

5 DAS POTENZIAL VON FERN- ERKUNDUNGSDATEN ZUR UNTER- STÜTZUNG EINES NACHHALTIGEN WALDMANAGEMENTS

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die derzeit zur Verfügung stehenden Fernerkundungssensoren, die bei der Umweltüberwachung und beim Umweltmonitoring eingesetzt werden können. Neben ihren Anwendungsmöglichkeiten im Ressourcenschutz und Waldmanagement werden auch bestehende Limitationen für den Bereich der forstlichen Planung aufgezeigt. In Kapitel 5.3 liegt der inhaltliche Schwerpunkt, in Hinblick auf die gegenwärtige Waldbrandproblematik in der Mongolei (vgl. Kapitel 3.3), auf der Beschreibung von Fernerkundungspotenzialen bei der Schadenskartierung und dem Monitoring von Waldbränden.

Der Begriff „Fernerkundung“ entstand aus der sinn-gemäßen Übersetzung des in den USA in den 60er-Jahren geprägten Begriffs „*remote sensing*“. Ursprünglich auf Informationsgewinnung aus dem Weltraum mit Satelliten beschränkt, wird er heute weiter gefasst und bezeichnet allgemein Messverfahren, die es erlauben, aus größeren Entfernungen berührungsfrei Informationen über Art und Eigenschaft von Objekten zu erhalten. Die Anwendung der Fernerkundung in der Forst- bzw. Waldwirtschaft zielt unter anderem auf die Gewinnung von planungsrelevanten Informationen. Dabei bieten satellitengestützte Waldkartierungen, die aus einer kontinuierlichen Dokumentation von Informationen und der Möglichkeit, den Zustand sowie die Entwicklung von großen Flächen auch nachträglich durch die Auswertung mehrerer Bildjahrgänge im Sinne eines Flächenmonitorings zu beurteilen, wesentliche Zeit- und Kostenvorteile gegenüber anderen Informationsquellen (BODMER 1993). Nationale Forstinventuren streben eine Überwachung und die strategische Planung von großen Waldflächen an. Dabei wird in der Regel eine große Anzahl von terrestrischen Proben unter hohem Zeit- und Kostenaufwand erhoben. Um die zeitlichen und finanziellen Komponenten so gering wie möglich zu halten, hat sich in vielen Projekten die Kombination aus Fernerkundung und terrestrischen Inventurarbeiten durchgesetzt. Durch den Einsatz der Fernerkundung wird erwartet, dass sich der Stichprobenumfang verringern lässt und dadurch eine Kostenersparnis erreicht wird (RANNEY et al. 1987, FAZAKAS & NILSSON 1996).

Für die raum-zeitliche Analyse und Modellierung werden aus Fernerkundungsdaten gewonnene Geodaten

oft in geographischen Informationssystemen weiterverarbeitet, um Informationen zur Überwachung räumlich verteilter Konventionsobjekte⁸⁷ in Form von digitalen Karten bereitzustellen. Diese Art der Umweltbeobachtung ist eines der ältesten Anwendungsgebiete von GIS. Durch die Konzentration auf messbare Größen und deren Dokumentation können zu einem späteren Zeitpunkt quantitative oder qualitative Veränderungen erkannt und ausgewertet werden. Ziel muss sein, ökologisch ungünstige Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen, daraus Prioritäten für praktisches Handeln aufzuzeigen und damit Gefahren für Mensch und Umwelt wirkungsvoller begegnen zu können.

Ein grundsätzlicher Vorteil der Fernerkundung liegt in einer schnellen und objektiven Erfassung großer Flächen mit verhältnismäßig geringem Aufwand. Zu diesem Zweck wurden schon Anfang des 20. Jahrhunderts Luftbilder zur Kartierung von Waldgebieten als Hilfsmittel zur Forsteinrichtung und zur Erhebung von Bestandsdaten eingesetzt (ALBERTZ 2001, HILDEBRANDT 1996). Für heutige Auswertungen kommen vorwiegend Colorinfrarotluftbilder (CIR) mit einem Maßstab von mindestens 1:15000 zum Einsatz. Mit diesen Bildern ist es dem Nutzer möglich, bestimmte Bestandsparameter auf der Grundlage von ausführlichen und vereinheitlichten Interpretationsschlüsseln zu bestimmen. So können unter bestimmten Aufnahmevoraussetzungen beispielsweise die Baumhöhen und mit vorgefertigten Dichteskalen der Beschirmungsgrad ermittelt werden (ALBERTZ 2001, LAUTNER 2001). Von Seiten der Forstwirtschaft wird an den Luftbildern vor allem die hohe geometrische Auflösung positiv bewertet. Allerdings sind die Aufnahmekosten relativ hoch und die Flächenabdeckung klein, so dass die operationalen Anwendungen in den letzten Jahren überwiegend auf der Basis von Satellitenbilddaten durchgeführt wurden.

Das große Potenzial von Landsat-Satellitenbilddaten für die Untersuchung flächenhafter Phänomene und für großräumige Inventuren wurde in verschiedenen Bereichen der Geowissenschaft schon nach wenigen Jahren anerkannt und in praxisbezogene Anwendungen umgesetzt. Ab der Verfügbarkeit von Landsat-MSS-Daten wurde auch eine Fülle von Untersuchungen über die Anwendbarkeit in der Forstwirtschaft durchgeführt. Das Einsatzfeld erweiterte sich dabei von der Ermittlung der Waldfläche und deren Abgrenzung bald auf detaillierte Klassifizierungen innerhalb des Waldes. So wurden beispielsweise in Finnland für die nationale Waldinventur Landsat-TM-Daten in Verbindung mit terrestrischen Aufnahmen verwendet. In letzter Zeit erfolgten hier auch Untersuchungen zur Bestimmung von Biomasse in borealen Wäldern mit Hilfe von ASTER Satellitenbilddaten (MUUKKONEN & HEISKANEN 2006).

⁸⁷ Neben dem „*Kyoto Protokoll*“ sind u.a. die UN-Konvention über biologische Diversität (UNCBD) und die UN-Konvention zur Bekämpfung der Wüstenbildung (UNCCD) zu nennen.

Trotz vielfältigen Untersuchungen zur Quantifizierung und Klassifizierung von Waldbeständen mit Hilfe der optischen Fernerkundung konnte bisher jedoch keine Studie die lokal gewonnenen Ergebnisse auf eine kontinentale oder zumindest regionale Ebene übertragen (ROSENQVIST et al. 2003). Auf globaler Ebene können die nachfolgend beschriebenen optischen Sensoren wie NOAA AVHRR und MODIS aufgrund ihrer hohen temporalen Auflösung gute und vergleichbare Ergebnisse liefern (DONG et al. 2003, HÄME et al. 1997), für regionale oder lokale Untersuchungen muss auf höherauflösende Satellitenbildmaterial (z.B. Landsat, ASTER, SPOT) zurückgegriffen werden. In den letzten Jahren erfolgte auch eine extensive Untersuchung von Radardaten zur Quantifizierung von Waldressourcen (GAVEAU et al. 2003, SALAS et al. 2002).

Die optische Fernerkundung verwendet passive Systeme ohne eigene Strahlungsquelle. Diese Systeme detektieren von der Erdoberfläche natürlicherweise reflektierte Sonnenstrahlung des optischen und nahen infraroten Spektrums im Spektralbereich von 0.4 bis 3.0 μm bzw. emittierte Energie (Thermalstrahlung) mit einer Wellenlänge von 3.0 μm bis 100 μm und zeichnen diese auf. Damit können die optischen Systeme nur dann arbeiten, wenn die Erdoberfläche von der Sonne beleuchtet wird. Natürlicherweise von der Erde emittierte Strahlung, wie das thermale Infrarot, kann indes auch in der Nacht detektiert und in sehr ähnlicher Weise wie die Strahlung des optischen und nahen infraroten Spektrums verwendet werden. Die Abbildung der Erdoberfläche durch optische Fernerkundungssysteme ist von Absorptions-, Transmissions- und Reflektionsprozessen an der Erdoberfläche abhängig. Diese sind spezifisch für das betrachtete Objekt und dessen Zustand. Dennoch weisen viele Objekte ein ähnliches oder gleiches Reflektionsverhalten auf. Dies gilt nicht zuletzt für zahlreiche Pflanzenarten bzw. Vegetationstypen. Die Unterschiede im Reflektionsverhalten sind auf physikalische und chemische Eigenschaften der Objekte und insbesondere deren Oberflächenbeschaffenheit zurückzuführen. In diesen Punkten unterscheiden sich die optischen Fernerkundungsdaten grundsätzlich von SAR- Fernerkundungsdaten (*Synthetic Aperture Radar*), bei denen vorwiegend geometrische Objekt-Eigenschaften wie die Oberflächenrauigkeit, Streumechanismen und die elektrischen Eigenschaften für Unterschiede im Reflektionsverhalten verantwortlich sind. Bei den SAR-Systemen handelt es sich um abbildende Mikrowellen (Radar)-Sensoren, welche die Erdoberfläche mit einer eigenen Strahlungsquelle abtasten. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der Wetterunabhängigkeit. Radar hat den großen Vorteil, Wolken und Rauch zu durchdringen und so bei jedem Wetter ein Bild der Erdoberfläche erstellen zu können. Die Intensität der Radarrückstreuung wird von der Geometrie des ange-

strahlten Objektes, seiner Oberflächenbeschaffenheit und elektrischen Eigenschaften bestimmt. Diese physikalischen Eigenschaften werden zum Beispiel durch Feuer während Wald- und Steppenbrände erheblich verändert. So können die Radarstrahlen nach Schädigung bis zum Boden vordringen. Durch die Reduzierung des Wassergehaltes im Waldboden infolge verstärkter Sonneneinstrahlung wird die Rückstreuung des Radars vom Boden vermindert. Diese Veränderungen führen zu einer zwischen 2 und 4 dB geringeren Rückstreuung als bei intaktem Wald (KASISCHKE et al. 1992). So lassen sich mit Hilfe von zeitlichen Veränderungsanalysen von Radarbildern Brandflächen mit großer Genauigkeit identifizieren und der entstandene ökologische und ökonomischer Schaden abgeschätzt werden.

Wegen der Bewölkungsprobleme bei den optischen Satellitensensoren wird auch die Radarfernerkundung verstärkt in großräumigen Inventurprogrammen eingesetzt. Die exakte Beobachtung von Vegetationsveränderungen war auch Ziel des von der EU geförderte Klimaforschungsprogrammes SIBERIA⁸⁸. Die zweite Phase (SIBERIA II) wurde unter Federführung der Universität Jena gestartet und erforschte bis 2005 die Veränderungen innerhalb der borealen Waldbestände Sibiriens mit Hilfe von multitemporalen Landsat-Satellitendaten und Radarsensoren (vgl. Kapitel 1.3). Im Rahmen des Projektes wurden für große Flächen in Zentralsibirien interferometrische Radardaten von ERS und JERS-1 für eine großräumige Waldinventur eingesetzt. Im Folgeprojekt SIBERIA II wurden diese Arbeiten unter Mitarbeit des DFD im Hinblick auf Abschätzungen der Bilanzen der Kohlenstoffspeicherung weitergeführt. Der Einsatz von ERS und JERS Radardaten in Kombination mit optischen Satellitenbilddaten wurden auch im Rahmen eines FAO-Projektes zum Einsatz von Fernerkundungsmethoden und GIS zur Unterstützung von ausgewählten Waldgemeinschaftsgebieten in der Mongolei erprobt (FROTSCHER 2004)⁸⁹. Die Bestimmung von Volumenklassen funktionierte im Rahmen der SIBERIA Projektphasen sehr gut für boreale Waldgebiete innerhalb von Regionen, die durch eine niedrige Reliefenergie gekennzeichnet waren (WAGNER et al. 2003, ERIKSSON et al. 2003). Die Übertragung der Ergebnisse auf Regionen in der Mongolei mit wesentlich höherer Reliefenergie führte im Rahmen der Untersuchungen aufgrund von Radarschatten und Überstrahlungsbereiche zu keinen nennenswerten Ergebnissen (FROTSCHER

⁸⁸ SAR Imaging for Boreal Ecology and Radar Interferometry Applications. Das SIBERIA Projekt stützte sich auf die Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der europäischen Raumfahrtagentur ESA und der japanischen Raumfahrtagentur NASDA.

⁸⁹ „Report on technical consultation for Remote Sensing and GIS for participatory Forestry in Mongolia“ FAO-Projekt: TCP/MON/2903

2004). Die Anwendungsmöglichkeiten für Vegetationskartierungen oder forstliche Fragestellungen von Radardaten liegen derzeit hinter denen optischer, multispektraler Daten zurück (HYYPÄ et al. 2000). Die offensichtlichen Vorteile in der Datenaufnahme (Beleuchtungs- und Wetterunabhängigkeit) werden durch Probleme in der Auswertung kompensiert (KREMMERS 1997). Dennoch können auf der Basis der Rückstreuungswerte Waldschäden erfasst und qualitativ gute „Wald- Nichtwaldmasken“ abgeleitet werden. Die Kombination der strukturellen Eigenschaften von Radardaten mit multispektralen, optischen Satellitenbilddaten, die eine insgesamt wesentlich differenzierte Bestimmung von Waldtypen ermöglichen (RANSON et al. 2003), könnte zu einer Verbesserung der Waldklassifizierungen führen.

Während sich grundsätzliche Verfügbarkeit, maßstäbliche Flexibilität und EDV-technische Möglichkeiten in den letzten Jahren dramatisch verbessert haben, können dennoch verschiedene Gründe angeführt werden, warum Fernerkundungsdaten oft nur bedingt für den Bereich des Ressourcenschutzes angewendet wurden. So ist es meist schwierig, für größere Gebiete flächendeckende Aufnahmen und geeignete Aufnahmezeitpunkte zu erhalten, wie es für landschaftsökolo-

NOS) führen zu neuen Anwendungen im Bereich der Forstwirtschaft und zu verbesserten Ergebnissen (vgl. Kapitel 5.2). Allerdings werden die Daten aufgrund der (noch) sehr hohen Kosten nur bedingt im Rahmen von forstwirtschaftlich orientierten Projekten eingesetzt.

5.1 Fernerkundungsdaten im Vergleich

Das folgende Kapitel gibt eine kurze Übersicht über ausgewählte operational verfügbare Satelliten und den zugehörigen Sensoren in Bezug auf ihre spektrale und geometrische Merkmalsausbildung, die im Rahmen der Projektarbeiten Verwendung fanden. Weiterhin wird die methodische Vorgehensweise für die Datenrecherche Beschrieben. Schwerpunkte liegen in der Beschreibung von MODIS sowie Landsat ETM+ und TM, da diese Sensoren das Hauptaugenmerk der Arbeit bilden. Auf eine Beschreibung von IRS und SPOT Satellitenbilddaten wurde verzichtet. Aufgrund ihres vergleichsweise höheren Kostenfaktors fanden diese Bilddaten im Rahmen der Projektarbeiten keine Anwendung.

Gerade durch die geometrischen und spektral immer höherauflösenden Satelliten fallen große Datenmengen

URL	Organisation	Daten
www.dlr.de	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrttechnik e.V.,	Landsat,IRS,NDVI-Produkte, MOMS
http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome	EOS Data Gateway der der NASA und des USGS	u.a. ASTER, MODIS, LANDSAT, AVHRR
www.Earthnet.esrin.esa.it www.eurimage.com	European Space Agency, ESA Eurimage	ERRS, Envisat, Landsat, NOAA Landsat, ERS, IRS, Radarsat, Envisat, QuickBird, NOAA
www.spotimage.fr www.sirius.spotimage.fr	SPOT-Image	SPOT
www.euomap.de	Euomap Satellitendaten Vertriebsgesellschaft	IRS-1C
www.gaf.de	Gesellschaft für angewandte Fernerkundung (GAF)	u.a. Landsat, ERS IKONOS, IRS, NOAA, Radarsat
www.spaceimaging.com http://www.euspaceimaging.com	Space Imaging Europe	IKONOS, IRS, Landsat, ERS-1
www.digitalglobe.com	Earth Watch Incorporated	QuickBird

gische, botanische oder klimatologische Fragestellungen oft notwendig ist. Des weiteren sind professionelle Auswertesysteme, wie z.B. die Softwarepakete ArcGIS und ERDAS Imagine nach wie vor ein signifikanter Kostenfaktor und erfordern seitens der Auswerter eine hochgradige Spezialisierung⁸⁹. Die Modifizierung und kontinuierliche Entwicklung von neuen Methoden zur Auswertung von Satellitendaten sowie die Bereitstellung neuer Sensoren mit immer höheren räumlichen wie spektralen Auflösungen (z.B. QuickBird oder IKO-

Tabelle 4: Übersicht der kommerziellen Online-Kataloge zur Bestellung von Satellitenbilddaten.

Quelle: Eigene Zusammenstellung

⁸⁹ In den letzten Jahren ist allerdings eine rasante Entwicklung im Bereich der Entwicklung und Anwendung von „Open Source“ GIS und FE Software zu beobachten. Auch wenn die Versuche der Standardisierung der Datenformate und Schnittstellen erheblichen Fortschritt gemacht haben (z.B. durch das OpenGIS Konsortium), ist ein detailliertes Wissen von Datenquellen und deren Import- und Weiterverarbeitungsoptionen notwendig.

an, die in verschiedenen Archiven gesammelt und aufbewahrt werden. Die Kenntnis über die Organisation dieser Archivdaten und die Möglichkeit, die Produktvielfalt und diverse Datenformate für den Bereich des Ressourcenmanagements konstruktiv einzusetzen, stellt inzwischen eine methodische Herausforderung dar. Eine Übersicht der wichtigsten Firmen und Forschungseinrichtungen, die Satellitenbilddaten über Online-Kataloge vertreiben, sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

5.1.1 LANDSAT TM / ETM+

Landsat 7 befindet sich seit April 1999 im Orbit und Landsat 5 seit März 1984 im Orbit. Beide sind Teil des „Earth Resources Technology Satellite“ (ERST) Programms der NASA, welches mit dem Start von LANDSAT 1 im Jahr 1972 begann. Die Satelliten dieses zivilen Zwecken dienenden Programms sind in einer Höhe von 705 km auf einer ebenfalls polarnahen, sonnensynchronen Umlaufbahn mit einer Inklination von 98,2 Grad. Im Vergleich zu den beiden nachfolgend beschriebenen Sensoren (vgl. Kapitel 5.1.2) ist der Aufnahmewinkel um ein Vielfaches kleiner, woraus der

Die seit über 30 Jahren bestehende Aufnahmekontinuität und Datenkonsistenz ermöglicht, im Vergleich zu anderen Sensoren, ein sehr effektives Monitoring von Landschaftsveränderungen auf der Basis von multitemporaler Auswertung. Durch die vergleichsweise hohe geometrische Auflösung kann der Einfluss von natürlichen Prozessen und menschlichen Aktivitäten auf die Umwelt „sichtbar“ gemacht werden (GOWARD et al. 2001). Die Bedeutung der Landsat Daten liegt darin, dass sie im Bereich zwischen Satelliten mit sehr kurzer Wiederholungsrate (NOAA; MODIS), aber grober Auflösung und den hochauflösenden Sensoren (QuickBird, IKONOS) wertvolle Informationen liefern. Neben der Kontinuität der Aufzeichnungen liegen die Vorteile auch in den vergleichsweise niedrigen Kosten und in der Vielzahl von vorhandenen Erfahrungen und Ergebnissen im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen und praxisorientierten Projektarbeiten. Die Bildqualität sowie die Aufnahmekontinuität haben allerdings in den letzten Jahren stark gelitten. Seit Mitte 2003 bestehen technische Schwierigkeiten beim Sensor Landsat 7 ETM+ durch den Ausfall des

Landsat-5					Landsat-7				
Sensor	Multispektral Scanner (MSS)			Thematic Mapper(TM)			Enhanced Thematic Mapper (ETM+)		
Sensortyp	Optisch-mechanisch			Optisch-mechanisch			Optisch-mechanisch		
Spektrale Kanäle	Kanal	Wellenlänge	Auflösung	Kanal	Wellenlänge	Auflösung	Kanal	Wellenlänge	Auflösung
	1 Blau	0,50-0,60 µm	79 m	1	0,45-0,52 µm	30 m	1	0,45-0,52 µm	30 m
	2 Grün	0,60-0,70 µm	79 m	2	0,52-0,60 µm	30 m	2	0,52-0,60 µm	30 m
	3 Rot	0,70-0,80 µm	79 m	3	0,63-0,69 µm	30 m	3	0,63-0,69 µm	30 m
	4 (NIR)	0,80-1,10 µm	79 m	4	0,76-0,90 µm	30 m	4	0,76-0,90 µm	30 m
	5 (MIR)			5	1,55-1,73 µm	30 m	5	1,55-1,73 µm	30 m
	7 (MIR)			7	2,08-2,35 µm	30 m	6	2,08-2,35 µm	30 m
Thermalkanal				6	10,4-12,5 µm	120 m	7	10,4-12,5 µm	60 m
Panchromatisch							8	0,25-0,90 µm	15 m

Tabelle 5: Spektrale Charakterisierung der Landsat Sensoren MSS, TM und ETM+. Quelle: Verändert nach HAKE et al. 2002 & LILLESAND et al. 2004

wesentlich schmalere Aufnahmestreifen von 183 km resultiert. Die temporale Verfügbarkeit der Satellitenbilddaten liegt bei 16 Tagen. Der „Enhanced Thematic Mapper“ (ETM+) Sensor ist eine verbesserte Version des „Thematic Mapper“ (TM) und arbeitet mit acht verschiedenen Spektralkanälen in den Wellenlängen zwischen 0,45 und 12,5 µm. Das entspricht dem Bereich des sichtbaren Lichts, des nahen Infrarots, des Thermalinfrarots und der Kurzwelle. Im panchromatischen Kanal wird mit einer Auflösung von 15 x 15 m² aufgenommen, in den restlichen Kanälen des sichtbaren Lichts in 30 x 30 m² (vgl. Tabelle 5). Ausnahme stellt der Thermalinfrarotkanal dar, der in einer Pixelgröße von 60x60 m² aufzeichnet (HAKE et al. 2002).

SLC („Scan Line Corrector“), so dass zwischenzeitlich auf das ältere Aufnahmesystem TM mit einer räumlichen Auflösung von 30 m. zurückzugreifen ist. Allerdings sind seit März 2006 auch hier technische Schwierigkeiten zu verzeichnen. Über einen möglichen Start von Landsat 8 im Jahr 2010 laufen zurzeit Diskussionen über Finanzierung und Ausstattung des Sensors⁹¹.

⁹¹ Seit Ende des Jahres 2005 hat die NASA eine so genannte *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) gebildet, um die Kontinuität des Landsat-Aufnahmesystems zu realisieren. Dafür werden gegenwärtig potenzielle Anwendungsbereiche, sowie langfristige und konsistente globale Aufnahmekonzepte formuliert. Durch die limitierte Verfügbarkeit gewinnt die Integration anderer multispektraler Daten wie. z.B. ASTER oder SPOT 2 zunehmend an Bedeutung. Um den gesamten Waldbestand der Mongolei abzudecken, wären ca. 250 ASTER Szenen (60 x 60 km), oder 50 SPOT 2 Satellitenbildszenen notwendig. Für die reine Datenbeschaffung wäre mit einem Finanzvolumen von bis zu 220.000 US\$ zu rechnen.

Band	Wellenlänge	Spektralbereich	Anwendungsbeispiele
1	0,45-0,52 µm	Blau	Identifizierung von Wasser. Bestimmung von Wassertiefen in Küstenbereichen, Bestimmung der Vegetationsdichte. Wird wegen der starken Absorption des Chlorophylls zur Unterscheidung von Boden und Vegetation, von Laub- und Nadelwald sowie zur Untersuchung von Gewässern wegen der hohen Eindringtiefe in Wasser (Plankton) genutzt
2	0,52-0,60 µm	Grün	Messung der hohen Reflexion der Vegetation im grünen Licht. Zur Vegetationsdifferenzierung und zur Identifizierung von Objekten. Misst die in diesem Spektralbereich vergleichsweise hohe Reflexion von (gesunder) Vegetation an Land und im Wasser
3	0,63-0,69 µm	Rot	Messung der Chlorophyllabsorption. Unterscheidung von Vegetationstypen und Identifizierung von Objekten. Misst die unterschiedliche Chlorophyllabsorption verschiedener Pflanzenarten. Trennung von Bodentypen und Mineralgehalten
4	0,76-0,90 µm	Nahes IR (NIR)	Messung der hohen Reflexion des Chlorophylls. Bestimmung von Vegetationstypen und Biomasse. Bestimmung der Bodenfeuchte. Misst die in diesem Spektralbereich sehr hohe Reflexion gesunder Vegetation. Erkennung von Küstenlinien aufgrund der geringen Eindringtiefe in Wasser
5	1,55-1,73 µm	Mittleres Infrarot (MIR)	Misst den Wassergehalt in Vegetation und Boden.; Sehr gute Unterscheidung von Schnee und Wolken; hohe Reflexion von Gesteinen, daher gut für geologische Kartierungen geeignet.
6	10,4 – 12,5 µm	Thermales IR	Anwendungen im Thermalbereich. Misst die von der Erde ausgehende Wärmestrahlung (thermische Kartierung). Sehr gut zur Detektion von Vegetationsschäden und –stress. Dringt in die oberste Bodenschicht ein. Geeignet für bodenkundliche und geologische Untersuchungen
7	2,08 – 2,35 µm	Mittleres Infrarot	Unterscheidung von mineralogischen Eigenschaften der Gesteine und Böden. Misst den Wassergehalt in Vegetation und Boden. Geeignet für geologische und bodenkundliche Anwendungen

Tabelle 6: Anwendungsbereiche der spektralen Bänder des Landsat Sensors ETM+.

Quelle: Verändert nach LILLESAND & KIEFER (2004), SCHARDT (1990)

Eine erste Visualisierung und Beschreibung (Metadaten) der Vorhandenen Landsat Satellitenbildszenen, wie auch MODIS und den nachfolgend beschriebenen ASTER Satellitenbilddaten, wird durch den „Global Visualization Viewer“ (GLOVIS)⁹² des USGS ermöglicht. Zur besseren Orientierung können topographische Elemente wie z.B. Ländergrenzen, Hauptstädte, Fluss- und Straßennetze integriert werden. Die globale, kostenlose Bereitstellung von orthorektifizierten Landsat ETM+, TM und MSS-Satellitenbilddaten sowie SRTM Datensätzen ist über das „Global Land Cover Facility“ (GLCF)⁹³ der University of Maryland, USA via FTP möglich. Allerdings stehen die Landsat Szenen, aufgrund der beschriebenen technischen Schwierigkeiten, zurzeit maximal bis zum Jahr 2003 zur Verfügung⁹⁴. Pro Satellitenbildszene sind zudem maximal

zwei Aufnahmezeitpunkte vorhanden, was unter Umständen die saisonal abhängige Interpretierbarkeit und den multitemporalen Vergleich erschweren kann. Aus diesem Grund wurden für die in Kapitel 6.1 beschriebenen Projektgebiete Zusatzszenen bestellt. Ansonsten sind die Landsat Daten über die „Earth Resources Observation and Science“-Plattform der NASA (EROS) in den folgenden Formaten erhältlich:

- Unkorrigierte Rohdaten (Level 0Rp), ohne radiometrische oder geometrische Korrekturen. Scanlinien sind invertiert und nominell angepasst. Die Bilddaten werden in 8-Bit geliefert.
- Systemkorrigiert (Level 1G), mit radiometrischen oder geometrischen Korrekturen. Die Bilddaten werden in neu berechneten 8-Bit Werten geliefert. Die Szene wird in eine gewünschte Kartenprojektion gedreht, angepasst und georeferenziert. Die geometrische Genauigkeit sollte binnen 250 Metern für Gebiete mit wenig Relief liegen. Die Level 1 Produkte wurden entweder vom „Level 1 Product Generation System“ (LPGS) oder dem National Land Archive Production System (NLAPS) verarbeitet.

⁹² Online unter: <http://glovis.usgs.gov> [Stand: 12.08.2006].

⁹³ Online unter: <http://glcf.umiacs.umd.edu> [Stand: 12.08.2006].

⁹⁴ Nach inoffiziellen Angaben soll im Jahr 2007 ein neuer globaler Landsat Datensatz des Jahres 2006 über das GLCF zur Verfügung gestellt werden.

- Seit dem Ausfall des SLC („Scan Line Corrector“) Ende Mai 2003, welcher die Vorwärts Bewegung des Satelliten kompensiert, gibt es ein weiteres Format für Aufnahmen nach diesem Datum, welches systemkorrigiert (Level 1G) und lückengefüllt (nur „SLC-off“) vorliegt. Die Szenen beinhalten radiometrische und geometrische Korrekturen sowie Ersatz für alle fehlenden Bildelemente durch histogrammangepasste Daten durch die Integration von normal arbeitendem SLC. Das Bild wird der gewünschten Projektion angepasst.

Die Daten des Sensors „Thematic Mapper“ wurden und werden für vielfältige Fragestellungen eingesetzt (vgl. Tabelle 6). Bei der Konzeption für die Kanalauswahl (vgl. Kapitel 6.3.2) wurde von folgenden Hauptanwendungen ausgegangen. Die einzelnen Kanäle zeigen ein viel höheres Potenzial, vor allem durch die Möglichkeit, verschiedene Kanalkombinationen zu wählen (SCHARDT 1990).

5.1.2 MODIS / AVHRR

Die Beobachtung der terrestrischen Biosphäre mit Satellitensensoren mittlerer Auflösung (~250 m bis 1 km) wie z.B. mit dem amerikanischen Sensor MODIS auf Terra, NOAA-AVHRR oder mit dem europäischen Sensor MERIS auf ENVISAT⁹⁵ konzentrieren sich, im Vergleich zu den Landsat Daten, aufgrund der Pixelgröße, der Streifenbreite und der täglichen Abdeckung schwerpunktmäßig auf die mesoskalige Erfassung. Der seit 1999 operativ eingesetzte Umweltbeobachtungssatellit TERRA-EOS⁹⁶ der amerikanischen Weltraumbehörde NASA bietet mit dem Sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) erstmals die Möglichkeit, zeitlich hochaufgelöste Landnutzungsinformationen mit sehr geringem Aufwand zu liefern (ZIMMERMANN 2001). Die Stärken des multispektralen Sensors liegen sowohl im Erfassen von großen Ausschnitten der Erdoberfläche (die Breite des Aufnahmebereichs beträgt 2330 km) als auch in seiner hohen zeitlichen Auflösung sowie in der Breite des erfassten Spektrums, das den sichtbaren bis thermalen Infrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums mit 36 Kanälen abdeckt. Die Bodenaufklärung steht in Abhängigkeit zu den spektralen Kanälen des Sensors. So besitzen die ersten beiden Bänder eine geometrische Auflösung von 250 m x 250 m. Bei den

spektralen Kanälen 3 bis 7 beträgt diese 500 m x 500 m. Alle anderen Kanäle, das heißt die Bänder 8 bis 36, haben eine Auflösung von 1000 m x 1000 m (LILLESAND et al. 2004). Aufgrund der vergleichsweise geringen geometrischen Auflösung von 250 bis 1000 m eignen sich die Satellitenbilddaten eher für überregionale Anwendungen und Übersichtskartierungen. Für Detailuntersuchungen zur Vegetationsbedeckung muss auf höherauflösende, aber auch teilweise kostenpflichtige Satellitenbilddaten zurückgegriffen werden, um der hohen Heterogenität z.B. im Bereich der mongolischen Waldsteppe gerecht zu werden. Gleichzeitig müssen aber auch ein kleinerer Aufnahmebereich sowie eine geringere zeitliche Auflösung in Kauf genommen werden. MODIS tastet die gesamte Erde innerhalb von 48 Stunden vollständig ab, die höheren Breiten (ab 40°N/S) sogar alle 24 Stunden.

Durch diese hohe Wiederholrate kann MODIS hervorragend zur Beobachtung von sich schnell ändernden Phänomenen, wie z.B. Überflutungen oder Waldbrände und anderen Naturkatastrophen, eingesetzt werden. Ebenfalls ist die Chance, eine Aufnahme mit einer geringen Bewölkung zu erhalten, z.B. im Vergleich zu Landsat mit einer 16-tägigen Abdeckung, um ein vielfaches höher.

Weitere Vorteile liegen in der kostenlosen Verfügbarkeit und in der vielfältigen Produktpalette, die dem Nutzer zur Verfügung steht. Die Daten der 36 Rohbänder des MODIS Sensors werden halb- bis vollautomatisiert aufbereitet und zu abgeleiteten Größen umgerechnet. Aus den Rohdaten können neben multispektralen Satellitenbildern („Surface Reflectance“), die in einer Auflösung von 250 m bis 500 m vorliegen, auch eine Vielzahl von weiterführenden Produkten abgeleitet werden (vgl. Abbildung 26), die für das überregionale Monitoring von Landschaftsveränderungen und im Bereich des Umweltmanagements eingesetzt werden können. Hierzu gehören z.B. die Produkte „Active Fires“ (vgl. Kapitel 5.3), Nettoprimärproduktion, Blattflächenindex, NDVI, EVI („Enhanced Vegetation Index“), Schneebedeckung, Erdoberflächentemperatur und auch Landnutzung („Land Cover“) bzw. deren Veränderungen⁹⁷. In Kapitel 7.2 werden Beispiele dieser Produktpalette, die im Rahmen eines Feuermonitorings eingesetzt wurden, vorgestellt.

Tabelle 7 gibt eine Kurzcharakterisierung der bisher beschriebenen Sensoren im Vergleich.

⁹⁵ MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) auf ENVISAT. Multispektralszene mit 15 Kanälen von 390 – 1040 nm und einer maximalen Auflösung von 300 m. MERIS Daten sind direkt bei ENVISAT unter: <http://envisat.esa.int> [Stand: 15.08.2006] erhältlich.

⁹⁶ Die Sensoren wurden am 18. Dezember 1999 (Trägerplattform Terra) und am 04. Mai 2002 (Trägerplattform Aqua) von der NASA in die Umlaufbahn geschickt (LILLESAND et al. 2004). Neben dem MODIS-Instrument befinden sich noch vier weitere Sensoren auf der Terra Trägerplattform. Der bekannteste ist wohl der ASTER-Sensor, bei den drei weiteren handelt es sich um CERES, MISR und MOPITT.

⁹⁷ Eine sehr ausführliche Produktbeschreibung ist auf der Website des LP DAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) enthalten. Online unter: <http://archive.digitalglobe.com/archive> [Stand: 12.08.2006]

Satellit Sensor	Landsat 7 ETM+	NOAA AVHRR	Terra MODIS
Start	1999	1994	1999
Spektralbereich	0,45-12,5	0,58-12,5	0,40-14,4
Anzahl der Bänder	7	5	36
Pixelgröße	30 x 30 m ² 60 x 60 m ² - Thermal 15 x 15 m ² - Panchromatisch	1,1 x 1,1 km ²	250 m - Bänder 1 u.2 500 m - Bänder 3 bis 7 1000 m - Bänder 8 bis 36
Streifenbreite	185 km	2399 km	2330 km
Zeit der globalen Abdeckung	16 Tage	1 Tag	1 bis 2 Tage
Flughöhe	705 km	870 km	705 km
Umlaufbahn	polar sonnensynchron absteigend	polar sonnensynchron aufsteigend	polar sonnensynchron absteigend

Tabelle 7: Vergleich der Sensoren ETM+, AVHRR und MODIS. Quelle: Eigene Zusammenstellung

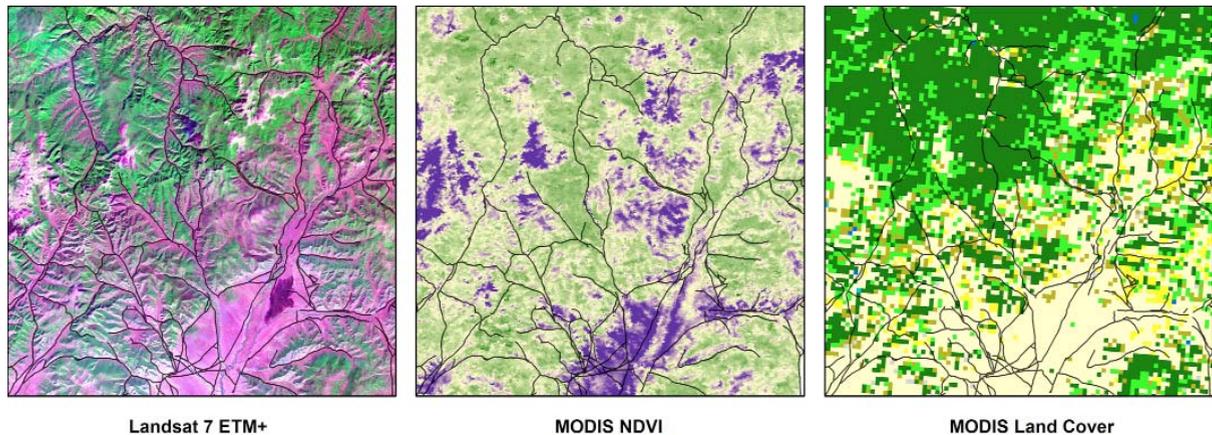


Abbildung 26: Landsat 7 ETM+ und MODIS-Produkte im Vergleich. *Links:* Landsat ETM+ vom 12. September 2002 (Auflösung = 30 m). *Mitte:* MODIS NDVI (MOD13Q1) von Anfang Juni, 2002 (Auflösung = 250 m). *Rechts:* MODIS Land Cover (MOD12Q1) vom Jahr 2003 (Auflösung = 1 km). Projektgebiet *Mongonmorit, Töv Aimag*

Tabelle 8 gibt eine Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten MODIS-Produkte. Eine generalisierte Übersicht der global vorhandenen Waldressourcen ermöglicht das Landnutzungsprodukt *MOD12Q1* mit einer räumlichen Auflösung von 1 km. Der hierfür entwickelte Algorithmus basiert auf Aufnahmen über einen Zeitraum von ca. 96 Tagen. Das primäre Klassifikationsschema besteht aus 17 Landnutzungsklassen, die mit den Klassen des 1992 entwickelten globalen

Landcovers des „*International Geosphere Biosphere Programme*“ (IGBP)⁹⁸ identisch sind und auf Daten des Wetterbeobachtungssatelliten NOAA beruhen (LOVELAND & BELWARD 1997). Die *Land Cover* Klassifikation (*MOD12Q1*) basiert nicht auf den Rohdaten, sondern auf bereits abgeleiteten Produkten wie NDVI. Erst wenn diese qualitativ gut und stabil sind, kann der Landcover Datensatz optimiert werden. Seit Anfang 2006 sind diese Klassifikationen über das *EOS Data Gateway* nicht nur für das Jahr 2001 sondern ebenfalls für die Jahre 2002 sowie 2003 kostenlos erhältlich. Diese werden jährlich weitergeführt, wobei die verwendeten Klassifikationsalgorithmen anhand von definierten Testgebieten kontinuierlich verbessert werden, um eine nachhaltige Erfassung und Bewertung von Landnut-

⁹⁸ Informationen zum IGBP sind online unter: <http://www.igbp.kva.se> [Stand: 15.08.2006] erhältlich. Daten zur globalen Vegetationsbedeckung sind beim USGS unter <http://edcscns17.cr.usgs.gov/glcc> [Stand: 15.08.2006] erhältlich. Hier ist unter anderem auch das FRA 2000 Produkt (*Global Forest Resources Assessment*) herunterladbar (vgl. Kapitel 5.1.6).

zungsveränderungen zu ermöglichen. Insgesamt existieren fünf Landnutzungsklassifikationen die im HDF-Format verschachtelt vorliegen. Klassifikationstyp 1 (nach IGBP) setzt sich beispielsweise aus 17 Klassen zusammen⁹⁹.

Basis für die Erfassung von Landschaftsveränderungen haben das Entwicklungsteam von MODIS-Produkten nach anderen Wegen zur Optimierung des Landcover-Datensatzes suchen lassen. So wurde ein Datensatz entwickelt, der als „vegetation continuous fields“

Terra Surface Reflectance (MOD09GHK)	Terra Land Cover (MOD12Q1)	Terra Thermal Anomalies (MOD14A2)	Terra Vegetation Indices (MOD13Q1)
<p>Fläche: 10° x 10° Auflösung: 500 m Dateigröße: 500 MB Projektion: Sinusoidal Datenformat: HDF-EOS Verfügbarkeit: Täglich Beschreibung Multispektrales Satellitenbild in 7 Bändern: Band 1: 620-670 µm Band 2: 841-876 µm Band 3: 459-479 µm Band 4: 545-565 µm Band 5: 1230-1250 µm Band 6: 1628-1652 µm Band 7: 2105-2155 µm Auch in einer Auflösung von 250 m (MOD09GQK) mit 2 Bändern: Rot: 620-670 µm NIR: 841-876 µm</p>	<p>Fläche: 10° x 10° Auflösung: 1 km Dateigröße: 23 MB Projektion: Sinusoidal Datenformat: HDF-EOS Verfügbarkeit: Jährlich Beschreibung Algorithmus basiert auf Aufnahmen über 96 Tagen. Globale Landnutzungs-klassifizierungen z.B. nach IGBP.</p>	<p>Fläche: 10° x 10° Auflösung: 1 km Dateigröße: 3 MB Projektion: Sinusoidal Datenformat: HDF-EOS Verfügbarkeit: 8-Tages Produkt Beschreibung Erfassung von aktiven Feuern in einer Auflösung von 1 km und Evaluierung der Erfassungsgenauigkeit (Qualitätskontrolle). Diese stehen auch mit einer täglichen Auflösung (MOD14A1) zur Verfügung</p>	<p>Fläche: 10° x 10° Auflösung: 250 m Dateigröße: 507 MB Projektion: Sinusoidal Datenformat: HDF-EOS Verfügbarkeit: 16-Tages Produkt Beschreibung Generierung von NDVI und EVI über die Bänder: Rot (620-670 µm), Nahes IR (841-876 µm) Blau (459-479 µm).</p>

Tabelle 8: Übersicht der verwendeten MODIS Produkte. Quelle: *Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)*

Abbildung 27 zeigt die „Land Cover“ Klassifikation des 1km MODIS Landnutzungsproduktes. Für die Darstellung in der Übersichtskarte wurden die 4 Waldklassen *Evergreen Needleleaf Forest*, *Evergreen Broadleaf Forest*, *Deciduous Needleleaf Forest* und *Deciduous Broadleaf* zu einer Klasse „Wald“ zusammengefasst. Die bestehenden Klassen nach dem IGBP Programm wurden für die Darstellung modifiziert. Mit insgesamt 8.9 Mio. Hektar geschlossener Waldfläche liegen die Waldanteile in der Mongolei aus dem Jahr 2003 jedoch weit unterhalb der offiziellen Waldstatistiken aus Vergleichsdaten (vgl. Kapitel 2.3). Die Probleme mit der Klassifizierungsgenauigkeit der „Land Cover“-Daten als

bezeichnet wird und seit dem Frühjahr 2003 zur Verfügung steht. Dieser Datensatz gibt für eine 1x1 km-Fläche nicht nur an, ob es sich um Nadelwald, um landwirtschaftliche Flächen oder um einen See handelt, sondern wie viel Prozent dieses Quadratkilometers mit Nadelwald bedeckt sind, so dass eine wesentliche Verbesserung der Landschaftsdifferenzierung möglich ist. Diese Daten stehen seit Frühjahr 2003 zur Verfügung.

Alle MODIS Daten werden archiviert und stehen über das *EOS-Data-Center* des U.S. *Geological Survey* (USGS) im Internet kostenlos im HDF-Format (Hierarchisches Datenformat) zur Verfügung¹⁰⁰. Hierbei handelt es sich um Kacheln, die eine Größe von annähernd 10° mal 10° einnehmen und in einer *Sinu-*

⁹⁹ 1. Water, 2. Evergreen Needleleaf Forest, 3. Evergreen Broadleaf Forest, 4. Deciduous Needleleaf Forest, 5. Deciduous Broadleaf, 6. Mixed Forests, 7. Closed Shrublands, 8. Open Shrublands, 9. Woody Savannas, 10. Savannas, 11. Grasslands, 12. Permanent Wetlands, 13. Croplands, 14. Urban and Built up, 15. Cropland / Natural Vegetation Mosaic, 16. Permanent Snow and Ice, 17. Barren or Sparsely Vegetated.

¹⁰⁰ Der Zugriff auf den EOS DATA Gateway ist online über: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/> [Stand: 12.12.2006] möglich.

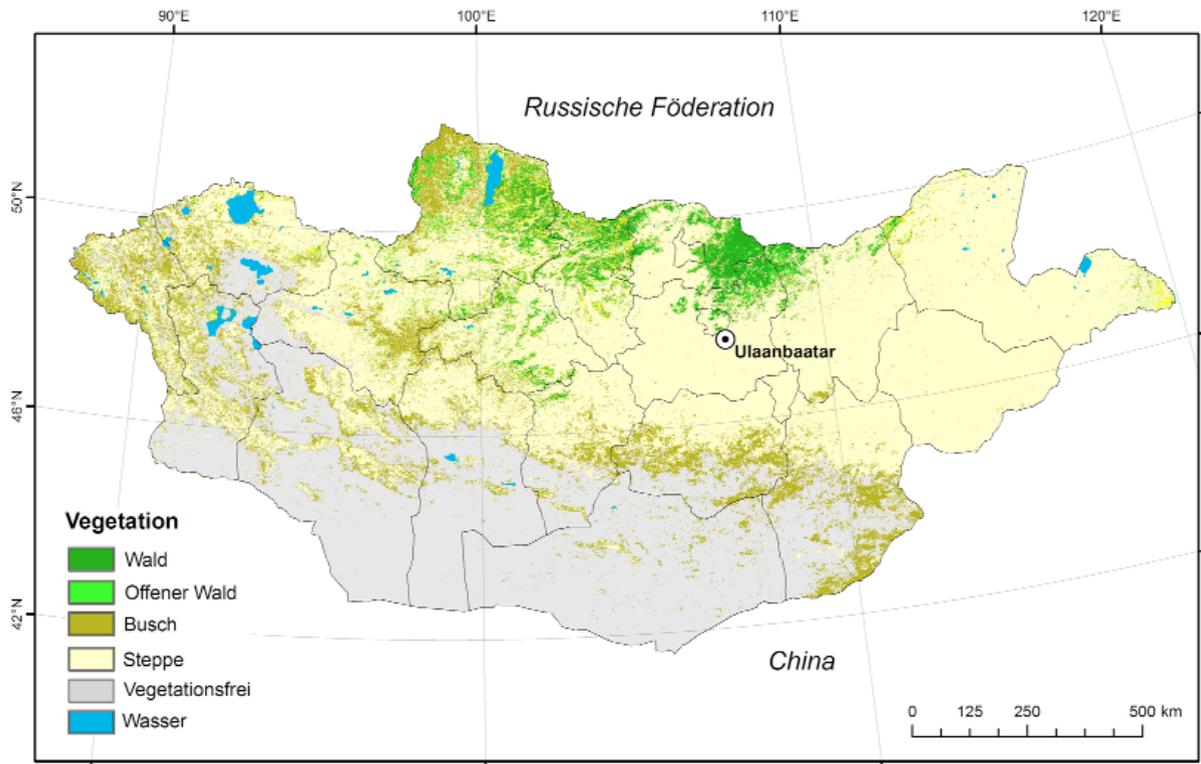


Abbildung 27: MODIS „Land Cover“ Klassifizierung von 2003 (IGBP). Datenquelle: USGS

soidal-Projektion vorliegen. Mit der Hilfe von Java-basierten Werkzeugen wie z.B. dem MRTOOL (*Modis Reprojection Tool*) ist neben der Datenkonvertierung (z.B. GeoTiff) auch eine Umprojektion in gängigere geographische oder kartesische Koordinatensysteme problemlos möglich. Eine gute Visualisierungsoption der gesamten MODIS Produktpalette ist im Internet über interaktive „*Global Browse Products*“¹⁰¹ mit PAN und ZOOM-Funktionen gegeben (vgl. Abbildung 28). Diese Produkte werden täglich mit einer Auflösung von 5 km und 20 km zur Verfügung gestellt und können im JPEG-Format heruntergeladen werden.

Der NOAA-Satellit mit dem AVHRR-Sensor (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) wird in der Literatur aufgrund seines Anwendungsspektrums oft als der Vorgänger von MODIS bezeichnet. Der AVHRR-Sensor wurde mit dem Start des ersten NOAA-Satelliten 1979 mit dem ursprünglichen Ziel in den Weltraum geschickt, meteorologische Daten zur Verfügung zu stellen. Mit den technischen Verbesserungen seiner Nachfolger wurde der Satellit nach und nach auch für

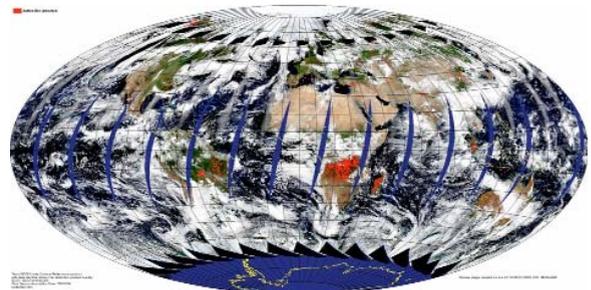


Abbildung 28: Beispiel des *Global Browse Products*: „Aktive Feuer“ vom 01. Januar 2006. Quelle: NASA

ökologische Anwendungen, z.B. für das Monitoring der globalen Vegetation durch die Ableitung von NDVI oder für Temperaturanalysen, eingesetzt. Die einzelnen Generationen der NOAA-Satelliten werden chronologisch durchnummeriert. Der aktuellste ist der NOAA 18, der im Mai 2005 startete. Momentan befinden sich drei Betriebsbereite NOAA-Satelliten im Welt-raum (Generationen 16 bis 18). Alle NOAA Satelliten befinden sich in einer Höhe von 870 km. Wie schon bei MODIS handelt es sich um eine polnahe, sonnensynchrone Umlaufbahn. Die Breite des Aufnahmestreifens beträgt 2400 km (LILLESAND et al. 2004). Die AVHRR-Daten sind, ähnlich wie MODIS, durch eine hohe zeitliche Auflösung (tägliche Verfügbarkeit) aber relativ geringe räumliche Auflösung von 1,1 km² gekennzeichnet. Die Tabelle 9 stellt die spektrale Auflösung des

¹⁰¹ Online unter: <http://modland.nascom.nasa.gov/browse> [Stand: 15.08.2006].

AVHRR-Sensors dar. Es fällt auf, dass nur ein Kanal für das sichtbare Licht sensibilisiert ist, die anderen fünf decken die Bereiche des nahen, mittleren und thermalen Infrarots ab.

Kanal	Spektralbereich	Spektrum
1	0.58-0.68 µm	Sichtbar (red)
2	0.725-1.10 µm	Nahes IR
3 (A)	1.58-1.64 µm	Nahes IR
3 (B)	3.55-3.93 µm	Mittleres IR
4	10.30-11.30 µm	Thermal IR
5	11.50-12.50 µm	Thermal IR

Tabelle 9: Spektrale Auflösung des NOAA-AVHRR Sensors. Quelle: USGS

5.1.3 ASTER

Der Sensor ASTER liegt, wie auch MODIS, an Bord des TERRA Satelliten, der am 18. Dezember 1999 startete. ASTER verfügt über drei Subsysteme: Sichtbares und nahes Infrarot (VNIR), kurzwelliges Infrarot (SWIR) und thermales Infrarot (TIR). Die geometrische Auflösung beträgt 15 m (VNIR), 30 m (SWIR) und 90 m (TIR). Die Abdeckung einer ASTER-Szene beträgt 60 x 60 km².

VNIR	SWIR
Band 1: 0.52 – 0.60 µm, Grün	Band 4: 1.600 – 1.700 µm
Band 2: 0.63 – 0.69 µm, Rot	Band 5: 2.145 – 2.185 µm
Band 3: 0.76 – 0.86 µm (NIR)	Band 6: 2.185 – 2.225 µm
	Band 7: 2.235 – 2.285 µm
	Band 8: 2.295 – 2.365 µm
	Band 9: 2.360 – 2.430 µm

Tabelle 10: Spektrale Charakteristik der ASTER Subsysteme VNIR und SWIR. Quelle: YAMAGUCHI et al. (1998)

ASTER wird in zwei Verarbeitungsstufen angeboten: Neben Level 1 Produkten (Rohdaten mit ihren radiometrischen und geometrischen Korrekturen in Form einer Textdatei) existieren auch geometrisch und radiometrisch korrigierte Level 2-Produkte („Registered Radiance at Sensor“). Diese sind, wie auch MODIS, über das EOS Data Gateway erhältlich, allerdings seit Anfang des Jahres 2006 nicht mehr kostenlos¹⁰². Bis Anfang des Jahres 2006 waren z.B. die so genannten Aster On demand L2 Surface Radiance (AST_09) mit den Bändern SWIR und VNIR (Bestelloption ohne Thermalauswertung) kostenlos verfügbar und fanden für Teile der Projektgebiete als Zusatzinformationen Anwendung. ASTER Satellitenbilddaten wurden bisher



Abbildung 29: Optischer Vergleich von ASTER (VNIR) und Landsat ETM+. Oben: Ausschnitt aus einer ASTER Szene vom 01.10.2000 in VNIR (Auflösung = 15 m). Unten: Szenenausschnitt von LANDSAT 7 ETM+, Bandkombination: 5,4,3 (RGB) vom 25.11.2000 (Auflösung = 15 m; fusioniertes bild). In beiden Winteraufnahmen sind die Kiefernflächen, die in der Infrarot Falschfarbendarstellung der ASTER Szene als rote Flächen erscheinen, gut zu erkennen

¹⁰² Derzeit kostet eine ASTER-Szene 80 US\$.

weniger stark für die Erfassung von Waldbeständen eingesetzt (MUUKKONEN & HEISKANAN 2006). Dies liegt sicherlich an der im Vergleich kleinen Streifenbreite und an der Tatsache, dass die einzelnen Szenen eher unsystematisch vorliegen und nur selten konsistente Aufnahmereihen eines Zeitschnittes bilden, was zu einem „Flickenteppich“ aus einzelnen und sich überlappenden Szenen führt. Dies limitiert die Möglichkeit, eine flächendeckende und großräumige Untersuchung von Waldressourcen durchzuführen. Allerdings kann die spektrale Bandbreite des VNIR aufgrund der hohen geometrischen Auflösung als Zusatzinformation und Ergänzung zu Landsat Daten im Rahmen von Detailuntersuchungen oder zur Verifizierung von Teilgebieten Anwendung finden. Des Weiteren existiert eine gute spektrale Übereinstimmung mit Landsat TM oder ETM+¹⁰³. Ein Beispiel für beide Bilddaten zeigt die Abbildung 29.

5.1.4 QuickBird

Neben den beschriebenen hochauflösenden optischen Satellitenbildern steht seit einigen Jahren auch eine neue Generation von höchstaflösenden optischen Satellitensystemen der zivilen Erdbeobachtung zur Verfügung, die auch für die forstliche Kartierung angewendet werden können. Zurzeit ist QuickBird¹⁰⁴ der Satellit mit der höchsten räumlichen Auflösung von nur 0.6 m im panchromatischen und 2.4 m im multispektralen Bereich. Der opto-elektronische Scanner nimmt die Erdoberfläche in fünf Kanälen (Blau, Grün, Rot, nahes Infrarot und im panchromatischem Kanal) auf. Die erhöhte geometrische und radiometrische Auflösung bietet daher, insbesondere in kleinflächig bewirtschafteten Gebieten oder in ausgesprochen inhomogenen Waldgebieten, wie sie in der Mongolei in der Regel anzutreffen sind, eine zwar (noch) sehr kostenintensive, aber verbesserte Interpretationsmöglichkeit, die eine Erfassung auf Einzelbaumebene ermöglicht. Nachteile dieser Daten sind der momentan noch sehr hohe Kostenfaktor sowie die enorme Datenmenge, die eine Untersuchung von größeren Gebieten bei derzeitigen Hardware-Voraussetzungen äußerst schwierig machen. Aus diesem Grund wurden QuickBird Daten innerhalb der GTZ-Projektarbeiten nur vereinzelt in Hinblick auf ihre potenzielle Eignung für die Waldkartierung untersucht. Auf die methodischen Arbeiten soll im Rahmen dieser Arbeit nur bedingt eingegangen werden. Ein Vergleich von QuickBird mit Landsat ETM+ ist in der Abbildung 30 gegeben.

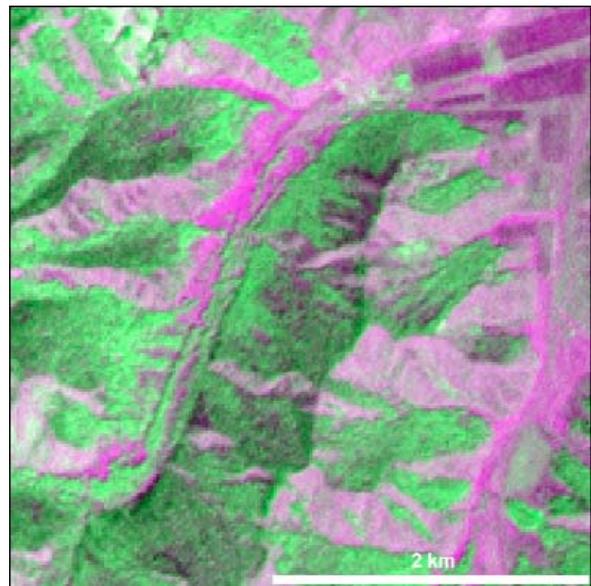
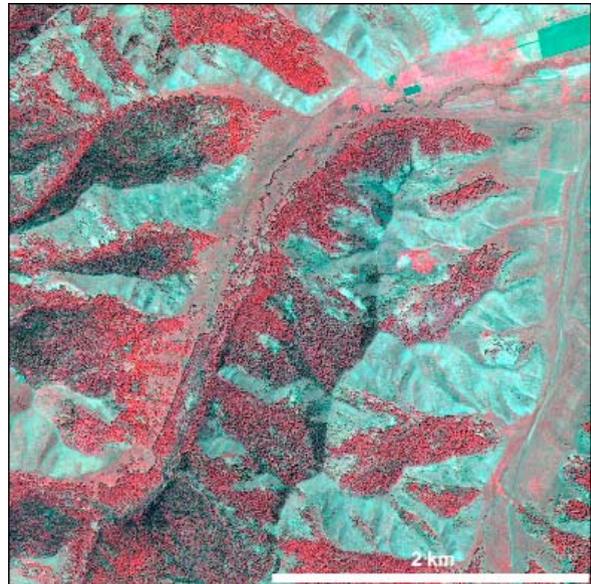


Abbildung 30: Optischer Vergleich von QuickBird und Landsat ETM+. *Oben:* Ausschnitt aus einer QuickBird Szene vom 04. Juni 2005 mit einer Bodenauflösung von 2.44 m (MS) in einer Infrarot Falschfarbendarstellung (*False Color IR*). *Unten:* Landsat ETM+ vom 13.09.2000 mit einer Bodenauflösung von 30 m (MS) in einer Falschfarbendarstellung (*False Natural Color*), Bandkombination: 5,4,3 (RGB). Projektgebiet Bayangol, Mandal soum, Selenge Aimag

¹⁰³ So korrespondiert Band 4 (1.60 µm-1.75 µm) mit dem Band 5 TM/ETM+ (1.55 µm-1.75 µm) und die Bänder 5-8 (2.145 µm-2.365 µm) mit dem Band 7 TM/ETM+ (2.08 µm-2.35 µm).

¹⁰⁴ QuickBird ist ein kommerzieller Erdbeobachtungssatellit der Firma *DigitalGlobe* und wurde im Jahr 2001 von der Air Base Vandenberg, Kalifornien gestartet.

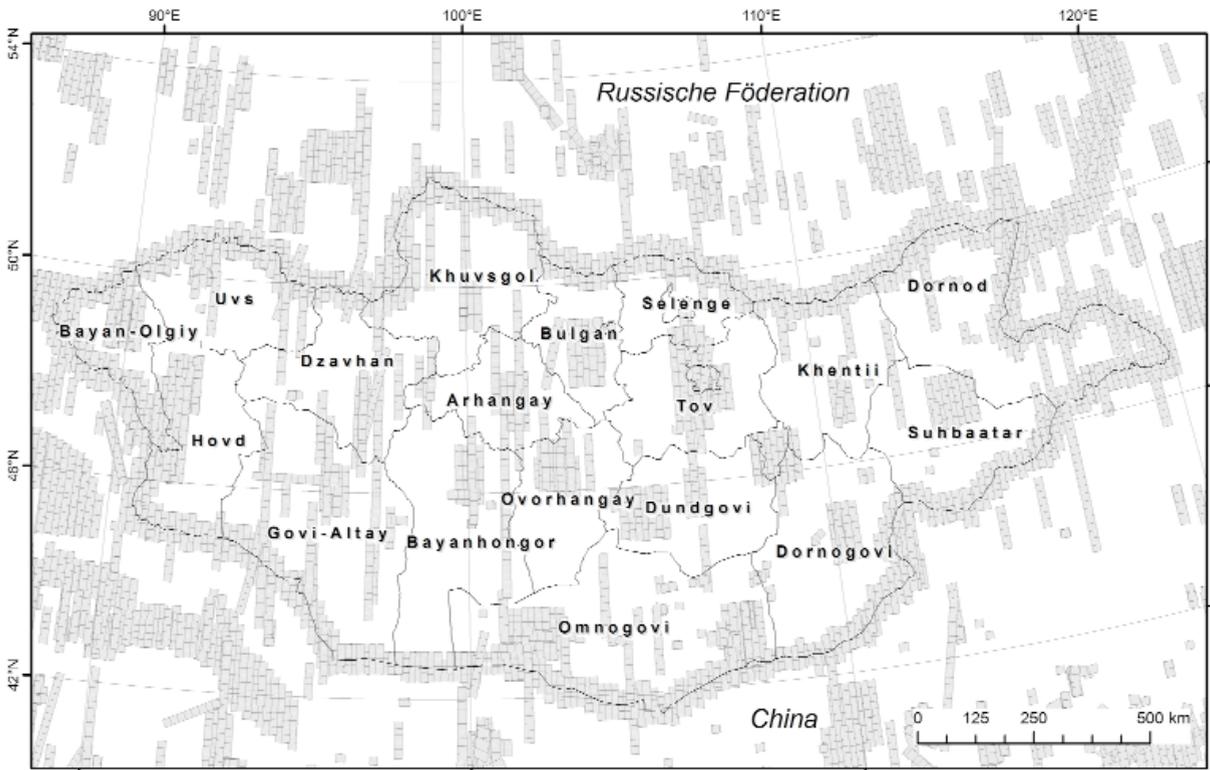


Abbildung 31: Räumliche Verteilung von QUICKBIRD Archivdaten, Stand: 27.04.2006. Quelle: DIGITALGLOBE

Inzwischen existiert eine hohe Anzahl von Archivbildern für das Gebiet der Mongolei, die insbesondere entlang der Grenzregionen zu China und Russland eine hohe Abdeckung aufweisen (vgl. Abbildung 31). Die Qualitätskontrolle (z.B. Wolkenbedeckungsgrad) ist online mit Hilfe von *Browse-Produkten* möglich¹⁰⁵. Die Bildprodukte werden über *DigitalGlobe* in drei verschiedenen Verarbeitungsstufen angeboten:

- *Basic Imagery*
- *Standard and Standard Ortho-Ready Imagery*
- *Orthorectified Imagery*

Die im Rahmen der Projektbearbeitung verwendeten Daten lagen als *Standard Ortho-Ready Imagery* vor, die vom Hersteller bereits auf das grobe SRTM-Höhenmodell GTOPO30 rektifiziert wurden und trotz Vorkorrektur einen Standardfehler von bis zu 14 m aufweisen können, so dass neben radiometrischen auch geometrische Korrekturen unter Verwendung entsprechender Bildverarbeitungssoftware notwendig sind (Eurimage 2006). Zu den Hochauflösenden kommerziellen Pan/Multispektralsatelliten gehört auch IKONOS, der seit 1999 durch *Space Imagine Corp* (USA) in

Betrieb ist. Im multispektralen Bereich weist IKONOS eine Auflösung von 4 m, im panchromatischen Bereich eine Auflösung von 1 m auf.

5.1.5 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Digitale Höhendaten der Erde gibt es in frei verfügbaren Versionen in einer Auflösung von 1 km des „*United States Geographical Survey*“ (USGS). Eine andere Möglichkeit stellen Daten der „*Shuttle Radar Topography Mission*“ (SRTM) dar, die über ein Radar System („*Interferometrisches Synthetisches Radar*“) an Bord der *Endeavour* während einer 11-tägigen Mission im Februar 2000 aufgenommen wurden. An der Mission waren Raumfahrtinstitute aus Deutschland (DLR), USA (NASA-JPL, NIMA) und Italien (ASI) beteiligt. Die Vorteile der SRTM Höhendaten liegen in der freien Verfügbarkeit¹⁰⁶ und in der nahezu globalen Abdeckung. So existiert seit Anfang 2004 ein konsistentes und kontinuierliches digitales, mittelauflösendes

¹⁰⁵ Online unter: <http://archive.digitalglobe.com/archive> [Stand: 12.08.2006].

¹⁰⁶ Die Rohdaten sind nach dem „*Freedom of Information Act*“ (FOIA) als „*public domain*“ (freie Geodaten im Sinne von freegis.org. Online unter: <http://freegis.org> [Stand: 10.08.2006] zu bezeichnen.



Abbildung 32: Vergleich von SRTM Höhendaten mit Isolinien und Höhenfestpunkten aus einer topographischen Karte im Maßstab 1: 100.000. *Links:* Ausschnitt aus einer 1° x 1° SRTM Kachel, *Mitte:* Ableitung von Isolinien mit einer Äquidistanz von 20 Metern und *Rechts:* Vergleich mit der topographischen Karte und den enthaltenen Höhenfestpunkten. Quelle: SRTM und TK 1: 100.000

Landschaftsmodell¹⁰⁷ mit einer erheblich besseren Qualität im Vergleich zu bislang erhältlichen Höhendaten. Die C-Band SRTM Daten liegen für alle 90 Meter (Qualitätsstufe SRTM-3) für einen bis zu sechs Höhenmeter genauen Punkt vor, für das Gebiet der USA liegt der Abstand sogar nur bei 30 Metern (Qualitätsstufe SRTM-1)¹⁰⁸. Die SRTM-Daten sind seit 2004 über das GLCF frei erhältlich und liegen im gleichen Blattschnitt wie die Landsat TM / ETM Daten vor, wodurch die Bestellung und gleichzeitige Verarbeitung erheblich vereinfacht wird. Allerdings weichen die Höhenangaben teilweise stark von den Rohdaten der NASA ab¹⁰⁹. Im Vergleich sind Höhendifferenzen von bis zu 50 Metern möglich. Die aufgearbeiteten Radaraufnahmen weisen jedoch in Bereichen mit stark variabler Morphologie

und in Gebieten mit Wasser- und Eisflächen aufgrund von „Layover“-Effekten und Radarschatten Datenlücken auf, die sich in den Datensätzen als Leerstellen bemerkbar machen¹¹⁰.

Die hohe Qualität der C-Band SRTM Daten und die Möglichkeit der Anwendung in den Bereichen der Geo- und Umweltwissenschaften werden von mehreren Autoren bestätigt (vgl. CZEGKA 2004, REICH & THIEL 2002). Diese mittelaufösenden Daten wurden als zusätzliche Informationsebenen für die Analyse und Klassifikation der Satellitendaten verwendet. Auf die Erstellung von Geländemodellen auf der Basis von Höhenlinien wurde im Rahmen der Projektarbeiten aufgrund der Großflächigkeit der Projektgebiete und aus Zeit- und Kostengründen weitestgehend verzichtet. Die SRTM Daten wurden für ausgewählte Projektgebiete anhand der zur Verfügung stehenden georeferenzierten russischen topographischen Karten im Maßstab 1: 100 000 auf Ihre Lage- und Höhengenaugkeit überprüft (vgl. Abbildung 32). Für die Stichproben wurden jeweils die Höhen aus dem SRTM Datensatz mit den in der Karte 1: 100.000 enthaltenen Isolinien und Höhenfestpunkten miteinander verglichen.

Der Vergleich zeigte, dass die geometrische Genauigkeit der Reliefpräsentation der SRTM Daten für Datenanalysen im mittleren Maßstabsbereich (1: 100 000 bis 1: 200.000) hinreichend genau ist. Die relativ niedrige Auflösung der SRTM Höhendaten von 90 Metern sowie die maßstabsbedingte Generalisierung der topographischen Karten 1: 100.000 führten zwar in einigen Bereichen zu Lageungenauigkeiten von bis zu 100 Metern, die mittlere Höhenabweichung liegt jedoch in der Regel im Bereich der Steppe und Waldsteppe bei 5 bis 10 Meter, in geschlossenen Waldbeständen erwartungsgemäß um ca. 20 m. Somit besteht mit den SRTM Daten eine durchaus qualitative und vor allem kosten-

¹⁰⁷ Da das C-Band und das X-Band die Vegetationsdecke nicht durchdringen, stellen die SRTM-Daten so genannte Digitale Oberflächenmodelle bzw. „Digital Surface Models“ (DSM) dar. Dadurch sind die Genauigkeiten in der Höhenangabe, abhängig von der Vegetations- oder Gebäudebedeckung, unterschiedlich. So sind auf vegetationsfreien Flächen Genauigkeiten von 3 m möglich, die in bewaldeten Bereichen über 25 m liegen können.

¹⁰⁸ In Folge der Ereignisse vom 11. September 2001 wird aus „Sicherheitsgründen“ nur die Qualitätsstufe SRTM-3 ausgeliefert. Die SRTM-1 Daten sind vorhanden und werden im militärischen Bereich genutzt. Diese sind nur für wissenschaftliche Zwecke auf Anfrage abrufbar.

¹⁰⁹ SRTM Daten, die jeweils ein Breiten- und Längengrad abdecken, sind über die NASA: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm> [Stand: 16.08.2006] im .hgt-Format erhältlich. Die Dateinamen geben die geographische Breite und Länge der 1° x 1° Kachel an, z.B. hat die Kachel N47E108 (*Mongonmorit soum*, Mongolei) ihre südwestliche Ecke bei 47° nördlicher Breite und 108° östlicher Länge. Zum Konvertieren der Daten in GeoTiff oder USGS ASCII DEM steht auch eine Reihe von frei erhältlichen Softwareprodukten z.B. 3DEM zur Verfügung.

¹¹⁰ Inzwischen sind über die NASA überarbeitete Versionen erhältlich, wo die Leerstellen anhand von Referenzdaten oder durch Interpolationsverfahren beseitigt wurden. Weiterhin sind die Wasserflächen ausmaskiert. Diese sind online unter: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddatapducts.html> [Stand: 26.10.2006] erhältlich.

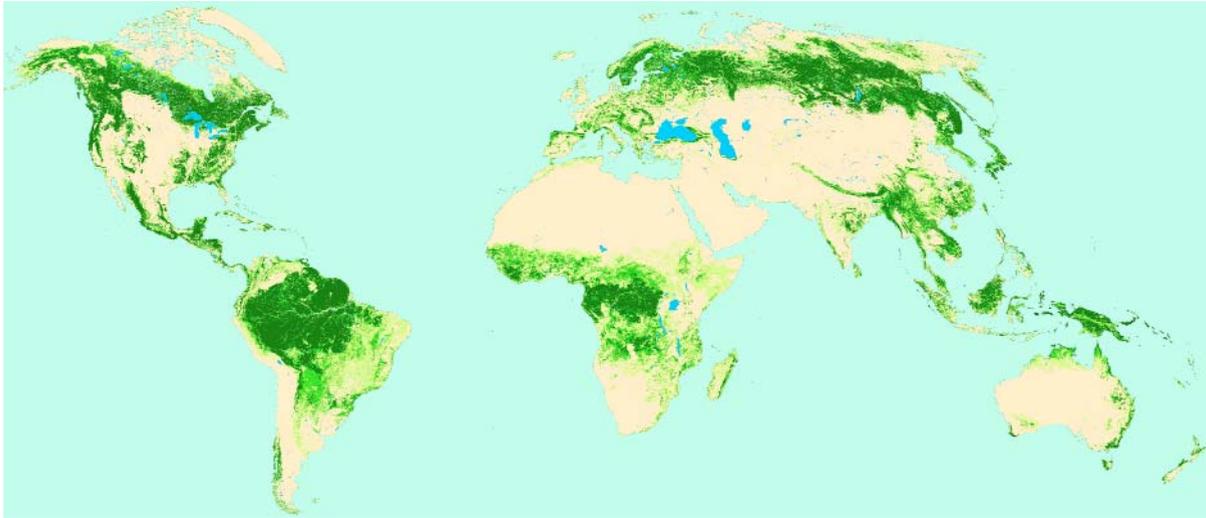


Abbildung 33: FRA 2000 (*Global Forest Resources Assessment*), Quelle: USGS

günstige Alternative für die Durchführung von Reliefanalysen beispielsweise in Bezug auf die Untersuchung der höhen- und expositionsabhängigen Waldtypenverteilung (vgl. Kapitel 7.1.2).

5.1.6 Globale Vegetationskartierungen

Für überregionale oder globale Vegetationskartierungen sind Satellitendaten nicht nur nützliches Hilfsmittel, sondern eine unverzichtbare Voraussetzung, um ökologische und klimatische Entwicklungen verfolgen zu können. Hierfür sind globale Vegetationsinventuren erforderlich, die eine möglichst methodisch einheitliche und sich wiederholende Informationsbeschaffung gewährleisten. Neben den in Kapitel 5.1.2 beschriebenen MODIS „Land Cover“ Produkten und Klassifikationsalgorithmen haben inzwischen eine Reihe von internationalen Organisationen globale Inventurprojekte gestartet, in denen jeweils Satellitendaten als Hauptinformationsquelle dienen. Das *Forest Resources Assessment 1990* (FRA 1990) der FAO war eines der ersten und umfangreichsten Projekte für die Kartierung von Wäldern. Ziel der Studie war die globale Feststellung der Waldflächenentwicklung zwischen 1980 und 1990, wobei das Hauptaugenmerk auf den Tropen lag. Das Verfahren basierte auf NOAA Daten, die anhand von Landsat-basierten Stichproben verifiziert wurden. Alle zehn Jahre berichtet das FAO über den Zustand und die räumliche Veränderungen der globalen Waldressourcen. Die derzeit aktuelle Darstellung (vgl. Abbildung 33) basiert auf einer Erfassung aus dem Jahr 2000 (FRA 2000). Die Karte der globalen Waldressourcen wurde aus der bestehenden GLCC („*Global Land Cover Characteristics*“) Datenbank¹¹¹ abgeleitet und

weist eine räumliche Auflösung von 1 km auf. Der Datensatz beinhaltet die folgenden generalisierten Klassen:

- Geschlossene Waldflächen
- Offener Wald
- Sonstige Waldflächen
- Sonstige Landbedeckung
- Wasser

In Europa liegt inzwischen ein einheitliches Informationssystem zur Bewertung des Umweltzustandes vor. Die CORINE Daten¹¹² basieren auf Satellitenaufnahmen (Erdbeobachtungssatelliten Landsat 5 und Landsat 7) um das Jahr 2000, die nach abgestimmter Methodik interpretiert wurden. Diese Auswertung machte deutlich, welche Veränderungen sich seit 1990 (erstmalige europaweite Auswertung) vollzogen haben und wie sich zum Beispiel der anhaltende Trend der Flächenversiegelung in den Außenbereichen der Städte oder Renaturierungsmaßnahmen in Tagebaugebieten über die Jahre ausgewirkt haben.

Über GLCF sind ebenfalls Globale Produkte in einer räumlichen Auflösung von 1 km erhältlich¹¹³. In den letzten Jahren wurde am GLCF eine Vielzahl von Methoden zur Verbesserung der globalen Klassifikationen erprobt, um diese im Rahmen eines globalen Vegetationsmonitorings einzusetzen. Die Produkte

¹¹² CORINE Daten („*Coordinated Information on the Environment*“) sind auf der CORINE Website des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) verfügbar.

¹¹³ Folgende Formate stehen zur Verfügung: Goods's Projektion und Lat-Long Projektion im BSQ (Binary) und ASCII Grid Format. Daten sind online unter <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landcover/data.shtml> [Stand: 06.08.2006].

¹¹¹ Die frei zur Verfügung stehenden Daten sind online unter <http://edcscs17.cr.usgs.gov/glcc/> [Stand: 06.09.2006] erhältlich.

basieren, wie auch bei den FRA der Jahre 1990 und 2000, auf NOAA-AVHRR Beobachtungen, die innerhalb eines Zeitraumes von 14 Jahren (1981-1994) durchgeführt wurden. Bei der Klassifizierung wurden neben Vegetationsindizes (NDVI) auch die Infrarot- und Thermalbänder des NOAA-Sensors berücksichtigt, um die Vegetationsdifferenzierung zu optimieren. Die insgesamt 14 Klassen orientieren sich am Klassifikationsschema des IGBP.

An dieser Stelle ist auch das „Global Vegetation Monitoring Unit“ (GVM) des „Joint Research Centre der EC“ (JRC)¹¹⁴ zu nennen, die seit dem Jahr 2000 für die Koordinierung und Implementierung des „Global Land Cover 2000“-Projektes in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern zuständig war. Seit 2003 stehen konsistente globale und regionale Vegetationskartierungen auf der Basis von SPOT VGT (Vegetation) – Aufnahmen des Jahres 2000 kostenlos zur Verfügung¹¹⁵.

5.2 Möglichkeiten und Grenzen der Klassifizierung von Waldbeständen

Die heutigen Daten der Fernerkundung liegen fast ausschließlich nur noch in digitaler Form vor. Mit der rasanten Entwicklung im Bereich der digitalen Systeme wird zunehmend versucht, die Leistungsfähigkeit des Menschen durch numerische und rechnergestützte Verfahren schrittweise zu approximieren. Nach HILDEBRANDT (1996) können bei der thematischen Auswertung von Fernerkundungsdaten die Methoden der visuellen Interpretation, der rechnergestützten numerischen Klassifizierung, der Identifizierung von Objekten an ihren Formen (Mustererkennung) und der Erkennung von Veränderungen im Objektfeld einer Aufzeichnung („Change Detection“) unterschieden werden. An diesen Methoden hat sich auch zehn Jahre später prinzipiell nichts geändert. Wie viel aus dem Satellitenbild visuell interpretiert wird, hängt wesentlich vom Erfahrungsschatz des Interpreten ab. Anhand von grundlegenden räumlichen Informationen und unter Zuhilfenahme seines Wissens über Objekteigenschaften und aufgrund seiner Kombinations- und Assoziationsfähigkeit können Teilinformationen erfasst bzw. herausgefiltert werden, die für eine spezifische Fragestellung relevant sind. Dabei fließen spektrale und textuelle Merkmale (wie Grau- bzw. Farbtöne, Helligkeit, Muster und Textur, Form, Größe, Lage etc.) aber auch Nachbar-

schaftsbeziehungen zwischen den Objekten in die Auswertung mit ein. Die Qualität der visuellen Interpretation kann mit Hilfe von digitalen Bildverarbeitungsverfahren verbessert werden. Hierzu gehören beispielsweise die Änderung von Farbuordnung und/oder Farbintensität durch verschiedene Ratio-, Dehnungs- oder Glättungsfilter, die zu einer großen Anzahl von Farbkombinationen und Farbabstufungen führen (vgl. Kapitel 6.3.2). Der große Nachteil der visuellen Interpretation ist, dass die Ergebnisse immer subjektiv und nur eingeschränkt nachvollziehbar sind.

Die kritische Trennung von Objekten und die Durchführung von komplexen Beobachtungsprozessen sind im Rahmen einer rein digitalen Interpretation nicht realisierbar, da die „kognitive Erfahrung“ des menschlichen Interpreten fehlt. Schwierigkeiten bestehen insbesondere bei der Erfassung unscharfer Grenzen und breiter Übergangszonen sowie in der Objektgeneralisierung. Alle in der digitalen Interpretation eingesetzten Verfahren beruhen auf spektralen Reflexionseigenschaften bestimmter Objekte bzw. Objektklassen, die sich entweder unterscheiden oder statistisch ähnliche spektrale Signaturen aufweisen. Durch die Minimierung störender atmosphärischer Einflüsse oder reliefbedingter Beleuchtungsunterschiede im Rahmen der Bildverarbeitung kann die spektrale Trennbarkeit erhöht und damit auch das Klassifizierungsergebnis verbessert werden. Die Vorteile der digitalen Klassifizierung liegen auf jeden Fall in der statistischen Objektivität und der mathematisch-physikalischen Nachvollziehbarkeit. Des Weiteren liegen die Ergebnisse gleich in digitaler Form vor, die dann problemlos in ein GIS überführt und weiterverarbeitet werden können. Ebenfalls ist der Zeit- und Kostenfaktor im Vergleich zur visuellen Interpretation wesentlich geringer.

Die Bestrebungen bei der Entwicklung von Auswertungsverfahren gehen dahin, die Vorteile beider Methoden im Sinne einer wissenschaftlichen digitalen Klassifikation unter Einbeziehung von Zusatzinformationen wie beispielsweise Vegetationsindizes, Reliefparametern und anderen thematischen Ebenen (z.B. Forsteinrichtungskarten) als Referenzdaten zu synthetisieren (vgl. Kapitel 7.1). In der Regel ist es sinnvoll, bei der digitalen Klassifikation hierarchisch vorzugehen. So könnte die Objektklasse „Wald“ in weitere Hierarchiestufen, etwa in Nadelwald und Mischwald, untergliedert werden. Welche hierarchische Ebene letztendlich erreicht werden kann, hängt maßgeblich von dem zur Verfügung stehenden Zusatzmaterial ab.

Nach wie vor ist festzuhalten, dass die inhaltliche Tiefe der Auswertung von Satellitendaten im forstlichen Bereich nicht in allen Fällen die Erwartungshaltung der Anwender erfüllt. Oft sind die mit den derzeit verfügbaren multispektralen Satellitendaten trennbaren Klas-

¹¹⁴ Online unter <http://www.jrc.cec.eu.int> [Stand 03.12.2006].

¹¹⁵ Die Vegetationskartierungen liegen in geographische Koordinaten, sowie in ESRI-Formaten vor so das eine direkte GIS-Integration möglich ist und sind online unter: <http://www.gem.jrc.it/glc2000> [Stand: 08.08.2006] erhältlich.

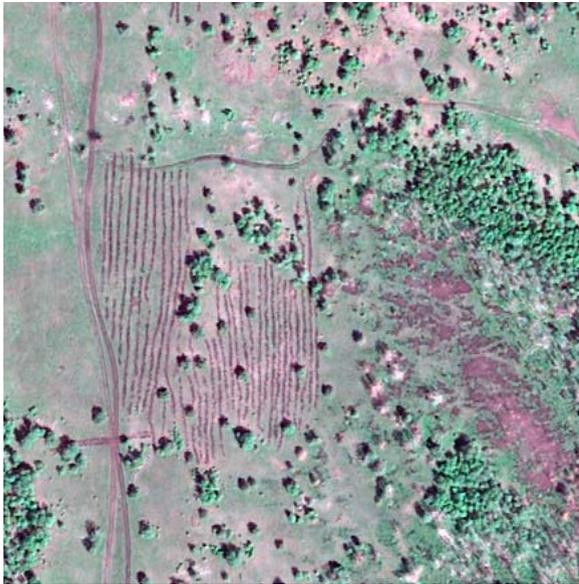


Abbildung 34: Erkennung von Einzelbäumen und Aufforstungsrinnen in einer QuickBird-Aufnahme (Projektgebiet Bayangol, Mandal Soum). *Oben:* Aufforstungsrinnen am Wegesrand. *Unten:* Birken (hellgrün) und Kiefern (dunkelgrün). Bandkombination: 3,2,1 (RGB). Datenquelle: DIGITAL-GLOBE

sen, wie beispielsweise Wald und Nichtwald oder Laub-, Nadel- und Mischwald, nicht detailliert genug (KELLENBERGER 1996 BODMER, 1993). Daher hat sich die Fernerkundung, trotz intensiver Forschungsaktivitäten, bisher nur bedingt als Werkzeug zur Datenerhebung im Rahmen der forstlichen Planung durchsetzen können. Dies liegt sicherlich an den bisher operational eingesetzten optischen Fernerkundungsdaten. Geokodierte Merkmale wie Baumartenverteilung,

Schichtaufbau, Totholzanteil oder Bestandesalter können mit der räumlichen und thematischen Auflösung der verfügbaren Sensoren nicht reproduziert werden, so dass mit Hilfe von Satellitendaten nur ein limitierter Satz von Merkmalen erfasst werden kann, der bei Weitem nicht alle Informationsbedürfnisse einer Planung im Sinne der nachhaltigen Sicherung der Vielfachfunktionen von Wäldern abdeckt. Ähnliche Probleme bestehen auch im Bereich der Waldschadenserfassung. Nachteilig bei den hochauflösenden Satellitenbilddaten wie z.B. Landsat oder ASTER ist die Tatsache, dass Schadflächen durch Waldbrand oder Insektenbefall erst ab einer Größe von ca. 1 ha erkannt werden können. Eine differenzierte Interpretation von Veränderungen an Kronenstruktur und Astsystemen (Kronenzustandsansprache) sind nur mit Einschränkungen möglich (ALBERTZ 2001).

Ziel muss daher sein, die Fernerkundung auf möglichst effiziente Weise mit terrestrischen Erhebungen zu kombinieren. Die derzeitige Entwicklung hin zu höchstauflösenden Sensoren wie z.B. QuickBird oder IKONOS sowie Hyperspektralsensoren¹¹⁵ und den dazugehörigen Analyseverfahren bietet die Möglichkeit, vor allem hinsichtlich der inhaltlichen Auflösung und Genauigkeit, diesen Sprung zu schaffen. Die erhöhte geometrische Auflösung bietet insbesondere in kleinflächig bewirtschafteten Gebieten bessere Interpretationsmöglichkeiten, da der Anteil der Mischpixel reduziert wird. Die bessere räumliche Auflösung bei IKONOS (1 m im panchromatischen und 4 m im multispektralen Bereiche) und die bessere radiometrische Auflösung bieten gerade in inhomogenen Waldgebieten mit geringen Waldschäden neue Anwendungsmöglichkeiten. Einzelne Pixel weisen nicht mehr nur eine Mischsignatur von z.B. Baumkronen, Bodenvegetation, Boden und Schatten auf, sondern annähernd reine Spektralwerte. So werden auch Subobjekte bei zunehmender geometrischer Auflösung detektier- und identifizierbar. Abbildung 34 zeigt Ausschnitte aus einer QuickBird-Szene, in denen einzelne Objekte wie Aufforstungsrinnen und Einzelbäume (Birken und Kiefern) im fusionierten Produkt mit einer Auflösung von 0.6 Metern sehr gut erkennbar sind.

¹¹⁵ Systeme, die im optischen Spektralbereich eine nahezu kontinuierliche spektrale Abdeckung sowie eine hohe spektrale Auflösung erreichen und somit über eine große Anzahl von Aufnahmekanälen verfügen, werden als Bildspektrometer oder Hyperspektralsensoren bezeichnet (BALL 1995). Beispielsweise ist der Start des hyperspektralen EnMAP-Sensors („*Environmental Monitoring and Analysis Program*“) im Jahr 2009 geplant. Der Sensor verfügt über 200 kontinuierliche spektrale Bänder mit einer Wellenlänge von 420 bis 2450 µm (davon 96 Bänder im VNIR und 122 Bänder im SWIR-Bereich) sowie eine räumliche Auflösung von 30 m und einen Abdeckungsbereich von 30 km.

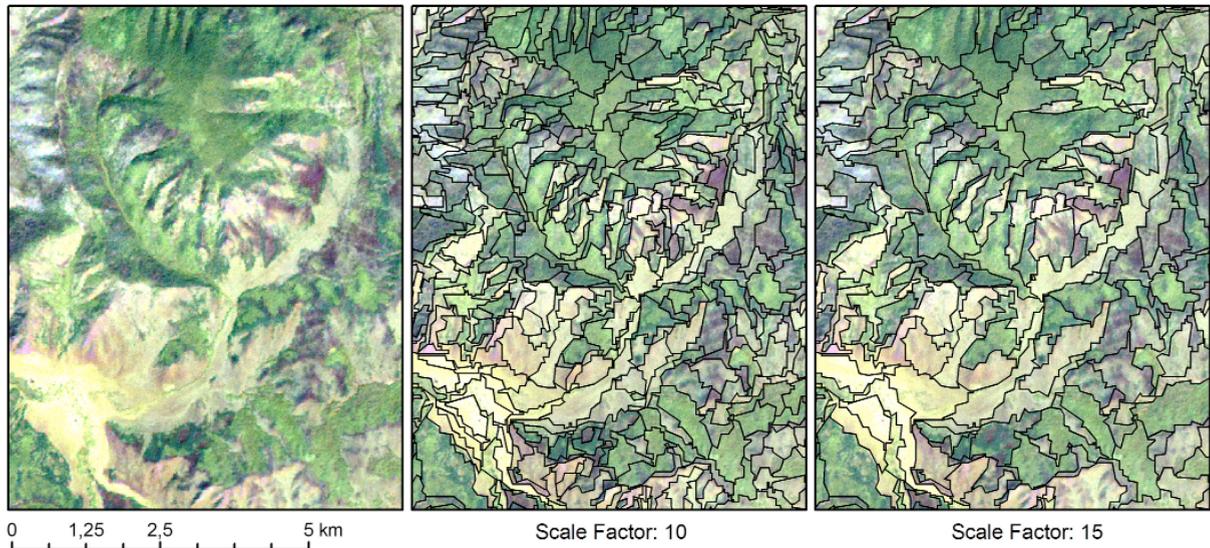


Abbildung 35: Segmentierungsergebnis einer LANDSAT 7 ETM+ Satellitenbildszene mit unterschiedlichen Generalisierungsstufen („Scale Factor“). Projektgebiet *Khont, Selenge Aimag*

Allerdings wird die pixelbasierte digitale Klassifikation von höchstauflösenden Satellitendaten durch die resultierenden, sehr kleinräumigen Klassifizierungsergebnisse („Salt and Pepper Effect“) erschwert (KENNEWEG et al. 1991). Somit wird die integrierte Nutzung innerhalb eines GIS problematisch. Zur Lösung dieses Problems bietet sich die so genannte segmentbasierte Klassifikation mit Hilfe der Software *eCognition* der Firma Delphi2™ an (BAATZ 1999). Die Mustererkennung durch Delphi2™ folgt einem objektorientierten Bildverarbeitungskonzept. In einem ersten Schritt wird der Bildraum in homogene Regionen mit ähnlichen spektralen Informationen nach einem automatisierten Verfahren segmentiert (PAL et al. 2000). Dafür werden neben der spektralen Information des mehrdimensionalen Merkmalsraumes auch Form- und Textureigenschaften verwendet. Im Ergebnis entstehen im Bildraum so genannte Objektprimitive mit entsprechenden Attributen, die im Anschluss über benutzerdefinierte Regeln zu Objektklassen zusammengefasst werden können. Bei jedem Aggregationsschritt können auch andere räumliche Objekte aus existierenden Geodatenbanken in den Prozess einbezogen werden. Durch die GIS-Kompatibilität bildet die objektbezogene Klassifikation eine direkte Schnittstelle zwischen bereits existierenden GIS Datenbeständen und der Fernerkundungsdatenauswertung.

Die Anwendung von objektbasierten Klassifikationsverfahren setzt sich seit der Einführung von *eCognition* im Jahr 1999 immer häufiger für die Erfassung von Landbedeckungsklassen durch. Eine praxisorientierte Anwendung zu Waldmonitoring und Klassifikation im Bereich der Bayerischen Alpen wurde im selben Jahr

in mehreren Publikationen präsentiert (DE KOK et al. 1999). Aktuelle Arbeiten zu dieser Methodik konzentrieren sich auf die Eignung und Qualität dieser Methodik für fernerkundliche Anwendungen (BLASCHKE 2000, BENZ et al. 2004) oder auf den Vergleich von klassischen rein pixelbasierten Methoden mit objektbasierten Klassifikationen (ORUC et al. 2004, KOCH et al. 2003). Trotz den in der Regel besseren Klassifizierungsergebnissen im Vergleich zur pixelorientierten Klassifikation – dies gilt insbesondere für höchstauflösende Satellitenbilder – gibt es auch Schwächen, die vor allem in der Segmentierung liegen. Diese erfolgt über die iterative Auswahl einer Skalierung („Scalefactor“), die der subjektiven Wahrnehmung des Bearbeiters unterliegt, wodurch die Übertragbarkeit des Verfahrens wesentlich eingeschränkt wird (vgl. Abbildung 35.). Darüber hinaus erfolgt durch die Segmentierung eine Objektgeneralisierung, die einerseits Vorteile hat, da sie der menschlichen Wahrnehmung entgegenkommt, aber auch Informationsverlust beinhaltet. So gehen wichtige Details wie beispielsweise Bestandslücken, Mischungsverhältnisse innerhalb von Mischbeständen, Anteile an offenem Boden usw. im Vergleich zu einer qualitativ hochwertigeren, aber gleichzeitig sehr zeitintensiven visuellen Interpretation, verloren. Pixelbasierte Verfahren haben im Vergleich zur objektbasierten Klassifikation den Vorteil, dass jedes Pixel für den Nutzer aufgrund seiner statistischen Merkmale nachvollziehbar einer eindeutigen Klasse zugeordnet wird. Damit ist das Ergebnis besser nachzuvollziehen und der subjektive Einfluss des Bearbeiters wird sehr gering gehalten. Darüber hinaus unterbleibt jede Art von Generalisierung.

5.3 Satellitenbildgestützte Erfassung von Waldbränden

Ein Pauschalurteil des Phänomens Feuer kann nicht ohne Weiteres gefällt werden. Das Verstehen der Zusammenhänge, Abschätzen von Risiken und Feuer-Management sind heute nach den Erfahrungen der Vergangenheit von enormer Bedeutung. Von vielen Forschern wird eine genaue und systematische Überwachung von globalen Vegetationsbränden gefordert, um genauere Daten über die weltweit vorkommenden Vegetationsbrände, und deren Lokalisierung nach Ökosystemen zu erhalten. Die Fernerkundung kann als interdisziplinäre Anwendung auf diesem Gebiet einen bedeutenden Beitrag leisten. Zum einen steigt die zeitliche Verfügbarkeit von Daten seit Jahren kontinuierlich, zum anderen lassen sich heute mit verschiedenen Satellitensystemen mehrere räumliche Dimensionen (Multisensor Projekte) erfassen. Die wichtigsten Faktoren, die den Nutzen der Fernerkundungsdaten im Bereich der Naturgefahren bestimmen, sind Maßstab, räumliche, spektrale und zeitliche Auflösung. Ebenfalls nicht zu vernachlässigen sind die Flächenabdeckung, radiometrische Eigenschaften, Datenkosten und Verfügbarkeit. Im Idealfall sollte in geographischen Regionen, wo aus unterschiedlichen Gründen eine schnelle Reaktionszeit gefordert ist (z.B. Nähe zu Siedlungsbereichen), eine operationelle, satellitengestützte Detektierungsmethode entwickelt werden, die in nahezu Echtzeit (alle 5-15 Minuten) die Entscheidungsträger über Brandereignisse und deren Intensität informiert. Die zurzeit angewendeten Fernerkundungsdaten und -methoden genügen diesen Ansprüchen einer Echtzeitüberwachung von Feuerherden allerdings (noch) nicht.

Die systematische Erfassung und das Monitoring von Waldbränden haben ihren Ursprung in den 80er-Jahren und basieren auf dem AVHRR an Bord des NOAA Satelliten (DOZIER 1981, ROBINSON 1991). Im Rahmen einer internationalen Initiative zur Entwicklung einer globalen 1 km AVHRR Datenbank des IGBP wurden Ergebnisse der globalen räumlichen und zeitlichen Verteilung von Vegetationsbränden innerhalb eines 12-monatigen Zeitraumes (April 1992 bis März 1993) (DWEYER et al. 2000) mit Forschungsschwerpunkten in den Tropen und auf dem afrikanischen Kontinent erarbeitet. Verwendung fanden die Kanäle 3 und 4, welche die spektralen Wellenlängen von 3,55-3,93 μm (mittleres Infrarot) und 10,3-11,3 μm (thermales Infrarot) aufzeichnen. Kanal 3 erwies sich hier als besonders nützlich, um heiße Flächen wie Feuer zu detektieren. Für die Detektion von Bränden wurde im Projekt ein spezieller Algorithmus entwickelt, der in verschiedenen Naturräumen und zu verschiedenen Jahreszeiten angewendet werden kann (DWEYER et al. 2000). Die NOAA Sensoren sind eigentlich nicht für die Erfassung

von aktiven Feuern konzipiert worden und haben daher den Nachteil, dass die Kanäle, die das Feuer erfassen können, oft schnell gesättigt sind. Jedoch gelingt es, mit dem AVHRR aktive Brandherde zu erfassen. Das erste Instrument mit Kanälen, die speziell für die Erfassung von Bränden entwickelt wurden, ist der *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (KAUFMANN et al. 1998). Die Feuererkennung von MODIS basiert auf dem gleichen Algorithmus, der unter anderem für den AVHRR-Sensor entwickelt wurde. Zur Erfassung von aktiven Feuern werden die spektralen Kanäle 21 und 22, die für den gleichen Bereich des mittleren Infrarots (MIR) sensibilisiert sind (3,929 μm bis 3,989 μm), sowie der 31 Kanal des thermalen Infrarots (TIR: 10,8-11,3 μm) verwendet. Der 2 Kanal, der für das nahe Infrarot (NIR: 0,84-0,88 μm) sensibilisiert ist, wird für die Validierung der erfassten thermalen Anomalien genutzt¹¹⁷. MODIS ist in der Lage, flammende und schwelende Feuer ab einer ungefähren Flächengröße von 1 km² zu erkennen. Unter sehr guten Bedingungen, d.h. geringer oder fehlender Rauchentwicklung sowie relativ homogenen Geländeformen, liegt die kleinste erfassbare Fläche bei ungefähr 100 m². Allerdings ist hierbei von einer Klassifizierungsgenauigkeit von maximal 50% auszugehen (MORISSETTE et al. 2005).

Die MODIS Feuerprodukte sind über das *Distributed Active Archive Center* (DAAC) der NASA im HDF-EOS Format (hierarchisches Datenformat) kostenlos erhältlich¹¹⁸. Nach Giglio (2005) sind die HDF-Dateien mehr oder weniger selbstbeschreibend, das heißt, sie besitzen eine umfangreiche Menge von Metadaten, die in einer Textdatei (XML-Datei) zusammengefasst sind. Die MODIS Feuerprodukte haben den entscheidenden Vorteil, dass dem Nutzer neben den aktuellen auch alle Archivdaten (seit November 2000) für die Durchführung eines Langzeitmonitorings zur Verfügung stehen. Bei den so genannten MOD14A1 und MOD14A2 Produkten (vgl. Tabelle 8) handelt es sich um kachelbasierte Produkte mit einer räumlichen Auflösung von 1 km und einer zeitlichen Auflösung von 1 bis 8 Tagen. Pixel, die nicht verifiziert werden können, werden als „*Missing Data*“ klassifiziert. Wolken und Wasserflächen werden mit Hilfe von erstellten Datenmasken für den Nutzer im Endprodukt entsprechend kodiert. In den hierarchisch organisierten HDF-Files ist ebenfalls eine qualitative Komponente, die den Nutzer über die Wahrscheinlichkeit eines Brandes informiert, enthalten. Die

¹¹⁷ Eine ausführliche Beschreibung dieses Vorgangs sowie des gesamten MODIS-Feuer-Detektions-Algorithmus kann in JUSTICE et al. (2002) nachgelesen werden.

¹¹⁸ Online unter EOS DATA Gateway: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/> [Stand: 15.08.2006].

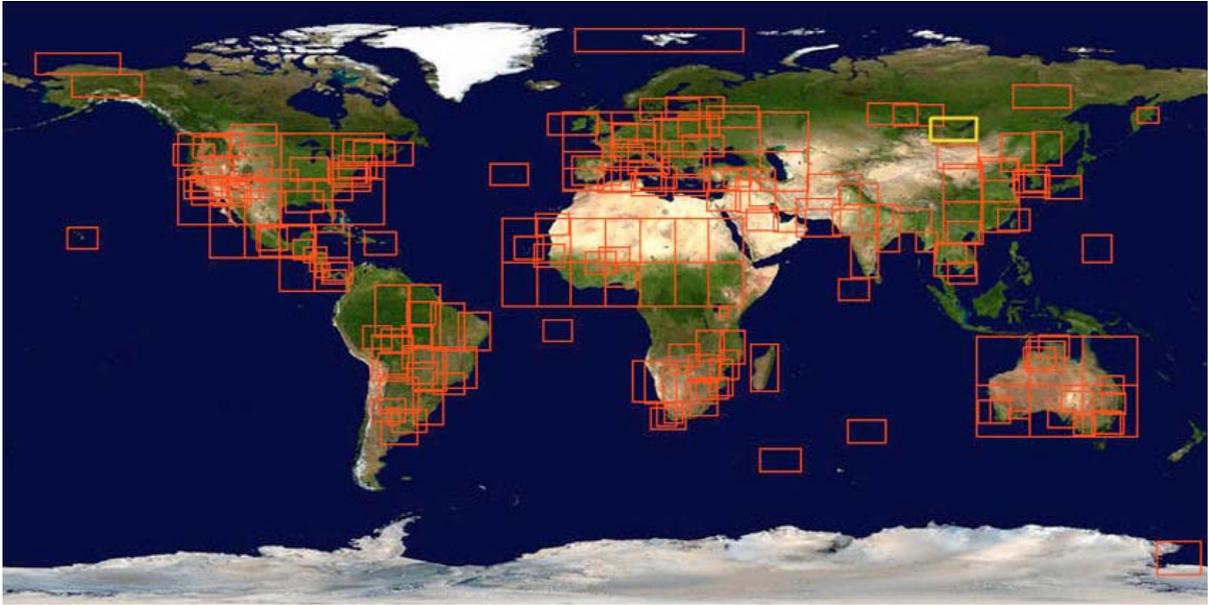


Abbildung 36: MODIS Rapid Response-System. Übersicht der „Near-real-time“ Satellitenbild-Teilgebiete. Der gelbumrandete Ausschnitt (AERONET_Irkutsk) deckt Teilbereiche der mongolischen Waldbestände ab. Quelle: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov> [Stand: 15.08.2006]

Brandpixel werden in drei Wahrscheinlichkeitskategorien eingeteilt (*high, nominal oder low confidence*). Aufgrund der vergleichsweise geringen Pixelzahl in der Klasse „*low confidence*“ wurden diese Pixel bei der Datenauswertung für die *Khentii*-Region (vgl. Kapitel 7.2) miteinbezogen. Zur Datenkonvertierung (.HDF zu GeoTIFF) und zur Projektion der in einer *Sinusoidal* Projektion vorliegenden Kacheln stehen eine Vielzahl von Werkzeugen, z.B. das Java-basierte MRTOOL (*MODIS Reprojection Tool*)¹¹⁹, zur Verfügung. Diese Tools ermöglichen auch eine Umprojizierung in gängigere, GIS unterstützte geographische oder kartesische Projektionen (z.B. UTM).

Für ein effektives Feuer Management sind Daten in einer noch höheren zeitlichen Auflösung erforderlich. Das MODIS *Rapid Response System*¹²⁰ bildet hierfür einen ersten Schritt und wurde im April 2001 initiiert. Seitdem stehen tägliche Feuerprodukte in *Near-real-time* als JPGs für derzeit insgesamt 200 Teilgebiete online zur Verfügung (vgl. Abbildung 36). Diese werden innerhalb von 2 bis 4 Stunden nach der Aufnahme für feuerinteressierte Nutzer bereitgestellt (JUSTICE et al. 2002).

Die ausgewerteten Feuerpixel (1 km Auflösung) werden mit den multispektralen MODIS TERRA Satellitenbilddaten kombiniert, um eine gute geographische Lokalisierung der Feuereignisse zu ermöglichen. In Abbildung 37 sind die rot gekennzeichneten Frühjahrsbrände des Jahres 2006 im Südosten des *Khovsgol-Nuur* Sees (*Khovsgol-Aimag*, Mongolei), sowie die verbrannten Bereiche nach dem Brandereignis (26.05.2006) auf der Basis des multispektralen Satellitenbildes in der vorliegenden Auflösung von 250 m, gut zu erkennen.

Über den an der University of Maryland entwickelten, auf *ArclMS (Internet Map Server)* basierten „*Web Fire Mapper*“¹²¹ sind die aktuellen MODIS Feuer Ereignisse in nahezu Echtzeit sowie archivierte Daten für verschiedene Regionen interaktiv erhältlich. Der „*Map Server*“ ermöglicht auch eine zusätzliche Visualisierung von Geodaten (z.B. administrative Grenzen). Brände können für die letzten 48 Stunden, im 7-Tages-Intervall oder selektiv für einen bestimmten Zeitraum abgerufen werden die dann auch als Vektordaten (Punkte) im SHAPE-Format herunterladbar sind. Der „*Web Fire Mapper*“ ist insbesondere für die schnelle Erfassung und Visualisierung von Brandereignissen sowie für die Identifizierung von potenziellen Problemgebieten

¹¹⁹ Online unter <http://lpdaac.usgs.gov/datatools.asp> [Stand: 05.08.2006]

¹²⁰ Online unter <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov> [Stand: 15.08.2006]

¹²¹ Online unter <http://maps.geog.umd.edu/> [Stand: 15.08.2006]

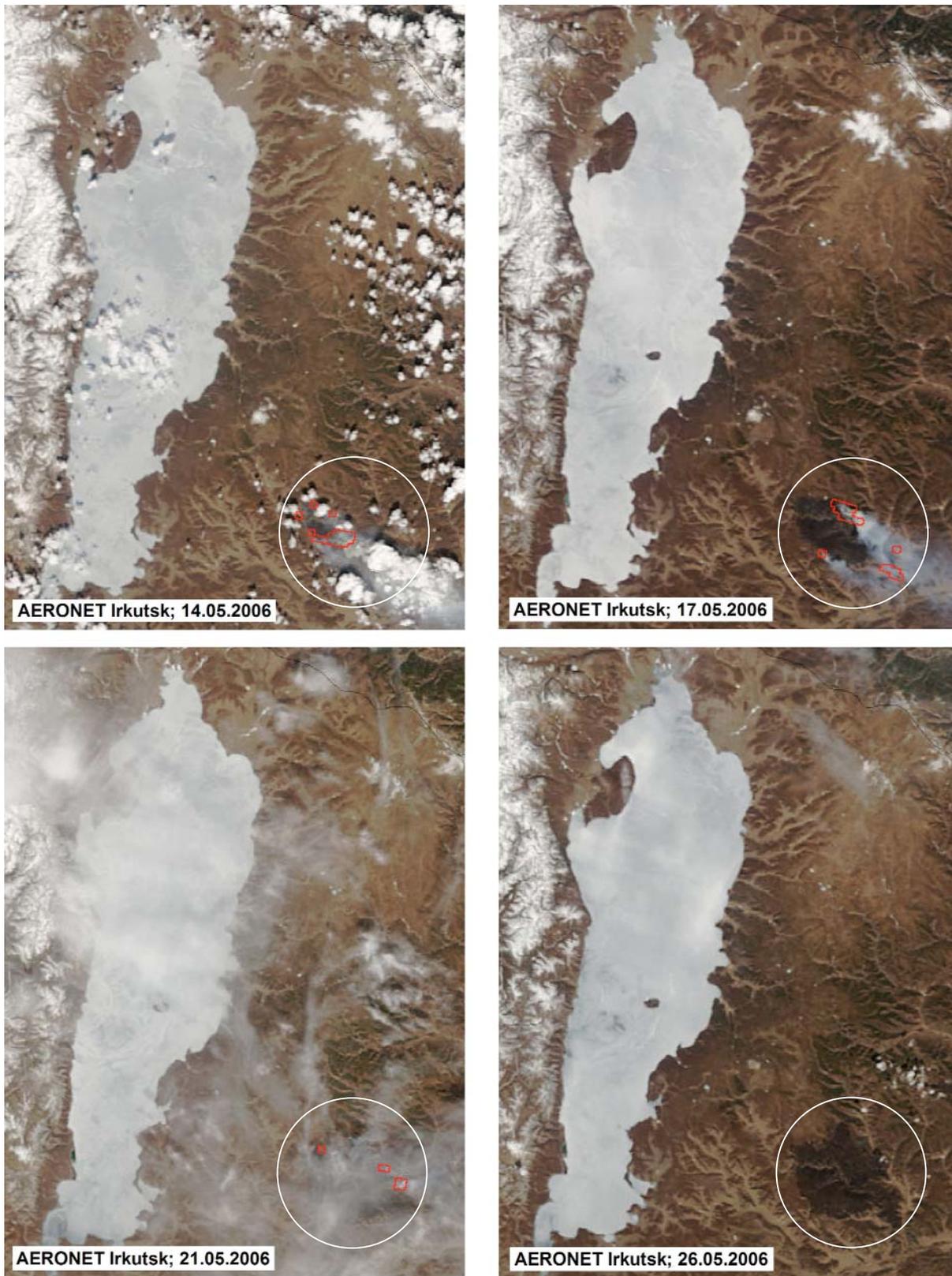


Abbildung 37: Visualisierung von aktiven Bränden im Südosten des *Khovsgol-Nuur* Sees, *Khovsgol* Aimag, Mongolei vom 14.05.2006 bis 26.05.2006. Quelle: http://rapidfire.sci.gfc.nasa.gov/subsets/AERONET_Irkutsk [Stand: 15.08.2006]

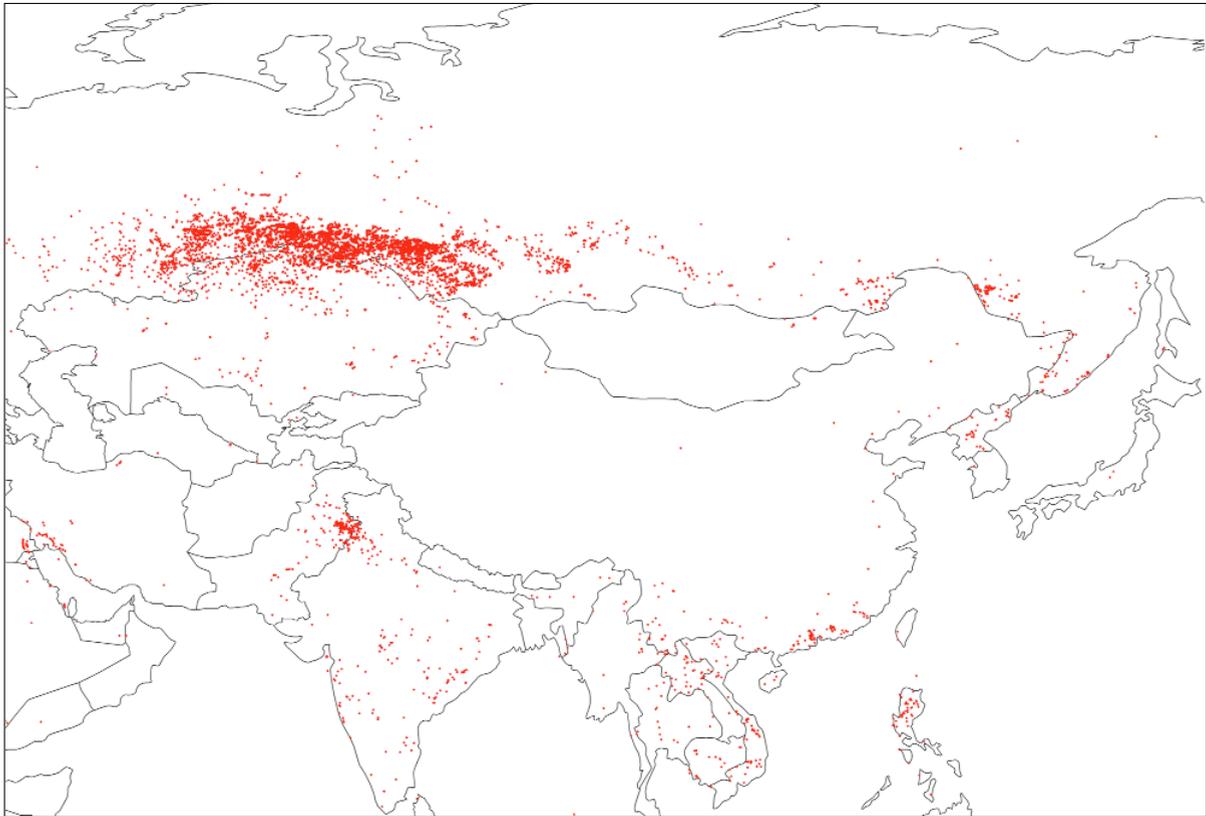


Abbildung 38: Ausschnitt aus dem „Web Fire Mapper“ für den 14-tägigen Zeitraum: 04.05.2006 bis 11.05.2006.
Quelle: <http://maps.geog.umd.edu/> [Stand: 15.08.2006]

geeignet. Abbildung 38 zeigt die Mongolei zu Beginn der Brandperiode 2006. Bis auf einzelne Brandereignisse im Nordosten des Landes erscheint die Mongolei im Vergleich zu weiter westlichen sibirischen Regionen brandfrei. Im Jahresverlauf 2006 war eine insgesamt geringe Brandhäufigkeit festzustellen. Dies lag an den vergleichsweise höheren Niederschlägen im Jahr 2005, die sich im Jahr 2006 fortsetzten und zu einer Minderung der Brandgefährdung führten (vgl. Kapitel 7.2.1).

Mittels NOAAH/AVHRR oder MODIS stehen somit kostengünstige Produkte für die Bereiche Umweltmanagement und -monitoring zur Verfügung. Die hohe zeitliche Auflösung der abgeleiteten Produkte (bei MODIS fließen Tag- und Nachtaufnahmen ein) kompensiert die relativ geringe räumliche Auflösung von 250 m bis 1 km. Beide Sensoren liefern zudem überregionale, konsistente und flächenhafte Informationen über die Landoberfläche und ermöglichen somit auch eine grenzüberschreitende räumliche Analyse der Brandhäufigkeit sowie eine Identifizierung von Risikogebieten. Detailkartierungen zur Erfassung des brennbaren Materials und zur genauen Bestimmung des Ausmaßes der Brandfläche und somit auch der Schadensschätzung können in einem zweiten Schritt mit

Hilfe von höherauflösenden Satellitenbilddaten (z.B. Landsat ETM+ und ASTER) durchgeführt werden (vgl. Kapitel 7.2.4).

Gegenwärtig gibt es, bis auf MODIS, keinen Satelliten, der speziell für die Erkennung und Untersuchung von Bränden ausgelegt ist. Für die Zukunft sind die vorhandenen Detektionssysteme auszubauen und zu verbessern. Satelliten höherer Auflösung können dann auch kleinere Brandherde identifizieren. Gute Ansätze hierfür liefert beispielsweise der vom DLR betriebene Forschungssatellit „BIRD“, der am 22. Oktober 2001 startete und speziell für die Erfassung von Feuer über die Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich entwickelt wurde. Mit einer Bodenauflösung von ca. 200 m gilt BIRD im Vergleich zu meteorologischen Satelliten als hochauflösend. Durch die rasante Entwicklung von Fernerkundungssensoren mit immer höheren geometrischen und spektralen Auflösungen müssen neue Wege der Bildverarbeitung und des Erkennungsprozesses gegangen werden. Um anfallende große Datenraten und Datenvolumina adäquat bearbeiten zu können, werden effiziente und automatisierbare Algorithmen und Verfahren benötigt.