

Möglichkeiten zur Ableitung Boden-bezogener Größen aus multi- und hyperspektralen Fernerkundungsdaten

THOMAS JARMER, THOMAS UDELHOVEN & JOACHIM HILL, Trier

Keywords: remote sensing, spectrometry, absorption feature, organic carbon, inorganic carbon, iron

Zusammenfassung: Die räumliche Beschreibung pedologischer Eigenschaften erfordert die Analyse einer Vielzahl repräsentativer Proben. Die Reflexionsspektrometrie stellt in diesem Zusammenhang eine sinnvolle Ergänzung zur chemischen Laboranalytik dar, da sie auf Grund der schnellen Messtechnik und einer minimalen Probenaufbereitung einen hohen Probendurchsatz erlaubt. Anhand verschiedener Fallstudien wird das Potential der Methode für die räumliche Quantifizierung ausgewählter bodenchemischer Messgrößen (organischer und anorganischer Kohlenstoff, Eisen) aufgezeigt. Neben der Laborspektrometrie wurden hierbei auch Bilddaten unterschiedlicher geometrischer und spektraler Auflösung (Luftbild, Landsat-TM und DAIS 7915) für die Ableitung pedologischer Eigenschaften verwendet.

Abstract: *Possibilities to derive soil related parameters from multi- and hyperspectral remote sensing data.* The quantification of spatial soil properties requires the consideration of many representative soil samples. Reflectance spectroscopy seems to be a useful supplement for chemical laboratory analysis, since the approach is fast and has only limited requirements for sample preparation. Based on several case studies the potential of the method to derive selected chemical soil constituents (organic carbon, inorganic carbon and iron) is demonstrated. Beside of the usage of laboratory spectrometry also image data with different spatial and spectral resolution (aerial photographs, Landsat TM and DAIS 7915) have been included in the study.

1 Einführung

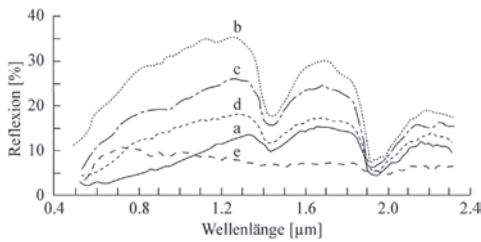
Böden bilden einen wesentlichen Bestandteil terrestrischer Ökosysteme. Die Eigenschaften der Böden sind jedoch weder statisch noch zeitlich und räumlich homogen. Dies macht die Entwicklung geeigneter Methoden für eine rasche Schätzung der räumlichen Verteilung von physiko-chemischen pedogenen Größen sinnvoll (SHEPHERD & WALSH 2002).

Der Einfluss pedogener Eigenschaften auf das Reflexionsverhalten von Böden ist allgemein bekannt (z. B. CONDIT 1970, BAUMGARDNER et al. 1985, IRONS et al. 1989). Die spektrale Reflexion von Böden ist eine kumulative Eigenschaft, die sich aus dem in-

härenten spektralen Verhalten heterogener Kombinationen von Mineralen, organischer Substanz und Bodenwasser ableitet.

Die Bodenreflexion ist in erster Linie durch das Reflexionskontinuum charakterisiert, wobei sich verschiedene bodenphysikalische und pedochemische Parameter in spezifischer Weise auswirken (Abb. 1). Jedoch können auch spezifische Absorptionsmerkmale im Spektralbereich zwischen 0,4 und 2,5 μm zur Identifikation wichtiger Bodeninhaltsstoffe wie Eisen, Tonmineralen oder Karbonaten genutzt werden.

Die Schätzung spezifischer pedologischer Eigenschaften durch Reflexionsmessungen kann aufgrund der Schnelligkeit der Methode die herkömmliche Laboranalytik bei der



(a) organic-dominated (hoher Gehalt an organischer Substanz, mittelfeine Textur); (b) minimally altered (gering entwickelter Rohboden, geringer Gehalt an organischer Substanz, mittlere Eisengehalte); (c) iron-affected (geringer Gehalt an organischer Substanz, mittlere Eisengehalte); (d) organic-affected (hoher Gehalt an organischer Substanz, mittelgrobe Textur); (e) iron-dominated (hoher Eisengehalt, feine Textur)

Abb. 1: Charakteristische Reflexionsspektren für Oberbodenproben von fünf Mineralböden (STONER & BAUMGARDNER 1981).

Beschreibung räumlicher Bodeneigenschaften unterstützen. Dafür steht eine Vielzahl vorwiegend statistischer Methoden zur Verfügung. Bei der Modellwahl muss häufig ein Kompromiss zwischen Einfachheit und Vollständigkeit gefunden werden. Je einfacher ein Modell aufgebaut ist umso leichter ist es zu interpretieren, aber umso unvollständiger kann es sein. Dabei ist in Anlehnung an MARTENS & NAES (1989) insbesondere folgenden Punkten Rechnung zu tragen:

a. In der Regel müssen zur Vorhersage einer Messgröße mehrere Absorptionswerte verwendet werden. Eisen beispielsweise liegt im Boden in verschiedenen Bindungsformen vor, die unterschiedliche Spektralsignaturen aufweisen. Die Bestimmung des Gesamteisengehalts gelingt daher meist nicht mit der geforderten Genauigkeit mit Hilfe nur eines spektralen Merkmals.

b. Es treten hohe Korrelationen bei den spektralen Absorptionen insbesondere bei benachbarten Wellenlängen auf. Diese Kollinearität wird beispielsweise in der Partial-Least-Square Regression (PLS) genutzt, um die Robustheit des Regressionmodells gegenüber Zufallsstörungen zu erhöhen. Die PLS ist eng verwandt mit der Hauptkomponentenregression. Die Faktorisierung der X-

Matrix (der Reflexionsspektren) richtet sich jedoch hierbei nicht ausschließlich nach deren Varianz sondern ein weiteres Kriterium ist die Kovarianzmaximierung der gebildeten Faktorwerte mit den Y-Variablen (den vorherzusagenden Messgrößen) (BÜNTING 1999, OTTO 1997). Alternativ können auch abgeleitete, möglichst unabhängige Größen aus einem Reflexionsspektrum in einer multiplen Regression verwendet werden. Um beispielsweise die VIS-Domäne in Reflexionsspektren in einem Schätzmodell zu repräsentieren können spektral hoch aufgelöste redundante Reflexionswerte in einen geeigneten Farbraum transformiert und daraus wenige unabhängige Farbfaktoren verwendet werden.

c. Es ist oftmals nicht sichergestellt, dass unser a-priori Wissen bezüglich des Einflusses einer chemischen Messgröße auf das Reflexionsverhalten vollständig oder richtig ist. In Bodenproben treten beispielsweise spektrale Interferenzen aufgrund einer Vielzahl von Inhaltsstoffen auf, was oftmals die Berücksichtigung vieler spektraler Stützstellen in einem Schätzmodell erfordert. Bei der Quantifizierung von Bodeneigenschaften ist zudem mit indirekten Korrelationen zu rechnen. So schätzen BEN-DOR & BANIN (1995) beispielsweise die Kationenaustauschkapazität und weiterer Eigenschaften von Böden mit hoher Genauigkeit aus Reflexionsspektren, ohne dass diese Eigenschaften direkte spektrale Features aufweisen. Die Vorhersagen basierten vielmehr auf der Korrelation der Zielvariablen mit optisch aktiven Hintergrundvariablen wie beispielsweise dem Tongehalt.

Letztendlich stellt jedes statistische Modell eine Arbeitshypothese dar, basierend auf einer Anzahl von Annahmen für ein Problem, die unvollständig oder fehlerhaft sein können.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Studien vorgestellt, die den Einsatz kontinuums- und bandenorientierter Analyseverfahren für die Schätzung bodenchemischer Messgrößen beispielhaft aufzeigen.

Die spektrale Reflexion der im Rahmen der folgenden Studien verwendeten Bodenproben wurde mit einem ASD FieldSpec im

Labor (Nadirposition des Sensors, 10 cm Entfernung des Messkopfes von der Probe, künstliche Beleuchtung mit einer 1000 W Halogenlampe aus 30 cm Entfernung mit 30° Einstrahlungswinkel) in 1 nm Schritten gemessen und gegen die absolute Reflexion eines Spektralstandard abgeglichen.

2 Schätzung von Konzentrationen pedochemischer Größen aus Reflexionsspektren

2.1 Gesamteisengehalt

Eisen besitzt charakteristische Reflexionseigenschaften (BAUMGARDNER et al. 1985, CLARK 1999) und bereits nur in Spuren vorkommendes Eisen führt zum Auftreten von Absorptionsbanden (GEERKEN 1991). Die Art und relative Menge der Eisenoxide beeinflusst die Bodenfarbe deutlich. Eine Zunahme des Eisenoxidgehaltes hat eine Abnahme der Gesamreflexion zur Folge.

Die meisten der durch das Eisen hervorgerufenen Absorptionsbanden resultieren aus Elektronenübergängen in den Eisenkationen. Typischerweise treten drei relativ breite Absorptionen bei $\sim 0,5 \mu\text{m}$, $\sim 0,7 \mu\text{m}$ und $\sim 0,9 \mu\text{m}$ in Fe(III)-Oxiden auf. Über die dritte Bande ist auch eine Differenzierung der Eisenoxide Goethit und Hämatit möglich, da die Absorptionsbande des Hämatit bei $\sim 0,87 \mu\text{m}$ und die des Goethit bei $\sim 0,93 \mu\text{m}$ auftritt. Zweiwertiges Eisen lässt sich durch eine Absorptionsbande bei $\sim 1,0 \mu\text{m}$ identifizieren (HUNT et al. 1971, BURNS 1993).

Auf Grundlage einer synthetischen Mischungsreihe aus Eisenmineralien und einer karbonatischen Matrix konnte der Einfluss wechselnder Eisengehalte auf das resultierende Spektralverhalten von Böden nachgewiesen werden (JARMER & SCHÜTT 1998). In dieser Untersuchung wurden die Reflexionsspektren über die Anpassung einer konvex-einhüllenden Funktion normiert, um eine Quantifizierung der Absorptionsbanden zu ermöglichen. Dieses Verfahren ermöglicht es, Absorptionsbanden vergleichbar zu machen und ihre Wellenlängen-

position, Absorptionstiefe, -breite und -fläche sowie Asymmetrieeigenschaften zu bestimmen. Die Quantifizierung der Eisengehalte erfolgte mit einer multiplen linearen Regression. Für die Validierung standen Bodenproben aus dem südlichen Israel (entwickelt aus Kalkstein oder Kreide, teilweise vergesellschaftet mit Löß) zur Verfügung.

Das normierte Flächenintegral $[0,451 \mu\text{m}; 1,270 \mu\text{m}]$ sowie die über die konvex-einhüllende Funktion normierten Absorptionstiefen (1 – Hull Quotient) bei $0,884 \mu\text{m}$ (Hämatit) und $0,929 \mu\text{m}$ (Goethit) wurden als unabhängige Variablen für das Regressionsmodell verwendet (HAUFF & KRUSE 1990). Da die Konzentrationen von organischer Substanz und Karbonat in natürlichen Bodenproben erheblich variieren, wird deren Albedo nicht mehr ausschließlich durch den Eisengehalt bestimmt. Daher wurden zusätzlich die Normfarbwerte aus den Reflexionsspektren berechnet und in C.I.E.-Normfarbwerten (Y, x, y) ausgedrückt. Dieses Farbsystem der „Commission Internationale de l'Éclairage [C.I.E.]“ von 1931 wurde dem in der Bodenkunde verbreiteten MUNSSELL Farbsystem vorgezogen, da das C.I.E. auf spektralen Reflexionsmessungen

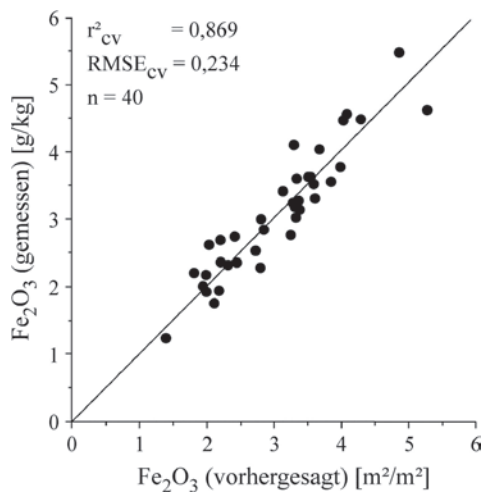


Abb. 2: Scatterplot der Kreuzvalidierung des entwickelten Modells zur Vorhersage von Gesamteisenkonzentration (aus JARMER & SCHÜTT 1998).

basiert. Der Quotient der C.I.E.-Normfarbwertanteile x und y wurde als zusätzliche unabhängige Variable für die Eisenbestimmung berücksichtigt, da dieser Wert vom Verhältnis zwischen den Hämatit- und Goethitgehalten deutlich beeinflusst wird. Außerdem wurde der C.I.E.-Normfarbwert Y , der ein Maß für die Farbhelligkeit darstellt und einen hohen Zusammenhang mit der panchromatischen Reflexion ($\alpha < 0,001$) aufweist, als Y^{-2} in das Regressionsmodell einbezogen (SUDDUTH & HUMMEL 1991).

Die Kreuzvalidierung ergab für dieses Modell ein r_{cv}^2 von 0,869 (Abb. 2).

2.2 Anorganischer Kohlenstoff

Karbonate zeigen starke Absorptionsbanden im nahen Infrarot bei 2.30–2.35 μm und 2.50–2.55 μm . Drei schwächere Absorptionsbanden treten bei 1.85–1.87 μm , 2.12–2.16 μm und 1.97–2.00 μm auf. Die Positionen der Banden variieren in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der unterschiedlichen Karbonate im Boden (HUNT & SALISBURY 1971, GAFFEY 1986). Mit zunehmendem Gehalt an Magnesiumkarbonat verschiebt sich die maximale Absorption hin zu den kürzeren Wellenlängen (VAN DER MEER 1996, CLARK 1999).

Die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Karbonatkonzentration und Bodenreflexionseigenschaften erfolgte im Rahmen einer entsprechenden Untersuchung beispielhaft an 45 Bodenproben aus dem Jüdischen Bergland in Israel. Dieser Raum ist durch semi-aride bis hyperaride Klimabedingungen charakterisiert. Alle berücksichtigten Proben stammen von Böden, die sich auf Kalkstein entwickelt haben. Die Böden in diesem Gebiet variieren entsprechend der Niederschlagsmengen von Rendzinen im semi-ariden und ariden Bereich bis zu Lithosolen am Ostrand des Gebietes.

Die starke Ausprägung der charakteristischen Absorptionsbande bei ca. 2,33 μm kann zur Schätzung der Karbonatgehalte verwendet werden (JARMER et al. 2002). Die Messung der Bodenreflexion erfolgte unter den in 2.1 beschriebenen Bedingungen. Für

die Bestimmung der Karbonatbandenparameter wurden die Reflexionsspektren ebenfalls unter Verwendung einer Hüllkurve normiert und die maximale Absorptionstiefe und das Flächenintegral im Wellenlängenbereich 2.33–2.37 μm ermittelt. Dieser Wellenlängenbereich zeigte die höchste Korrelation mit der Konzentration anorganischen Kohlenstoffs. Das beste Regressionsmodell mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.719 ergab sich unter Verwendung der maximalen Absorptionstiefe bei 2.33 μm –2.37 μm .

Da der relative Karbonatanteil in Böden die Bodenelligkeit substantiell beeinflusst (BEN-DOR & BANIN 1994), wurden zusätzlich die C.I.E.-Normfarbwerte in der Modellbildung berücksichtigt. Dabei war zu erwarten, dass der C.I.E.-Normfarbwert Y , der die Helligkeit repräsentiert, die Modellergebnisse erheblich verbessert. Allerdings hatte die Integration von Y nicht den erhofften Effekt, während sich ein sehr hoher Zusammenhang zwischen dem C.I.E.-Normfarbwertanteil x und der Konzentration an anorganischem Kohlenstoff ergab ($r = 0,946$) (Abb. 3).

Die Integration von Absorptionsbandenparametern und C.I.E.-Normfarbwerten in die Modellbildung, d.h. die Verknüpfung

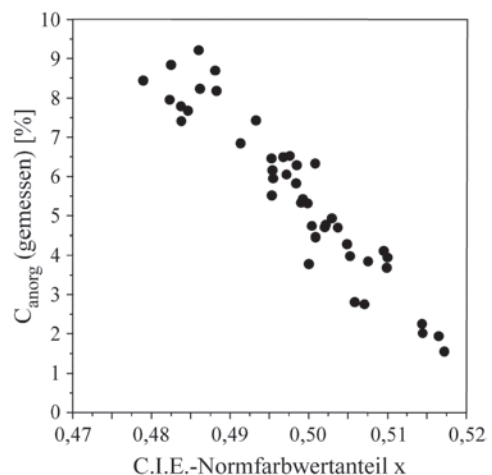


Abb. 3: Zusammenhang zwischen dem C.I.E.-Normfarbwertanteil x und der Konzentration an anorganischem Kohlenstoff (aus JARMER et al. 2002).

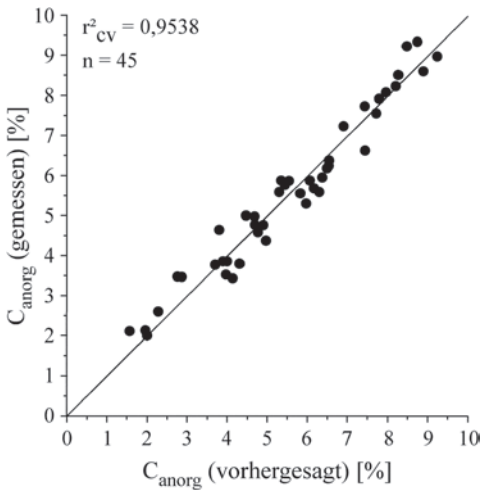


Abb. 4: Scatterplot der Kreuzvalidierung des entwickelten Modells zur Vorhersage von Konzentrationen an anorganischem Kohlenstoff (aus JARMER et al. 2002).

zwischen spezifischen Absorptionsmerkmalen und Eigenschaften des Kontinuums, führte zu einem optimalen Ergebnis. Das beste Regressionsmodell lieferte hierbei kreuzvalidiert ein r^2 von 0,9538 (Abb. 4).

2.3 Organischer Kohlenstoff

Im Gegensatz zu Eisen und anorganischem Kohlenstoff lässt sich organischer Kohlenstoff nur eingeschränkt über charakteristische Absorptionsbanden identifizieren. Er beeinflusst vielmehr den Gesamtverlauf der Reflexion zwischen $0,35 \mu\text{m}$ und $1,4 \mu\text{m}$. Reflexionsspektren mit einem deutlich konkaven Anstieg zum maximalen Reflexionsniveau bei ca. $1,3 \mu\text{m}$ weisen in der Regel nur sehr geringe Anteile an organischer Substanz auf (Abb. 1, Typ b und c). Mit zunehmendem Anteil an organischen Substanzen verringert sich die Gesamtreflexion. Während geringe Gehalte organischen Kohlenstoffs zu einem konvexen Verlauf des Reflexionsspektrums führen, kann bei hohen Anteilen organischen Kohlenstoffs ($> 2\%$) häufig eine eher gestreckte oder konkave Verlaufsform beobachtet werden (Abb. 1, Typ a).“

Aufbauend auf diesen Überlegungen schätzten HILL & SCHÜTT (2000) im Rah-

men einer Studie im Guadalentin (SE Spanien, karbonatische Böden) den organischen Kohlenstoffgehalt von Oberböden anhand einer spezifisch auf die Parametrisierung des spektralen Kontinuums ausgerichteten Strategie. Dazu wurden die kontinuierlich vorliegenden Reflexionsspektren ($0,4\text{--}2,5 \mu\text{m}$) zunächst auf die Reflexion bei $1,676 \mu\text{m}$ normiert. Anschließend wurde für den Wellenlängenbereich $0,45\text{--}1,676 \mu\text{m}$ ein Polynom dritter Ordnung an den Kurvenverlauf approximiert (Gl. 1).

$$\rho_\lambda = b_0 + b_1 \cdot \lambda + b_2 \cdot \lambda^2 + b_3 \cdot \lambda^3 \quad (\text{Gl. 1})$$

Ein solches Polynom kann das Reflexionskontinuum von Böden und Gesteinen ziemlich gut annähern. Dabei beschreiben die Koeffizienten $b_1\text{--}b_3$ die Steigung und Krümmung der Funktion, wobei die Koeffizienten b_1 und b_3 die wichtigsten Variablen zur Konzentrationsbestimmung von organischem Kohlenstoff darstellen. Mit Hilfe dieser beiden Variablen ließ sich die Konzentration des organischen Kohlenstoffs in den Bodenproben durch eine multiple Regression vorhersagen. Nachdem wegen der nichtlinearen Beziehung zwischen Reflexion und organischem Kohlenstoffgehalt die Konzentrationen des organischen Kohlenstoffs für die Modellbildung logarithmiert worden waren, lieferte das kreuzvalidierte Modell ein r^2 von 0,768 ($n = 91$) (Abb. 5).

In einer weiteren Untersuchung wurde der organische Kohlenstoff aus Reflexionsspektren von Bodenproben aus der Region Trier (Rheinland-Pfalz) mit der Partial Least Square Regression geschätzt (UDELHOVEN et al. 2003). Berücksichtigt wurden 165 Bodenproben von Acker- und Grünlandböden aus Eifel und Hunsrück. Im Hunsrück ist der vorherrschende Bodentyp eine schluffig-tonige Braunerde aus devonischen Schiefen. Die vorherrschenden Böden in der Eifel variieren in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Ausgangsgesteinen (z.B. eisenreiche Sandsteine, Kalksteine, tonige Sedimente). Die Modellanpassung erfolgte für die beiden Untersuchungsgebiete getrennt.

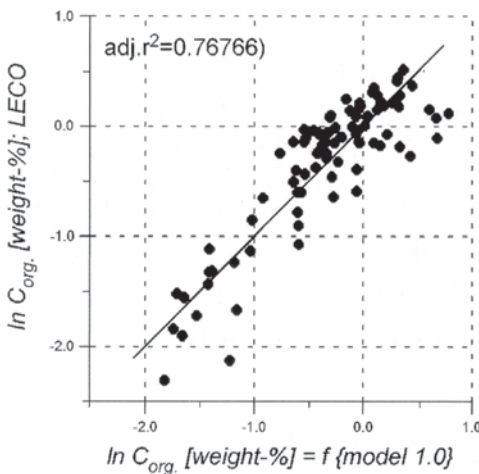


Abb. 5: Scatterplot der Kreuzvalidierung des entwickelten Modells zur Vorhersage von Konzentrationen an organischem Kohlenstoff (aus HILL & SCHÜTT 2000).

Das Modell für die relativ homogenen Bodenproben aus dem Hunsrück erbrachte gute Schätzergebnisse der organischen Kohlenstoffkonzentrationen aus Labor-Reflexionsmessungen ($r_{cv}^2 = 0,88$). Anders stellte sich das Resultat für die Bodenproben aus der Eifel dar. Für die auf heterogenem geologischen Ausgangsgestein entwickelten Böden lieferte das Kreuzvalidierte PLS-Modell nur ein r^2 von 0.69. Im Rahmen dieser Studie konnten zwei zusätzliche Restriktionen bei der Schätzung chemischer Bodeninhaltsstoffe aus Reflexionsspektren aufgezeigt werden. So erbrachten die PLS-Modelle für pflanzenverfügbare Nährstoffe (P, K, Mg gemessen im CAL-Extrakt) keine verwertbaren Ergebnisse. Die Gesamtgehalte (Ca, Mg, Fe, Mn, K) hingegen konnten aus Labor-Reflexionsmessungen zufriedenstellend geschätzt werden. Entsprechende Geländemessungen erbrachten keine brauchbaren Resultate. Die zugrunde liegenden Ursachen sind in weiterführenden Untersuchungen noch zu klären.

3 Bildbasierte Schätzung pedogener Eigenschaften

Eine Übertragung von unter Laborbedingungen entwickelten Modellen ist nur eingeschränkt auf Bilddaten möglich. Ursachen dafür sind u.a. die Verschiedenartigkeit der Sensoren, die Beeinflussung durch die Atmosphäre und ein unterschiedliches Skalenniveau, auf dem die Messungen erfolgen.

Dennoch konnte das Modell von HILL & SCHÜTT (2000) nach geringen Modifikationen auch für die Interpretation von multispektralen Bilddaten von Landsat TM und hyperspektralen Daten des HyMap-Sensors aus dem Untersuchungsgebiet (vgl. 2.3) verwendet werden. Dies ermöglichte die Ableitung einer räumlich differenzierten Karte der Verteilung des organischen Kohlenstoffs im Untersuchungsgebiet. Die anhand von 15 ausgewählten Standorten vorläufig überprüften Ergebnisse deuten an, dass insbesondere für niedrige C_{org} -Konzentrationen anhand der Satellitendaten niedrigere Schätzwerte als mit den HyMap-Hyperspektral-daten ermittelt wurden (Abb. 6).

Ein weiteres Beispiel für die Ableitung pedogener Größen aus Bilddaten bildet eine Studie aus dem Nordwestteil der Negev-Wüste in Israel (HILL et al. 2000). Dieses Gebiet bildet den östlichen Ausläufer des Sinai-Sandfeldes und ist durch west-ost-orientierte Longitudinaldünen charakterisiert, die durch Depressionen zwischen den Dünen (Interdunes) getrennt werden. Der obere Teil der Dünen besteht aus unverfestigtem Sand und ist fast vollständig vegetationsfrei, während die Dünenbasis und die Interdunes eine dichtere Vegetation aufweisen und zu großen Teilen durch biogene Krusten bedeckt sind. Die Zwischendünenbereiche sind außerdem durch inaktive Dünen, Nebkhas und vegetationsfreie Oberflächen („Playa“) mit vorherrschend schluffig-tonigen Sedimenten charakterisiert.

In diesem Gebiet wurden Reflexionsmessungen der unterschiedlichen vorherrschenden Substrat- und Oberflächentypen durchgeführt. Anhand einer spektralen Entmischung von digitalisierten, reflexionskalibrierten Luftbildern sowie Hyperspektral-

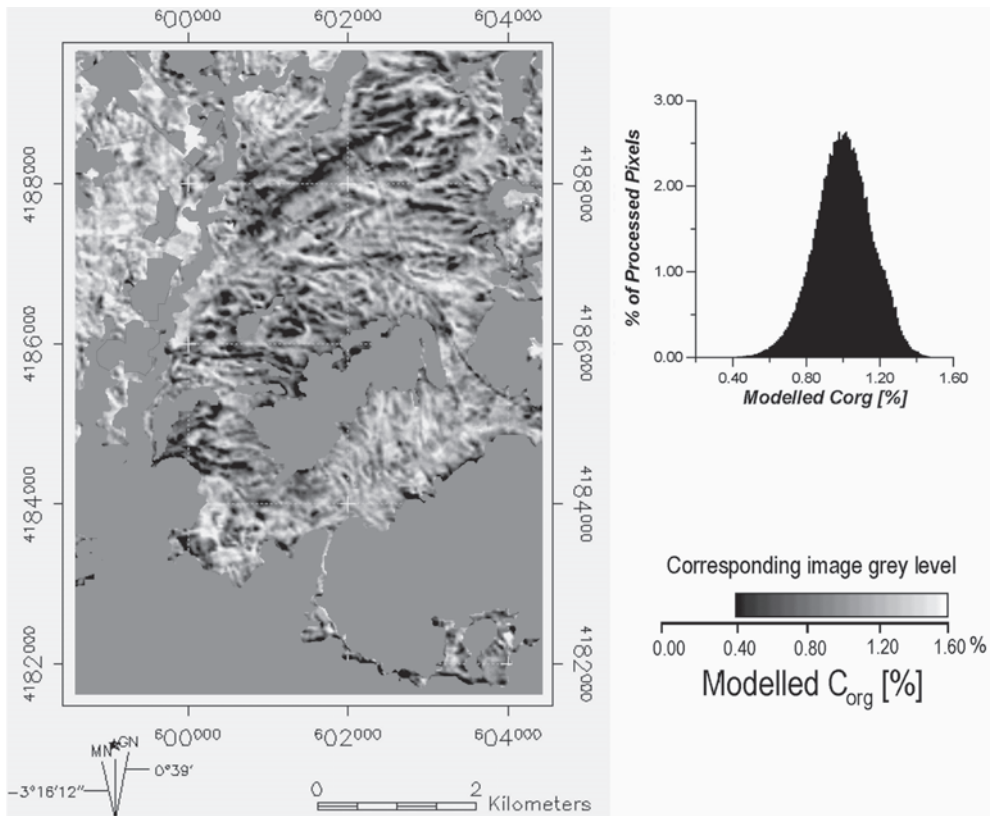


Abb. 6: Modellierung der durchschnittlichen Konzentrationen an organischem Kohlenstoff aus drei Landsat-TM Datensätzen (7/89, 4/92 und 7/92) für das Untersuchungsgebiet der Cañada Hermosa (SE-Spanien). Das Histogramm zeigt die Verteilung der C_{org} -Werte.

daten des DAIS-7915 Sensors wurden die proportionalen Anteile der Oberböden an Sand, Feinmaterial und biogener Bestandteile quantitativ bestimmt. Übereinstimmend sind dabei die Sande der Dünenkämme (rötlich) und die Playas (bläulich) zu erkennen, während die biogenen Krusten in grünlichen Farbtönen dargestellt sind (Abb. 7 & Abb. 8). Weiterführende Detailuntersuchungen sind in Bearbeitung.

4 Fazit

Die Analyse geo-ökologischer Prozesse auf unterschiedlichen Maßstabsebenen erfordert auch die räumliche Erfassung aussagekräftiger pedogener Eigenschaften. Die hier zusammengefassten Untersuchungen zeigen, dass ausgewählte Bodeninhaltsstoffe

(Fe, anorganischer und organischer Kohlenstoff) mit statistischen Modellen erfolgreich aus Reflexionsmessungen abgeleitet werden können. Es konnten sowohl kontinuumsbezogene wie auch auf die Auswertung spezifischer Absorptionsbanden ausgerichtete Verfahren erfolgreich eingesetzt werden. Damit ist ein schnelles Screening für ausgewählte Bodeninhaltsstoffe als Ergänzung zu chemischen Laboranalysen möglich. Für andere chemische Bodenkenngrößen, insbesondere für pflanzenverfügbare Nährstoffe, wurden hingegen keine ausreichend genauen Schätzergebnisse erzielt. Die Kalibrierung statistischer Modelle mit in-situ gewonnenen Reflexionsspektren stellt ein weiteres Problem dar. Die Übertragbarkeit von Labormodellen auf Bilddaten ist mit Einschränkungen möglich.

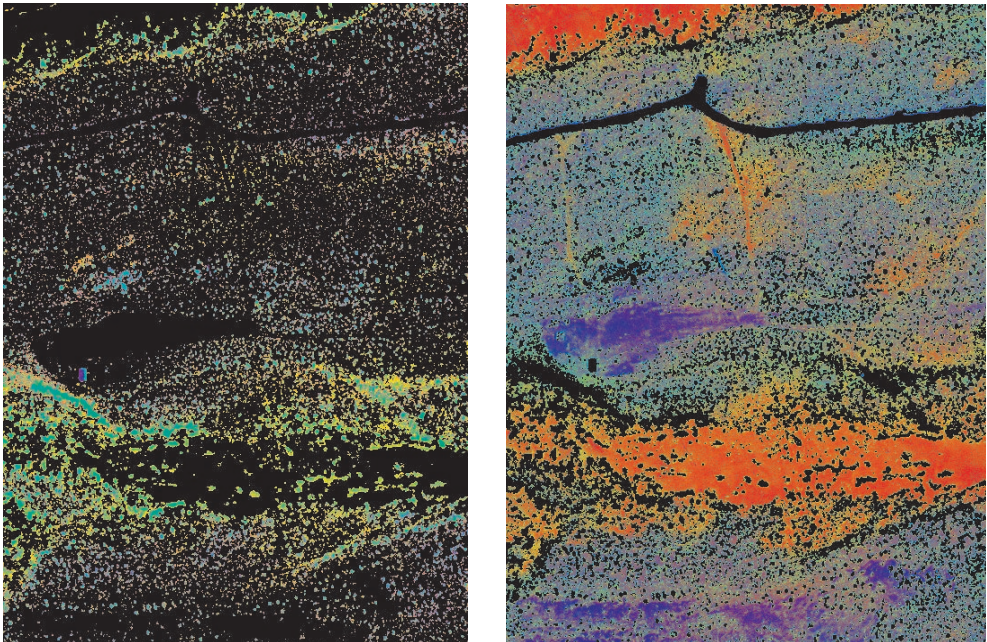


Abb. 7: Farbkomposite der Abundanzbilder für Vegetation (links) und Substrate (rechts) einer stratifizierten Entmischung aus Luftbildern (Nizzana/Nord-Negev). Die RGB-Darstellung zeigt die relativen Anteile an Sand – photosynthetisch aktiver Vegetation – verholzter Vegetation (links) und Sand – biogener Kruste – Schluff/Ton (rechts).

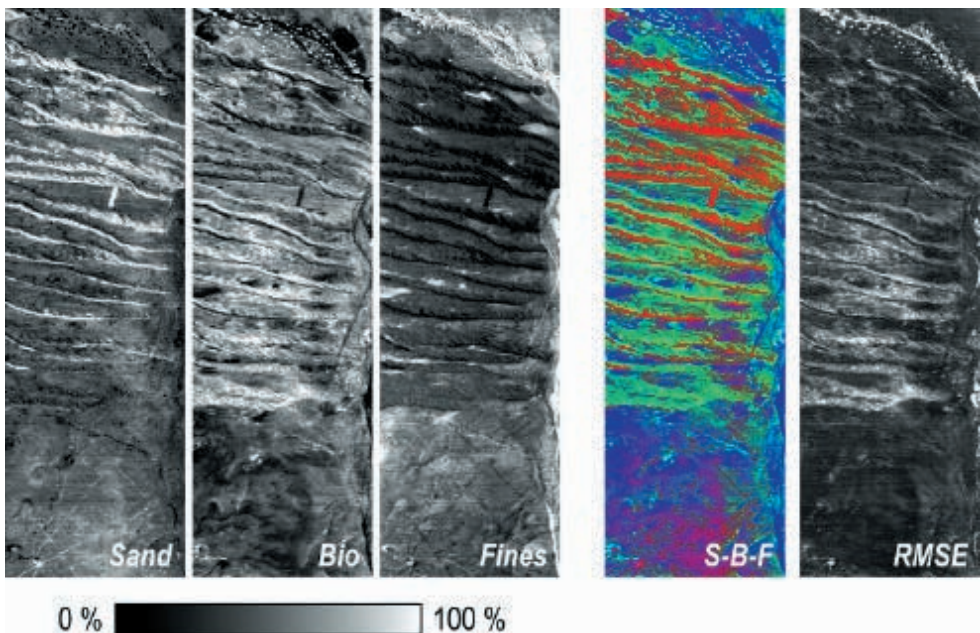


Abb. 8: Abundanzbilder für Sand, biogenes Krustenmaterial und Feinmaterial (Schluff/Ton), eine RGB-Farbkomposite dieser Fraktionen und der Root Mean Square Error des verwendeten Dreimember-Modells aus kalibrierten und atmosphärisch korrigierten DAIS-7915-Daten (Nizzana/Nord-Negev) (aus HILL et al. 2000).

Literatur

- BAUMGARDNER, M.F., SILVA, L.F., BIEHL, L.L. & STONER, E.R., 1985: Reflectance properties of soils. – *Advances in Agronomy*, **38**: 1–44.
- BEN-DOR, E. & BANIN, A., 1994: Visible and near-infrared (0.4–1.1 μm) analysis of arid and semi-arid soils. – *Remote Sensing of Environment*, **48**: 261–274.
- BEN-DOR, E. & BANIN, A., 1995: Near infrared analysis (NIRA) as a method to simultaneously evaluate spectral featureless constituents in soils. – *Soil Science*, **150**: 259–270.
- BURNS, R.G., 1993: Mineralogical applications of crystal field theory. (Ed.: A. PUTNIS & R.C. LIEBERMANN), 2nd edition. – Cambridge, Cambridge University Press.
- CLARK, N. (1999): Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. – In: RYERSON, R. A. (Hrsg.): *Manual of Remote Sensing* (3rd ed.).
- CONDIT, H.R., 1970: The spectral reflectance of American soils. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **36**: 955–966.
- GAFFEY, S.J., 1986: Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35–2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite. – *American Mineralogist*, **71**: 151–162.
- GEERKEN, R., 1991: Informationspotential von spektral hochauflösenden Fernerkundungsdaten für die Identifizierung von Mineralen und Gesteinen. Laborversuche und Anwendungsbeispiele in der Geologie. – Stuttgart.
- HAUFF, P.L. & KRUSE, F.A., 1990: International spectral properties data base. Species characterization. Handcopy. (prepared for the IGCP 264 Data Base Committee). Boulder, Co.
- HILL, J. & SCHÜTT, B., 2000: Mapping complex patterns of erosion and stability in dry mediterranean ecosystems. – *Remote Sensing of Environment*, **74**: 557–569.
- HILL, J., UDELHOVEN, T., SCHÜTT, B. & YAIR, A., 2000: Differentiating biological soil crusts in a sandy arid ecosystem based on hyperspectral data acquired with DAIS 7915. – In: SCHAEPMANN, M., SCHLÄPFER, D. & ITTEN, K. (Ed.): 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy. – pp. 427–436.
- HUNT, G.R. & SALISBURY J.W., 1971: Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates. – *Modern Geology*, **2**, 23–30.
- HUNT, G.R., SALISBURY, J.W. & LENHOFF, C.J., 1971a: Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. – *Modern Geology*, **2**: 195–205.
- IRONS, J.R., WEISMILLER, R.A. & PETERSEN, G.W., 1989: Soil reflectance. – In: ASRAR, C., 1989: *Theory and applications of optical remote sensing*. – pp. 66–105, New York.
- JARMER, T. & SCHÜTT, B., 1998: Analysis of iron contents in carbonate bedrock by spectroradiometric detection based on experimentally designed substrates. – In: SCHAEPMANN, M., SCHLÄPFER, D. & ITTEN, K.: 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy. – pp. 375–382.
- JARMER, T., LAVÉE, H., HILL, J. & SARAH, P., 2002: Spectral detection of inorganic carbon content along a semi-arid to hyper-arid climatic gradient in the Judean desert (Israel). – 2nd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, 2002, Enschede (on CD-Rom).
- MARTENS, H. & NAES, T., 1989: Multivariate Calibration. – John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- SHEPHERD, K.D. & WALSH, M.G., 2002: Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. – *Soil Sci. Am. J.*, **66**: 988–998.
- SUDDUTH, K.A. & HUMMEL, J.W., 1991: Evaluation of reflectance methods for soil organic matter sensing. – *Transactions of the ASAE*, **34**: 1900–1909.
- UDELHOVEN, T.; EMMERLING, C. & JARMER, T., 2003: Quantitative analysis of soil chemical properties with diffuse reflectance spectrometry and partial-least-square regression. – *Plant and Soil* (accepted).
- VAN DER MEER, F.D., 1995: Imaging spectrometry and the Ronda peridotites. – Wageningen.
- Anschriften der Autoren:
 Dipl.-Geogr. THOMAS JARMER, Universität Trier, Abt. Fernerkundung, Behringstraße, D-54286 Trier
 Tel.: +49-651-201-4605,
 Fax: +49-651-201-3815,
 e-mail: jarmer@uni-trier.de
 Dr. rer. nat. THOMAS UDELHOVEN, Universität Trier, Abt. Fernerkundung, Behringstraße, D-54286 Trier
 Tel.: +49-651-201-4594,
 Fax: +49-651-201-3815,
 e-mail: udelhove@uni-trier.de
 Prof. Dr. rer. nat. JOACHIM HILL, Universität Trier, Abt. Fernerkundung, Behringstraße, D-54286 Trier,
 Tel.: +49-651-201-4591,
 Fax: +49-651-201-3815,
 e-mail: hillj@uni-trier.de
- Manuskript eingereicht: November 2002
 Angenommen: Januar 2003