

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 164 (2013)

Heft: 1

Artikel: Flächenhafte Modellierung von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz

Autor: Mosimann, Thomas / Herbst, Philipp

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097599>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Flächenhafte Modellierung von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz

Thomas Mosimann
Philipp Herbst

Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Leibniz Universität Hannover (DE)*
Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Leibniz Universität Hannover (DE)

Spatial modeling of forest soil properties in Northwestern Switzerland

Forest soils are an important natural resource. However, up to now almost no area-wide forest soil information was available for Switzerland. Since 2006, model-based, high-resolution maps of forest soil properties in the cantons Basel-Landschaft and Basel-Stadt were generated, depicting soil depth, stone content, soil wetness, acidity and water storage capacity. These maps are based on all available point information on soils, and on 95 recently analyzed pedological forest soil profiles. Two different methods were applied in parallel: 1) the development of decision trees based on frequency statistics combined with expertise and 2) the semi-automated Random Forest modeling approach. Highly branched hierarchical decision trees were used to derive soil properties from 24 predictors (relief forms, parent material, vegetation, forest type, location, climate, etc.). This article describes the approaches and portrays the mapped results of soil depth, top soil acidity and water storage capacity. Our project shows that it is basically feasible to predict soil properties with a high spatial resolution, classifying them into 4–5 categories. However, depending on soil type, for 10–30% of the area no predictions are possible, especially because of high soil heterogeneity, inadequate morphographic slope differentiation in the terrain models and the implausibility of predictor information. Soil property maps provide basic information for set up forestry maps for forest development, forest management and risk assessment.

Keywords: forest soils, digital soil mapping, knowledge-based modeling, forest soil properties









doi: 10.3188/szf.2013.0010

* Schneiderberg 50, DE-30167 Hannover, E-Mail mosimann@phygeo.uni-hannover.de

Die Waldböden gehören zu den wichtigsten natürlichen Ressourcen. Sie sind die Grundlage für das Wachsen eines stabilen, ertragreichen und naturnahen Waldes. Wald und Boden bilden dabei eine Einheit. In dieser Einheit erfüllen die Böden auch wichtige ökologische Funktionen wie Filterung des Sickerwassers, Transformation von aus der Atmosphäre eingetragenen Schadstoffen, Grund- und Quellwasserschutz sowie Abflussregulation (Hochwasserschutz). Die Waldböden in der Nordwestschweiz zeigen eine grosse Vielfalt (Tabelle 1). Zusammen mit dem differenzierten Relief und der klimatischen Variabilität von der oberrheinischen Tiefebene bis auf die Jurakämme ermöglicht diese grosse standörtliche Diversität die Entwicklung vielfältiger Wälder. Die Vielfalt der Böden ergibt sich aus dem Vorkommen fast aller Gesteinstypen – es fehlen nur kristalline Gesteine und Schiefer – und den verschiedenartigen Deckschichten aus dem Quartär (Grundmoränen aus dem Riss, unterschiedlich alte Schotter, Löss, periglaziäre Deckschutte und -lehme). Diese Bodenvielfalt lässt sich

mit dem Spektrum der Werte einiger wichtiger Bodeneigenschaften illustrieren: pflanzennutzbare Gründigkeit: 15–180 cm, Skelettgehalt: 0–80%, Wasserspeichervermögen: 20–400 mm, Durchlässigkeit: sehr hoch bis sehr gering, Versauerung im Oberboden: pH 3.6–8.0, Basensättigung: 5–100% (Mosimann 2011).

210 km², d.h. rund 40% der Fläche des Kantons Basel-Landschaft, sind bewaldet. Im Unterschied zur Landwirtschaftsfläche, deren Böden in den 1990er-Jahren im Massstab 1:5000 kartiert wurden, lagen für den Wald bisher nur wenige, weit verstreute Bodeninformationen vor. Das Inventar der Waldböden der Schweiz erfasst in der ganzen Nordwestschweiz vier Standorte (Walther et al 2004). Deshalb wurden mit dem Projekt «Modellierung von Waldbodeneigenschaften im Kanton Basel-Landschaft» seit 2004 flächenhafte Informationen über die Waldböden erarbeitet und dabei eine Fülle von methodischen Erfahrungen gesammelt. Es entstanden digitale Karten ausgewählter Waldbodeneigenschaften in den beiden Halbkantonen Basel-Land-

Gestein	Kalk, Kalkmergel	Tonmergel, Mergelton	Nagelfluh, Schluffmergel (Tertiär)	Buntsandstein	Schotter (Kalk- und Kalk-Silikat-Schotter)	Hangschutt, Hanglehm	Löss, Lösslehm	Grundmoräne (Decklehm)
Bodenprofil-beispiel								
Häufige Bodentypen	Rendzina, verbraunte Rendzina	Braunerde-Pelosol, Pseudogley-Kalkbraunerde	Pararendzina, verbraunte Pararendzina	Saure Braunerde	Saure Braunerde, Pararendzina	Braunerde-Rendzina, Kalkbraunerde	Parabraunerde, Pseudogley-Parabraunerde, Pseudogley	Braunerde, Parabraunerde, Pseudogley-Parabraunerde

Tab 1 Vielfalt der Böden in der Nordwestschweiz. Acht Bodenbeispiele verschiedener Gesteine und Deckschichten.

schaft und Basel-Stadt. Diese bilden in Zukunft eine Grundlage für die Steuerung der Waldentwicklung, für eine schonende Waldbewirtschaftung, für die Erhaltung der Waldleistungen sowie für die Abschätzung von Risiken wie Trockenstress, Waldbrand und Befahrung.

Methodisches Vorgehen

Konzept

Für die Regionalisierung von Bodeninformationen werden mit verschiedenen geostatistischen und faktorenbasierten Methoden (Grunwald 2009) Punktdaten der Böden mit flächig vorliegenden Informationen zu den bodenbildenden Faktoren wie zum Beispiel Relief, Gestein und Vegetation verknüpft, um so auf Bodeneigenschaften in nicht kartierten Gebieten zu schliessen (Eberhardt 2011). Für den Einsatz geostatistischer Verfahren reichen die verfügbaren Stichprobendaten in Form von standörtlichen Bodenerhebungen häufig nicht aus. Deshalb kommen faktorenbasierte Verfahren zum Zuge, die auch kombiniert angewendet werden. Hierzu zählen nach Behrens & Scholten (2006) Regressionsstatistik, Entscheidungsbäume und fuzzy-theoretische Näherungsverfahren. Je nach vorhandenem Expertenwissen und methodischem Ansatz sind auch wissensbasierte Regeln in die Modelle integrierbar (Skidmore et al 1996, Walter et al 2007).

Eine Untersuchung zur Leistungsfähigkeit regressionsstatistischer Verfahren für die Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften führte Zirlewagen (2003) im Südschwarzwald durch. Häring et al (2009) testeten die Güte der Prognose von Bodenkarten mit Random-Forest-Modellen (Breiman 2001) in unterschiedlichen naturräumlichen Regionen Bayerns. In der Schweiz wurden bisher neben verschiedenen geostatistischen Anwendungen (Keller et al

2011) vor allem faktorenbasierte Regionalisierungen (Egli et al 2004, 2005), unter anderem mit Entscheidungsbäumen, durchgeführt (Classification and Regression Trees [CART]; Breiman et al 1984). Die Prognosemöglichkeiten und die Qualität der Modellierungen hängen von den verfügbaren Eingangsdaten, der Vielfalt der Prädiktoren und vom Landschaftstyp ab. Für geostatistische und faktorenbasierte automatische Modellierungen von Bodeneigenschaften grösserer Gebiete sind nach aktuellem methodischem Kenntnisstand Punktdatendichten von mindestens 0.5 bis 2 Punktinformationen pro Quadratkilometer erforderlich. Solche Dichten werden in der Schweiz nur in wenigen Gebieten erreicht. Ein ausschliesslich geostatistischer oder ein automatischer Ansatz scheidet für eine flächendeckende Modellierung im naturräumlich sehr kleinräumig differenzierten Jura deshalb prinzipiell aus. Um für grosse Flächen bodenkundliche Grundlagen für die waldbauliche Planung verfügbar zu machen, muss die Analyse der Zusammenhänge zwischen den Bodeneigenschaften und den bodenbildenden Faktoren um regionales bodenkundliches Erfahrungswissen ergänzt werden (Walter et al 2007). Für die Überprüfung der Eignung faktorenbasierter Regionalisierungsverfahren und ihrer Grenzen bei räumlich hochauflösenden Bodenvorhersagen wurde im Untersuchungsraum ein Vergleich teilautomatischer Random-Forest-Prognosen von Gründigkeit, Skelettgehalt und Wasserspeicherfähigkeit mit wissensbasierter Modellierung durchgeführt (Herbst & Mosimann 2010, Herbst, submitted¹). Die Ergebnisse zeigen, dass das Random-Forest-Klassifizierungs- und -Regressionsmodell die Verbreitung einzelner

¹ HERBST P (SUBMITTED) Räumlich hoch aufgelöste Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden in der Nordwestschweiz. Faktorenbasierte Prognose mit einem Vergleich von wissensbasierter und teilautomatisierter Abschätzung. Hannover: Univ Hannover, Dissertation. 172 p.

Bodeneigenschaften im Prinzip den naturräumlichen Gegebenheiten entsprechend abzubilden vermag. Random Forest prognostiziert jedoch viele nicht erklärbare Kleinstrukturen, bildet viele Grenzen nicht richtig ab und liefert auch eine Prognose für Flächen, für die wegen zu kleiner Stichproben oder zu hoher räumlicher Variabilität gar keine Aussage möglich ist (Herbst & Mosimann 2010). Deshalb wurde entschieden, die Karten der Waldbodeneigenschaften beider Basel nebst parallel laufenden Random-Forest-Prognosen mit einem kombinierten Verfahren zu entwickeln, das empirisch-statistische Analysen mit Expertenwissen verbindet. Die wissenschaftsbasierte Modellierung orientierte sich dabei an folgenden Prämissen:

- umfangreiche zusätzliche bodenkundliche Standortaufnahmen zur Verdichtung der bereits vorhandenen Stichprobe (95 Bodenprofile in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt). Zusammen mit den bestehenden Daten wurden damit die in Tabelle 2 zusammengestellten Stichprobenumfänge für die einzelnen Bodeneigenschaften erreicht. Dies entspricht Stichprobendichten von 0.6 bis 1.6 Punkten pro Quadratkilometer Wald;

Modellierte Bodeneigenschaft	Grösse der Punktstichprobe
Gründigkeit	319
Skelettgehalt	319
Vernässung	319
Azidität im Oberboden	341
Azidität im Unterboden	318
Wasserspeicherfähigkeit	129

Tab 2 Stichprobenumfang (Anzahl der Bodenprofile) für die Entwicklung der entscheidungsbasierten Modelle.

- Vorhersage von Bodeneigenschaften und nicht von Bodentypen. Für die Ableitung praxisorientierter Aussagen werden Bodenbasisdaten benötigt, wozu Bodentypen zu wenig aussagekräftig sind;
- für Anwender durchschaubare Modellstruktur. Die Kombination der Prädiktoren, die zur Einstufung der Bodeneigenschaft führt, muss für jeden Einzelfall aus den Entscheidungsbäumen nachvollziehbar sein;
- Prognose einer primären und – wenn möglich und vorhanden – einer sekundären Ausprägung der Bodeneigenschaften als Lösungsansatz für das Problem der kleinräumigen Variation der Böden. Die Aussagesicherheit wird anhand der Häufigkeitsverteilung der Ausprägung der Bodeneigenschaften für eine bestimmte Prädiktorenkombination eingestuft;
- Areale ohne Aussage. Die Karten zeigen die Bereiche an, für die wegen zu kleiner Stichprobe, fehlender Informationen über Prädiktoren oder zu hoher räumlicher Variation der Bodeneigenschaft vorläufig keine Aussage möglich ist.

Umfangreicher Prädiktorensatz

Die Bodeneigenschaften werden auf der Basis von insgesamt 24 Prädiktoren aus den Bereichen Relief, Gestein, Vegetation, Waldtyp, Position des Standorts und Klima vorhergesagt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verwendeten Prädiktoren und ihre hierarchische Anordnung in den Modellen. Die Matrix zeigt auch, welche Prädiktoren für die verschiedenen Eigenschaften von Bedeutung sind. Die Untersuchungen in der Nordwestschweiz haben für die Reliefeinheiten und -formtypen, den Waldtyp «Schuttwald», das Gestein, die pflanzenökologische Feuchtestufe, den Abstand (Fließweglänge) von Kanten und Fels und die Hangneigung allgemeine Bedeutung ergeben. Die übrigen Prädiktoren sind nur für einen Teil der Eigenschaften relevant. Grundsätzlich lassen sich zwei Typen von Prädiktoren unterscheiden:

1. Faktoren der Bodenbildung (Relief, Gestein, Lage des Bodens, Klima und Waldtyp «Fichtenwald/Tannenwald»).
2. Indikatoren mit Zeigerwert für Bodeneigenschaften (pflanzensoziologische Waldgesellschaften und der Waldtyp «Schuttwald»).

Die Vorhersagemodelle kombinieren Prädiktoren beider Typen. Die folgenden Erläuterungen sowie die Tabelle 3 fassen wichtige Informationen zu ausgewählten Prädiktoren zusammen.

Reliefeinheiten und Reliefformtypen

Die Grundlage der Reliefgliederung bildet ein rasterbasiertes digitales Höhenmodell mit einer Auflösung von 2 m (DTM-AV Grid, Swisstopo). Dieses hochauflösende Höhenmodell ermöglicht eine detaillierte, grossmassstäbige Abbildung kontinuierlicher Eigenschaften und diskreter Strukturen der Erdoberfläche. Ziel der Analysen ist die Modellierung geomorphometrischer und geomorphografischer Reliefeigenschaften des Meso- und Mikroreliefs mit unterschiedlichen Prozessbedingungen für die Bodenentwicklung. Die Reliefanalyse muss sich dabei am landschaftstypischen Formeninventar orientieren. Hierfür erfolgt die Kombination und Klassifikation der kontinuierlich variierenden geomorphometrischen Merkmalsausprägungen und hydrologischer Kennwerte des Reliefs zu sieben diskreten geomorphografischen Reliefeinheiten (Tabelle 3) und deren detailliertere Oberflächendifferenzierung in zwölf Reliefformtypen (Tabelle 3). Eine detaillierte Darstellung der Modellierung der Reliefeinheiten und -formtypen liefern Herbst et al (2012).

Gesteinstypen

Die Modellierung basiert auf 13 Gesteinstypen (Tabelle 3; Mosimann et al 2011). Diese wurden auf der Basis neu entwickelter Schlüssel aus den geologischen Karten abgeleitet.

Prädiktorebene	Bodeneigenschaft				
	Gründigkeit	Skelettgehalt	Vernässung	Azidität	Wasserspeicherfähigkeit
Reliefeinheiten Skalierung: nominal Kantenbereiche, Scheitel, Plateaus, Steilhänge, Hänge, Tiefenbereiche, Felsbänder	•	•	•	•	•
Reliefformtypen Skalierung: nominal Flache Scheitelbereiche auf Vollformen, Hangrücken und steile Scheitelbereiche, ebene Plateaubereiche, geneigte Plateaubereiche, Scheitelbereiche auf Plateaus, Mulden auf Plateaus, konvex geformte Hangbereiche, Flachhänge, Normalhänge, steile Tiefenlinien und konkav geformte Hangbereiche, Talböden, Muldentäler	•	•	•	•	•
Waldtyp Schuttwald Skalierung: nominal	•	•	•	•	•
Gestein Skalierung: nominal 13 Gesteinstypen (Löss, Decklehm, Schotter, alluviale Lehme und Sande, tertiäre Mergel, Juranagelfluh, Kalk, Kalkmergel, Tonmergel allgemein, Tonmergel bis Tone des Keuper, Buntsandstein, Gehängeschutt allgemein und lehmreicher Gehängeschutt)	•	•	•	•	•
Pflanzenökologische Feuchtestufe Skalierung: ordinal 5 Feuchtestufen nach Ökogramm	•	•	•	•	•
Pflanzenökologische Reaktionsstufe Skalierung: ordinal 5 Reaktionsstufen nach Ökogramm		•		•	•
Positionsparameter I Skalierung: kardinal Horizontalabstand von Kante/Fels	•	•	•	•	•
Positionsparameter II Skalierung: kardinal Vertikalabstand von Tiefenlinie	•	•			•
Hangneigung Skalierung: kardinal Grenzwerte in Grad	•	•	•	•	•
Klimaparameter Skalierung: kardinal Höhe über Meer				•	
Waldtyp Fichtenwald/Tannenwald Skalierung: ordinal Fichtenanteil				•	

Tab 3 Übersicht zu den Prädiktoren für die flächenhafte Modellierung von Waldbodeneigenschaften. Die Reihenfolge entspricht der hierarchischen Stellung in den wissenschaftlichen Modellen. Total 24 Prädiktoren: 3 Reliefeinheiten (die nicht weiter räumlich differenziert werden), 12 Reliefformtypen sowie Gestein, pflanzenökologische Feuchtestufe, pflanzenökologische Reaktionsstufe, 2 Positionsparameter, Hangneigung, ein Klimaparameter sowie 2 spezielle Waldtypen.

Pflanzenökologische Feuchte- und Reaktionsstufen
Die Prädiktorinformationen der Feuchte- und Reaktionsstufen entstanden aus den im Massstab 1:5000 kartierten pflanzensoziologischen Waldgesellschaften auf der Basis der Ökogramme in Burand & Hasspacher (1999). Es werden je fünf Stufen unterschieden.

Waldtyp «Schuttwald»
Im Rahmen der Erstellung der Gefahrenhinweis- und Gefahrenkarten beider Basel wurden von

den Revierförstern die Schuttwaldflächen aufgrund von Beobachtungen räumlich abgegrenzt. Schuttwälder sind Flächen mit aktiver Verlagerung von Steinen an der Oberfläche. Sie erweisen sich als sehr guter Prädiktor. Es bestehen enge Zusammenhänge zur Ausprägung aller modellierten Bodeneigenschaften.

Positionsparameter und Hangneigung
Auf der Basis häufigkeitsstatistischer Untersuchungen wurden Schwellenwerte für Horizontal- und Vertikalabstände der Standorte von Kanten und

Tiefenlinien, Fließweglängen und Grenzwerte für die Gliederung von Hängen in Steil-, Normal- und Flachhänge ermittelt (Details siehe Herbst et al 2012). Diese Schwellenwerte trennen Geländebereiche mit unterschiedlicher Häufigkeitsverteilung der Merkmalsausprägungen der Bodeneigenschaften.

Waldtyp «Fichtenwald/Tannenwald»

Nadelholzbestände führen wegen der Säureproduktion der schwerer abbaubaren Streu zu einer zusätzlichen Bodenversauerung (Manderscheid & Matzner 1995, Veerhoff et al 1996). Dieser Effekt wurde im Rahmen des Projektes an 40 Standorten des Kantons Basel-Landschaft vergleichend untersucht (Schutt 2009). Daraus entstand ein Modellbaustein, der die Abzüge von den für Laubwaldbestände modellierten pH-Stufen festlegt. Die zusätzliche Versauerung unter Fichtenbeständen ist in Oberböden karbonathaltiger Gesteine am stärksten (pH-Werte im Mittel bis 1.0 Einheiten niedriger) und auf natürlich stark versauerten Böden auf Löss- und Decklehmen sowie Rheinschottern am schwächsten (pH-Werte im Mittel nur 0.1–0.2 Einheiten niedriger). Im Unterboden (50 cm) schwächt sich der versauernde Effekt auf maximal 0.5 pH-Einheiten ab. Eine signifikante zusätzliche Versauerung besteht nur in Beständen mit sehr hohem Fichtenanteil (Kriterium im Modell: Fichtenanteil $\geq 90\%$). In Tannenbestän-

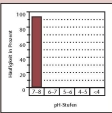
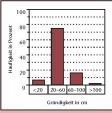
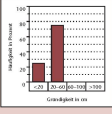
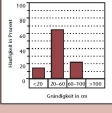
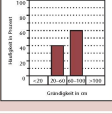
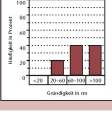
den ist der Versauerungseffekt geringer, und die Datenbasis reicht hier für eine Anpassung der entsprechenden pH-Stufen nicht aus.

Die wissensbasierten Modelle

Der theoretische Hintergrund für die Entwicklung der entscheidungs-basierten Modelle ist das Prinzip der unscharfen Mengen (Zadeh 1965). Auf jedem Bodenareal nimmt eine Bodeneigenschaft einen bestimmten Wertebereich ein. Mit der Annahme einer unscharfen Menge trägt die Modellierung den Unsicherheiten Rechnung, die aus der Ungenauigkeit der Datenbasis (Zhang & Goodchild 2002) und aus der kleinräumigen Variabilität der Bodeneigenschaften resultieren. Bei genügend grossem Stichprobenumfang entspricht die häufigste Merkmalsausprägung einer Bodeneigenschaft ihrer wahrscheinlichsten Ausprägung. Die übrigen Häufigkeiten repräsentieren ebenfalls vorkommende Varianten. Dies entspricht im Grunde einem fuzzy-theoretischen Ansatz (McBratney & Odeh 1997). Aufgrund der Kombination vielfältiger Prädiktoren sind die Stichproben in der Regel nur bei den weiter verbreiteten Standorttypen genügend gross. Deshalb muss der häufigkeits-statistische Ansatz mit Expertenwissen kombiniert werden. Dieses entscheidet bei Stichproben kleiner $n = 10$ über die Akzeptanz der Häufigkeitsaussage und die Ungültigkeit von Ausreißern. Die Wahl dieses Vorgehens verlangt von den Modellentwicklern eine sehr gute bodenkundliche Feldkenntnis der modellierten Region.

Grundlage für die Kalibrierung der Entscheidungsbäume ist also eine sehr grosse Zahl häufigkeitsstatistischer Analysen. Dabei werden aussagekräftige Prädiktoren ermittelt und schrittweise kombiniert. Eine statistisch begründete Aussage ist möglich, wenn das Häufigkeitsmaximum der Klasse einer Bodeneigenschaft die 50%-Grenze überschreitet. Aus der Häufigkeit benachbarter Klassen kann bei einseitiger Verteilung eine sekundäre Ausprägung abgeleitet werden (Tabelle 4). Der gesamte Auswertevorgang erfolgt in diesem Fall manuell. Dies ist zeitaufwendig, bringt aber entscheidende Vorteile:

1. Die ganze Modellstruktur ist komplett durchschaubar und unter Kontrolle.
2. Der Einfluss der Prädiktoren und ihrer Kombinationen auf die Verteilungsfunktionen der Bodeneigenschaften kann einzeln verfolgt und nachvollzogen werden.
3. Unplausible Stichprobenverteilungen werden erkannt. Bei genügendem Erfahrungswissen kann die statistische Aussage durch die Expertenaussage ersetzt werden.
4. Die Auswertung legt offen, für welche Standortkombinationen keine Aussage zur jeweiligen Bodeneigenschaft gemacht werden kann.
5. Im Unterschied zu automatisierten Verfahren lernt der Mensch und nicht die Maschine.

Beispiele von Häufigkeitsverteilungen	Häufigkeitsmaximum (%)	Aussagesicherheit der primären Ausprägung	Aussage zur sekundären Ausprägung
	>90	sehr hoch	keine
	70–90	hoch	keine
	70–90	hoch	möglich
	50–70	eingeschränkt	keine
	50–70	eingeschränkt	möglich
	<50	keine Aussage möglich	keine

Tab 4 Ableitung der primären und sekundären Ausprägung und der Aussagesicherheit der Prognose aus den Verteilungsfunktionen der Bodeneigenschaften.

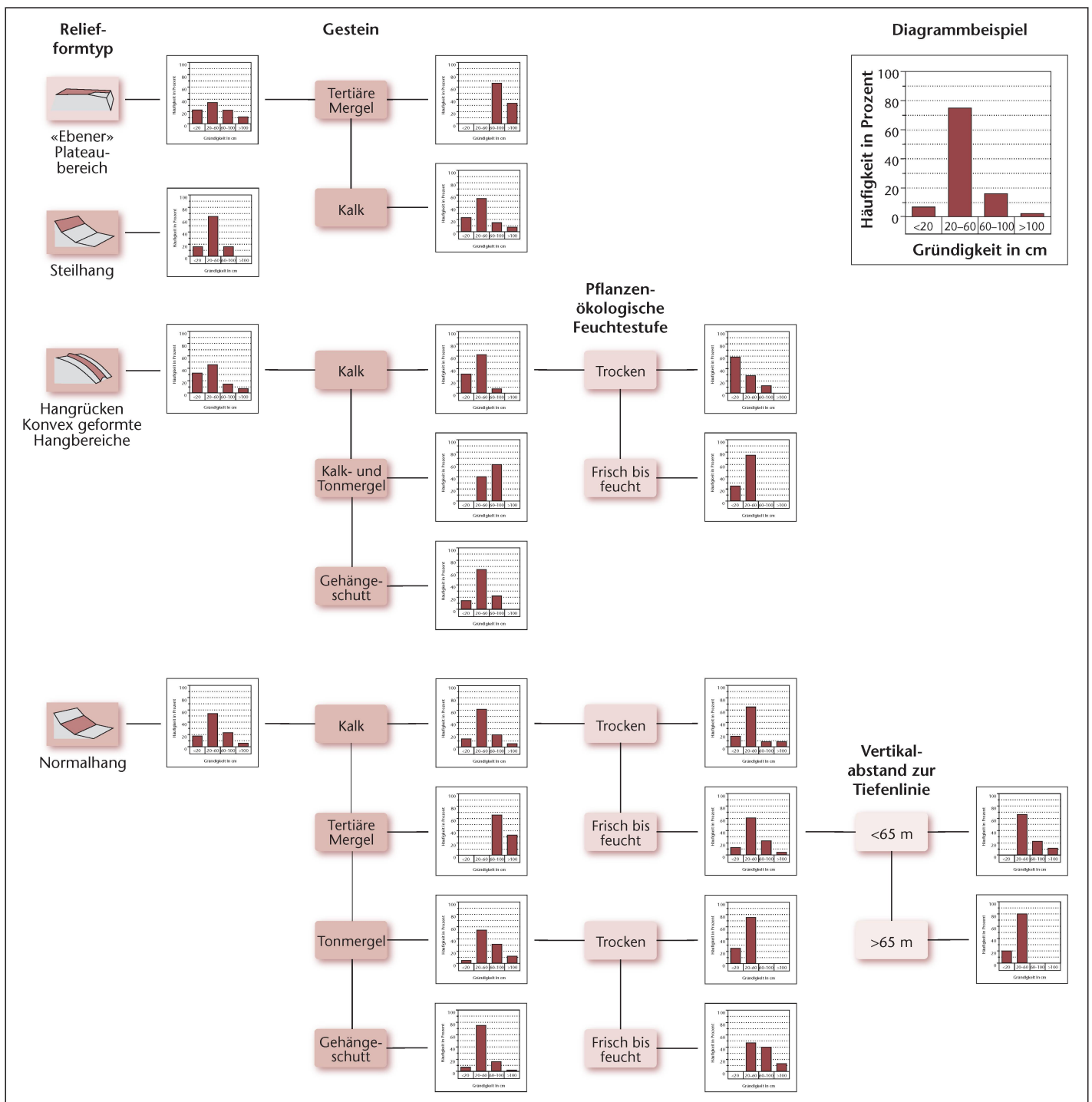


Abb 1 Prinzipieller Aufbau der Prognosemodelle dargestellt an einem vereinfachten Ausschnitt aus dem Modell Gründigkeit. An den Endpunkten der Prädiktorkombinationen stehen Verteilungsfunktionen der Ausprägung der Bodeneigenschaften.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der nach diesem Ansatz entstandenen Prognosemodelle. Es handelt sich um einen vereinfachten Ausschnitt aus dem Modell «Gründigkeit» für die Bodenregion Jura. Von der Struktur her sind die Modelle weit verästelte hierarchische Entscheidungsbäume (Berk 2008a). Die Prädiktoren ordnen sich in der Abfragehierarchie nach ihrer generellen Bedeutung für die Ausprägung der Bodeneigenschaften (Abbildung 1). An den Endpunkten der Entscheidungsbäume stehen Häufigkeitsverteilungen der Ausprägung der Bodeneigenschaften, aus denen sich die Modellaussage er-

gibt. Aus den Häufigkeitsverteilungen wurde die primäre Ausprägung und – wenn möglich – eine sekundäre Ausprägung und die Sicherheit der Aussage abgeschätzt. Die Sicherheit der Aussage ergibt sich aus der Höhe des Häufigkeitsmaximums oder der Stärke der Abhängigkeit der Eigenschaft von einem dominierenden Prädiktor. Tabelle 4 illustriert dies an Beispielen der Verteilungsfunktionen. Die Modelle müssen für jede einzelne Bodenregion individuell kalibriert werden. In den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt sind dies die Regionen Lösshügelland, Jura und Talböden.

Modellierung mit Random Forest

Parallel zur wissensbasierten Modellierung erfolgte die teilautomatisierte Prognose ausgewählter Bodeneigenschaften mit Random Forest (RF; Breiman 2001). RF ist ein Klassifizierungs- und Regressionsmodell in Form eines Ensembles einzelner, binärer und voneinander unabhängiger Entscheidungsbäume. Jeder Entscheidungsbaum des Ensembles wird mit dem CART-Algorithmus (Breiman et al 1984) aus einer zufällig gezogenen Teilstichprobe der Bodenprofildaten entwickelt. Die Teilstichproben sind voneinander unabhängig und umfassen immer zwei Drittel des gesamten Datenkollektivs. Das übrige Drittel (out of bag) der Bodenprofildaten dient zur unabhängigen Validierung und Fehlereinschätzung der Entscheidungsbäume. Als Prognose gibt RF die Merkmalsausprägungen der Bodeneigenschaften aus, die für die verschiedenen Prädiktorenkombinationen von den Entscheidungsbäumen am häufigsten ausgewiesen werden. Die Prognosen der einzelnen Bäume des Ensembles werden über Mehrheitsentscheidungen vereinigt. Die Instabilität der Prognose kann dadurch reduziert werden. Nach Berk (2008b) ist die Verlässlichkeit und Stabilität der Vorhersage eines RF damit höher als die eines einzelnen CART. Für detaillierte methodische Erläuterungen sei auf Breiman (2001) und Berk (2008b) verwiesen.

Die GIS-technische Umsetzung der Modelle erfolgte über die Kopplung von ArcGIS 9.3 und MS Access 2007 auf der Grundlage von Personal Geodatabases (PGDB). Hierfür wurden die Klassifizierungsregeln der wissensbasierten Modelle in SQL-Kommandozeilen übersetzt und unter ArcGIS skriptbasiert auf die Eingangsdaten in den PDGB angewendet. Nach dem Import in das Softwarepaket R (R Development Core Team 2011) erfolgt auf Basis der identischen Eingangsdaten die teilautomatisierte Prognose mit RF (Version 4.6-6).

Karten ökologisch wichtiger Waldbodeneigenschaften

Erläuterungen zu den Karten

Die Karten der Waldbodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt, Vernässung, Azidität im Oberboden und Azidität im Unterboden sind im geografischen Informationssystem des Kantons Basel-Landschaft integriert.² Abbildung 2 zeigt die Bildschirmdarstellung am Beispiel der Gründigkeit. Nach Auswahl der Bodeneigenschaft muss bis in den Massstab <1:20000 gezoomt werden, um die Detailinformationen abzurufen. Die Karten liefern zu den einzelnen Arealen folgende Informationen: primäre Ausprägung der Bodeneigenschaft (Klasse oder Stufe), sekundäre Ausprägung (wenn möglich), Ausagesicherheit verbal klassifiziert (Tabelle 4). Falls für ein Areal keine Aussage möglich ist, nennt das Informationsfenster auch den Grund dafür (z.B. Heterogenität zu gross, Prädiktor unplausibel oder Stichprobe zu klein).

Die Karten der wissensbasierten und teilautomatisierten Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit können auf der Website des Instituts für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Leibniz Universität Hannover³ betrachtet werden. Hier sind die weiterführenden Informationen technisch noch nicht eingebunden.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen Ausschnitte aus den Karten «Versauerung im Oberboden» und «Nutzbare Feldkapazität» mit der differenzierten Legende. Entsprechend dem Kartenkonzept ist die Legende «fliessend» aufgebaut. Beidseits der Hauptklassen gibt es Übergangsklassen, in denen das Bodenmerkmal entsprechend der sekundären Ausprägung nach oben oder nach unten tendiert. Im Falle der Versauerung wird zudem je nach der Streuung der Werte unter den Bedingungen der einzelnen Prädiktorenkombinationen eine Prognose in ganzen oder halben pH-Stufen vorgenommen. Die Farbdichte zeigt die Verlässlichkeit der Aussage an. Der komplexe Legendenaufbau führt allerdings zu nah beieinanderliegenden Farbabstufungen, sodass im Kartenbild vor allem die Hauptklassen klar in Erscheinung treten. Das Scroll-up-Fenster liefert in jedem Fall die eindeutigen Einzelinformationen.

Der grösste sinnvolle Massstab der Karten liegt bei circa 1:4000 bis 1:5000. Die kleinsten dargestellten Areale sind rund 0.1 ha gross. Unterhalb dieses Massstabsbereiches würden die Karten eine Genauigkeit vortäuschen, die es nicht gibt.

Der Kartenausschnitt aus dem Tafeljura zur Versauerung im Oberboden (Abbildung 3) zeigt für die pH-Hauptstufen eine klare Tendenz in der räum-

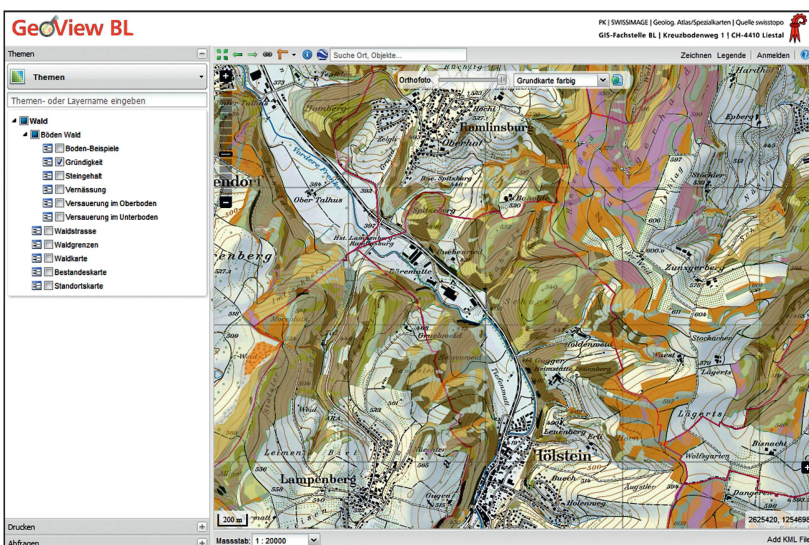


Abb 2 Screenshot eines Ausschnittes aus der Karte Gründigkeit (Waldenburgertal). Die Informationen zu den einzelnen Arealen werden in einem Scroll-up-Fenster abgerufen.

© Kantonale Verwaltung Basel-Landschaft

2 www.geo.bl.ch > geoViewBL > Themenbereich Wald > Böden Wald (20.11.2012)

3 www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html (20.11.2012)

Abb 3 Karte der Versauerung im Oberboden (Ausschnitt aus dem Tafeljura südlich Gelterkinden). © Topografische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25 000 (Swisstopo)

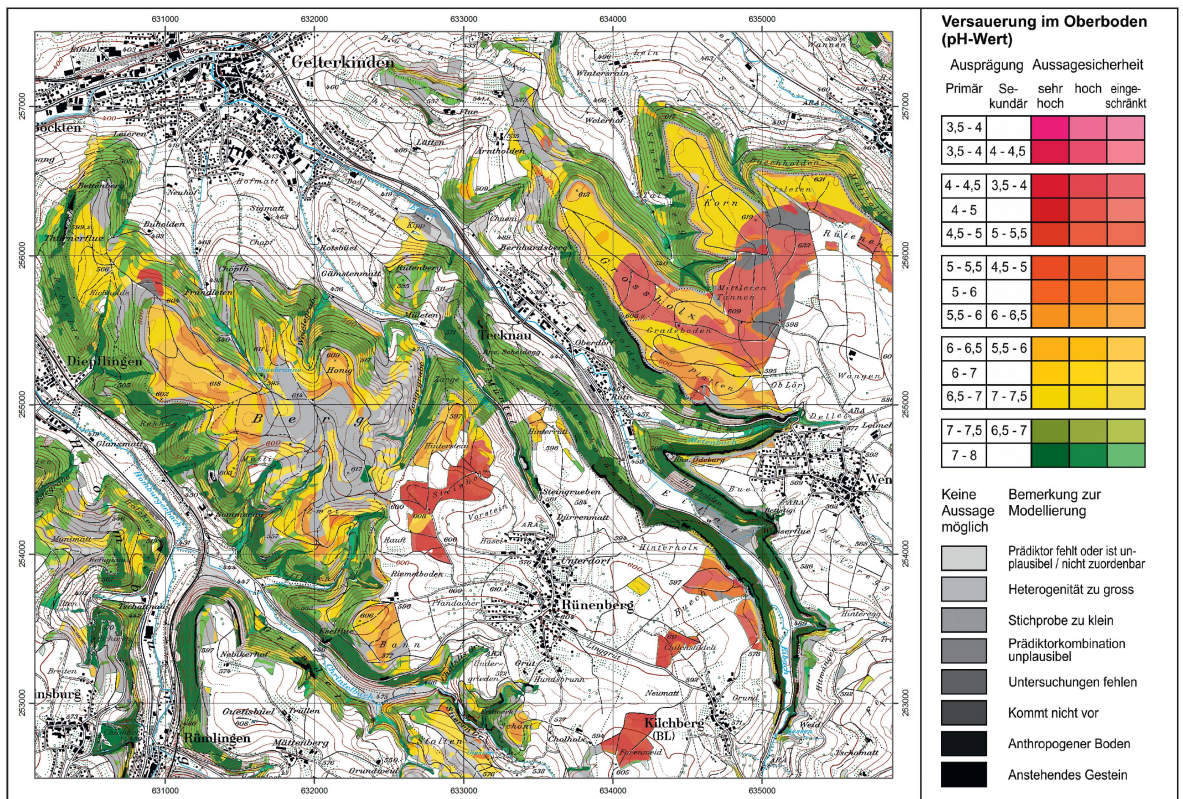
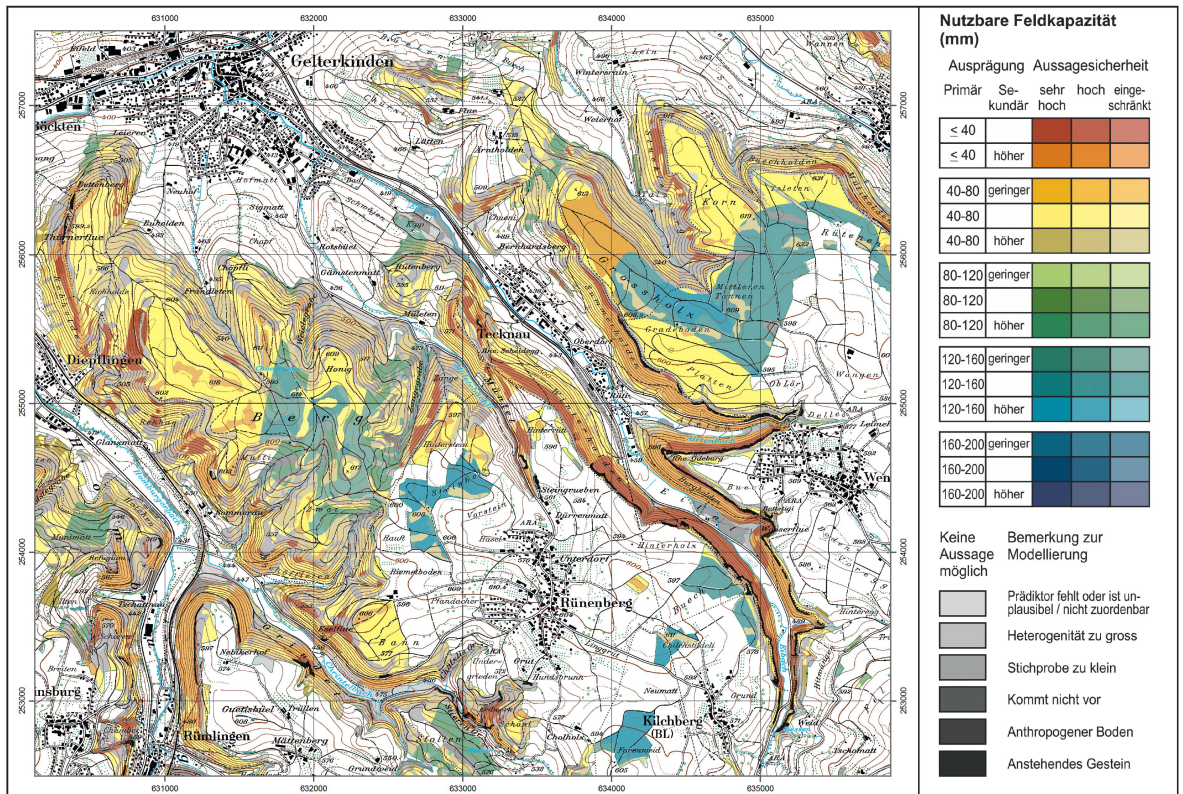


Abb 4 Karte der nutzbaren Feldkapazität bis 100 cm Tiefe (Ausschnitt aus dem Tafeljura südlich Gelterkinden). © Topografische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25 000 (Swisstopo)



lichen Verteilung. Die rötlichen Areale mit potenziellen pH-Werten zwischen 4 und 5 hängen grösstenteils mit der Verbreitung von Decklehmen auf den Tafeljurahochflächen zusammen. Diese Decklehme glazialer und periglazialer Entstehung liegen mit 0.5 bis 2 m Mächtigkeit über den mesozoischen und tertiären Kalken, Mergeln und Tonmergeln. Sie sind wegen des hohen Alters stark bis sehr stark versauert (pH-Werte bis 3.8). Die übrige Differenzierung

zeigt für die Wälder auf den Randhängen der Plateaus überwiegend basische Oberböden. Hier herrschen Gehängeschutte und Gehängelehme vor, die meist Kalksteinbruchstücke bis in die humushaltigen Bodenhorizonte enthalten. Auf den Plateaus sind dagegen die Oberböden auf den Kalken und auf den Mergeln/Tonmergeln überwiegend leicht bis mässig versauert. Hier wirken keine Abtrags- und oberflächliche Umlagerungsprozesse, sodass auch die Verwit-

terungsrückstände des Kalkes an der Oberfläche langsam versauern können.

Gemäss einer Flächenbilanz der modellierten Azidität stocken rund 6% der Wälder des Baselbiets auf stark versauerten Böden. Auf diesen Flächen liegen die potenziellen pH-Werte im Ober- und Unterboden meist unter 4.5. Diese Böden befinden sich also im Silikatpufferbereich (Blume et al 2002). pH-Werte unter 4 im Oberboden sind mit nur 0.2% aller Flächen selten. Solch tiefe Werte kommen vor allem in sandig-lehmigen Böden mindel- und gänzlichlicher Deckenschotter und auf alten Lösslehmen vor.

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der wissenschaftlichen Modellierung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) für den gleichen Gebietsausschnitt. Insgesamt überwiegen in diesem Gebiet die gelblichen Flächen mit geringer nFK (40–80 mm). Auf den Plateaus sind dies die Areale der anstehenden Kalke und Kalkmergel. Über diesen liegen meist unterschiedlich mächtige Deckschichten und Kalkverwitterungsschichten. Im Gegensatz zu den Fels-Rendzinen weisen solche Standorte durch das zusätzliche Feinbodenvolumen nFK-Werte über 40 mm auf. In den Hanglagen haben die flacheren Normalhänge (<25 Grad) auf Kalk und Kalkmergel und die Gehängeschutte den grössten Anteil an den Flächen mit geringer nFK. Flachere Hangbereiche sind häufiger von Hangschutten und -lehmen überlagert als die steilen Hanglagen. Sehr geringe nFK-Werte unter 40 mm (rötlich) beschränken sich deshalb hauptsächlich auf Hänge mit Neigungen von 25–32 Grad auf Kalk, auf Steilhänge (>32 Grad) und auf Schuttflächen unterhalb von Felsbändern und Hangrücken. Auf den Plateaus werden nFK-Werte <40 mm nur für Waldareale ausgewiesen, in denen Waldgesellschaften mit der Zei-

gereigenschaft für sehr trockene Standorte stocken (z.B. nordöstlich von Diepflingen). Areale mit mittlerer bis hoher nFK hängen auf den Plateaus mit der Verbreitung der Tonmergel (80–120 mm, grünlich) und Decklehme (120–160 mm, bläulich) zusammen. In den Hängen weisen Bereiche mit anstehenden Tonmergeln entsprechende Speicherkapazitäten auf. Waldböden in Decklehmen und Tonmergeln sind häufig skelettarm oder skelettfrei. In der Kombination mit ihrer schluffig bis tonigen (Decklehm) beziehungsweise vorwiegend lehmig-tonigen Zusammensetzung (Tonmergel) des Feinbodens speichern diese Substrate viel Wasser. Auf den Plateaus wirken keine Abtrags- und Umlagerungsprozesse. Der scharfe Wechsel von Böden mit hoher nFK zu den direkt angrenzenden Böden auf Kalk mit geringer nFK ist damit nachvollziehbar und im Gelände gut aufzufinden. Im Gegensatz dazu sind die Grenzen der Festgesteine in den Hängen häufig von Hanglehmen oder -schutten überlagert. In den Hanglagen bildet das Modell deshalb noch zu scharfe Grenzen zwischen den Arealen geringer und hoher Wasserspeicherfähigkeit ab (Herbst, submitted).

Validierung

Eine Validierung der Modellergebnisse wurde bisher für die Azidität und die Gründigkeit durchgeführt. Vernässung, Skelettgehalt und Wasserspeichervermögen können nur mit grossem Aufwand validiert werden, weil diese Merkmale nur im aufgedigerten Bodenprofil genügend genau eingeschätzt werden können. Zudem war das Abtrennen eines Teils der Stichprobe für die spätere Validierung nicht zielführend, weil dadurch der Stichprobenumfang für die Kalibrierung in zu vielen Prädiktorkombinationen zu klein geworden wäre.

Für die Validierung der Azidität wurden 66 Standorte aus vier Teilgebieten der Modellregion Jura zufällig ausgewählt. Die Beprobung erfolgte mit dem Bohrstock in 0–10 cm und 50 cm Tiefe. Es wurden Mischproben aus drei Einstichen erstellt und die pH-Werte in H₂O und CaCl₂ an den feldfrischen Proben im Labor gemessen. Massgebend für die Validierung ist der potenzielle pH-Wert (CaCl₂).

Abbildung 5 präsentiert das Validierungsergebnis für die Azidität im Oberboden. Das Stichprobenkollektiv ist nicht normalverteilt, weil pH-Werte von 5 bis 6 generell weniger häufig vorkommen als die höheren und die niedrigeren Werte. Der pH-Bereich von 5 bis 6 ist schlechter gepuffert, weil die Silikatpufferung kinetisch langsamer verläuft und dieser pH-Bereich demzufolge schneller durchlaufen wird. Für die Stärke des Zusammenhangs zwischen prognostizierten und gemessenen Werten ergibt sich ein R² von 0.69. 69% der gemessenen Werte weichen nicht mehr als eine halbe pH-Stufe vom prognostizierten Wert ab. 82% der Werte liegen innerhalb von ±1 pH-Stufe. Die Steigung der Gerade zeigt an, dass

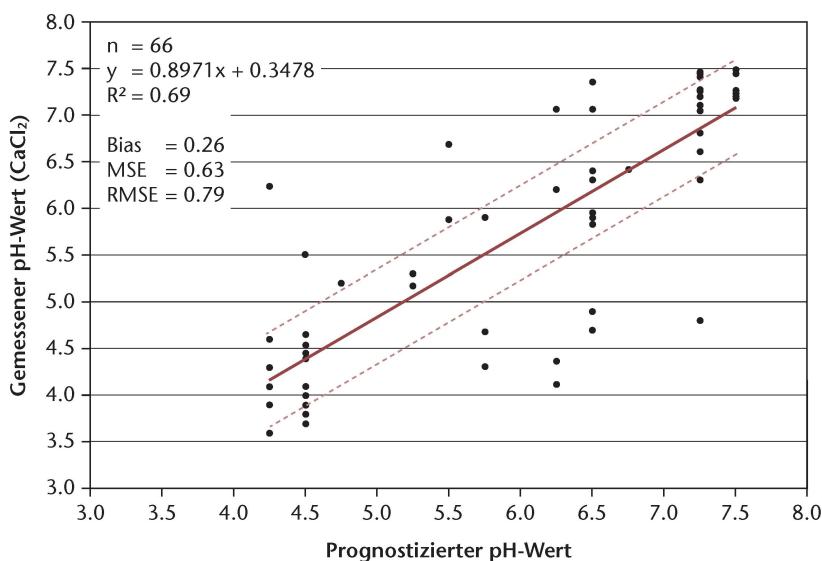


Abb 5 Validierung der Azidität im Oberboden. Zusammenhang zwischen modellierter Aziditätsstufe und gemessenem pH-Wert (pH CaCl₂) an 66 Standorten. Gütemasse zur Beurteilung der Vorhersagen: Bias = Mean Error (systematische Fehler), MSE = Mean Square Error, RMSE = Root Mean Square Error.

die prognostizierten Werte im Durchschnitt etwas höher sind als die gemessenen. Dies liegt vermutlich an der Transferfunktion, mit der die etwa 280 Fälle in der Gesamtstichprobe von 430 Standorten, für die nur Feld-pH-Messungen mit dem Hellige-Indikator zur Verfügung standen, für die Kalibrierung in potenzielle pH-Werte nach CaCl_2 -Standard umgerechnet wurden. Bei pH-Werten um 4 und darunter misst der Hellige-Indikator nicht mehr zuverlässig, sodass es zu einer Verschiebung des Zusammenhangs kommen kann. Weiter fällt auf, dass die Abweichungen im mittleren pH-Bereich stärker sind als im neutralen bis basischen und im stark sauren Bereich. Dies überrascht nicht. Im mittleren Bereich befinden sich die Böden auf Mergeln und Tonmergeln, die eine grössere Variation der Versauerung aufweisen als die Böden auf Kalken einerseits und auf tiefgründig entkalkten Lehmen andererseits.

Im Unterboden hängt die Prognosequalität stark von der pH-Stufe ab. Die Validierungsergebnisse sind zudem wenig gesichert, weil mit dem Edelman-Bohrer wegen der Flachgründigkeit und der hohen Steingehalte nur an 24 der 66 Standorte Proben genommen werden konnten. Bei pH-Werten ≤ 5 sind die Modellergebnisse sehr gut. Alle gemessenen Werte weichen maximal ± 0.5 pH-Stufen vom prognostizierten Wert ab. Im als neutral bis basisch prognostizierten Bereich sind die Abweichungen jedoch stärker. Hier lagen etwa ein Drittel der gemessenen Werte im sauren Bereich (pH 4.7–5.4). Die Ursache sind unvollständig erfasste versauerte Decklehme über Kalk, eines der gewichtigen Probleme bei der Genauigkeit der Prädiktoren (siehe unten).

Für die Validierung der Gründigkeit stehen bisher 31 Standorte an Wegeinschnitten, Böschungen, Mergelgruben und kleinen Steinbrüchen zur Verfügung. An solchen Aufschlüssen lässt sich die Gründigkeit sehr gut abschätzen. Das Validierungsergebnis gilt somit für Böden auf mittleren bis steilen Hängen und auf konvexen Formeinheiten, jedoch nicht für Böden auf Plateaus und auf flachen Hängen. Die Übereinstimmung der gemessenen Werte mit den prognostizierten Gründigkeitsklassen ist für diese Bereiche sehr gut. Fast vier Fünftel der überprüften Standorte entsprechen der prognostizierten primären Gründigkeitsklasse. Abgesehen von zwei Ausnahmen stimmen die übrigen Werte mit der Prognose der sekundären Ausprägung überein. Die relativ grobe Differenzierung der prognostizierten Gründigkeit in vier Klassen (0–20 cm, 20–60 cm, 60–100 cm, >100 cm) ermöglicht als positiven Nebeneffekt eine erfreulich valide Prognose für die genannten Reliefbereiche. Nachteilig wirkt sich die Unschärfe der breiten Klassen auf die Berechnung abgeleiteter Grössen aus, zum Beispiel die Abschätzung der Wasserspeicherung aus Gründigkeit, Skelettgehalt und Bodenart.

Das Projekt belegt die grundsätzliche Machbarkeit einer hochauflösenden Vorhersage der ausgewählten Bodeneigenschaften. Voraussetzungen sind, neben einer Stichprobe von mindestens 1–2 Profilpunkten pro Quadratkilometer, ein umfangreicher Satz an Prädiktoren und viel Erfahrungswissen über die räumliche Anordnung der Bodeneigenschaften in der modellierten Region. Der umfangreiche Prädiktorensatz ermöglicht eine feine Aufgliederung der Entscheidungsbäume. Daraus ergeben sich an den Endpunkten der Abfrageäste zum Teil sehr kleine Stichproben ($n \leq 5$). In diesen Fällen ersetzt das Expertenwissen die statistische Aussage. Je umfangreicher die Eingangsgrössen sind, desto eher muss also statistisches Vorgehen mit rein wissenschaftlichen Einschätzungen kombiniert werden.

Die Bodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt und Wasserspeichervermögen können in vier bis fünf Klassen differenziert werden. Beim vorhergesagten pH-Wert ist teilweise eine feinere Einteilung in halbe pH-Stufen möglich. Bei der schrittweisen statistischen Analyse der Häufigkeitsverteilungen wurden zunächst alle Bodeneigenschaften in sieben Klassen differenziert. Die Werteverteilungen sind jedoch bei der grossen Mehrheit der untersuchten Prädiktorenkombinationen so breit, dass bei sieben Klassen das Häufigkeitsmaximum der Ausprägung einer Bodeneigenschaft die 50%-Grenze nicht überschreitet, somit also für eine solch feine Klasseneinteilung keine Prognose möglich ist. Erst die Reduktion auf vier oder fünf Klassen erbrachte in sehr vielen Fällen prognosefähige Häufigkeitsmaxima über 50%.

Der gewählte häufigkeitsstatistische Ansatz bewältigt das Problem der kleinräumigen Variabilität und der zum Teil breiten Amplitude der Bodeneigenschaften unter sehr ähnlichen Standortbedingungen angemessen. Sowohl die sicheren als auch die unsicheren Aussagen können in den Karten unmittelbar erkannt werden. Bei unsicherer Prognose (Aussagesicherheit der primären Ausprägung: eingeschränkt) liefern die Karten zudem eine Aussage zur sekundären Ausprägung, sofern die Variation der Böden unter den betreffenden Bedingungen dies zulässt. Natürlich ist dies eine Unschärfe, welche der Verwendung der Karten Grenzen setzt. Diese Unschärfe ist jedoch Bestandteil der Natur. Konventionelle Bodenkarten nennen, angekoppelt an das Leitprofil, für die diskret abgegrenzten Areale in der Regel flächenmässig dominante Ausprägungen der einzelnen Eigenschaften oder Werte, die aus mehreren Bohrungen gemittelt wurden. Die Eigenschaften streuen aber auch innerhalb kartierter, also im Gelände empirisch abgegrenzter Einheiten erheblich. Die im Feld aufgenommenen Bodenkarten neu-

erer Generation liefern Informationen zum Streubereich morphologischer Parameter, jedoch keine Informationen zur Streuung quantitativer Grössen.

Das Projekt hat auch an die Grenzen der Modellierbarkeit von Waldbodeneigenschaften geführt. Die wichtigste Begrenzung liegt in den Flächenanteilen, für die keine Vorhersage der Bodeneigenschaften möglich ist. Diese variieren je nach Bodeneigenschaft zwischen rund 10 und 30%. Am besten funktioniert die Vorhersage für die Eigenschaften Gründigkeit, Vernässung und Azidität im Unterboden. Schwieriger sind die Ableitung des Skelettgehaltes und die Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit. Sie gelingen nur für 68% (Skelettgehalt) beziehungsweise 75% (nFK) der Waldfläche.

Die Gründe für fehlende Aussagen verteilen sich sehr unterschiedlich (Details siehe Mosimann et al 2011). Bei Gründigkeit, Vernässung und Versauerung im Unterboden überwiegen die technischen Gründe für fehlende Prognosen (vor allem fehlende oder unplausible Prädiktorinformationen und zu kleine Stichproben). Hier kann alleine durch die Verbesserung der Grunddaten die Prognose weiter optimiert werden. Im Falle des Skelettgehaltes ist die Situation schwieriger. Hier ist die kleinräumliche Variabilität auf über 20% der Fläche so gross, dass die Prognose an der hohen Heterogenität des Merkmals scheitert. Bei der Wasserspeicherfähigkeit trifft dies auf rund 15% der Waldfläche des Baselbiets zu. Hauptursache sind die verbreiteten Deckschichten auf den Jurahängen (Hangschutte und Hanglehme). Wegen des vielfach geschichteten Aufbaus und der unterschiedlichen Beimengung von Steinen variieren die Lehm- und Steinanteile kleinräumig ohne erkennbare Gesetzmässigkeit. Dies gilt jedoch auch für Areale, die in Feldkartierungen abgegrenzt werden.

Auch die Prädiktoren setzen der Genauigkeit der Prognose Grenzen. Bei den pflanzensoziologischen Waldgesellschaften sind erwartungsgemäss die Zeigereigenschaften in den Randbereichen der Ökogramme besser (sehr trocken/trocken und nass bei der Feuchtestufe, basisch und leicht sauer/sauer bei der Reaktionsstufe). In den Stufen «leicht basisch» und «frisch» wurden dagegen zum Teil nahezu keine Zusammenhänge mit dem pH-Wert beziehungsweise dem Grad der Vernässung oder der Wasserspeicherkapazität des Bodens gefunden.

Bei den Gesteinstypen besteht das grösste Problem in der Unschärfe der Information in den geologischen Karten zu den Deckschichten (Grundmoränenreste, Löss, Gehängelehm und -schutt). Je nach Massstab und Kartierer weisen die geologischen Karten die Deckschichten nur bei grösserer Mächtigkeit oder Flächenausdehnung oder nur in ihrer allgemeinen Verbreitungstendenz aus. In Gebieten mit Deckschichten kann das Ausgangsgestein der Bodenbildung also völlig von der Information in der geologischen Karte abweichen. Für eine verlässliche

Bodenprognose muss die Verbreitung von Deckschichten also unter Umständen nachkartiert werden.

Wie in allen Modellen bestehen bei der Ableitung der einzelnen Bodeneigenschaften Grenzen, weil die Informationen zu den beeinflussenden Faktoren nicht oder noch nicht flächendeckend verfügbar sind. Dies betrifft zum Beispiel die geringmächtigen Deckschichten, die petrografische Ausbildung stark variabler stratigrafischer geologischer Einheiten, Quell- und Hangwasseraustritte, Wasseransammlungen in flachen Mulden und die Tiefe von Hanggrundwasser.

Die Wasserspeicherfähigkeit ist eine Schlüsselgrösse, wenn man die Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum prognostizieren will. Das wissensbasierte Modell bildet die nutzbaren Wasserreserven im Boden in fünf Klassen ab (Abbildung 4). Parallel wurde eine teilautomatisierte Prognose der Wasserspeicherkapazität mit Random Forest (RF) durchgeführt, und die Ergebnisse wurden lagebezogen miteinander verglichen (Herbst, submitted). Die Ergebnisse zeigen, dass das wissensbasierte Modell für einen deutlich höheren Waldflächenanteil des Baselbiets räumlich plausible Verteilungen der nFK-Werte liefert und dass die Aussagesicherheit der wissensbasierten Prognosen insgesamt höher ist als bei RF. Die teilautomatisierte Modellierung stösst bei vielen Prädiktorenkombinationen durch unvollständige oder begrenzte Stichproben an ihre Grenzen. Dies führt dazu, dass RF den überwiegenden Teil der Prognosen nur mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten ($\leq 50\%$) ausgibt. Bei der RF-Modellierung treten auf rund der Hälfte der Waldfläche des Baselbiets zudem verbreitet Fehlprognosen, nicht nachvollziehbare Verteilungsmuster und inkonsistente Vorhersagen unter sehr ähnlichen Standortbedingungen auf. Des Weiteren liefert RF auch für die rund 25% der Waldfläche Prognosen, für die wegen der kleinräumigen Variabilität der Bodeneigenschaften, zu kleiner oder nicht flächenrepräsentativer Stichproben und aufgrund ungenügender Informationen zu einzelnen Prädiktoren keine Aussage zur Wasserspeicherfähigkeit möglich ist. Bei einer Datenbasis von 0.6–1 Profilpunkten pro Quadratkilometer sind die wissensbasierten Modellierungsergebnisse den teilautomatisierten Prognosen für Praxisfragen und weiterführende ökologische Fragestellungen (z.B. Trockenstressrisiko) deshalb grundsätzlich vorzuziehen (Herbst, submitted).

Ausblick

Die hochauflösende Modellierung der Karten der Waldbodeneigenschaften beider Basel hat die Möglichkeiten und Grenzen eines solchen Vorgehens demonstriert. Für 70–90% der Waldfläche liegen nun

Informationen über ökologisch wichtige Bodeneigenschaften vor. Für Fragen und Vorhaben, wo sehr ortsgenaue und parzellenscharfe Aussagen notwendig sind, müssen die entscheidungsbasierten Aussagen der modellierten Karten allenfalls vor Ort überprüft werden. Von Fall zu Fall sind zudem auch in Zukunft grossmassstäbliche, im Feld kartierte Bodenkarten notwendig. Da bisher nur sehr wenige Waldbodenkarten existieren, ist die modellgestützte Bodenvorhersage jedoch die einzige Möglichkeit, in absehbarer Zeit Bodeninformationen für grössere Waldgebiete zur Verfügung zu stellen. Die entscheidende Chance der modellgestützten Bodenvorhersage besteht in der Möglichkeit, bodenkundliche Grundlagen für die waldbauliche Planung und die Abschätzung von Umwelt- und Klimarisiken für grosse Flächen nicht erst nach Jahrzehnten aufwendiger Feldkartierung verfügbar zu machen. Dies ermöglicht es, Bodeneigenschaften mit Klima- und Bestandesdaten zu verknüpfen im Hinblick auf räumlich differenzierende Aussagen, zum Beispiel zum Trockenstressrisiko und zur Baumartenwahl.

Kurz vor dem Abschluss stehende Arbeiten beschäftigen sich mit der Modellierung des kalkfreien Bodenbereichs (Fracek & Mosimann 2012) und der Basensättigung. Bei der Basensättigung führt der Weg der Vorhersage über die modellierten Aziditätsstufen. Hier besteht das Problem darin, den pH-Bereich von 4.0 bis 4.8, in dem fast das gesamte Spektrum der Basensättigung vorkommt, durch geeignete Prädiktorkombinationen in einzelne Basensättigungsklassen zu differenzieren. Dies wird die Grundlage für die Ausscheidung nährstoffarmer Standorte sein.

Die Karten der Waldbodeneigenschaften stehen nicht isoliert da. Das vielfältige, im Projekt erarbeitete Wissen soll ganz allgemein für den Wert der Ressource Waldböden sensibilisieren. Deshalb werden 40 Waldböden in allgemein verständlicher Form im Internet präsentiert.⁴ Fünf Demonstrationsprofile sind für Exkursionen und die praktische Ausbildung offen zugänglich.⁵ Dem gleichen Zweck dienen 18 in Harz konservierte Bodenmodelle, die an Ausstellungen und im Unterricht für Demonstrationszwecke eingesetzt werden. ■

Eingereicht: 11. August 2011, akzeptiert (mit Review): 15. November 2012

Dank

Wir bedanken uns bei Dr. Jens Gross und Dr. Uwe Meer für die tatkräftige Mitarbeit bei der Reliefmodellierung und der GIS-technischen Um-

setzung der Modelle. Ein besonderer Dank geht an Kantonsforstingenieur Ueli Meier vom Amt für Wald beider Basel und Dr. Roland Bono vom Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft. Ihre langjährige finanzielle, materielle und ideelle Förderung hat dieses Projekt erst ermöglicht. Wir bedanken uns im Weiteren für die organisatorische und praktische Unterstützung bei den Kreisforstingenieuren Guido Bader, Beat Feigenwinter, Christian Gilgen und Ernst Spahr sowie den vielen helfenden Mitarbeitern beim Amt für Wald und beim Amt für Umweltschutz und Energie. Bei den Feldarbeiten haben uns besonders auch die Revierförster stets spontan und tatkräftig unterstützt.

Literatur

- BEHRENS T, SCHOLTEN T (2006) Digital soil mapping in Germany – a review. *J Plant Nutr Soil Sci* 169: 434–443.
- BERK RA (2008A) Classification and regression trees. In: Bickel P et al, editors. *Statistical learning from a regression perspective*. New York: Springer. pp. 103–167.
- BERK RA (2008B) Random forests. In: Bickel P et al, editors. *Statistical learning from a regression perspective*. New York: Springer. pp. 193–255.
- BLUME HP ET AL (2002) *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 593 p.
- BREIMAN L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45: 5–32.
- BREIMAN L, FRIEDMAN J, OLSHEN R, STONE C (1984) *Classification and regression trees*. Belmont: CRC. 358 p.
- BURNAND J, HASSPACHER B (1999) *Waldstandorte beider Basel*. Liestal: Verlag Kanton Basel-Landschaft. 266 p.
- EBERHARDT E (2011) *Bodenkundliche Kartenwerke*. Handbuch der Bodenkunde. Weinheim: Wiley. 16 p.
- EGLI M, HÄFLIGER S, ACHERMANN M (2004) Modellierung von Bodenkarten: Ansätze zur Verbesserung der bestehenden Grundlagen. *Bull Bodenkd Ges Schweiz* 27: 45–48.
- EGLI M, MARGRETH U, VÖKT U, KELLER F (2005) Bodenmodellierung mit GIS im hochalpinen Raum. *Geomatik Schweiz* 103: 458–462.
- FRACEK K, MOSIMANN T (2012) Wissensbasierte Modellierung der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereichs in den Waldböden des Kantons Basel-Landschaft (Nordwestschweiz). 12 p. www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-13-4.pdf (21.11.2012).
- GRUNWALD S (2009) Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma* 152: 195–207.
- HÄRING T, DIETZ E, KÖLLING C (2009) Zusammenhang zwischen Rastergrösse und Modellgüte für die Prognose von Bodenkarten im Massstab 1:25 000. *Ber Deutsch Bodenkdl Ges.* 4 p. http://eprints.dbges.de/192/1/DBG_2009_HäringDietz-Kölling.pdf (29.10.2012).
- HERBST P, MOSIMANN T (2010) Prognose ökologisch wichtiger Waldbodeneigenschaften mit Random Forest in der Nordwestschweiz – Vergleich der Vorhersagen mit wissensbasierter empirisch-statistischer Modellierung. *Geomatik Schweiz* 108: 140–144.
- HERBST P, GROSS J, MEER U, MOSIMANN T (2012) Geomorphographic terrain classification for predicting forest soil properties in Northwestern Switzerland. *Z Geomorphol* 56: 1–22.
- KELLER A, REHBEIN K, SCHWIERZ C, PAPRITZ A (2011) Robuste geostatistische Methoden zur räumlichen Analyse und Kartierung von Bodeneigenschaften. *Mitt Dtsch Bodenkdl Ges.* 4 p. http://eprints.dbges.de/805/1/Mittlg_DBG_Keller2011.pdf (29.10.2012).

4 www.phygeo.uni-hannover.de/waldboden/Start.swf (21.11.2012)

5 www.baselland.ch/Bodeninformation.312689.0.html (21.11.2012)

- MANDERSCHIED B, MATZNER E (1995) Spatial heterogeneity of soil solution chemistry in a mature Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) stand. *Water Air Soil Poll* 85: 1185–1190.
- MCBRATNEY AB, ODEH IO (1997) Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decision. *Geoderma* 77: 85–113.
- MOSIMANN T (2011) Waldböden im Kanton Basel-Landschaft (NW-Schweiz) – Vielfalt, ökologische Eigenschaften und Verbreitung. *Mitt Naturforsch Ges beider Basel* 13: 43–66.
- MOSIMANN T, HERBST P, GROSS J, MEER U (2011) Wissensbasierte Modellierung von Waldbodeneigenschaften – Möglichkeiten, Grenzen, Herausforderungen. *Bull Bodenkd Ges Schweiz* 32: 43–50.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011) R: A language and environment for statistical computing. Wien: R Foundation Statistical Computing. www.r-project.org (29.10.2012).
- SCHUTT M (2009) Bodenversauerung durch Nadelhölzer in Wäldern des Kantons Basel-Landschaft (Schweiz) – Untersuchungen zum Ausmass der Versauerung und Ableitung von Vorschlägen für die Vorhersage der Azidität in der Modellierung von Waldbodeneigenschaften. Hannover: Univ Hannover, Institut Physische Geographie Landschaftsökologie, Diplomarbeit. 157 p.
- SKIDMORE AK, WATFORD F, LUCKANANURUG P, RYAN PJ (1996) An operational GIS expert system for mapping forest soils. *Photogramm Eng Remote Sens* 62: 501–511.
- VEERHOFF M, ROSCHER S, BRÜMMER G (1996) Ausmass und ökologische Gefahren der Versauerung von Böden unter Wald. Berlin: Erich Schmidt. 364 p.
- WALTER C, LAGACHERIE P, FOLLAIN S (2007) Integrating pedological knowledge into digital soil mapping. In: Lagacherie P, McBratney A, Voltz M, editors. *Digital soil mapping. An introductory perspective*. Amsterdam: Springer. pp. 281–300.
- WALTHERT L, ZIMMERMANN S, BLASER P, LUSTER J, LÜSCHER P (2004) Waldböden der Schweiz. Grundlagen und Region Jura. Bern: HEP. 768 p.
- ZADEH LA (1965) Fuzzy sets. *Inform Control* 8: 338–353.
- ZHANG J, GOODCHILD M (2002) Uncertainty in categorical variables. In: Fisher P, Raper J, editors. *Uncertainty in geographical information*. New York: Taylor & Francis. pp. 133–191.
- ZIRLEWAGEN D (2003) Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften. Freiburg: Forstliche Versuchs- Forsch.anstalt Baden-Württemberg. 154 p.

Flächenhafte Modellierung von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz

Die Waldböden sind eine wichtige natürliche Ressource. Bisher gibt es in der Schweiz jedoch nahezu keine flächendeckenden Bodeninformationen für den Wald. Seit 2006 wurden für die Wälder der Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt modellgestützte hochauflösende Karten der Bodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt, Vernässung, Azidität und Wasserspeicherfähigkeit erstellt. Grundlage sind alle bisher verfügbaren punkthaften Informationen über Böden und 95 bodenkundliche Neuaufnahmen von Waldstandorten. Methodisch wurden zwei Wege parallel beschritten: die auf einem häufigkeitsstatistischen Ansatz und Expertenwissen basierende Entwicklung von Entscheidungsbäumen (decision trees) und die teilautomatische Modellierung mit Random Forest. Die Bodeneigenschaften werden in umfangreichen hierarchischen Entscheidungsbäumen aus 24 Prädiktoren (Reliefformen, Gestein, Vegetation, Waldtyp, Lage, Klima) abgeleitet. Der Beitrag erläutert das Vorgehen und stellt die Ergebnisse an Kartenausschnitten für die Gründigkeit, Azidität im Oberboden und Wasserspeicherfähigkeit dar. Das Projekt belegt die grundsätzliche Machbarkeit einer hochauflösenden Vorhersage von Bodeneigenschaften, wobei diese in vier bis fünf Klassen differenziert werden können. Je nach Bodeneigenschaft bleiben aber 10 bis 30% der Fläche vorläufig ohne Aussage. Ursachen dafür sind vor allem die zu hohe Heterogenität der Böden, die noch nicht ausreichende morphografische Differenzierung der Hänge im Reliefmodell und unplausible Informationen zu den Prädiktoren. Die Karten der Waldbodeneigenschaften sind die Grundlage für die Ableitung von Praxiskarten, die die Waldentwicklung, die Waldbewirtschaftung und die Abschätzung von Risiken beinhalten.

Modélisation des propriétés des sols forestiers dans le nord-ouest de la Suisse

Les sols forestiers sont une ressource naturelle importante. Malgré cela, il n'existe en Suisse presque aucune donnée sur le sol forestier couvrant l'ensemble du territoire. Depuis 2006, des cartes de haute résolution conçues par des modèles ont été élaborées pour les forêts des cantons Bâle-Campagne et Bâle-Ville. Elles indiquent les propriétés suivantes: la profondeur du sol, la pierrosité, le degré d'humidité du sol, l'acidité et la capacité de rétention d'eau. Des informations ponctuelles sur le sol ainsi que 95 nouveaux relevés de sols forestiers en forment la base. Deux approches méthodologiques ont été menées en parallèle: le développement d'arbres décisionnels (decision trees) sur la base de statistiques de fréquence et des connaissances d'experts, ainsi que la modélisation semi-automatique avec Random Forest. Les propriétés du sol ont été définies dans de vastes arbres décisionnels hiérarchiques composés de 24 variables explicatives (relief, roche, végétation, type de forêt, position en versant, climat). Cet article présente la démarche et les résultats à l'exemple des cartes de la profondeur du sol, de l'acidité de l'horizon A et de la capacité de rétention d'eau. Le projet démontre la faisabilité d'une prévision de haute résolution des propriétés du sol qui sont ainsi définies en 4–5 classes. Toutefois, selon les propriétés du sol, environ 10–30% de la surface restent sans information. Une trop forte hétérogénéité des sols, une différenciation morphographique insuffisante des pentes dans le modèle de relief et le manque de plausibilité de certaines variables explicatives en sont la cause. Les cartes du sol forment la base pour l'élaboration de cartes de la gestion forestière et de l'estimation des risques.