

Räumliche Modellierung der Vegetationsverteilung in Zentralsibirien aus Fernerkundungsprodukten und thematischen Karten

DANIELA KNORR & CHRISTIANE SCHMULLIUS, Jena

Keywords: Remote Sensing, spatial modeling, data fusion, land cover classification, boreal ecosystem, carbon balance

Zusammenfassung: Traditionell basieren satellitengestützte Methoden der Landbedeckungsklassifizierung in großen Untersuchungsgebieten auf nur einem Haupteingangsdatensatz (z. B. MODIS land cover und SPOT VGT für GLC2000) und der Benutzung von Trainingsgebieten. In der vorliegenden Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der für die Ableitung einer Landbedeckungskarte für ein 3 Mio. km² großes Untersuchungsgebiet in Zentralsibirien mehrere unabhängige satellitenbasierte Fernerkundungsprodukte sowie eine nationale Bodenkarte fusioniert. Durch die Verwendung spezieller Entscheidungsregeln, die auf landschaftsökologischen Gegebenheiten des borealen Untersuchungsgebietes basieren, konnte die Klassifizierung der Vegetation vertieft und sogar dominierende Baumarten unterschieden werden. Eine derartige Klassifizierungstiefe wird für die terrestrische Kohlenstoffbilanzierung auf regionalem Maßstab benötigt, wurde aber bisher von keinem fernerkundungsbasierten Landbedeckungsprodukt für dieses Untersuchungsgebiet auf vergleichbarem Maßstab erreicht.

Summary: *Spatial Modeling of Vegetation Units in Central Siberia using Remote Sensing Products and Thematic Maps.* Traditionally, satellite-based approaches of land cover classification over large areas rely upon one main input data set (e. g. MODIS land cover and SPOT VGT for GLC2000) and the use of training areas. We developed an approach for the derivation of a vegetation map over a 3 Mio km² study area in Central Siberia, which is based on fusion of several different independent satellite remote sensing products and a national soil map. Using special decision rules, which rely upon landscape ecological regularities of the boreal study region, the vegetation classification could be enhanced down to species level. Such a depth of vegetation classification is needed for the regression based approach for terrestrial full carbon accounting on regional scale of the International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.

1 Einleitung

Entsprechend der Vorgaben des Kyoto-Protokolls ist es notwendig, bis zum ersten Validierungszeitraum 2008–2012 geeignete Methoden zu entwickeln, die die räumliche Verteilung von Quellen und Senken der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Distickstoffmonoxid flächendeckend mit ausreichender Genauigkeit abzuschätzen erlauben. Im Rahmen des von 2002 bis 2005 durch die Europäische Union finanzierten Projektes SIBERIA-II (SCHMULLIUS et al.

2003, <http://www.siberia2.uni-jena.de>) entwickelte das International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Laxenburg/Österreich ein GIS-basiertes semi-empirisches Modell, welches mittels Regressionsgleichungen Kohlenstoffspeicher und -flüsse in einem 3 Mio. km² großen Untersuchungsgebiet in Zentralsibirien zulässt. Dabei benutzt das Modell empirische Werte (ermittelt aus forstwirtschaftlichen Ertragstabellen, Landwirtschaftsstatistiken und zahlreichen Messungen) für Phytomasse, Wachstumsraten und autotrophe und hete-

rotrophe Atmung verschiedener Pflanzen unter verschiedenen Umweltbedingungen (Klima, Standortqualität, Bestandsalter), um den Kohlenstoffgehalt in den Pflanzen und deren Nettoprimärproduktion (NPP) zu berechnen (SHVIDENKO et al.). Den bestimmenden Parameter dieses Modells stellt demnach die Vegetationsverteilung dar. Die für das Modell benötigten Daten werden durch einen vektorbasierten GIS-Datensatz mit einer attribuierten Datenbank mit Informationen über die Vegetationstypen, Bodentypen und Klima repräsentiert. Dieser Datensatz wurde durch russische Vegetationsexperten erstellt, welche anhand einer Fülle an Informationsquellen (v. a. Forstinventurdaten, nationale Boden- und Landschaftskarten, topographische Karten, Luftbilder) homogene (bezüglich Vegetation und Boden) Polygone identifizierten und manuell digitalisierten. Das resultierende Produkt ist eine Vegetationskarte für das Jahr 2003, die aufgrund des einfließenden Expertenwissens einzigartig ist, aber deren Erstellung extrem zeit- und arbeitsintensiv war. Daneben werden die benötigten Forstinventuren nur alle 10 bis 15 Jahre wiederholt. Somit ist es sehr schwierig eine derartige Datenbank für weitere Jahre zu aktualisieren. Um Aussagen über Veränderungen in der Kohlenstoffbilanz im Untersuchungsgebiet treffen zu können, werden aber Informationen über mehrere Jahre in Folge benötigt.

Nur eine automatisierte Methode und kontinuierlich aufgenommene Daten können die benötigte zeitliche Auflösung liefern. Die Fernerkundung stellt die einzige Methode dar, flächendeckend räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Daten von zum Teil unzugänglichen Gebieten zu erhalten. Fernerkundungssysteme mit der nötigen Flächenabdeckung und zeitlichen Auflösung erlauben aber aufgrund ihrer geringeren räumlichen und spektralen Auflösung nicht die für das IIASA-Modell benötigte Tiefe der Vegetationsklassifikation bis hin zu Baumarten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer automatisierten Methode zur Ableitung einer Landbedeckungskarte für ein 3 Mio. km² großes Un-

tersuchungsgebiet in Zentralsibirien mit höherer Klassifikationstiefe als vergleichbare Produkte für dieses Gebiet. Im Gegensatz zu traditionellen satellitenbasierten Methoden der Landbedeckungsklassifizierung großer Gebiete, welche sich auf einen Eingangsdatensatz stützen, basiert diese Methode auf einer GIS gestützten Fusion mehrerer Datenquellen, sowie einem aus landschaftsökologischen Gesetzmäßigkeiten für diese Region abgeleiteten Regelwerk.

2 Konzept: Räumliche Modellierung der Vegetationsverteilung

Die Verteilung der Vegetation ist das Resultat der Interaktionen zwischen verschiedenen Landschaftsfaktoren. Hierzu zählen vor allem die Topographie, welche Temperatur und Allokation von Wasser beeinflusst und Bodentextur, welche einen Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen hat (PFEFFER et al. 2003). Die dadurch gesteuerte Verteilung der potentiellen natürlichen Vegetation wird zusätzlich durch natürliche und anthropogene Störungen, wie Feuer, Insektenbefall, Windwurf und Rodung beeinflusst.

In Gebieten, die zu groß oder unzugänglich für Vegetationskartierungen im Gelände sind, ermöglicht die Verwendung von GIS unter Berücksichtigung ökologischer Zusammenhänge bestimmte Vegetationsmuster aus der räumlichen Verteilung anderer Landschaftselemente, die z. B. mit Hilfe der Fernerkundung kartiert werden, räumlich zu modellieren (VOGIATZAKIS 2003).

Beispiele für die kombinierte Verwendung von GIS und Fernerkundungsdaten für Vegetationsmodellierung sind zahlreich vorhanden. So präsentierten OHMAN & GREGORY (2002) eine GIS-basierte Gradientanalyse und Nearest Neighbour Methode für die Abschätzung der Waldzusammensetzung und Struktur in der Oregon Coastal Province. Durch die Verwendung multipler Vegetationsattribute von georeferenzierten Waldinventurplots, klimatischer, topographischer und geologischer Karten, sowie einer Landbedeckungskarte aus Landsat TM Daten, erzielten sie eine gute bis mode-

rate Genauigkeit der modellierten Baumartenverteilung.

Im SIBERIA-II Untersuchungsgebiet führten KHARUK et al. (2003) eine Waldkartierung entlang des Flusses Jenisei mit NOAA AVHRR Daten durch. Die Klassifizierungen des 1000 km × 3000 km großen Transekts, welcher durch sehr unterschiedliche Landschaften geprägt ist, konnte im Vergleich zu ersten Versuchen erheblich verbessert werden, nachdem der Transekt in mehrere Ökoregionen unterteilt wurde, in welchen unterschiedliche Vegetationsklassen möglich waren.

In einer weiteren Studie im SIBERIA-II Gebiet nutzte KUZMENKO (2003) satellitengetragene MK-4 Daten und Informationen über Höhenlage, Boden und Geomorphologie aus existierenden Karten für die Erstellung einer Waldkarte mit besonderem Schwerpunkt auf anthropogene Störungen im Südöstlichen Teil der Angara-Jenisei-Region.

Für großräumige Regionen, wie dem gesamten SIBERIA-II Untersuchungsgebiet liegen vergleichbare Untersuchungen noch nicht vor.

Im Rahmen des Projektes SIBERIA-II wurde eine Landbedeckungskarte mit 16

Klassen aus MODIS Daten mit 500 m räumlicher Auflösung (SKINNER & LUCKMAN 2004) für das Jahr 2003 erstellt. Nutzt man diese Karte zur primären Unterscheidung zwischen übergeordneten Vegetationstypen, wie Nadel- und Laubwald, können Informationen über Höhenlage, Bodentypen und bioklimatische Regionen, helfen, eine Landbedeckungskarte mit vertiefter Klassifizierung bis hin zu Baumarten für das Untersuchungsgebiet zu erstellen.

3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Zentralsibirien/Russland und umfasst 3,28 Mio. km² (Abb. 1). Das Klima ist aufgrund der enormen Nord-Süd-Ausdehnung von etwa 3000 km sehr divers. Die jährliche Durchschnittstemperatur nimmt von -17°C im Norden auf 0°C im Südwesten zu (ROJKOV et al. 2003).

Aufgrund der niedrigen Jahresmitteltemperaturen ist beinahe im gesamten Untersuchungsgebiet Permafrost zu finden, welcher Einfluss auf die Vegetationsverteilung und die Infiltration von Niederschlag in den Boden hat. So kommt es in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes zu Wasserstau und



Abb. 1: Untersuchungsgebiet in Zentralsibirien/Russland.

der Bildung von mächtigen Torf- und Rohhumusschichten. Besonders im Norden des Untersuchungsgebietes und westlich des Jenissejs, dem längsten Fluss im Untersuchungsgebiet, findet man ausgedehnte Feuchtgebiete (SCHULTZ 1995).

Als Resultat des diversen Klimas ist eine Veränderung der Vegetationsgesellschaften von Tundra mit zahlreichen kleinen Seen und Feuchtgebieten im Norden, über einen ca. 100 km breiten Gürtel aus Waldtundra bei etwa 72° N zu borealem Nadelwald zu beobachten. Letzterer, auch als Taiga bezeichnet, nimmt mit etwa 60 % den größten Teil der Vegetation im Untersuchungsgebiet ein (ROJKOV et al. 2003). Verglichen mit den borealen Wäldern Nordamerikas und Ostasiens, beheimatet die sibirische Taiga eine viel geringere Zahl an Baumarten. Kiefer, Tanne, Fichte, Lärche, Sibirische Kiefer, Birke und Espe machen allein etwa 87 % des gesamten Russischen Waldes aus (SHVIDENKO & NILSSON 2003). Im trockenen Süden des Untersuchungsgebietes findet man einige kleine Steppen- und Waldsteppengebiete, die aber nur 2 % des Untersuchungsgebietes bedecken. Durch den geringen Nährstoffgehalt der Böden und die kurze Vegetationsperiode spielt Landwirtschaft nur eine untergeordnete Rolle in diesem Gebiet. Landwirtschaftliche Flächen, bedecken nur etwa 3,2 % des gesamten Untersuchungsgebietes (ROJKOV et al. 2003).

4 Entscheidungs-basierte Post-Klassifizierung

Die Inputdaten für die Erstellung der fernerkundungsbasierten Landbedeckungskarte, im Folgenden als FE-Karte bezeichnet, stehen durch das Projekt SIBERIA-II zur Verfügung und stammen sowohl von Satellitendaten als auch vorhandenem Kartenmaterial.

Bei der Erstellung der FE-Karte handelt es sich um eine Post-Klassifizierung der aus MODIS-Daten erzeugten SIBERIA-II Landbedeckungskarte mit 500 m Pixelgröße (SKINNER & LUCKMAN 2004), welche mit insgesamt 16 Klassen Auskunft über die Verteilung von übergeordneten Vegetationstypen, wie Nadel- und Laubwald, Grasland, Steppe und Tundra gibt. Diese Klassen werden aufgrund der Werte verschiedener unabhängiger Inputdaten und durch Anwendung der im folgenden erläuterten Entscheidungsregeln weiter in Baumarten und verschiedene Tundren-, Feuchtgebieten- und Steppentypen differenziert. Diese Entscheidungsregeln wurden speziell für das Untersuchungsgebiet erstellt und beruhen auf landschafts-ökologischen Gesetzmäßigkeiten, wie z. B. Höhenstufen in Gebirgen, und auf Informationen aus der IASA-Vegetationskarte.

Aufgrund der enormen Nord-Süd-Ausdehnung des Untersuchungsgebietes von etwa 3000 km und den daraus resultierenden unterschiedlichen Klimabedingungen und Vegetationszonen, war es notwendig, das Untersuchungsgebiet in einem ersten Schritt in mehrere Ökoregionen zu unterteilen, für welche unterschiedliche Entscheidungsregeln entwickelt wurden. Durch Verwendung der Ökoregionen Tundra, Nördliche, Mittlere und Südliche Taiga, Gebirgstaiga und Steppe konnte eine erste Plausibilitätskontrolle der SIBERIA-II Landbedeckungskarte vorgenommen und eindeutige Fehlklassifizierungen beseitigt werden. Beispielsweise darf die Klasse „Steppe“ nur in der Ökoregion Steppe vorkommen. Pixel mit dieser Klassenzuweisung in anderen Ökoregionen werden entsprechend den Entscheidungsregeln umklassifiziert.

Eine weitere Plausibilitätsprüfung erfolgte durch die Verwendung des MODIS Vegetation Continuous Field (VCF) Produktes (HANSEN et al. 2003), welches half, die Eingangsklassifikation von Wald und nicht bewaldeten Flächen zu überprüfen. Dieses aus drei Teilen bestehende Produkt gibt Auskunft darüber, wie viel Prozent eines Pixels mit Bäumen, niedrigeren Vegetationstypen oder vegetationslosen Flächen bedeckt sind. Die Verwendung des VCF ermöglicht dadurch eine Fuzzy-Klassifizierung, durch die einem Pixel mehrere Landbedeckungsklassen mit ihren prozentualen Anteilen pro Pixel, zugewiesen werden können. Um dies zu realisieren, wurde die FE-Karte an dieser Stelle ebenfalls in drei separate Karten mit der Angabe des prozentualen Anteils der je-

weiligen Klasse am Pixel aufgeteilt, und zwar in eine Waldkarte, eine Karte für alle weiteren Vegetationsarten und eine Karte für den Anteil an unbewachsenen und somit, bezüglich des Kohlenstoffaustausches, unrelevanten Flächen.

Der erste Satz an Klassifizierungsregeln, der über eine Verfeinerung der Eingangsklassen entscheidet, bezieht sich auf die Topographie und nutzt ein digitales Geländemodell aus SRTM und Gtopo'30-Daten als Informationsträger. Dadurch konnten z. B. anhand von Höhenstufen in Gebirgen verschiedene Baumtypen klassifiziert werden.

Durch IIASA stand eine GIS-basierte Bodendatenbank im Maßstab 1:1 Million (ROJKOV et al. 2003) zur Verfügung, welche

für jeden Bodentyp horizontweise Informationen über Mächtigkeit, Bodenart, sowie bodenchemische und -physikalische Eigenschaften enthält. Mit Hilfe dieser Informationen konnten Böden mit mächtigen Torfhorizonten selektiert werden (> 40 cm), die der Ableitung von Feuchtgebieten dienen. Daneben wurde die Bodendatenbank genutzt, um Baumarten aufgrund bevorzugter Bodenarten gegeneinander abzugrenzen.

Wasserflächen, abgeleitet aus Envisat/ASAR-Daten mit einer Auflösung von 150 m (BARTSCH et al., im Druck), wurden zur Verfeinerung des Eingangsdatensatzes bezüglich Flussverläufen und Seen verwendet. Vor allem im Norden des Untersuchungsgebiets befindet sich eine große Anzahl kleiner Seen,

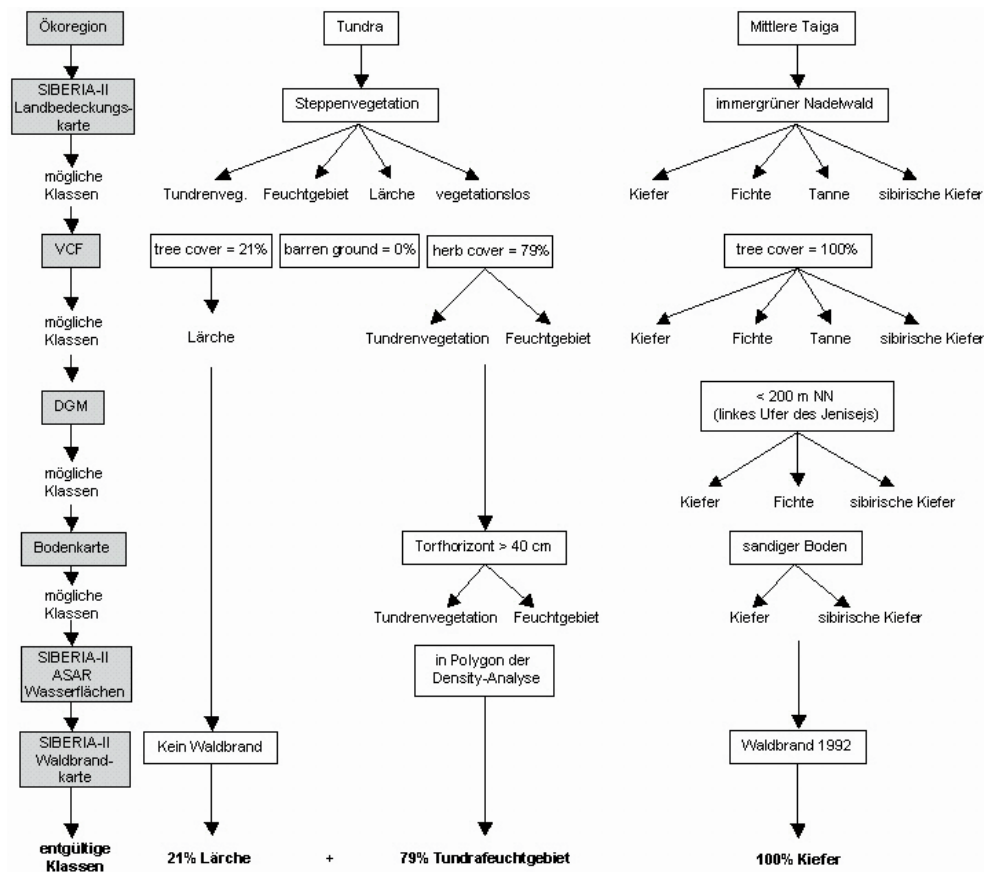


Abb. 2: Ablaufschema der Datenfusion und schrittweisen Post-Klassifizierung der SIBERIA-II Landbedeckungskarte beispielhaft für ein fehlklassifiziertes Pixel in der Ökoregion „Tundra“ und ein immergrüner Nadelwald klassifiziertes Pixel in der Ökoregion „mittlere Taiga“.

die in der 500 m MODIS-Auflösung nicht erfasst werden. Da diese Seen aber sowohl im Sommer als auch im Winter Methan emittieren, sollten sie nicht vernachlässigt werden. Durch eine Density-Analyse dieser kleinen Seen, welche nach Ramsar-Klassifikationsschema in subarktischen Regionen auf Tundrenfeuchtgebiete hinweisen, konnten BARTSCH et al. (im Druck) die Seen zu einem Polygon zusammenfassen, welches sie als Tundrafeuchtgebiet klassifizierten. Durch Verschneidung dieses Polygons mit der Torfmächtigkeit der genannten Bodenkarte wurden die Feuchtgebiete im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes abgeleitet.

Des Weiteren stand durch SIBERIA-II für die Erfassung gerodeter und verbrannter Flächen eine Waldbrand-Karte aus SPOT-VGT, MODIS, AVHRR und ATSR-Daten (BALZTER et al. 2005) für die Jahre 1992 bis 2003 zur Verfügung. Mit Hilfe dieser Information konnten geschädigte Waldgebiete identifiziert und je nach Alter und räumli-

cher Lage der Schädigung die Pionierarten Birke, Lärche und Kiefer klassifiziert werden. Zusätzlich konnten Flächen als Kahlschläge identifiziert werden, die im Ausgangsdatensatz (der SIBERIA-II Landbedeckungskarte) falsch als landwirtschaftliche Flächen klassifiziert wurden.

Die schrittweise Fusion der verschiedenen Datensätze und Umsetzung der Entscheidungsregeln für die Post-Klassifizierung der SIBERIA-II Landbedeckungskarte ist anhand von zwei Beispielen schematisch in Abb. 2 dargestellt. Die technische Umsetzung erfolgte im Geoinformationssystem ArcInfo (ESRI, Inc.) und wurde durch eine mit AML (ArcInfo Macro Language) geschriebene Routine automatisiert.

5 Ergebnisse und Diskussion

Das Ergebnis der beschriebenen regelbasierten Post-Klassifizierung ist eine Landbedeckungskarte mit 500 m räumlicher Auflö-

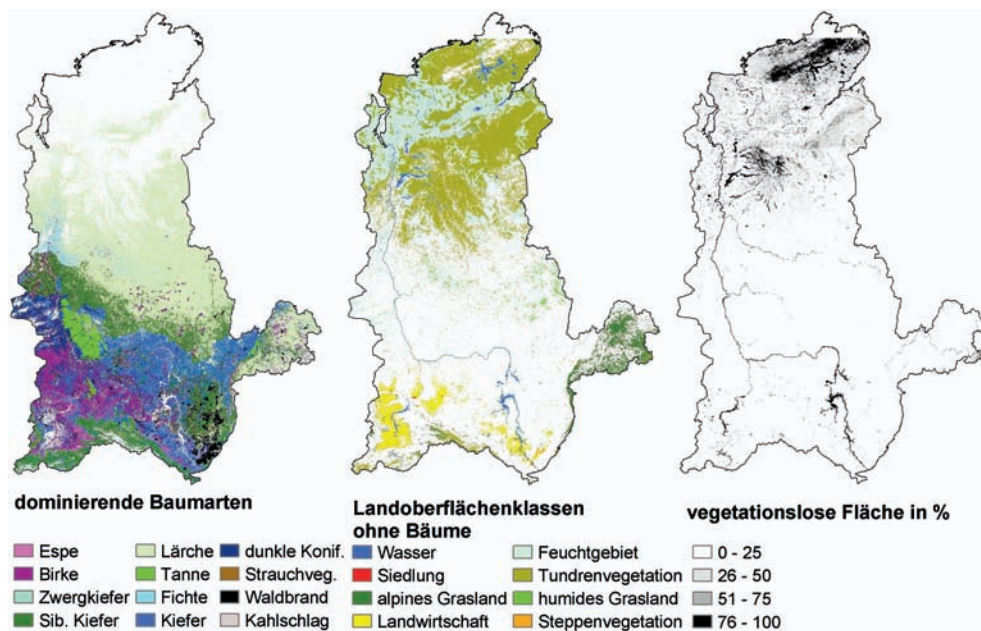


Abb. 3: Ergebnis der regelbasierten Post-Klassifizierung: Rasterkarte mit 500 m räumlicher Auflösung, bestehend aus den Karten der a) Verteilung verschiedener Baumarten (dunkle Koniferen = Fichte, Tanne, Sibirische Kiefer, welche nicht trennbar waren), b) Verteilung baumloser Vegetationstypen (Landwirtschaft, Feuchtgebiet, Tundren- und Steppenvegetation wurden aus 25 Klassen aggregiert), c) Verteilung von vegetationslosen Flächen, hier dargestellt in prozentalem Anteil jedes einzelnen Pixels.

sung für das Jahr 2003, die aus drei separaten Rasterdatensätzen für die Verteilung verschiedener Baumarten, baumloser Vegetationstypen sowie unbewachsener Flächen besteht (Abb. 3). Zusätzlich zur Landbedeckungsklasse enthalten die drei Karten den prozentualen Anteil der jeweiligen Klasse in jedem einzelnen Pixel. Mit 42 Klassen ist die Klasseneinteilung detaillierter als bei bisher existierenden fernerkundungsbasierten Landbedeckungskarten. Aufgrund der Verwendung der gleichen Klassendefinitionen wie IIASA kann die erzeugte Landbedeckungskarte direkt als Modellinput für die Kohlenstoffbilanzierung im Untersuchungsgebiet angewendet werden.

Der visuelle Vergleich dieses Produktes mit IIASAs inventurbasierter Vegetationsdatenbank (Abb. 4) zeigt gute Übereinstimmung der räumlichen Muster der Vegetationsverteilung und besonders der dominierenden Baumarten.

Der pixelbasierte Vergleich der absoluten räumlichen Lage der Klassen zeigt je nach Ökoregion bis zu 50% räumliche Überein-

stimmung. Dieser scheinbar niedrige Wert lässt sich durch die unterschiedliche Datenrepräsentation des rasterbasierten Fernerkundungsproduktes gegenüber den zum Teil stark generalisierten Polygonen der IIASA-Datenbank erklären. Die größten Unterschiede zwischen beiden Karten treten im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes auf und beruhen zum einen auf unterschiedlichen Klassendefinitionen, zum anderen auf größeren Ungenauigkeiten der IIASA-Karte in diesem waldlosen Gebiet. Da die IIASA-Karte vornehmlich auf Forstinventurdaten beruht, standen ihr für die Kartierung dieses Gebietes weniger Informationen zur Verfügung. So zeigt die regelbasierte FE-Karte im Norden des Untersuchungsgebietes deutlich mehr Feuchtgebiete und weniger Tundravegetation als die IIASA-Karte, was durch die an die Ramsar-Klassifizierung angelehnte Definition der Klasse „Tundrafeuchtgebiet“ erklärbar ist. Ein weiterer Unterschied in dieser nördlichen Region, der ebenfalls auf unterschiedliche Klassendefinitionen zurückgeführt werden

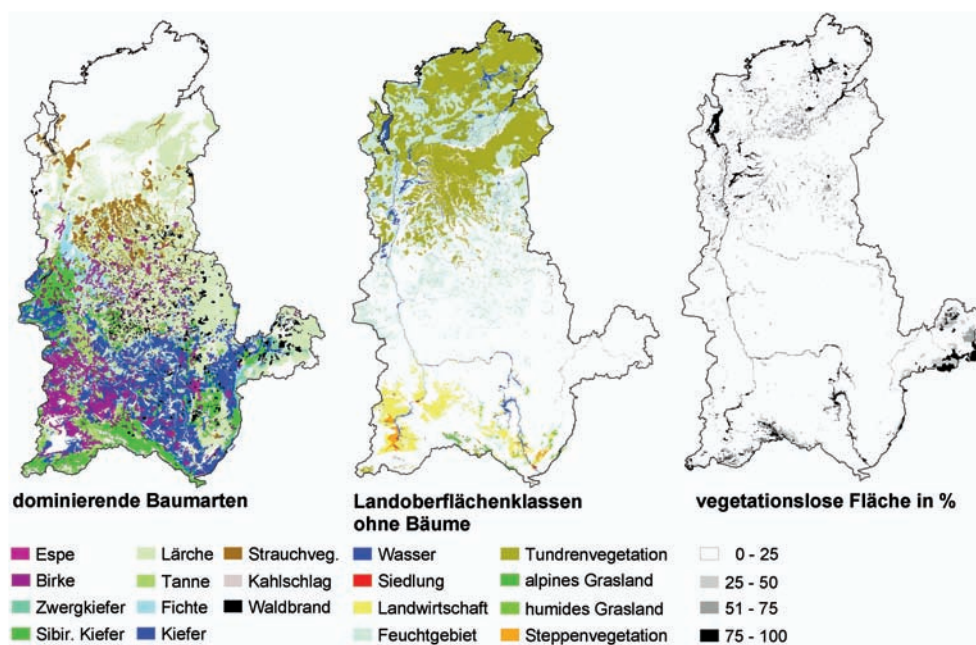


Abb. 4: IIASAs polygonbasierte Vegetationskarte im Maßstab 1:1 Million, a) Verteilung verschiedener Baumarten, b) Verteilung anderer Vegetationsarten, hier aggregiert zu Oberklassen, c) vegetationslose Flächen, hier dargestellt in prozentualen Anteil am Polygon.

kann, ist der deutlich höhere Anteil an vegetationslosen Flächen im fernerkundungs-basierten Produkt. Nach dem MODIS VCF sind große Teile im subarktischen Norden des Untersuchungsgebietes vegetationsfrei. Diese Gebiete wurden vom IIASA als „spoty tundra“, also vegetationslose Gebiete mit kleineren durch Moose und Flechten bewachsenen Flächen, klassifiziert. Im Gegensatz dazu zeigt die IIASA-Karte größere unbewachsene Flächen im östlichen Zipfel des Untersuchungsgebiets, die in der fernerkundungs-basierten Karte als alpines Grasland klassifiziert wurden. Während die Klassifizierung im Fernerkundungsprodukt auf strikten Regeln basiert, scheint die Klassifizierung der IIASA-Karte bearbeiterabhängig zu sein und unterschiedliche Grenzwerte für die Definition von vegetationslosen Flächen aufzuweisen.

Ein weiterer auffälliger Unterschied zwischen FE-Karte und IIASA-Karte ist der höhere Anteil an Strauchvegetation in der IIASA-Karte im mittleren Teil des Untersuchungsgebietes. Da die Unterscheidung zwischen Bäumen und Sträuchern nur auf der Höhe der Pflanzen beruht, welche aus dem VCF nicht hervorgehen, sind diese Flächen in der FE-Karte zum Teil als Lärche und zum Teil als Strauchtundra klassifiziert. Da die einzelnen Typen der Klasse „Strauchvegetation“ der IIASA-Karte ebenfalls Zwergformen von Lärchen und Tundrensträuchern enthalten, sind diese Unterschiede vernachlässigbar.

Die genannten Unterschiede schlagen sich auch auf die für die Kohlenstoffbilanzierung besonders wichtige Flächenverteilung der einzelnen Vegetationsklassen nieder. Die Histogramme in Abb. 5 zeigen die Flächenanteile aggregierter Landbedeckungsklassen der FE-Karte und der IIASA-Karte. Die Klassen „vegetationslose Flächen“, „humides Grasland“ (zusammengefasst mit „alpinem Grasland“), „Feuchtgebiet“, „Tundrenvegetation“ und „Strauchvegetation“ nehmen unterschiedliche Flächenanteile in beiden Karten ein. Dagegen ist die Fläche der am stärksten vertretene Klasse „Wald“ mit 1,75 Mio. km² (FE-Karte) und 1,82 Mio. km² (IIASA-Karte)

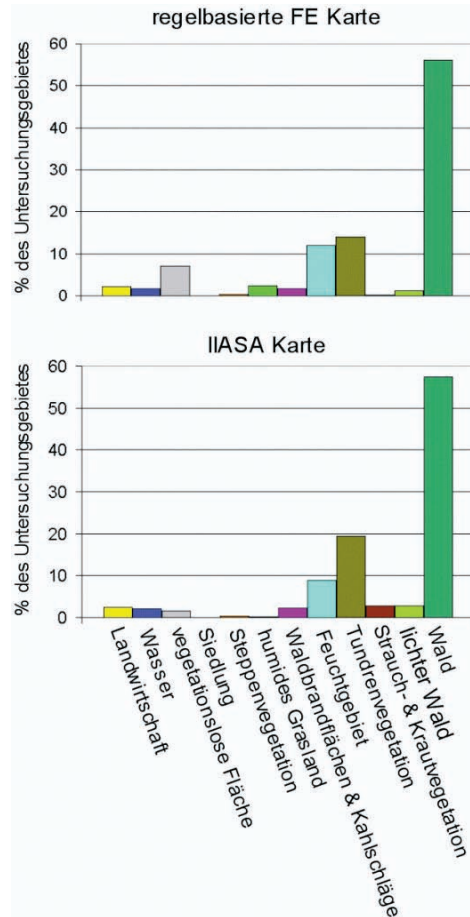


Abb. 5: Anteile der einzelnen Landbedeckungsklassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes.

te) in beiden Produkten vergleichbar. Das Gleiche gilt für die Aufteilung der Waldfläche auf die verschiedenen Baumarten, dargestellt in Abb. 6. Lediglich ein geringer Teil (7,5%) der immergrünen Nadelwälder konnte in der mittleren Taiga nicht eindeutig in einzelne Baumarten getrennt werden, sondern nur als dunkle Koniferen (Fichte, Tanne, Sibirische Kiefer) klassifiziert werden. Um diesen Anteil ist daher die Fläche der Klassen „Fichte“ und „Tanne“ in Abb. 6 geringer als in der IIASA-Karte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Gegensatz zur IIASA-Methode der

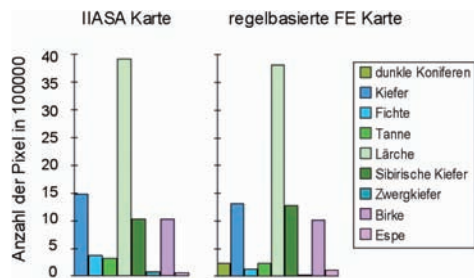


Abb. 6: Flächenanteile der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Baumarten (dunkle Koniferen = Fichte, Tanne, Sibirische Kiefer, welche nicht trennbar waren).

Erstellung der Vegetationskarte, die vorgestellte fernerkundungsbasierte Klassifizierung aufgrund ihrer strikten Entscheidungsregeln und der Automatisierung wiederholbar und auf andere Jahre als 2003 anwendbar ist. Dies ist die Voraussetzung für eine kontinuierliche Modellierung und einen Vergleich der Kohlenstoffflüsse auf jährlicher Basis.

Danksagung

Diese Arbeit ist Bestandteil einer Doktorarbeit am Lehrstuhl für Fernerkundung der Universität Jena, die durch ein Promotionsstipendium der Studienstiftung des Deutschen Volkes finanziert wird. Die Idee und das Konzept entstanden während des Young Scientist Summer Programm 2005 am International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Österreich. Hier soll besonders ANATOLY SHVIDENKO und IAN MCCALLUM für die inhaltliche und technische Unterstützung gedankt werden.

Literatur

- BALZTER, H., GERARD, F.F., GEORGE, C.T., ROWLAND, C.S., JUPP, T.E., MCCALLUM, I., SHVIDENKO, A., NILSSON, S., SUKHININ, A., ONUCHIN, A. & SCHMULLIUS, C., 2005: Impact of the Arctic Oscillation pattern on inter-annual forest fire variability in Central Siberia. – *Geophysical Research Letters* **32** (14): L14709.
- BARTSCH, A., PATHE, C., SCIPAL, K. & WAGNER, W. (im Druck): Detection of permanent open

water surfaces in central Siberia with ENVISAT ASAR wide swath data with special emphasis on the estimation of methane fluxes from tundra wetlands. – eingereicht bei *Nordic Hydrology*.

- HANSEN, M.C., DEFRIES, R.S., TOWNSEND, J.R.G., CARROLL, M., DIMICELI, C. & SOHLBERG, R.A., 2003: Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Field Algorithm. – *Earth Interactions*, **7** (10): 1–15.
- KHARUK, V.I., RANSON, K.J., BURENINA, T.A. & FEDOTOVA, E.V., 2003: Mapping of Siberian forest landscapes along the Yenisey transect with AVHRR. – *International Journal Remote Sensing* **24**: 23–37.
- KUZMENKO, E.I., 2003: Structure, Spatial and Temporal Dynamics and Mapping of the Southern Taiga Forests in Mid-Siberia. – *Proceedings of Map Asia Conference 2003*, 13.–15. Oktober 2003, Kuala Lumpur, (<http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/overview/pdf/ma03121.pdf>)
- OHMAN, J. & GREGORY, M., 2002: Predictive Mapping of forest composition and structure with direct gradient analysis and nearest-neighbor imputation in coastal Oregon, U.S.A. – *Canadian Journal of Forest Research* **32**: 725–741.
- PFEFFER, K., PEBESMA, E.J. & BURROUGH, P.A., 2003: Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. – *Landscape ecology* **8**: 759–776.
- ROJKOV, V.A., GORSHKOVA, M.A., RUKHOVICH, D.I., KOVALEVA, P.V., NILSSON, S., SHVIDENKO, A. & MCCALLUM, I., 2003: Deliverable 21 – Soil map and database, and Deliverable 22 – Accuracy assessment of soil map. – unveröffentlichte Deliverables des SIBERIA-II Projektes.
- SCHMULLIUS, C., HESE, S. & KNORR, D., 2003: SIBERIA-II: A Multi-Sensor Approach for Greenhouse Gas Accounting in Northern Eurasia. – *Petermanns Geographische Mitteilungen* **147**: 4–5.
- SCHULTZ, J., 1995: *The Ecozones of the World. – The ecological deviations of the Geosphere*, 449 S., Springer, Berlin.
- SHVIDENKO, A. & NILSSON, S., 2003: A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998. – *Tellus* **55B**: 391–415.
- SHVIDENKO A., SHEPASHENKO D., NILSSON S. & BOULOUT YU., angenommen: Semi-empirical models for assessing biological productivity of

- Northern Eurasia forests. – Ecological Modelling (angenommen)
- SKINNER, L. & LUCKMAN, A., 2004: Introducing a land cover map of Siberia derived from MERIS and MODIS data. – Proceedings of IGARSS'04, Anchorage, 20–24 September, pp. 223–226.
- VOGIATZAKIS, I.N., 2003: GIS-based Modelling and Ecology: A Review of Tools and Methods. – Geographical Paper No. 170, Department of Geography, The University of Reading, Whiteknights (www.geog.reading.ac.uk/Research/Papers/GP170.pdf).

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Geogr. DANIELA KNORR
Prof. Dr. CHRISTIANE SCHMULLIUS
Abteilung Fernerkundung
Institut für Geographie
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Löbdergraben 32, D-07743 Jena
Tel.: 03641/948878, Fax: 03641/948882
e-mail: daniela.knorr@uni-jena.de
c.schmullius@uni-jena.de

Manuskript eingereicht: Juli 2006

Angenommen: August 2006