

## Wissensbasierte Modellierung der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches in den Waldböden des Kantons Basel-Landschaft (Nordwestschweiz)

*Knowledge-based modeling of the non-calcareous soil depth of forest soils in the canton Basel-Landschaft (Northwest Switzerland)*

Kristin Fracek & Thomas Mosimann

### Abstract

*The progressive acidification of forest soils leads to a lack of nutrients and increasingly threatens forest ecologies. To assess these risks, area-wide information on forest soil properties that are relevant to soil acidification is needed. In this context, a knowledge-based prediction model to predict the non-calcareous soil depth of forest soils in the Canton Basel-Landschaft (northwest Switzerland) was developed, based on eight predictors/predictor groups. The resulting map provides comprehensible, detailed information on the relevant soil property for 87 % of the forest areas. With the help of these modeled results, the base saturation of forest soils can be estimated, and forest sites with an inadequate nutrient supply can be identified. In the long term, this model is an important tool for assessing acidification risks.*

**Keywords:** *knowledge-based modeling, digital soil mapping, classification and regression trees, forest soil properties, decalcified soil depth, soil acidification*

### Zusammenfassung

Die fortschreitende Versauerungsdynamik der Waldböden führt zu einer zunehmenden Gefährdung von Waldökosystemen durch Nährstoffmangel. Um eine Risikoabschätzung vornehmen zu können, werden flächendeckende Informationen zu den für die Bodenversauerung relevanten Waldbodeneigenschaften benötigt. Vor diesem Hintergrund ist auf der Grundlage von acht Prädiktoren/-gruppen ein wissensbasiertes Prognosemodell zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches in den Waldböden des Kantons Basel-Landschaft (Nordwestschweiz) entwickelt worden. Die Ergebniskarte liefert für 87 % der Waldfläche nachvollziehbare, kleinräumig differenzierte Informationen zur Ausprägung dieser Bodeneigenschaft. Mithilfe der vorliegenden Modellergebnisse lassen sich zukünftig die Basensättigung der Waldböden flächendifferenziert abschätzen und Waldstandorte mit unzureichender Nährstoffversorgung identifizieren. Langfristig stellt das Modell zudem eine wichtige Grundlage zur Beurteilung des Versauerungsrisikos dar.

**Schlüsselwörter:** Wissensbasierte Modellierung, Digitale Bodenvorhersage, Entscheidungsbäume, Waldbodeneigenschaften, Entkalkungstiefe, Bodenversauerung

### 1 Problemstellung

Für die waldbauliche Entwicklungsplanung werden umfassende Informationen über die auf das Waldökosystem einwirkenden Umweltbedingungen und ihre Wirkungszusammenhänge benötigt, um die vielfältigen Funktionen des Waldes nachhaltig sicherzustellen und zukünftige Risiken abschätzen zu können. Im Rahmen der Waldschadens- und Waldökosystemforschung sind seit den 1980er Jahren zahlreiche Untersuchungen zum Einfluss des Ausgangsgesteins, des Bodens, des Klimas, der anthropogenen Nutzung und des Depositionsgeschehens atmosphärischer Stoffe auf die Vitalität des Waldbestandes durchgeführt worden. Erkenntnisse über die Waldböden traten dabei verstärkt ins Zentrum des Interesses (WALTHERT et al. 2004), da Waldböden wichtige ökologische Funktionen besitzen und die Grundlage eines stabilen Waldökosystems bilden.

Um diese Forschungsergebnisse für die waldbauliche Entwicklungsplanung in Wert zu setzen und flächenbezogene Auswirkungen auf Waldökosysteme abschätzen zu können, bedarf es einer Regionalisierung der im Rahmen von Feldkartierungen erfassten punktbezogenen Daten mithilfe von Prognosemodellen. Untersuchungen zur Regionalisierung von Waldbodeneigenschaften mithilfe von multiplen Regressionsmodellen wurden z. B. von ZIRLEWAGEN (2003) und ZIRLEWAGEN et al. (2006) durchgeführt. Anhand eines digitalen Reliefgliederungsverfahrens sind unter Berücksichtigung der Ausgangssubstrate, der Bestandesstruktur und der Meliorationsmaßnahmen statistisch signifikante Schätzungen bodenchemischer Parameter (pH-Wert, Basensättigung, Kohlenstoffvorrat usw.) vorgenommen worden. Regressionsmodelle zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches sind von BELL et al. (1994), HOWELL et al. (2007) sowie FLORINSKY et al. (2002) aufgestellt worden. Auf der Grundlage vielfältiger geomorphologischer Merkmale ist die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches für kleinere Untersuchungsgebiete (< 1 km<sup>2</sup>) in den USA und in Kanada prognostiziert worden. Untersuchungen zur räumlichen Modellierung bodenkundlicher Informationen mithilfe von Entscheidungsbäumen (CART-Methode) wurden u. a. von EGLI et al. (2004, 2005) durchgeführt. Neben der Regionalisierung von Bodentypen wurden zum Beispiel die Gründigkeit der Böden in Teilgebieten der Kantone Luzern und Graubünden modelliert. Auch ABEREGG et al. (2009) haben mithilfe der CART-Methode die räumliche Verbreitung von Bodentypen modelliert sowie eine modellgestützte Prognose zur Humusform vorgenommen. Des Weiteren sind z. B. Prognosemodelle zum Wasserhaushalt (CIALELLA et al. 1997), zum Phosphorgehalt (McKENZIE & RYAN 1999) sowie zur Kationenaustauschkapazität von Böden (BISHOP

& McBRATNEY 2001) mithilfe von Entscheidungsbäumen aufgestellt worden.

Die bisherigen Forschungsergebnisse zur digitalen Bodenvorhersage verdeutlichen die Bedeutung von geomorphologischen Merkmalen für die Modellierung von Bodeneigenschaften (FLORINSKY 2012), insbesondere in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften (ZIRLEWAGEN 2003). Vor diesem Hintergrund entwickelten HERBST et al. (2012) für die Wälder im Kanton Basel-Landschaft (Nordwestschweiz) ein detailliertes Reliefgliederungsmodell, das als Grundlage für die Modellierung der Waldbodeneigenschaften dient. Unter Berücksichtigung weiterer Prädiktoren (Topographie, Vegetation, Gestein, Klima) ist eine modellgestützte Modellierung der Waldbodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt, Vernässung und Azidität vorgenommen worden (MOSIMANN et al. 2011). Für die Zukunft lassen sich aus diesen Ergebnissen weitergehende Erkenntnisse, beispielsweise über die Befahrungsempfindlichkeit, das Trockenstressrisiko und die Verbreitung nährstoffarmer Standorte gewinnen (MOSIMANN 2011).

In der Risikoabschätzung kommt auch dem Themenbereich der Nährstoffversorgung eine große Bedeutung zu. Langjährige Untersuchungen auf Walddauerbeobachtungsflächen haben gezeigt, dass trotz der Reduktion anthropogener Säuredepositionen die Bodenversauerung aktuell weiter fortschreitet. Die daraus resultierenden Nährstoffverluste führen zu Ernährungsstörungen bei den Waldbäumen, einem reduzierten Stammzuwachs sowie einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Windwurf und Trockenstress (FLÜCKIGER & BRAUN 2009a). Die Ergebnisse der Walddauerbeobachtung in der Nordwestschweiz und im Schweizer Mittelland zeigen, dass die Bodenversauerung in den Jahren 1996 bis 2005 deutlich zugenommen hat und heute über die Hälfte der untersuchten Standorte stark bis sehr stark saure  $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Werte aufweisen. Gleichzeitig hat die Basensättigung der karbonatfreien Horizonte in dieser Zeitspanne im Mittel um 5,3 % abgenommen, so dass aktuell 13 % der untersuchten Wälder eine kritische Basensättigung unter 15 % aufweisen (FLÜCKIGER & BRAUN 2009b). Aus der ersten Waldbodenzustandserhebung (BZE) in Deutschland geht hervor, dass sogar mehr als 60 % der untersuchten karbonatfreien Waldstandorte sehr geringe Basensättigungen (< 15 %) aufweisen (WOLFF & RIEK 1996). Auch die Ergebnisse der zweiten Waldbodenzustandserhebung deuten auf eine fortschreitende Versauerungsdynamik der Waldböden hin. Zwar liegt der Bundesbericht zur zweiten BZE aktuell noch nicht vor, doch zeugen die Ergebnisberichte der Länder im Bezug auf die Basensättigung von einem anhaltend „kritischen Zustand der Waldböden“ (HEINTZE & ANDREAE 2011, S. 37). Forschungsziel ist es daher, Waldstandorte mit unzureichender Nährstoffversorgung zu identifizieren und die Gefährdung der übrigen Waldböden durch die Beurteilung ihres Versauerungsrisikos einzuschätzen. In diesem Zusammenhang werden detaillierte Informationen zur Entkalkungstiefe der Böden benötigt, da kalkhaltige Bodenbereiche in Abhängigkeit von ihrer Tiefe selbst für stark versauerte Horizonte oberhalb der Kalkgrenze eine säurepuffernde Wirkung besitzen. Liegt die Kalkgrenze im Wurzelraum, so werden dem Oberboden über den Nährstoffkreislauf der Pflanzen mit dem Streufall basische Kationen zugeführt, die Protonen vom Austauschverdrängen und damit zu einer erhöhten Basensättigung und einer Reduktion der Azidität führen können (WALTHERT et al. 2004). In Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt kann es außerdem zu einer aufwärts gerichteten Diffusion basischer Kationen aus tieferen Bodenbereichen kommen oder eine

direkte Aufbasung durch Grundwasser erfolgen, das im Kontakt mit dem karbonathaltigen Untergrund steht (BLASER et al. 2008c).

Grundsätzlich können auch Böden, die sich nicht aus Karbonatgestein entwickelt haben, durch einen kalkhaltigen Untergrund beeinflusst werden, so dass in diesem Zusammenhang die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches den Begriff der Entkalkungstiefe ersetzt. Zur Vereinfachung wird im Folgenden jedoch der Begriff der Entkalkungstiefe als Synonym verwendet.

Dieser Beitrag stellt ein wissenschaftliches Modell für die flächendifferenzierte Prognose der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches in den Waldböden des Kantons Basel-Landschaft (Nordwestschweiz) dar. Im Rahmen weiterer Schritte dient dieses Modell als Grundlage für die flächendeckende Vorhersage der Basensättigung sowie langfristig für die Beurteilung des Versauerungsrisikos der Waldböden im Untersuchungsgebiet.

## 2 Datengrundlagen und Methodik

### 2.1 Datengrundlagen

Die Entwicklung des Prognosemodells zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches basiert auf der im Rahmen des Projektes MODELLIERUNG VON WALDBODENEIGENSCHAFTEN IM KANTON BASEL-LANDSCHAFT aufgebauten Waldbodendatenbank (MOSIMANN 2011). Diese Datenbank umfasst die profil- sowie horizontbezogenen Daten von knapp 450 Waldbodenstandorten in der Nordwestschweiz (Stand: März 2010).

Die Ermittlung der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches der einzelnen Bodenprofile beruht, soweit vorhanden, auf den Laborwerten der Karbonatgehalte des Feinbodens. Dabei sind Bodenproben mit Karbonatgehalten  $\leq 0,5$  % als karbonatfrei eingestuft worden, um methodisch bedingte Messungenauigkeiten zu berücksichtigen. An Profildaten ohne Laboranalysen wurden die Ergebnisse der Feldansprache (Salzsäuretest) verwendet. Die Angaben zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches sind für die modellgestützte Prognose in eine klassifizierte Form überführt worden. Die Klassifizierung der Entkalkungstiefe erfolgte in fünf Tiefenstufen: 0–10 cm, 10–50 cm, 50–100 cm, 100–150 cm und > 150 cm.

Insgesamt umfasst das für die Modellierung zur Verfügung stehende Datenkollektiv 329 Fälle für eine Fläche von 200 km<sup>2</sup>. Hinzu kommen 56 Waldstandorte, die für die Validierung des Prognosemodells verwendet worden sind. Als weitere Datengrundlagen dienen folgende Flächendaten: Baumartenanteile, aus den pflanzensoziologischen Waldgesellschaften abgeleitete pflanzenökologische Reaktions- und Feuchtestufen und die in 13 petrographische Einheiten klassifizierten Gesteinstypen des Kantons Basel-Landschaft.

Des Weiteren steht ein hochauflösendes digitales Höhenmodell zur Verfügung. Auf dessen Grundlage sind im Rahmen des Projektes MODELLIERUNG VON WALDBODENEIGENSCHAFTEN IM KANTON BASEL-LANDSCHAFT eine Vielzahl geomorphometrischer Reliefparameter berechnet und eine detaillierte, auf die Bodenvorhersage ausgerichtete geomorphographische Reliefgliederung vorgenommen worden (HERBST et al. 2012). Für die Modellentwicklung stehen damit insgesamt 29 Prädiktoren mit Informationen zur Topographie, zum Relief, Gestein, Klima und der Vegetation zur Verfügung.

## 2.2 Methodik der Modellentwicklung

Das entwickelte Prognosemodell basiert auf einer kombinierten Anwendung von häufigkeitsstatistischen Analysen und Expertenwissen und weist eine faktorenbasierte Struktur in Form weit verzweigter Entscheidungsbäume (classification and regression trees, MERTENS et al. 2002) auf.

Die für das Modell relevanten Prädiktoren sind mithilfe von häufigkeitsstatistischen Untersuchungen identifiziert und anschließend schrittweise kombiniert worden. Dabei entstanden für die verschiedenen Bodenregionen des Untersuchungsgebietes (Jura, Lösshügelland, Talböden) individuelle Entscheidungsbäume, um den spezifischen naturräumlichen Gegebenheiten gerecht zu werden. Diese Entscheidungsbäume weisen entsprechend ihrer Prädiktorenkombinationen unterschiedlich viele Entscheidungsknoten auf, besitzen zur besseren Übersichtlichkeit aber die gleiche Grundstruktur im Sinne einer einheitlichen hierarchischen Reihenfolge der Prädiktoren (Tab. 1). Diese Reihenfolge leitet sich aus der Bedeutung der einzelnen Prädiktoren für das Prognosemodell ab (Kapitel 3.2). Grundsätzlich steht die Reliefgliederung innerhalb der Entscheidungsbäume an erster Stelle, da die Bodeneigenschaften zumeist durch das geomorphologische Prozessgeschehen modifiziert werden. Dies kommt darin zum Ausdruck, dass im Untersuchungsgebiet flächenmäßig Böden in auf- und umgelagerten Deckschichten dominieren, während die Bodenbildung im anstehenden Gestein weniger stark verbreitet ist (nur ca. 20 % der Gesamtfläche). Da auch der Waldtyp Schuttwald indirekt Ausdruck einer bestimmten Reliefsituation (Steilhanglage) ist und sehr starke Zusammenhänge zu den Bodeneigenschaften aufweist, tritt dieser an die zweite Stelle der hierarchischen Reihenfolge der Prädiktoren. Die gesteinspezifischen Unterschiede werden in der Regel erst innerhalb der definierten Reliefformtypen deutlich, so dass der Gesteinstyp als Prädiktor der Reliefgliederung im Entscheidungsbaum nachgeordnet ist. Dies gilt selbst dann, wenn für einzelne Gesteinstypen keine reliefbedingte Modifikation der Entkalkungstiefe festgestellt werden kann (z.B. Gesteinstyp Tonmergel), um die allgemeine Modellstruktur einheitlich und übersichtlich zu halten.

Den einzelnen Prädiktorenkombinationen innerhalb der Entscheidungsbäume wird eine Klasse der Mächtigkeit

des kalkfreien Bodenbereiches zugeordnet. Die Vorhersage umfasst neben der prognostizierten Ausprägung der Entkalkungstiefe eine Angabe zur Aussagesicherheit, so dass dem Anwender direkt Informationen zur Güte der Prognose vorliegen. Die Aussagesicherheit stützt sich auf die Häufigkeitsverteilung der Entkalkungstiefe, die sich unter der jeweiligen Prädiktorenkombination ergibt. Diese Häufigkeitsverteilung wird als Wahrscheinlichkeitsverteilung interpretiert, so dass die relative Häufigkeit der prognostizierten Klasse gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens beschreibt. Bei einseitiger Verteilung kann neben der primären Ausprägung zudem eine sekundäre Ausprägung der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches angegeben werden (Abb. 1). Dies trägt der kleinräumigen Heterogenität der Bodeneigenschaften Rechnung. Bei geringem Stichprobenumfang ( $n < 10$ ) besteht die Gefahr, dass überproportional vertretene Sonderfälle die Häufigkeitsverteilung verzerren und damit zu falschen Aussagen führen. Deshalb ist insbesondere bei kleinen Stichproben die inhaltliche Überprüfung und Beurteilung der häufigkeitsstatistischen Analyseergebnisse durch Expertenwissen unerlässlich (MOSIMANN et al. 2011). Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, auf diese Weise nicht prognostizierbare Flächen auszuweisen, falls die häufigkeitsstatistischen Analyseergebnisse keine dominante Klasse aufweisen (hohe Heterogenität), die Informationen über einzelne Prädiktoren ungenügend sind oder das verfügbare Wissen nicht ausreicht.

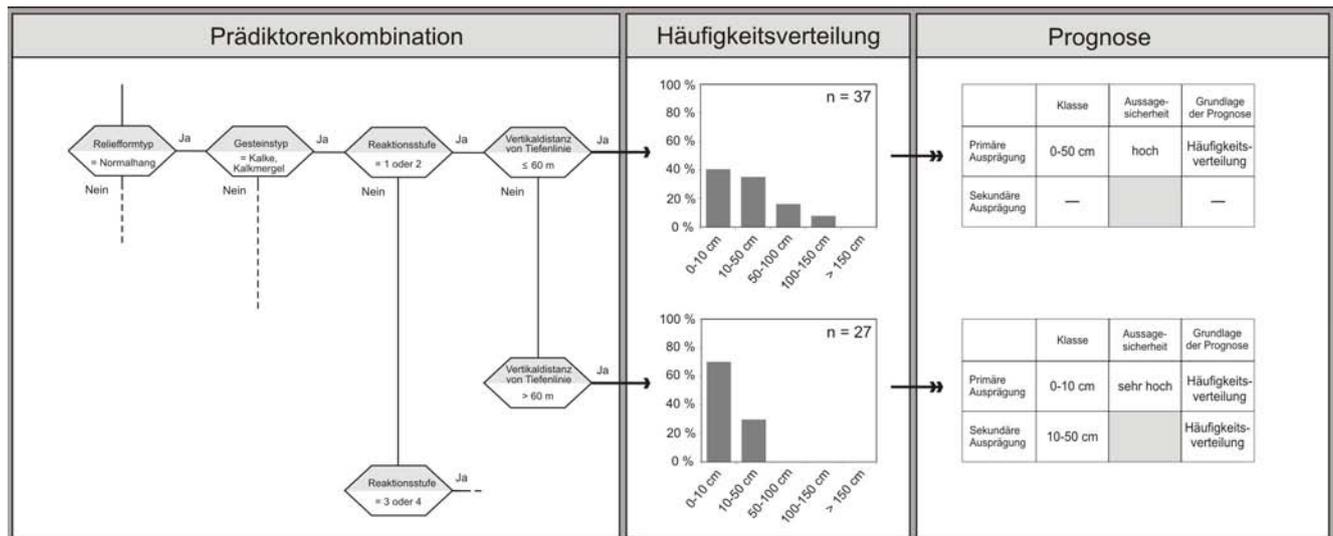
Im Vergleich zu geostatistischen sowie automatisierten faktorenbasierten Modellansätzen können durch die gewählte Methodik auch für Bereiche mit zu geringem Stichprobenumfang hochauflösende Prognosen erzielt werden, sofern die Zusammenhänge empirisch bekannt sind. Ungenügende Stichproben können erkannt und die Prognose dementsprechend korrigiert werden, während automatisierte Modellansätze dazu nicht in der Lage sind. Des Weiteren ergibt sich der Vorteil, bei ungenügend gesicherten Zusammenhängen oder zu hoher Heterogenität nicht prognostizierbare Flächen ausweisen zu können (HERBST & MOSIMANN 2010).

Außerdem erweist sich die Modellstruktur in Form von Entscheidungsbäumen als übersichtlich und durchschaubar, so dass Anwender die Möglichkeit haben, die

**Tab. 1:** Übersicht zu den acht Prädiktoren/-gruppen und ihrer Verwendung in den drei Bodenregionen. Die Prädiktoren/-gruppen sind im Modell hierarchisch geordnet.

**Tab. 1:** Overview of the eight predictors/predictor groups and their application in the three soil regions. The predictors/predictor groups are structured hierarchically in the model.

Prädiktor/Prädiktorengruppe	Bodenregion		
	Jura	Lösshügelland	Talböden
Morphographische Reliefformtypen	x	x	
Waldtyp Schuttwald	x		
Petrographische Gesteinstypen	x	x	x
Pflanzenökologische Feuchtestufen	x		
Pflanzenökologische Reaktionsstufen	x	x	
Positionsparameter Vertikaldistanz von Tiefenlinie	x		
Reliefparameter Hangneigung	x		
Klimaparameter Höhenlage		x	



**Abb. 1:** Prinzip der Prognose der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches mithilfe häufigkeitsstatistischer Analysen am Beispiel eines vereinfachten Ausschnittes aus dem Entscheidungsbaum der Bodenregion Jura. Der kalkfreie Bodenbereich ist im Unterhang (Vertikaldistanz von Tiefenlinie  $\leq 60$  m) häufig mächtiger, weil es dort durch hangabwärts gerichtete Umlagerungsprozesse verstärkt zur Ablagerung des transportierten entkalkten Verwitterungsmaterials kommt. Allerdings müssen die Klassen 0–10 cm und 10–50 cm zusammengefasst werden, um eine Aussage zu erzielen.

**Fig. 1:** Principle for predicting the non-calcareous depth of forest soils using statistical frequency analysis. An example from a simplified section of the decision tree from the Jura soil region is shown. The depth of non-calcareous soil in the bottom slopes (vertical distance to channel network  $\leq 60$  m) is usually greater due to the downward shift and deposit of decalcified material. The 0–10 cm and 10–50 cm classes were combined to obtain a prediction.

einzelnen Prognosen anhand der zugrunde liegenden Prädiktorenkombination nachzuvollziehen. Voraussetzung für eine wissenschaftliche Modellierung ist aber aus mehrjähriger Geländeerfahrung verfügbares Expertenwissen (MOSIMANN et al. 2011).

### 2.3 Technische Umsetzung des Prognosemodells

Die technische Umsetzung des Prognosemodells erfolgte GIS-gestützt über die Kopplung von MS ACCESS 2007 und ARCGIS 9.3 auf der Basis von PERSONAL-GEODATABASES. Die Informationsebenen der einzelnen Prädiktoren sind ins Rasterformat konvertiert und zu einer Gesamtdatei zusammengeführt worden (Combine Grid). Anschließend sind die Entscheidungsbäume befehlszeilengestützt umgesetzt (VBA-Scripting) und der jeweiligen Merkmalskombination in der Attributtabelle des Grids die entsprechenden Prognose-Informationen zugewiesen worden. Um Splitterflächen ( $< 625$  m<sup>2</sup>) zu eliminieren, erfolgte eine Vektorisierung der im Rasterformat vorliegenden Prognosekarte und eine Filterung vor der abschließenden Generierung der Ergebniskarte.

### 2.4 Validierung des Prognosemodells

Die Validierung des Prognosemodells erfolgte anhand eines unabhängigen Datensatzes von 56 Standorten. Diese sind im Rahmen zusätzlicher Feldkartierungen in den Jahren 2008 und 2011 untersucht worden. Die Standorte stammen größtenteils aus der Modellregion Jura (49 Standorte) sowie in einem geringeren Umfang aus einem Teilgebiet des Lösshügellandes (Sundgauer Lösshügelland). Die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches ist auf der Grundlage der Feldansprache (Salzsäuretest) ermittelt worden. Dabei wurden für jeden Standort in der Regel 5–10 Bohrungen mit dem Bohrstock vorgenommen und die mittlere Entkalkungstiefe

bestimmt. Lediglich bei großen Entkalkungstiefen von mehr als etwa 60 cm reichen dagegen ein bis drei Einstiche aus.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Die Prognosekarte zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches

Die Prognosekarte für das Untersuchungsgebiet kann unter <http://www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html> eingesehen werden. Der folgende Text gibt eine regionale Übersicht zur Karte und stellt die Ergebnisse anhand eines Beispielgebietes detailliert dar.

#### 3.1.1 Regionale Übersicht

Die Bodenregionen Jura, Lösshügelland und Talböden zeichnen sich durch eine charakteristische Oberflächengestalt und das Vorkommen prägender Gesteinstypen aus. Dementsprechend differenziert sind die Mächtigkeiten des kalkfreien Bodenbereiches:

Die größten Entkalkungstiefen treten im Lösshügelland auf, dessen tertiäre Sedimente großflächig von quartären Schottern und Lössen überdeckt sind. Bildet Löss das Ausgangssubstrat, so sind die Böden im Allgemeinen mindestens bis in 100 cm Tiefe, teilweise bis weit über 150 cm Tiefe entkalkt. Dabei ist die Entkalkungstiefe aufgrund der langen Verwitterungszeit auf den ältesten, höchst gelegenen Ablagerungsniveaus am größten ( $> 200$  cm). Dies trifft mehrheitlich auch auf Bereiche zu, welche die geologische Karte als Schotter ausweist, da sowohl die Hochterrassen als auch die Deckenschotter in der Regel lössbedeckt sind. Ausschließlich im Grenzbereich zum Elsass treten aufgrund der vergleichsweise geringeren Niederschlagsmengen unter 750 mm/Jahr auch weniger tief entkalkte Löss (50–100 cm)

auf. Allerdings stößt hier die Prognose an Grenzen, da die Böden durch starke Erosion überprägt worden sind. So hat die Bodenerosion auf früher landwirtschaftlich genutzten Flächen ein kleinräumiges Muster unterschiedlich tief entkalkter Lössböden geschaffen, für die aufgrund der großen Heterogenität keine Prognose möglich ist. Verstärkt treten diese durch Erosion gekappten Lössböden auf den tieferen Niveaus ( $\leq 350$  m NN) auf.

Im Gegensatz zum Lösshügelland dominieren im Jura geringe Entkalkungstiefen unter 50 cm. Hat sich der Boden direkt im anstehenden Kalkgestein entwickelt, wie es insbesondere für Teile der Plateaus und Scheitelbereiche des Jura typisch ist, so liegt die Kalkgrenze zumeist bereits in 0–10 cm Tiefe. Im Vergleich dazu variiert die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches in den Hangbereichen des Jura aufgrund der weit verbreiteten Deckschichten stärker: Während die Böden im Gehängeschutt zumeist bis nahe an die Oberfläche kalkhaltig sind (0–10 cm), weisen Gehängelehme in Abhängigkeit ihres Skelettgehaltes und Verlehmungsgrades teilweise Entkalkungstiefen bis zu 100 cm auf. Dabei gibt es entsprechend ihres heterogenen Aufbaus große Spannweiten. Allgemein lässt sich aber festhalten, dass die Deckschichten in Steilhängen ( $> 32^\circ$ ) aufgrund ihres Skelett-reichtums nur oberflächennah entkalkt sind (0–10 cm) und bei vergleichbaren Reliefverhältnissen der Anteil des verlehnten Feinbodens und damit auch die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches vom Ober- zum Unterhang zunimmt.

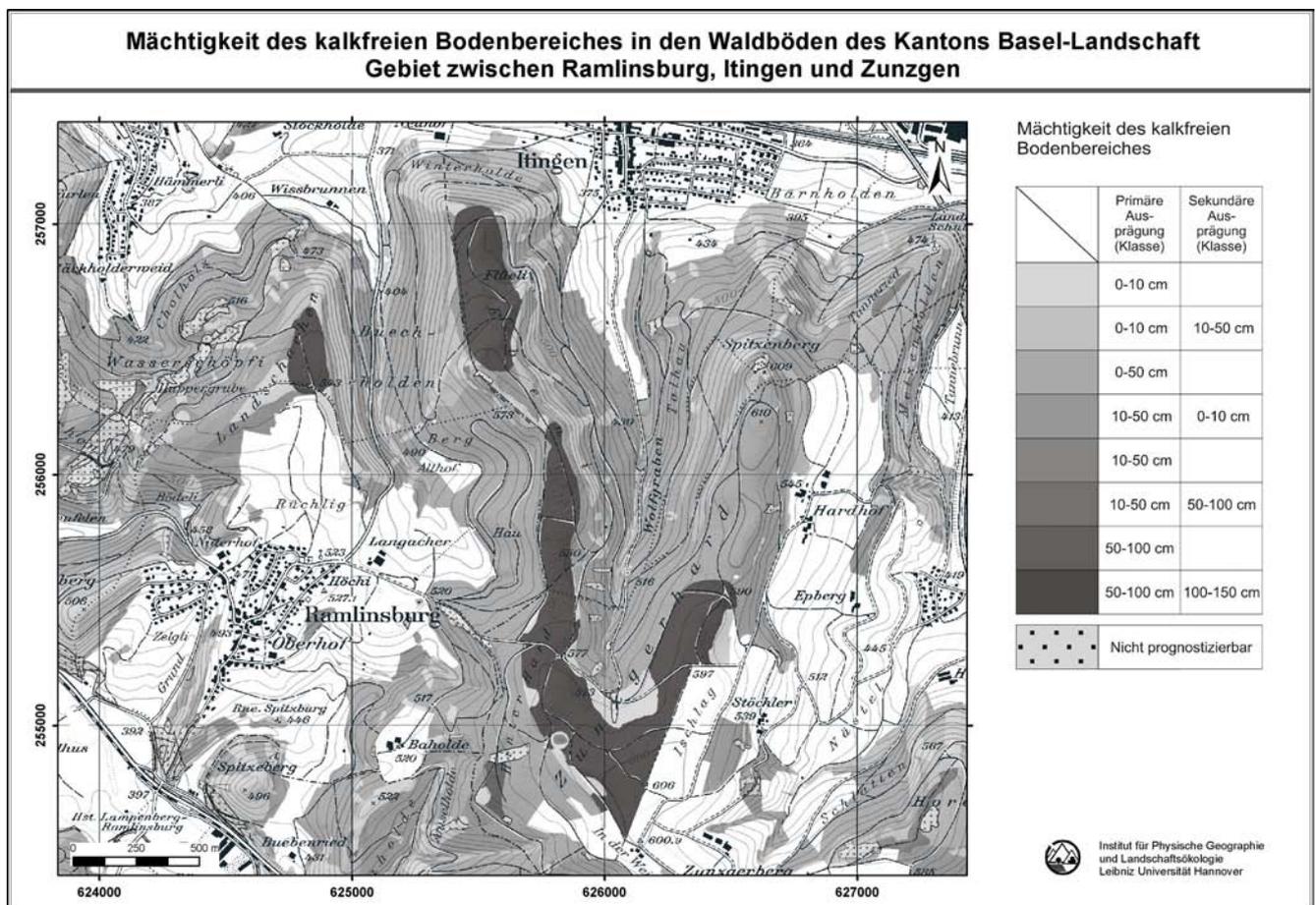
Kalkfreie Bodenbereiche bis in über 50 cm Tiefe lassen

sich im Jura außerdem auf den Tafeljura-Hochflächen, im Bereich der inselartig verbreiteten Decklehme, finden. Dabei handelt es sich um einige Dezimeter bis maximal zwei Meter mächtige Erosionsreste umgelagerter quartärer bis tertiärer Verwitterungslehme und Riss-Grundmoränen. Ihre Entstehung ist sehr vielfältig, so dass sie teilweise Flugsand oder Löss enthalten und stark variierende Skelettgehalte aufweisen (MOSIMANN 2011). Ebenso wie bei den Lösslehmen im Lösshügelland, liegt die Kalkgrenze der Decklehme in der Regel in einer Tiefe unterhalb von 50 cm. Die Entkalkungstiefe reicht jedoch zumeist nicht bis in Tiefen über 150 cm, da sich spätestens ab dieser Tiefe der kalkhaltige Untergrund bemerkbar macht.

Die Bodenregion der Talböden wird im Gebiet des Rheintales durch Kalk-Silikat-Schotter und in den Juratälern durch reine Kalkschotter aufgebaut. Dementsprechend dominieren in den Juratälern sehr geringe Entkalkungstiefen von 0–10 cm, während im nördlich gelegenen Rheintal die Kalkgrenze zumeist in Tiefenbereichen von 50–100 cm liegt.

### 3.1.2 Beispielgebiet Ramlinsburg-Zunzgen

Der Kartenausschnitt aus dem Gebiet zwischen Ramlinsburg, Itingen und Zunzgen veranschaulicht das typische Verteilungsmuster der Prognosewerte im Tafeljura (Abb. 2): Insgesamt zeigt sich in den Hangbereichen eine Dominanz geringer Entkalkungstiefen unter 50 cm, während insbesondere auf den Tafeljura-Hochflächen kleinräumig auch tiefer entkalkte Böden auftreten. Dabei handelt es sich um



**Abb. 2:** Ausschnitt aus der Prognosekarte im Gebiet zwischen Ramlinsburg, Itingen und Zunzgen (Tafeljura).

**Fig. 2:** Section of prediction map of the area between Ramlinsburg, Itingen and Zunzgen (Table Jura).

inselartig verbreitete Decklehme, die mehrheitlich bis in 50–100 cm und maximal bis in 150 cm Tiefe entkalkt sind. Treten keine Decklehme auf, so sind auch die Böden auf den Plateaus lediglich bis in eine Tiefe von 50 cm entkalkt. Dies ist beispielsweise im nördlichen Plateaubereich der Zunzgerhard der Fall. Hier haben sich die Böden auf kalkhaltiger Juranagelfluh entwickelt, die auf den Tafeljuraplateaus südlich der Ergolz weit verbreitet ist. Die untersuchten Standorte weisen eine Wechsellagerung aus wenig verfestigtem Konglomerat und Mergel auf und sind maximal bis in Tiefen von 50 cm entkalkt.

Im Gegensatz zu den Plateaus weisen die Tafeljurahänge aufgrund ihrer Reliefenergie und ihrer heterogenen Oberflächenstruktur ein kleinräumig stärker differenziertes Verteilungsmuster der Prognosewerte auf. Während großflächig Entkalkungstiefen bis zu 50 cm dominieren, treten in einzelnen Reliefstufen ausschließlich sehr geringe Entkalkungstiefen von 0–10 cm auf. Dies trifft zum Beispiel auf die konvex geformten Hangbereiche zu, auf denen sich infolge fehlender Überdeckung oder Abtrages ausschließlich flachgründige Rendzinen entwickeln konnten (z. B. Flurname Winterholde). Und auch innerhalb der Steilhänge sind die Böden nur oberflächennah entkalkt, da hier skelettreiche Gehängeschuttdecken entstanden (z. B. östlich von Landschachen).

Die Entkalkungstiefe in weniger stark geneigten (Neigung  $\leq 32$  Grad), einheitlich geformten Hängen wird maßgeblich vom Ausgangsgestein bestimmt. Haben sich die Böden zum Beispiel auf Tonmergeln entwickelt, so beträgt die prognostizierte Entkalkungstiefe grundsätzlich 0–50 cm (z. B. Hangbereich östlich von Ramllinsburg). Eine stärker differenzierte Prognose ist aufgrund des heterogenen Gesteinsaufbaus nicht möglich. Stehen im Untergrund hingegen Kalke an, so haben sich in der Regel unterschiedlich stark entkalkte Gehängelehme ausgebildet, deren Entkalkungstiefe in Abhängigkeit von ihrer Hangposition variiert. So dominieren infolge der hangabwärts gerichteten Umlagerungsprozesse im Oberhang sehr geringe Entkalkungstiefen (0–10 cm), während im Unterhang eine höhere Heterogenität vorherrscht und häufiger auch Entkalkungstiefen bis maximal 50 cm vorkommen (z. B. westlich geneigter Hang bei Buechholden). Wegen des kleinräumigen Wechsels muss aber eine Gesamtklasse von 0–50 cm gebildet werden.

## 3.2 Die Bedeutung der einzelnen Prädiktoren

Entsprechend der Unterschiede bei den geologischen Ausgangsgesteinen und dem Reliefgefüge haben die einzelnen Prädiktoren in den drei Bodenregionen Jura, Lösshügelland und Talböden zum Teil unterschiedliche Bedeutung. Gesamthaft betrachtet nehmen aber sowohl im Jura als auch im Lösshügelland die Reliefgliederung und der petrographische Gesteinstyp eine zentrale Stellung ein. Aufgrund des homogenen Reliefs in den Talböden stützt sich die Prognose dort hingegen primär auf den petrographischen Gesteinstyp sowie auf die räumliche Differenzierung zwischen dem Rheintal und den Juratälern (Kapitel 3.1).

### 3.2.1 Morphographische Reliefformtypen

Durch die morphographische Reliefgliederung werden in der Bodenregion Jura und im Lösshügelland Reliefseinheiten mit spezifischen pedogeomorphologischen Prozessbedingungen

abgegrenzt. Aufgrund des kleinräumig differenzierten Reliefes erweist sich die Reliefgliederung insbesondere im Jura als sehr bedeutsamer Prädiktor. Einzelne Reliefseinheiten weisen hohe Häufigkeiten bestimmter Tiefenklassen der Entkalkung auf. So zeigen zum Beispiel die Teilstichproben der Steilhänge und Felsbänder zu 88,9 % bzw. 100 % sehr geringe Entkalkungstiefen von 0–10 cm (Abb. 3). Andere Reliefseinheiten weisen eine große Heterogenität bei den Entkalkungstiefen auf. Dies gilt besonders für Normalhänge (Häufigkeitsmaximum von 48,3 %). Auf Hangrücken herrschen dagegen zumeist sehr geringe Entkalkungstiefen von 0–10 cm vor (Häufigkeitsmaximum von 63,6 %). Im Lösshügelland ergeben sich für die Reliefseinheit der Plateaus relativ einheitliche Entkalkungstiefen von  $> 100$  cm (über 60 % der Standorte). Die Tiefenbereiche sind dagegen sehr heterogen (Entkalkungstiefen zwischen 0 cm und  $> 150$  cm, Häufigkeitsmaximum einer Klasse nur 37,5 %).

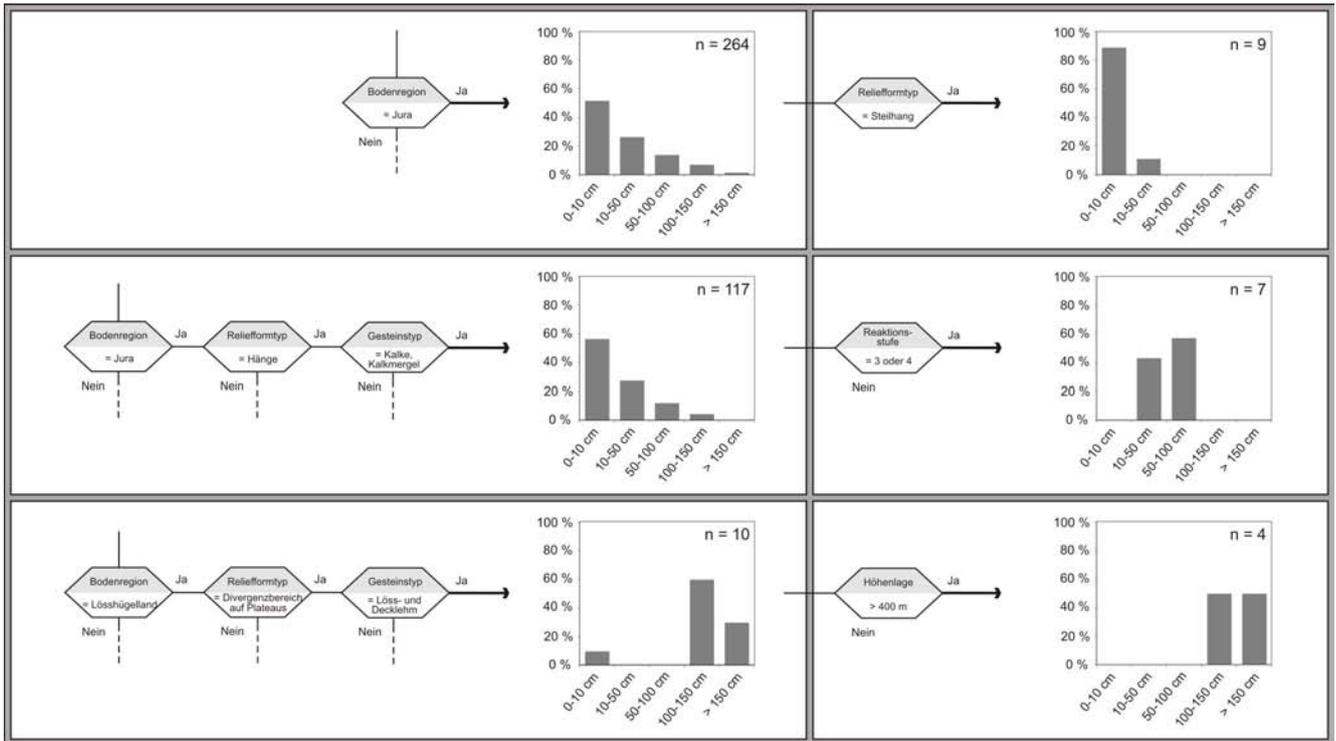
### 3.2.2 Petrographische Gesteinstypen

Anhand der petrographischen Gesteinstypen kommen die für die Bodenentwicklung entscheidenden Unterschiede in der Gesteinszusammensetzung zum Ausdruck. Eine Bodenentwicklung im anstehenden Gestein ist jedoch auf Reliefbereiche beschränkt, wo keine Umlagerungsprozesse stattfinden. Flächenmäßig dominieren in der Nordwestschweiz aber Böden in auf- und umgelagerten Deckschichten. Infolge dessen sind die gesteinspezifischen Bodeneigenschaften vielfach durch das geomorphologische Prozessgeschehen modifiziert.

Dennoch lassen sich bereits unabhängig vom Relief gesteinspezifische Ausprägungen der Entkalkungstiefe feststellen. So sind die Lösslehme in der Regel bis in Tiefen über 100 cm entkalkt (Häufigkeitsmaximum von 69,2 %), während die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches im Gehängeschutt zumeist höchstens 10 cm beträgt (Häufigkeitsmaximum von 75,7 %). Für den Großteil der Gesteinstypen erweist sich aber eine Kombination mit dem Prädiktor des Reliefstyps als zwingend. Dies ist insbesondere für die im Jura flächenmäßig dominanten Gesteinstypen der Kalke und Kalkmergel der Fall, da ihr Verlehmungsgrad und Skelettgehalt primär vom geomorphologischen Prozessgeschehen abhängig ist. So treten zum Beispiel skelettreiche Rendzinen mit sehr geringer Entkalkungstiefe insbesondere in konvex geformten Hangbereichen auf (keine Werte  $> 10$  cm), während sich innerhalb der Normalhänge auch tiefreichender entkalkte Gehängelehme entwickelt haben. Lediglich für einzelne Gesteinstypen, wie beispielsweise die Tonmergel, erfolgt die Prognose gänzlich unabhängig vom Relief, da in den weicheeren Gesteinen keine ausgeprägt konvexen Formen entstehen und die Hänge ausgeglichener sind.

### 3.2.3 Höhenlage

Die Höhenlage besitzt eine Indikatorfunktion zur Differenzierung verschiedener Ablagerungsniveaus. Im Lösshügelland lassen sich so die unterschiedlich alten und dementsprechend unterschiedlich stark entkalkten Lösslehme differenzieren. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Höhenlage entsprechend ihres Alters auch die Entkalkungstiefe der Lössle zunimmt. So herrschen bei Höhenlagen zwischen 350–400 m NN zumeist Entkalkungstiefen von 100–150 cm vor (Häufigkeitsmaximum von 75 %), während mit zunehmender Höhe gleichermaßen Entkalkungstiefen  $> 150$  cm auftreten (Abb. 3). Des Weiteren können anhand der Höhenlage die durch Erosion stark



**Abb. 3:** Die Bedeutung der einzelnen Prädiktoren: Beispiele zum Einfluss der Prädiktoren Reliefformtyp, Höhenlage und Reaktionsstufe auf die Häufigkeitsverteilung der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches.

**Fig. 3:** The effect of the predictors: examples of how the predictors landform, altitude and reactivity level influence the frequency distribution of non-calcareous soil depth.

gekappten Lössböden des Sundgauer Lösshügellandes weitgehend eingegrenzt werden (Höhenlage ≤ 350 m NN).

**3.2.4 Pflanzenökologische Reaktionsstufe**

Die pflanzenökologische Reaktionsstufe ist aus den Zeiger-eigenschaften der pflanzensoziologischen Waldgesellschaft (BURNAND & HASSPACHER 1999) abgeleitet und beschreibt die charakteristische Bodenreaktion anhand von fünf Reaktionsstufen. Insbesondere im Jura ist die Reaktionsstufe als Prädiktor von Bedeutung, um die großflächig verbreiteten Deckschichten in ihrer Entkalkungstiefe zu differenzieren. So zeigt innerhalb des Gesteinstyps der Kalke und Kalkmergel eine leicht basische bis basische Reaktion skelettreiche Verwitterungslehme mit einer geringen Entkalkungstiefe von zumeist 0–10 cm (Häufigkeitsmaximum von 60 %) an. Mittlere bis leicht saure Bodenreaktion weist hingegen auf feinmaterialreiche Gehängelehme sowie Decklehme mit einer Entkalkungstiefe von 50–100 cm hin (Abb. 3: Häufigkeitsmaximum dieser Klasse von 57,1 %).

**3.2.5 Vertikaldistanz von der Tiefenlinie**

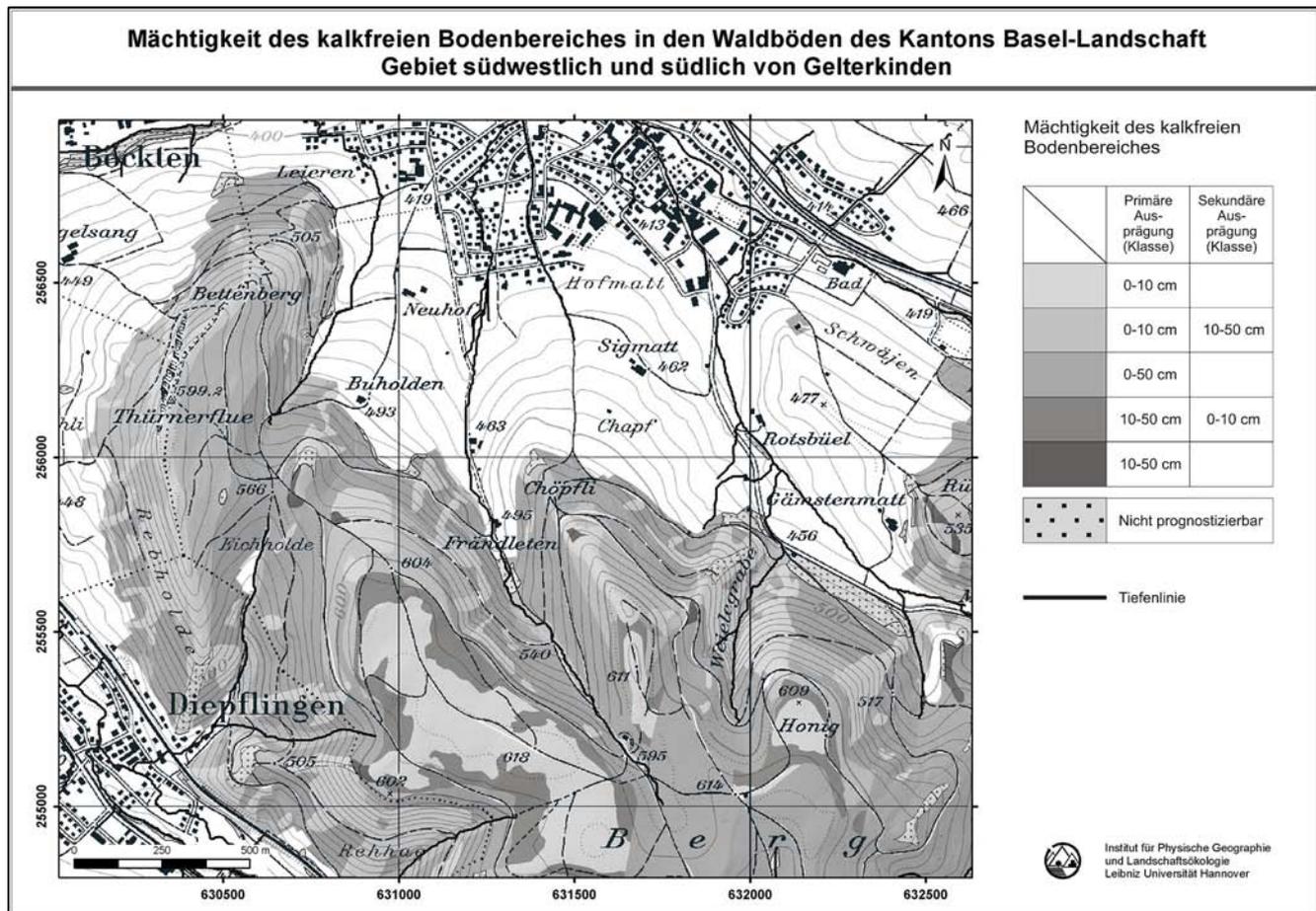
Die Vertikaldistanz von der Tiefenlinie (VDCN) gibt Auskunft über die räumliche Lage von Standorten innerhalb eines Hanges. In Abhängigkeit von der jeweiligen Hangposition wirken sich die hangabwärts gerichteten Umlagerungsprozesse unterschiedlich auf die Standorte aus. Während im Oberhang erosive Prozesse dominieren, kommt es im Unterhang verstärkt zur Deposition des erodierten Verwitterungsmaterials. Dementsprechend nehmen beim Gesteinstyp der Kalke der Anteil des verlehmteten Feinbodens und damit auch die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches im Verlauf vom Ober- zum Unterhang tendenziell zu. Innerhalb der Jura-

Hänge lassen sich so mithilfe der Vertikaldistanz von der Tiefenlinie (Schwellenwert: 60 m) differenzierte Prognosen der Entkalkungstiefe erzielen. Dabei erfolgt eine Kombination dieses Prädiktors mit der Reliefgliederung, dem Gesteinstyp und der Reaktionsstufe. Es zeigt sich deutlich, dass im definierten Oberhangsbereich (VDCN > 60 m) zumeist sehr geringe Entkalkungstiefen von 0–10 cm vorherrschen (Häufigkeitsmaximum von 70,4 %), während im Unterhang Entkalkungstiefen bis 50 cm dominieren (s. Abb. 1).

**3.2.6 Das Zusammenwirken der Prädiktoren am Beispiel des Gebietes zwischen Thürner Fluh und Berg**

Der Einfluss der einzelnen Prädiktoren auf die räumliche Differenzierung der Prognosewerte lässt sich anhand des Kartenausschnittes aus dem Gebiet südwestlich und südlich von Gelterkinden (Tafeljura) veranschaulichen (Abb. 4): Innerhalb der von Umlagerungsprozessen unbeeinflussten Scheitel- und Plateaulagen ist die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches in der Regel sehr gering (0–10 cm), da sich die Böden im anstehenden Kalkstein entwickelt haben. Lediglich in Bereichen mit abweichendem Gesteinsuntergrund treten auch größere Entkalkungstiefen von bis zu 50 cm auf. Dies ist beispielsweise auf dem Plateau im Gebiet Berg der Fall. Dort stehen Tonmergel an, deren Entkalkungstiefe aufgrund ihres variierenden Kalkgehaltes und geringfügigen Resten von Riss-Grundmoräne und Decklehmen stets zwischen 0 cm und 50 cm liegt.

In den Hangbereichen führen Deckschichten zu einem kleinräumig differenzierten Verteilungsmuster der Prognosewerte. Mithilfe der Hangneigung (Schwellenwert: 32°) lassen sich dort sehr stark geneigte Hangbereiche identifizieren, die



**Abb. 4:** Ausschnitt aus der Prognosekarte im Gebiet südwestlich und südlich von Gelterkinden (Tafeljura).

**Fig. 4:** Section of prediction map of the area southwest and south of Gelterkinden (Table Jura).

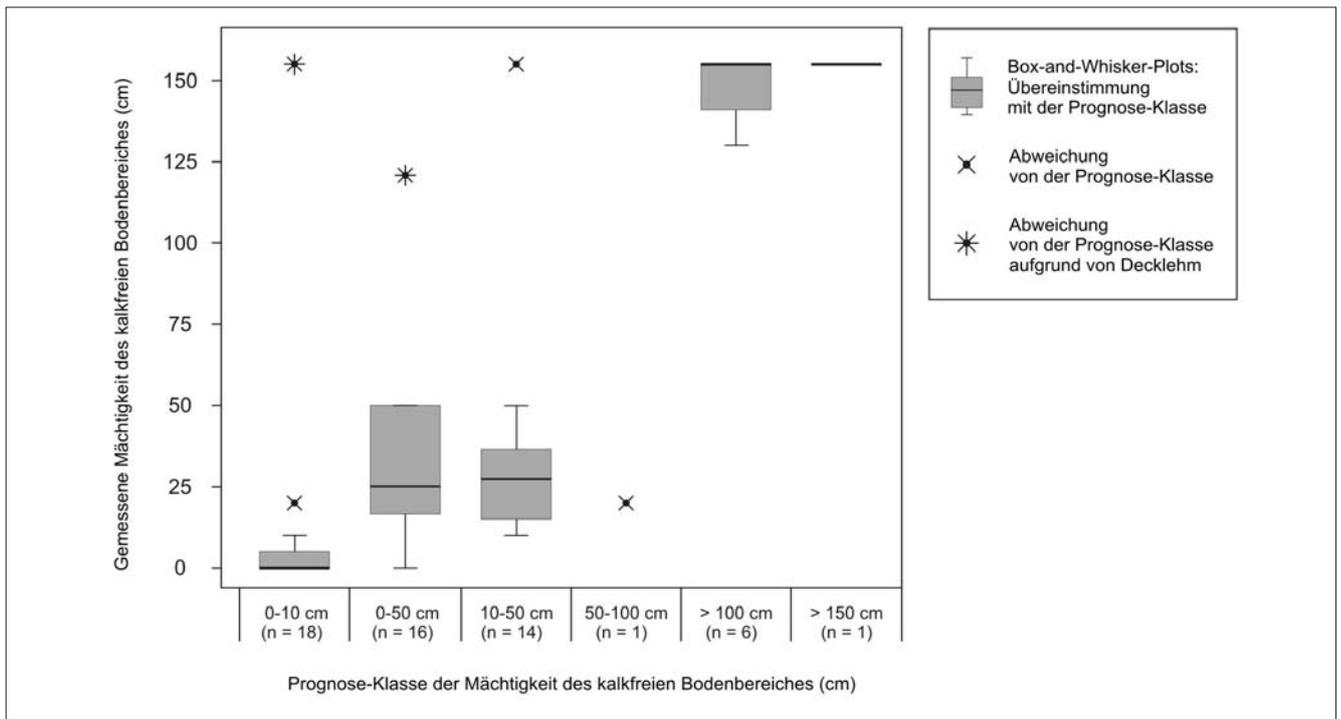
grundsätzlich von skelettreichen Gehängeschutten bedeckt und damit bis nahe an die Oberfläche kalkhaltig sind (z. B. Flurbezeichnung Rebholde). Eine weitergehende Differenzierung der Hänge erfolgt durch die Abgrenzung konvex geformter Hangbereiche (z. B. nördlich der Flurbezeichnung Bettenberg). Darüber hinaus lassen sich die relativ einheitlich geformten Normalhänge mithilfe der Vertikaldistanz von der Tiefenlinie (Schwellenwert: 60 m) in einen Ober- und Unterhang differenzieren. Dies zeigt sich innerhalb des Kartenausschnittes beispielsweise anhand des in östliche Richtung geneigten Hanges unterhalb des Hangrückens der Thürnerflue. Innerhalb dieses Hanges nehmen der Anteil des verlehnten Feinbodens und damit auch die Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches aufgrund der Umlagerungsprozesse vom Ober- zum Unterhang zu.

### 3.3 Validierung des Prognosemodells

Die Validierung des Prognosemodells erfolgt anhand eines unabhängigen Datensatzes von 56 Standorten aus anderen Untersuchungen. Diese stammen größtenteils aus dem westlichen Faltenjura sowie vereinzelt aus dem Tafeljura und dem Sundgauer Lösshügelland. Das Stichprobenkollektiv ist nicht normalverteilt, sondern weist eine Dominanz geringer Entkalkungstiefen zwischen 0 cm und 50 cm auf. Entkalkungstiefen zwischen 50 cm und 100 cm sind hingegen kaum vertreten. Dafür gibt es zwei Gründe: Entkalkungstiefen von 50–100 cm kommen im Kanton Basel-Landschaft insgesamt wenig vor und die Region Faltenjura ist im Stichproben-

kollektiv übervertreten. Zwischen den gemessenen Werten des Validierungsdatensatzes und den Mittelwerten der prognostizierten Klassen herrscht eine starke Korrelation vor (Rangkorrelations-Koeffizient nach SPEARMAN:  $r_s = 0,715$  mit  $p \leq 0,001$ ). Zum Vergleich sind die gemessenen Werte in Form von Box-and-Whisker-Plots für die einzelnen Prognose-Klassen dargestellt (Abb. 5).

Insgesamt entfallen 91 % der gemessenen Werte ( $n = 51$ ) auf die prognostizierten Klassen, wobei zumeist bereits die primäre Prognose-Klasse dem gemessenen Wert entspricht. Im prognostizierten Wertebereich unter 50 cm (Prognose-Klassen 0–10 cm, 0–50 cm und 10–50 cm) treten jedoch vereinzelt starke Abweichungen in Form einer Unterschätzung der Entkalkungstiefen auf. Grund dafür ist das vereinzelte Vorkommen sehr tief entkalkter Decklehme, die nicht kartiert sind und damit im Prädiktorendatensatz fehlen. Die starken Abweichungen von der prognostizierten Entkalkungstiefe sind also zumeist auf Diskrepanzen zwischen der Gesteinsinformation der geologischen Karten und dem tatsächlich bodenbildenden Ausgangsgestein zurückzuführen. Auch die fehlerhafte Prognose für den Standort mit einer prognostizierten Entkalkungstiefe von 50–100 cm lässt sich auf die Datengrundlage zurückführen. Hier liegt die Unschärfe jedoch nicht im Gesteinstyp sondern in den Informationen zur pflanzensoziologischen Waldgesellschaft. So befindet sich dieser Standort im Grenzbereich zwischen den Arealen unterschiedlicher Waldgesellschaften, die eine schwach saure bzw. alkalische Bodenreaktion beschreiben. Aufgrund seiner räumlichen Lage im Randbereich des Areals



**Abb. 5:** Validierung des Prognosemodells zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches: Box-and-Whisker-Plots der gemessenen Werte von 56 Standorten, differenziert nach den Prognose-Klassen. Entkalkungstiefen > 150 cm wird der Wert 155 cm zugewiesen. Werte von 50–100 cm Entkalkungstiefe sind im Validierungsdatensatz nur mit einem Fall vertreten, weil diese Entkalkungstiefen im Kanton Basel-Landschaft nur selten vorkommen.

**Fig. 5:** Validation of the prediction model of the non-calcareous depth of forest soils: box and whisker plots of measured values from 56 sample sites, differentiated according to the predicted classes. A value of 155 cm is assigned to non-calcareous soil depths > 150 cm. A value within the 50–100 cm range for non-calcareous soil depth is listed only once in the validation dataset because these depths seldom occur in the Canton Basel-Landschaft.

einer schwach sauren Reaktionsstufe, ist eine für Decklehme typische Entkalkungstiefe von 50–100 cm prognostiziert worden. Bei diesem Standort handelt es sich jedoch um eine Fels-Rendzina, die nur einen sehr geringmächtigen Decklehmrest aufweist und aufgrund dessen eine für das angrenzende Areal mit alkalischer Reaktionsstufe typische Entkalkungstiefe von 10–50 cm aufweist.

Das Validierungsergebnis macht deutlich, dass die Prognose sowohl im Wertebereich geringer ( $\leq 50$  cm) als auch sehr hoher (> 100 cm) Entkalkungstiefen eine hohe Qualität aufweist und auftretende Abweichungen zumeist auf die Datengrundlagen zurückzuführen sind. Eine Beurteilung der Qualität für den prognostizierten Wertebereich mittlerer Entkalkungstiefen (50–100 cm) ist jedoch wegen der sehr geringen Stichprobenzahl nicht möglich.

### 3.4 Grenzen des Prognosemodells

Eine direkte Begrenzung erfährt das Modell dort, wo die Ausprägung der Bodeneigenschaft nicht prognostiziert werden kann. Dies trifft insgesamt auf rund 13 % der Waldfläche im Untersuchungsgebiet zu. Die Gründe für die Ausweisung von Flächen ohne Aussage sind vielfältig, wobei technische Aspekte überwiegen (Tab. 2): Fehlende oder unplausible Prädiktoren/-kombinationen stellen den Hauptgrund dar. Beispielsweise fehlen für einige Flächen die Informationen zur pflanzensoziologischen Waldgesellschaft. In anderen Gebieten weicht das bodenbildende Ausgangsgestein teilweise völlig von den Informationen der geologischen Karten ab, da die Deckschichten (Löss- und Decklehm, Gehängelehm und

-schutt) nicht vollständig kartiert sind (MOSIMANN et al. 2011). Der Informationsgehalt einzelner Prädiktoren ist dementsprechend eingeschränkt.

Aus inhaltlicher Sicht überwiegen gesteinspezifische Heterogenitäten. So kann zum Beispiel für den Gesteinstyp Mergel und Sandstein grundsätzlich keine Prognose zur Entkalkungstiefe gegeben werden, da innerhalb der stratigraphischen Einheit des Keuper auch kalkfreie oder nahezu kalkfreie Gesteine vorkommen. Im Lösshügelland besteht zudem in einzelnen Gebieten eine kleinräumige Variabilität der Entkalkungstiefe infolge der Kappung der Lössböden durch Bodenerosion.

Neben dieser eingeschränkten Prognose-Möglichkeit unterliegt das Modell zudem einer Begrenzung im Bezug auf die Genauigkeit der Prognose. Wie präzise das Prognosemodell an das Untersuchungsgebiet angepasst ist, wird anhand der Abb. 6 deutlich. Insgesamt werden rund 85 % der im Kalibrierungsdatensatz enthaltenen Fälle ( $n = 227$ ) in den Entscheidungsbäumen korrekt abgebildet, wobei in über 66 % der Fälle bereits eine Übereinstimmung in der primären Prognose-Klasse vorliegt.

Die höchste Kalibrierungsgüte erreicht das Modell im Bereich sehr großer Entkalkungstiefen von über 100 cm (Prognose-Klassen 100–150 cm, > 100 cm und > 150 cm). Dort entfallen zwischen 88 % und 100 % der Messwerte auf die prognostizierten Wertebereiche. Eine vergleichbare Situation herrscht bei sehr geringen Entkalkungstiefen von 0–10 cm vor. Dort liegt in knapp 85 % der Fälle eine Übereinstimmung vor, wobei die primäre Prognose-Klasse den weitaus

**Tab. 2:** Übersicht zu den Gründen für die Ausweisung von Flächen ohne Prognose. Die Prozentangaben geben die Anteile an der gesamten Waldfläche wieder.

**Tab. 2:** Overview of factors that can lead to the modeling of unpredictable areas. The percent values indicate the amount in relation to the total forest area.

Gründe für Flächen ohne Prognose	Prädikatorensituation ohne Prognosemöglichkeit mit größtem Flächenanteil	
Inhaltliche Gründe	Heterogenität ist zu groß (5,37 %)	Gesteinstyp Mergel & Sandstein
	Anthropogener Boden (0,05 %)	Gesteinstyp Anthropogene Aufschüttung
Technische Gründe	Prädikatorenkombination ist unplausibel (5,11 %)	Schotterablagerungen in Jurahängen
	Prädikator fehlt (1,31 %)	Information zur Waldgesellschaft
	Stichprobe ist zu klein (0,82 %)	Schotterablagerungen in Tiefenbereichen
	Untersuchungen fehlen (0,06 %)	Muldenbereiche auf Plateaus

größten Anteil (83 %) einnimmt. Im mittleren Wertebereich zwischen 10 cm und 100 cm weist das Modell die geringste Kalibrierungsgüte auf. Hier wird im schlechtesten Fall nur eine Übereinstimmung von 75 % erreicht (Prognose-Klasse 50–100 cm).

Neben einer insgesamt hohen Kalibrierungsgüte zeigt sich aber auch, dass in einzelnen Prognose-Klassen häufig erst eine Übereinstimmung in der sekundären Klasse vorliegt. So sind z. B. bei der Prognose-Klasse 10–50 cm, bei einer korrekten Abbildung von insgesamt 76 % der Stichproben, rund 35 % auf die Übereinstimmung in der sekundären Prognose-Klasse zurückzuführen. Und bei der Prognose-Klasse 50–100 cm liegt der Anteil der Übereinstimmung mit 30 % von insgesamt 75 % in der sekundären Prognose-Klasse. Begründet liegt dies in der kleinräumlichen Variabilität der Gehängelehme, deren Entkalkungstiefe aufgrund ihres heterogenen Aufbaus eine hohe Spannweite aufweist (Abb. 1). So ist die Genauigkeit der Prognose trotz großer Stichprobenumfänge innerhalb dieser Prognose-Klassen eingeschränkt.

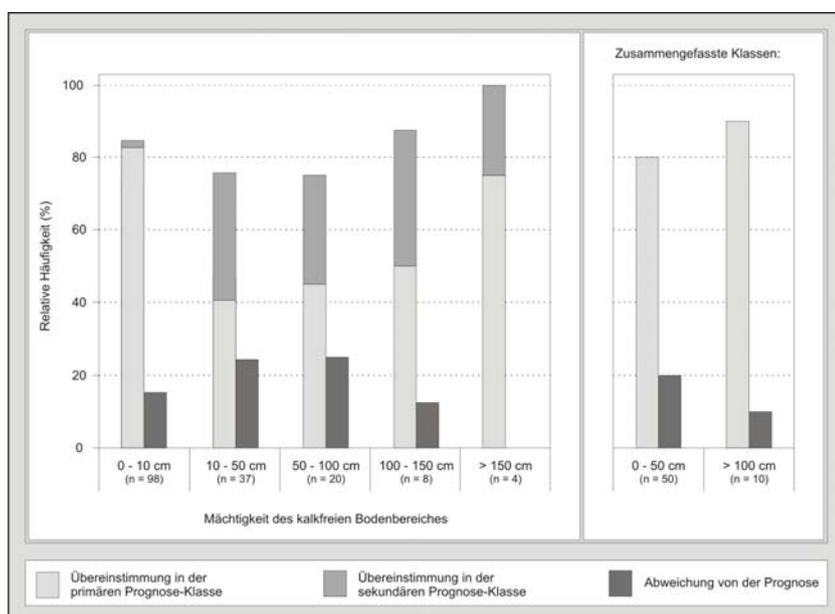
Die prinzipiellen Einschränkungen der Prognose-Möglichkeit und -Genauigkeit sind primär auf die Datengrundlagen (eingeschränkter Informationsgehalt der Prädiktoren) sowie

auf die zum Teil große räumliche Heterogenität der Bodeneigenschaften (kleinräumige Variabilitäten innerhalb eines Gesteinstyps) zurückzuführen. Eine Optimierung der Prognose lässt sich dementsprechend nur durch die Verbesserung der Grunddaten erreichen.

#### 4 Schlussfolgerungen: Anwendung des Prognosemodells

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Gefährdung von Waldökosystemen durch Nährstoffmangel ist mithilfe wissenschaftlicher Modellierung eine Prognosekarte zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches der Waldböden im Kanton Basel-Landschaft (Nordwestschweiz) erstellt worden.

Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen lassen sich in weitergehenden Schritten Informationen zur Nährstoffversorgung der Wälder gewinnen: Liegt die Kalkgrenze im Wurzelraum, so ist unter Berücksichtigung des Skelettgehaltes, der Gründigkeit und der Vernässung aufgrund der großen Menge an zur Verfügung stehenden Nährstoffen (Ca- und Mg-Kationen) von einer guten Nährstoffversorgung auszugehen.



**Abb. 6:** Kalibrierungsgüte des Prognosemodells zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches: Vergleich der prognostizierten Klassen mit den gemessenen Werten des Kalibrierungsdatensatzes. Fälle, die auf Flächen ohne Prognose entfallen, sind ausgeschlossen.

**Fig. 6:** Calibration quality of the prediction model of the non-calcareous soil depth of forest soils: Comparison of predicted classes with measured values taken from the calibration dataset. Cases of unpredictable areas were excluded.

Befindet sich die Kalkgrenze hingegen unterhalb des Wurzelraumes und ist der Versauerungsprozess weit fortgeschritten (pH-Werte < 5), so besteht die Gefahr von Nährstoffmangel. Um dieses Risiko einschätzen zu können und Waldstandorte mit unzureichender Nährstoffversorgung zu identifizieren, werden u. a. flächendifferenzierte Informationen zur Basensättigung der Waldböden benötigt, da in Abhängigkeit von der Baumart für ein stabiles Waldwachstum eine Mindestanforderung an den Basensättigungsgrad des Bodens besteht (PUHE & ULRICH 2001). Ziel ist es daher, aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen, ein Prognosemodell zur Basensättigung zu entwickeln. Die Entkalkungstiefe ist dabei von großer Bedeutung, da die Basensättigung versauerter Bodenbereiche in Abhängigkeit der Entkalkungstiefe stark variieren kann (BLASER et al. 2008c).

Aus langfristiger Sicht können die Informationen zur Entkalkungstiefe zudem in Kombination mit weiteren Waldbodeneigenschaften für die Beurteilung des Versauerungsrisikos verwendet werden. Das Versauerungsrisiko beschreibt die Empfindlichkeit des Bodens gegenüber einer potentiellen Abnahme des pH-Wertes und der Basensättigung sowie einer möglichen Aluminium-Toxizität bei den Pflanzen (BLASER et al. 2008b). Die vorliegenden Informationen zur Entkalkungstiefe stellen eine wichtige Grundlage zur Beurteilung des Versauerungsrisikos dar, weil sich das Vorhandensein kalkhaltiger Bodenbereiche positiv auf den bodenchemischen Zustand auswirkt: So werden dem Boden über den Streufall oder aufwärts gerichtete Diffusion zusätzlich basische Kationen zugeführt, die Protonen vom Austauscher verdrängen können (WALTHERT et al. 2004). Untersuchungen zum Versauerungsrisiko der Waldböden im Kanton Bern belegen, dass die Empfindlichkeit gegenüber einer schnell fortschreitenden Bodenversauerung bei Standorten mit kalkhaltigem Untergrund vergleichsweise geringer ist (ZIMMERMANN et al. 2010). Für die zukünftige Beurteilung des Versauerungsrisikos kann z. B. an das System von BLASER et al. (2008a, 2008b) angeknüpft werden, um empfindliche Waldböden zu identifizieren und vorsorgende Maßnahmen ergreifen zu können. Das Prognosemodell zur Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches bildet dafür eine wichtige Grundlage.

## Literatur

- ABEREGG, F., EGLI, M., SARTORI, G., PURVES, R. (2009): Modelling spatial distribution of soil types and characteristics in a high Alpine valley (Val di Sole, Italy). *Studi Trent. Sci. Nat.* **85**: 39-50.
- BELL, J.C., THOMPSON, J.A., BUTLER, C.A., MCSWEENEY, K. (1994): Modeling soil genesis from a landscape perspective. In: ETCHEVERS, B.J.D. (Hrsg.): *Transactions of the 15<sup>th</sup> world congress of soil science, July 1994, Acapulco, Mexico, Vol. 6a, ISSS, Mexico*: 179-195.
- BISHOP, T.F.A., McBRATNEY, A.B. (2001): A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma* **103**: 149-160.
- BLASER, P., WALTHERT, L., ZIMMERMANN, S., GRAF PANNATIER, E., LUSTER, J. (2008a): Classification schemes for the acidity, base saturation, and acidification status of forest soils in Switzerland. *J. Plant Nutr. Soil Science.* **171**: 163-170.
- BLASER, P., WALTHERT, L., GRAF PANNATIER, E. (2008b): The sensitivity of Swiss forest soils to acidification and the risk of aluminum toxicity. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **171**: 605-612.
- BLASER, P., GRAF PANNATIER, E., WALTHERT, L. (2008c): The base saturation in acidified Swiss forest soils on calcareous and noncalcareous parent material. A pH-base saturation anomaly. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **171**: 155-162.
- BURNAND, J., HASSPACHER, B. (1999): Waldstandorte beider Basel. Quellen und Forschungen zur Geschichte und Landeskunde des Kantons Basel-Landschaft, Bd. **72**. Verlag des Kantons Basel-Landschaft, Liestal: 266 S.
- CIALELLA, A.T., DUBAYAH, R., LAWRENCE, W., LEVINE, E. (1997): Predicting soil drainage class using remotely sensed and digital elevation data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **63** (2): 171-178.
- 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, M., VÖKT, U., KELLER, F. (2005): Bodenmodellierung mit GIS im hochalpinen Raum. *Geomatik Schweiz* **8**: 458-462.
- FLORINSKY, I.V., EILERS, R.G., MANNING, G.R., FULLER, L. G. (2002): Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environ. Model. Softw.* **17**: 295-311.
- FLORINSKY, I.V. (2012): *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Academic press, Amsterdam (u. a.): 377 S.
- FLÜCKIGER, W., BRAUN, S. (2009a): Bodenversauerung – aktueller Kenntnisstand. *Zür. Wald* **41** (1): 10-14.
- FLÜCKIGER, W., BRAUN, S. (2009b): Wie geht es unserem Wald? 25 Jahre Walddauerbeobachtung, Bericht 3. IAP, Schönenbuch: 87 S.
- HEINTZE, F., ANDRAE, H. (2011): Die zweite Bodenzustandserhebung in Sachsen – Erste Ergebnisse zur zeitlichen Veränderung des chemischen Bodenzustandes zwischen 1992/93 und 2006/08. *Schr.reihe Freib. Forstl. Forsch.* **88**: 33-41.
- 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* **4**: 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): 1-22.  
<http://dx.doi.org/10.1127/0372-8854/2012/0069>
- HOWELL, D., KIM, Y., HAYDU-HOUDESHELL, C., CLEMMER, P., ALMARAZ, R., BALLMER, M. (2007): Fitting soil property spatial distribution models in the Mojave Desert for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P., McBRATNEY, A. B., VOLTZ, M. (Hrsg.): *Digital soil mapping, an introductory perspective. Developments in soil science, Vol. 31*, Elsevier, Amsterdam (u. a.): 465-485.
- McKENZIE, N.J., RYAN, P.J. (1999): Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* **89**: 67-94.
- MERTENS, M., NESTLER, I., HUWE, B. (2002): GIS-based regionalization of soil profiles with Classification and Regression Trees (CART). *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **165**: 39-43.
- MOSIMANN, T. (2011): Waldböden im Kanton Basel-Landschaft (NW-Schweiz) – Vielfalt, ökologische Eigenschaften und Verbreitung. *Mitt. Nat.forsch. 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.
- PUHE, J., ULRICH, B. (2001): Global climate change and human impacts on forest ecosystems: Postglacial development, present situation, and future trends in Central Europe. *Ecological Studies, Bd. 143*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York: 592 S.

- WALTHERT, L., ZIMMERMANN, S., BLASER, P., LUSTER, J., LÜSCHER, P. (2004): Waldböden der Schweiz, Bd. 1: Grundlagen und Region Jura. Hep Verlag, Bern: 768 S.
- WOLFF, B., RIEK, W. (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996 – Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987–1993 (BZE), Bd. 1. Bonn: 186 S.
- ZIMMERMANN, S., CHERVET, A., MAURER, C.G., STRUNY, W. (2010): Säurestatus und Versauerungszustand von Waldböden im Kanton Bern. Schweiz. Z. Forstwes. **161** (12): 524-529.
- ZIRLEWAGEN, D. (2003): Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften. Schr.reihe Freib. Forstl. Forsch. **19**: 154 S.
- ZIRLEWAGEN, D., RABEN, G., VON WILPERT, K. (2006): Regionalisierung von Daten der forstlichen Umwelt-Messnetze. AFZ/Wald **21**: 1166-1167.

submitted: 26.03.2012

reviewed: 27.06.2012

accepted: 17.07.2012

**Autorenanschrift:**

Dipl.-Geogr. Kristin Fracek  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie-  
Schneiderberg 50, 30167 Hannover  
E-Mail: fracek@phygeo.uni-hannover.de

Prof. Dr. Thomas Mosimann  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie-  
Schneiderberg 50, 30167 Hannover  
E-Mail: mosimann@phygeo.uni-hannover.de