

Die Erfassung organischen Kohlenstoffs des Oberbodens mittels Hyperspektraldaten

Detection of top soil organic carbon by hyperspectral datasets

Thomas Jarmer¹, Holger Lilienthal², Manfred Ehlers¹, Pablo Rosso³

¹ *Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastrasse 22b, 49076 Osnabrück, Germany*

E-mail: tjarmer@igf.uni-osnabrueck.de, mehlers@igf.uni-osnabrueck.de

² *Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany*

E-mail: holger.lilienthal@jki.bund.de

³ *Product Development Group, RapidEye AG, Molkenmarkt 30, 14776 Brandenburg an der Havel, Germany*

E-mail: rosso@rapideye.de

Zusammenfassung: In der vorliegenden Studie wird die räumliche Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden mittels Hyperspektraldaten vorgestellt. Dazu wurde der organische Kohlenstoff von Oberbodenproben eines landwirtschaftlich genutzten Feldes nördlich von Osnabrück (Niedersachsen) analysiert. Im Labor wurden außerdem Reflexionsmessungen mit einem ASD FieldSpec-III Spektroradiometer durchgeführt. Aus den Reflexionsspektren wurden synthetische Spektren in der spektralen Auflösung des Penta-Spek-Systems generiert. Die Schätzung des organischen Kohlenstoffs aus den Laborspektren erfolgte über ein Partial Least Squares Regressionsmodell. Die aus den Penta-Spek-Daten geschätzten Konzentrationen lagen im Konzentrationsbereich der Laboranalytik und spiegelten die räumlichen Strukturen des Ackers wider. Die Ergebnisse zeigen das große Potential der Methode als ein schnelles Screening-Tool für die räumliche Erfassung organischen Kohlenstoffs und stellen eine geeignete Alternative zur zeit- und kostenintensiven chemischen Analyse im Labor dar. Damit wurden die Grundlagen für eine Anwendung der Methode auf spektralen Bilddaten entwickelt.

Deskriptoren: organischer Kohlenstoff, Spektroskopie, PLSR

Abstract: *This study focuses on spatial assessment of organic carbon of agricultural soils from hyperspectral data. For this purpose organic carbon of top soil samples of an agricultural used plot north of Osnabrück (Lower Saxony, NW-Germany) were analysed. Soil reflectance of the samples was measured in the lab using an ASD FieldSpec-III spectroradiometer. Reflectance spectra have been resampled to spectral resolution of the so-called "Penta-Spek-System". For organic carbon prediction, an empirical model*

based on partial least squares (PLS) regression was defined from the measured reflectance spectra. Concentrations obtained from simulated Penta-Spek data are in accordance with the concentration range of the chemical analysis. The predicted soil organic carbon concentrations reflect the spatial conditions of the investigated plot. The results indicate the potential of this method as a quick screening tool for the spatial assessment organic carbon, and therefore an appropriate alternative to time- and cost-intensive chemical analysis in the laboratory. Therewith basics of an application of this approach on spectral imagery have been developed.

Keywords: organic carbon, spectroscopy, PLSR

1 Einleitung

Bodeninhärente spektrale Eigenschaften, wie unterschiedliche Kombinationen mineralischer Komponenten, organischer Substanz und Bodenfeuchte beeinflussen die spektrale Reflexion von Böden (BAUMGARDNER *et al.* 1985). Die Beziehung zwischen spektraler Reflexion und Bodeneigenschaften wie zum Beispiel Korngrößenverteilung, Bodenfeuchte, Eisenoxide Karbonatgehalt und organische Substanz wurden in vielen Studien untersucht (z. B., KRISHNAN *et al.* 1980, KOSMAS *et al.* 1984, BEN-DOR & BANIN 1995a, b, UDELHOVEN *et al.* 2003, VISCARRA ROSSEL *et al.* 2006, JARMER *et al.* 2008, RICHTER *et al.* 2009) Obwohl einige dieser Studien ihr Potential unter Laborbedingungen belegten, sind Anwendungen für bildgebende Systeme selten und auf kleine Gebiete beschränkt (SELIGE *et al.* 2006, GOMEZ *et al.* 2008).

Die Erfassung und Kartierung organischen Kohlenstoffs ist nicht nur für den Bodenschutz von großer Bedeutung, sondern auch bei der Entwicklung von Strategien zur Minderung der globalen Erwärmung (JONES *et al.* 2005). Da Böden mehr als doppelt so viel Kohlenstoff im Vergleich zur Vegetation oder der Atmosphäre speichern können (BATES 1996), werden Bewirtschaftungspraktiken, die die Kohlenstoffspeicherung im Boden unterstützen, als Möglichkeit zur Reduzierung des CO₂ erwogen (LAL *et al.* 1998).

Die fernerkundliche Erfassung des Bodenkohlenstoffes besitzt ein großes Potential für ein bodenbezogenes Betriebsmanagement. Dies ist besonders wichtig vor dem Hintergrund der schnellen Entwicklung neuer Fernerkundungssensoren, wie dem Hyperspektralsatelliten EnMAP, die voraussichtlich in den nächsten Jahren gestartet werden. Allerdings werden auch diese operationellen Sensoren aufgrund von Wolkenbedeckung und konkurrierender Datenakquise nur eingeschränkt Daten liefern, so dass terrestrischen Hyperspektralsystemen, wie beispielsweise dem Penta-Spek-System des JKI (LILIEN-THAL & SCHNUG 2010), eine herausragende Bedeutung zukommt.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist die räumliche Erfassung organischen Kohlenstoffes im Boden aus Hyperspektraldaten. Dabei wird auch der Einfluss der spektralen Auflö-

sung der Hyperspektraldaten auf die Modellierung untersucht, um die Anforderungen an ein terrestrisches Hyperspektralsystem zur Quantifizierung organischen Kohlenstoffes zu bestimmen.

2 Material und Methoden

Das Untersuchungsgebiet liegt im südwestlichsten Teil Niedersachsens ($52^{\circ}23'N / 8^{\circ}02'E$; **Abbildung 1**). Zehn Kilometer nördlich von Osnabrück wurde in der Nähe des Ortes Engter ein landwirtschaftlicher Schlag („Faldieke“) mit einer Größe von ca. fünf Hektar beprobt. Das untersuchte Feld erstreckt sich 300 m in West-Ost-Richtung und 120 m in Nord-Süd-Richtung. Bei den Böden handelt es sich um nährstoffarme Gleye und Pseudogleye, auf denen vor der Probennahme Weizen angebaut wurde. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt bei etwa 700 mm.

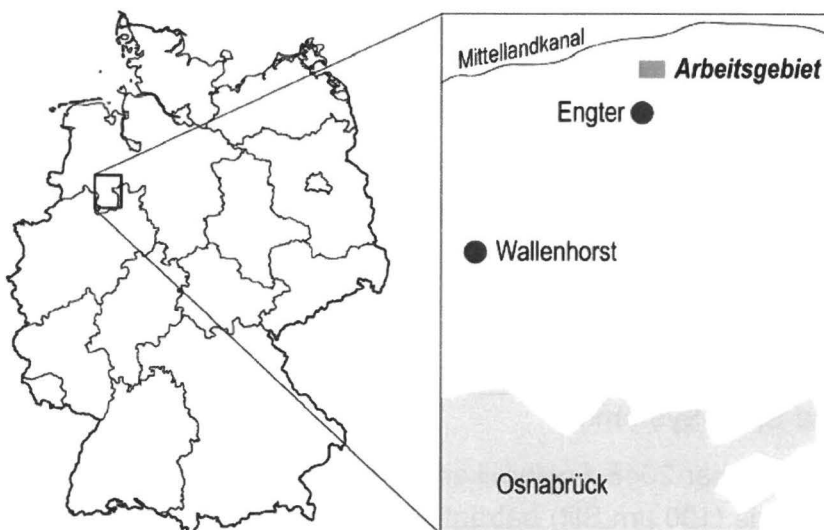


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes

Die Bodenprobennahme erfolgte im Oktober 2009 nach der Ernte bei trockenen Wetterverhältnissen. Um die räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften zu berücksichtigen, wurde eine 30 x 30 m-Rasterbeprobung durchgeführt ($n = 40$). An jeder Rasterposition wurde eine integrative Oberbodenprobe des obersten 1 cm des Bodenprofils einer Fläche von ca. 1 m² genommen. Mittels differenziellem GPS wurde jede Beprobungsstelle exakt verortet. Der Lagefehler für die einzelnen Probenstandorte liegt im Sub-Meter-Bereich.

Die Bodenproben wurden im Labor luftgetrocknet, vorsichtig zerkleinert und auf 2 mm gesiebt und anschließend für die chemische Analyse gemörsert. Die chemische Analyse der Bodenproben (organischer Kohlenstoff) wurde am RC612 (Temperaturgesteuer-

ter Kohlenstoff/Wasser-Phasenanalysator) der Firma LECO Instrumente GmbH vorgenommen.

Die bi-direktionelle Reflexion der gesiebten Bodenproben wurde im Labor mit ASD FieldSpec-III Spektroradiometer (Analytical Spectral Devices Inc.) in 1 nm-Auflösung im Wellenlängenbereich 350 - 2.500 nm unter Verwendung eines Reflexionsstandards (Spectralon©) gemessen. Der optische Sensor des Spektroradiometers wurde für die Messungen an einem Stativ in Nadir-Position in einer Entfernung von zehn Zentimetern befestigt. Die Beleuchtung des Referenzpanels und der Bodenproben erfolgte mit einer 1000 W Videolampe aus ca. einem Meter Entfernung unter einem Einstrahlungswinkel von 45 Grad.

Absolute Reflexionsspektren wurden durch Multiplikation der gemessenen Reflexion mit der zertifizierten Reflexion des Spectralons berechnet. Eine Datenvorverarbeitung wurde nicht durchgeführt; allerdings wurde in der Folge nur der Wellenlängenbereich 400 - 900 nm verwendet, in dem das Penta-Spek-System die Reflexion messen kann.

Die Schätzung der Gehalte an organischem Kohlenstoff und an Wasser aus den Reflexionsspektren erfolgte mittels Partial Least-Squares Regression (PLSR). Die maximale Anzahl der latenten Variablen (Rank) wurde auf zehn begrenzt. Die Ergebnisse der PLSR wurden nach der 'leave-one-out'-Methode kreuzvalidiert (cv). Das Bestimmtheitsmaß (r^2), der Quadratwurzelfehler (RMSE) und das Verhältnis des Standardfehlers der Vorhersage zur Standardabweichung (RPD) wurden als Maße für die Schätzgenauigkeit bestimmt (MALLEY *et al.* 2004).

3 Simulation des Penta-Spek-Systems

Das Penta-Spek-System verfügt über 2048 Spektralkanäle in zwei Modulen. Die spektrale Auflösung des ersten Moduls (100 μm Slit) beträgt 0,67 nm (0,57 – 0,75 nm), während das zweite Modul (50 μm Slit) eine spektrale Auflösung von 0,83 nm (0,71 – 0,93 nm) besitzt. Für die Simulation des Einflusses unterschiedlicher spektralen Auflösungen von Hyperspektraldaten auf die Modellierung des organischen Kohlenstoffes wurde die ursprüngliche 1 nm-Auflösung des ASD FieldSpec-III Spektroradiometer als spektral höchst aufgelöste Daten verwendet. Ausgehend von diesen Daten wurde die spektrale Auflösung in fünf Schritten bis auf eine Kanalbreite von 40 nm degradiert (**Tabelle 1**). Als Ergebnis lagen Reflexionsspektren in sechs verschiedenen spektralen Auflösungen mit unterschiedlicher Anzahl von Kanälen im Wellenlängenbereich 400 – 900 nm für die vergleichende Analyse vor.

Tabelle 1: Spektrale Auflösungen und Anzahl der Kanäle der Simulationen

Spektrale Auflösung	Anzahl der Kanäle
1 nm	501
3 nm	168
5 nm	101
10 nm	51
20 nm	26
40 nm	14

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Gehalte an organischem Kohlenstoff in den untersuchten Bodenproben variierten zwischen 6.3 g kg^{-1} und 26.9 g kg^{-1} mit einem Mittelwert von 11.6 g kg^{-1} (Std.-Abw.: 4.9 g kg^{-1}). Allerdings lagen die untersuchten Parameter für den Schlag Faldieke nicht normalverteilt vor. Für den organischen Kohlenstoff war dies auf die Überrepräsentation niedriger Werte zurückzuführen. Da auch nach dem Logarithmieren keine Normalverteilung gegeben war, wurden die C_{org} -Werte aufsteigend sortiert und jede 4. Probe im Konzentrationsbereich unter 10 g kg^{-1} ausgeschlossen. Nach diesem Vorgehen war die Normalverteilung ($n = 30$) für organischen Kohlenstoff gegeben.

Tabelle 2: Einfluss der spektralen Auflösung auf die Schätzgüte

Spektrale Auflösung	Anzahl der Kanäle	Rank	r^2_{cv}	RMSE_{cv}	RPD_{cv}
1 nm	501	8	0,90	1,36	3,24
3 nm	168	1	0,91	1,31	3,36
5 nm	101	1	0,91	1,29	3,43
10 nm	51	1	0,92	1,24	3,56
20 nm	26	3	0,89	1,42	3,11
40 nm	14	1	0,88	1,53	2,89

Die Schätzungen des organischen Kohlenstoffes aus Reflexionsspektren unterschiedlicher spektraler Auflösung lieferten in allen Simulationen sehr gute Ergebnisse. In allen Fällen lag das kreuzvalidierte r^2 deutlich über 0,85 bei einem RMSE von unter $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ (**Tabelle 2**). Der RPD erreichte im Minimum einen Wert von 2,89 und lag damit deutlich über dem von DUNN *et al.* (2002) für Bodenanalysen einer standortspezifischen Landwirtschaft als Untergrenze vorgeschlagen Wert von 2,0 für exzellente Schätzungen.

Eine genauere Betrachtung der Ergebnisse zeigt dabei, dass die beste Schätzung des organischen Kohlenstoffes mit den Spektren in 10 nm Auflösung erreicht wurde und

nicht die spektral höchst aufgelösten Daten die besten Schätzungen ermöglichten. Ausgehend von der 1 nm-Auflösung nimmt das r^2 - wenn auch geringfügig mit verringerter spektraler Auflösung - bis zu einer Auflösung von 10 nm zu. Deutlicher wird die verbesserte Modellgüte mit abnehmender spektraler Auflösung bei Betrachtung des $RMSE_{cv}$ (Abnahme von 1,36 auf 1,24 g kg⁻¹) und des RPD (Anstieg von 3,24 auf 3,56). Bei der Verringerung der spektralen Auflösung auf 20 nm und weiter auf 40 nm kehrt sich dieser Trend um und die Güte der Schätzung organischen Kohlenstoffes nimmt deutlich ab. Die Verringerung der spektralen Auflösung scheint bis zu einem gewissen Grad wie eine Glättung der Spektraldaten zu wirken und so das Daten-inhärente Rauschen zu reduzieren. Wird allerdings durch das spektrale Resampling zu stark geglättet bzw. die Anzahl der spektralen Kanäle zu stark reduziert, wird sich dies auf die Schätzung des organischen Kohlenstoffes eindeutig negativ aus.

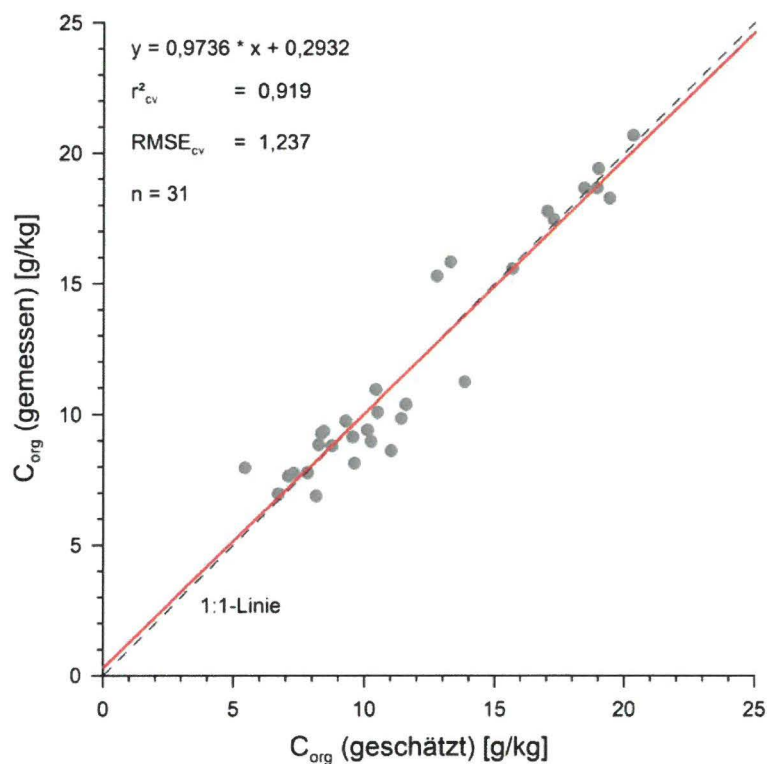


Abbildung 2: Scatterplot der PLS Schätzung (kruzvalidiert) für organischen Kohlenstoff aus simulierten Penta-Spek Daten in 10 nm Auflösung

In **Abbildung 2** sind die kruzvalidierten Schätzungen des organischen Kohlenstoffes für simulierten Penta-Spek Daten in 10 nm Auflösung dargestellt. Der Zusammenhang zwischen gemessenen und geschätzten Konzentrationen organischen Kohlenstoffes für den untersuchten landwirtschaftlichen Schlag lässt sich kein signifikanter Offset erkennen und die Regressionsgerade liegt sehr nahe der 1:1-Linie.

Ein operationeller Einsatz der Reflexionsspektrometrie und insbesondere des Penta-Spek-Systems für das Bodenmonitoring erfordert die akkurate Wiedergabe der räumlichen Konzentrationsmuster des organischen Kohlenstoffes. Um die Vorhersagekraft über punktuelle Daten hinaus zu belegen, wurden die im Labor gemessenen und die geschätzten Konzentrationen organischen Kohlenstoffes interpoliert (**Abbildung 3**).

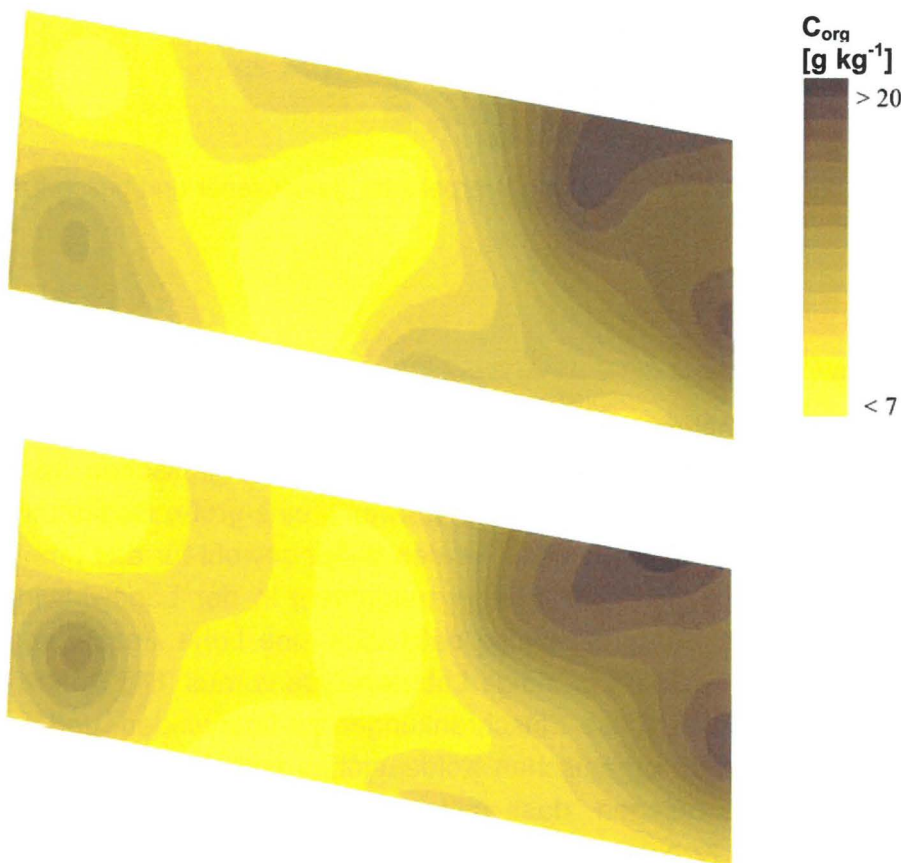


Abbildung 3: Interpolation gemessener (oben) und geschätzter (unten) Gehalte organischen Kohlenstoffes für den untersuchten Schlag

Ein Vergleich der Interpolationsergebnisse bestätigt, dass die Schätzung der PLSR eine relativ genaue Wiedergabe des räumlichen Musters organischen Kohlenstoffes ermöglicht. Das Muster, das sich für die geschätzten Gehalte ergibt, stimmt sehr gut mit den interpolierten gemessenen Werten überein. Um Unterschiede zwischen beiden räumlichen Mustern hervorzuheben wurden die räumlichen interpolierten Schätzungen von den aus den gemessenen Gehalten interpolierten Werten abgezogen. Dadurch zeigt sich, dass die Überschätzung mit $2,67 \text{ g kg}^{-1}$ im Norden des Feldes auftritt, während die stärkste Unterschätzung im rechten zentralen Bereich mit $2,83 \text{ g kg}^{-1}$ vorliegt.

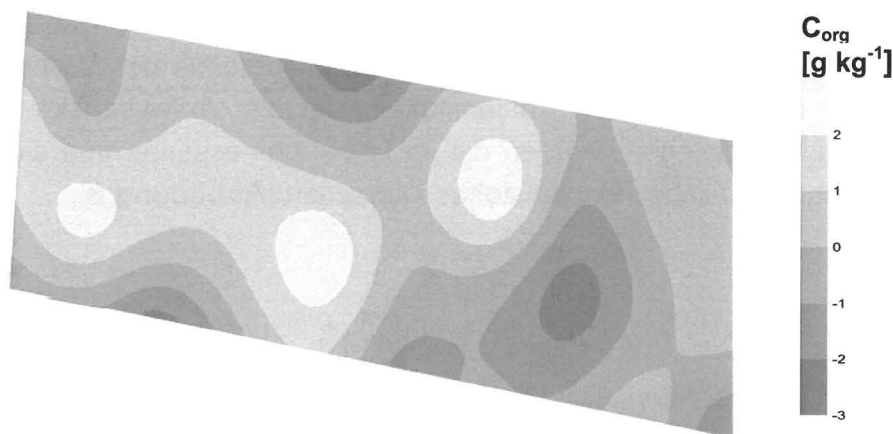


Abbildung 4: Unterschiede der räumlichen Verteilung interpolierter gemessener und geschätzter Konzentrationen organischen Kohlenstoffes

5 Zusammenfassung

Die Erfassung des organischen Kohlenstoffes ist von großer Relevanz für den Bodenschutz. Gleichzeitig kommt einer flächenscharfen Abschätzung des organischen Kohlenstoffgehaltes im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung eine große Bedeutung zu. Aktuelle Karten des organischen Kohlenstoffes werden daher sowohl für das Monitoring als auch für das standortspezifische Betriebsmanagement in der Landwirtschaft benötigt. In der klassischen Vorgehensweise setzt dies eine hohe Anzahl von Bodenproben und deren zeit- und kostenaufwändige Laboranalyse voraus. Die Reflexionsspektrometrie besitzt das Potential, diese Einschränkungen zu überwinden, und so die zeitliche und räumliche Variabilität organischen Kohlenstoffes zu erfassen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie belegen, dass mittels PLSR aus Laborreflexionsspektren die Gehalte organischen Kohlenstoffes mit sehr hoher Genauigkeit geschätzt werden können. Die Simulation von Spektren des Penta-Spek-Systems belegte dabei insbesondere das Potential eines terrestrischen Hyperspektralsystems im Spektralbereich 400 – 900 nm für die Quantifizierung des organischen Kohlenstoffes landwirtschaftlicher Böden. Darüber hinaus konnte in den Simulation unterschiedlicher spektraler Auflösungen aufgezeigt werden, dass nicht ausschließlich eine hohe spektrale Auflösung relevant ist. Die Reduzierung der spektralen Auflösung führte in der Simulation scheinbar zu einer Glättung und somit Rauschreduzierung, so dass bessere Schätzungen möglich waren.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft finanziell gefördert. Die Autoren danken Martin Bachmann und Sebastian Weide von der DLR für Organisation und die Möglichkeit der Teilnahme an der HyEurope Kampagne

2009. Ganz besonders möchten wir uns bei dem Landwirt des untersuchten Schlages für seine Kooperation und Unterstützung bedanken.

Literatur

- BATJES N.H. (1996):** Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47: 151-163
- 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. (1995a):** Near-Infrared analysis (NIRA) as a method to simultaneously evaluate spectral featureless constituents in soils. *Soil Science*, 159(4): 259-270
- BEN-DOR E., BANIN A. (1995b):** Near-Infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2): 364-372
- DUNN B.W., BEECHER H.G., BATTEN G.D., CIAVARELLA S. (2002):** The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – A case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42: 607-614
- GOMEZ C., VISCARRA ROSSEL R.A., McBRATNEY A.B. (2008):** Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, 146(3-4): 403-411
- JARMER T., VOHLAND M., LILIENHAL H., SCHNUG E. (2008):** Estimation of some chemical properties of an agricultural soil by spectroradiometric measurements. *Pedosphere*, 18(2): 163-170
- JONES R.J.A., HIEDERER R., RUCO E., MONTANARELLA L. (2005):** Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European Journal of Soil Science*, 56: 655–671
- KOSMAS C.S., CURI N., BRYANT R.B., FRANZMEIER D.P. (1984):** Characterisation of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 401-405
- KRISHNAN P., ALEXANDER D.J., BUTLER B., HUMMEL J.W. (1980):** Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 1282-1285
- LAL R., KIMBLE J.M., FOLLETT R.F., COLE C.V. (1998):** The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect, Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan
- LILIENHAL H., SCHNUG E. (2010):** Bodengestützte Erfassung räumlich hochaufgelöster Hyperspektraldaten. Das Penta-Spek System. In: 16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 4. Mai 2010, Braunschweig, Bornimer Agrartechnische Berichte; in diesem Band
- MALLEY D.F., MARTIN P.D., BEN-DOR E. (2004):** Application in analysis of soils. In *Near-infrared spectroscopy in agriculture (= Agronomy, 44)* (Eds. C.A. Roberts, J. Workman Jr & J.B. Reeves III), Madison, pp. 729-783
- RICHTER N., JARMER T., CHABRILLAT S., OYONARTE C., HOSTERT P., KAUFMANN H. (2009):** Free iron oxide determination in Mediterranean soils using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 72-81
- SELIGE T., BÖHNER J., SCHMIDHALTER U. (2006):** High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. *Geoderma*, 136 (1-2): 235-244

- UDELHOVEN T., EMMERLING C., JARMER T. (2003):** Quantitative analysis of soil chemical properties with diffuse reflectance spectrometry and partial-least-square regression: A feasibility study. *Plant and Soil*, 251(2): 319-329
- VISCARRA ROSSEL R.A., WALVOORT D.J.J., MCBRATNEY A.B., JANIK L.J., SKJEMSTAD J.O. (2006):** Visible, near infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59–75