellung des Waldflächenverzeichnisses Thüringens, Abschlussbericht*, Band 22. Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei.
- SCHMITZ, F., POLLEY, H., HENNIG, P. und SCHWITZGEBEL, F. (2004): *Die zweite Bundeswaldinventur - BWI² - Das Wichtigste in Kürze*. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- SCHMITZ, F., POLLEY, H., HENNIG, P. und SCHWITZGEBEL, F. (2005): *Die zweite Bundeswaldinventur - BWI²*. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).
- SCHWARZ-VON RAUMER, H.-G. (2006): Indicating Landscape Fragmentation using Patency Index. *Technischer Bericht*, Institut für Landschaftsplanung und Ökologie, Stuttgart.
- STATISTISCHES BUNDESAMT, WIESBADEN (2005): *Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, Fachserie 3 Reihe 5.1 - 2004, Allgemeine und methodische Erläuterungen, Nutzungsartenkatalog und Länderergebnisse der Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung zum 31.12.2004*. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei.
- TISCHENDORF, L. (2001): Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology* (16): 235 – 254.
- TRAUB, B. und KLEINN, C. (1999): Zur Erfassung von Flächenfragmentierung und struktureller Diversität. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **Jahrgang 118**: 39–50.
- TRÖLTZSCH, K. (2004): *Nutzung der Software eCognition zur Erfassung von Waldstrukturparametern*. Master-Arbeit, TU Dresden, Institut für Kartographie.
- UUTTERA, J., FOLVING, S., KENNEDY, P. und PUUMALAINEN, J. (2003): *Monitoring forest landscape diversity at a European level: Case studies on forest types and fragmentation*. EUR 20740 EN, European Commission, Joint Research Centre.
- WADE, T. G., RIITERS, K. H., WICKHAM, J. D. und JONES, K. B. (2003): Distribution and Causes of Global Forest Fragmentation. *Conservation Ecology* **7**(2). URL: <http://www.consecol.org/vol7/iss2/art7> (Stand: Dezember 2005).
- WALZ, U. (1999): *Charakterisierung der Landschaftsstruktur mit Methoden der Satelliten-Fernerkundung und der Geoinformatik*. Dissertation, TU Dresden.

A. Abkürzungsverzeichnis

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMELV	Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BWI	Bundeswaldinventur
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DLM	Digitales Landschaftsmodell
ETM	Enhanced Thematic Mapper
HB	Holzboden
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
LaNuKla	nach bestimmten Kriterien ausgewählte Landnutzungsklassen des Digitalen Landschaftsmodells
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
Patch	Landschaftselement; Einzelfläche, die einer Landuntzungs-klasse zugehört
Pixel	Picture Element
UG	Untersuchungsgebiet bzw. -gebiete
WiFS	Wide Field-of-view-Sensor

B. Abbildungsverzeichnis

2.1. Tägliche Veränderung der Bodennutzung in Hektar (1993-2004)	9
3.1. Zunahme der Fragmentierung der Ausgangslandschaft (a) durch Änderung von Flächenverhältnissen (b) und steigende Anzahl der Patches (c)	14
3.2. Landschaften a-f, für die das Indikatorenset berechnet wurde	16
3.2. Landschaften g-j, für die die Indikatoren <i>ED</i> , <i>LSI</i> , <i>MESH</i> und <i>MESH_{PI}</i> berechnet wurden	18
4.1. Beispielfläche (a) mit Sichtbarkeitspolygonen zu verschiedenen Punkten P (durch * dargestellt) (b-d)	20
4.2. Durchgängigkeitsindex für Wald nach DLM - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz	24
4.3. Durchgängigkeitsindex für Wald nach Landsat-Daten - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz	25
4.4. Durchgängigkeitsindex für Wald nach QuickBird-Daten - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz	26
4.5. Durchgängigkeitsindex für LaNuKla nach DLM - Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz	27
4.6. Durchgängigkeitsindex für Wald nach DLM - Untersuchungsgebiet Brandenburg	28
4.7. Durchgängigkeitsindex für Wald nach Landsat-Daten - Untersuchungsgebiet Brandenburg	29
4.8. Durchgängigkeitsindex für LaNuKla nach DLM - Untersuchungsgebiet Brandenburg	30

C. Tabellenverzeichnis

3.1. Übersicht zu den Objektarten, die in der Landnutzungsklassengeometrie aggregiert sind (f=Flächenobjekte)	12
3.2. Übersicht zu den Objektarten, die in der Zerschneidungsgeometrie aggregiert sind (f=Flächenobjekte, l=Linienobjekte)	12
3.3. Ergebnisse der Indikatoren für die Landschaften a-f	16
3.4. Ergebnisse der vier Indikatoren für die Landschaften g-j	18
4.1. Zerschneidungsmaße für das Untersuchungsgebiet Rheinland-Pfalz	21
4.2. Zerschneidungsmaße für das Untersuchungsgebiet Brandenburg	22