



Beiträge der Radarfernerkundung zur Erfassung des globalen CO₂-Kreislaufs

Wolfgang Wagner ¹

¹ Abteilung "Umwelt und Geoinformation", Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, D-82234 Weßling, Deutschland

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (2), S. 64–71

2001

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Wagner_VGI_200105,  
Title = {Beitr{\a}ge der Radarfernerkundung zur Erfassung des globalen CO2-  
Kreislaufs},  
Author = {Wagner, Wolfgang},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {64--71},  
Number = {2},  
Year = {2001},  
Volume = {89}  
}
```





Beiträge der Radarfernerkundung zur Erfassung des globalen CO₂-Kreislaufs*

Wolfgang Wagner, Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung

Die Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxids (CO₂) und anderer Treibhausgase wie Methan (CH₄) oder Distickstoffoxid (N₂O) führt zu einer Erwärmung des Klimas. Dies könnte eine Reihe schwerwiegender Umweltprobleme verursachen, wie eine Zunahme an Stürmen, Überschwemmungen, Dürren und anderer Naturkatastrophen. Während Politiker in langwierigen Verhandlungen um rechtlich verbindliche Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen ringen, ist der globale Kohlenstoffkreislauf ins Zentrum der wissenschaftlichen Diskussion gerückt. Doch fehlen oft geeignete Geodaten für die Quantifizierung von Kohlenstoffflüssen. Anhand dreier Beispiele wird in diesem Artikel das Potenzial der Radarfernerkundung zur Erfassung CO₂-relevanter Parameter dargestellt und dabei auftretende Probleme diskutiert.

Abstract

The increase of carbon dioxide (CO₂) and other greenhouse gases like methane (CH₄) or nitrous oxide (N₂O) in the atmosphere has caused global warming. There is emerging evidence that because of this phenomenon the frequency of storms, floods, droughts and other natural disasters is increasing. While politicians discuss legally binding measures to reduce the emission of greenhouse gases, scientists have started to explore the mechanisms of the global carbon cycle in greater detail. But often the magnitude of carbon fluxes and carbon pools is not sufficiently well known due to the lack of environmental data. In this article the potential and limitation of radar remote sensing for measuring geophysical parameters of relevance to the global carbon cycle is discussed based on three pilot studies: forest mapping with SAR interferometry, soil moisture monitoring and freeze/thaw mapping with scatterometer data.

1. Einleitung

Umweltprobleme wie der saure Regen oder das Ozonloch haben zum ersten Mal deutlich gemacht, dass der Eingriff des Menschen in natürliche Kreisläufe ein globales Ausmaß erreicht hat. Ohne die Kenntnis globaler Veränderungen würde man den Ursprung vieler lokaler Umweltprobleme nicht verstehen. Es wäre schwierig, wenn gar unmöglich, geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Speziell die Geowissenschaften sind daher aufgefordert, die Grundlagen zum Verständnis des Zusammenhangs lokaler, regionaler und globaler Umweltveränderungen zu erforschen. Damit ist die Forderung verbunden, Geodaten auf lokaler bis globaler Ebene zu erheben, für die Zukunft zu speichern und in geeigneter Form den Anwendern zur Verfügung zu stellen. Dieser Artikel zeigt einige Möglichkeiten auf, wie die Radarfernerkundung zur verbesserten Quantifizierung des Kohlenstoffkreislaufs beitragen könnte und geht im Konkreten auf die Kartierung sibirischer Wälder, die Verfügbarkeit glo-

baler Bodenfeuchtigkeitsdaten und die Detektion von Bodenfrost ein.

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts hat sich der globale Kohlenstoffkreislauf nachhaltig verändert [1]. Vor allem durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe und die Abholzung von Wäldern wurden seither ungefähr 405 ± 60 Gigatonnen Kohlenstoff als Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre emittiert. Dies hatte einen Anstieg des atmosphärischen CO₂ um 28 % und eine Erwärmung der mittleren Lufttemperatur um bis zu einem 1°C zur Folge [2]. Modellrechnungen sagen – bei unverminderten Emissionen von Treibhausgasen – für das 21. Jahrhundert eine weitere Temperaturerhöhung von 1.4 – 5.8 °C voraus. Dieses wird regional sehr unterschiedliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben [3]. Unter anderem sind extreme Wetterlagen und vor allem in tropischen und sub-tropischen Regionen Ernteeinbußen und reduzierte Trinkwasserreserven zu befürchten. In den Alpen muß man mit Veränderungen der winterlichen Schneedecke und des Abflußregimes von Flüssen rechnen.

* Stark verändertes Manuskript eines Bewerbungsvortrags für eine Universitätsprofessur für Fernerkundung am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien.

2. Das Kyoto-Protokoll

Um die Klimaveränderungen in einem tolerablen Rahmen zu halten, wurde auf der dritten Konferenz der Vertragsparteien zur Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, die im Dezember 1997 in Kyoto stattfand, ein Vertragswerk ausverhandelt. Dieses sogenannte Kyoto-Protokoll enthält erstmals quantifizierte, rechtlich verbindende Verpflichtungen zur Begrenzung der Emission von Treibhausgasen [4]. Nach wie vor gibt es aber offene Fragen, die geklärt werden müssen, bevor die Vertragspartner das Kyoto-Protokoll ratifizieren werden. Neben Emissionsreduktionen in Industrie und Verkehr, besteht auch die Möglichkeit, die Reduktionsziele ergänzend durch die Einbindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in terrestrische Ökosysteme zu erreichen. Darunter fallen Aktivitäten wie Aufforstungen oder verbessertes Bodenmanagement in der Landwirtschaft. Speziell in den ersten Jahrzehnten könnten in beträchtlichem Ausmaß biologische Kohlenstoffsinken an die Stelle der Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe treten [5]. Auf lange Sicht gesehen sind aber Emissionsreduktionen notwendig, da die Aufnahmekapazität der Biosphäre natürliche Grenzen aufweist. Auch bestehen noch große wissenschaftliche Unsicherheiten und Schwierigkeiten bei der Erhebung relevanter Geodaten [6].

Wenn man sich die Frage stellt, welche Geodaten die Radarfernerkundung zur Erfassung von biologischen Kohlenstoffsinken liefern könnte, sollte man jene nach ihrem Verwendungszweck unterscheiden: 1) Geodaten, die von den Vertragsländern zur Erfüllung ihrer konkreten Berichtspflichten benötigt werden; 2) Geodaten, die darüber hinaus für eine vollständige Bilanzierung der Kohlenstoffflüsse von Nutzen sind. Die Berichtspflichten des Kyoto-Protokolls beschränken sich auf „unmittelbar von Menschen verursachte Landnutzungsänderungen und forstwirtschaftliche Maßnahmen, die auf Aufforstungen, Wiederaufforstungen und Entwaldung seit 1990“. Die Fernerkundung könnte hier für die Erfassung und Dokumentation von Flächen verschiedener Bedeckungsklassen und deren zeitliche Veränderungen eingesetzt werden. Zur Diskussion steht, ob die Satellitendaten als primäre Datenquellen der Inventur oder nur für die Verifikation verwendet werden sollen [1]. Radarsysteme mit einer synthetischen Apertur (SAR) erzielen die für diese Aufgabe benötigte räumliche Auflösung von unter 30 m und ermöglichen eine gezielte Aufnahmeplanung, auch in Gebieten mit häufiger Wolkenbedeckung.

Über die konkreten Berichtspflichten des Kyoto-Protokolls hinaus sind neue Geodaten für das bessere Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs dringend erforderlich. Laut Cramer et al. [7] sind viele der offenen Fragen mit der Wirkungsweise und den Veränderungen der terrestrischen Ecosysteme verbunden. Zwar werden globale Kohlenstoffmodelle laufend verbessert, doch fehlen in vielen Bereichen noch Geodaten zur Modellvalidierung und als Eingangsparameter. Aus den vielen Möglichkeiten der Radarfernerkundung werden hier drei Methoden vorgestellt, an deren Entwicklung der Autor beteiligt war:

- Waldkarte Sibiriens aus SAR Daten
- Globale Bodenfeuchtigkeitsdaten aus ERS Scatterometer Daten
- Frostdynamik aus ERS Scatterometer Daten

Die Radardaten in den vorzustellenden Beispielen stammen in erster Linie von den Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 und ERS-2, die ein sogenanntes Active Microwave Instrument (AMI) an Bord hatten. Dieses Instrument erlaubte sowohl die Aufnahme von räumlich hochauflösenden Bilddaten (30 m) mit Hilfe einer synthetischen Antennenapertur als auch von zeitlich hochauflösenden Scatterometer Daten (durchschnittlich eine Messung alle vier Tage) mit einer räumlichen Auflösung von 50 km. Das AMI arbeitete bei einer Frequenz von 5.3 GHz (C-Band) VV-Polarisation.

3. Waldkarte Sibiriens

In Waldökosystemen stellt sich bei gleichbleibenden Klimaverhältnissen und einem Gleichgewicht von Störung (Brände, Insektenbefall, etc.) und Regeneration langfristig eine ausgeglichene Kohlenstoffbilanz ein [8]. Wird dieses Gleichgewicht gestört, so können sich Waldökosysteme von Kohlenstoffsinken in Kohlenstoffquellen verwandeln und umgekehrt. So hat man in den borealen Wäldern Kanadas seit 1970 eine Zunahme und seit 1980 eine Verdreifachung der Feueraktivität beobachtet, wodurch die Senkenfunktion dieser Wälder beträchtlich gestört wurde. Auch in Sibirien sind Waldbrände – die vorwiegend von Menschen verursacht werden – eine der größten Sorgen der dortigen Forstverwaltung. Doch fehlen speziell seit dem Zusammenbruch der Sowjetunion die Mittel zur regelmäßigen forstwirtschaftlichen Bestandsaufnahme. Daher ist auch die Abschätzung der Kohlenstoffflüsse mit großen Unsicherheiten behaftet [9].

Russland's boreale Wälder nehmen eine Fläche von zirka 624 Mio. ha ein [8]. Solch große Flächen können nur mithilfe der Fernerkundung im Abstand eines oder einiger weniger Jahre aufgenommen werden. Es fehlen aber nach wie vor übertragbare und umfassend validierte Verfahren zur Ableitung forstwirtschaftlicher Parameter aus bildgebenden Aufnahmesystemen. Es war daher das Ziel des SIBERIA-Projekts, eine adaptive Methode zur Waldklassifikation aus SAR Daten zu entwickeln, anhand einer umfangreichen Referenzdatenbank zu validieren und ein zirka 100 Mio. ha großes Gebiet in Zentralsibirien zu kartieren [10]. Als Eingangsdaten dienten sogenannte Kohärenzbilder, die ein Maß für die Korrelation zweier SAR Aufnahmen darstellen. Diese Kohärenzbilder wurden aus SAR Tandembilder abgeleitet, die im Abstand von einem Tag mit den Satelliten ERS-1 und ERS-2 aufgenommen worden sind. Aufgrund zeitlicher Dekorrelations-effekte, z.B. verursacht durch die Bewegung von Blättern und Gräsern im Wind, nimmt die Kohärenz im allgemeinen mit zunehmender Ve-

getationsbedeckung ab. Daher erscheinen in Kohärenzbildern Wälder in dunklen und vegetationslose Flächen in sehr hellen Tönen (Abb. 1). Wasserflächen erscheinen schwarz, da hier die Bewegung der Wasseroberfläche zu einer vollkommenen Dekorrelation führt. Weiters wurden SAR Aufnahmen des Japanischen Erdbeobachtungssatelliten JERS verwendet. Das JERS SAR arbeitet bei einer Frequenz von 1.3 GHz und zeigt ebenfalls einen Zusammenhang mit der Vegetationsbedeckung.

Sowohl die ERS Kohärenz als auch die JERS Intensität schwanken über Waldflächen aufgrund vielfältiger Einflußfaktoren von Szene zu Szene. Die Analyse der Daten hat aber gezeigt, dass zu meist ein quasi exponentieller Zusammenhang zwischen den beiden Radarparametern und dem Stammvolumen der Wälder nachgewiesen werden kann, d.h. die Kohärenz nimmt mit steigenden Stammvolumina ab, die JERS Intensität zu, und beide Parameter nähern sich ihrem Grenzwert ab zirka 100 m³/ha [11]. Diese Beobachtung war die Grundlage für einen adaptiven

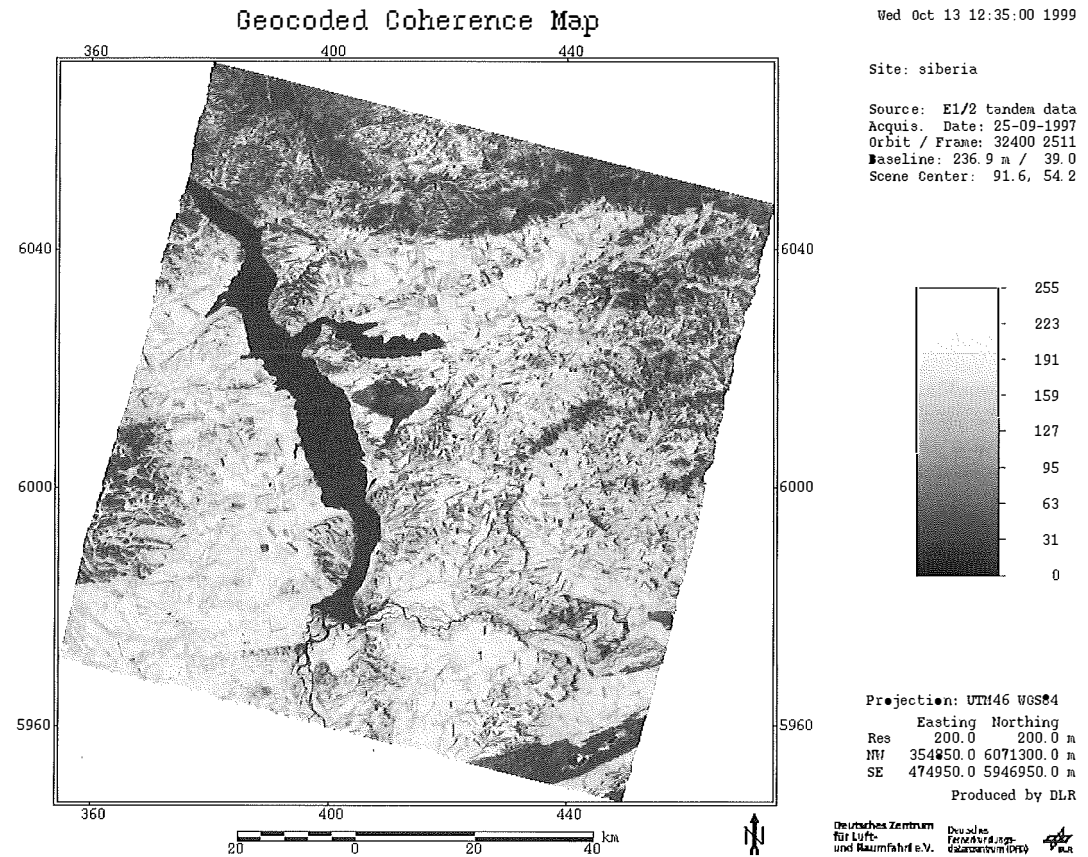


Abb. 1: Kohärenzbild abgeleitet aus einer ERS-1/2 Tandemaufnahme. Das Bild zeigt ein Gebiet rund um ein Stau-becken des Flusses Jenisey, südlich von Krasnojarsk, Sibirien (© DLR).

Algorithmus, der vier Stammvolumenklassen unterscheidet: 0–20, 20–50, 50–80 und > 80 m³/ha. Weiters wurden die Klassen „Wasser“ und „Glatte Flächen“ (beinhaltet Landwirtschaft, Steppe, Moore) unterschieden. Für die Produktion der Waldkarte wurden zuerst die einzelnen Satellitenszenen separat klassifiziert und anschließend in einem Mosaik zusammengeführt. Wie in Abb. 2 ersichtlich, treten an den Szenenübergängen keine abrupten Sprünge auf, mit Ausnahme einiger Szenen in der Mitte des Gebiets (zwischen 98 und 100°). In diesen Fällen hat Regen zwischen den beiden SAR Aufnahmen zu einer starken Dekorrelation geführt. Diese Bilder sollten eigentlich durch andere Tandemaufnahmen, die nicht durch Regen betroffen waren, ersetzt werden, wurden aber wegen des

Mangels zusätzlicher Daten im Mosaik belassen. In Abb. 2 ist ersichtlich, dass Teile des Gebiets maskiert wurden (schwarze Flächen). Es handelt sich dabei um Gebiete mit ausgeprägter Topographie, in denen starke geometrische und radiometrische Verzerrungen der Radardaten auftreten. Trotz dieser Einschränkungen kann der Schluss gezogen werden, dass in den borealen Gebieten Kanadas und Eurasiens CO₂-relevante Waldparameter (in diesem Falle das Stammvolumen) großflächig mit Hilfe der Radarfernerkundung aufgenommen werden können. Eine durch unabhängige Forstexperten durchgeführte Überprüfung der SIBERIA Karte ergab eine mittlere Treffsicherheit der Waldklassen von 86,9 %. Von speziellem Interesse für die Kohlenstoffbilanzierung ist, dass vor allem Brandflächen und

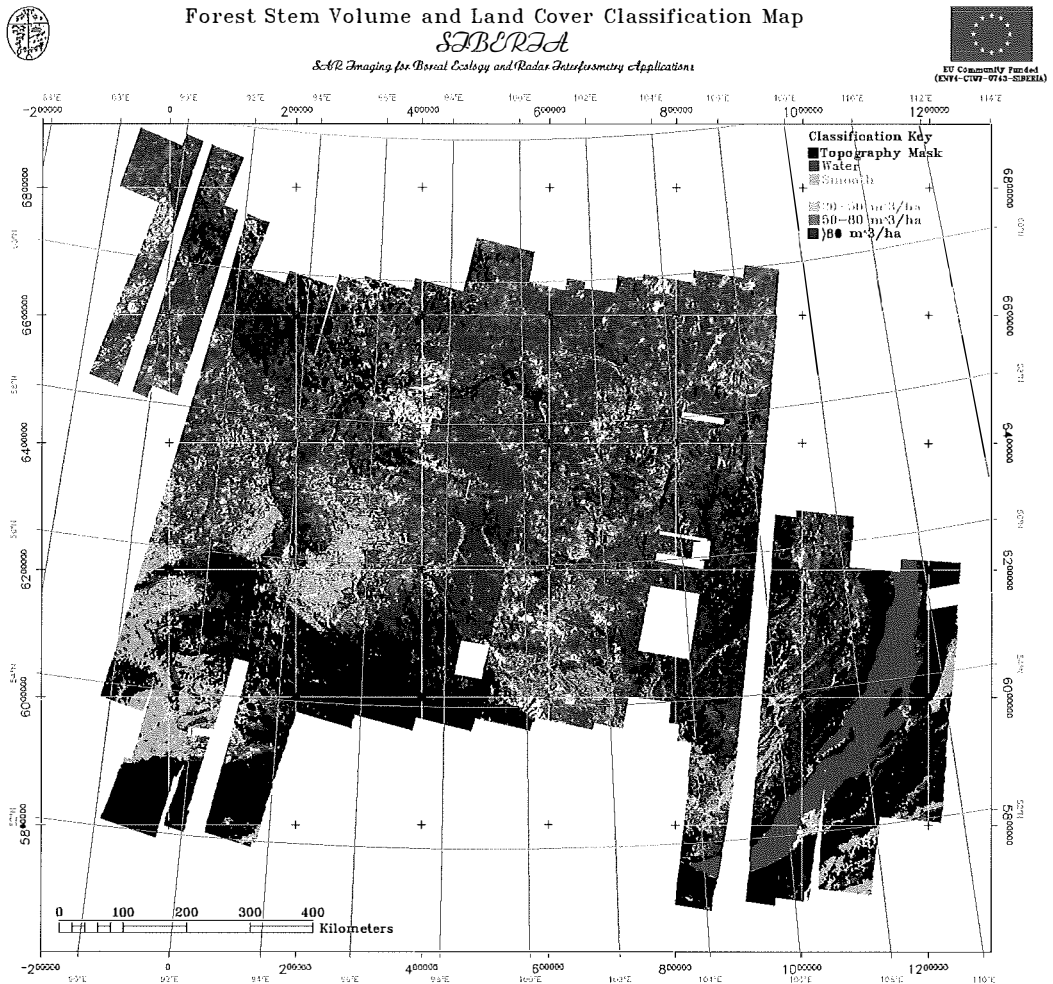


Abb. 2: Waldkarte erstellt im Rahmen des SIBERIA Projekts aus ERS SAR Tandemaufnahmen und JERS SAR (Copyright: EC ENV4-CT97-0743-SIBERIA, © ESA 97/98, NASDA GBFM, DLR)

Abholzungen klar in der Radarkarte ersichtlich sind.

4. Globale Bodenfeuchtigkeitsdaten

Um ein CO₂ Molekül zu binden, verbrauchen Pflanzen bis zu 400 Wassermoleküle [12]. Das in Reichweite der Pflanzenwurzeln gespeicherte Bodenwasser ist daher von zentraler Bedeutung für die CO₂-Bilanz, vor allem in trockenen Klimazonen. Im Regelfall simulieren globale Kohlenstoffmodelle die Wasserverfügbarkeit der Vegetation basierend auf monatlichen Klimamittelwerten, mit teils sehr unterschiedlichen Auswirkungen auf die Netto-Primärproduktivität der Vegetation [7]. Ein direkter Vergleich verschiedener Kohlenstoffmodelle gibt zwar wichtige Hinweise auf deren Funktionsweise, doch werden für die Validierung und Verbesserung globale Bodenfeuchtigkeitsdaten benötigt. Nicht nur könnten mögliche Zukunftsszenarien realistischer simuliert werden, sondern auch die gemessenen interannualen Schwankungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration besser verstanden werden.

Weltweit gibt es nur wenige Regionen, in denen der Bodenwassergehalt mit *in-situ* Messmethoden (gravimetrische Bestimmung, Tensiometer, etc.) flächendeckend und in regelmäßigen Abständen aufgenommen wird. Für die Aufnahme eines globalen Meßdatensatzes ist man daher auf die Methoden der Fernerkundung angewiesen. Im Mikrowellenbereich ist die von der Erdoberfläche emittierte (passive Verfahren) und reflektierte (aktive Verfahren) Strahlung stark von den Dielektrizitätseigenschaften des Bodens – und somit von dessen Wassergehalt – abhängig. Die starke Abhängigkeit der Emissionseigenschaften vom Bodenwassergehalt will man sich bei dem in Planung befindlichen Satelliten SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity Mission), der zum Zweck der Messung der Bodenfeuchtigkeit über Land und des Salzgehaltes der Ozeane konstruiert wird, zunutze machen [13]. SMOS ist ein experimenteller Satellit, der ab 2005 globale Bodenfeuchtigkeitsdaten mit einer räumlichen Auflösung von 20 – 30 km liefern soll.

Da aufgrund der vorherrschenden Lehrmeinung das Signal-zu-Rauschverhältnis bei passiven Systemen besser als bei aktiven Systemen ist und das Radarsignal eine höhere Sensitivität zu störenden Einflußfaktoren wie die Bodenrauigkeit und die Vegetationsstruktur aufweist [13], hat sich die internationale Forschungsgemeinschaft bei globalen Fragestellungen bisher auf passive Systeme konzentriert. Daher sind

die Möglichkeiten aktiver Systeme, wie des ERS Scatterometer, noch wenig bekannt, obwohl auch hier bereits große Fortschritte erzielt worden sind. So zeigt Abb. 3 den jahreszeitlichen Verlauf der Bodenfeuchtigkeit über dem afrikanischen Kontinent. Die Karten wurden aus Scatterometer Aufnahmen aus den Jahren 1992-2000 mithilfe eines *Change-Detection* Ansatzes berechnet [14]. Indem nur zeitliche Veränderungen betrachtet werden, berücksichtigt die Methode auf einfache Art und Weise die Einflüsse der Bodenrauigkeit und der Vegetation. Sie erlaubt die flächenhafte Auswertung der Scatterometer Daten, mit Ausnahme von dichtem Regenwald und Wüstengebieten, in denen eine starke Abhängigkeit der Rückstreuung vom Azimutwinkel beobachtet wird (Abb. 3). Die beobachteten räumlichen und zeitlichen Muster stimmen gut mit dem Wissen über den globalen Wasserhaushalt überein und auch der lokale Vergleich mit *in-situ* Messungen hat gute Ergebnisse geliefert. So zeigte ein direkter Vergleich mit einer 12 835 Meßwerte umfassenden Datenbank aus gravimetrischen Meßwerten der 0–100 cm Bodenschicht aus der Ukraine, dass zumindest fünf Feuchtigkeitsstufen getrennt werden können [15].

5. Detektion von Bodenfrost

In den hohen nördlichen Breiten der borealen Waldzone und der Tundra trifft man Permafrost, d.h. ständig gefrorenen Boden, bis in Tiefen von 300 m an. Doch für die Vegetation ist nicht die Tiefe oder das Alter des Permafrost von Bedeutung, sondern vielmehr die oberste Bodenschicht, die im Sommer auftaut. Die Dynamik dieser Auftaubodenschicht steuert bodenbildende und vegetationsökologische Prozesse [16] und ist insofern für die CO₂-Bilanz dieser Gebiete von großer Bedeutung. Kicklighter et al. [17] stellen fest, dass globale Kohlenstoffmodelle die Dynamik von Tau- und Gefrierprozessen und deren Effekt auf die Netto-Primärproduktivität der Vegetation nur unzureichend simulieren.

Radarsysteme können den Vorgang des Gefrierens und Tauens dokumentieren, da Frost die Dielektrizitätseigenschaften des Bodens stark verändert. Weiters ist wichtig, dass im niederfrequenten Mikrowellenbereich trockener Schnee weitgehend transparent ist und nasser Schnee je nach Rauigkeit seiner Oberfläche unterschiedliche Rückstreuwerte aufweisen kann. Während SAR Systeme detaillierte räumliche Informationen liefern können, geben Scatterometer einen großflächigen Überblick über die zeitli-

Soil Water Index

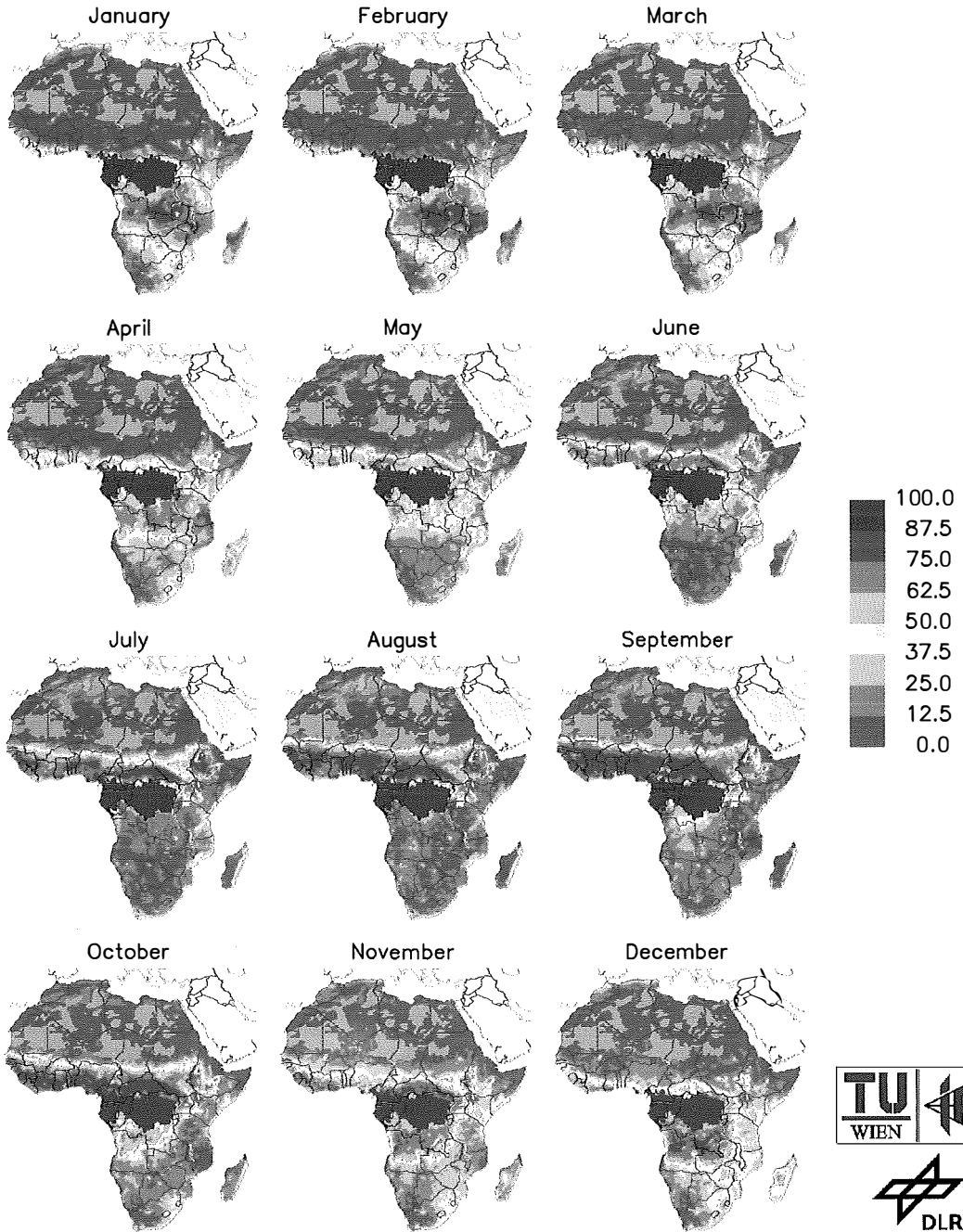


Abb. 3. Jahreslauf des Bodenwassergehalts über Afrika aus ERS Scatterometer Daten. Dargestellt sind Monatsmittelwerte des Bodenfeuchtigkeitsindex, wobei dunkelbraune Farben trockene Verhältnisse (Welkepunkt) und dunkelblaue Farben nasse Verhältnisse (Feldkapazität) darstellen. Grüne Flächen zeigen dichte Regenwälder und graue Flächen Bereiche, in denen das gemessene Signal eine starke Abhängigkeit von der Aufnahmerichtung aufweist (Azimutaleffekte). In diesen Gebieten war eine Ableitung des Bodenwassergehalts nicht möglich.

che Dynamik von Tau- und Gefrierprozessen [18]. Als Beispiel zeigt Abb. 4 die Dynamik des Bodenfrosts über Nordkanada im Jahr 1995 [19]. Die Validierung der Ergebnisse ist aufgrund des Mangels an Referenzdaten schwierig, doch dürfte der zeitliche Fehler bei der Bestimmung der Übergänge vom gefrorenen Zustand in den getauten und umgekehrt in der Größenordnung von 1-2 Wochen liegen. Auch wenn die Daten noch Unsicherheiten aufweisen, bieten sie zum ersten Mal die Möglichkeit, Modellsimulationen zu überprüfen. In einem iterativen Prozeß könnten dann die Fernerkundungsmethodik und die Modelle laufend verbessert werden.

ten, CO₂ relevante Geodaten bereitzustellen. Oft verhindern aber Probleme wie Datenverfügbarkeit, Diskontinuität von Fernerkundungsmissionen oder der beträchtliche Ressourcenaufwand, der für die Bearbeitung großer Datenmengen notwendig ist, den Schritt von wissenschaftlichen Pilotprojekten zu operativen Anwendungen. So wird es nach dem Ende von ERS-2 bis zum Start des ersten METOP (Meteorological Operational) Satelliten, der voraussichtlich im Jahre 2005 erfolgen wird, keine C-Band Scatterometer Daten geben. Eine Serie von drei METOP Satelliten soll dann aber eine Kontinuität bei der Bereitstellung von Scatterometer Daten

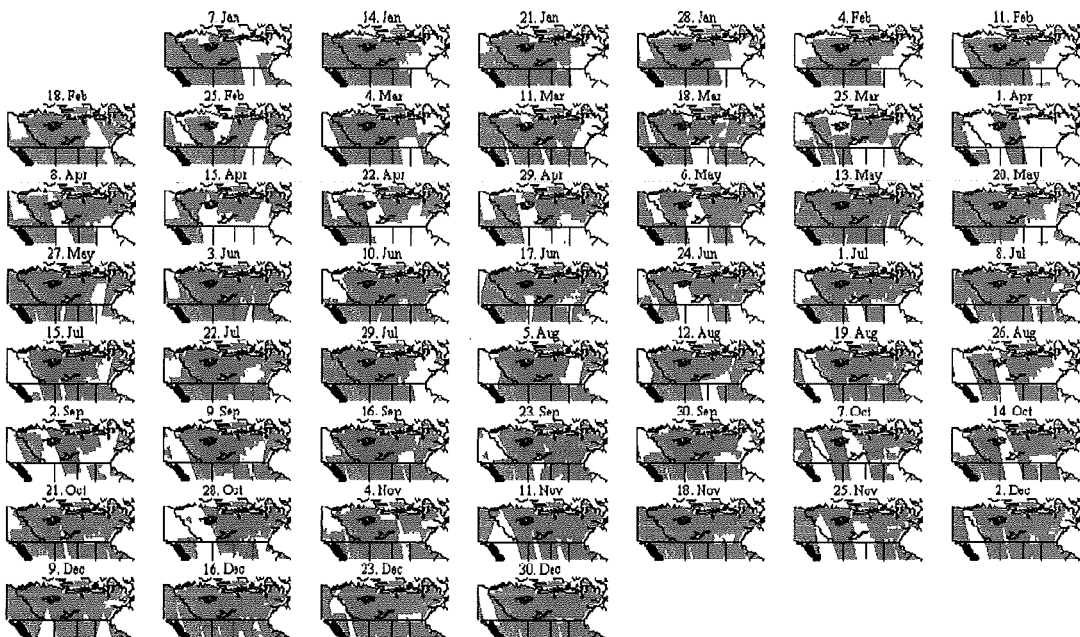


Abb. 4: Dynamik des Bodenfrosts über Nordkanada (55–72°N, 85–141°W) im Jahr 1995 aus ERS Scatterometer Daten. Gefrorener Boden ist in blau dargestellt, getauter Boden in grün, Gebiete in denen keine Aussage möglich ist in grau und fehlende Daten in weiß (© IPF).

6. Perspektiven

Ausgehend von den Diskussionen rund um das Kyoto-Protokoll ist die quantitative Erfassung des globalen Kohlenstoffkreislaufs ins Zentrum der wissenschaftlichen Diskussion gerückt. Während die grundlegenden Mechanismen des globalen CO₂-Kreislauf bekannt sind, ist aufgrund des Mangels an Geodaten die quantitative Abschätzung von Kohlenstoffflüssen mit großen Unsicherheiten behaftet. Wie in diesem Artikel anhand von drei Beispielen gezeigt wird, bietet die Radarfernerkundung zahlreiche Möglichkei-

über zumindest 14 Jahre hinaus garantieren. Weniger erfreulich ist die Lage im Falle von SAR Tandemkohärenzdaten. Hier ist noch nicht abzusehen, ob es einmal eine, der ERS-1/2 Tandemmission vergleichbare Konstellation von Radarsatelliten geben wird. In diesem Fall wird man sich mit dem historischen Datenarchiv aus den Jahren 1995 bis 1998 begnügen müssen. Neben einer kohärenten Planung von Fernerkundungsmissionen sollte man in Zukunft Anwendungsaspekte stärker berücksichtigen, um den hohen wissenschaftlichen und praktischen Nutzen der Fernerkundung – der schlußendlich die Investi-

tionen in Sensorenentwicklung, Satellitenbetrieb und Bodeninfrastruktur rechtfertigt – zur vollen Geltung kommen zu lassen.

Literatur

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (2000) Land use, land-use change, and forestry, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- [2] Sweet, W. und E. A. Bretz (1999) Toward carbon-free energy, IEEE Spectrum, 36(11):28–33.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (2001) Climate Change 2001: Impacts, Adaption, and Vulnerability, Summary for Policymakers, IPCC Secretariat, Genf, Schweiz, <http://www.ipcc.ch/>, 2001.
- [4] Oberthür, S. und H. E. Ott (2000) Das Kyoto-Protokoll, Internationale Klimapolitik für das 21. Jahrhundert, Leske + Budrich, Opladen, Deutschland.
- [5] Fischlin, A. und J. Fuhrer (2000) Die Klimapolitik bringt die Wissenschaft an ihre Grenzen – Die Herausforderung des Kyoto-Protokolls für die Ökologie, Neue Zürcher Zeitung, Nr. 262 (9. Nov.).
- [6] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1998) Die Anrechnung biologische Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder Rückschritt für den globalen Umweltschutz? ISBN 3-9806309-0-0, <http://www.awi-bremerhaven.de/WBGU/>
- [7] Cramer, W., D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, B. Nemry, A. Ruimy, A Schloss and the participants of the Potsdam NPP Model Intercomparison (1999) Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results, Global Change Biology, 5(suppl. 1):1–15.
- [8] Treter, U. (2000) Rolle der borealen Waldländer im globalen CO₂-Haushalt – Eine ökosystemare Analyse, Geographische Rundschau, 52(12):4–11.
- [9] Nilsson, S. (Ed.) (2000) IIASA's forestry project – Seeing the forest and the trees, Options, Autumn 2000, International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Österreich.
- [10] Schmullius, C. und W. Wagner (2000) SIBERIA – Kartierung borealer Wälder mit Radarfernerkundung, Geographische Rundschau, 52(12):44–48.
- [11] Wagner, W., J. Vietmeier, K. Tansey, H. Balzter, C. Schmullius, A. Luckman, S. Quegan, J. J. Yu, D. Gaveau, M. Davidson, T. Le Toan, M. Gluck and A. Shvidenko, An

adaptive approach for classifying boreal forest in SIBERIA based on ERS tandem coherence and JERS backscatter data, submitted to Remote Sens. Environ.

- [12] Donovan, L. A. and J. Sperry (2000) Scaling the soil-plant-atmosphere continuum: from physics to ecosystems, Trends in Plant Science, 5(12):510–512.
- [13] Kerr, Y. H., J. Font, P. Waldteufel and M. Berger (2000) The Soil Moisture and Ocean Salinity Mission – SMOS, Earth Observation Quarterly, 66:18–26.
- [14] Wagner, W. und K. Scipal (2000) Der Einsatz von Radarsatelliten zur Überwachung der Bodenwasserressourcen in Afrika, Petermanns Geographische Mitteilungen, 144(3): 40–45.
- [15] Wagner, W., G. Lemoine and H. Rott (1999) A Method for Estimating Soil Moisture from ERS Scatterometer and Soil Data, Remote Sens. Environ., 70:191–207.
- [16] Makarov, V. N. und J.-F. Venzke (2000) Umweltbelastung und Permafrost in Jakutsk (Sibirien), Geographische Rundschau, 52(12):21–26.
- [17] Kicklighter, D. W., A. Bondeau, A. L. Schloss, J. Kaduk, A. D. McGuire and the participants of the Potsdam NPP Model Intercomparison (1999) Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes, Global Change Biology, 5(suppl. 1):16–24.
- [18] Vismann, V. (2000) Monitoring of seasonal thawing in Siberia with ERS Scatterometer data, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 38(4):1804–1809.
- [19] Scipal, K. and W. Wagner (1998) Monitoring freeze-thaw cycles over northern Canada, 2nd European Conference on Applied Climatology, Vienna, Austria, October 19–23, 1998.

Internetseiten

SIBERIA-Projekt: <http://pipeline.swan.ac.uk/siberia/>
Scatterometer Anwendungen: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/www/home.htm>

Anschrift des Autors

Dr. Wolfgang Wagner: Abteilung „Umwelt und Geoinformation“, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, D-82234 Weßling, Deutschland. E-mail: w.wagner@dlr.de.