

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

**Titel der Tagung:** Erd-Reich und Boden-Landschaften

DBG/BGS, 24.-29. August 2019, Bern

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

<http://www.dbges.de>

## **Verbreitungsmuster von Waldhumusformen in den italienischen Alpen in Abhängigkeit von der räumlichen Skala**

Niels Hellwig<sup>1,2,3</sup>, Dylan Tatti<sup>4,5</sup>, Giacomo Sartori<sup>6</sup>, Kerstin Anschlag<sup>1</sup>, Ulfert Graefe<sup>7</sup>, Markus Egli<sup>8</sup>, Jean-Michel Gobat<sup>4</sup>, Gabriele Broll<sup>1</sup>



<https://www.decalp.org/>

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

<sup>2</sup> Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Universität Potsdam, Karl-Liebknecht-Straße 24-25, 14476 Potsdam, Deutschland

<sup>3</sup> Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Hochschule Osnabrück, Caprivistraße 30a, 49076 Osnabrück, Deutschland

<sup>4</sup> Laboratoire d'écologie fonctionnelle, Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, 2000 Neuchâtel, Schweiz

<sup>5</sup> Division Agronomie, Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL, Länggasse 85, 3052 Zollikofen, Schweiz

<sup>6</sup> Museo Tridentino di Scienze Naturali, Corso del Lavoro e della Scienza 3, 38122 Trento, Italien

<sup>7</sup> IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH, Tornberg 24a, 22337 Hamburg, Deutschland

<sup>8</sup> Geographisches Institut, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich, Schweiz

## **Zusammenfassung**

Waldhumusformen dienen als wichtiger Indikator für Abbauprozesse toter organischer Substanz im Oberboden und in der organischen Auflage. Ihre räumliche Verbreitung steht im Zusammenhang mit Umweltfaktoren wie Relief, Klima und Vegetation. Diese Faktoren sind im Hochgebirge durch eine starke räumliche Heterogenität gekennzeichnet, die sich in einer hohen Variabilität der Standortbedingungen und somit der Humusformen widerspiegelt. In dieser Studie wurden Waldhumusformen in einem Gebiet in den norditalienischen Alpen (Val di Sole / Val di Rabbi, Trentino) untersucht. Ziel war die Analyse der Verbreitungsmuster von Waldhumusformen in Abhängigkeit von der räumlichen Skala (lokale Ebene, Hangebene und Landschaftsebene).

Gemäß der unterschiedlichen Standortbedingungen im Untersuchungsgebiet wurden folgende Standorte für die Analyse von Waldhumusformen ausgewählt: auf lokaler Ebene sechs Standorte mit Hilfe von Expertenwissen, auf Hangebene 60 Standorte und auf Landschaftsebene 30 zusätzliche Standorte mittels Conditioned Latin Hypercube Sampling basierend auf der Verteilung der Umweltfaktoren. Zur Erfassung der lokalen Variabilität von Waldhumusformen wurde ihre Verbreitung unter verschiedenen Bodenvegetationstypen untersucht. Die Verbreitungsmuster auf Hang- und Landschaftsebene wurden mit Random Forests und Ordinary Kriging der Residuen modelliert.

Die Ergebnisse zeigen eine enge Beziehung zwischen dem Auftreten verschiedener Waldhumusformen und der Lage im Relief. Während sich die Humusformen auf lokaler Ebene vor allem je nach Mikrorelief (Erosions- versus Akkumulationsbedingungen) und Bodenvegetation unterscheiden, stehen sie auf Hangebene in deutlichem Zusammenhang mit Höhe und Hangexposition. Auf Landschaftsebene bilden die Modelle diese auf lokaler und Hangebene bestehenden Beziehungen nicht ab und es ergeben sich unregelmäßige Verbreitungsmuster. Die Modelle auf Hangebene schneiden bei der

Modellgüte insgesamt besser ab als die Modelle auf Landschaftsebene. Allgemein legen die Ergebnisse dieser Studie nahe, dass die Analyse räumlicher Muster von Waldhumusformen auf Landschaftsebene nur in Verbindung mit Untersuchungen auf lokaler Ebene und auf Hangebene dazu beiträgt, ein generelles Verständnis von der Verbreitung von Humusformen im Landschaftskontext zu erlangen.

**Schlüsselwörter:** Zersetzung organischer Substanz, Räumliche Modellierung, Random Forest, Skalenabhängigkeit, Waldböden, Italienische Alpen

## Einleitung

Um die Grundlagen des Abbaus organischer Substanz im Hochgebirge besser zu verstehen, wurden im Rahmen des D.A.CH-Projektes “Effect of climate on coarse woody debris decay dynamics and incorporation into the soils of forested Alpine areas” (DecAlp, gefördert durch DFG, FWF, SNF) seit 2012 bodenökologische Zusammenhänge und Prozesse in interdisziplinärer Zusammenarbeit erforscht. Die DecAlp-Hauptziele waren:

- die Untersuchung des Totholzabbaus und der Umwandlung von Totholz in organische Bodensubstanz,
- die Analyse der Beziehungen zwischen Umwelteinflüssen und Indikatoren für Zersetzungsprozesse,
- die Analyse räumlicher Dekompositionsmuster.

Schwerpunkte der Untersuchungen im DecAlp-Projekt waren daher die Bereiche Bodenfauna, Bodenmikrobiologie, Humusformen, Totholz und räumliche Modellierung. Im Hochgebirge lässt sich sowohl kleinräumig als auch auf Landschaftsebene eine hohe Variabilität von Umweltfaktoren wie Relief, Klima und Vegetation beobachten. Dies spiegelt sich auch innerhalb der geschlossenen Wälder in einer enormen Heterogenität der Eigenschaften von Oberböden sowie der organischen Auflage wider (Egli & Poulénard 2017). Angesichts der hohen Vulnerabilität von Ökosystemen im

Hochgebirge bei anhaltenden Klima- und Landnutzungsveränderungen (Gobiet et al. 2014; Mountain Research Initiative EDW Working Group 2015; Hellwig et al. 2019a) ist es notwendig, bodenökologische Prozesse und Zusammenhänge auf verschiedenen räumlichen Skalen zu erfassen und möglichst genau zu kartieren. Vorherige Studien legen nahe, dass Waldhumusformen ein guter morphologischer Indikator für diese bodenökologischen Zusammenhänge sind (Ascher et al. 2012; Moscatelli et al. 2017), da ihre Entwicklung eng mit der Aktivität der Bodenorganismen der Zersetzergesellschaft verknüpft ist (Graefe & Belotti 1999; Graefe & Beylich 2006).

In der vorliegenden Studie sollen räumliche Verbreitungsmuster von Waldhumusformen (a) in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen räumlich vorhergesagt und (b) hinsichtlich ihrer Indikatorfunktion für die Artenzusammensetzung der Zersetzergesellschaft sowie für bodenmikrobiologische Eigenschaften untersucht werden. Folgende Fragen mit Bezug zu einem Untersuchungsgebiet in den italienischen Alpen sollen beantwortet werden:

- In welchen Verbreitungsmustern treten Waldhumusformen auf (i) lokaler Skala, (ii) Hangskala und (iii) Landschaftsskala auf?
- Inwieweit lassen sich die Verbreitungsmuster von Waldhumusformen durch die Variabilität der Standortbedingungen erklären?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der räumlichen Verbreitung von Humusformen, Bodenorganismen verschiedener Zersetzergesellschaften und bodenmikrobiologischen Parametern?

## Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den italienischen Alpen (Provinz Trentino). Untersucht wurden die Wälder der montanen bis subalpinen Stufe im Val di Sole und Val di Rabbi (dominierende Baumarten sind *Larix decidua* und *Picea abies*). Aus silikatischem Gestein (überwiegend Paragneis und Orthogneis) haben sich hier Haplic Cambisols

(Dystric) und Umbric Podzols entwickelt, oberhalb von 1900 m ü. NN vor allem Entic Podzols, Albic Podzols und Umbric Podzols (Sartori & Mancabelli 2009). Eine ausführliche Beschreibung des Untersuchungsgebietes findet sich bei Hellwig (2018).

### **Material und Methoden**

Unter Berücksichtigung der unterschiedlich ausgeprägten räumlichen Heterogenität von Umwelteinflüssen auf den drei Skalenebenen basierte die Analyse der Verbreitungsmuster von Waldhumusformen jeweils auf verschiedenen, an die jeweilige Skala angepassten Ansätzen zur Datenerhebung und räumlichen Modellierung. Auf lokaler Skala wurden Waldhumusformen an sechs Standorten auf nordexponierten Hängen (N1-N3) und südexponierten Hängen (S6-S8), jeweils auf drei unterschiedlichen Höhenstufen (ca. 1200 m, 1400 m und 1630 m ü. NN) untersucht (Egli et al. 2006; Hellwig et al. 2017). Die Verbreitungsmuster der Humusformen wurden mit der kleinräumig teils sehr heterogenen Bodenbedeckung (Farn, Gras, Moos, Streu und Zweige) in Beziehung gesetzt (Hellwig et al. 2019b). Auf der Hangskala wurden jeweils 30 Standorte an einem nord- und einem südexponierten Hang im Val di Rabbi untersucht, auf Landschaftsebene weitere 30 Standorte innerhalb des gesamten Untersuchungsgebietes (jeweils mit Conditioned Latin Hypercube Sampling optimierte Erhebungsstandorte; Details bei Anschlag et al. 2017).

Die Bestimmung der Humusformen richtete sich nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und Graefe (2007). Für die räumlichen Analysen wurden die Humusformen nach dem Auftreten organischer Auflagehorizonte und dem Bodengefüge im A-Horizont modelliert und anschließend reklassifiziert (Hellwig et al. 2018, 2019b).

Mittels räumlicher Modellierung basierend auf Random Forests (Breiman 2001) mit anschließendem Kriging der Residuen (Heuvelink & Webster 2001) wurden Vorhersagen für das Auftreten von Humusformen auf Hang- und Landschaftsskala erstellt.

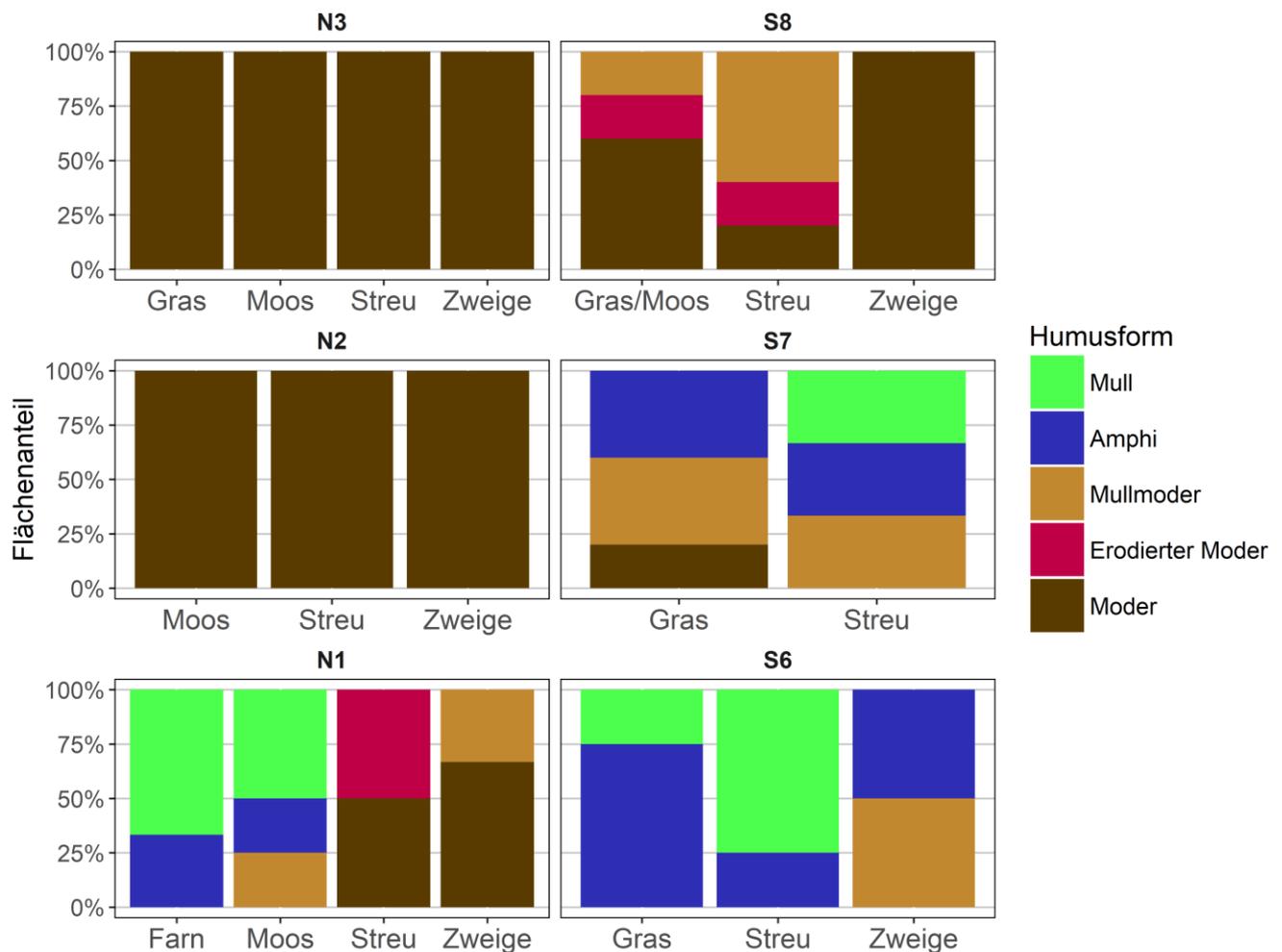
Details zu den für die Modellierung als Einflussfaktoren genutzten Umweltvariablen finden sich bei Hellwig et al. (2018, 2019b). Die Güte der Random-Forest-Modelle wurde anhand der mittleren quadratischen Residuen und der erklärten Varianz abgeschätzt (Liaw & Wiener 2002).

Um die Indikatorfunktion für die Artenzusammensetzung der Zersetzergesellschaft sowie für bodenmikrobiologische Eigenschaften zu analysieren, wurden die Verbreitung von Enchyträenarten (klassifiziert als Moder- und Mull-Indikatoren) sowie der pH-Wert, die Aktivitäten von Leucin-Aminopeptidase, alkalischer und saurer Phosphomonoesterase das C/N-Verhältnis und die Bakterien- und Archaeen-Abundanzen im A-Horizont bestimmt und räumlich modelliert. Details zu Material und Methoden finden sich bei Hellwig et al. (2017, 2018).

### **Ergebnisse**

Die Verbreitung von Humusformen auf lokaler Skala steht im Zusammenhang mit dem Vorkommen unterschiedlicher Bodenbedeckungstypen (Abb. 1). Unter Farn, Gras und Moos fanden sich an den tiefergelegenen Standorten N1 und S6 überwiegend Mull und Amphi, z. T. auch an Standort S7, während an den höhergelegenen Standorten Moder dominiert. Humusformen unter Streu (d. h. ohne erkennbaren Bewuchs in der Krautschicht) zeigten an südexponierten Standorten oftmals eine hohe biologische Aktivität (untersucht anhand des Bodengefüges im A-Horizont), sodass sie sich insbesondere an den tiefergelegenen Standorten S6 und S7 als Mull oder Amphi klassifizieren ließen. An den nordexponierten Standorten fanden sich unter Streu ausschließlich Moder-Humusformen (an Standort N1 teilweise erodiert). Den höchsten Anteil an Moder-Humusformen wiesen Profile auf, an denen sich Zweige angesammelt hatten (in der Regel flachere Akkumulationsstandorte im Mikrorelief).

Die räumlichen Modelle auf der Hangskala zeigen deutliche Unterschiede im Auftreten von Humusformen zwischen dem nord- und

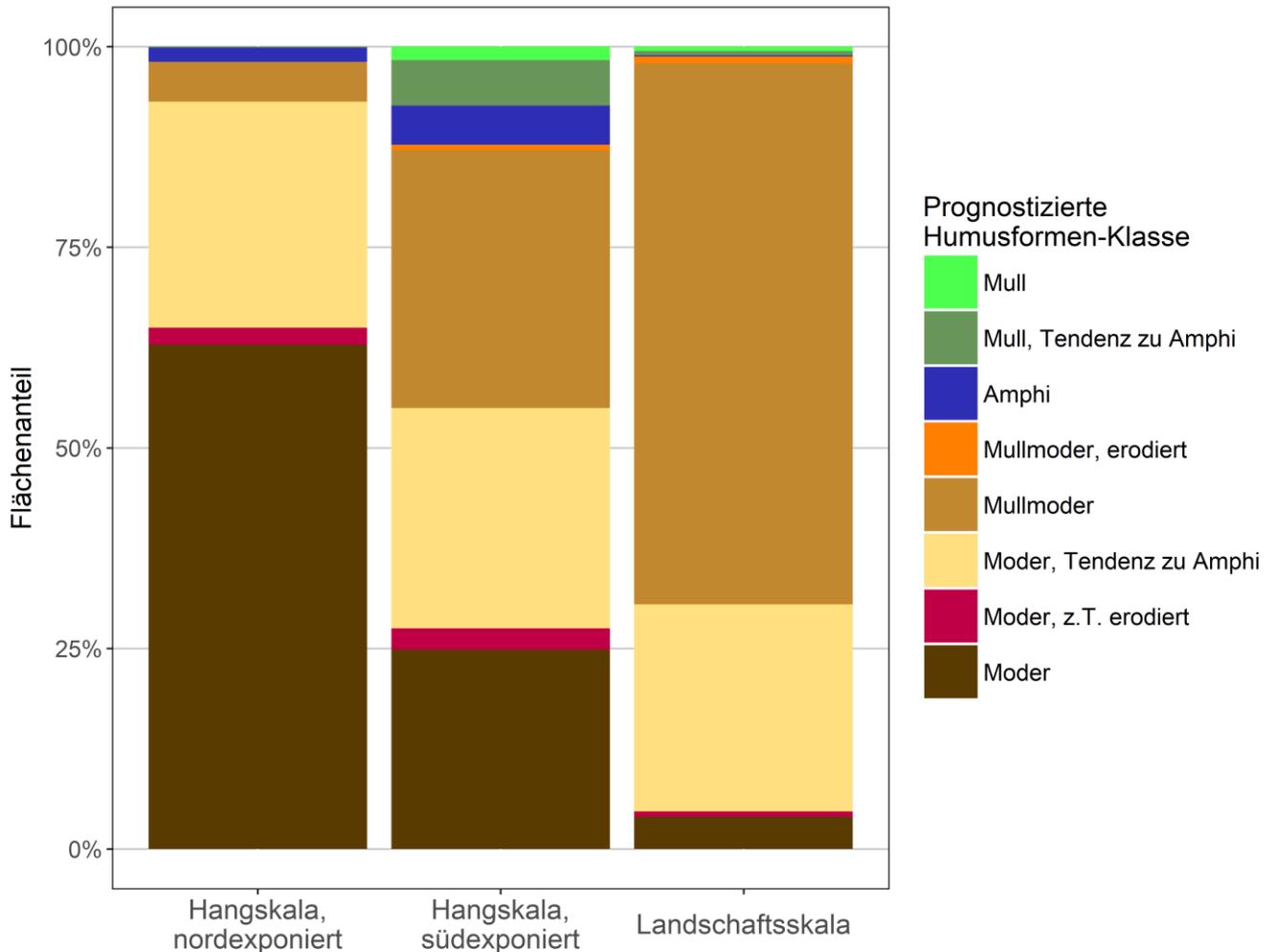


**Abb. 1:** Humusformen auf lokaler Skala in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung (Daten aus Hellwig et al. 2019b). Nordexponierte Hänge: N1 (ca. 1200 m), N2 (ca. 1400 m) und N3 (ca. 1630 m); südexponierte Hänge: S6 (ca. 1200 m), S7 (ca. 1400 m) und S8 (ca. 1630 m).

dem südexponierten Hang im Val di Rabbi (Abb. 2). Während der nordexponierte Hang fast vollständig von Moder-Humusformen dominiert wird (> 90 %, teilweise erodiert oder mit Tendenz zu Amphi), finden sich die Moder-Humusformen auf dem südexponierten Hang vor allem in den höher gelegenen Bereichen. An tiefergelegenen südexponierten Standorten weisen die Modelle ein verbreitetes Vorkommen von Mull und Amphi aus.

Im Vergleich zur Hangskala zeigen die Modelle auf der Landschaftsskala eine weite Verbreitung der Übergangsform Mullmoder an (Abb. 2). Daneben kommen auch Moder-Humusformen häufig vor, insbesondere mit Tendenz zu Amphi. Mull und Amphi nehmen nur kleine Flächen ein, vor allem in den unteren Hangbereichen. Die Vorhersagegüte der Random-Forest-Modelle auf Hangskala

(mittlere quadratische Residuen zwischen 7,9 % und 11,8 %; erklärte Varianz zwischen 18,05 % und 24,18 %) ist deutlich besser als die der Random-Forest-Modelle auf Landschaftsskala (mittlere quadratische Residuen zwischen 18 % und 23 %; erklärte Varianz zwischen 6 % und 8 %). Weitere Ausführungen zu den Verbreitungsmustern von Waldhumusformen im Untersuchungsgebiet inkl. detaillierter Beschreibungen der Situation auf lokaler Skala und Vorhersagekarten für Humusformen auf Hang- und Landschaftsskala finden sich bei Hellwig et al. (2019b). Abb. 3 zeigt die durch Modellierung auf Hang- bzw. Landschaftsskala herausgestellten Zusammenhänge zwischen der räumlichen Verbreitung von Humusformen, Enchyträenarten und Eigenschaften des A-Horizontes. Nordexponierte Hänge sind gekennzeichnet von einer weiten Verbreitung



**Abb. 2:** Prognostizierte Humusformen-Klassen auf Hangskala und Landschaftsskala (Modellerggebnisse aus Hellwig et al. 2019b).

von Moder-Humusformen, die mit den für Moder typischen Enchyträenarten sowie im Vergleich zu südexponierten Hängen niedrigen pH-Werten, einer geringen Aktivität von Leucin-Amino-peptidase, einem niedrigen Verhältnis der Aktivitäten von alkalischer zu saurer Phosphomonoesterase und einem weiten C/N-Verhältnis im A-Horizont einhergehen. Die Bakterien- und Archaeen-Abundanzen im A-Horizont ließen keinen signifikanten Zusammenhang zur Verbreitung der Humusformen erkennen. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse zur räumlichen Verteilung von Bodenorganismen verschiedener Zersetzer-gesellschaften findet sich bei Hellwig et al. (2017) und zu bodenmikrobiologischen Parametern bei Hellwig et al. (2018).

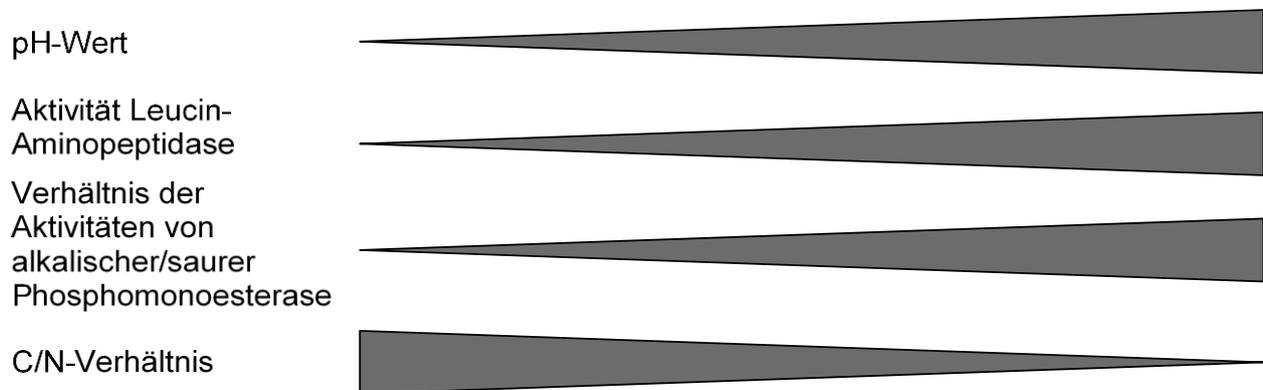
### Diskussion

Die vorgestellten Untersuchungen tragen dazu bei, ein besseres, skalenübergreifendes Verständnis von Umwelteinflüssen auf Abbauprozesse toter organischer Substanz im Untersuchungsgebiet in den italienischen Alpen zu erlangen. Das heterogene Mikrorelief der bewaldeten Hänge bringt eine kleinräumige Variabilität von Erosions- und Akkumulationsbereichen mit sich, was eine mosaikartige Ausbildung der Bodenvegetation mit sich bringt. Die Verbreitung verschiedener Humusformen auf lokaler Skala steht in einem engen Zusammenhang mit diesen mosaikartigen Mustern (Anschlag et al. 2017; Hellwig et al. 2019b).

Auf der Hang- und auf der Landschaftsskala lässt sich ein deutlicher Zusammenhang der Verbreitung von Humusformen mit den Relief-eigenschaften konstatieren. Die Dominanz von Moder an nordexponierten Hängen und

	Nordexponierte Hänge	Südexponierte Hänge
Vorherrschende Humusformen	Moder	Mull, Amphi
Enchyträenarten	Moder-Indikatoren	Mull-Indikatoren

### Eigenschaften des A-Horizontes



**Abb. 3:** Zusammenhänge zwischen der räumlichen Verbreitung von Humusformen, Bodenorganismen verschiedener Zersetzergesellschaften und bodenmikrobiologischen Parametern auf Landschaftsebene im Untersuchungsgebiet (Hellwig 2018).

das häufigere Vorkommen von Mull und Amphi an südexponierten Hängen spiegeln den geländeklimatischen Effekt im Untersuchungsgebiet wider. So kommt es an wärmeren Standorten zu verstärkter Bioturbation im Oberboden und zu geringerer Akkumulation organischen Materials in den Auflagehorizonten (Hellwig et al. 2019b).

Insbesondere auf der Landschaftsskala ist die Anwendbarkeit der bisherigen Modelle beschränkt, vor allem aufgrund der geringen Modellgüte der Random-Forest-Modelle und der relativ geringen Dichte der 90 Standorte im Untersuchungsgebiet. Zusätzliche Faktoren wie die Landnutzungshistorie könnten für die heutige Verbreitung von Humusformen auf der Landschaftsskala von Bedeutung sein. Auf der Hangskala konnte durch das Kriging der Residuen aufgrund der relativ dichten Verteilung der Standorte eine deutliche Verbesserung der räumlichen Prognosen erreicht werden (Hellwig et al. 2019b).

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse passen zu den Ergebnissen vorheriger Studien im Untersuchungsgebiet Val di Sole / Val di Rabbi. So wurden bereits von Aberegge et al. (2009) Moder-Humus-

formen als vorherrschend beschrieben. Die Zusammenhänge zwischen den räumlichen Verteilungen der untersuchten bodenökologischen Parameter verdeutlichen, dass die Humusform ein geeigneter Indikator für die Bodenorganismen verschiedener Zersetzergesellschaften sowie die bodenmikrobiologischen Eigenschaften im Untersuchungsgebiet ist. Dies wird durch weitere Studien unterstützt (Ascher et al. 2012; Gómez-Brandón et al. 2017a). Zahlreiche Studien stellten außerdem Unterschiede in den Abbauprozessen toter organischer Substanz zwischen nord- und südexponierten Standorten auf verschiedenen Höhenstufen im Untersuchungsgebiet heraus (Egli et al. 2009, 2016; Hellwig et al. 2016; Bardelli et al. 2017), im Rahmen des DecAlp-Projektes auch für den Abbau von Totholz (Petrillo et al. 2015; Fravolini et al. 2016; Gómez-Brandón et al. 2017b; Bardelli et al. 2018a,b).

### Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben unterschiedliche Verbreitungsmuster der Waldhumusformen in Abhängigkeit von der Skala gezeigt:

- Auf lokaler Skala hängt die Verbreitung von Humusformen mit der kleinräumigen Variabilität im Mikrorelief und der Bodenbedeckung zusammen.
- Die Verbreitungsmuster auf Hangskala sind eng mit der Hangexposition und der Höhe verknüpft.
- Auf der Landschaftsskala ergibt sich die Verbreitung von Humusformen aus dem Zusammenspiel vielfältiger Umwelteinflüsse und skalenübergreifender Effekte, die aus den Mustern auf der lokalen Skala und der Hangskala hervorgehen.

Die Waldhumusformen im Untersuchungsgebiet stehen in deutlichem Zusammenhang mit den Bodenorganismen verschiedener Zersetzergesellschaften und bodenmikrobiologischen Parametern. Somit kann die Humusform hier als guter Indikator für die Abbauprozesse organischer Substanz angesehen werden.

### 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

Aberegg, I., Egli, M., Sartori, G., Purves, R. (2009): Modelling spatial distribution of soil types and characteristics in a high Alpine valley (Val di Sole, Trentino, Italy). *Studi Trentini di Scienze Naturali* **85**, 39-50.

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 5. Auflage.

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.

Bardelli, T., Gómez-Brandón, M., Ascher-Jenull, J., Fornasier, F., Arfaioli, P., Francioli, D., Egli, M., Sartori, G., Insam, H., Pietramellara, G. (2017): Effects of slope exposure on soil physico-chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps. *Science of The Total Environment* **575**, 1041-1055.

Bardelli, T., Ascher-Jenull, J., Burkia Stocker, E., Fornasier, F., Arfaioli, P., Fravolini, G., Alves Medeiros, L.R., Egli, M., Pietramellara, G., Insam, H., Gómez-Brandón, M. (2018): Impact of slope exposure on chemical and microbiological properties of Norway spruce deadwood and underlying soil during early stages of decomposition in the Italian Alps. *Catena* **167**, 100-115.

Bardelli, T., Gómez-Brandón, M., Fornasier, F., Arfaioli, P., Egli, M., Pietramellara, G., Ceccherini, M.T., Insam, H., Ascher-Jenull, J. (2018): Chemical and microbiological changes in Norway spruce deadwood during the early stage of decomposition as a function of exposure in an alpine setting. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **50**(1), e1438347.

Breiman, L. (2001): Random Forests. *Machine Learning* **45**, 5-32.

Egli, M., Poulenard, J. (2017): Soils of Mountainous Landscapes. In: Richardson, D., Castree, N., Goodchild, M.F., Kobayashi, A., Liu, W., Marston, R.A. (Eds.): *The International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment, and Technology*. New York: Wiley.

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**(3), 155-174.

Egli, M., Sartori, G., Mirabella, A., Favilli, F., Giaccari, D., Delbos, E. (2009): Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils. *Geoderma* **149**, 124-136.

Egli, M., Hafner, S., Derungs, C., Ascher-Jenull, J., Camin, F., Sartori, G., Raab, G., Bontempo, L., Paolini, M., Ziller, L., Bardelli, T., Petrillo, M., Abiven, S. (2016): Decomposition and stabilisation of Norway spruce needle-derived material in Alpine soils using a <sup>13</sup>C-labelling approach in the field. *Biogeochemistry* **131**(3), 321-338.

- Fravolini, G., Egli, M., Derungs, C., Cherubini, P., Ascher-Jenull, J., Gómez-Brandón, M., Bardelli, T., Tognetti, R., Lombardi, F., Marchetti, M. (2016): Soil attributes and microclimate are important drivers of initial deadwood decay in sub-alpine Norway spruce forests. *Science of the Total Environment* 569-570, 1064-1076.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M. (2014): 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of The Total Environment* **493**, 1138-1151.
- Gómez-Brandón, M., Ascher-Jenull, J., Bardelli, T., Fornasier, F., Sartori, G., Pietramellara, G., Arfaioli, P., Egli, M., Beylich, A., Insam, H., Graefe, U. (2017a): Ground cover and slope exposure effects on micro- and mesobiota in forest soils. *Ecological Indicators* **80**, 174-185.
- Gómez-Brandón, M., Ascher-Jenull, J., Bardelli, T., Fornasier, F., Fravolini, G., Arfaioli, P., Ceccherini, M.T., Pietramellara, G., Lamorski, K., Sławiński, C., Bertoldi, D., Egli, M., Cherubini, P., Insam, H. (2017b): Physico-chemical and microbiological evidence of exposure effects on *Picea abies* – Coarse woody debris at different stages of decay. *Forest Ecology & Management* **391**, 376-389.
- Graefe, U. (2007): Gibt es in Deutschland die Humusform Amphi? *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **110**, 459-460.
- Graefe, U., Belotti, E. (1999): Strukturmerkmale der Bodenbiozönose als Grundlage für ein natürliches System der Humusformen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **89**, 181-184.
- Graefe, U., Beylich, A. (2006): Humus forms as tool for upscaling soil biodiversity data to landscape level? *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **108**, 6-7.
- Hellwig, N. (2018): Spatial patterns of humus forms, soil organisms and soil biological activity at high mountain sites in the Italian Alps. Dissertation an der Universität Osnabrück. Online verfügbar auf <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:700-20181024676>.
- 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. (2018): Humus forms and soil microbiological parameters in a mountain forest: Upscaling to the slope scale. *Soil Systems* **2**(1), 12.
- Hellwig, N., Walz, A., Markovic, D. (2019a): Climatic and socioeconomic effects on land cover changes across Europe: Does protected area designation matter? *PLoS ONE* **14**(7), e0219374.
- Hellwig, N., Tatti, D., Sartori, G., Anschlag, K., Graefe, U., Egli, M., Gobat, J.-M., Broll, G. (2019b): Modeling Spatial Patterns of Humus Forms in Montane and Subalpine Forests: Implications of Local Variability for Upscaling. *Sustainability* **11**(1), 48.
- 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.
- Moscatelli, M.C., Bonifacio, E., Chiti, T., Cudlín, P., Dinca, L., Gömöryova, E., Grego, S., La Porta, N., Karlinski, L., Pellis, G., Rudawska, M., Squartini, A., Zhiyanski, M., Broll, G. (2017): Soil properties as indicators of treeline dynamics in relation to anthropogenic pressure and climate change. *Climate Research* **73**(1-2), 73-84.
- Mountain Research Initiative EDW Working Group (2015): Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change* **5**, 424-430.
- Petrillo, M., Cherubini, P., Sartori, G., Abiven, S., Ascher, J., Bertoldi, D., Camin, F., Barbero, A., Larcher, R., Egli, M. (2015): Decomposition of Norway spruce and European larch coarse woody debris (CWD) in relation to different elevation and exposure in an Alpine setting. *iForest* **9**, 154-164.
- 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.