

## DIGITAL SOIL MAPPING

**Soilution** GbR  
Illingerstrasse 115 | D-66265 Heusweiler  
info@soilution.de

Im Auftrag des Eidgenössischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

**NABO**  
nationale bodenbeobachtung

---

DR. THORSTEN BEHRENS, DR. KARSTEN SCHMIDT, DR. ARMIN KELLER

## Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt (BAFU) Abteilung Boden und Biotechnologie CH-3003 Bern
Auftragnehmer	Soilution – Dr. Steinrücken und Dr. Behrens – Gbr Illingerstrasse 115 D-66265 Heusweiler
Datei	Factsheets Digital Soil Mapping
Autoren	Dr. Thorsten Behrens, Dr. Karsten Schmidt und Dr. Armin Keller
Begleitung BAFU	Ruedi Stähli, Fabio Wegmann
Hinweis	Im Auftrag des Eidgenössischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU) Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN)

Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

DR. THORSTEN BEHRENS, DR. KARSTEN SCHMIDT, DR. ARMIN KELLER

## Organisation der Factsheets

Die Factsheets „Digital Soil Mapping“ behandeln verschiedene praxisrelevante Daten, Methoden und Beispiele. Viele Methoden sind in sich eigenständig und können so leicht in klassische Kartierungen einbezogen werden. Das Ziel der Factsheets ist es, die Integrationsmöglichkeiten von erprobten Methoden aus dem Bereich des Digital Soil Mapping und der klassischen Kartierung herauszustellen. Die beiden Ansätze werden in diesem Sinne als ergänzend und nicht als konkurrierende Verfahren für die Erhebung von Bodeninformationen verstanden.

Die Factsheets gliedern sich in drei (sich teilweise überschneidende) Gruppen:

### HINTERGRUND

- Digital Soil Mapping
- Bodeneigenschaften und Bodenformen
- Skalenebenen
- DSM auf der Feldskala
- DSM auf der Landschaftsskala

### DATENGRUNDLAGEN

- Naherkundung
- Fernerkundung
- Digitale Reliefanalyse

### METHODEN

- Stichprobenverfahren
- Geostatistik
- Prognostik
- Digital Field Mapping

Diese Liste ist nicht als abschliessend zu betrachten, weitere Factsheets zu spezifischen Themen und Methoden können und sollten zukünftig diese erste Auflistung ergänzen.

### DIGITAL SOIL MAPPING

#### Pedometrie

Pedometrie ist derjenige Bereich der Bodenkunde, der sich mit der Anwendung mathematischer und statistischer Methoden zur Untersuchung der Verbreitungssystematik und der Genese der Böden inklusive ihrer Eigenschaften beschäftigt.

#### Digital Soil Mapping

Digital Soil Mapping ist der angewandte Teil der Pedometrie. Hauptziel ist die Erstellung von bodenkundlichen Kartenwerken auf Basis von quantitativen Beziehungen zwischen bodenkundlichen Feld- oder Labordaten und flächendeckend vorliegenden Umweltdaten (Relief, Geologie, Klima, und anderen Faktoren).

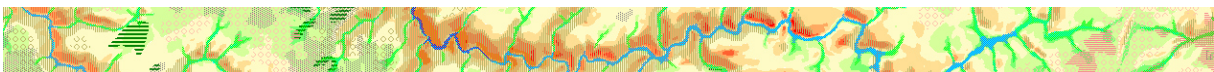
Die Begriffe „Boden-Landschaftsmodellierung“, „Bodenprognose“ und „Digitale Bodenkartierung“ werden oftmals synonym verwendet.

### ZIELE UND METHODEN

Hauptziel des Digital Soil Mapping ist die Bereitstellung von Bodeneigenschaftskarten und Bodenkarten. Hierbei umfasst das Methodenspektrum die komplette Kette von der Probennahme bis zur Validierung der erstellten Karten im Gelände, zum Beispiel:

- Stichprobenverfahren
- Nutzbarmachung von Nah- und Fernerkundungsdaten
- Digitale Reliefanalyse
- Räumliche Prognosen
- Tiefenfunktionen
- Integration von Altdaten

Digital Soil Mapping kann dabei als eigenständiges Methodenspektrum zur Bodenkartierung verstanden werden. Oder mit anderen Worten: ein Werkzeugkasten mit Tools für spezifische Fragestellungen. Das größte Potential ergibt sich jedoch durch eine Integration von klassischer Kartierung und Bausteinen des Digital Soil Mapping.



## HINTERGRUND | DIGITAL SOIL MAPPING

## DIGITAL SOIL MAPPING IN DER KLASSISCHEN KARTIERUNG

Eine Bodenkartierung ist grundsätzlich geprägt von den zur Verfügung stehenden Basisdaten bzw. Vorinformationen, dem jeweiligen Gebiet und seinen Besonderheiten, und nicht zuletzt von der jeweiligen Fragestellung. Grundsätzlich gliedert sie sich jedoch in folgende Arbeitsschritte:

1. Sammlung und Aufbereitung von Grundlagendaten (Umwelt- und Bodendaten)
2. Erstellung einer Konzeptkarte
3. Ausweisung von Beprobungsstandorten
4. Erhebung von Bodeneigenschaften und Qualitätsmanagement
5. Kartenerstellung und Produkte

Diese Schritte treffen sowohl für die klassische Kartierung als auch für das Digital Soil Mapping zu. Daher können beide sehr gut integriert werden. Das heisst, dass im Rahmen einer klassischen Kartierung einzelne Tools des Digital Soil Mapping (DSM) für ganz bestimmte Aufgabenstellungen verwendet werden können. Dies sollte in erster Linie an Stellen passieren bei denen die subjektive Komponente in der klassischen Kartierung erhöht bzw. zu wenig Erfahrung vorhanden ist. Beispielsweise können DSM-Tools insbesondere bei der Ausweisung und Optimierung der Beprobungsstandorte wertvolle Hilfe leisten, oder im Rahmen der räumlichen Abgrenzung von bodenkundlichen Kartiereinheiten. So sollte für eine erste Übersichtsbegehung sichergestellt sein, dass das gesamte inhaltliche Spektrum der relevanten Grundlagendaten abgedeckt ist, und dass die Grenzziehung von Kartiereinheiten systematisch nach gleichen Regeln im gesamten Gebiet erfolgt. Die Möglichkeiten der Integration von DSM Tools in die einzelnen Arbeitsschritte werden im Folgenden erläutert.

### 1. Sammlung und Aufbereitung von Grundlagendaten

Neben den herkömmlichen Geobasisdaten wie insbesondere topographischen und geologischen Karten, die zentrale Elemente einer klassischen Kartierung bilden, kommen im Rahmen des DSM weitere Datenquellen aus dem Bereich der Nah- und Fernerkundung hinzu. Auf der Feldskala sind dies unter anderem elektromagnetische Messungen, die Gamma-Spektroskopie, oder der Einsatz eines Georadars. Sollen im Gegensatz dazu ganze Regionen betrachtet werden, empfiehlt sich der Einsatz von flugzeuggestützter Gamma-Spektroskopie, die wichtige Informationen zum Substrat und zur räumlichen Abgrenzung von Übergängen liefern kann. Gleiches gilt für die Prozessierung von den verfügbaren Fernerkundungsdaten (z.B. LANDSAT oder Sentinel) zur räumlich und zeitlich differenzierten Erfassung der Landnutzung. Eine auf nahezu allen Skalenebenen essentielle Grundlage liefert das Digitale Geländemodell. Aus ihm lassen sich eine Vielzahl an Reliefparametern ableiten, die wichtige Indikatoren für die Bodengenese darstellen.

Im Vorfeld der eigentlichen Kartierung können dann bereits statistische Analysen und Korrelationen zwischen vorliegenden Altdaten und den aufbereiteten Basisdaten erfolgen. Dies erlaubt erste Rückschlüsse zur Verbreitungssystematik der Böden und eine bessere Planung der eigentlichen Kartierung. Zentral ist dabei die Aufbereitung der Daten, die immer fragestellungsbezogen erfolgen muss. Dies gilt sowohl für die Auswahl der Reliefparameter und der zugrundeliegenden Algorithmen, die Klassifizierung geologischer Karten wie auch die Aufbereitung geophysikalischer Rohdaten und Fernerkundungsdaten.

## HINTERGRUND | DIGITAL SOIL MAPPING

## 2. Erstellung einer Konzeptkarte

Nach der Sichtung und Aufbereitung der vorliegenden Geobasisdaten und gegebenenfalls nach einer ersten Begehung des Gebiets wird im Rahmen der Kartierung üblicherweise eine Konzeptkarte erstellt. Sie enthält – analog oder digital – überlagerte Informationen zur Geologie, zum Relief und weiteren relevanten Quellen. Sie liefert somit eine Raumstrukturierung, die eine erste Grundlage und Anhaltspunkte zur Ausweisung bodenkundlich homogener Polygone liefert. Je nach Zielstellung, ob eine klassische Bodenformenkarte oder Karten kontinuierlich abgebildeter Bodeneigenschaften oder -funktionen erstellt werden sollen, kann das Vorgehen zur Erstellung einer Konzeptkarte im Rahmen von DSM, im Vergleich zu einer klassischen Bodenkartierung erheblich abweichen.

Eine der wichtigsten Grundlagen für prognostische Ansätze zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften, stellen hochaufgelöste Digitale Geländemodelle dar. Im Rahmen klassischer Kartierungen werden hieraus meist Karten der Hangneigung und Höhenlinien extrahiert, die zusammen mit geologischen Informationen wichtige Anhaltspunkte zum Verständnis der Landschaftssystematik liefern. Im DSM wird jedoch meist eine Vielzahl von Reliefparametern berechnet und dann mit vorliegenden Bodeneigenschaften oder Bodenformen korreliert. Daher wird bei DSM in den meisten Fällen keine typische erzeugt, sondern eine erste Prognosekarte von Zielgrößen (z.B. Bodeneigenschaften).

Im Rahmen der Prognostik wird – entweder auf Basis vorliegender Bodenkarten oder auf Basis vorliegender oder zu erhebender Punktinformationen – eine Regression oder eine überwachte Klassifikation aufgebaut. Diese wird dann in landschaftsgenetisch vergleichbaren Gebiete in denen bisher keine Bodenkarte vorliegt angewendet. D.h. es wird eine Prognose erstellt bzw. es erfolgt eine Regionalisierung. Somit wird bei einem DSM-Ansatz der Schritt einer Konzeptkarte oftmals übersprungen, da als Ergebnis aus der Prognose direkt eine Bodenkarte oder eine Bodeneigenschaftskarte entsteht.

Mithilfe unüberwachter Klassifikationsverfahren (z.B. Clusteranalysen) auf Basis der vorliegenden Daten ist es ebenso möglich eine erste Raumstrukturierung vorzunehmen. Hier kann die vorgeschaltete statistische Analyse anhand von Altdaten helfen, relevante Basisdaten zu identifizieren. Diese können dann genutzt werden, um eine valide Konzeptkarte zu erstellen. Mit anderen Worten, es werden die wichtigsten Faktoren in einem Gebiet statistisch ausgewertet, die bei gegebenem Kenntnisstand die bodenkundlichen Unterschiede im Gebiet bestmöglich erklären.

Ein allgemeiner Vorteil von Prognosekarten, die auf Basis von Regressions- oder überwachten Klassifikationsverfahren erstellt wurden, ist, dass oftmals Gütemasse dafür vorliegen. Neben der allgemeinen Bewertung der Prognosegüte, z.B. anhand von Kreuzvalidierungsdaten, ist es teilweise auch möglich die Prognosegüte räumlich darzustellen. Die Bereitstellung von Karten zur Prognosegüte erlaubt dem Kartierer dann ein sehr zielgerichtetes und zügiges Vorgehen.

Darüber hinaus können Prognosekarten auch als Konzeptkarten für Prüfkartierungen dienen, mit denen andere Kartenwerke validiert und korrigiert werden können.

## HINTERGRUND | DIGITAL SOIL MAPPING

## 3. Ausweisung von Beprobungsstandorten

Grundsätzlich werden im DSM, wie auch in der klassischen Bodenkartierung, Geobasisdaten oder vorliegende Konzeptkarten als Basis für die Stichprobenausweisung herangezogen. Ein wichtiger Einflussfaktor in der klassischen Kartierung ist hier die persönliche Erfahrung und die für die Kartierung zur Verfügung stehende Zeit. Je detaillierter das Vorwissen, desto weniger Probenahmestellen werden zur Erstellung der Karte benötigt. Jedoch birgt ein geringerer Stichprobenumfang die Gefahr eines erhöhten subjektiven Einflusses auf das Ergebnis. Ist der zur Verfügung stehende Zeitraum zu knapp bemessen und die Stichprobenanzahl zu niedrig angesetzt, werden eventuell nur leicht zugängliche Standorte oder Cluster beprobt. Dies kann dann ebenfalls dazu führen, dass die Verbreitungssystematik der Böden nur unvollständig oder inkorrekt erfasst wird.

Für eine effiziente Ausweisung von Beprobungsstandorten bieten sich mathematische und statistische Verfahren zur Stichprobenausweisung an. So stehen beispielsweise Verfahren zur Verfügung, die bei vorgegebenem Stichprobenumfang die vollständige Abdeckung der inhaltlichen Spannweite gewährleisten. Damit ist sichergestellt, dass alle bodengenetisch relevanten Basisdaten über ihre gesamte Spannweite abgedeckt wurden. Dies empfiehlt sich insbesondere bei ersten Übersichtskartierungen.

Es bestehen auch dann methodische Unterschiede zwischen klassischer Kartierung und DSM, wenn Probenahmestellen für große Gebiete ausgewiesen werden sollen, für die kontinuierliche Bodeneigenschaftskarten erstellt werden oder für Gebiete, in denen geophysikalische Sensordaten vorliegen. In solchen Fällen werden explizit statistische Verfahren eingesetzt, die die Probenahmestellen nicht nur möglichst gleichmäßig über den Raum verteilen, sondern auch versuchen die inhaltliche Bandbreite aller relevanter Geobasisdaten (z.B. Hangneigung, Niederschlag, Sensordaten und andere) vollständig abdecken. Zentrales Element ist hierbei, neben der Erfüllung der inhaltlichen und meist auch räumlichen Abdeckung, die größtmögliche Reduzierung bzw. Optimierung des Stichprobenumfangs. Je nach Größe des Gebiets und der erforderlichen Genauigkeit ist ein iteratives Vorgehen zur Beprobung denkbar, bei dem bei Bedarf weitere Standorte beprobt werden, die die inhaltliche und räumliche Abdeckung der Basisdaten feiner auflösen.

Im Rahmen des Einsatzes von Verfahren wie der Nah-Infrarot (NIR) Spektroskopie für großräumige Untersuchungen wird oft ein zweistufiges Beprobungsverfahren gewählt. Zu Beginn werden Referenzproben von ausgewählten Standorten gezogen, die im Labor analysiert werden. Anhand dieser Referenzproben wird dann eine sogenannte spektrale Bibliothek aufgebaut und, wenn vorhanden, mit national vorhandenen Spektralbibliotheken ergänzt. D.h. es werden Regressionsgleichungen zwischen den spektralen Informationen und den Bodeneigenschaften erstellt. Im nächsten Schritt werden dann an (vielen) weiteren Standorten ebenfalls Proben genommen, die lediglich noch spektral analysiert werden und nicht bodenkundlich im Labor. Die Bodeneigenschaften zu diesen Punkten werden dann über Regressionen aus der spektralen Bibliothek bestimmt. Somit lässt sich der Laboraufwand stark minimieren. Da die reine spektrale Messung sehr schnell und ggf. sogar im Gelände durchgeführt werden kann, ist eine sehr hohe Punktdichte möglich. Am Ende werden alle Punkte dann gemeinsam verwendet, um die gewünschte Bodeneigenschaft mit Hilfe von Geobasisdaten (Relief, Geologie, Klima) zu regionalisieren. Dieses prinzipielle Vorgehen zur kostengünstigen Bestimmung von Bodeneigenschaften lässt sich auch auf andere Sensoren wie z.B. XRF übertragen.

## HINTERGRUND | DIGITAL SOIL MAPPING

### 4. Erhebung von Bodeneigenschaften

Die Erhebung der Bodeneigenschaften im Gelände oder im Labor unterscheidet sich nicht von der herkömmlichen Kartierung. Insbesondere bei der Betrachtung großer Gebiete und im Rahmen von mehrjährigen Projekten empfiehlt es sich jedoch ausreichend Rückstellproben zur Laborkontrolle vorzuhalten. Des Weiteren empfiehlt sich der Einsatz schneller und moderner (Proxy-) Analyseverfahren (z.B. Laser-Partikelmessgeräte, NIR, XRF u.a.), um Zeit und Kosten zu sparen.

### 5. Kartierung, flächenhafte Abgrenzung der Bodeneinheiten

Die klassische Bodenkarte weist Polygone mit quasi-homogenen Bodeneigenschaften aus. Dies ist mit DSM auch möglich. Jedoch bietet das DSM auch die Möglichkeit, Bodendaten quasi-kontinuierlich in Form von Rasterdaten darzustellen. Dies ist für viele Anwender von großem Interesse, da so je nach Fragestellung andere Klassengrenzen (z.B. von pH-Werten, Korngrößen, Schwermetallgehalten) gewählt werden können, und die abgeleiteten Ergebnisse damit teilweise genauer sind, da sie nicht auf vorklassifizierten Polygonbeschreibungen basieren. Ein besonderer Vorteil des DSM besteht dabei darin, dass neben den Schätzungen für eine Bodeneigenschaft auch Angaben zur Zuverlässigkeit der Schätzung gemacht werden können.

Die „Kartierung“ erfolgt im Bereich des DSM auf Basis von Regionalisierungs- bzw. Prognoseverfahren. Dazu zählen geostatistische Verfahren wie beispielsweise Kriging-Interpolationen und insbesondere Regressions- und Klassifikationsverfahren aus dem Bereich des Data Mining und des Maschinellen Lernens.

Bei allen Methoden werden auf Basis von bodenkundlichen Punktinformationen (originär oder aus Flächendaten extrahiert) mathematische oder statistische Modelle erzeugt und diese im Anschluss auf nicht-kartierte Bereiche übertragen. Dies passiert letztendlich auch in der klassischen Kartierung über das mentale Modell, das der jeweilige Kartierer von der Landschaft entwickelt hat. Die Qualität der Kartierung hängt in diesem Falle stark von der jeweiligen Kartiererfahrung und Ortskenntnis ab.

Grundsätzlich bestehen Unterschiede in der Informationsverarbeitung. Diese ist im Rahmen eines mentalen Modells allerdings wesentlich komplexer als dies mit statistischen Modellen möglich ist. So ist ein GIS und die statistische Software größtenteils an die Informationen am Punkt gebunden und kann zur „Interpretation“ nicht – bzw. nur sehr eingeschränkt – den räumlichen Kontext einer Landschaft heranziehen und so skalenabhängige Beziehungen der Landschaftsentstehung berücksichtigen. Neuere multi- und hyperskalige Prognoseansätze bieten hierfür jedoch mittlerweile Ansätze und führen auch in Landschaften mit komplexer Bodenentstehung zu hohen Prognosegüten.

Ein wichtiger Vorteil von DSM Verfahren liegt in der intersubjektiven Überprüfbarkeit des Vorgehens und der Ergebnisse. Denn trotz einheitlicher Kartierschlüssel ist das Ergebnis einer klassischen Kartierung in besonderem Maße von der bodenkundlichen und landschaftskundlichen Erfahrung des jeweiligen Kartierers abhängig. Dies führt daher oftmals zu räumlichen und inhaltlichen Kartenrandverwerfungen, wenn unterschiedliche Kartierer benachbarte Blätter bearbeiten.



## HINTERGRUND | DIGITAL SOIL MAPPING

Eine DSM Kartierung kann eigenständig erfolgen. Dann liegt je nach vorliegender Informationsdichte eine Konzeptkarte oder eine fertige Bodenkarte bzw. Bodeneigenschaftskarte vor. Die Konzeptkarte kann als Grundlage für eine Kartierung dienen. Eine klassische Kartierung kann jedoch auch eine DSM Kartierung integrieren, d.h. verschiedene Module bzw. Fragestellungen werden durch einen DSM Ansatz abgedeckt, während andere Arbeitsschritte klassisch erfolgen. Zum einen können ggf. für spezifische räumliche Bereiche oder einzelne Bodenformen Prognosen erstellt werden, die dann im Gelände verfeinert und erweitert werden. Diese Erweiterungen können dann wiederum prognostiziert werden. So kann iterativ ein Kartenwerk erstellt werden, das validiert ist, intern stringent und zeiteffizient umsetzbar. Eine Erweiterung dieses iterativen Verfahrens ist der Einsatz von Client-Server basierten Lösungen die eine direkte Prognose kartierter Einheiten bereits im Feld ermöglichen und somit eine wesentliche Effizienzsteigerung darstellen können. Allerdings bedeutet ein solches Vorgehen auch ein Umdenken in der Organisation einer Bodenkartierung und in der Zusammenarbeit aller Beteiligten.

Im Bereich der Erstellung von hochauflösenden Bodeneigenschaftskarten für große Gebiete ist insbesondere die Anzahl der erhobenen Punkte von zentraler Bedeutung. Hier gliedert sich die „Kartierung“ in drei Bereiche: i) Probenahme an festgelegten Standorten, ii) Data Mining und iii-a) Validierung durch erfahrene Kartierer im Gelände und/oder iii-b) durch Validierungsproben.

Im Allgemeinen ist das spezifische Vorgehen stark von der jeweiligen Fragestellung abhängig. In den meisten Fällen ändert sich die Arbeit der Kartierer. DSM stellt hierbei Tools zur Verfügung, die helfen die Kartierung effizienter und objektiver zu machen. Das bodenkundliche Fachwissen bleibt bei allen Ansätzen zentral. Eine Zusammenarbeit zwischen Kartierern und DSM Experten ermöglicht nicht nur ein effizienteres Vorgehen, sondern auch die Erstellung besserer Karten über die wichtige Ressource Boden.

## LITERATUR

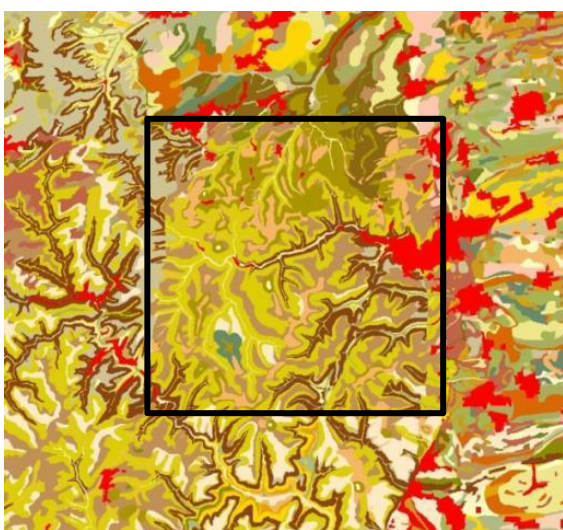
- Behrens, T., Scholten, T., 2006. Digital Soil Mapping in Germany - a review. *J Plant Nutri Soil Sci* 169, 434-443.
- Lagacherie, P., McBratney, A.B., 2007. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. *Developments in Soil Science* 31, 389-399.
- McBratney, A.B., Mendonca-Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O.A., McArthur, D., 2003. Predictive soil mapping: a review. *Prog. Phys. Geogr.* 27, 171-197.
- Viscarra Rossel, R. A., Chen, M. J., Grundy, R., Searle, D., Clifford and P. H. Campbell, 2015. The Australian three-dimensional soil grid: Australia's contribution to the GlobalSoilMap project. *Soil Research* 53(8), 845-864.

### BODENFORMENKARTEN

Bodenformenkarten sind das klassische Medium zur Beschreibung der räumlichen Verbreitungssystematik der Böden. Sie stellen klassischerweise Areale homogener bodenkundlicher Ausprägung dar.

Die Erstellung basiert auf dem bodenkundlichen Fachwissen des Kartierers sowie seines Verständnisses der Boden-Landschaftsbeziehungen. In den meisten Fällen basiert die Ausweisung von Flächeneinheiten in Bodenformenkarten dabei auf einem bodengenetischen Konzept – und nicht primär auf physikalischen oder chemischen Unterschieden. Die Flächeneinheiten werden so abgegrenzt, dass sie bodenkundlich auf dem jeweiligen Kartiermassstab in sich homogen sind und sich von benachbarten Einheiten bodenkundlich unterscheiden.

Aus einer klassischen Bodenkarte lassen sich sehr viele Eigenschaften ableiten. Dies jedoch ohne die Möglichkeiten kontinuierliche Übergänge darzustellen und Aussagen zur räumlichen Variabilität innerhalb der kartierten Areale treffen zu können.



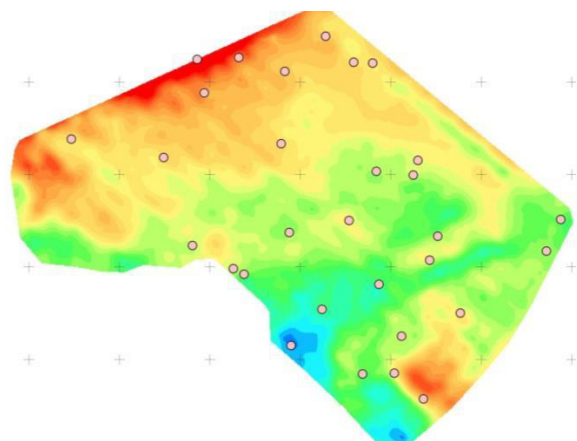
Prognostizierte Bodenformen (innerhalb des schwarzen Rahmens). Methode: Künstliche Neuronale Netze; Parameter: Relief und Geologie.

### BODENEIGENSCHAFTSKARTEN

Der Boden ist ein äußerst vielschichtiges Umweltmedium mit einer Vielzahl an ökosystemaren Aufgaben. Somit ist nicht nur der Bedarf an Bodendaten enorm, sondern auch die Erwartungen an sie.

Der Bedarf kommt dabei aus unterschiedlichsten Bereichen wie Hydrologie, Geothermie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, usw. Für viele Anwendungen und insbesondere die Ableitung von spezifischen Bodenfunktionen werden vor allem Bodeneigenschaften benötigt. Hier bieten kontinuierliche Bodeneigenschaftskarten im Rasterdatenformat den Vorteil, dass sie im Gegensatz zur klassischen Bodenkarte kontinuierliche Informationen bereitstellen, die je nach Fragestellung neu klassifiziert werden können.

Die Kombination von Digital Soil Mapping Tools mit geophysikalischen Daten und kontinuierlichen Reliefparametern stellt im Prinzip den einzig gangbaren Weg dar, um hochauflösende Bodeneigenschaftskarten zu erstellen.



Prognostizierter Tongehalt im Oberboden. Methode: Random Forests; Parameter: Geophysik.

## HINTERGRUND | BODENEIGENSCHAFTEN UND BODENFORMEN

## DSM: BODENFORMEN

Bodenformenkarten können mit DSM Tools auf unterschiedliche Weisen erstellt werden. Liegen bereits kartierte Punkt- oder Flächendaten vor, können diese mit Prognoseverfahren regionalisiert werden. Dazu dienen überwachte Klassifikationsverfahren wie beispielsweise *Classification Trees*, die im Ergebnis direkt eine Bodenformen oder Bodentypenkarte liefern. Diese Karten können je nach geforderter Genauigkeit als fertiges Produkt oder als Zwischenprodukt im Sinne einer Konzeptkarte aufgefasst werden, und können so als Grundlage für eine weiterführende klassische Kartierung dienen.

Liegen für ein Gebiet noch keine Kartierungsergebnisse vor, die zur Regionalisierung genutzt werden können, können unüberwachte Klassifikationsverfahren wie die Clusteranalyse eingesetzt werden. Hier werden die gewählten Basisdaten in statistisch homogene Gruppen eingeteilt. Das Ergebnis sind dann Raumeinheiten mit bodenkundlicher Relevanz jedoch ohne eine inhaltliche bodenkundliche Beschreibung. Eine solche Karte entspricht somit eher einer klassischen Konzeptkarte, die als Grundlage für eine Kartierung dienen kann. Das Gleiche gilt für die direkte Klassifikation von Reliefformen.

## DSM: BODENEIGENSCHAFTEN

Die Erstellung von Bodeneigenschaftskarten unterscheidet sich in vielfältiger Weise von der Erstellung von Bodenformenkarten. Zum einen ist es der Stichprobenumfang. Dieser sollte ggf. höher sein als bei einer Bodenformenkartierung, um graduelle Unterschiede besser erfassen zu können. Zum anderen müssen mathematische oder statistische Regionalisierungsverfahren eingesetzt werden, um sinnvoll und effizient kontinuierliche Karten erstellen zu können.

Je nach Fragestellung werden für die Regionalisierung Regressions- oder Interpolationsverfahren eingesetzt. Geostatistische Interpolationsverfahren können dann eingesetzt werden, wenn das Gebiet relativ klein und die Stichprobe relativ groß und gleichmäßig im Untersuchungsgebiet verteilt ist, und wenn nicht mit abrupten räumlichen Änderungen in der Ausprägung der betrachteten Bodeneigenschaft zu rechnen ist.

Bei größeren Gebieten und komplexeren Fragestellungen empfehlen sich jedoch Regressionsverfahren. Diese basieren auf der pedogenetischen Annahme, dass die Ausprägung einer Bodeneigenschaft durch andere Umweltvariablen gesteuert wird. Diese Beziehungen können über Regressionen erfasst und zur Extrapolation genutzt werden.

## LITERATUR

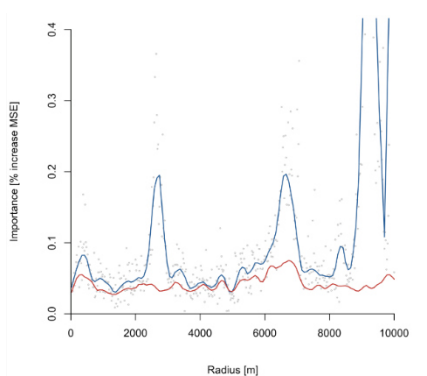
- Behrens, T., Förster, H., Scholten, T., Steinrucken, U., Spies, E., and Goldschmitt, M., 2005. Digital soil mapping using artificial neural networks, *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 168, 1-13.
- Bock, M., Böhner, J., Conrad, O., Köthe, R., Ringeler, A., 2007. Methods for creating Functional Soil Databases and applying Digital Soil Mapping with SAGA GIS. - In: Hengl, T. et al.(Eds.) Status and prospect of soil information in south-eastern Europe: soil databases, projects and applications. - EUR 22646 EN, 149-163, Scientific and Technical Research series, Office for Official Publications of the European Communities; Luxemburg.
- Jenny, H., 1941. Factors of soil formation. McGraw-Hill Book Co Inc. pp281.
- McBratney, A.B., Mendonca-Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- McBratney, A.B., Mendonca-Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.

### SKALENEBENEN

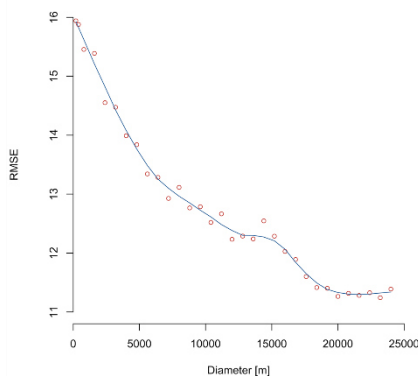
#### Interaktion und Integration

Die Berücksichtigung multipler Skalenebenen in der Regionalisierung von Bodeninformationen ist insbesondere im Landschaftsmassstab von großer Bedeutung, da Interaktionen zwischen verschiedenen bodenbildenden Faktoren - wie Relief und Klima - auftreten können.

So werden beispielweise die Windrichtung und -intensität, die Niederschlagsverteilung, aber auch Beschattungseffekte durch die grossräumige Topographie beeinflusst und können so an eigentlich „identischen“ Standorten (gleiche Reliefposition, gleiches Substrat etc.) zu unterschiedlichen Ausprägungen in den Bodeneigenschaften führen.



Beispiel für die Bedeutung der Skala, auf der Reliefparameter abgeleitet wurden, in einer Prognose.



Beispiel der Abnahme des Prognosefehlers mit grösser werdender Nachbarschaft

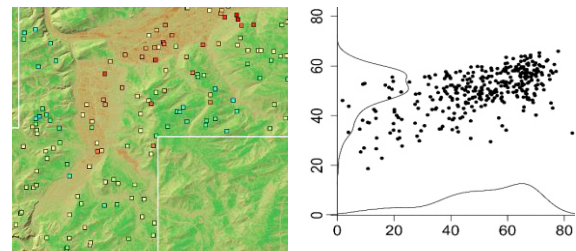
### HINTERGRUND

#### Klassische Kartierung und Modelle

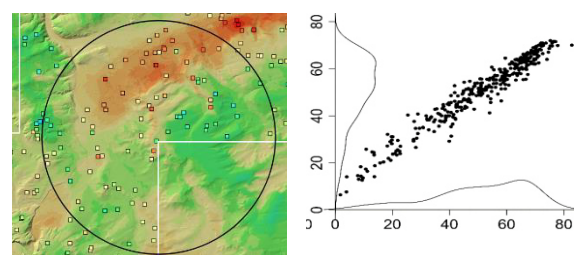
Ein entscheidender Vorteil einer klassischen Kartierung ist das mentale Modell der Landschaft, das sich der Kartierer aufbaut. Es berücksichtigt Interaktionen von Landschaftselementen auf unterschiedlichen Skalenebenen.

Die Betrachtung und Einbeziehung unterschiedlicher Skalenebenen in GIS-basierten Modellen ist demgegenüber äußerst komplex, da die Geobasisdaten meist nur in einer Auflösung bzw. auf einem Massstab vorliegen und die Interaktion zwischen weit entfernt liegenden relevanten Raumkomponenten kaum erfassbar ist.

Die Einbeziehung solcher Effekte ist jedoch teilweise mit spezifischen Methoden der multi- und hyperskaligen Digitalen Relieffanalyse und des Data Mining möglich.



Prognose des Schluffgehaltes mit Hilfe herkömmlicher Reliefparameter



Prognose des Schluffgehaltes mit Hilfe hyperskaliger Relieffanalyse. Der Kreis zeigt die maximale verwendete Skala ( $r = 12\text{km}$ ).

## HINTERGRUND | SKALENEBENEN

## MULTI- UND HYPERSKALIGE RELIEFANALYSE

Wie die Übersichtsartikel von McBratney et al. (2003) sowie Scull et al. (2003) zeigen, sind Reliefattribute die am häufigsten verwendeten Parameter zur Prognose bodenkundlicher Informationen. Dies zeigt die herausragende Bedeutung des Faktors Relief, die bereits von Jenny (1941) und Gerrard (1981) postuliert wurde.

Um die Einflüsse der Geomorphologie über größere Nachbarschaften und damit über lokale, regionale und überregionale Landschaftskomponenten hinweg berücksichtigen zu können, sind Informationen über den lokalen und regionalen geomorphologischen Kontext notwendig (MacMillan, 2004).

Herkömmliche Reliefparameter sind in ihrer Aussage jedoch auf die Punkt- und Catena-Skala beschränkt, so dass regionale und überregionale Komponenten des Reliefs nicht berücksichtigt werden können.

Ein hyperskaliges Verfahren zur Ableitung von lokalen, regionalen und supra-regionalen Reliefinformationen ist ConMap (Behrens et al., 2010). ConMap basiert auf der Ableitung von Höhendifferenzen zwischen dem Zentralpixel und seinen Nachbarpixeln in einer „lokalen“ kreisförmigen Nachbarschaft. Diese Differenzen werden für jeden Pixel des gesamten Untersuchungsgebietes berechnet und direkt als Prädiktoren in der Prognose verwendet. Die Größe der Nachbarschaft kann dabei jedoch – je nach Gebiet, Datensatz und Rechenleistung – von lokal bis global schwanken. Damit basiert ConMap im Gegensatz zu den herkömmlichen Ansätzen auf einfachen und universell ableitbaren topographischen Indikatoren. Dies erübrigt zum einen die Frage, welche Algorithmen zur Ableitung der Hangneigung, der Krümmung oder der Fließakkumulation verwendet werden sollten.

Zum anderen kann die Nachbarschaft nahezu beliebig erweitert werden, ohne dass sich die Komplexität in der Ableitung der Reliefinformationen erhöht. Durch die Möglichkeit überregionale Oberflächenform zu erfassen, wurden mit ConMap im Vergleich zur herkömmlichen Digitalen Reliefanalyse teilweise Verbesserungen in der kreuzvalidierten Prognosegüte um den Faktor 4 erzielt. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Skalenintegration.

## LITERATUR

- Behrens, T., Schmidt, K., Ramirez-Lopez, L., Gallant, J., Zhu, A-X., Scholten, T., 2014. Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis. *Geoderma* 213, 578-588.
- Behrens, T., Schmidt, K., Zhu, A. X. und Scholten, T., 2010: The ConMap approach for terrain-based digital soil mapping. *European Journal of Soil Science* 61, 1, 133-143.
- Gerrard A.J. (1981): *Soils and Landforms. An Integration of Geomorphology and Pedology*. George Allen and Unwin, London.
- Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation*. McGraw-Hill Book Co Inc. pp281.
- MacMillan, R.A., Jones, R.K., McNabb D.B., 2004. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). *Computers, Environment and Urban Systems* 28 (3), 175-200.
- McBratney, A.B., Mendonca-Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.

### DSM AUF DER FELDSKALA

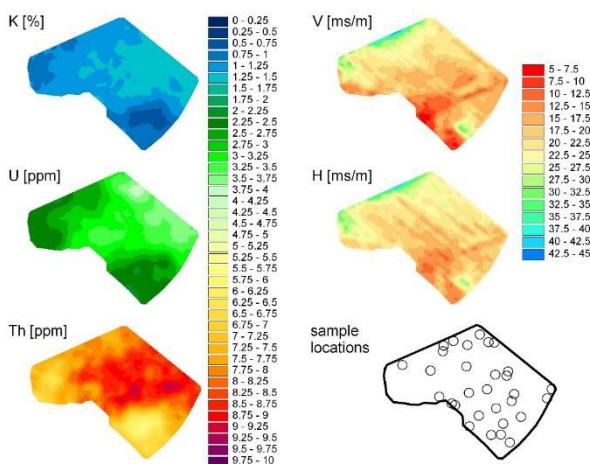
#### Integration von Geophysik

Auf der Feldskala (< 1km<sup>2</sup>) eignen sich geophysikalische Naherkundungsverfahren, um räumlich sehr hochauflösende Bodeneigenschaften erfassen zu können.

Je nach Verfahren können Bodeneigenschaften in unterschiedlichen Tiefenstufen erfasst werden.

Je mehr Sensordaten zur Verfügung stehen, desto mehr und desto präziser können im Anschluss chemische und physikalische Bodeneigenschaften regionalisiert werden.

In Kombination mit geeigneten Stichproben- und Regressionsverfahren lassen sich damit präzise Bodeneigenschaftskarten für unterschiedliche Tiefenstufen erstellen.



Interpolierte geophysikalische Sensordaten (Gamma-Spektroskopie und Elektromagnetik) und daraus abgeleitetes Messnetz.

### LITERATUR

Werban, U., Behrens, T., Cassiani, G., Dietrich, P. (2010): iSOIL: An EU Project to Integrate Geophysics, Digital Soil Mapping, and Soil Science. In: Viscarra-Rossel, McBratney, and Minasny: Proximal Soil Sensing. pp. 103-110.

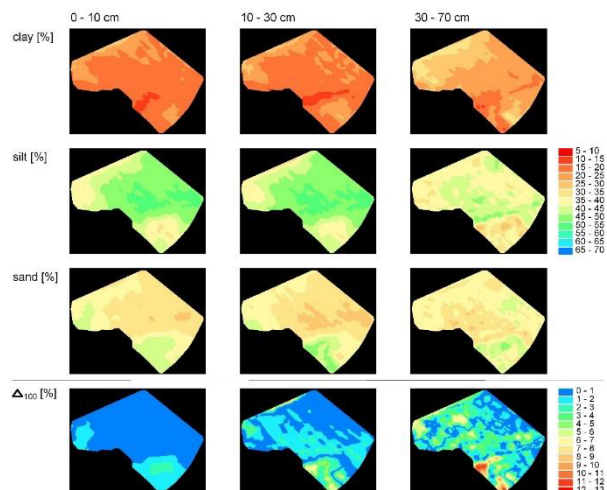
Schmidt, K., Behrens, T., Daumann, J., Ramirez-Lopez, L., Werban, U., Dietrich, P., Scholten, T. (2014): A comparison of calibration sampling schemes at the field scale. Geoderma 232-234, 243-256.

### METHODE

Je nach Fragestellung und Untersuchungsgebiet können ein oder mehrere geophysikalische Sensoren verwendet werden. Die Sensordaten werden anschließend interpoliert.

Auf Basis der interpolierten Sensordaten wird dann ein Messnetzdesign aufgebaut, das die Sensordaten repräsentativ abbildet. Die an den Messpunkten genommenen Bodendaten werden dann mit den Sensordaten korreliert und mit Hilfe von Prognoseverfahren und den interpolierten geophysikalischen Sensordaten regionalisiert.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Aufbereitung der Sensordaten, die Auswahl der Stichprobe und die Auswahl des Regressionsverfahrens.



Regionalisierung der Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Tiefenstufen auf Basis von geophysikalischen Sensordaten (Gamma-Spektroskopie und Elektromagnetik).

### DSM AUF DER LANDSCHAFTSSKALA

#### Hintergrund

Auf der Landschaftsskala lassen sich nahezu alle Methoden und Techniken aus dem Bereich des Digital Soil Mapping optimal integrieren, um effizient hochauflösende Boden- und Bodeneigenschaftskarten zu erstellen.

Eine effiziente und integrierte Methode ist die Verknüpfung von effizienten Stichprobenverfahren, multiskaliger Digitaler Reliefanalyse, Data Mining, im Falle von Bodenformenkarten das Digital Field Mapping, und für die Erstellung von Bodeneigenschaftskarten die Infrarotspektroskopie.

Kernpunkt ist die effiziente Integration verfügbarer Geobasisdaten. Eine zentrale Informationsquelle sind hierbei, neben Reliefinformationen, geologische Karten.

Hier sollen zwei Vorschläge für die Erstellung von Bodenkarten aufgezeigt werden.

### BEISPIEL 2: BODENEIGENSCHAFTSKARTEN

Auf Basis der verfügbaren und bodenkundlich relevanten Geobasisdaten werden optimierte Stichprobennetze (= Beprobungsstandorte) ausgewählt:

- das erste Netz ist das Referenznetz,
- das zweite Netz das Regionalisierungsnetz.

Im Referenznetz werden Bodenproben genommen, die im Labor bodenkundlich und spektroskopisch und gegebenenfalls mit weiteren Methoden analysiert werden. Die Daten des Referenznetzes werden genutzt, um Regressionen zwischen den gemessenen Bodeneigenschaften (pH, Korngröße, Bodenkohlenstoff, etc.) und den spektroskopischen Daten zu erstellen.

Die Proben des Regionalisierungsnetzes werden nur spektroskopisch analysiert. Die mit Hilfe des Referenznetzes erstellten Regressionen werden dann auf das Regionalisierungsnetz angewendet, sodass für jeden Messpunkt geschätzte Bodeneigenschaften zur Verfügung stehen.

Für beide Messnetze wird eine gemeinsame zu den Geobasisdaten aufgebaut und so die Bodeneigenschaften flächendeckend regionalisiert.

Die Vorteile dieser Methode sind der geringe laboranalytische Aufwand einer spektroskopischen Messung, die resultierende hohe Probendichte, die Objektivität bei der Erhebung der Daten und die Effizienz der Methode.

### BEISPIEL 1: BODENFORMENKARTEN

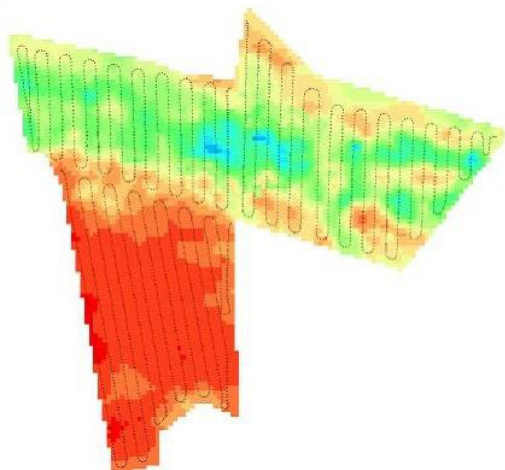
1. Aufgrund der verfügbaren und bodenkundlich relevanten Geobasisdaten werden optimierte Stichprobennetze erstellt.
2. Auf Basis von vorliegenden Bodendaten werden erste Prognosen als Konzeptkarte erstellt.
3. Für die Feldarbeit werden die Prognosen digital zur Verfügung gestellt.
4. Zusätzlich zu eigenen und frei wählbaren Probenahmestellen werden im Rahmen der Kartierung statistisch ausgewiesenen Standorte beschrieben.
5. Während der Kartierung werden die Prognosen im Gelände verifiziert, übernommen oder korrigiert.
6. Dieses Vorgehen ermöglicht eine effiziente Integration von bodenkundlicher Expertise und statistischer Prognose.

### GEOPHYSIKALISCHE MESSVERFAHREN

Naherkundungsverfahren sind geophysikalische Methoden zur Erfassung von physikalischen oder chemischen Bodeneigenschaften.

Im Gegensatz zu herkömmlichen bodenkundlichen Parametern, wie dem pH-Wert, der Bodenart oder der Lagerungsdichte liefern diese Verfahren Informationen, zum Beispiel elektromagnetische Signale, die mit herkömmlichen Bodeneigenschaften korreliert werden müssen. Sie haben den Vorteil einer sehr hohen räumlichen Auflösung und werden meist auf der Feldskala eingesetzt. Zur Kalibrierung der Signale werden immer ausreichend Bodenanalysen benötigt.

Geophysikalische Messverfahren eignen sich insbesondere zur Erstellung von Bodeneigenschaftskarten.



Geostatistische Interpolation geoelektrischer Signale.

### Methoden

#### Elektromagnetik

- misst die elektrische Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund

#### GAMMA Spektroskopie

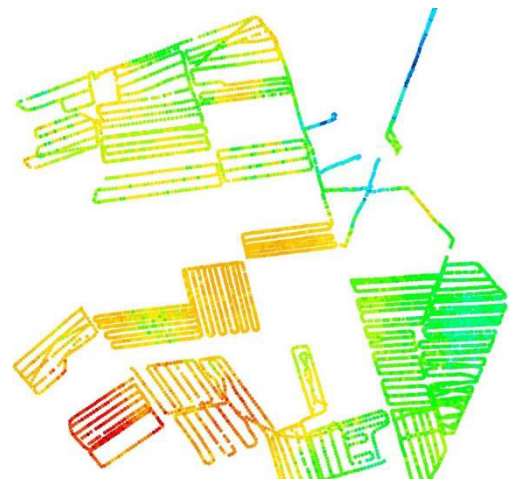
- misst die oberflächennahe natürliche Radioaktivität

#### vis-NIR Spektroskopie

- misst im sichtbaren, nah-infraroten und infraroten Spektralbereich die Reflexionseigenschaften

#### Georadar

- misst die Zeitdifferenz zwischen dem Senden eines Radarimpulses und dem Eintreffen der reflektierten Signale am Empfänger



Aufbereitete Gammaskpektroskopie-Signale (Dose rate).



Schleppgeophysik in der Anwendung. Elektromagnetik und Gammaskpektroskopie.



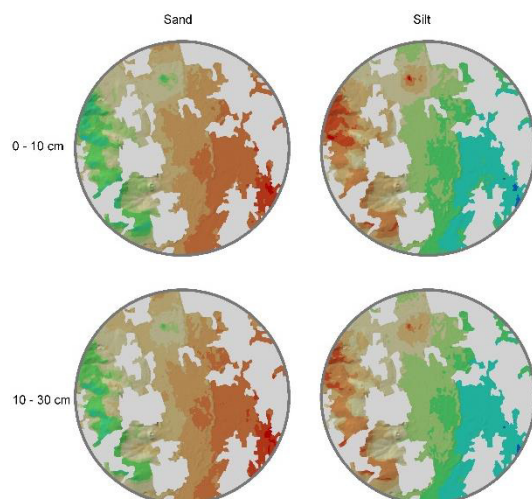
## DATENGRUNDLAGEN | NAHERKUNDUNG

## BEISPIEL: FELDSKALA

Auf der Feldskala wird meist die Schleppgeophysik angewendet. D.h. ein oder mehrere Sensoren werden fahrzeuggestützt in regelmäßigen Bahnen über eine Fläche gezogen. Diese Daten werden anschließend interpoliert und mit bodenkundlichen Labormessungen korreliert. Über Prognoseverfahren lassen sich die Bodeneigenschaften dann regionalisieren.

Die wichtigsten Verfahren sind hierbei die Elektromagnetik und die Gamma-Spektroskopie, die oftmals gute Vorhersagen zur Korngröße, zum Humusgehalt oder zum pH-Wert ermöglichen.

Je nach Bodensystematik sind einzelne Verfahren unterschiedlich gut zur Ableitung einzelner Bodeneigenschaften geeignet. Manche Verfahren liefern generell gute Korrelationen (vis-NIR Messungen) andere nur im Hinblick auf spezifische Bodeneigenschaften (Georadar).



Beispiel für Prognose auf der Landschaftsskala. Als Grundlage dienen geophysikalische Messung in Teilräumen (Patches) und hyperskalige Digitale Reliefanalyse.

## LITERATUR

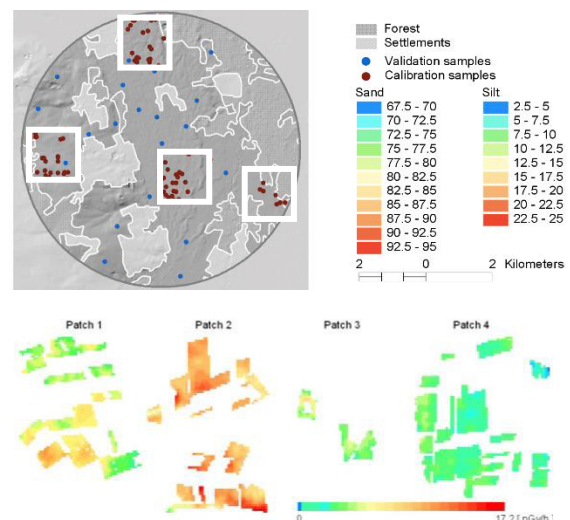
Schmidt, K., Behrens, T., Daumann, J., Ramirez-Lopez, L., Werban, U., Dietrich, P., Scholten, T. (2014): A comparison of calibration sampling schemes at the field scale. *Geoderma* 232-234, 243-256.

Werban, U., Behrens, T., Cassiani, G., Dietrich, P. (2010): iSOIL: An EU Project to Integrate Geophysics, Digital Soil Mapping, and Soil Science. In: Viscarra-Rossel, McBratney, and Minasny: *Proximal Soil Sensing*. pp. 103-110.

## BEISPIEL: LANDSCHAFTSSKALA

Auf der Landschaftsskala bieten sich Daten aus dem Bereich der Fernerkundung an. Dies sind insbesondere Multispektraldaten, aber auch Gammadaten von Befliegungen. Im Gegensatz zu den Gammadaten sind die Multispektraldaten bodenkundlich jedoch nur nutzbar wenn keine Vegetation vorliegt.

Ebenfalls gut einsetzbar sind vis-NIR Messungen, da sehr einfach viele Messpunkte gesammelt werden können und nur wenige Bodenproben im Labor analysiert werden müssen. Aus vis-NIR Messungen resultieren sogenannte spektrale Bibliotheken. Da die Beziehungen zu den Bodeneigenschaften relativ stark sind, können die Bodeneigenschaften der übrigen Proben daraus über Regressionen geschätzt werden. So lassen sich in kurzer Zeit große Messnetze aufbauen, die dann zur Erstellung von Bodenkarten verwendet werden können.



### Der Blick von oben

Die Fernerkundung umfasst ein breites Spektrum der Erfassung von Daten der Bodenoberfläche. Es reicht von satelliten- über flugzeuggestützte Sensoren bis zu UAV/Drohnen basierten Systemen.

Diese Verfahren liefern hauptsächlich multispektrale Bilddaten in Form von Orthophotos, andererseits aber auch hochauflösende Höhen- und Oberflächenmodelle mittels Laserscanning oder gammaspektroskopische Daten, die wichtige Informationen zum Ausgangssubstrat liefern können.

Im letzten Jahrzehnt hat sich die Verfügbarkeit von flächendeckenden und hochauflösenden Fernerkundungsdaten stark verbessert.

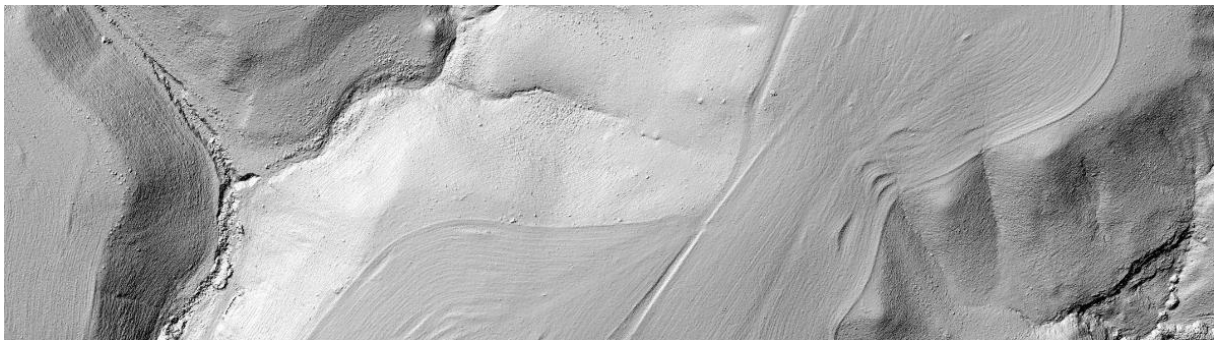
### Daten

#### Satellitendaten

- Satellitendaten liefern unterschiedlichste Informationen über Böden und Vegetation – von Multispektraldaten, über Erstellung von Höhenmodellen bis zur Radar gestützten Erfassung der Bodenfeuchte

#### Flugzeug- und UAV-Daten

- Der Einsatz von Flugzeugen und kleinen Drohnen kann eine Fülle extrem hochauflösender Daten liefern. Dies umfasst insbesondere Luftbilder, Orthofotos sowie Gamma- und LIDAR-Messungen.



Digitales Oberflächenmodell auf Basis von UAV-Bilddaten.



UAV gestützte Bodenkartierung.

Sensoren	Spektralbänder	Spektralbereich (µm)	Räumliche Auflösung (m)	Frequenz (Tage)
<b>Optisch</b>				
Landsat	11	0.43-12.51	15-60	16
MODIS	36	0.40-14.40	250-1000	1
MERIS	15	0.39-1.40	300	3
ASTER	15	0.52-11.65	15-90	16
Sentinel-2	13	0.44-2.19	10-60	5-10
RapidEye	5	0.44-0.85	6.5	5.5
<b>LIDAR</b>				
ICESat	2	0.53,1.06	70	91
<b>Radar</b>				
SRTM	2	2.5-8.0	30	-
SMOS	1	15-30	50000	3
Sentinel-1	1	2.5-4.0	1000	3-6

Ausgewählte satellitenbasierte Sensoren der Fernerkundung.

## DATENGRUNDLAGEN | FERNERKUNDUNG

## ANWENDUNGSFELDER

## Vegetation

Die räumliche und zeitliche Variabilität in der Vegetation wird von vielen Faktoren beeinflusst. Neben dem Klima und dem Relief ist dies insbesondere der Boden.

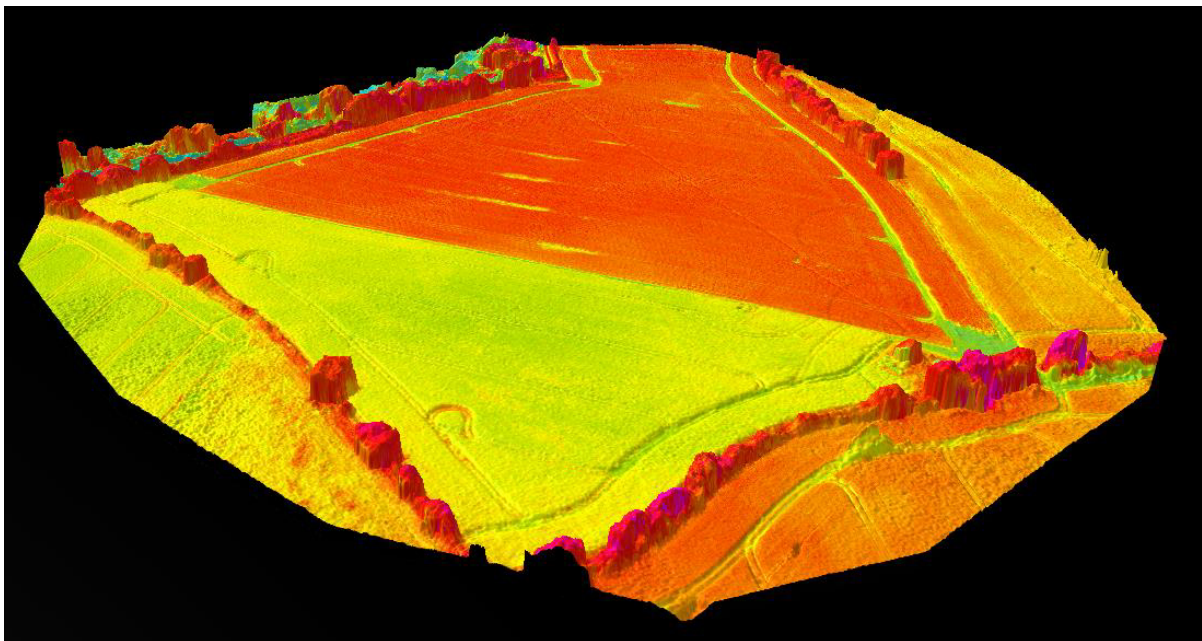
Multispektrale Daten, die Informationen aus dem nahen Infrarotbereich liefern und Aussagen über den Chlorophyllgehalt und damit die Charakterisierung des Zustands der Pflanzen ermöglichen, eignen sich gut, um kleinräumige Unterschiede in Bodeneigenschaften zu erfassen. Zum Einsatz kommen hier Vegetationsindices wie der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Solche Daten lassen sich anwendungsspezifisch sowohl mit Satelliten als auch mit Flugzeugen und Drohnen erfassen.

## Relief

Das Relief hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Böden. Daher sind Höhenmodelle eine wichtige Grundlage für das DSM. Neben Satellitendaten werden auch auf der Landschaftsskala vermehrt hochauflösende flugzeuggestützte LIDAR-Daten für Prognosen verwendet. Für Erosionsmessungen auf einzelnen Schlägen bieten sich jedoch auch UAV Daten an, die Auflösungen im Subzentimeterbereich liefern.

## Boden

Der Boden, sofern er nicht von Vegetation bedeckt ist, kann ebenfalls mit Hilfe von Multispektraldaten analysiert werden. Hier geht es insbesondere um Farbunterschiede, die Aussagen zum Humusgehalt, der Korngrößenverteilung und der Mineralogie erlauben.



UAV gestützte Kartierung von Vegetationseigenschaften als Indikator für Bodeneigenschaften.

## LITERATUR

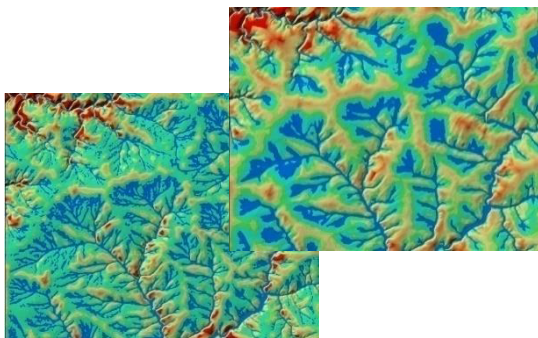
Wulf, H., Mulder, V. L., Schaepman, M. E., Keller, A., Jörg, P. C. (2015). Remote sensing of soils. Remote Sensing Laboratories, University of Zürich. 22. Jan., 2015, 1-71 S.

### DIE BESCHREIBUNG DER ERDOBERFLÄCHENFORM

Die Digitale Reliefanalyse ist ein zentrales Werkzeug des Digital Soil Mapping und oft auch der klassischen bodenkundlichen Kartierung.

Über einfache Parameter hinaus, wie beispielsweise die Höhe ü. NN, die Hangneigung oder die Exposition, liefert die Digitale Reliefanalyse vielfältige Datengrundlagen, die für die Erstellung von bodenkundlichen Konzeptkarten sowie für die räumliche Prognose zentral sind.

Neben kontinuierlichen Parametern wie der Krümmung lassen sich auch Reliefformenkarten erstellen (z.B. Hang- oder Kuppenlagen).



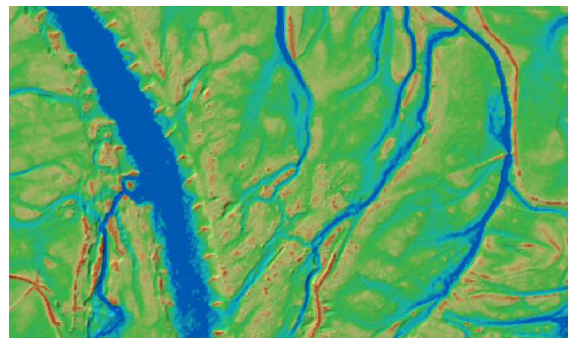
Beispiele für die Ableitung von Reliefparametern (Höhe über Tiefenlinie) auf unterschiedlichen Skalen.

### RELIEFPARAMETER

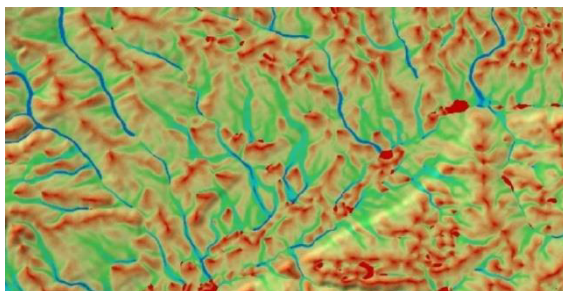
Für visuelle Analysen und Bewertungen des Reliefs sind Schummerungsdarstellungen und Höhenlinien wichtige Grundlagen.

Für einfache Regressionsansätze und bodengenetische Interpretationen sind es meist die Höhe ü. NN, die Hangneigung, die Exposition, die Krümmung, die beitragende Fläche, lokale Höhendifferenzen oder spezifische Parameter wie der Topographische Feuchteindex.

Komplexe Modellansätze umfassen multi-skalige Reliefparameter. Diese erlauben es, die Eigenschaften des Reliefs nicht nur in der lokalen, sondern auch in der großräumigen Nachbarschaft in Prognosen zu berücksichtigen. So kann beispielsweise die Interaktion von Klimaparametern mit dem Relief approximiert werden.



Beispiel der Bedeutung der Reliefanalyse in flachen Auenbereichen



Unterschiede in den Berechnungsalgorithmen zur Fließakkumulation. Links: multiple flow, rechts: Monte Carlo D8

## DATENGRUNDLAGEN | DIGITALE RELIEFANALYSE

### DATENGRUNDLAGEN

Die Basis jeder Digitalen Reliefanalyse bilden Digitale Höhenmodelle (DHM). DHM liegen in unterschiedlichen Auflösungen vor. Für bodenkundliche Fragestellungen sind je nach Massstab Auflösungen von 1m bis 100m Rasterweite relevant.

Zu beachten ist hierbei, dass die Auflösung des Höhenmodells der jeweiligen Fragestellung und des Zielmaßstabes entsprechen sollte. Die Modelle sollten dabei weder zu grob noch zu fein sein.

Auf der Feldskala empfehlen sich LIDAR Modelle mit  $\leq 1\text{m}$  Auflösung. Für Betrachtungen auf der Landschaftsskala sollten Modelle zwischen 5m und 10m Auflösung genutzt werden.

### DATENAUFBEREITUNG

In den meisten Fällen müssen die Höhendaten vor der Ableitung der Reliefparameter aufbereitet werden. Dies muss in Abhängigkeit von den Eigenschaften und in Anbetracht der jeweils möglichen Fehlerquellen erfolgen.

Wichtige Aufbereitungsschritte sind:

- Filterung zur Eliminierung von Rauschen
  - wichtig für die Ableitung von Krümmungen
- Korrektur von Senken
  - wichtig zur Berechnung der Bodenfeuchte
- Eliminierung von anthropogenen Strukturen
  - insbesondere bei hochauflösenden LIDAR Daten

### ANWENDUNG

**Reliefformenkarten** sind klassischen geomorphographischen Karten sehr ähnlich. Jedoch werden sie nicht kartiert, sondern die unterschiedlichen Reliefformen werden aus einem Höhenmodell abgeleitet. Die räumlichen Einheiten stellen oftmals bodenkundlich relevante homogene Areale dar und können somit gut als Grundlage für klassische Kartierungen verwendet werden.

**Geomorphometrische Karten** stellen Kartenwerke zu einzelnen kontinuierlichen Reliefparametern dar. Diese können einerseits fragestellungbezogen klassifiziert werden (beispielsweise die Hangneigung) und andererseits in Regressionsmodellen verwendet werden, um kontinuierliche Bodeneigenschaftskarten zu erstellen. Grundsätzlich wichtig ist die Auswahl der richtigen Parameter und die Ableitung auf der relevanten Skalenebene und Auflösung des DHM.

### LITERATUR

Behrens, T., Schmidt, K., Ramirez-Lopez, L., Gallant, J., Zhu, A-X., Scholten, T., 2014. Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis. *Geoderma* 213, 578-588.

Behrens, T., Zhu, A. X., Schmidt, K. und Scholten, T., 2010. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection in digital soil mapping. *Geoderma* 155, 3-4, 175-185.

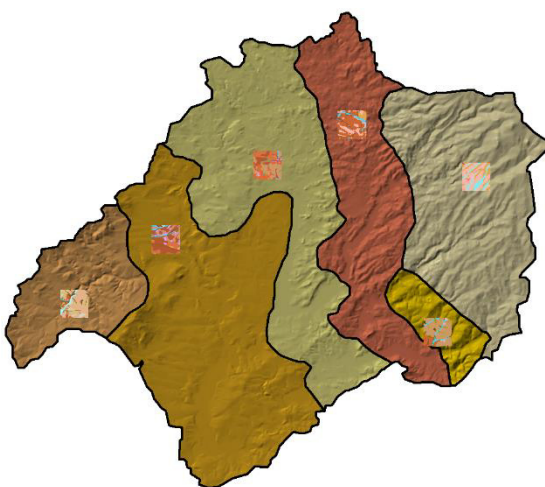
### MESSNETZDESIGN

Ohne Bodendaten, die im Gelände erhoben wurden, lassen sich keine bodenkundlichen Kartenwerke erstellen und bewerten. Ein Messnetzdesign dient dazu, objektive und repräsentative Beprobungsstandorte in dem zu kartierenden Gebiet festzulegen.

Zur Erstellung eines Messnetzdesigns werden oft existierende Geobasisdaten (z.B. Geologie, Höhenmodell, Nutzung, u.a.) herangezogen, die einen Einfluss auf die Verbreitungssystematik der Böden im Raum haben. Ziel ist die vollständige Abdeckung der Variabilität der Geobasisdaten mit Hilfe der Stichprobe. Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass die Standorte gleichmäßig über den Raum verteilt werden. So können die Standorte für die bodenkundliche Kartierung optimal verteilt werden.

Ziel ist im Allgemeinen die Minimierung des Stichprobenumfangs und gleichzeitig eine optimale und vollständige inhaltliche Abdeckung der Basisdaten.

Des Weiteren können im Rahmen des Messnetzdesigns auch repräsentative Teilräume oder Transekte für geophysikalische Erkundungen ausgewiesen werden.



Beispiel für die Ausweisung repräsentativer Teilräume für detaillierte Beprobungen.

### ANSÄTZE

Ein klassisches Verfahren zur Verteilung von Stichproben im Raum sind die Rasterbeprobung und die räumliche Zufallsstichprobe. Sie haben jedoch den Nachteil, dass ihnen keine Annahmen über die Verbreitungssystematik zugrunde liegen.

Die Berücksichtigung von Geobasisdaten, die einen Einfluss auf die Verbreitungssystematik von Böden haben, erhöht nicht nur die Effizienz des Messnetzes, sondern auch die Aussageschärfe. Solche Verfahren gehören meist zur Gruppe der „geschichteten Stichprobenverfahren“.

### ANWENDUNGSFELDER

- Übersichtserkundungen
- Düngegeratung
- Standortauswahl für Bodenprofile oder Bohrungen
- Standortauswahl für geophysikalische Messungen

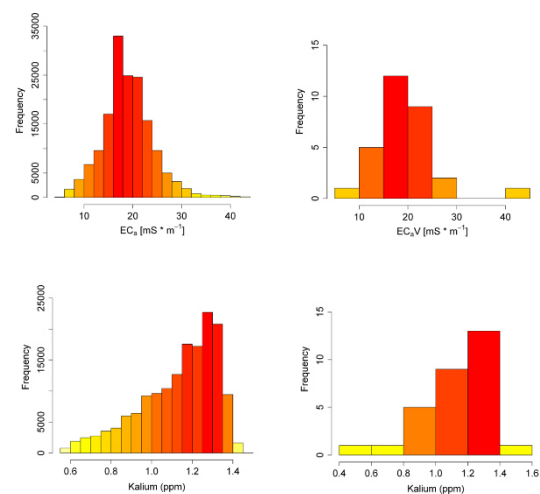


Abbildung der Häufigkeitsverteilung der Grundgesamtheit (links) in der Stichprobe (rechts) am Beispiel eines Messnetzdesigns auf Basis geophysikalischer Basisdaten.

## METHODEN | MESSNETZDESIGN

## DATENGRUNDLAGEN

Für die Anwendung von geschichteten Stichprobenverfahren werden Geobasisdaten benötigt. Sie dienen dazu, relevante räumliche Verbreitungsmuster im Untersuchungsraum zu berücksichtigen, die einen Einfluss auf die Bodeneigenschaften haben. Dieser Ansatz ist vergleichbar mit einer Konzeptkarte, wobei die Stichproben auf die relevanten Einheiten zufällig oder systematisch verteilt werden. So kann sichergestellt werden, dass die Verteilung der Stichproben alle möglichen Ausprägungen der Böden im Untersuchungsraum bestmöglich erfasst.

Die Auswahl der Basisdaten hängt insbesondere von der Untersuchungsgebietsgröße ab. Auf der Feldskala bieten sich geophysikalische Messdaten an, auf der Landschaftsskala beispielsweise Reliefparameter und Geologische Karten.

## WICHTIGE METHODEN

Bei einer [geschichteten Zufallsstichprobe](#) wird die Grundgesamtheit (hier die inhaltliche Verteilung der Geobasisdaten) in kleine Gruppen/Schichten aufgeteilt - beispielsweise die Einheiten einer Konzeptkarte. Aus jeder Einheit werden dann ein oder mehrere Punkte zufällig ausgewählt. Problematisch ist hierbei die Festlegung der Anzahl der Schichten, da diese vorab definiert werden muss und von der Untersuchungsregion determiniert wird.

[Conditioned Latin Hypercube Sampling \(cLHS\)](#) ist ein effizientes und optimiertes geschichtetes Zufallsstichprobenverfahren. Es erfasst die komplette Spannweite der zugrundeliegenden Geobasisdaten und ermöglicht gleichzeitig die Minimierung des Stichprobenumfangs. Mit cLHS wird sichergestellt, dass die Häufigkeitsverteilung der Basisdaten bei nahezu allen gewählten Stichprobengrößen erhalten bleibt. Somit ist die Repräsentativität der Stichprobe gewährleistet. LHS kann auf jeder Skalenebene eingesetzt werden.

## LITERATUR

- Behrens, T., Schneider, O., Lösel, G., Scholten, T., Hennings, V., Felix-Henningsen, P., Hartwich, R. (2009): Analysis on pedodiversity and spatial subset representativity – The German soil map 1:1.000.000. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172, 1, 91–100.
- Schmidt, K., Behrens, T., Daumann, J., Ramirez-Lopez, L., Werban, U., Dietrich, P., Scholten, T. (2014): A comparison of calibration sampling schemes at the field scale. *Geoderma* 232-234, 243-256.
- Stumpf, F., Schmidt, K., Behrens, T., Schönbrodt-Stitt, S., Buzzo, G., Dumperth, C., Wadoux, A., Xiang, W., Scholten, T. (2016): Incorporating limited field operability and legacy soil samples in a Hypercube Sampling design for Digital Soil Mapping. *J Plant Nutr Soil Sci* 179, 499-509.

## ALTDATEN

In vielen Fällen liegen bereits bodenkundliche Punktdaten bzw. Daten aus älteren Bodenkartierungen vor. Diese können im Rahmen der klassischen Kartierung und der DSM gestützten Kartierung auf vielfältige Weise genutzt werden.

Neben der allgemeinen bodenkundlichen Relevanz kann beispielsweise analysiert werden, wie repräsentativ die Verteilung der Altdaten ist. Im Anschluss können dann zusätzliche Proben ausgewiesen werden, die jene Bereiche abdecken die in den Altdaten unterrepräsentiert sind. Auf diese Weise lässt sich durch Einbindung schon vorhandener Bodeninformationen der Stichprobenumfang und somit die Kosten minimieren.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Altdaten zur Validierung neuerer Kartierungen heranzuziehen.

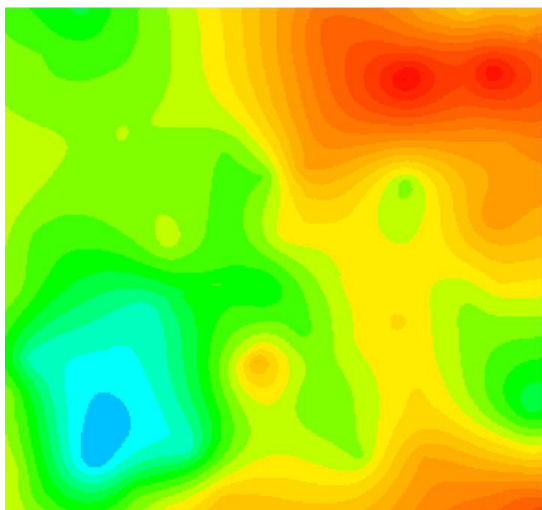
## GEOSTATISTIK

### Regionalisierung durch Interpolation

Im engeren Sinn bezeichnet die Geostatistik statistische Verfahren zu Interpolation von Punktdaten.

Diese Verfahren sind beispielsweise geeignet, um räumlich engmaschig verteilte Werte auf der Feldskala zu interpolieren. Sie werden aber auch eingesetzt, um grossräumige Basisdaten mit langwelligen räumlichen Trends wie Klimastationsdaten zu regionalisieren.

Generell eignen sich geostatistische Methoden, um Daten mit einem starken räumlichen Trend und kontinuierlicher Ausprägung zu interpolieren. Für die Anwendung müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein, die mit Hilfe eines Variogramms bestimmt werden können.



Beispiel für die Interpolation des pH-Wertes mittel Kriging.

## METHODEN

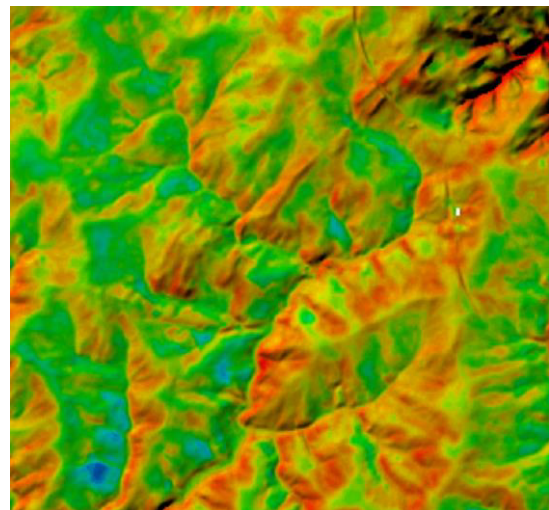
### Variogrammanalyse

Ein Variogramm beschreibt die räumliche Variabilität einer Bodeneigenschaft. Es zeigt die relativen Werteunterschiede zwischen benachbarten Punkten über die Entfernung zwischen den Punkten, oder mit anderen Worten: Es liefert eine mathematische Beschreibung für Toblers geographisches Gesetz:

*“Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.”*

### Kriging

Kriging ist ein Interpolationsverfahren, das die Variogrammfunktion nutzt, um die räumliche Interpolation entsprechend der natürlich vorkommenden Variabilität der Bodeneigenschaft zu gewichten.



Beispiel für die Anwendung von Regression Kriging, einer Kombination aus Regression und Kriging-Interpolation



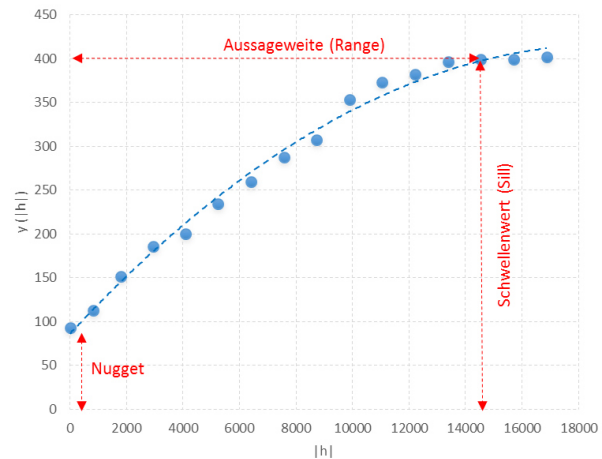
## METHODEN | GEOSTATISTIK

## METHODIK

Das Variogramm zeigt die Wertedifferenzen zwischen benachbarten Punkten über ihren räumlichen Abstand. Je weiter Punkte auseinanderliegen, desto stärker unterscheiden sich zumeist die Werte. Punkte, die nah beieinander liegen, weisen im Allgemeinen ähnliche Werte auf.

Nach der Darstellung der empirischen Daten muss eine theoretische Funktion gewählt werden, die die empirischen Daten bestmöglich beschreibt. Diese Funktion wird dann im Kriging für die Interpolation angewendet.

Der **Nugget** eines Variogramms beschreibt die kleinräumige Variabilität. Je geringer er ist, desto stärker ist meist der räumliche Zusammenhang. Der **Sill** (Schwellenwert) definiert die maximale Varianz der Bodeneigenschaft und der **Range** (Aussageweite) die Distanz zwischen zwei Punkten, bei der die maximale Variabilität erreicht ist.



Variogramm-Beispiel

Die räumliche Variabilität einer Bodeneigenschaft ist „am Punkt“ um ca. den Faktor 4 kleiner als zwischen Punkten, die 14 km auseinanderliegen. Der Nugget ist im Vergleich zum Sill relativ gering. Die Daten zeigen somit einen räumlichen Zusammenhang und dürfen mittels Kriging interpoliert werden.

## WICHTIGE ANWENDUNGEN

## Interpolation geophysikalischer Messdaten

Geophysikalische Messdaten liegen oftmals in hoher räumlicher Auflösung vor. Sie werden gewonnen, indem beispielsweise ein Traktor ein Messgerät zieht (Schleppgeophysik). Der Abstand der Messungen liegt meist im Bereich von  $< 50\text{cm}$ , der Abstand der Bahnen bei ca.  $5\text{m}$ . Kriging wird hier verwendet, um die Daten flächendeckend und in einem einheitlichen Raster abzubilden.

## Regression Kriging

Regression Kriging ist ein Verfahren, bei dem zumeist lineare Regressionen mit Interpolationen kombiniert werden, um neben inhaltlichen Zusammenhängen auch räumliche Trends in den Daten berücksichtigen zu können. Dazu wird im ersten Schritt eine Regression zwischen einer Bodeneigenschaft und vorliegenden Geobasisdaten aufgebaut. Dann werden die Differenzen zwischen den Regressionsergebnissen und den Messwerten ermittelt. Diese sogenannten Residuen werden – wenn das Variogramm einen räumlichen Trend zeigt – per Kriging interpoliert. Abschließend werden die Regressionsergebnisse und die Interpolationsergebnisse zur Gesamtprognose addiert.

## LITERATUR

Hengl, T. 2009: A Practical Guide to Geostatistical Mapping. University of Amsterdam, Amsterdam, pp. 291.

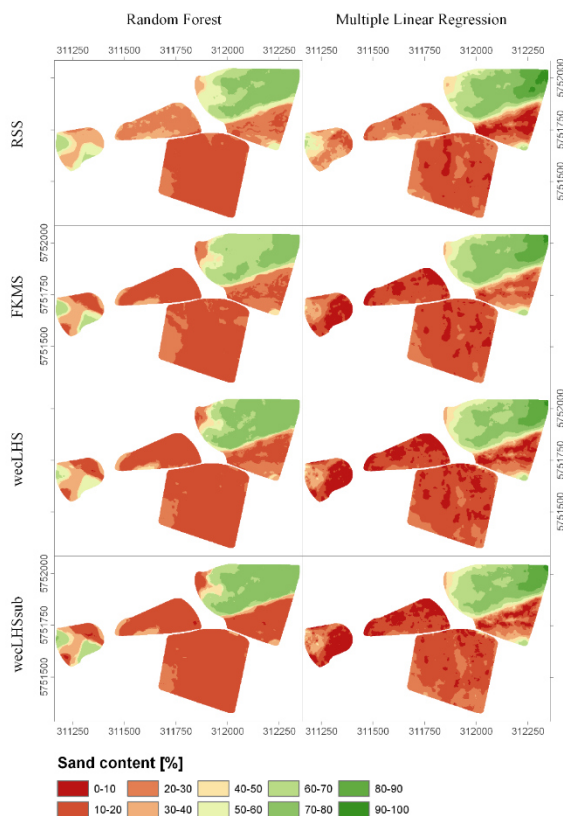
## PROGNOSTIK

### Vorhersagen zur Verbreitung der Böden

Räumliche Prognosen sind Verfahren, die in einem ersten Schritt auf Basis von kartierten oder gemessenen Bodendaten Zusammenhänge zu vorliegenden Geobasisdaten ableiten bzw. aufdecken – beispielsweise den Zusammenhang einer geringer werdenden Bodenmächtigkeit mit zunehmender Hangneigung.

In einem zweiten Schritt werden diese Zusammenhänge bzw. die erstellten Modelle dann mit Hilfe der Basisdaten auf die gesamte Fläche übertragen.

Man unterscheidet hierbei insbesondere Interpolationen und Extrapolationen sowie lineare und nicht-lineare Regressions- und Klassifikationsansätze.



Vergleich unterschiedlicher Prognoseverfahren und Messnetzdesigns.

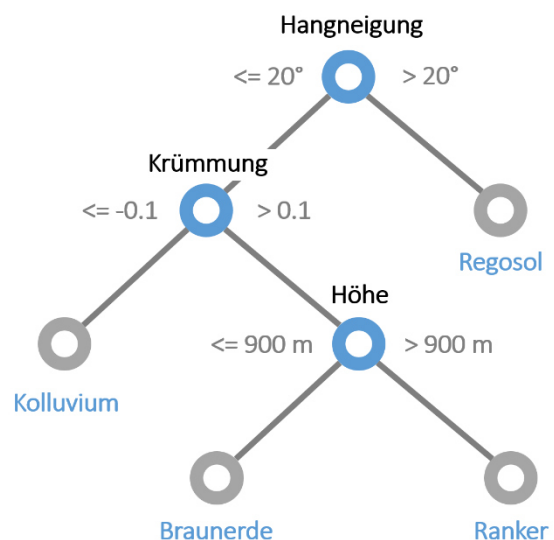
## METHODEN

Regressionen werden eingesetzt, um numerische Bodeneigenschaften (Humusgehalt, pH-Wert, Korngröße, etc.) mit Hilfe von Geobasisdaten zu schätzen.

**Klassifikation** Bei Klassifikationsansätzen werden kategorische Bodendaten, wie z.B. Bodenformen betrachtet.

**Interpolation / Extrapolation** bezieht sich auf den Wertebereich (räumlich und inhaltlich) der untersuchten Eigenschaft. Liegt der gesuchte Wert innerhalb des Wertebereichs der Basisdaten liegt eine Interpolation vor. Diese ist im generellen zuverlässiger als Extrapolationen.

**Linear / Nicht-Linear** Lineare Zusammenhänge lassen sich mit Regressionsgeraden beschreiben. Jedoch sind die meisten Zusammenhänge in der Natur nur partiell linear und teilweise durch sprunghafte Zusammenhänge gekennzeichnet, die nur mit komplexeren Verfahren abbildbar sind.



Beispiel für den Aufbau eines automatisiert aus den Trainingsdaten erstellen Entscheidungsbaums.

## METHODEN | PROGNOSTIK

## REGRESSIONSVERFAHREN

Die Regressionsanalyse testet, ob ein beschreibbarer Zusammenhang zwischen einer unabhängigen Variable (Geobasisdatensatz) und einer abhängigen Variable (Bodeneigenschaft) besteht. Dieser wird über eine Funktion beschrieben und ermöglicht in der Anwendung die Vorhersage der Bodeneigenschaft. Im Falle einer multiplen linearen Regression wird versucht, die Bodeneigenschaft durch mehrere unabhängige Variablen (Hangneigung, Krümmung, Niederschlag u.a.) zu beschreiben.

Neben der linearen Regression stehen unterschiedlichste Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens zur Verfügung, um nicht-lineare Zusammenhänge abzubilden. Dazu gehören beispielsweise Künstliche Neuronale Netze, Support Vector Machines und Regressionsbäume.

## ANWENDUNGEN

Generell finden Prognosen dort Anwendung, wo Messungen teuer und zeitaufwändig sind und wenn davon ausgegangen werden kann, dass Zusammenhänge zwischen den vorliegenden Geobasisdaten und der betrachteten Bodeneigenschaft bestehen. In diesem Fall ermöglichen Prognosen eine sehr schnelle flächenhafte und kosteneffiziente Erstellung von Bodenkarten bzw. Bodeneigenschaftskarten.

Grundvoraussetzung für die Anwendung ist das Vorliegen von bereits erhobenen Bodendaten. Dies können bereits vorliegende Bodenkarten sein oder im Falle von Punktdaten Altdaten. Oftmals werden für eine Prognose jedoch neue Datenbestände erhoben. Dabei bietet es sich an, das entsprechende Messnetzdesign auf die abhängige(n) Variable(n) abzustimmen und die für im Messnetzdesign gewählten Geobasisdaten auch in der Prognose zu verwenden.

Wie klassische Kartierungen, die oftmals durch den Erfahrungsschatz des Kartierers subjektiv geprägt sind, sind auch prognostisch erstellte Bodenkarten nicht fehlerfrei. Eine Validierung oder die direkte Integration von DSM in die klassische Kartierung sind daher immer empfehlenswert.

## LITERATUR

Grimm, R, Behrens, T., Märker, M., Elsenbeer, A., 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146, 1-2, 102-113.

Viscarra-Rossel, R., Behrens, T., 2010. A comparison of data mining techniques to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 158, 1-2, 46-54.

## KLASSIFIKATIONSVERFAHREN

Über die Verknüpfung der Geobasisdaten mit kategorischen Informationen (Bodenform) werden bei einer Klassifikation analog zur Regressionsanalyse Zusammenhänge geprüft und mathematisch oder statistisch beschrieben.

Die wichtigste Methode sind Entscheidungsbaumverfahren. Hierbei wird für jeden Geobasisdatensatz die Eignung geprüft, wie gut dieser die entsprechenden Bodenformen unterscheiden kann. Basierend auf der Prüfung wird ein Regelwerk entworfen, mit Hilfe dessen eine bestmögliche Beschreibung der Bodenlandschaft möglich ist. Dabei wird der gesamte Geobasisdatensatz mit jeder weiteren Testung in kleinere Teile zerlegt. So können sehr komplexe und nicht-lineare Zusammenhänge abgebildet werden.

# FACTSHEETS - DIGITAL SOIL MAPPING

## METHODEN | DIGITAL FIELD MAPPING

### DIGITAL FIELD MAPPING

#### Integration

Ein besonderer Fall der Integration von klassischer Bodenkartierung und Digital Soil Mapping ist das Digital Field Mapping.

Hierbei stehen dem Kartierer bei seiner Arbeit im Gelände nicht nur bereits prognostizierte Karten digital zur Verfügung. Er kann – bei vorhandener Internetverbindung – auch direkt von ihm im Gelände digitalisierte homogene bodenkundliche Einheiten auf dem Tablet einzeichnen und an einen Server schicken.

Innerhalb weniger Minuten ist das Prognose Ergebnis zur Validierung und Integration in die Bodenkarte auf dem Tablet verfügbar.

Diese Vorgehensweise erlaubt eine sehr effiziente und stringente Kartierung, erfordert aber auch eine Anpassung der Arbeiten im Gelände.

### METHODE

#### Konzeptkarte

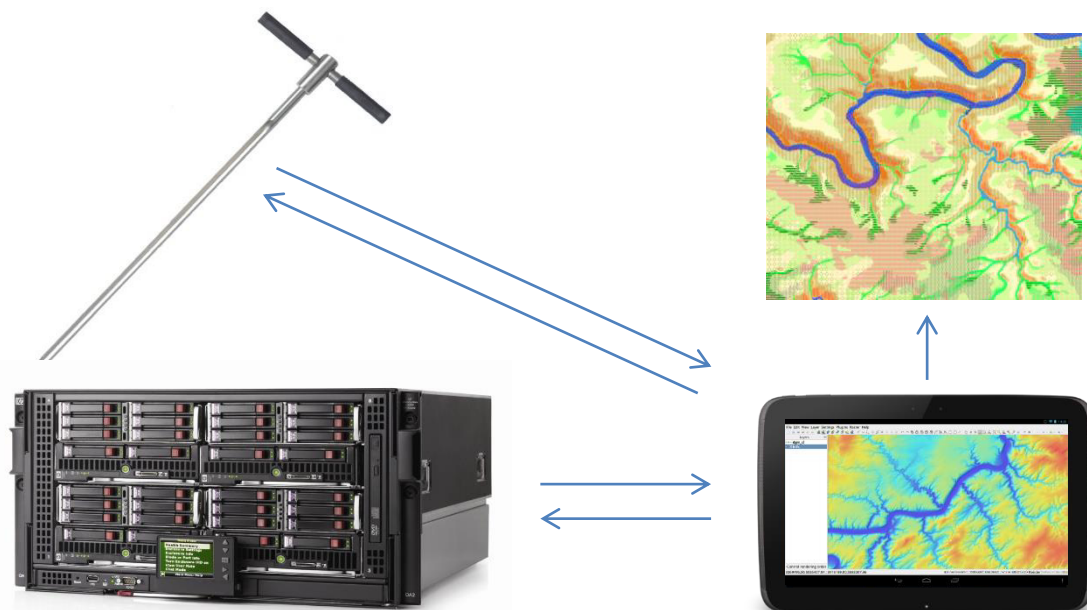
Hier steht es dem Kartierer primär frei, wie er seine Daten aufbereitet. Einzige Prämisse ist die Nutzung eines Tablets mit Digitalisierungsfunktion.

#### Kartierung

Die Kartierung erfolgt nach dem üblichen Vorgehen im Gelände. Einziger Unterschied zur klassischen Kartierung ist, dass die Kartiereinheiten nicht analog auf Karten gezeichnet, sondern direkt im Gelände digitalisiert werden.

#### Prognose

Sind zwei oder mehrere Polygone digitalisiert, kann auf dieser Basis bereits eine Prognose erstellt werden, die innerhalb von wenigen Minuten direkt auf dem Tablet verfügbar ist.

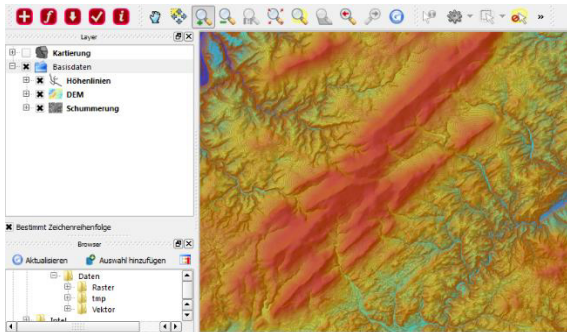


Integration von klassischer Kartierung und Prognostik mit Hilfe des Digital Field Mapping. Bereits im Gelände werden die bodenkundlichen Einheiten per Tablet digitalisiert und auf einem Server innerhalb weniger Minuten prognostiziert.

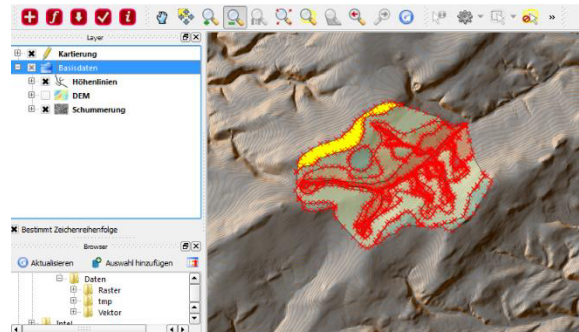
## METHODEN | DIGITAL FIELD MAPPING

## ANWENDUNG

Sobald die Geobasisdaten im GIS auf dem Tablet organisiert sind, können bodenkundliche Einheiten digitalisiert werden. Über ein Menü werden die selektierten Basisdaten dann zum Server geschickt und prognostiziert.



Organisation der Basisdaten im GIS



Digitalisierung der bodenkundlichen Einheiten

## ERGEBNISSE

Für die Prognose stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: Klassifikation, Wahrscheinlichkeiten des Auftretens einer Klasse und Regression. Somit stehen dem Kartierer nicht nur starre prognostizierte Grenzen (Klassifikation) zur Verfügung, sondern auch kontinuierliche Informationen, die direkt im Gelände als „variable“ Stützinformation für die Kartierung dienen können.

**Modellbildung und Prognose**

Shapefile der Kartierung:  Feld:

Prognosemethode

Klassifikation

Wahrscheinlichkeiten der Klassen

mit automatischem Download von Klasse:

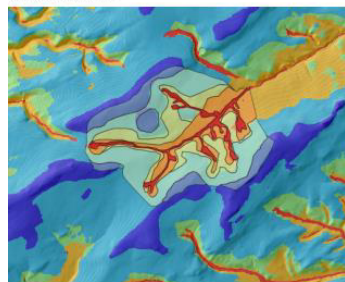
Regression

Warten bis die Prognose fertig ist und die Ergebnisse direkt laden.

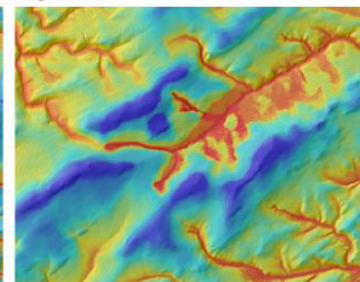
**Start**

Auswahl der Methode

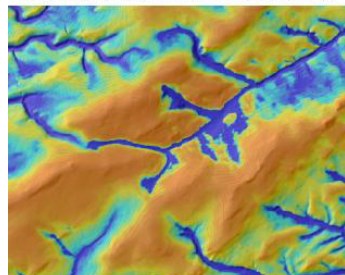
Classification



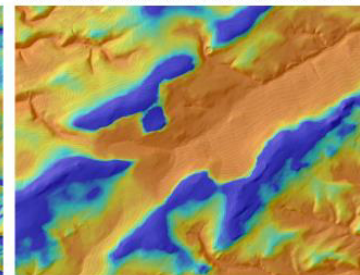
Regression



Probability of class A (red mapping unit)



Probability of class E (blue mapping unit)



\* blue values indicate a high probability, red values a low probability

Mögliche Ergebnisse der Prognose