

**Tagungsbeitrag zu:** Jahrestagung der DBG, Kommission III

**Titel der Tagung:** Horizonte des Bodens  
DBG, 2.-7. September 2017, Göttingen

**Berichte der DBG** (nicht begutachtete online Publikation)

<http://www.dbges.de>

## **Modellgestützte Analyse räumlicher Dekompositionsmuster im Hochgebirge**

Niels Hellwig<sup>1</sup>, Kerstin Anschlag<sup>1</sup>, Gabriele Broll<sup>1</sup>

### **Zusammenfassung**

Dekompositionsprozesse stehen in starker Abhängigkeit zu äußeren Bedingungen wie Relief, Klima und Vegetation. Derartige Umwelteinflüsse weisen in Hochgebirgen eine besonders hohe Heterogenität auf. Die unterschiedlichen Dynamiken des Streuabbaus zeigen sich in diesen Regionen in einer kleinräumigen Vielfalt an Zersetzergesellschaften und Humusformen sowie einer entsprechend weiten Spanne bodenmikrobiologischer Eigenschaften. Aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit vieler Bereiche kann bei der Kartierung bodenökologischer Parameter im Hochgebirge im Regelfall nicht auf ein dichtes Netz an Beprobungsorten zurückgegriffen werden. Daher sind sowohl die Wahl möglichst repräsentativer Untersuchungsstandorte als auch geeignete Methoden zur räumlichen Modellierung erforderlich. In dieser Studie wurden bodenökologische Zusammenhänge in einem Gebiet in den norditalienischen Alpen (Val di Sole / Val di Rabbi, Trentino) untersucht. Ziel war die Analyse von Dekompositionsmustern in den bewaldeten Flächen des Untersuchungsgebietes durch die Analyse kleinräumiger Variabilität auf Ebene eines Untersuchungsstandortes (625 m<sup>2</sup>) sowie Erstellung räumlicher Modelle auf der Ebene eines Hanges

(ca. 3 km<sup>2</sup>) und des gesamten Untersuchungsgebietes (523 km<sup>2</sup>).

Die Auswahl der Untersuchungsstandorte erfolgte mittels Conditioned Latin Hypercube Sampling und Expertenwissen. Die Datengrundlage für die räumliche Modellierung boten Geländedaten zu Humusformen (Vorhandensein von Auflagehorizonten sowie biologische Aktivität im A-Horizont). Für die Modellierung auf Hangebene wurde ein Random Forest genutzt, dem erklärende Variablen zur Beschreibung der Umweltbedingungen (im Hochgebirge v. a. durch das Relief beeinflusst) zugrunde lagen. Auf Ebene des Untersuchungsgebietes wurden für die Modellierung Entscheidungsbäume und Fuzzy-Logik genutzt.

Die Dekompositionsmuster zeigen auf den verschiedenen Skalenebenen unterschiedlich starke Abhängigkeiten von den untersuchten Umwelteinflüssen. Während die Muster auf Standortebene primär mit unterschiedlicher Bodenvegetation zusammenhängen, lassen sie sich auf den übergeordneten Ebenen vor allem durch die Höhe ü. NN und die Hangexposition erklären. An höher gelegenen und nordexponierten Standorten sind die Umweltbedingungen für Dekompositionsprozesse in der Regel ungünstiger als an tiefer gelegenen und südexponierten Standorten.

**Schlüsselwörter:** Humusformen, Upscaling, Räumliche Modellierung, Random Forest, Fuzzy-Logik

### **Einleitung**

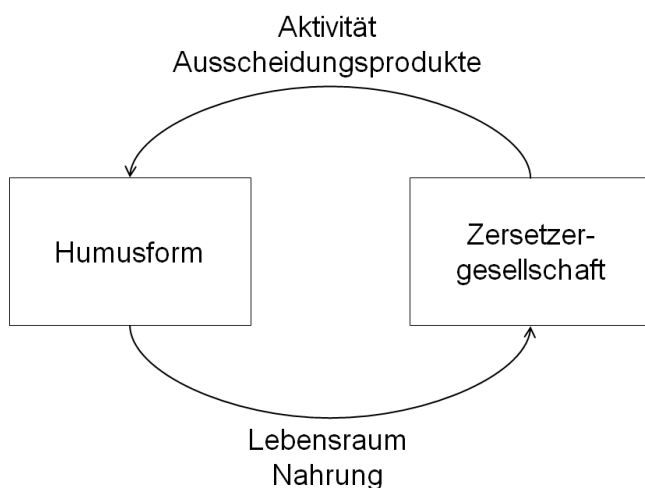
Unter den Horizonten des Bodens sind vor allem die organischen Auflagehorizonte sowie der oberste Mineralbodenhorizont für die Analyse des Abbaus organischer Substanz interessant, da sich hier die morphologischen Auswirkungen der Akkumulation und Zersetzung von Pflanzenstreu sowie der Zersetzung oberflächennaher Wurzelreste zeigen. Je nach Vorhandensein der Auflagehorizonte L, Of und Oh sowie nach biologischer Aktivität im A-Horizont (Vorliegen eines biogenen, gut strukturierten Bodengefüges) können Mineralboden-Humusformen (Mull) und Auf-

---

<sup>1</sup> Universität Osnabrück, Institut für Geographie, AG Agrarökologie und Bodenforschung, Seminarstraße 19ab, 49074 Osnabrück  
niels.hellwig@uni-osnabrueck.de

lage-Humusformen (Moder und Rohhumus) unterschieden werden. Dazwischen gibt es Übergangsformen (Mullmoder, auch Mullartiger Moder). An Standorten im mitteleuropäischen Hochgebirge wurde zudem die Humusform Amphimull beschrieben, die sich durch das Vorhandensein von L-, Of- und Oh-Lage bei gleichzeitigem Vorliegen eines A-Horizontes mit hoher biologischer Aktivität auszeichnet (Graefe 2007). An steilen Hangstandorten können des Weiteren erodierte Moderformen beschrieben werden, die im Gegensatz zur üblichen Humusform Moder aufgrund von Erosion am Hang lediglich eine geringmächtige L- und gegebenenfalls Of-Lage aufweisen (Hagerhumus).

Die Humusform steht in enger Wechselwirkung mit der Zersetzergesellschaft (Abb. 1). Daher hat sie sich als im Gelände schnell zu erfassender Indikator für die durch die Zersetzergesellschaft betriebenen Abbauprozesse organischer Substanz etabliert. Durch die relativ schnelle Veränderung der Humusform als Reaktion auf Umweltveränderungen (z. B. Zusammensetzung des Pflanzenbestandes) eignen sich Humusformen außerdem, um den Übergang von Ökosystemen zwischen verschiedenen Zuständen anzuzeigen. Dies ist in unterschiedlichen Kontexten für das Landschaftsmanagement von Bedeutung (z. B. für die Forstwirtschaft, den Naturschutz oder die Bewertung von Umweltveränderungen).



**Abb. 1:** Wechselwirkungen zwischen Humusform und Zersetzergesellschaft.

Naturräumliche Variabilität im Hochgebirge wird auf Landschaftsebene vor allem durch das Relief bestimmt. Eine hohe Reliefenergie prägt hier den kleinräumigen Wechsel der klimatischen Verhältnisse, was sich auch in der Abfolge verschiedener Vegetationsstufen niederschlägt. In diesem Beitrag sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Was sind die (topographisch bedingten) Haupteinflussfaktoren für den Abbau organischer Substanz in den Wäldern des Hochgebirges?
- Wie unterscheiden sich Dekompositionsmuster in Abhängigkeit von der räumlichen Skalenebene?
- Welche Methoden eignen sich zur Prognose von Dekompositionsmustern auf verschiedenen Modellskalen?

### Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die an den Hängen der Alpentäler Val di Sole und Val di Rabbi (Provinz Trentino, Italien) gelegenen Waldstandorte auf silikatischem Ausgangsgestein (überwiegend Paragneis und Orthogneis). Unterhalb von etwa 1900 m lassen sich die Böden überwiegend als Haplic Cambisols (Dystric) und Umbric Podzols charakterisieren, oberhalb dominieren Entic Podzols, Albic Podzols und Umbric Podzols (Sartori & Mancabelli 2009). Die vorherrschenden Baumarten sind Lärche (*Larix decidua*) und Fichte (*Picea abies*).

### Material und Methoden

Je nach räumlicher Skalenebene unterscheidet sich das Forschungsdesign. Auf Hangebene wurden aus einem Digitalen Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 1 m, basierend auf LiDAR-Daten (Provincia Autonoma di Trento, Ufficio Sistemi Informativi – Servizio autorizzazioni e valutazioni ambientali), Reliefparameter abgeleitet (Details bei Anschlag et al. 2017). Durch die Anwendung von Conditioned Latin Hypercube Sampling wurde daraus jeweils ein optimaler, d. h. hinsichtlich der Umweltparameter möglichst repräsentativer Satz von 30 Standorten an einem süd- und einem nordexponierten Hang

im Val di Rabbi ermittelt. An diesen Standorten wurden jeweils Daten zu Humusformen (Vorhandensein von Auflagehorizonten und biologische Aktivität im A-Horizont) aufgenommen. Zur räumlichen Modellierung der Dekompositionsmuster wurde ein Random Forest (Breiman 2001) und Kriging der Residuen (Heuvelink & Webster 2001) genutzt (Abb. 2). Zur Analyse der Wichtigkeit der Einflussvariablen im Random Forest werden die durch die jeweilige Variable bedingten a) prozentualen Veränderungen im Vorhersagefehler bezogen auf den Out-Of-Bag-Datensatz (%IncMSE) (Liaw & Wiener 2002) und b) Differenzen in der Reinheit der Baumknoten (IncNodePurity) berechnet.

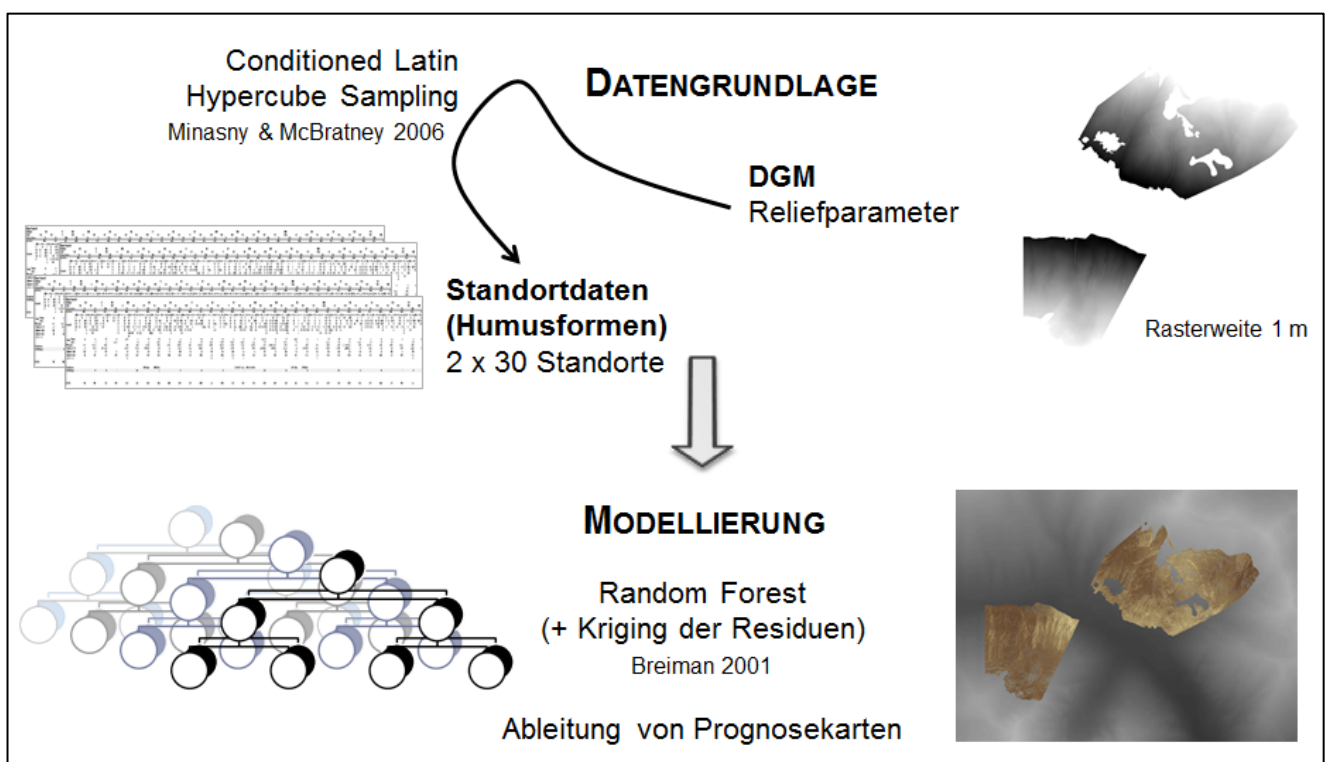
Auf lokaler Ebene wurden jeweils auf drei verschiedenen Höhen Standorte an nordexponierten (N1, N2, N3) und südexponierten Hängen (S6, S7, S8) auf der Basis von Expertenwissen und vorherigen Studien (Egli et al. 2006) ausgewählt. An diesen Standorten wurde die kleinräumige Variabilität der Krautschicht und der Humusformen auf einer Fläche von 25 m x 25 m erfasst (Details bei Hellwig et al. 2017).

Für das Upscaling der lokalen Daten auf die Landschaftsebene wurden entsprechend der Verteilung der Untersuchungsstandorte die

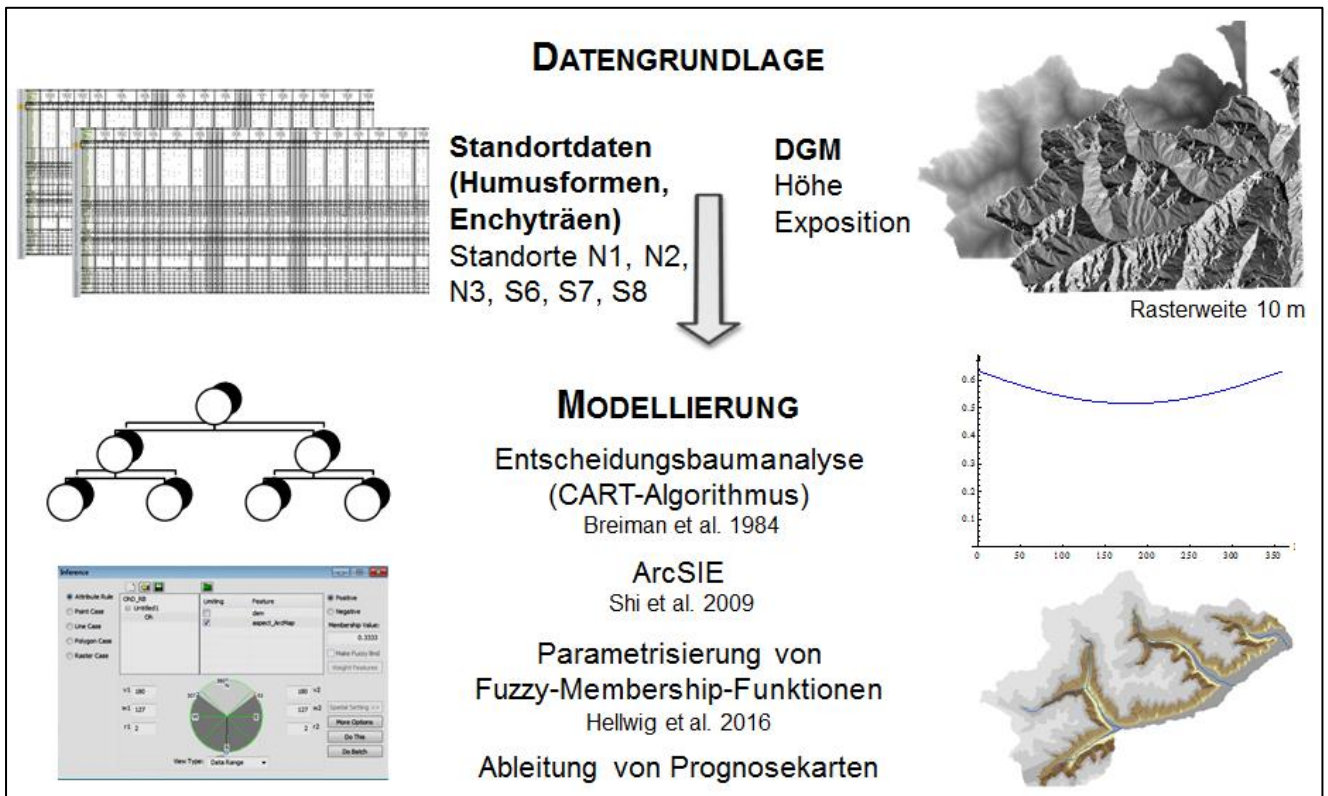
Einflüsse von Höhe und Hangexposition (aus einem DGM mit einer Auflösung von 10 m, Museo Tridentino di Scienze Naturali) modelliert. Aufgrund der geringen Anzahl an Standorten bestand die Modellierung aus einem einfachen Entscheidungsbaum (Anwendung des CART-Algorithmus), aus dessen Struktur anschließend Fuzzy-Membership-Funktionen parametrisiert wurden (Abb. 3).

## Ergebnisse

Tab. 1 enthält die Wichtigkeiten der Einflussvariablen in den Random-Forest-Modellen auf Hangebene. Die durch diese Modelle erklärte Varianz beträgt für das Vorhandensein von Auflagehorizonten 18 %, für die biologische Aktivität im A-Horizont 24 %. Das Kriging der Residuen aus den Random-Forest-Modellen ermöglichte trotz des geringen Erklärungsgehaltes der Random-Forest-Modelle die Ableitung von Vorhersagen für Dekompositionsmuster (siehe Hellwig et al., submitted). Mehr Details zu den Ergebnissen in der Verteilung von Humusformen, pH-Werten und mikrobiologischen Eigenschaften des Oberbodens finden sich ebenfalls bei Hellwig et al. (submitted).



**Abb. 2:** Datengrundlage und Methoden zur Modellierung auf Hangebene.



**Abb. 3:** Datengrundlage und Methoden zur Modellierung auf Landschaftsebene.

Die Erhebungen zu Humusformen auf lokaler Ebene zeigen einen deutlichen Zusammenhang mit der Vegetation der Krautschicht. Tab. 2 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für Standort N1 (1200 m ü. NN, nordexponiert). Daraus lassen sich regelhafte Beschreibungen der Verteilungsmuster für Humusformen beschreiben. Für Standort N1 liegt folgende Verteilung vor:

- Farn: Mull, überwiegend F-Mull
  - Moos: Mull, überwiegend F-Mull
  - Streu: Typischer Moder, teils erodiert
  - Zweige: Typischer Moder, teils mullartig
- Die Ergebnisse des Upscaling der lokalen Daten zeigen eine starke Abhängigkeit der Dekompositionsmuster auf Landschaftsebene von der Höhe sowie der Hangexposition.

**Tab. 1:** Wichtigkeit der Einflussvariablen in den Random-Forest-Modellen auf Hangebene.

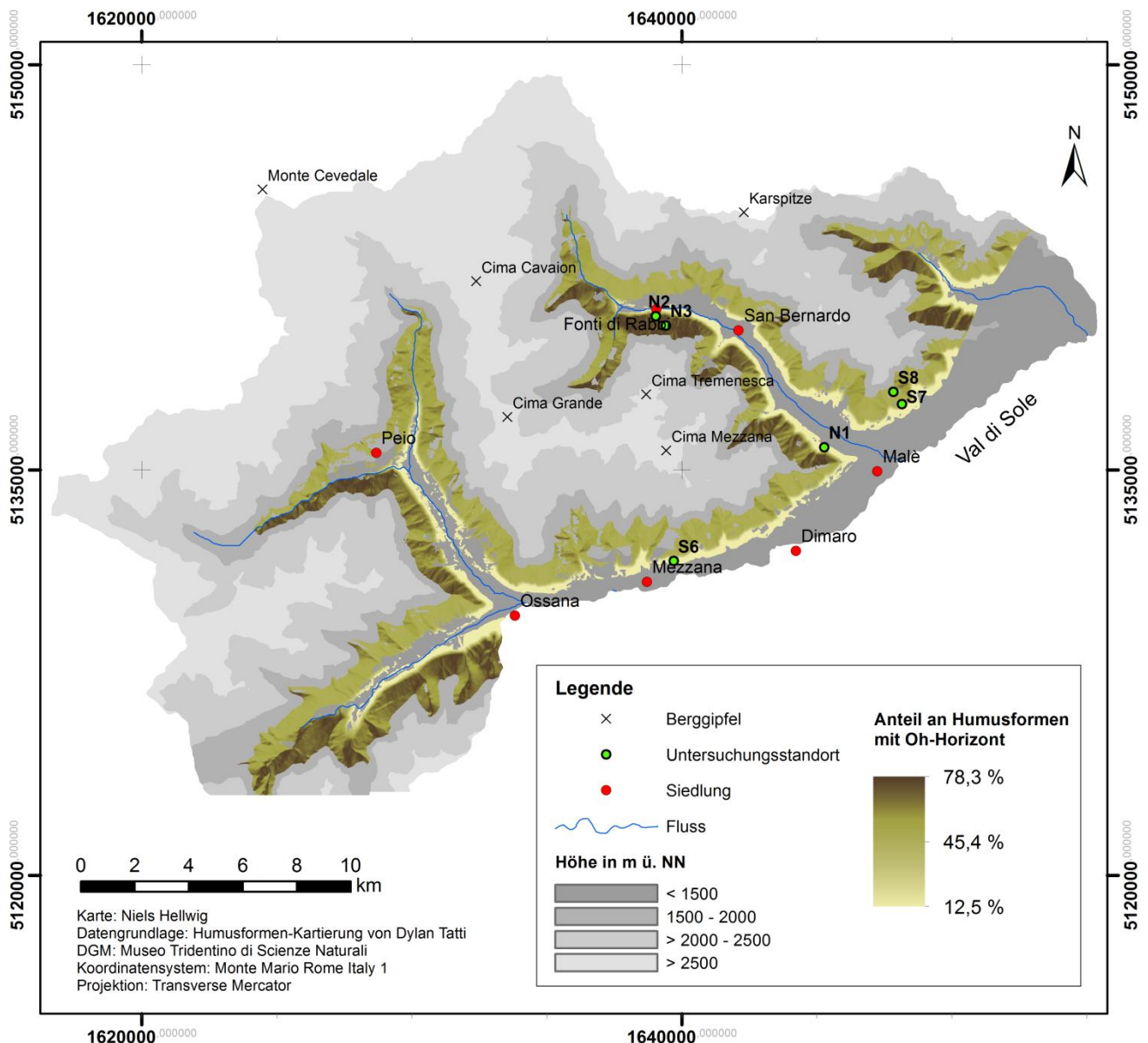
Einflussvariable	Vorhandensein von Auflagehorizonten		Biologische Aktivität im A-Horizont	
	%IncMSE	IncNodePurity	%IncMSE	IncNodePurity
Höhe ü. NN	-4.81	0.69	52.22	2.10
Neigung	39.20	0.69	18.38	0.60
Exposition	61.04	1.48	67.99	2.15
Vertikalkrümmung	28.90	0.61	-0.58	0.57
Horizontalkrümmung	13.21	0.26	11.61	0.56
Kombinierte Krümmung	8.50	0.34	-3.33	0.38
LS-Faktor	19.71	0.66	7.06	1.18
Baumartenklasse	15.39	0.35	14.30	0.47
Walddichte	-0.06	0.31	3.70	0.79

**Tab. 2:** Humusformen bei unterschiedlicher Krautschicht an Standort N1.

Krautschicht	F-Mull	Mullartiger Moder	Typischer Moder	Erodierter Moder	Amphimull
Farn (n = 3)	2	-	-	-	1
Moos (n = 4)	2	1	-	-	1
Streu (n = 2)	-	-	1	1	-
Zweige (n = 6)	-	1	5	-	-

So treten die geringsten Anteile an Humusformen mit Oh-Horizont in den tiefgelegenen Hangbereichen (ca. 1200-1300 m ü. NN) auf. In den höheren Bereichen dominieren Humusformen mit Oh-Horizont vor allem an nordexponierten Standorten, während ihr

Anteil an südexponierten Standorten bei etwa 50 % liegt (Abb. 4). Weitere Details zur Verteilung von Humusformen mit Oh-Horizont sowie der Verbreitung von Enchyträenarten finden sich bei Hellwig et al. (2017).



**Abb. 4:** Modellierter Verteilung von Humusformen mit Oh-Horizont auf Landschaftsebene (verändert nach Hellwig et al. 2017).

## Diskussion

Unter den für die Verteilung von Humusformen auf Hangebene analysierten Einflussvariablen im Random-Forest-Modell ist die Hangexposition von mit Abstand größter Wichtigkeit. Daneben zeigen die Ergebnisse einen nennenswerten Einfluss der Höhe, der Hangneigung, der Krümmung, des LS-Faktors und der Baumartenklasse (siehe Tab. 1). Auch die durch das Upscaling abgeleiteten Dekompositionsmuster auf Landschaftsebene zeigen in den Waldbeständen einen deutlichen Zusammenhang mit der Höhe und der Exposition. Der starke Einfluss des Reliefs auf Dekompositionsprozesse im Hochgebirge, den diese Ergebnisse verdeutlichen, ist vielfach beschrieben (z. B. Bayranvand et al. 2017; Bojko & Kabala 2017), vor allem durch die über das Relief bestimmten klimatischen Verhältnisse und die Höhenzonierung der Vegetation.

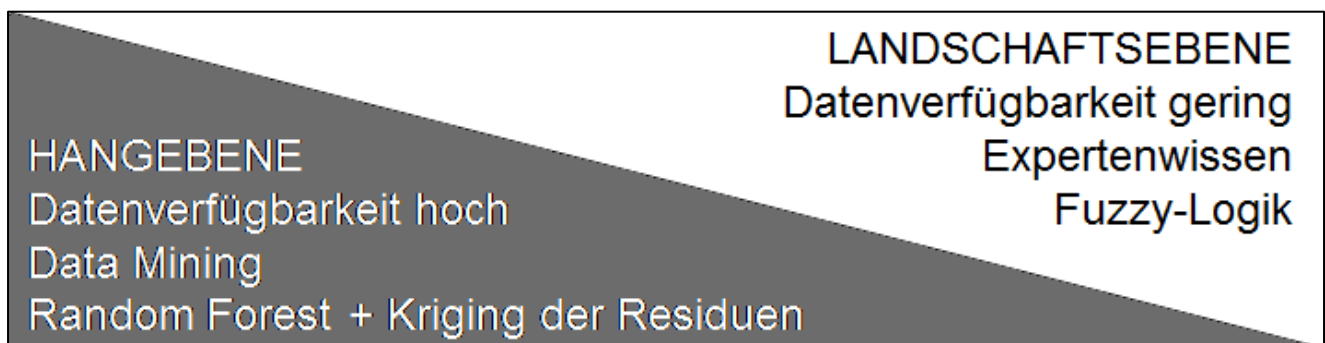
Die Gegenüberstellung der Einflussvariablen für die Random-Forest-Modelle (siehe Tab. 1) offenbart eine deutlich stärkere Wichtigkeit von Hangneigung und Vertikalkrümmung für die Bildung organischer Auflagehorizonte als für die biologische Aktivität im A-Horizont (dies gilt für %IncMSE auch für den LS-Faktor). Dies lässt sich wahrscheinlich auf Erosion und Akkumulation von Streu am Hang zurückführen: An Standorten, die in hohem Maße Erosionsprozessen ausgesetzt sind, kommt es im Vergleich zu Akkumulationsstandorten zu deutlich weniger Streuabbau und daher seltener zur Ausbildung von Auflagehorizonten. Die Höhe ist dagegen nur für das Modell der biologischen Aktivität im A-Horizont von Bedeutung (siehe Tab. 1). Dies deutet darauf hin, dass die biologische

Aktivität im Oberboden an den untersuchten Standorten stärker als das Vorhandensein von Auflagehorizonten von den klimatischen Verhältnissen abhängt.

Auf lokaler Ebene zeigen die Humusformen eine ebenfalls hohe Variabilität. Diese steht vor allem im Zusammenhang mit lokalen Unterschieden in der Krautschicht. Zwar führt die Betrachtung der Baumartenklasse als Einflussvariable auf Hangebene zu einer Verbesserung der Random-Forest-Modelle (siehe Tab. 1), dennoch sind die Humusformen im Untersuchungsgebiet stärker abhängig von der Vegetation der Krautschicht als von der Baumartenzusammensetzung (Anschlag et al. 2017).

Die methodischen Ansätze zur Modellierung der Dekompositionsmuster unterscheiden sich auf den untersuchten Skalen grundlegend in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit. Auf Hangebene konnte mittels Conditioned Latin Hypercube Sampling ein für den gesamten Hangbereich möglichst repräsentativer Datensatz erreicht werden. In einem solchen Fall lassen sich für die räumliche Modellierung Data-Mining-Ansätze wie Random Forest anwenden, gepaart mit Kriging zur Verbesserung der Modelle unter Berücksichtigung der teils hohen Modellresiduen. Auf Landschaftsebene wurde ein expertenbasierter Ansatz gewählt, um trotz geringer Datenlage ein zuverlässiges Vorhersagemodell zu erhalten (Abb. 5).

Untersuchungen zu Humusformen und zur Zersetzergesellschaft im Hochgebirge legen nahe, dass Humusformen auch im Untersuchungsgebiet dieser Studie als Indikator für die von Enchyträen und Mikroorganismen betriebenen Abbauprozesse gut geeignet



**Abb. 5:** Methodische Ansätze auf Hang- und Landschaftsebene in Abhängigkeit von der Datenlage.

sind (Ascher et al. 2012; Gómez-Brandón et al. 2017). An nordexponierten Hängen, wo Auflage-Humusformen dominieren, finden sich vor allem Enchyträenarten, die als Moderzeiger gelten. Dagegen finden sich an südexponierten Hängen, wo Mineralboden-Humusformen dominieren, vor allem solche Enchyträenarten, die als Mullzeiger gelten (Hellwig et al. 2017). Des Weiteren stimmt die Verteilung der Humusformen weitgehend mit unterschiedlichen Aktivitätsbereichen extrazellulärer Enzyme überein. So finden sich an südexponierten Standorten und in tiefgelegenen Hangbereichen (bis ca. 1500-1600 m) parallel zu Mineralboden-Humusformen relativ hohe Aktivitäten von Leucin-Aminopeptidase und alkalischer Phosphomonoesterase. An nordexponierten und höhergelegenen Standorten ist dagegen die Aktivität saurer Phosphomonoesterase hoch (Hellwig et al., submitted).

### Schlussfolgerungen

- Dekompositionsmuster auf lokaler Ebene lassen sich vor allem auf kleinräumige Unterschiede in der Vegetation (Krautschicht) zurückführen. Dekompositionsmuster auf der Hang- und Landschaftsebene hängen bei Waldbeständen mit vergleichbarer Baumartenzusammensetzung stark mit der Hangexposition und der Höhe ü. NN zusammen.
- Je nach Skala und Datenlage eignen sich unterschiedliche Methoden des Digital Soil Mapping (Entscheidungsbäume, Fuzzy-Logik, Random Forest) zur Prognose von Dekompositionsmustern.
- Humusformen haben sich in den Waldbeständen an dem untersuchten Hochgebirgsstandort als gut geeigneter Indikator für die durch die Bodenfauna und Bodenmikroorganismen betriebenen Abbauprozesse organischer Substanz herausgestellt.

### Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen sind Teil des D.A.CH.-Projektes DecAlp. Dieses wird finanziert durch die nationalen Forschungsfonds DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), FWF (Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung) und SNF (Schweizerischer Nationalfonds). Weitere Informationen auf <https://www.dec alp.org/>.

### Literatur

- Anschlag, K., Tatti, D., Hellwig, N., Sartori, G., Gobat, J.-M., Broll, G. (2017): Vegetation-based bioindication of humus forms in coniferous mountain forests. *Journal of Mountain Science* **14**(4), 662-673.
- Ascher, J., Sartori, G., Graefe, U., Thornton, B., Ceccherini, M. T., Pietramellara, G., Egli, M. (2012): Are humus forms, mesofauna and microflora in subalpine forest soils sensitive to thermal conditions? *Biology and Fertility of Soils* **48**(6), 709-725.
- Bayranvand, M., Kooch, Y., Hosseini, S. M., Alberti, G. (2017): Humus forms in relation to altitude and forest type in the Northern mountainous regions of Iran. *Forest Ecology and Management* **385**, 78-86.
- Bojko, O., Kabala, C. (2017): Organic carbon pools in mountain soils — Sources of variability and predicted changes in relation to climate and land use changes. *Catena* **149**, 209-220.
- Breiman, L. (2001): Random Forests. *Machine Learning* **45**, 5-32.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., Stone, C. J. (1984): Classification and regression trees (= The Wadsworth Statistics/Probability Series). Wadsworth, Belmont.
- Egli, M., Mirabella, A., Sartori, G., Zanelli, R., Bischof, S. (2006): Effect of north and south exposure on weathering rates and clay mineral formation in Alpine soils. *Catena* **67**, 155-174.

- Gómez-Brandón, M., Ascher-Jenull, J., Bardelli, T., Fornasier, F., Sartori, G., Pietramellara, G., Arfaioli, P., Egli, M., Beylich, A., Insam, H., Graefe, U. (2017): Ground cover and slope exposure effects on micro- and mesobiota in forest soils. *Ecological Indicators* **80**, 174-185.
- Graefe, U. (2007): Gibt es in Deutschland die Humusform Amphi? *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **110**, 459-460.
- Hellwig, N., Anschlag, K., Broll, G. (2016): A fuzzy logic based method for modelling the spatial distribution of indicators for decomposition in a high mountain environment. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **48**(4), 623-635.
- Hellwig, N., Graefe, U., Tatti, D., Sartori, G., Anschlag, K., Beylich, A., Gobat, J.-M., Broll, G. (2017): Upscaling the spatial distribution of enchytraeids and humus forms in a high mountain environment on the basis of GIS and fuzzy logic. *European Journal of Soil Biology* **79**, 1-13.
- Hellwig, N., Gómez-Brandón, M., Ascher-Jenull, J., Bardelli, T., Anschlag, K., Fornasier, F., Pietramellara, G., Insam, H., Broll, G. (submitted): Humus forms and soil microbiological parameters in a mountain forest: Upscaling to the slope scale.
- Heuvelink, G.B.M., Webster, R. (2001): Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma* **100**(3-4), 269-301.
- Liaw, A., Wiener, M. (2002): Classification and Regression by randomForest. *R News* **2**(3), 18-22.
- Minasny, B., McBratney, A. B. (2006): A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences* **32**, 1378-1388.
- Sartori, G., Mancabelli, A. (2009): Carta dei suoli del Trentino: scala 1:250.000. Museo Tridentino di Scienze Naturali di Trento, Centro di Ricerca per l'Agrobiologia e la Pedologia di Firenze.
- Shi, X., Long, R., Dekett, R., Philippe, J. (2009): Integrating Different Types of Knowledge for Digital Soil Mapping. *Soil Science Society of America Journal* **73**(5), 1682-1692.