

Wie erforscht man die Tatsachen des Bodens auf dem Boden der Tatsachen? Digitale Bodenkarten liefern wichtige Erkenntnisse über das Geschehen direkt unter uns. Eine Gruppe des Lehrstuhls für Physische Geographie und Bodenkunde untersucht, wie solche Karten effizient, kostengünstig und präzise erstellt werden können.

Dem Boden auf den Grund gehen



Abb.1: Probenentnahme im Gelände

von Jonas Daumann

Beim Begriff Boden denkt man an Matsch an den Schuhen nach einem Spaziergang und an Kinder, die im Dreck spielen, oder an graue Straßen, an eine Ackerlandschaft und den Geruch von Dünger. Es scheint, als hätte der Boden ein Imageproblem. Zum einen mag dies an unseren Assoziationen mit Dreck und Schmutz liegen. Zum anderen liegt es aber auch daran, dass der Boden viele Jahre aus der gesellschaftlichen und politischen Diskussion und damit unserem Bewusstsein verschwunden war. Erst mit der Einführung der Agenda 21 für nachhaltige Entwicklung, beschlossen 1992 in Rio de Janeiro, und der weltweiten Debatte um den Klimawandel ist der Boden wieder verstärkt in den Fokus der Politik gerückt. Mit Blick auf die heutigen globalen Herausforderungen, wie einer nachhaltigen Ernährungssicherung für eine wachsende Weltbevölkerung und der Bereitstellung von Bioenergie aus Nutzpflanzen, verwundert dies nicht. Des Weiteren ist der Boden ein wichtiger CO₂-Speicher und spielt deshalb auch bei Fragen des Klimawandels eine wichtige Rolle

(Hartemink 2008). Daher ist es von zentralem Interesse, die nicht erneuerbare Ressource Boden vor Erosion und Degradation (Abnahme der Bodenqualität) zu bewahren, um die Wasser- und Luftqualität, die Biodiversität, das Klima und die menschliche Lebensqualität zu schützen. Hochauflösende Informationen über den Zustand der Böden und über die in ihm ablaufenden Prozesse in Form von Karten sind deshalb von großer Bedeutung.

Mehr als klassisch kartographisch
Klassisch werden die Bodeninformationen im Rahmen der sogenannten bodenkundlichen Landesaufnahme erfasst. Hierzu werden Bodenkarten im Maßstab 1:25 000 (1 cm auf der Karte entsprechen 25 000 cm bzw. 250 m in der Natur) erstellt, indem Bodenkundler im Gelände anhand einer Vielzahl von Bohrpunkten und Bodenprofilen die Merkmale von Böden aufnehmen, erläutern und kartographisch darstellen. Diese Vorgehensweise ist jedoch sehr zeitintensiv und kann sich je nach Gebiet über Jahrzehnte erstrecken. So gibt es bislang bundesweit keine flächendeckende Bodenkarte

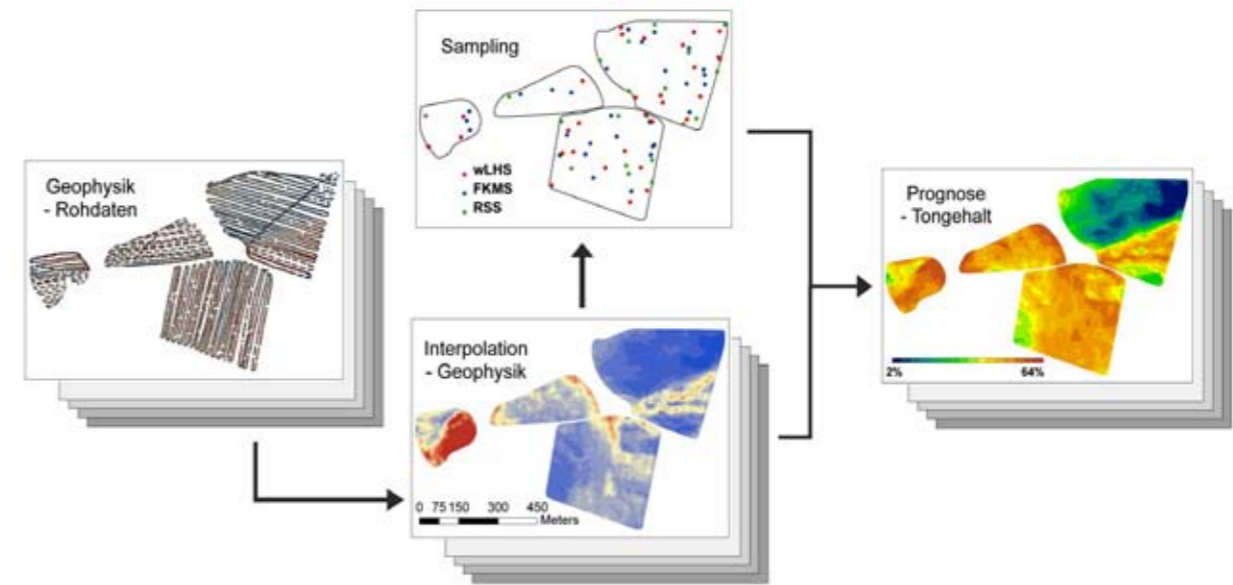


Abb. 2: Ablauf der Arbeiten zur Erstellung räumlich hochauflösender Bodenkarten auf der Grundlage geophysikalischer Messungen

in dieser Auflösung, sondern lediglich Übersichtsdarstellungen in kleineren Maßstäben, z.B. 1:200 000 (Behrens und Scholten 2006). Daher sucht die aktuelle bodenkundliche Forschung nach alternativen Methoden, um möglichst kostengünstig und zeitnah flächendeckende Bodeninformationen in hoher räumlicher und inhaltlicher Präzision zu generieren. Hierzu haben sich die Forschungsfelder der Pedometrie (siehe Kasten) und der Boden-Landschaftsmodellierung (Digital Soil Mapping; Kasten nächste Seite) etabliert (McBratney 2003), in denen passende mathematische und statistische Verfahren entwickelt werden. Ziel ist es, Bodeneigenschaften auf Basis einer relativ kleinen Stichpro-

be für eine möglichst große Fläche zu erhalten, indem man die Daten inter- bzw. extrapoliert. Haupteinsatzgebiet ist die Präzisionslandwirtschaft. Hier geht es insbesondere um Empfehlungen für räumlich präzise Düngergaben, was einerseits Dünger spart und

sind. Dies gilt u.a. für Australien, Ostdeutschland, Polen und die Ukraine. Das Projekt iSOIL (Interactions between soil related sciences – Linking geophysics, soil science and digital soil mapping) beschäftigt sich mit der Frage, wie hochauflösende flächendeckende Bodeninformationen

Präzisionslandwirtschaft: Dünger sparen und die Umwelt schonen

andererseits die Umwelt schont. Die Erstellung der hierfür benötigten Karten mit Auflösungen zwischen 1 und 5 m erfolgt unter ökonomischen Gesichtspunkten und mithin insbesondere dort, wo die einzelnen landwirtschaftlichen Flächen sehr groß

möglichst effizient erstellt werden können. Das Ziel von iSOIL ist es, durch die Verknüpfung von Bodenkunde, Geophysik und Pedometrie neue und innovative Verfahren zu entwickeln, die es erlauben, möglichst schnell verlässliche und hochauflösende digitale Bodenkarten zu erstellen.

In iSOIL forschen 17 Partnereinrichtungen aus verschiedenen Ländern Europas. Darunter befindet sich auch der Lehrstuhl für Physische Geographie und Bodenkunde der Universität Tübingen unter Leitung von Prof. Dr. Thomas Scholten. Die Projektkoordination und die Leitung des Workpackages „Pedometrics“ erfolgt vor Ort durch Dr. Thorsten Behrens und Dr. Karsten Schmidt.

Pedometrie

Der Begriff **Pedometrie** (engl.: Pedometrics) leitet sich aus den griechischen Begriffen pedos (Boden) und metron (Maß) ab. Pedometrie beschäftigt sich ganz allgemein mit der Anwendung mathematischer, statistischer und numerischer Methoden in der Bodenkunde. Hier-

bei werden insbesondere Fragen der räumlichen Verbreitung von Böden und ihren Eigenschaften sowie Fragen der Entstehung und Entwicklung von Böden betrachtet. Zentrale Techniken sind dabei das sogenannte **Data Mining (Mustererkennung)** und die **Geostatistik**.

Das Neue im iSOIL-Projekt ist die Verknüpfung geophysikalischer Messverfahren (wie Elektromagnetik oder Gammaskopie) mit pedometrischen Methoden (wie nicht-linearen Regressionsverfahren) aus dem Bereich des Data Minings. Das Konzept beruht auf der Annahme, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den im Feld erfassten geophysikalischen und den auf Basis einer kleinen Stichprobe im Labor gemessenen bodenkundlichen Eigenschaften – etwa der elektromagnetischen Leitfähigkeit und dem Tongehalt – besteht. Ist ein solcher Zusammenhang statistisch nachweisbar, lassen sich auf Basis der einfach zu messenden geophysikalischen Kenngrößen laborintensive Bodeneigenschaften über statistische Modelle „regionalisieren“ – d.h. als hochauflösende Bodeneigenschaftskarte darstellen. Im Rahmen des Projekts iSOIL ist es Ziel meiner Diplomarbeit herauszufinden, welche mathematischen und statistischen Regressionsverfahren am besten geeignet sind, um zuverlässige flächendeckende Bodeneigenschaftskarten auf Basis geophysikalischer Messungen zu generieren.

Als Untersuchungsgebiet dient extensiv genutztes Grünland in den Elbauen bei Dessau in Sachsen-Schmidt, Leonardo Ramirez-Lopez und mir 240 Bodenproben (80



Abb. 3: Anhalt. Es wurden von Dr. Karsten Schmidt, Leonardo Ramirez-Lopez und mir 240 Bodenproben (80

Digital Soil Mapping

Die **Boden-Landschaftmodellierung** (engl.: Digital Soil Mapping) ist ein Teilgebiet der Pedometrie, das sich hauptsächlich mit der Erstellung digitaler Bodentypkarten und Bodeneigenschaftskarten beschäftigt. Das

Digital Soil Mapping stellt somit den „angewandten“ Teil pedometrischer Forschung dar, der sich mit der Umsetzung bzw. Einführung der in der Pedometrie behandelten Verfahren in die Praxis beschäftigt.

Standorte mit je drei Tiefenstufen 0-10 cm, 10-30 cm, 30-70 cm) im Gelände genommen (Abb. 1, Seite 18). Anschließend wurden die Bodeneigenschaften Textur (Anteil der Korngrößen Sand, Schluff und Ton), pH-Wert, Lagerungsdichte sowie Gehalt an Kohlenstoff und Stickstoff im Labor bestimmt. Der methodische Aufbau der Arbeit gliedert sich in die drei Hauptbestandteile (Abb. 2, Seite 19):

- Interpolation der geophysikalischen Messungen
- Sampling (Auswahl der Untersuchungspunkte)
- Prognose (Ableitung hochauflösender Bodeneigenschaftskarten)

Der Blick in den Untergrund

Die Geophysik bedient sich verschiedener Techniken wie Elektromagnetik, Georadar oder Seismik. Für die Untersuchungen im Rahmen meiner Diplomarbeit wurde neben elektromagnetischen Verfahren (EM31 und EM38) Gamma-Radiometrie angewandt. Die EM-Verfahren bestimmen die elektrische Leitfähigkeit des Untergrunds. Das Gammaskopie misst die radioaktive Strahlung von Kalium, Uran und Thorium.

Die Messungen im Gelände erfolgen mit Hilfe einer fahrzeuggestützten Sensorplattform, auf der alle Messungen zeitgleich ablaufen (Abb. 3). Für jeden Messpunkt werden mittels moderner GPS-Technik zusätzlich die genauen Koordinaten gespeichert. Durchgeführt wurden die Messungen vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ). Damit entsteht ein relativ dichtes

Messpunkttraster mit Abständen von ca. 20 cm (EM) bzw. 5 m (Gamma).

Vom Punkt in die Fläche I

Durch die geophysikalische Messung des Untergrunds steht somit für die zu untersuchende Fläche eine Vielzahl an punktuellen Informationen über die verschiedenen geophysikalischen Messgrößen zur Verfügung. Ein wichtiger Zwischenschritt ist die anschließende Interpolation der geophysikalischen Messungen, die auf Basis der einzelnen Messpunkte flächendeckende Karten mit einem regelmäßigen Raster erzeugt. In der Diplomarbeit wurde hierzu das geostatistische Verfahren Ordinary Kriging angewendet. Punkte bzw. Rasterzellen, für die kein Messwert vorliegt, werden dabei durch ein spezielles räumliches Gewichtungungsverfahren aus den Werten räumlich benachbarter Punkte der geophysikalischen Messung optimal geschätzt.

Wo werden Proben genommen?

Um Bodeneigenschaften auf Basis von geophysikalischen Messungen flächendeckend in Form einer Karte darstellen zu können, müssen stichprobenhaft einige Punkte im jeweiligen Untersuchungsgebiet beprobt und im Labor bodenkundlich analysiert werden.

Im Vorfeld der Geländephase muss daher mit Hilfe eines geeigneten Stichprobenverfahrens bestimmt werden, an welchen Punkten im Gelände Bodenproben zu entnehmen sind. Die Auswahl der Punkte

richtet sich nach den Häufigkeitsverteilungen der geophysikalischen Daten. Ziel ist es, die komplette Spannweite aller geophysikalischen Messgrößen möglichst gut abzudecken, um somit eine möglichst hohe Varianz in den Labormessungen bzw. den Bodeneigenschaften zu gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen der Diplomarbeit die modernen geschichteten Stichprobenverfahren Weighted Conditioned Latin Hypercube Sampling (LHS), Fuzzy k-Means Sampling (FKMS) und Response Surface Sampling (RSS) miteinander verglichen. Neben der möglichst weiten Streuung der Messwerte ist die Minimierung des Stichprobenumfangs ein weiteres Ziel dieser Verfahren, da die Laboranalyse häufig den größten Kostenfaktor im Rahmen von Digital-Soil-Mapping-Projekten darstellt.

Menschen mit Werkzeug auf dem Acker? Das sind wohl keine Schatzsucher, sondern Bodenkundler

Nach der Interpolation der geophysikalischen Messungen und der Analyse im Labor erfolgt der Aufbau eines Regressionsmodells, das es ermöglicht, die im Labor analysierten Messwerte zu regionalisieren.

Vom Punkt in die Fläche II

Die Kernidee, die diesem Vorgehen zugrunde liegt, basiert auf Arbeiten zur Bodenbildung von Dokuchaev (1883) und insbesondere von Jenny (1941). Diese stellen den Boden und seine Eigenschaften als Produkt von Umweltfaktoren und dadurch bedingten Prozessen dar. Liegen also Informationen über die jeweils relevanten Umweltfaktoren vor, können – so die Theorie – dementsprechend auch Aussagen über die Bodenentwicklung und mithin Bodeneigenschaften getroffen werden. Dieses qualitative Prinzip wurde im Hinblick auf Digital Soil Mapping für die moderne empirische quantitative Modellierung unter anderem von

McBratney (2003) erweitert und angepasst. Dazu wird zunächst ein mathematisches bzw. statistisches Modell erstellt, das diesen Zusammenhang bestmöglich abbildet. Ist ein solches Modell erzeugt, lässt es sich auf alle Flächen anwenden, für die interpolierte geophysikalische Daten vorliegen.

In meiner Diplomarbeit werden die nicht-linearen Regressionsverfahren Random Forests (RF), Support Vector Machines (SVM) und Partial Least Squares Regression (PLS) miteinander verglichen.

Vom Feld auf die Karte

Das Ergebnis meiner Arbeit stellen Bodeneigenschaftskarten mit dazugehörigen Gütemaßen dar. Ein Beispiel zeigt Abbildung 4. Dargestellt ist die räumliche Verteilung der Gehalte an organischem Kohlenstoff.

Die Güte solcher Karten wird maßgeblich durch die im Feld gewonnenen Informationen bestimmt. In unserem Fall können wir mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,87 von einer sehr validen räumlichen Schätzung der Verteilung des organischen Kohlenstoffs sprechen. Das heißt 87 Prozent der Variation des organischen Kohlenstoffs können mit Hilfe der geophysikalischen Messdaten erklärt werden.

Die Lösung vieler globaler wie auch regionaler Umweltprobleme steht in direktem oder indirektem Zusammenhang zu den Böden und ihren Eigenschaften. Dies liegt insbeson-

Jonas Daumann studiert seit 2005 Geographie mit den Nebenfächern Bodenkunde, Geographische Informationssysteme, Geologie und Politik in Tübingen. Derzeit schreibt er seine Diplomarbeit im Rahmen des vorgestellten Projekts. Durch die vielen Exkursionen und Geländearbeiten in der Geographie ist es ihm möglich, viel Zeit in der Natur zu verbringen. Auch in der Freizeit treibt es ihn oft nach draußen. So steht dieses Jahr eine Trekking-Tour in Grönland auf dem Programm.

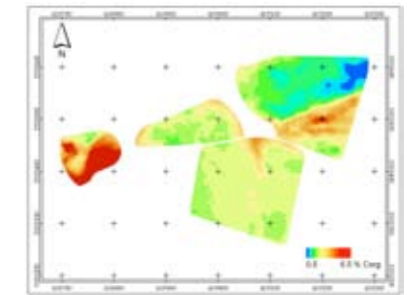


Abb. 4: Prognoseergebnis für den organischen Kohlenstoff auf Basis der Modellierung mit Hilfe des SVM-Verfahrens

dere an ihrer zentralen Funktion als Speicher für Wasser, Pflanzennährstoffe und Kohlenstoff. Um einer Degradation von Böden vorzubeugen und nachhaltige Anpassungsstrategien für Umweltveränderungen erarbeiten zu können, werden hochauflösende Bodeneigenschaftskarten benötigt.

Das EU-FP7-Projekt iSOIL, in dessen Rahmen ich meine Diplomarbeit durchführe, beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit der Einbeziehung multipler geophysikalischer Messverfahren und komplexer mathematischer und statistischer Prognosemethoden, um die Erstellung der benötigten Flächeninformationen zu beschleunigen. Die Ergebnisse auf der Feldskala, in deren Rahmen sich auch meine Arbeit bewegt, sind vielversprechend. Der nächste Schritt ist die Übertragung und Anwendung der Verfahren auf den Landschaftsmaßstab. Die Arbeiten hierzu laufen bereits.

Wenn einem also beim nächsten Spaziergang eine Gruppe von Menschen mit Werkzeug und Gerätschaften auf einem Acker begegnet, handelt es sich vielleicht nicht um Schatzsucher, sondern um Bodenkundler, die mit ihrer Arbeit einen Beitrag dazu leisten, dass unsere Böden auch in Zukunft nachhaltig und leistungsfähig sind.

