

Untersuchung zum Informationspotenzial multispektraler Satellitendaten zur Aktualisierung grossmaßstäbiger Bodenkarten

Erik Zillmann und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Die Erdoberfläche wird von einer Vielzahl von Satelliten in regelmäßigen Abständen beobachtet. Die Sensoren zeichnen im Jahresverlauf oftmals auch unbewachsene Ackerflächen auf. Damit ergibt sich die Möglichkeit, mit Hilfe der multispektralen Satellitendaten die räumliche Variabilität des Bodens zu untersuchen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die Lokalisierung und räumliche Abgrenzung von Bodenunterschieden im Vergleich zu grossmaßstäbigen Bodenkarten der Reichsbodenschätzung (RBS) dar. Die Untersuchungen wurden anhand von Satellitendaten der Aufnahmesysteme Landsat-TM und IRS-1C aus dem Jahr 1997 im Randbereich des Thüringer Beckens bei Weimar durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Potenzial zur Differenzierung unterschiedlicher Texturklassen im Satellitenbild besteht, wobei die größte Bedeutung dem Spektralbereich des mittleren Infrarots zukommt. Die Lage und Ausdehnung der Bereiche unterschiedlicher Texturen im Satellitenbild weichen teilweise vom Kartenmaterial ab, stellen aber die genauere Informationsebene dar.

Schlüsselwörter: *Bodeninformation, Bodenreflexion, Bodentextur, Fernerkundung, räumliche Variabilität*

Summary

Satellite remote sensing allows the observation of the earth at regular temporal intervals. During the vegetation period bare soils are also measured by the different sensor systems. This allows the detection of spatial soil variability within multispectral satellite data. The main objective was the localisation and spatial differentiation of soil variability in comparison with large-scale soil evaluation maps of Germany (RBS). The investigations were carried out with satellite data of the region at the border of the Thüringer Becken near Weimar in 1997.

The results revealed the potential of multispectral satellite data to discriminate between different soil texture classes. For this application the spectral region in the middle infrared is of highest relevance. The site location and spatial expansion of areas with different soil texture differ partially from map information, but the satellite data is more accurate.

Keywords: *remote sensing, soil information, soil reflection, soil texture, spatial variability*

Einleitung

Die teilflächenspezifische Landbewirtschaftung (Precision Agriculture) soll der lokalen Variabilität natürlicher Standorteigenschaften Rechnung tragen, welche innerhalb eines Schrages größer sein kann, als in der gesamten umliegenden Landschaft, (Haneklaus et al., 1997). Die Realisierung dieser Managementmethode ist somit abhängig von der verfügbaren Informationsgrundlage über die Bodenheterogenitäten des Standortes.

Derzeit verfügbares Kartenmaterial ist hinsichtlich der räumlichen Genauigkeit nur bedingt für eine teilflächenorientierte Bewirtschaftung geeignet. Für die Erfassung kleinräumiger Bodenunterschiede sind grossmaßstäbige Bodenkarten im Maßstab von 1:5000 bis 1:25000 erforderlich (Capelle, 1999). Die Reichsbodenschätzung (RBS) stellt diesbezüglich noch immer die genaueste flächendeckend verfügbare Kartengrundlage über Textur, Entwicklungsgrad und Entstehungsart der Böden dar. Zu beachten ist hierbei, dass die Daten in den 1930er Jahren von einer Vielzahl an Personen mit unterschiedlicher Expertise erhoben wurden. Diese umfassende Datenbasis liegt heute teilweise digital vor.

Flächendaten über Boden- und Standortmerkmale sind mit traditionellen Erkundungs- und Kartierungsmethoden kaum noch rationell und mit ausreichender Genauigkeit zu beschaffen. Nach Herbst und Lamp (1999) wäre auf 47 % der Bodenfläche der Bundesrepublik eine 100 m Rasterbeprobung notwendig, um die Bodenverteilung hinreichend sicher zu erfassen. Auf den übrigen 53 % dagegen müssten die Proben aufgrund der starken Bodenheterogenität sogar in einem Raster von 50 m und dichter erhoben werden. Entsprechende Rasterabstände von 50-100 m ermittelten auch Haneklaus et al. (1997) für verschiedene Gebiete Norddeutschlands. Aufgrund der unregelmässigen Ausprägung der Bodenheterogenitäten kann aber eine Rasterbeprobung deren Erfassung innerhalb eines Schrages nicht immer gewährleisten (Poknee et al., 1996). Andere Ansätze zur effizienteren Bestimmung von dauerhaften Bodenparametern, wie Textur und Humusgehalt, liefern z. B. das „Self-Surveying-Verfahren“ (Haneklaus et al., 1998; Schröder, 1999) und für mittelfristig veränderliche Nährstoffe das „Directed-Sampling“ (Schnug et al., 1994, 1998; Poknee et al., 1996). Diese Verfahren können aber auch nur lokal zur Bestimmung von Bodenparametern herangezogen werden.

Den Methoden der Fernerkundung wird ein großes Potenzial zur großräumigen Variabilitätsfassung innerhalb landwirtschaftlicher Nutzflächen zugesprochen (Moran et al., 1997; Dixon & McCann, 1997; Brisco et al., 1998; Panten et al., 2003). Für die Erfassung räumlich-zeitlicher Variabilität von mittelfristig veränderlichen Nährstoffen ist die multispektrale Fernerkundung jedoch ungeeignet, da keine konsistenten Zusammenhänge zwischen Nährstoffversorgung und spektraler Signatur vorliegen (Panten, 2002). Von Interesse sind in diesem Zusammenhang daher die dauerhaften Bodenparameter Textur und Humusgehalt, welche das Reflexionsverhalten von Böden beeinflussen (Baumgardner et al., 1985) und die Hauptursache der standörtlichen Heterogenität darstellen (Panten et al., 2003).

Ziel der vorliegenden Untersuchung war der Vergleich des Informationsgehalts derzeit verfügbarer Kartenwerke, speziell der Reichsbodenschätzung, mit multispektralen Satellitenaufnahmen in Hinblick auf die Lokalisierung, räumliche Abgrenzung und inhaltliche Interpretation von Bodenvariabilitäten. Hierbei sollte insbesondere die räumliche Differenzierung unterschiedlicher Texturklassen im Satellitenbild analysiert und anhand der Karteninformation interpretiert werden. Weiterhin wurde der Informationsgehalt unterschiedlich spektral auflösender Aufnahmesensoren evaluiert.

Reflexionseigenschaften von Böden

Eine umfangreiche Zusammenfassung über die spektralen Reflexionseigenschaften von Böden wird von Baumgardner et al. (1985) geliefert. Böden reflektieren im sichtbaren Spektrum (0,4 – 0,7 μm) generell relativ schwach. Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Reflexionsintensität zu. Die Reflexion der solaren Strahlung an der vegetationslosen Bodenoberfläche wird hauptsächlich von den Faktoren Humusgehalt, Bodentextur, Eisenoxidgehalt und Bodenfeuchte bestimmt, wobei Wechselwirkungen bestehen.

Humusgehalt

Der Humusgehalt hat einen dominierenden Einfluss auf die Reflexionsintensität des Bodens. Nach Stoner und Baumgardner (1981) führt ein Anteil organischer Substanz von > 2 % zu einer vollständigen Überlagerung der Reflexionseigenschaften anderer Bodenbestandteile. Es besteht ein negativer Zusammenhang zwischen dem Gehalt an organischer Substanz und der Reflexionsintensität über den gesamten spektralen Bereich bis in das mittlere Infrarot hinein (Baumgardner et al., 1985; Coleman & Montgomery, 1987). Die Absorption ist im sichtbaren Spektralbereich am stärksten und nimmt mit Zunahme der Wellenlänge ab. Für die Differenzierung unterschiedlicher Gehalte sind insbesondere die Spektralbereiche im Rot und nahen Infrarot gut geeignet (Frazier et al., 1989). Diskrete Absorptionsbanden konnten bisher nicht nachgewiesen werden (Henderson et al., 1989).

Bodentextur

Die räumliche Variabilität der Korngrößen beeinflusst die spektrale Reflexion gleichmäßig über den gesamten Wellenlängenbereich (Baumgardner et al., 1985). Laboruntersuchungen von Boers und Hanks (1965) unter standardisierten Bedingungen zeigten eine höhere Gesamtreflexion feinkörniger Texturen im Vergleich zu grobkörnigen. Im Gelände dagegen weisen sandige Böden eine höhere Reflexion auf als tonige Böden (Myers et al., 1975). Die Ursache ist in der Aggregatbildung feinkörniger Böden zu sehen, die zu einer rauheren Oberflächenstruktur und damit einer Abnahme der Gesamtreflexion führt. Außerdem spielen Überlagerungseffekte durch organische Substanz und Bodenfeuchtigkeit eine entscheidende Rolle.

Eisenoxid und Kalziumkarbonat

Die Zunahme des Gesamtgehaltes an Eisenoxiden im Boden führt zu einer Dämpfung der spektralen Reflexion im gesamten sichtbaren Wellenlängenspektrum (Obuchov & Orlov, 1964). Eine charakteristische Absorptionsbande liegt bei 0,87 μm , deren Breite mit dem Eisengehalt zunimmt (Baumgardner et al., 1985). Zwischen Kalziumkarbonatgehalt und Reflexionsintensität des Bodens besteht ein positiver Zusammenhang im sichtbaren Spektrum (Ben-Dor & Banin, 1995). Nach Schröder (1989) führt ein Gehalt von > 25 % zu einem dominierenden Einfluss des Karbonats auf das Reflexionssignal, was die Reflexionswirksamkeit anderer Bodenparameter einschränkt. Dieser Aspekt spielt insbesondere bei der Ermittlung von Erosionserscheinungen eine Rolle, da hier das carbonathaltige geologische Ausgangsgestein verstärkt an die Bodenoberfläche gelangt (Brixy, 1997; Leone et al., 1995).

Bodenfeuchte

Der Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf die spektrale Reflexion wurde von Bowers und Hanks (1965) untersucht. Sie zeigten, dass ein Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes die Reflexion über die gesamte spektrale Bandbreite von 0,5 - 2,5 μm dämpft und die charakteristischen Absorptionsbanden bei 1,4 μm und 1,9 μm um so stärker ausgeprägt sind. Die Reflexionsintensität nimmt vor allem im Infrarot ab und lässt feuchte Böden in diesem Spektralbereich besonders dunkel erscheinen.

Material und Methoden

Testgebiet

Die Untersuchungen fanden auf Testflächen (Flächengrößen: 23 – 73 ha) nördlich von Weimar (N 51,1°; O 11,25°) im Randbereich des Thüringer Beckens statt (Abb. 1), dessen geologisches Ausgangsgestein von Schichten des unteren und mittleren Keupers bestimmt wird (Seidel, 1995).



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes bei Weimar mit Testflächen 203, 809 und 414.

Der mittlere Keuper ist geprägt durch Tonmergellagen, die sich in Folge von Verwitterungsprozessen zu tonigen Fließerden entwickelten. Er zeichnet sich vor allem durch sehr kalkhaltige Tone aus. Der untere Keuper weist eine größere Heterogenität mit sich abwechselnden Tonmergel- und sandigen Schichten auf. Über dem Ausgangsgestein sedimentierten äolische Lössschichten, die in großen Teilen des Gebietes die folgende Bodenentwicklung beeinflussten. Der Löß Thüringens ist aus lokalem geologischem Material entstanden und besitzt aus diesem Grund einen sehr hohen Tonanteil. Leitbodenformen im Untersuchungsraum sind die Parabraunerde, die Parabraun-Schwarzerde und die Rendzina. Als Begleitbodenformen treten Braunerden und Pelosole auf. Die Geomorphologie des Gebietes besteht vorwiegend aus welligen Plateaubereichen und Flachhängen. Die Reliefunterschiede innerhalb der einzelnen Testflächen sind gering. Eine detaillierte Beschreibung des Untersuchungsgebietes ist in Zillmann (1999) nachzulesen.

Satellitenszenen

Die Untersuchungen wurden anhand von Satellitenszenen der Aufnahmesysteme Landsat 5 -TM und IRS-1C von September 1997 durchgeführt. Die spektrale Auflösung der Aufnahmekanäle ist in Tab. 1 aufgeführt. Die Daten wurden unter Verwendung eines digitalen Geländemodells auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem geokodiert. Die Atmosphärenkorrektur wurde mittels eines einfachen Verfahrens (*Dark-Object-Substraction*) vorgenommen.

Aufgrund der Zielstellung der Studie konzentrierten sich die Untersuchungen auf vegetationslose Schläge, um ein unverfälschtes spektrales Abbild des Bodens analysieren zu können. Die entsprechenden Schläge wurden unter Verwendung des von Rouse et al. (1974) entwickelten Normalized-Difference-Vegetation-Index (NDVI) aus den Satellitenszenen extrahiert.

Tab. 1: Spektrale und räumliche Auflösung der Aufnahmesensoren des Landsat 5-TM und IRS 1-C

Landsat-5 TM			IRS-1C		
Band	Bandbreite μm	Pixel m	Band	Bandbreite μm	Pixel m
1	0.45-0.52	30	pan	0.5-0.75	≤ 10
2	0.52-0.60	30	LISS 1	0.52-0.59	23.5
3	0.63-0.69	30	LISS 2	0.62-0.68	23.5
4	0.76-0.90	30	LISS 3	0.77-0.86	23.5
5	1.55-1.75	30			
7	2.08-2.35	30			
6	10.4-12.5	120			

Aufgrund der klimatischen Bedingungen im Vorfeld der Aufnahmen vom 22.09.1997 (Landsat TM) bzw. 25.09.1997 (IRS-1C) variierte die Bodenfeuchtigkeit nur geringfügig. An der Wetterstation der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) bei Buttstedt wurden lediglich geringe Niederschläge innerhalb der letzten drei Wochen vor den Aufnahmen gemessen, so dass der Boden zumindest oberflächlich stark ausgetrocknet war (Zillmann, 1999). Die vorhandenen Unterschiede in der spektralen Reflexion beruhen somit auf den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens.

Methodik

Aus den vorverarbeiteten Satellitenszenen wurden die Testflächen ausmaskiert und mit den digitalisierten und georeferenzierten Klassengrenzen der RBS in ein geografisches Informationssystem (GIS) integriert. Flächen unterschiedlicher Reflexionsintensität innerhalb der Schläge wurden visuell in 2 - 3 Klassen differenziert. Hierfür wurden sowohl die Einzelkanäle als auch Farbdarstellungen verwendet. Aus den spektral abgrenzbaren Bereichen wurden jeweils zufällig 10 Bildpixel als Messpunkte für die spektrale Reflexion ausgewählt und die Grauwerte für jeden Spektralkanal extrahiert. Die so ermittelten Stichproben wurden als Mittelwert für den als spektral homogen anzusehenden Bereich des Schlages für die spektrale Signatur-

analyse verwendet.

Aufgrund fehlender Geländeinformation (Ground truth) konnten für die inhaltliche Interpretation der Reflexionsvariabilität nur die aus der RBS ableitbaren Bodeninformationen als Referenz herangezogen werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass eindeutige Klassenunterschiede in der Bodenart durchaus auch in multispektralen Satellitendaten räumlich abgrenzbar waren. So zeigten sandige und tonige Böden

in einzelnen Spektralkanälen eine andere Reflexionsintensität, als die im Untersuchungsgebiet dominierenden lehmigen Böden (L).

Der südliche Teilbereich von Schlag 414 mit erhöhtem Sandanteil (sL) wies in den Spektralkanälen des mittleren Infrarots des Landsat-TM eine höhere Reflexion auf, als der restliche Schlag (Abb. 2, rechts). Die räumliche Ausdehnung der Fläche mit erhöhter Reflexion erstreckt sich jedoch weiter in den Schlag hinein, als es die Klasseneinteilung der RBS ausweist. Die Information aus dem Satellitenbild bietet somit eine höhere räumliche Genauigkeit.

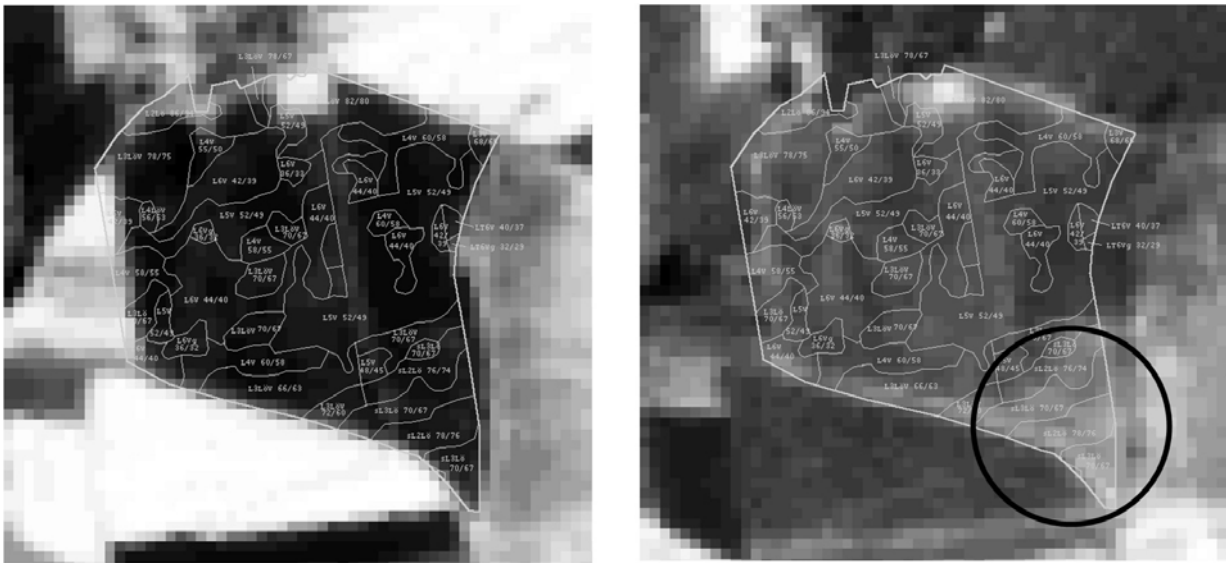


Abb. 2: Einzelkanalardarstellung des Schlages 414 bei Wohlsborn, überlagert mit den Klassen der Reichsbodenschätzung, links: Landsat TM-3 und rechts: Landsat TM-7 (Aufnahmedatum: 22.09.1997)

Bodensignaturdiagramm von Schlag 414

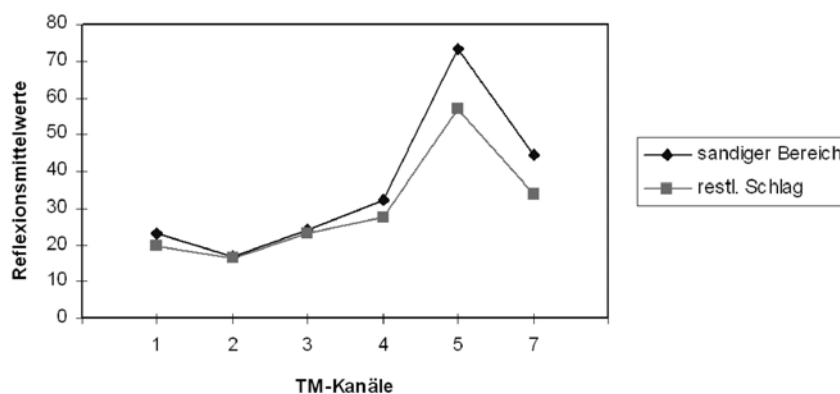


Abb. 3: Bodensignaturdiagramm für zwei Teilbereiche von Schlag 414 bei Wohlsborn für die spektrale Reflexion der Landsat-TM Kanäle

Im sichtbaren und nahen infraroten Wellenlängen-spektrum war die visuelle Differenzierung dieses Bereiches dagegen nicht möglich. Dies wird auch durch die Signaturanalyse bestätigt (Abb. 3), in der die größten Reflexionsunterschiede beider Teilflächen im Bereich des mittleren Infrarots liegen (Kanäle TM-5 und TM-7).

Entsprechende Reflexionsunterschiede konnten auch für tonige Böden (LT/T) ermittelt werden, wobei diese eine geringere Reflexion als die Lehmböden (L) zeigten. Dies ist in Abb. 4 im nordöstlichen Bereich des Schlags 809 zu erkennen. Auch hier zeigten der visuelle Vergleich (Abb. 4) der Bilddaten und die Signaturanalyse (Abb. 5), dass die tonigen Bereiche

insbesondere im Spektralbereich des mittleren Infrarots lokalisiert werden konnten.

In den Aufnahmen des IRS-1C, der lediglich im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich arbeitet, waren die genannten Texturunterschiede nicht zu erkennen. Dies unterstreicht die Bedeutung des mittleren infraroten Spektralbereichs für die Erfassung von Bodenheterogenitäten. Es kann ausgeschlossen werden, dass andere reflexionswirksame Bodenfaktoren, wie Bodenfeuchte oder organische Substanz die Reflexionssignatur beeinflussen.

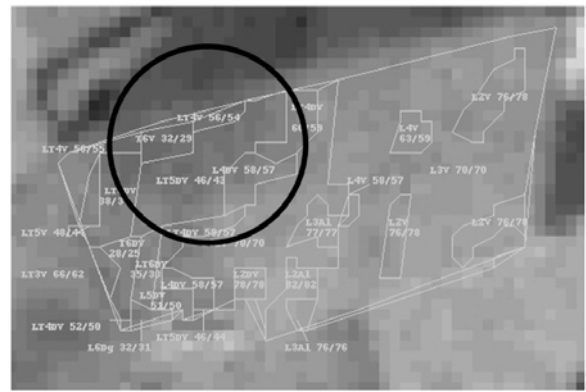
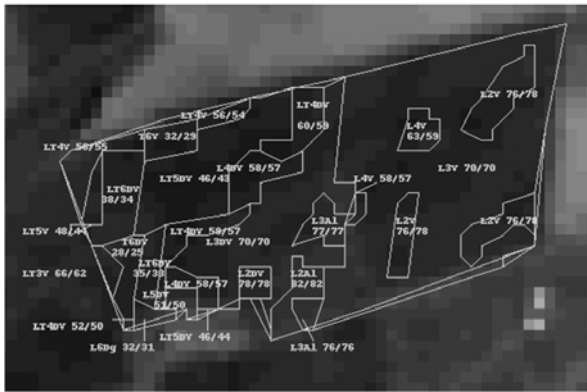


Abb. 4: Einzelkanalarstellung des Schlags 809 bei Buttelstedt, überlagert mit den Klassen der Reichsbodenschätzung, links: Landsat TM-3 und rechts: Landsat TM-7 (Aufnahmedatum: 22.09.1997)

Bodensignaturdiagramm von Schlag 809

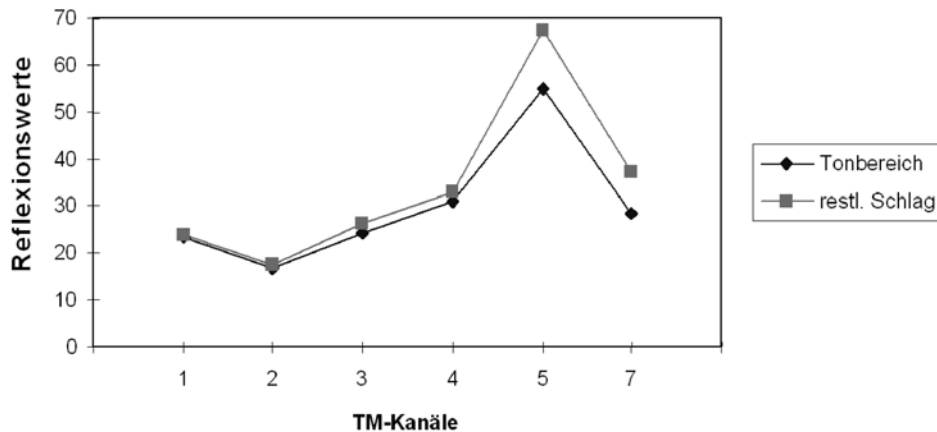


Abb. 5: Bodensignaturdiagramm für zwei Teilbereiche von Schlag 809 bei Buttelstedt für die spektrale Reflexion der Landsat-TM Kanäle

Zum einen war der Oberboden aufgrund der klimatischen Situation im Vorfeld der Aufnahmen vollständig abgetrocknet und zum anderen konnte keine erhöhte Absorption im roten und nahen infraroten Kanal, bedingt durch die organische Substanz, nachgewiesen werden.

Des Weiteren ließen sich eindeutig Bereiche ausweisen, die auf Erosionserscheinungen hindeuteten, da deren Reflexion durch Kalziumkarbonat beeinflusst war. Dies ist für Teilflächen der Fall, die in der RBS als Klassen mit geringer Lößdeckschicht über Verwitterungsboden (LöV) ausgewiesen sind. Diese Bereiche zeigten vor allem im sichtbaren Spektralbereich eine höhere Reflexion, wie am Beispiel in Abb. 6 zu sehen ist. Im mittleren Infrarot ist dagegen keine spektrale Trennung möglich (Abb. 6, rechts). Die räumlichen Abgrenzungen im Satellitenbild stimmen auch hier nicht eindeutig mit der Klassenabgrenzung der RBS (LöV) überein, dafür spiegeln sich die niedrigen Bodenwerte nahezu identisch in dem Gebiet starker Reflexion wider. Einen Zusammenhang zwischen Bodenwerten der RBS und der spektralen Signatur ermittelte Glaser (1989) in seinen Untersuchungen. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit lag aber keine konsistente Beziehung diesbezüglich vor. Die landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands sind meistens oberflächlich entkalkt. Daher wird dieser Bodenparameter bei der spektralanalytischen Untersuchung häufig außer Acht gelassen. Für die Lokalisierung erodierter Flächen mittels Fernerkundung stellt der CaCO_3 -Gehalt des Oberbodens jedoch einen bedeutsamen Indikator dar. Auf erodierten Flächen tritt das carbonathaltige geologische Ausgangsgestein häufig an die Oberfläche und beeinflusst die Reflexion des Oberbodens (Brixy, 1997; Schröder, 1989).

Schlussfolgerungen

Bodenheterogenitäten können mittels Fernerkundung nur dann erfasst und einem bestimmten Merkmal zugeordnet werden, wenn sie entsprechende unterschiedliche spektrale Reflexion hervorrufen. Da die in den Satellitendaten abgebildete Information lediglich aus dem Oberboden (Ap-Horizont) stammt, lassen sich keine Rückschlüsse auf darunter liegende Bodenhorizonte und deren Eigenschaften ziehen. Landwirtschaftliche Untersuchungen umfassen dagegen üblicherweise den gesamten Oberboden (Panten et al., 2003). Es scheint daher kaum möglich, unterschiedliche Bodentypen zu differenzieren, sondern lediglich Flächen unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften (Korolyuk & Shcherbenko, 1994).

Schlaginterne Unterschiede in der Bodenart liessen sich aufgrund verschiedener Reflexion im Satellitenbild erfassen. Auf einem trockenen Boden mit nur geringem Gehalt an organischer Substanz zeigten sandige, lehmige und tonige Areale eindeutig von einander abweichende Reflexionsintensitäten, insbesondere im Spektralbereich des mittleren Infrarots. Dies verdeutlicht die Bedeutung der spektralen Auflösung zukünftiger Sensoren. Eine einseitige Verbesserung der räumlichen Auflösung ist für die die Bodenheterogenität betreffende Fragestellungen nur von geringem Wert, sofern die spektrale Auflösung ungenügend ist. Die spektral abgrenzbaren Teilflächen waren in ihrer Lagegenauigkeit und Ausdehnung genauer als die Klassenzuweisung der Reichsbodenschätzung, so dass sich beide Datensätze hervorragend ergänzten.

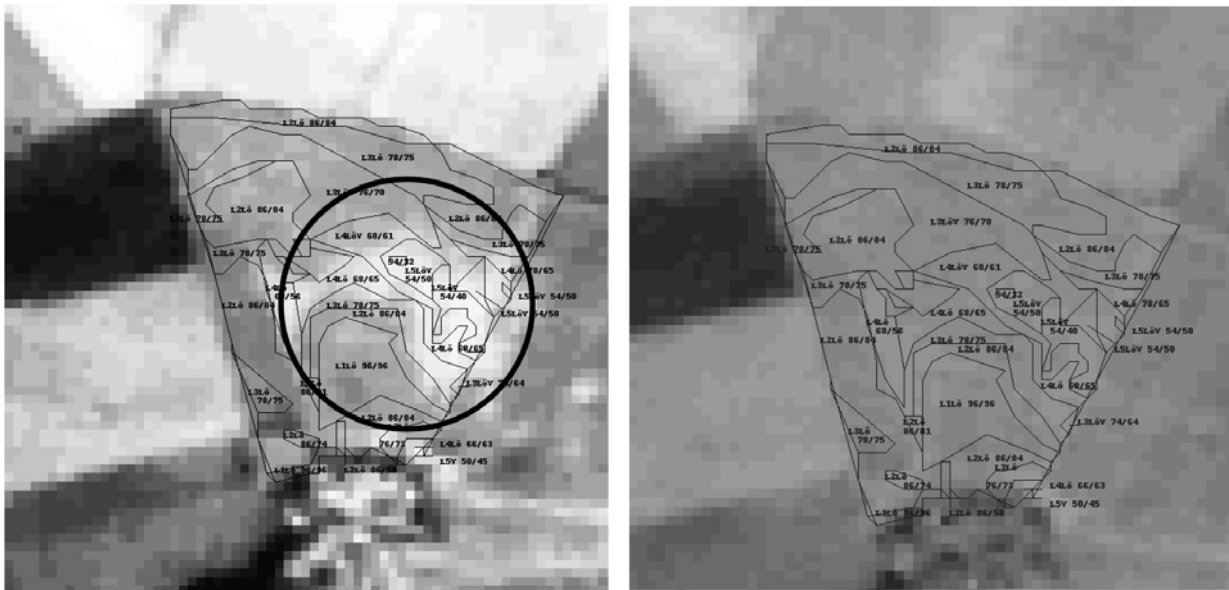


Abb. 6: Einzelkanalardarstellung des Schlates 203 bei Rohrbach, überlagert mit den Klassen der Reichsbodenschätzung, links: Landsat TM-3 und rechts: Landsat TM-5 (Aufnahmedatum: 22.09.1997)

Aussagen hinsichtlich der Variabilität anderer Bodeneigenschaften wie z. B. Humusgehalt sind anderen Studien zufolge durchaus möglich (u. a. Coleman & Montgomery, 1987; Frazier et al., 1989; Henderson et al., 1989).

Die Bodenreflexion wird weiterhin von verschiedenen Parametern wie z. B. Bodenfeuchtigkeit, Bodenrauigkeit und Bearbeitungspraktiken beeinflusst. Die Wechselwirkungen aller Parameter machen es notwendig, aktuelle Ground truth-Daten zur Kalibrierung der spektralen Reflexion zu erheben. Nur so lassen sich wertvolle Informationen zur Ableitung von Bearbeitungsentscheidungen im Precision Agriculture bereitstellen, auch wenn dies mit zusätzlichem Arbeitsaufwand und demzufolge höheren Kosten verbunden ist.

Literatur

- Baumgardner MF, Silva LF, Biehl LL, Stoner ER** (1985) Reflectance properties of soils. *Adv in Agronomy* 38: 1-44
- Bowers SS, Hanks RJM** (1965) Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 100: 130-138
- Brisco B, Brown RJ, Hirose T, Mc Nairn H, Staenz K** (1998) Precision Agriculture and the Role of Remote Sensing: A Review; *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24, 3: 315-327
- Brixy I** (1997) Erfassung erosionsgeschädigter Böden in der Lößlandschaft des Querfurter Raumes im Mitteldeutschen Trockengebiet anhand von Daten des Landsat Thematic Mapper. *Mitt Dt Bodenk Ges* 83, 395- 398
- Capelle A** (1999) Die Eignung von Bodenkarten unterschiedlicher Maßstäbe für die Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL-Arbeitspapier 264: 42-46
- Coleman TL, Montgomery OL** (1987) Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristic of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53: 1659-1663
- Dixon J, McCann M** (1997) Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management. Washington D.C.: National Academy Press, 118 p, ISBN 0-309-05893-7
- Frazier BE, Yaan-Cheng** (1989) Remote Sensing of soils in Eastern Palouse region with Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environ* 28: 317-325
- Glaser R** (1986) Fernerkundung mit Landsat 5 TM – Anwendungsmöglichkeiten am Beispiel von Würzburg und Umgebung, auch unter Berücksichtigung verschiedener Planungsebenen, DFVLR Wissenschaftlicher Bericht, Oberpfaffenhofen
- Haneklaus S, Ruehling I, Schroeder D, Schnug E** (1997) Studies on the Variability of Soil and Crop Fertility Parameters and Yields in different landscapes of Northern Germany. *Precision Agriculture 1997*, I, 785-792, Stafford JV (ed) Scientific Publishers Ltd., UK
- Henderson TL, Szilagyi A, Baumgardener MF, Chen T, Landgrebe DA** (1989) Spectral band selection for classification of organic matter content. *Soil Science Soc of Am J* 53: 1778-1784
- Herbst R, Lamp J** (1999) Zur kleinräumigen Heterogenität der Böden Deutschlands und zum Akzeptanzpotenzial der Teilflächenbewirtschaftung. Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL-Arbeitspapier 264: 33-41
- Korolyuk TV, Shcherbenko HV** (1994) Compiling soil maps on the basis of remotely sensed data digital processing: soil interpretation. *Inter J of Remote Sensing*, 17, 7: 1379-1400
- Moran MS, Inoue Y, Barnes EM** (1997) Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management, *Remote Sensing of Environment*, 61:319-346
- Myers VI** (1975) Crops and soils. – In: Reeves R (ed): *Manual of remote sensing*, Vol. 2, Falls Church, 1975
- Leone AP, Wright GG, Corves C** (1995) The application of satellite remote sensing in upland areas of Southern Italy. *Inter J of Remote Sensing* 16, 6: 1087-1105
- Obuchov AI, Orlov DS** (1964) Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations. *Pocvovedenie*, 2
- Panten K** (2002) Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen. *Landbauforsch Völkenrode SH* 232. ISSN 0376-0723; ISBN 3-93314-57-9
- Panten K, Lilienthal H, Zillmann E, Haneklaus S, Schnug E** (2003) Remote sensing and precision agriculture. In: Lal R (ed) *Encyclopedia of soil science*; New York USA: Marcel Dekker Inc. 2003 <<http://www.dekker.com/servlet/product/productid/E-ESS>> [zitiert am 15.04.2004]
- Pocknee S, Boydell BC, Green HM, Waters DJ, Kvien CK** (1996) Directed Soil Sampling. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) *Precision Agriculture; proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, 23-26 of June 1996. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 159-168, ISBN 0-89118-132-6
- Rouse JW, Haas R, Schell JA, Deering DW, Harlan JC** (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural

vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md. 371 p

Schnug E, Haneklaus S, Murphy DPL (1994) Equifertiles - an innovative concept for efficient sampling in the local resource management of agricultural soils. *Asp of Appl Biol* 37: 63-72

Schnug E, Panten K, Haneklaus S (1998) Sampling and nutrient recommendations - The future. *Commun Soil Sci Plant Anal* 29, (11-14), 1455-1462

Schröder H (1989) Fernerkundung von Löß- und Verwitterungsstandorten und deren bodenerosiver Schädigung unter Anwendung von Verfahren der Multispektralanalyse. *Petermanns Geografische Mitteilungen* 133/2: 129-139

Schröder D (1999) Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität*, KTBL-Arbeitspapier 264: 47-52

Seidel G (1995) *Geologie von Thüringen*, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 556 S.

Stoner ER, Baumgardner MF, (1981) Characteristic variations in reflectance of surface soils. - In: *Soil Science Soc. of Am. J.* Vol. 45: 1161-1165

Zillmann E (1999) Versuch der Lokalisierung und Interpretation von Feldheterogenitäten anhand von optischen Satellitenaufnahmen - Ein Vergleich von Landsat Thematic Mapper und IRS-1C -, Diplomarbeit TU-Berlin