

Tangelhumus in den Bayerischen Alpen – Vorkommen, Verbreitung, Schutz

Michelangelo Olleck

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Life Sciences der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Annette Menzel

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein
2. Prof. Dr. Jörg Ewald

Die Dissertation wurde am 09.05.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Life Sciences am 12.09.2022 angenommen.

Vorwort und Dank

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Waldklimafonds-Projektes "Alpiner Humus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor in Bergwäldern" (Akronym ALPENHUMUS, FKZ: 22WC406301 & 22WC406302), das vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) dankenswerterweise gefördert wurde.

Ich danke zahlreichen Personen für Ihre Unterstützung und Motivation während der gesamten Dauer dieses Projektes. Mein tiefster Dank geht an:

- Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein und Prof. Dr. Jörg Ewald, welche mir 2017 diesen Lebensabschnitt ermöglichten und mich seitdem exzellent betreut, inspiriert und motiviert haben.
- Meiner Mentorin Dr. Birgit Reger für Ihre stetige Unterstützung, die geniale Zusammenarbeit und die Durchsicht der Arbeit.
- Dr. Michael Kohlpaintner für die unschätzbaren Tage im Gelände, die vielen fruchtbaren Diskussionen und die fachliche Begleitung dieser Arbeit.
- Den Kolleginnen und Kollegen der Fakultät Wald und Forstwirtschaft und des Institutes für Ökologie und Landschaft der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf sowie des Fachgebietes für Waldernährung und Wasserhaushalt der Technischen Universität München für ihre kollegiale Unterstützung sowie das familiäre und humorvolle Arbeitsklima.
- Den zahlreichen Studenten für ihre grandiose Unterstützung im Gelände.
- Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bayerischen Forstverwaltung, der Bayerischen Staatsforsten, des Nationalparks Berchtesgaden und der Regierung Oberbayerns, welche mit Daten, Genehmigungen und Unterkünften die Geländekampagnen ermöglicht haben.

Ein besonderer Dank geht an meine Freunde und die gesamte Familie, insbesondere an meine Frau Nadja und meine beiden Kindern Finja und Elino, welche mich stets aufopferungsvoll auf diesem Weg begleitet, motiviert und gestützt haben.

Diese Arbeit ist mit herzlichstem Dank meinen Eltern gewidmet!

Inhalt

Inhalt

Vorwort und Dank	I
Zusammenfassung	III
Summary	V
1 Einleitung	1
2. Hauptziele der Arbeit	4
3 Material und Methoden.....	6
3.1 Das Untersuchungsgebiet	6
3.2 Regionalisierung in der Landschaft (Publikation I)	10
3.2.1 Auswahl der Untersuchungsflächen.....	10
3.2.2 Datenerfassung	14
3.2.3 Grundlegende Datenauswertung.....	19
3.2.4 Modellierung	20
3.3 Lokalisierung auf Bestandesebene (Publikation II).....	23
3.3.1 Datengrundlage	23
3.3.2 Datenanalyse	23
3.4 Humuspflge – Wissensstand und Maßnahmen (Publikation III).....	24
3.4.1 Umfrage	24
4 Publikationen im Rahmen dieser Dissertation	25
5 Publikationsübergreifende Diskussion	31
5.1 Regionalisierung von Tangelhumus in der Landschaft	31
5.2 Lokalisierung von Tangelhumus auf Bestandesebene	34
5.3 Maßnahmen und Status quo der Humuspflge	37
5.4 Das Dreisäulenprinzip der Tangelhumuspflge	42
6 Literaturverzeichnis	44

Zusammenfassung

Mächtige Humusauflagen spielen in Bergwäldern eine sehr wichtige Rolle für die Leistungsfähigkeit und Resilienz dieser Ökosysteme. Insbesondere die Humusform Tangelhumus, auch Alpenhumus genannt, welche Mächtigkeiten von mehr als 100 cm erreichen kann, hat eine essentielle Bedeutung für die auf felsigen Substraten entwickelten Waldstandorte. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts gab es zahlreiche Studien, welche sich mit dieser interessanten Humusform in den Kalkalpen auseinandersetzten. Diese Studien wurden jedoch meist lokal auf Teilgebieten durchgeführt und die Kenntnisse über die Verbreitung von Tangelhumus im gesamten Bayerischen Alpenraum ist bisher noch sehr rar.

Vor dem Hintergrund der bestehenden Wissenslücken in der Literatur verfolgt diese Arbeit drei Hauptziele: (1) die Lokalisierung potenzieller klimasensitiver Tangelhumusstandorte im gesamten bayerischen Alpenraum, (2) die Entwicklung einer praktikablen Methode zur Erfassung dieser oft kleinräumigen Standorte im Gelände und (3) die Abschätzung des Wissensstandes über Tangelhumus und des Status quo der Humuspfleßmaßnahmen in der forstlichen Praxis.

Für die Erreichung dieser Ziele wurden in den gesamten Bayerischen Alpen auf vorstratifizierten Untersuchungseinheiten fast 12.000 Humuserhebungen durchgeführt. Ergänzt durch weitere Boden- und Vegetationsdaten aus dem WINALP-Projekt sowie Befragungen von Forstpersonal wurden diese mittels geeigneter Analysen, wie Generalisierte Additive Modelle oder Indikatorartenanalysen, ausgewertet und Ergebnisse abgeleitet welche sich wie folgt zusammenfassen lassen.

Tangelhumus kann unter verschiedensten Waldtypen und Expositionen der tiefmontanen bis subalpinen Stufe vorkommen und ist mit ca. 10% der Waldfläche (incl. Latschengebüsch) der Bayerischen Alpen weiter verbreitet als bisher angenommen. Entscheidende Bedeutung für die Ausbildung mächtiger Humusauflagen kommt der darunter ausgebildeten Mineralbodenmächtigkeit zu, welche bei den dicken Humuspaketen sehr gering entwickelt ist oder sogar gänzlich fehlt. Daher ist Tangelhumus vor allem auf carbonatreichen, rückstandarm verwitterten Kalken und Dolomiten anzutreffen und ist dort für die Funktionsfähigkeit der Berg- und Schutzwälder von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit entstand eine modellierte Verbreitungskarte welche als Abgrenzung einer Suchkulisse für Tangelhumus dienen kann und eine Eingrenzung störungsgefährdeter Standorte ermöglicht.

Vegetationsbasierte Analysen führten zu dem Ergebnis, dass mittels leicht erkennbarer säurezeigender Heidekraut- (*Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*) und Bärlappgewächse (*Lycopodium annotinum*, *Huperzia selago*) diese häufig kleinräumig verteilten Tangelhumusstandorte auf Kalk und Dolomit sehr gezielt lokalisiert werden können. Außerdem weisen diese Standorte eine hohe Artenzahl an totholzbesiedelnden Bryophyten auf, welche vermutlich nach der Holzzersetzung auf die Humusauflagen übergreifen.

Das Phänomen Tangelhumus ist in der Forstpraxis in den Bayerischen Alpen nur diffus geläufig, auch wenn bereits einige Maßnahmen zur Humuspflge durchgeführt werden. Die Bewahrung des Humuskapitals sollte auf den Waldflächen mit Tangelhumus ein Hauptziel der Forstwirtschaft darstellen und durch finanzielle Anreize gefördert werden.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse lassen sich als Empfehlungen in einem dreistufigen Verfahren zur Humuspflge auf Tangelhumusstandorten zusammenfassen, welche über die allgemeinen Prinzipien der sachgerechten Berg- und Schutzwaldbehandlung hinausgehen.

1) Der erste Schritt des Verfahrens ist die „Lokalisierung und das Auffinden“ und bildet die Grundlage für deren Schutz. Diese potentielle Flächenkulisse für Tangelhumus kann mittels der Modellierungsergebnisse abgeleitet werden. Ist die grobe Orientierung abgeschlossen kann auf Waldbestandsebene durch dominant vorkommende säurezeigende *Ericaceae* und *Lycopodiaceae* die genaue Verbreitung von Tangelhumus abgeschätzt werden.

2) Innerhalb dieser störungsempfindlichen Gebiete sollte eine resiliente Dauerbestockung priorisiertes Ziel der Waldbewirtschaftung sein. Dieser zweite Schritt könnte mit „Bewahrung vor Humusabbau“ bezeichnet werden und ist nur durch angepasste Schalenwildbestände welche eine erfolgreiche Naturverjüngung zulassen, die Vorausverjüngung von waldgesellschaftstypischen Haupt- und Begleitbaumarten, strukturreiche, stabile und geschlossene Waldbestände sowie die Freistellung von Waldweide zu erreichen.

3) Sind Tangelhumusstandorte durch großflächige Kalamitäten oder ausbleibende Verjüngung aufgelichtet worden, ist als dritter Schritt die „Wiederherstellung der Humusvorräte“ zu nennen. Das Belassen von Stamm- und Kronenholz, bei Waldschutzkonflikten ggf. handentrinnet, sollte hier unbedingt in Erwägung gezogen werden um Verjüngungsnischen zu schaffen, Erosion zu verhindern und den Biomasseinput zum Humusaufbau zu gewährleisten. Finanzielle Anreize sollten diese Maßnahmen vor allem in der Schutzwaldsanierung unterstützen.

Summary

Summary

Thick organic forest floors play a crucial role in mountain forests for concerning the efficiency and resilience of these ecosystems. Especially the humus form “Tangelhumus”, also called alpine humus, which can reach a thickness of more than 100 cm, make a significant contribution to ecosystem services of forest sites developed on rocky substrates. Since the middle of the 19th century, several studies have dealt with this particular humus form in the limestone Alps. However, these studies were primarily conducted locally on subareas, and the knowledge about the distribution of Tangelhumus in the entire region of the Bavarian Alps is still very scarce.

In light of the existing knowledge gaps in the extant literature, this thesis has three main objectives: (1) Localizing potential climate-sensitive Tangelhumus sites in the entire Bavarian Alps, (2) developing a practical method for detection of these often small-scaled sites in the field and (3) determining the knowledge of Tangelhumus and the current humus care measures in forest management practice.

To achieve these objectives, nearly 12.000 humus samples were taken throughout the Bavarian Alps on pre-stratified survey units. Supplemented by additional soil and vegetation data from the WINALP project and interviews with foresters, the data were evaluated by means of suitable analyses such as generalized additive model or indicator species analysis. The results can be summarized as follows.

Tangelhumus can be found under different forest types regardless of the exposition in the low montane to the subalpine belt. With about 10% of the forest area (including the krummholz) of the Bavarian Alps, Tangelhumus is more widespread than previously assumed. Crucial for the formation of thick forest floors is the mineral soil depth underneath, which is very poorly developed or even completely missing when the Tangelhumus layer is thick.

Therefore, Tangelhumus is mainly found on solid or coarse carbonate-rich, poorly weathered limestones and dolomites with a low residual clay content, where the forest floor is crucial for the functionality of mountain and protective forests. Through this present work, a modeled distribution map was developed, which allows a spatial delimitation of Tangelhumus sites at risk of disturbance.

Conducted vegetation-based analyses led to the result that by focusing on easily recognizable acidophilous *Ericaceae* (*Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*) and *Lycopodiaceae* (*Lycopodium annotinum*, *Huperzia selago*) these often small-scale distributed Tangelhumus sites can be localized very precisely on limestone and dolomite. In addition, these sites have a high species number of deadwood-colonizing bryophytes, which presumably spread to the humus layers after wood decomposition.

The phenomenon of Tangelhumus is only diffusely known in forest practice in the Bavarian Alps, even though some humus management measures are already being implemented. In forest areas with Tangelhumus, the preservation of the forest floor should be a primary goal of forest management, and financial incentives could prove to be beneficial.

The results can be summarized as recommendations in a three-stage procedure for humus management on Tangelhumus sites, going beyond the general principles of mountain and protective forest management:

Summary

- 1) The first step of the process is locating and finding the Tangelhumus sites in the field. The modeled map can derive this potential distribution area for Tangelhumus. Once the first rough orientation is completed, the precise location of Tangelhumus can be estimated at the forest stand level by prevailing acidophilous *Ericaceae* and *Lycopodiaceae*.
- 2) A resilient permanent forest cover within these disturbance-sensitive areas should be a prioritized forest management objective. This second step could be described as "preservation from humus mineralization" and can only be achieved by an adapted game density that allows a successful natural regeneration of main and associated tree species typical of the forest community, structurally rich, stable, and closed forest stands. The forest pasture exemption is a further condition to protect the forest floor.
- 3) Suppose Tangelhumus sites have been thinned out by large-scale bark beetle attack, windfall, or lack of regeneration. In that case, the third step is the restoration of humus stocks. Leaving stems and crown wood, debarked if necessary in forest protection conflicts, should be strongly considered here to create regeneration niches, prevent erosion, and ensure biomass input for humus restoration. Financial incentives should support these measures, especially in protective forest restoration.

1 Einleitung

1 Einleitung

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Intakte Bergwälder, insbesondere Schutzwälder, erbringen eine Vielzahl von Ökosystemdienstleistungen (Millennium Ecosystem Assessment 2005), was auch im Bayerischen Waldgesetz (Bayerischer Landtag 2005) verankert ist (Olleck et al. 2021). Diese Leistungen werden von Bürger-Arndt et al. (2012) in die Kategorien *unterstützend*, *regulierend*, *bereitstellend* und *kulturell bedeutsam* eingeteilt. Die Schutzwirkung spielt in den Wäldern der Bayerischen Alpen eine besondere Rolle. Bergwälder schützen vor Schneelawinen, Steinschlag, Erdbeben, Murgängen, Oberflächenerosion und Hochwasser (Brang et al. 2001), doch diese Schutzwirkung hängt in hohem Maße vom Relief und außerdem vom Vorhandensein von Bäumen ab (Kupferschmid et al. 2003; Schirpke et al. 2013). Ein dauerhafter Baumbestand ist demnach der Schlüssel für den Erhalt der Böden in weiten Teilen der Kalkalpen (Göttlein et al. 2014). Doch ohne eine Bodenbildung ist auch kein Baumwachstum möglich, es ist demnach ein korrespondierendes System. Oftmals sind die Böden in den Bayerischen Alpen nur sehr flachgründig entwickelt, weshalb organische Auflagen einen herausragenden Beitrag zum Wasserrückhalt leisten und oft das einzige Wurzel- und Nährsubstrat darstellen (Ewald et al. 2020). Der Verlust des Auflagehumus erhöht die Anfälligkeit der Wälder gegenüber Trockenperioden und senkt deren Wüchsigkeit (Baier 2015).

Mächtige Humusaufgaben spielen demnach in Bergwäldern eine sehr wichtige Rolle für die Leistungsfähigkeit, Biodiversität und Resilienz dieser Ökosysteme. Insbesondere die Humusform Tangelhumus, auch Alpenhumus genannt, welche Mächtigkeiten von mehr als 100 cm erreichen kann, hat eine essentielle Bedeutung für die auf felsigen Substraten entwickelten Waldstandorte. Tangelhumus ist nicht mit dem Rohhumus zu vergleichen, welcher in der Forstwirtschaft oft mit dicken Humuspaketen assoziiert wird (vgl. Infobox Tangelhumus vs. Rohhumus weiter unten). Neben diesen waldökologischen Funktionen stellt Tangelhumus auch einen bedeutenden Kohlenstoffspeicher dar, was insbesondere in Zeiten des Klimawandels bei der Waldbewirtschaftung berücksichtigt werden sollte (Ewald et al. 2020; Kohlpaintner und Göttlein 2020).

Diese essentielle Bedeutung von Tangelhumus ist allerdings nicht neu. Die ersten Beschreibungen dieser Humusform finden sich in Sendtner (1854) Mitte des 19. Jahrhunderts und zahlreiche Studien folgten (Kolb und Göttlein 2021; Ewald et al. 2020). Die ersten ausführlichen Beschreibungen erfolgten etwa 55 Jahre später durch Leiningen (1908, 1909, 1912). Er erkannte bereits die Bedeutung dieser mächtigen Humusaufgaben für die Waldstandorte und schrieb, dass „... Alpenhumus auch auf meterdicken Schichten schöne Waldbestände aller Art zu tragen vermag, welche häufig aus ihm alleine ihre Nährstoffe schöpfen“. Der Begriff Tangelhumus wurde erstmals von dem österreichischen Bodenkundler Kubiëna (1948, 1953) erwähnt. Eine umfangreiche Übersicht über die Herkunft und die derzeitigen Definitionen des Tangelhumus-Begriffes findet sich im Artikel von Kolb und Göttlein (2021). Neben den Untersuchungen von Zöttl (1965a, 1965b, 1966) waren es vor allem die umfassenden Forschungen von Bochter (1984a, 1984b, 1984c) und Kollegen (Bochter et al. 1981) im Nationalpark Berchtesgaden, welche neue Erkenntnisse über den Tangelhumus brachten.

1 Einleitung

<u>Infobox Tangelhumus vs. Rohhumus</u>			
Oft werden mächtige Humusauflagen mit der Humusform Rohhumus assoziiert. Diese Infobox soll einen kurzen Vergleich von Tangelhumus und Rohhumus geben, um dem Leser die Abgrenzung zum Tangelhumus zu erleichtern. Auch wenn die Definitionen sehr unterschiedlich sind und auch länderübergreifend noch nicht final abgeschlossen sind (Kolb und Göttlein 2021), können folgende Eigenschaften als klare Unterschiede zum Rohhumus aufgeführt werden.			
Merkmal	Tangelhumus	Rohhumus	Quelle
Ausgangsgestein	meist nur Carbonatgestein	oft saure Silikate	Kolb und Göttlein (2021); Eckelmann et al. (2005)
Of- und Oh-Horizonte	v.a. zoogen geprägt, weniger scharfe Horizontübergänge	v. a. mycogen geprägt, scharfe Horizontübergänge	Kolb und Göttlein (2021); Amelung et al. (2018)
pH-Wert	im Kontakt zum Ausgangsgestein (Ovh-Horizont) hoch (um 6 - sehr schwach sauer bis schwach sauer), nach oben hin sauer werdend (unter 4 - sehr stark sauer)	im Oh-Horizont < 4 - sehr stark sauer	Kolb und Göttlein (2021), Kohlpaintner und Göttlein (2009); Rehfuess (1990); Eckelmann et al. (2005); Arbeitskreis Standortkartierung (2016); Amelung et al. (2018)
C/N-Verhältnis	sehr weit (>35) in den oberen Horizonten und mittel bis mäßig weit (um 20) in den folgenden Tiefenstufen	im Of-Horizont weit bis sehr weit (29-38), im Oh mäßig weit bis weit (25)	Kolb und Göttlein (2021); Kohlpaintner und Göttlein (2009); Eckelmann et al. (2005); Arbeitskreis Standortkartierung (2016); Kohlpaintner und Göttlein (2020); Amelung et al. (2018)
Basensättigung	bis in die oberen Horizonte hoch (> 85 %),	durchgehend eher gering (Oh-Horizont ~24)	Kolb und Göttlein (2021); Kohlpaintner und Göttlein (2009); Baier (2006); Schubert et al. (2015)
Gefüge Kontakthorizont	krümelig, locker	lagig	Kolb und Göttlein (2021); Kohlpaintner und Göttlein (2009); Eckelmann et al. (2005)
podsolierende Prozesse	fehlend	vorhanden	Kolb und Baier (2001); Kubiëna (1953)

Seit diesen Untersuchungen sind viele weitere Forschungsprojekte und Studien in den Bayerischen Alpen hinzugekommen, welche Tangelhumus erfassten, sich mit den ökologischen Eigenschaften oder den Folgen des Humusschwundes auseinandersetzten. So bestärken die Ergebnisse von Christophel et al. (2013), Prietzel und Christophel (2014) sowie Gangkofner und Göttlein (2014) die Annahme, dass es zu einer klimabedingten Beschleunigung des Humusverlustes kommt. Dieser beschleunigte Humusabbau durch Mineralisation und Erosion, könnte auf Waldstandorten mit Tangelhumus innerhalb weniger Jahre erhebliche Funktionseinschränkungen und Kohlenstofffreisetzung zur Folge haben (Ewald et al. 2020). Der Verlust der organischen Auflage und deren schwerwiegende Folgen für das Waldökosystem war auch Bestandteil der Arbeiten von Kohlpaintner und Göttlein (2009) und Baier et al. (2016). Dass die Bildung von mächtigen Tangelhumusauflagen im Gegensatz zur Degradation ein sehr langsamer Prozess ist und mehrere tausend Jahre dauern kann (Baier 2006; Weber 1999; Zöttl 1965b), verdeutlicht deren Bedeutung.

Es gab auch großräumiger angelegte Projekte, welche sich mit den Wäldern und Böden der Kalkalpen auseinandersetzten. 2011 wurde das Interreg-Projekt „Waldinformationssystem Nordalpen“ (Akronym WINALP) erfolgreich abgeschlossen. In diesem Projekt wurden an über 1500 Aufnahmepunkten neben Vegetationsdaten auch Daten zu Mineralböden und Humus erhoben (Reger und Ewald 2012). Es folgten die beiden Projekte „Standortssicherung

1 Einleitung

im Kalkalpin“ (SicALP, Göttlein et al. 2014) und „Wälder der Kalkalpen - Strategien für die Zukunft“ (StratAlp, Katzensteiner et al. 2016). Durch die Ergebnisse dieser großräumig angelegten Projekte verdichteten sich die Hinweise, dass Tangelhumus weiter verbreitet ist, als bisher angenommen (Ewald et al. 2020). Auch Huber und Englisch (1997) kommen nach Auswertungen von Inventurdaten zu dem Schluss, dass Tangelhumus im gesamten Alpenraum vorkommt.

Tangelhumus war bereits in vielen Projekten Bestandteil der Forschung. Eine Abschätzung der Verbreitung im Bayerischen Alpenraum erfolgte jedoch bisher nur lokal und in Teilgebieten. Um diesen essentiellen, aber auch klimasensitiven Standortfaktor und darüber hinaus enormen Kohlenstoffspeicher zu stabilisieren bzw. weiter aufzubauen, ist eine verbesserte Kenntnis über dessen Verteilung im Bayerischen Alpenraum sowie eine praxistaugliche Lokalisierungsmethode im Gelände notwendig. Außerdem ist es für den Schutz von Tangelhumus entscheidend, dass dieser auch in der Forstpraxis auf der Fläche Beachtung und Anerkennung findet. Dazu ist neben dem Erkennen im Gelände auch eine angepasste, humuspfleghche Behandlung der Waldbestände notwendig.

Anhand dieser vorhandenen Wissenslücken zur Verbreitung, der Lokalisation im Waldbestand und dem Wissenstand in der Praxis wurden für diese Arbeit folgende Forschungsfragen abgeleitet:

- 1) Wo und in welchem Umfang ist Tangelhumus in den Bayerischen Alpen verbreitet?
- 2) Wie lässt sich Tangelhumus einfach und praxistauglich im Gelände lokalisieren?
- 3) Inwieweit findet Tangelhumus bereits heute Berücksichtigung in der Forstwirtschaft und was wären humusfördernde Maßnahmen?

Diese drei Hauptthemen (Regionalisierung, Lokalisation und Humuspflge in der Praxis) bilden den roten Faden in dieser Arbeit.

An dieser Stelle wird ein kurzer Überblick gegeben, was den Leser dieses Textes erwartet. In Kapitel 2 werden die Hauptziele dieser Arbeit übersichtlich und prägnant formuliert. Der Abschnitt 3 befasst sich mit dem methodischen Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen. Die Gliederung orientiert sich hier an den drei genannten Hauptthemen, welche in separaten Unterabschnitten aufgezeigt werden. Diese Aufteilung soll die Orientierung erleichtern und eine gezieltere methodische Recherche ermöglichen. Im 4. Teil der Arbeit werden die drei kumulativ wirksamen Veröffentlichungen zusammengefasst dargestellt. Die in diesen Artikeln verwendeten Quellen wurden am Ende dieser Arbeit in einem gesonderten Verzeichnis aufgeführt, was eine weitere Recherche zum Thema Tangelhumus erleichtern soll. In Kapitel 5 werden die Untersuchungsergebnisse in einem breiteren Kontext diskutiert. Auch hier findet sich die Gliederung nach den drei Hauptthemen Verbreitung, Lokalisation und Humuspflge wieder. Jeder der Diskussionsabschnitte schließt mit einem kurzen Fazit mit den wichtigsten Botschaften ab. Zum Abschluss erfolgt ein kurzes allgemeines Fazit der vorliegenden Forschungsarbeit.

2. Hauptziele der Arbeit

2. Hauptziele der Arbeit

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Wie in der Einleitung verdeutlicht wurde, sind an die organische Auflage auf Tangelhumusstandorten viele essentielle Waldfunktionen und die Leistungsfähigkeit der Waldstandorte gebunden. Dies macht daher einen pfleglichen Umgang mit dem Humuskapital unumgänglich. Grundlage dafür ist das Schließen einiger vorhandener Wissenslücken, damit die humuspfllegenden Maßnahmen gezielter in der Waldfläche der Bayerischen Alpen umgesetzt werden können. Hierfür wurde ein konzeptionelles Vorgehen entwickelt (Abb. 1), aus welchem sich die drei Hauptziele der Arbeit wie folgt ableiten lassen:

- 1) Regionalisierung (Publikation I): Für den Schutz der empfindlichen Tangelhumusstandorte durch angepasste Humuspfllege sind erweiterte Kenntnisse über Steuergrößen sowie die Verbreitung der Böden essentiell. Die räumliche Modellierung von mächtigen Humusauflagen in Abhängigkeit von Klima, Relief, Boden und Geologie für die Bayerischen Alpen stellt ein Hauptziel der Arbeit dar. Die bisher vorliegenden Daten zur Verbreitung von Tangelhumus ist nur sehr vage. Durch geeignete Methoden sollen profilbezogene Daten der Humusauflage in die Fläche modelliert und neue Geodaten über die Verbreitung erstellt werden. Die resultierenden Verbreitungskarten sollen eine Ausweisung von Tangelhumusgebieten ermöglichen und eine Stabilisierung der Humusauflage durch die gezielte Steuerung der Waldbehandlung unterstützen. Für diesen Zweck wird eine Einbindung der entsprechenden Geodaten in vorhandene Geoinformationssystemen (GIS) der Forstverwaltung und Bayerischen Staatsforsten angestrebt.
- 2) Lokalisation (Publikation II): Die unter Punkt 1 genannten Modellergebnisse bieten aufgrund des groben Maßstabes der Eingangsvariablen und der Kulissengröße nur eine grobe Orientierung im Gelände. Aufgrund der sehr kleinräumigen Variabilität von mächtigen Humusauflagen in den bayerischen Bergwäldern ist es für die waldbewirtschaftenden Personen erforderlich, diese Sonderstandorte auch auf Bestandesebene unkompliziert und schnell zu lokalisieren. Aus diesem Grund ist ein weiteres Ziel, eine Methode zu entwickeln, welche das Erkennen von Tangelhumus im Waldbestand sicher und einfach ermöglicht.
- 3) Wissensstand/Unterstützungsbedarf/Schutzkonzept (Publikation III): Ein weiterer Baustein zum Schutz der mächtigen Humusauflagen ist die Sensibilisierung der Waldbewirtschafter für das Thema und die Wissensvermittlung. Demzufolge soll im Rahmen der Arbeit abgeschätzt werden, wie der Wissensstand zum Thema Tangelhumus bei den Försterinnen und Förstern in den Bayerischen Alpen aktuell ist. Außerdem soll eruiert werden, ob aktuell auf diesen Waldstandorten bereits spezielle humuspflgende Maßnahmen stattfinden bzw. welche zusätzlichen Informationen und Hilfsmittel notwendig sind, um die Umsetzung von stabilisierenden Maßnahmen zu begünstigen.

Die Ergebnisse der in den Punkte 1-3 ausgearbeiteten Hauptzielen sollen als Grundlage für die Ableitung eines Tangelhumuspfllegekonzeptes für die Bayerischen Alpen dienen.

2. Hauptziele der Arbeit

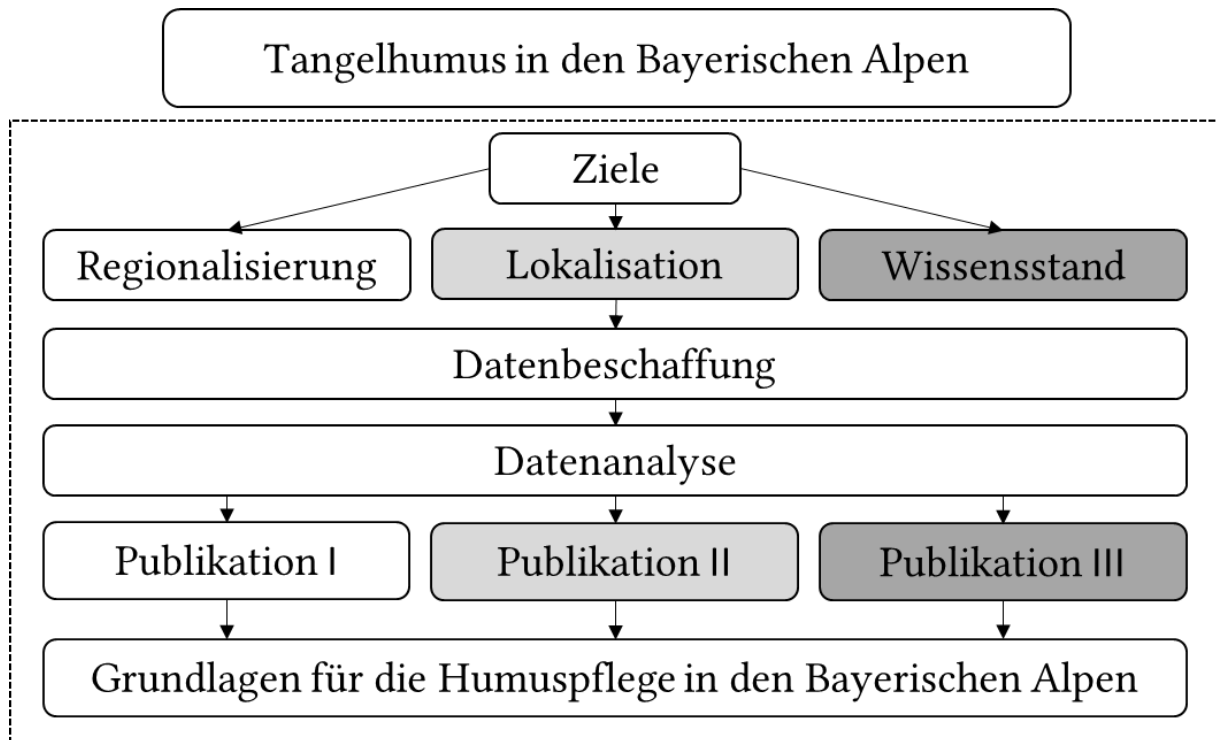


Abb. 1: Überblick über den konzeptionellen Rahmen, den Workflow und die Ziele dieser Arbeit.

3 Material und Methoden

3 Material und Methoden

3.1 Das Untersuchungsgebiet

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Der Bayerische Alpenraum erstreckt sich gemäß der Wuchsgebietsgliederung Bayerns (Foerst und Kreutzer 1977) auf das Wuchsgebiet 15 „Bayerische Kalkalpen“ (Abb. 2). Dieses umfasst ca. 4.600 km² und schließt ca. 260.000 ha Wald (incl. Latschengebüsche) ein. Etwa 60% der Waldfläche sind als Schutzwald im Sinne des Bayerischen Waldgesetzes (Artikel 10) ausgewiesen (Binder et al. 2019). Die Meereshöhenamplitude misst annähernd 2.500 Höhenmeter und hat ihren niedrigsten Punkt (473 m ü. NN) im Saalachtal, ihren höchsten an der Zugspitze (2.962 m ü. NN). Aufgrund dieser weiten Höhenstufenamplitude und des Westostverlaufs der Alpen, ergeben sich deutliche Gradienten der Lufttemperatur und der Niederschlagssummen (Olleck et al. 2020). Die mittleren Jahrestemperaturen liegen an Waldstandorten zwischen 2 und 9°C, die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssummen im Bereich von 1.175 bis 2.800 mm (Reger et al. 2014b). Das Niederschlagsmaximum fällt nach Ewald (1997) in die Sommermonate Juni bis August (vgl. auch die Klimadiagramme in Abb. 3). Die natürlichen Waldgesellschaften (vgl. Tab. 1) setzen sich überwiegend aus montanen Bergmischwäldern mit den Hauptbaumarten Fichte (*Picea abies*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Tanne (*Abies alba*) zusammen, welche von typischen Baumarten wie Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Mehlsbeere (*Sorbus aria*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und Eibe (*Taxus baccata*) begleitet werden (Reger et al. 2014b). Die subalpine Stufe wird ab ca. 1.400 m von Fichten dominiert und schließt nach oben auf ca. 1.800 m mit den Latschengebüschen (*Pinus mugo*) ab, welche die Waldgrenze bilden (ebenda). In diesen Höhen tritt auf nordseitigen, feuchteren, wasserzügigen Standorten die Grünerle (*Alnus alnobetula*) als Pendant zur Latsche auf, welche sich wegen Schneeschimmelbefalls nicht behaupten kann (Franz 1979).

Tab. 1: Natürliche Waldgesellschaften in den Höhenstufen der Bayerischen Alpen (verändert aus Ewald 1997)

Höhenstufe		Schlussgesellschaft	Besondere Merkmale Begleitgesellschaft
Hoch-	1.800 m	Latschengebüsch/ Lärchen- Zirbenwald	lückig, mit Rasen und Zwergstrauchheiden
Tief-	1.400 m		
Hoch-	1.200 m	Buchen-Tannen-Fichtenwald	oft Fichten-reich, Farn-, Hochstauden- oder Grasreich (schneereich)
Tief-	800 m	Buchen-Tannen-Fichtenwald	meist Fichten-arm, Vorkommen submontaner Baumarten
		Tannen-Buchenwald	
Sub-	500 m	Buchenwald	mit Eiche

Das Untersuchungsgebiet ist von kleinräumigen Unterschieden in Klima, Relief und geologischen Ausgangsbedingungen der Bodenbildung geprägt, wobei sich zwischen der Höhe und der Temperatur ein Gradient des Jahresmittels von 0,48 K/100 m ($R^2 = 0,48$) ergibt (Walentowski et al. 2001, Ewald 1997, Datenbasis Fliri 1975). Dieser Zusammenhang ist beim Niederschlag nicht so deutlich zu erkennen, da dieser starken regionalen und lokalen Effekten unterliegt (Walentowski et al. 2001).

Der südliche größere Teil des Untersuchungsgebietes ist durch Kalke und Dolomite geprägt, welche sich nach Norden von den Flysch-, Molasse- und Helvetikumzonen abgrenzen (Abb.

3 Material und Methoden

2). Abgesehen von einigen eisfreien Nunatakkern war die gesamte Region in den Eiszeiten immer wieder vergletschert (van Husen 1987), was durch den daraus resultierenden Gletscherschurf zu überwiegend jungen und flachgründigen Böden führte (Baier 2015). Aufgrund der hohen Variabilität von bodenbildenden Faktoren (Relief, Geologie, Mikroklima, Bodenwasser und Vegetation) treten kleinräumig unterschiedlichste Stadien der Bodenentwicklung auf (Veit 2002).

An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick über die Bodenentwicklungsserie auf Kalkgesteinen gegeben werden. Der Fokus liegt hier bei den reinen und silikatarmen Carbonatgesteinen (CaCO_3 - bzw. MgCO_3 -reich) wie Kalke und Dolomite. Auf diesen Gesteinen ist der spezifische Verwitterungsprozess die Carbonatlösung, durch welche überwiegend Ca und Mg gelöst und aus dem Oberboden ausgewaschen werden (Rehfuess 1990). Dieser Prozess wird in den Alpen durch die teilweise humusreichen und von kühlen, kohlesäurehaltigen Sickerwässer durchspülten Böden beschleunigt (Baier und Göttlein 2004; Stahr et al. 2016). Neben dem teilweise ausgefällten Calcit, bleiben überwiegend nichtcarbonatische Lösungsrückstände, welche mehrheitlich der Tonfraktion zuzurechnen sind (Rehfuess 1990). Nach der Besiedlung erster Pflanzen kommt es zu einer geringfügigen Ansammlung organischen Materials, auf welchem sich nach und nach höher Pflanzen ansiedeln können, welche den Biomasseeintrag weiter erhöhen (Kolb und Kohlpaintner 2018). Diese Anreicherung des mineralischen Residuums verläuft sehr langsam, weshalb es zu verstärkter Akkumulation von organischem Material kommt (Veit 2002). Initiale Bodentypen sind hier der Felshumusboden (O/mC) bzw. der Skeletthumusboden (x_C+O/C), welche der Klasse O/C- Böden zugeordnet sind (Eckelmann et al. 2005). Schreitet die Entwicklung eines initialen Mineralbodenhorizontes (Ai bzw. Aih) voran, kommt es über das Stadium der Protorendzina (Aih/cmC) zur Rendzina (Ah/cC) (ebenda). Durch die andauernde Entcarbonatisierung kommt es zur verstärkten Anreicherung von tonigen Lösungsrückstand, was zur Ausbildung eines tonreichen Horizontes führt (Rehfuess 1990). Diese Terra fusca (Ah/Tv/cC) können sich durch Tonverschlammung und Pseudovergleyung in Parabraunerden-Terra fusca oder Pseudogley-Terra fusca weiter entwickeln (Eckelmann et al. 2005; Rehfuess 1990).

Wie kann nun der Tangelhumus in diese Bodenentwicklungsserie eingeordnet werden? Sind die Kalke und Dolomite jedoch sehr rein (Carbonatanteil Ca- und/oder MgCO_3 >90% in Verbindung mit einem geringen Tonanteil (Kolb und Kohlpaintner 2018)), kommt es nur zu einer sehr geringen bis ausbleibenden (Erosionslagen) Mineralbodenbildung. Das organische Material akkumuliert sich, was durch die ausbleibende Bioturbation und scharfes Austrocknen weiter gefördert wird (Kolb und Kohlpaintner 2018). Dauert dieses Stadium für einen längeren Zeitraum an, kommt es zu einer chemischen Entkopplung vom basischen Ausgangsgestein (Olleck et al. 2020), was den Humusabbau zusätzlich hemmt.

Der Tangelhumus ist nach aktueller deutscher Definition eine Sonderform der Auflagehumusformen über Fels, in welchem der O_{vh}-Horizont als diagnostisch aufgeführt wird (Kolb und Göttlein 2021). Sie ist somit weitestgehend auf die Klasse der O/C-Böden anzuwenden. Eine geringmächtige Ausbildung eines Mineralbodenhorizontes ist unter mächtigen Auflagen jedoch möglich (vgl. Kolb und Kohlpaintner 2018) weshalb die Übergänge der Bodentypen mit Tangelhumus fließend sind.

3 Material und Methoden

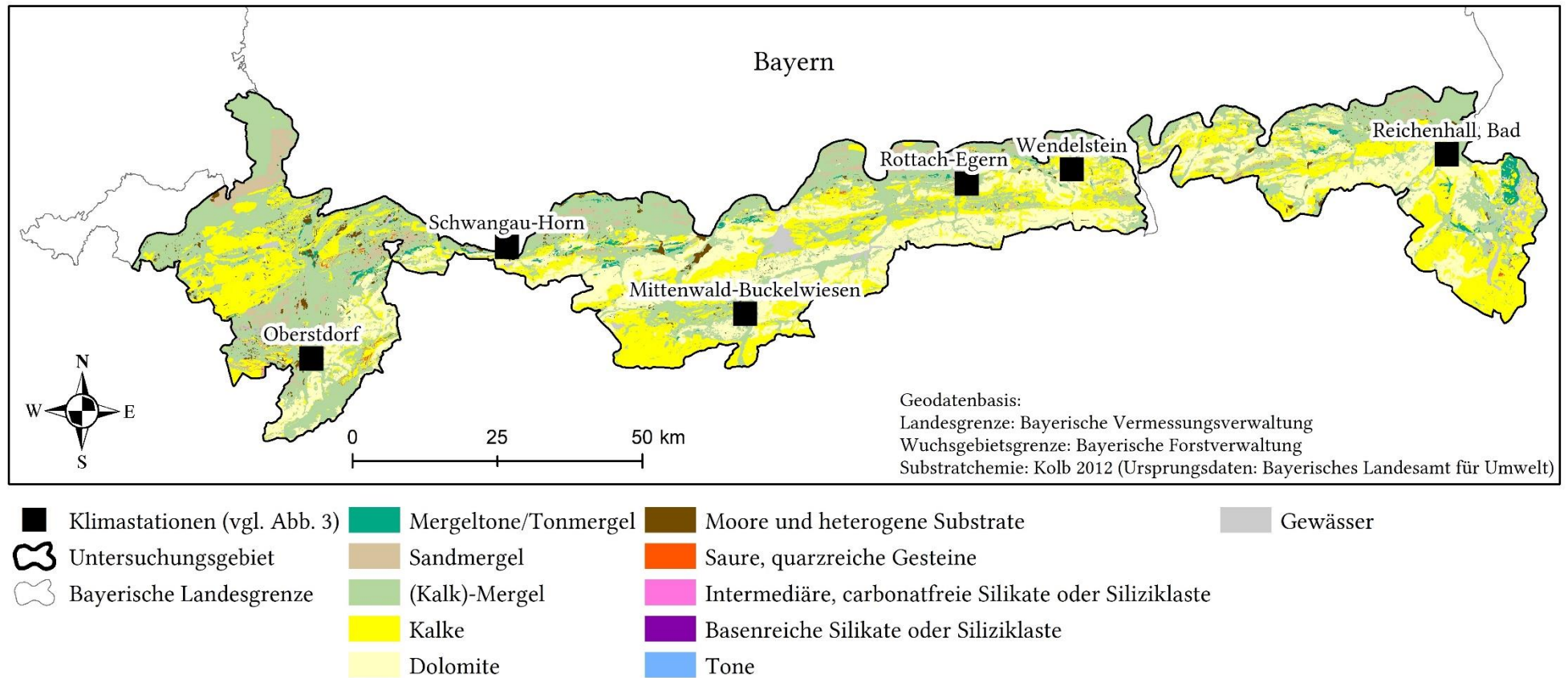


Abb. 2: Überblick der geologischen Substratchemie nach Kolb (2012) des Untersuchungsgebietes (Wuchsgebiet 15 – Bayerische Alpen gemäß Foerst und Kreutzer 1977). Die Quadrate kennzeichnen die Standorte der in Abb. 3 dargestellten Klimastationen.

3 Material und Methoden

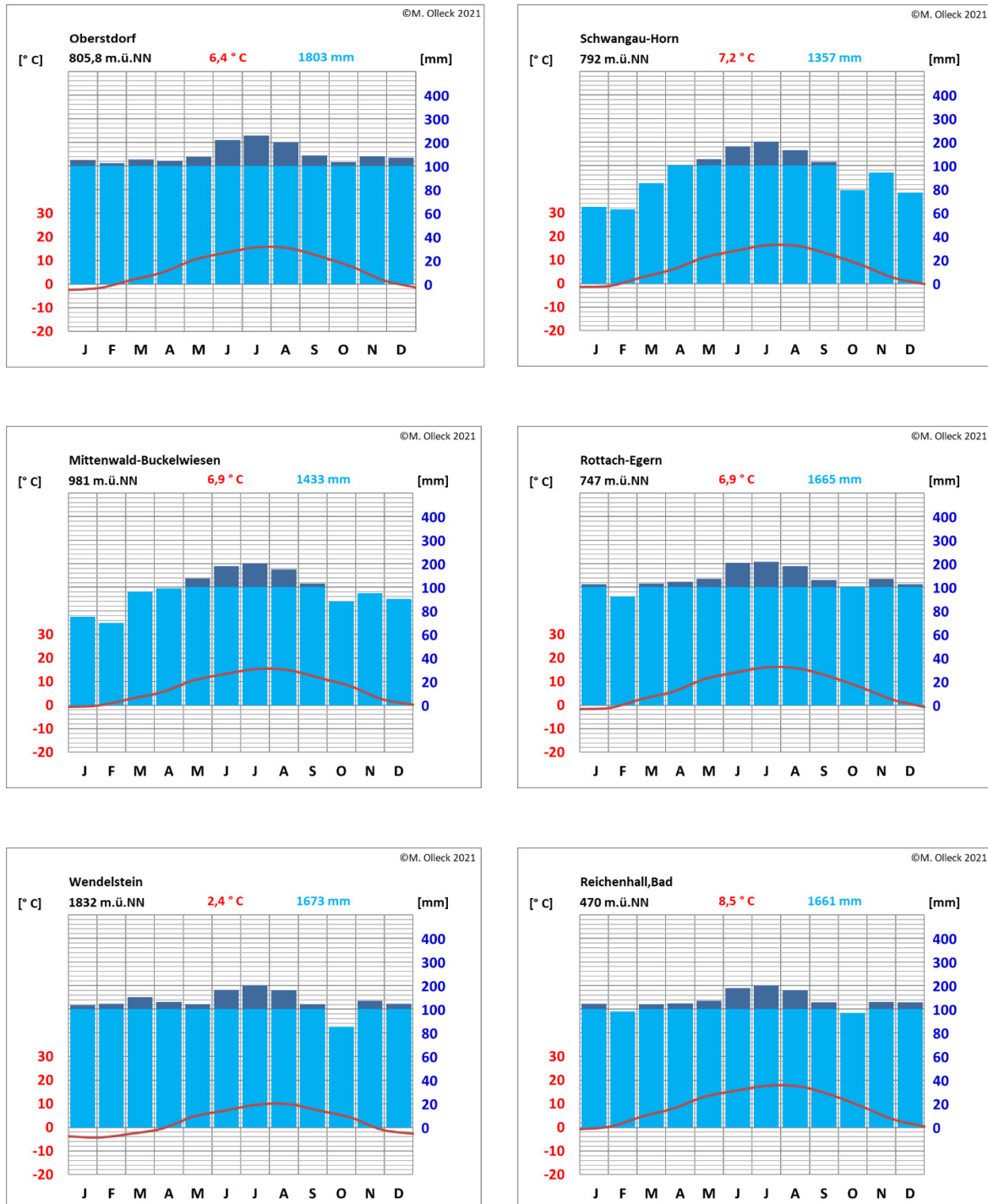


Abb. 3: Walter/Lieth-Klimadiagramme von sechs (Standorte vgl. Abb. 2) über das Untersuchungsgebiet verteilten (von Westen nach Osten) Klimastationen. Die ausgewählten Stationen zeigen die große Bandbreite der Meereshöhe und der damit verbundenen Variabilität der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag im Jahresdurchschnitt sowie im Jahresverlauf. Die Messzeiträume sind jeweils 1971-2000 (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst 2021).

3.2 Regionalisierung in der Landschaft (Publikation I)

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Erweiterte Kenntnisse zur Verbreitung von den empfindlichen Tangelhumusstandorten sind wie eingangs erwähnt für den Schutz essentiell und war ein Hauptziel dieser Arbeit. Verbreitungskarten sollten eine Ausweisung von Tangelhumus-Gebieten ermöglichen und eine Stabilisierung der Humusaufgabe durch die gezielte Steuerung der Waldbehandlung verbessern. Um dieses Ziel zu erreichen, sind eine Vielzahl von technischen und statistischen Methoden verfügbar. Dieser Abschnitt erläutert das methodische Vorgehen, welches in der ersten Publikation dieser kumulativen Dissertation angewandt wurde (Olleck et al. 2021), um die Verbreitung von Tangelhumus im Bayerischen Alpenraum zu regionalisieren.

3.2.1 Auswahl der Untersuchungsflächen

Das Untersuchungsgebiet ist von kleinräumigen Unterschieden im Klima, im Relief und in den geologischen Ausgangsbedingungen der Bodenbildung geprägt (Walentowski et al. 2001). Da diese inhomogene Vielzahl an Standorten möglichst gut abgebildet werden sollte, wurde eine (Vor-)Stratifizierung nach geeigneten Auswahlkriterien durchgeführt. Unter einer Stratifizierung versteht man allgemein die Einteilung des Untersuchungsgebietes in durch Hilfsvariablen definierte Teilgebiete und eine damit verbundene vorgegebene Anzahl von Stichprobeneinheiten (Straten) (Saborowski und Dahm 1997). Ziel ist es, durch dieses Vorgehen den Stichprobenfehler zu verringern (ebenda) und die Datenerhebung effizienter zu gestalten (West 2015, zitiert in Wallner 2021). Ein solches Vorgehen kann gegenüber einem systematischen oder zufälligen Auswahlverfahren genauere Schätzungen ergeben, wenn sich homogene und gut abgrenzbare Straten ausscheiden lassen (Wallner 2021; Saborowski und Cancino 2008).

Die Auswahlkriterien zur Stratifizierung wurden nach physiographischen Kriterien in ArcGIS 10.4.1 (ESRI Inc. 2020) durchgeführt. Diese Einteilung diente zur Vorauswahl von Untersuchungseinheiten im standörtlich sehr vielfältigen Untersuchungsgebiet. Berücksichtigt wurden Attribute des geologischen Ausgangssubstrates, der Höhenlage und des Reliefs. Für eine Kombination dieser Parameter wurde eine dreiziffrige Codierung (Stratenziffern) angewandt, dessen Herleitung im Folgenden erläutert wird.

Die Substratklassifizierung der ersten Stratenziffer erfolgte anhand der Substratkarte der Bayerischen Alpen (Kolb 2012). Aus dieser wurden für die Verbreitung von Tangelhumus potentiell infrage kommende Substrateinheiten (nach Kolb und Kohlpaintner (2018) feste und lockere Kalk- und Dolomitgesteine mit hohen Carbonatgehalten (>90%) ausgewählt und erneut zusammengefasst (Tab. 2).

3 Material und Methoden

Tab. 2: Auswahl der für die Stratifizierung (1. Ziffer) verwendeten Substrate (Olleck et al. 2020).

Eingangsinformation aus Substratkarte (Kolb 2012)		Abgeleitete Information für die Stratifizierung	
Substratkennziffer	Substrattyp	Substrat-Stratenziffer	Substrat-Stratentyp
281	Hartkalke, z.T. konglomeratisch	1	Festgestein und Blockstürze, kalkig
282	Kalke, z.T. konglomeratisch	1	Festgestein und Blockstürze, kalkig
291	Hartdolomite	2	Festgestein und Hart-Brekkzien, dolomitisch
292	Dolomite	2	Festgestein und Hart-Brekkzien, dolomitisch
382	carbonatische Lokalmoränen	3	Hangschutt, kalkig und Lokalmoränen, carbonatisch
481	Blockstürze	1	Festgestein und Blockstürze, kalkig
482	kalkige Hangschutte	3	Hangschutt, kalkig und Lokalmoränen, carbonatisch
492	dolomitische Hangschutte	4	Hangschutt, dolomitisch
583	kalkige Bachschuttkegel	5	Schuttkegel, kalkig
591	dolomitische Hart-Brekkzien	2	Festgestein und Hart-Brekkzien, dolomitisch
593	dolomitische Bachschuttkegel	6	Schuttkegel, dolomitisch

Die zweite Stratenziffer, abgeleitet aus dem digitalen Geländemodell mit 10 m Auflösung (DGM10) der Bayerischen Vermessungsverwaltung, repräsentiert die Höhenstufe (m ü. NN) und war unterteilt in a) Tieflagen unter 1.000 m (Höhenstratenziffer = 1) b) mittlere Lagen zwischen 1.000-1.500 m (Höhenstratenziffer = 2) sowie c) in Hochlagen höher 1.500 m (Höhenstratenziffer = 3) (Tab. 3).

Tab. 3: Auswahl der für die Stratifizierung (2. Ziffer) verwendeten Höhenstufen.

Eingangsinformation aus DGM10	Abgeleitete Information für die Stratifizierung	
Höhenstufen	Höhen-Stratenziffer	Höhen-Stratentyp
< 1.000 m	1	Tieflagen
1.000 - 1.500 m	2	Mittlere Lagen
> 1.500m	3	Hochlagen

Eine Kombination aus Hangneigung und Exposition (Tab. 4), welche sich an den Vorgaben des Arbeitskreis Standortkartierung (2016) orientieren, bildet die dritte Stratenziffer. Auch diese Daten wurden aus dem DGM10 abgeleitet.

Tab. 4: Bildung der Relief-Stratenziffern aus einer Kombination von Hangneigung und Exposition (Olleck et al. 2020, verändert).

Eingangsinformation aus DGM10		Abgeleitete Information für die Stratifizierung	
Hangneigung [Grad]	Exposition*	Relief-Stratenziffer	Relief-Stratentyp
0-15	sonn- und schattseitig	1	sonn- und schattseitige Plateaulagen
15-30	schattseitig	2	schattseitige geneigte bis steile Hanglagen
15-30	sonnseitig	3	sonnseitige geneigte bis steile Hanglagen
30-90	schattseitig	4	schattseitige steile bis schroffe Hanglagen
30-90	sonnseitig	5	sonnseitige steile bis schroffe Hanglagen

* Einteilung in sonnseitig 112,5°-292,5° und schattseitig 0°-112,4° und 292,6°- 360° (Arbeitskreis Standortkartierung 2016).

3 Material und Methoden

Bisherige Geländeerfahrungen von am Forschungsprojekt beteiligten Kollegen zeigten, dass sich Tangelhumus auch auf Plateaulagen und endgültig trockengefallenen Schotterauen finden lässt. Daraus resultierte die Ausweisung weiterer „Sonderstraten“, welche neben den drei obengenannten Substrat-, Höhen- und Reliefziffern auch Wertebereiche des Topografischen Feuchtigkeitsindex (TWI, topographic wetness index) zugeordnet bekamen (Tab. 5). Dieser TWI dient in humiden Regionen häufig zur Abschätzung der relativen Bodenfeuchte (Buchanan et al. 2014). Er wurde anhand des DGM10 berechnet. Die TWI-Wertebereiche wurden mittels Pixelinspektor in ArcGIS (ESRI Inc. 2020) in den Bereichen „Wildbachauen“, „Auenwälder“ und „Plateaulagen“ der Waldtypenkarte (Reger und Ewald 2012) ermittelt.

Tab. 5. Ausweisung der Sonderstraten nach Olleck et al. 2020.

Substratkennziffer (Kolb 2012)	TWI-Wertebereich	Höhenstufe [m ü. NN]	Sonderstraten-Ziffer	Sonder-Stratentyp
673, 672, 373	7-11	<1.000	816	Auengebiete der Tieflagen
673, 672, 373	7-11	>1.000	846	Auengebiete > 1.000 m
281, 282, 481, 291, 292, 591	5-8	<1.000	717	Plateaus der Tieflagen
281, 282, 481, 291, 292, 591	5-8	1.000-1.500	727	Plateaus der mittleren Lagen
281, 282, 481, 291, 292, 591	5-8	>1.500	737	Plateaus der Hochlagen

Diese Stratifizierung ergab insgesamt 96 Einheiten, mit teils sehr kleinen Flächenanteilen. Daher wurden sehr kleinflächige und ähnliche Straten weiter zusammengefasst. Diese Komprimierung erfolgte anhand der Höhen- und Relief-Stratenziffern in folgenden Fällen (vgl. auch Tab. 6):

- Stratenziffern 131, 132, 133, 134 & 135 wurden zu 138
- Stratenziffern 231, 232, 233, 234 & 235 wurden zu 238
- Stratenziffern 331, 332, 333, 334 & 335 wurden zu 338
- Stratenziffern 431, 432, 433, 434 & 435 wurden zu 338
- Stratenziffern 512 & 513 wurden zu 510
- Stratenziffern 514 & 515 wurden zu 519
- Stratenziffern 521, 522, 523, 524, 525, 531, 532, 533, 534 & 535 wurden zu 548
- Stratenziffern 612 & 613 wurden zu 610
- Stratenziffern 614 & 615 wurden zu 619
- Stratenziffern 621, 622, 623, 624, 625, 631, 632, 633, 634 & 635 wurden zu 648
- Stratenziffern 826 & 836 wurden zu 846

Zusätzlich wurden die Polygone mittels der „Nibble“-Funktion (ESRI Inc. 2020) weiter geglättet, indem zusammenhängende Rasterzellen von < 400 m² Größe durch den Wert des häufigsten Nachbarn ersetzt wurden. Diese Glättung wurde allerdings bei den Plateau-Sonderstraten nicht angewandt, da sonst kleinere Vorkommen dieses Stratums, z.B. entlang von Gratstrukturen, unberücksichtigt geblieben wären. Der letzte Schritt der Stratifizierung war der Zuschnitt auf die Waldfläche. Als Walddecker wurde die Ausdehnung der Waldtypenkarte incl. Latschengebüsche aus Reger und Ewald (2012) verwendet. Final ergaben sich für die Beprobung im Gelände 57 Straten (Tab. 6).

3 Material und Methoden

Tab. 6: Final ausgewiesene und untersuchte Straten (Olleck et al. 2020).

Stratenziffer	Beschreibung
111	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze ebener - stark geneigter Tieflagen
112	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr stark geneigter - steiler, schattseitiger Tieflagen
113	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr stark geneigter - steiler, sonnseitiger Tieflagen
114	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger Tieflagen
115	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr steiler - sehr schroffer, sonnseitiger Tieflagen
121	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze ebener - stark geneigter, mittlerer Lagen
122	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr stark geneigter - steiler, schattseitiger mittleren Lagen
123	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr stark geneigter - steilen, sonnseitiger mittleren Lagen
124	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger mittleren Lagen
125	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze sehr steilen - sehr schroffen, sonnseitigen mittlerern Lagen
138	kalkige(s) Festgestein & Blockstürze ebener - stark schroffer Hochlagen
211	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien ebener - stark geneigter Tieflagen
212	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr stark geneigten - steiler, schattseitiger Tieflagen
213	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr stark geneigter - steiler, sonnseitiger Tieflagen
214	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger Tieflagen
215	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr steiler - sehr schroffer, sonnseitiger Tieflagen
221	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien ebener bis stark geneigter mittlerer Lagen
222	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr stark geneigter - steiler, schattseitiger mittlerer Lagen
223	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr stark geneigter - steiler, sonnseitiger mittlerer Lagen
224	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger mittlerer Lagen
225	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien sehr steiler - sehr schroffer, sonnseitiger mittlerer Lagen
238	dolom. Festgestein & Hart-Brekkzien ebener - stark schroffer Hochlagen
311	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., ebener - stark geneigter Tieflagen
312	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr stark geneigter - steiler, schattseitiger Tieflagen
313	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr stark geneigter - steiler, sonnseitiger Tieflagen
314	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger Tieflagen
315	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr steiler - sehr schroffer, sonnseitiger Tieflagen
321	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., ebener - stark geneigter mittlerer Lagen
322	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr stark geneigter - steiler, schattseitiger mittlerer Lagen
323	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr stark geneigter - steiler, sonnseitiger mittlerer Lagen
324	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger mittlerer Lagen
325	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., sehr steiler - sehr schroffer, sonnseitiger mittlerer Lagen
338	Hangschutt kalkig & Lokalmoränen carbonat., ebener - stark schroffer Hochlagen
411	dolom. Hangschutt ebener - stark geneigter Tieflagen
412	dolom. Hangschutt sehr stark geneigter - steiler, schattseitiger Tieflagen
413	dolom. Hangschutt sehr stark geneigter - steiler, sonnseitiger Tieflagen
414	dolom. Hangschutt sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger Tieflagen
415	dolom. Hangschutt sehr steiler - sehr schroffer, sonnseitiger Tieflagen
421	dolom. Hangschutt ebener - stark geneigter mittlerer Lagen
422	dolom. Hangschutt sehr stark geneigter - steiler, schattseitiger mittlerer Lagen
423	dolom. Hangschutt sehr stark geneigter - steiler, sonnseitiger mittlerer Lagen
424	dolom. Hangschutt sehr steiler - sehr schroffer, schattseitiger mittlerer Lagen
425	dolom. Hangschutt sehr steiler - sehr schroffer, sonnseitiger mittlerer Lagen
438	dolom. Hangschutt ebener - stark schroffer Hochlagen
511	kalkige Schuttkegel ebener - stark geneigter Tieflagen
510	kalkige Schuttkegel sehr stark geneigter - steiler Tieflagen
519	kalkige Schuttkegel sehr steiler - sehr schroffer Tieflagen
548	kalkige Schuttkegel ebener - sehr schroffer Lagen > 1.000 m
611	dolom. Schuttkegel ebener - stark geneigter Tieflagen
610	dolom. Schuttkegel sehr stark geneigter - steiler Tieflagen
619	dolom. Schuttkegel sehr steiler - sehr schroffer Tieflagen
648	dolom. Schuttkegel ebener - sehr schroffer Lagen > 1.000 m
717	kalkige und dolom. Plateaus der Tieflagen
727	kalkige und dolom. Plateaus der mittleren Lagen
737	kalkige und dolom. Plateaus der Hochlagen
816	mergelige, fluviatile & glaziale Lockersedimente in Auengebieten der Tieflagen
846	mergelige, fluviatile & glaziale Lockersedimente in Auengebieten über 1.000 m

3 Material und Methoden

3.2.2 Datenerfassung

Für die Datenerfassung im Gelände wurde das Untersuchungsgebiet in fünf Großregionen eingeteilt, welche sich an den naturräumlichen Einheiten von Meynen et al. (1953-62) orientierten (Tab. 7).

Tab. 7: Großregionen und dazugehörige naturräumliche Einheiten nach Meynen et al. (1953-62) (Olleck et al. 2020).

Großregion	Naturräumliche Einheiten (Anzahl der Untersuchungsflächen)
Allgäuer Alpen	Hinterer Bregenzer Wald (8), Allgäuer Hochalpen (27), Vorderer Bregenzer Wald (8), Vilser Gebirge (3), Iller-Vorberge (8), Ammergebirge (4, westlicher Teil)
Werdenfeller Land	Wettersteingebirge (9), Karwendelgebirge (18), Ammergebirge (3, östlicher Teil), Niederwerdenfeller Land (4), Kocheler Berge (23)
Mangfallgebirge	Mangfallgebirge (57)
Chiemgauer Alpen	Chiemgauer Alpen (46), Loferer und Leoganger Alpen (16)
Berchtesgadener Alpen	Berchtesgadener Alpen (57)

Die Datenerfassung fand im Rahmen von fünf Bachelorarbeiten in der Vegetationsperiode 2017 statt (Feulner (2017), Haunstetter (2018), Jakob (2018), Lawrenz-Grunow (2018) und Wagner (2018)). Innerhalb der unter Kapitel 3.2.1 (Stratifizierung) in den Großregionen ausgewählten Polygonen wurden an repräsentativen Stellen zwei sich mittig kreuzende 20 m lange Transekte angelegt, woraus eine 400 m² große Untersuchungsfläche resultierte (Abb. 4). Die Koordinaten zur Georeferenzierung der Fläche wurden am Schnittpunkt der beiden Erfassungslinien (Punkt M in Abb. 4) mittels GPS-Gerät erhoben. Entlang der beiden Transekte wurde in 1 m-Abständen die Auflage- und Mineralbodenmächtigkeit orthogonal zur Hangoberfläche erfasst. An den Punkten A-D sowie M (vgl. Abb. 4) wurde die Ansprache etwas detaillierter vorgenommen und die an die organische Auflage angrenzenden Mineralbodenhorizonte angesprochen sowie Besonderheiten wie z.B. rötliche Totholz einschüsse notiert. Die Messung erfolgte durch einen eigens konstruierten Leichtbohrstock, welcher aus einem 20 mm starken Aluminiumrohr gefertigt wurde (Abb. 5). Übertraf die Bodenmächtigkeit die Länge des Leichtbohrstocks, wurde die Messung mittels Geolog-Bohrstock durchgeführt. Ergänzend wurde eine ebenfalls selbst konstruierte, 1 m lange Sondiernadel (Abb. 6) verwendet. Neben den bodenkundlichen Daten wurden auf der Untersuchungsfläche auch Informationen zu Vegetation, Relief und Waldbestand erfasst (Tab. 8).

Die Erfassung der Vegetationsdeckung erfolgte schichtweise nach 1. Baumschicht (BS1), 2. Baumschicht (BS2), Strauchschicht (StrS), Krautschicht (KS), Mooschicht (MS) und Flechten anhand einer siebenstufigen modifizierten Skala Braun-Blanquet-Skala (Braun-Blanquet 1964) mit den Klassen r = deutlich <1% Deckung, + = bis 1%, 1 = 1-4%, 2 = 5-25%, 3 = 26-50%, 4 = 51-75% und 5 = 76-100%.

Pflanzen bis 1 m Höhe sowie unverholzte größer 1 m wurden der KS zugeordnet. Die StrS umfasste alle Gehölze zwischen 1 und 5 m Höhe. Pflanzen auf Steinen, Wurzeln oder Totholz wurden nicht erfasst.

3 Material und Methoden

Tab. 8: Überblick der erfassten Parameter auf den Untersuchungsflächen (Olleck et al. 2020).

Parameter	Einheit	Bezugsfläche Datenerfassung	
		Gesamtfläche	Teilfläche Bodenvegetation
Vegetation			
Aktuelle Bestockung	Baumarten in BS1 und BS2	x	
Deckung nach einzelnen Schichten (Baumschicht 1 (BS1), Baumschicht 2 (BS2), Strauchschicht (StrS), Krautschicht (KS), Mooschicht (MS) und Flechten)	%	x	
Bodenvegetation (KS, MS, Flechten)			
Torfmoose, alle Arten zusammengefasst	%		x
Bärlappgewächse, alle Arten zusammengefasst	%		x
Grasartige, alle Arten zusammengefasst	%		x
Heidekrautgewächse, auf Artniveau	%		x
Reliefdaten			
Hangrichtung [Grad]	Grad	x	
Hangneigung [Grad]	Grad	x	
Vorhandensein von Luftwurzeln [Ja/Nein]	Ja/Nein	x	
Vorhandensein von offenliegendem Fels [Ja/Nein]	Ja/Nein	x	
Liegendes Totholz [Ja/Nein]	Ja/Nein	x	
Vorhandensein von Runsen [Ja/Nein]	Ja/Nein	x	
Vorhandensein von Karren [Ja/Nein]	Ja/Nein	x	
Vorhandensein von Buckeln [Ja/Nein]	Ja/Nein	x	
Vorhandensein von Stufen [Ja/Nein]	Ja/Nein	x	
Pflegezustand*	gut/mittel/schlecht	x	
Beweidung	Ja/Nein	x	

* Bewertung anhand waldbaulicher Indikatoren wie z.B. das Vorhandensein alter Stöcke mit Schnittflächen, h/d-Verhältnis, Kronenlänge, Erschließung

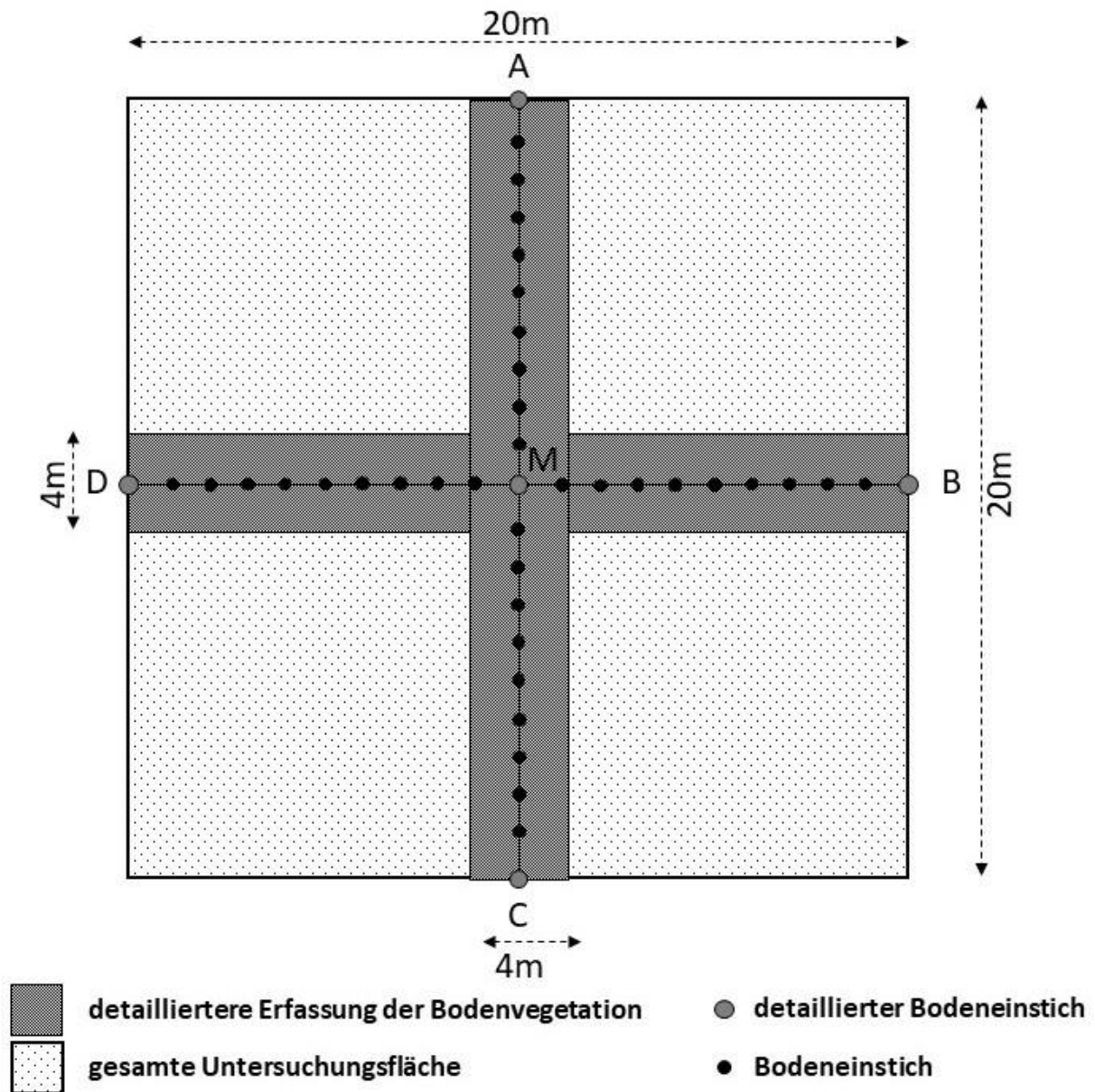


Abb. 4: Aufnahmefläche bestehend aus zwei 20 m langen Transekten und der daraus resultierenden Untersuchungsfläche (Skizze nicht maßstabsgetreu). Punkt "A" lag immer an der Hangoberseite und Transekt A-C verlief in Hangrichtung (Quelle: Olleck et al. (2020)).

Die erfassten Daten wurden durch Daten aus dem 2011 abgeschlossenen WINALP-Projekt (Waldinformationssystem Nordalpen) ergänzt, welche in der WINALPecobase (GIVD ID EU-DE-003 in Dengler et al. 2011) gespeichert sind (Abb. 7). Nähere Informationen zur Datenerfassung finden sich in Reger et al. (2012).

3 Material und Methoden

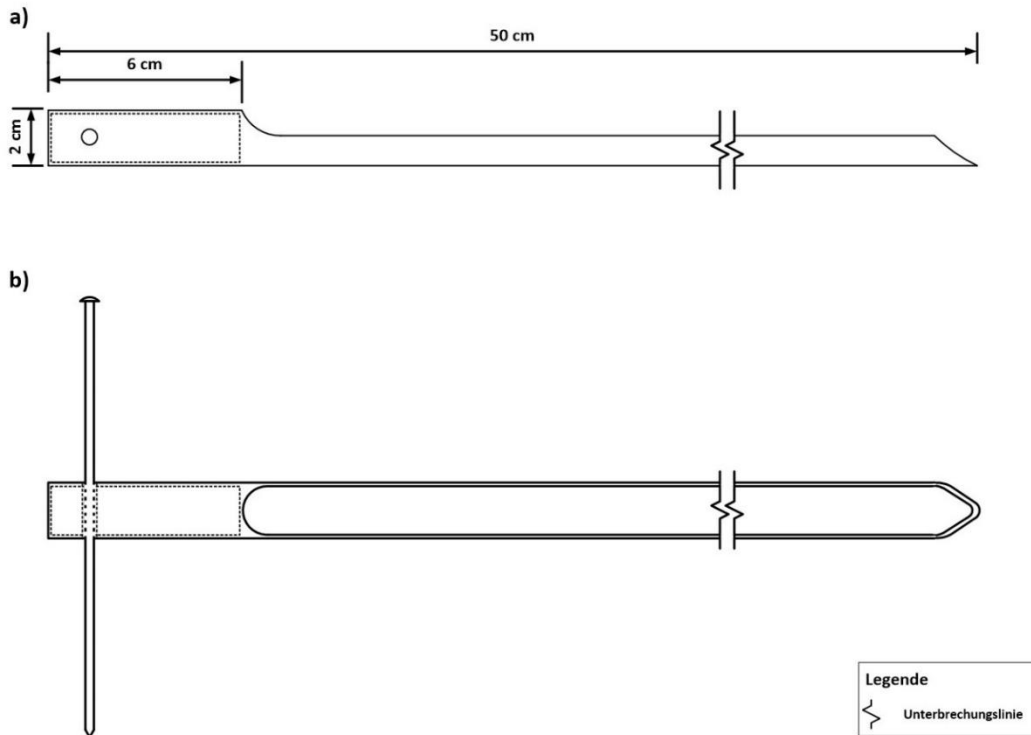


Abb. 5: a) Seitenansicht der Eigenkonstruktion des Alu-Bohrstocks. b) Draufsicht mit Stahlnagel als herausnehmbaren Griff. (Abbildungen nicht maßstabstreu).

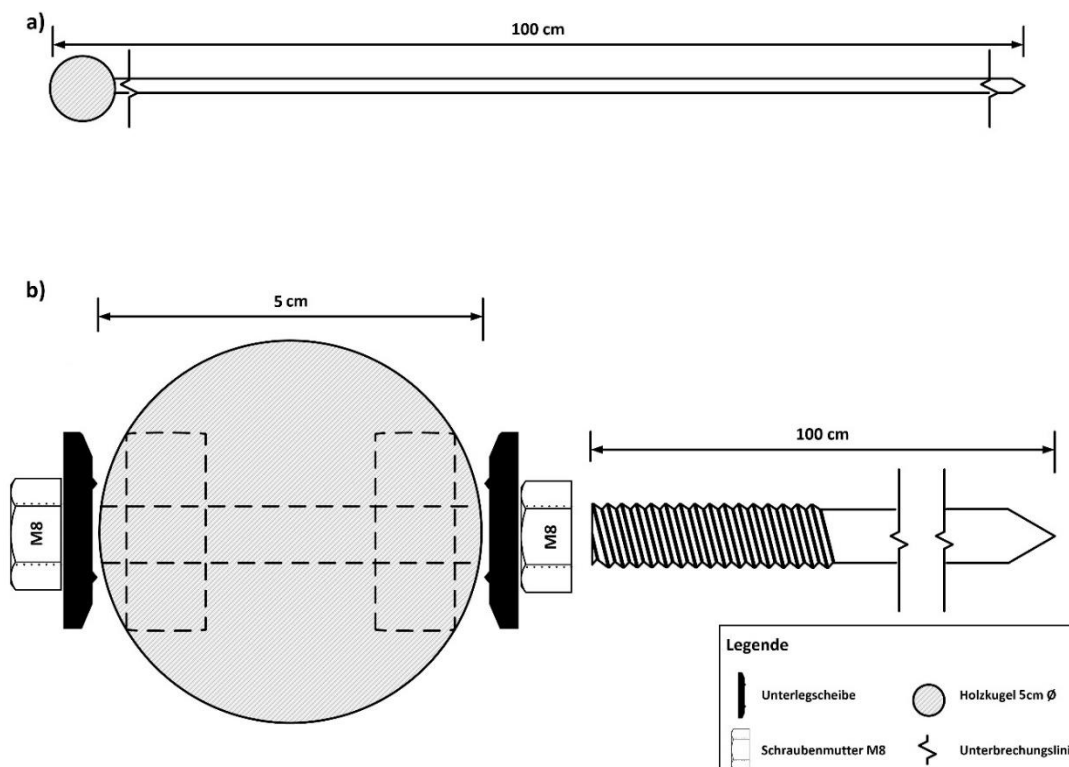


Abb. 6: a) Skizze des Sondiernadel-Eigenbaus in der Gesamtansicht. b) Detail des Sondiernadelkopfes als Explosionszeichnung. (Abbildungen nicht maßstabstreu).

3 Material und Methoden

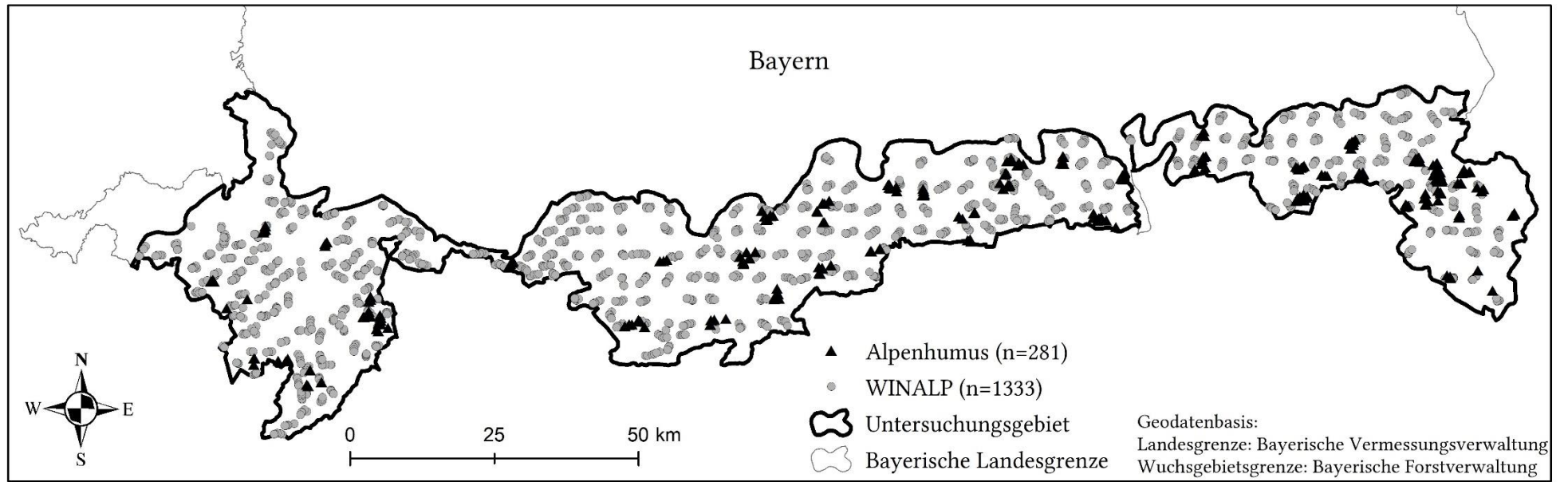


Abb. 7: Übersichtskarte der 1.614 Untersuchungsflächen des Alpenhumus- (Laufzeit 2016-2020) und des WINALP-Projektes (Laufzeit 2008-2011).

3.2.3 Grundlegende Datenauswertung

Das Einstecken der Bohrstöcke erfolgte bei beiden Erfassungen unterschiedlich (Alpenhumus rechtwinklig zur Geländeoberfläche, WINALP immer senkrecht). Daher wurden die 2017 erfassten Daten gemäß Prietzel und Wiesmeier (2019) mittels Cosinus korrigiert. Auf den 291 Untersuchungsflächen wurden 11.931 Bodeneinstiche vorgenommen, wobei für die Auswertung Profile tiefer 100 cm verworfen wurden, da diese die Bohrstock- bzw. Sondiernadellänge übertrafen. Aus dem zusätzlich verwendeten WINALP-Datensatz wurden Anmoor-Profile entfernt, da im Rahmen dieser Arbeit nur aeromorphe Humusformen untersucht werden sollten. Nach der Bereinigung verblieben für die Berechnungen 281 Plot-Mittelpunkte, welche durch 1.333 WINALP-Bodenprofile auf insgesamt 1.614 Plots ergänzt wurden. Für die Modellierung auf Landschaftsebene wurde eine Differenzierung zwischen „mächtigen organischen Böden“ und „sonstigen Bodenprofilen“ verwendet. Den „mächtigen organischen Böden“ wurden alle Profile zugeordnet, bei welchen die organischen Auflagen mächtiger war als die darunterliegende Mineralbodenmächtigkeit und mindestens 15 cm betrug. Für diese Böden kann angenommen werden, dass die ökologische Bedeutung des Bodensubstrats für den Waldbestand hauptsächlich auf der Humusaufgabe beruht (Olleck et al. 2021).

Variabilität

Zunächst erfolgte eine deskriptive Auswertung der Daten. Dazu wurde für die fünf Großregionen der Anteil der Untersuchungsflächen mit Tangelhumus an der Gesamtzahl der erfassten Plots berechnet. Durch diese Differenzierung konnten auch die mittlere Aufgabemächtigkeit für Tangelhumusstandorte für die gesamten Bayerischen Alpen ermittelt werden.

Präferenzindex

Um festzustellen, ob die Tangelhumusstandorte in gewissen Waldtypen (gemäß Reger und Ewald 2012), Expositionen oder Hanglagen (vgl. Tab. 4) sowie Höhenlagen (in 100 m Klassen) bevorzugt vorkommen, wurde der Präferenzindex gemäß Ewald (2004, 2007b) berechnet. Dieser Index kann sowohl positive (Standorte werden präferiert) als auch negative Werte (Standorte werden gemieden) annehmen und wurde wie folgt berechnet (vgl. Olleck et al. 2021):

$$p_i = \left(\frac{k_i}{\sum_i k_i} - \frac{n_i}{\sum_i n_i} \right) * 100$$

wobei

p_i : Präferenz von Tangelhumus im Abschnitt i

k_i : Anzahl der Tangelhumusplots im Abschnitt i

n_i : Anzahl der Gesamtaufnahmen im Abschnitt i

3.2.4 Modellierung

Allgemeines

Es gibt zahlreiche Modellierungsmethoden und Funktionen, um punktuell erfasste Bodeninformationen auf die Fläche zu bringen. Jenny (1941) fasste die Bodenentwicklung als einfaches Model bodenbildender Faktoren nach folgender Formel zusammen:

$$S = f(c, l, o, r, p, t, \dots).$$

Der Boden (S) ist demnach eine Funktion aus den unabhängigen Variablen Klima (c), Lebewesen (o), Relief (r), Ausgangsgestein (p) und Zeit (t). Die Punkte am Ende der Formel stehen als Platzhalter für weitere bodenbildende Parameter, welche ggf. in die Formel aufgenommen werden müssen (Jenny 1941). Mittlerweile ist diese Gleichung Grundlage vieler Studien und wurde bereits oft erweitert und modifiziert. Einen sehr guten Überblick über die Modellierung und Digitalisierung von Bodeneigenschaften findet sich in McBratney et al. (2003).

Hellwig et al. (2019) und Hellwig et al. (2018) nutzen Random forest Modelle (Breiman 2001) in Verbindung mit anschließendem Kriging der Residuen (Heuvelink und Webster 2001) zur Modellierung der räumlichen Verbreitung von Humusformen in den Italienischen Alpen. Aberegge et al. (2009) nutzen für die Modellierung von Bodentypen und -eigenschaften im Val di Sole den CART-Algorithmus (Classification and Regression Trees) (vgl. Mertens et al. 2002).

Um zu evaluieren, welche Methode für die Verbreitungsmodellierung von Tangelhumus am besten geeignet ist, wurden diverse Modelle getestet und deren Ergebnisse verglichen. Zunächst wurde der Ansatz des Generalisierten linearen Modells (GLM) mit den binomial verteilten Daten (Tangel ja/nein) verfolgt. Die unabhängigen Relief-, Klima- und Bodenvariablen wurden mittels Minimierung des Akaike-Informationskriteriums (AIC) schrittweise verbessert. Die Beurteilung der Modellgüte erfolgte an Hand der Pseudobestimmtheitsmaße Nagelkerke Index und McFadden's R^2 sowie mittels der area under curve, welche nicht unter 0,7 betragen sollte (Dormann und Kühn 2009). Die Ergebnisse wurde anschließend auf die Rasterdaten angewendet und das Modell auf die Fläche des Untersuchungsgebietes vorhergesagt. Für diese bimodalverteilten Tangelhumusdaten wurde auch ein CART-Modell und ein Random-Forest-Modell berechnet. Dies erfolgte an Hand eines in Trainings- und Testdaten aufgeteilten Datensatzes (80:20) und einer out-of-bag Evaluierung. Auch hier erfolgte eine Prädiktion der Ergebnisse auf flächige Rasterdaten. Zuletzt wurde die Humusaufagemächtigkeit mittels Generalisierten Additiven Modellen (GAM) nach Hastie und Tibshirani (1990) berechnet und von den Punktdaten auf die Fläche gebracht. Dieser GAM-Ansatz ergab für das Ziel der Verbreitungsmodellierung mit Abstand die besten Ergebnisse, weshalb diese Art der Modellierung eingesetzt wurde. Das genauere Vorgehen wird im Folgenden näher erläutert.

Potentielle Auflagemächtigkeit

Für die Modellierung der potentiellen Auflagemächtigkeit in Abwesenheit menschlicher Störungen wurde aufgrund der engen Beziehung zwischen der Mineralbodentiefe und der maximalen Auflagemächtigkeit (Abb. 8) der Quantilsregressionsansatz gewählt. Der Quantilsbereich wurde auf $q = 0,90-0,95$ festgelegt. Die Wahl dieses Quantilsbereichs basiert auf Vergleichen zwischen bewirtschafteten und unbewirtschafteten Waldbeständen auf vergleichbaren Standorten (vgl. Christophel et al. 2013; Daten aus Schmidt 2010; unveröffentlichte Daten des Autors von 2018, vgl. Abbildung S5 im elektronischen Anhang von (Olleck et al. 2021)), wo gezeigt werden konnte, dass die Mittelwerte der Auflagemächtigkeit auf unbewirtschafteten Standorten innerhalb des Quantilsbereichs 0,90-0,95 der bewirtschafteten Waldbestände liegen.

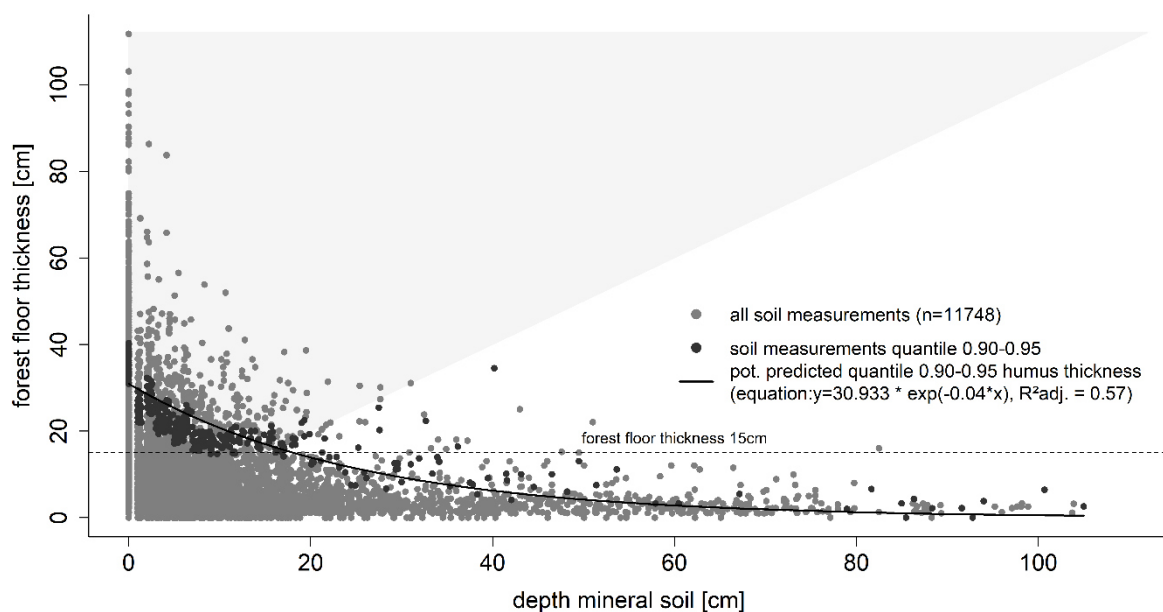


Abb. 8: Beziehung zwischen der Auflagemächtigkeit und der Mineralbodentiefe. Die Datenpunkte, welche dem 0,90-0,95 Quantil entsprechen sind dunkelgrau dargestellt und mit einer schwarzen Regressionsgeraden modelliert (Olleck et al. 2021). Alle Punkte innerhalb des hellgrauen Dreiecks sind Profile in welchen die Humusmächtigkeit die Mineralbodentiefe übertrifft.

Mineralbodenmächtigkeit

Durch Einsetzen der Mineralbodenmächtigkeit in die Gleichung der Quantilsregression kann die potentielle Auflagemächtigkeit vorhergesagt werden. Da die Mineralbodenmächtigkeit im Untersuchungsgebiet nicht flächig vorhanden war, wurde diese mittels GAM modelliert wie in Olleck et al. (2021) beschrieben.

Für die Modellierung kombinierten wir die 1.333 Bodenprofile des WINALP-Projekts und die 281 Plot-Mittelpunkte des ALPENHUMUS-Projekts. Zur Vorhersage der Mineralbodentiefe verwendeten wir das R-Paket mgcv (Wood 2017) und ein Generalisiertes Additives Modell (GAM) nach Hastie und Tibshirani (1990) mit den Prädiktorvariablen Substratgenese und Substratchemie (Kolb 2012) sowie der Entkalkungstiefe. Letztere basiert auf den Einheiten

3 Material und Methoden

und Referenzprofilen der Bayerischen Bodenübersichtskarte 1:25000 und wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt erstellt und von der Bayerischen Landesanstalt für Wald erweitert. Relief- oder Klimavariablen wurden bewusst nicht hinzugefügt um eine doppelte Verwendung auszuschließen (s. Unterpunkt *Aktuelle Humusaufagemächtigkeit* in diesem Abschnitt). Die Prädiktoren haben eine Rasterauflösung von 10 m × 10 m. Um Kollinearität zu vermeiden, wurden nur Prädiktorvariablen mit Korrelationskoeffizienten $< |0,5|$ verwendet, was die Untergrenze des von Dormann et al. (2013) empfohlenen Schwellenwerts darstellt. Die Bewertung des Modells erfolgte anhand des korrigierten Bestimmtheitsmaßes R^2 und des Prozentsatzes der Devianz. Die relative Bedeutung der Prädiktorvariablen wurde anhand des Max-Min Effektes nach Mellert und Ewald (2014a, 2014b) bewertet, wobei höhere Werte einen stärkeren Einfluss anzeigen (Reger et al. 2015).

Aktuelle Humusaufagemächtigkeit

Die modellierte potentielle Mineralbodenmächtigkeit aus dem oben dargestellten Ansatz floss neben der relativen Höhe über dem Abflussnetz, dem Topografischen Feuchteindex und der Hangneigung (alle abgeleitet aus dem DGM10) als Prädiktor in ein GAM ein (Olleck et al. 2021). Auch hier haben wir Kollinearität vermieden und die Modelleistung und die relative Bedeutung der Variablen entsprechend bewertet (ebenda).

Berechnung des Wiederherstellungspotentials

Wie in Olleck et al. (2021) beschrieben, wurden zur Berechnung des Wiederherstellungspotentials von Tangelhumus die Rasterwerte der aktuellen Aufagemächtigkeit von der potenziellen Aufagemächtigkeit subtrahiert. Dadurch kann abgeschätzt werden, in welcher Region ein besonderer Bedarf an Humuspflge besteht und wo das Aufbaupotential am höchsten einzuschätzen ist.

Alle resultierenden Rasterdateien wurden auf die Waldtypenfläche nach Reger und Ewald (2012) zugeschnitten, die auch die Krummholzzone mit *Pinus mugo* umfasst.

3.3 Lokalisierung auf Bestandesebene (Publikation II)

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Die Modellierungsergebnisse können aufgrund des groben Maßstabs, der moderaten Modellgüte und der kleinräumigen Verteilung von Tangelhumus im Gelände (nähere Informationen zur kleinräumigen Verteilung von Tangelhumus im Gelände finden sich in Olleck et al. 2020) nur als Orientierungshilfe und Suchkulisse für Tangelhumusstandorte dienen. Die waldbaulichen und holzerntetechnischen Planungen werden jedoch überwiegend auf Bestandesebene geplant und umgesetzt. Daher bedarf es einer detaillierten Lokalisation mächtiger Humusauflagen im Gelände. Aufgrund der engen Beziehung zwischen der Bodenvegetation und den vorherrschenden bodenkundlichen Verhältnissen (Ellenberg und Leuschner 2010) wurde ein Indikatorartenansatz gewählt, um Tangelhumus anhand von Zeigerarten im Gelände zu lokalisieren. Dieser Ansatz wurde u.a. auch bei Reger et al. (2014a) für die Erkennung nährstoffarmer Bergwaldstandorte in den Bayerischen Alpen gewählt.

3.3.1 Datengrundlage

Die in der Auswertung verwendeten Daten stammen aus der WINALPecobase (GIVD ID EU-DE-003 in Dengler et al. 2011) und wurden 2008-2011 in den Bayerischen Alpen erfasst. Auf 1.505 jeweils 14 m x 14 m großen Aufnahmeflächen wurden Vegetationsdaten (u.a. Deckungen von Gefäßpflanzen, Moosen und Flechten) erhoben, wobei Arten auf Steinen, Wurzeln oder Totholz nicht berücksichtigt wurden (Reger et al. 2012, dort auch nähere Informationen zur Datenerfassung). Aus dieser Datensammlung wurden die Datensätze extrahiert, welche auf den in Tab. 6 aufgeführten Straten erfasst wurden (n=811).

3.3.2 Datenanalyse

Eine Differenzierung zwischen Tangelhumus- und sonstigen Bodenprofilen erfolgte durch einen Ansatz, welcher sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien berücksichtigte (vgl. Olleck et al. 2019):

$[\text{Organische Auflage} > 15 \text{ cm}] \cap \{[\text{Humusform} = \text{Tangelhumus}] \cup [\text{Horizontfolge} = \text{O-C ohne mineralischen A-Horizont}]\}$

wobei das Symbol \cap für "und", \cup für "oder" steht.

Die Indikatorartenanalyse wurde mittels R-Paket „indispecies“ (Funktion „multipatt“, De Cáceres und Jansen 2013) durchgeführt und für alle Pflanzenarten der beiden Standortgruppen „Tangelhumus“ und „Sonstige“ einen Indikatorwert nach Dufrêne und Legendre (1997) berechnet. Der Indikatorwert liegt zwischen 1 (maximaler Indikator) und 0 (kein Indikator) und gibt durch die Treue sowie die Stetigkeit einer Art Auskunft über den Vorhersagewert als Indikator für eine Standortgruppe (Reger et al. 2014a). Die Berechnung der statistischen Signifikanz basierte auf einem Monte-Carlo-Test mit 999 Permutationen (Olleck et al. 2019).

3 Material und Methoden

3.4 Humuspflege – Wissensstand und Maßnahmen (Publikation III)

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

3.4.1 Umfrage

Inwieweit das Vorkommen von Tangelhumus auf der Fläche bekannt und Humuspflege als zentrale Aufgabe der Gebirgswaldbewirtschaftung angekommen sind, sollte durch eine weitere Untersuchung geklärt werden. Dazu wurde eine Onlineumfrage mit dem Titel „Tangelhumus und Waldbewirtschaftung in den Bayerischen Kalkalpen“ mittels der webbasierten EFS-Survey-Software (QuestBack GmbH) durchgeführt. Eingeladen wurden 105 Revierleiter/innen und Forstbetriebsleiter (Bayerische Staatsforsten (BaySF), Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AELF) und Bayerischer Waldbesitzerverein) im Untersuchungsgebiet (Abb. 9).

Die Umfrage enthielt 12 Fragen, welche sich in die vier Themenblöcke

1. Eigenschaften, Verbreitung und Bedeutung von Tangelhumus,
2. Erkennen von Tangelhumus im Gelände,
3. Gefahren für Tangelhumus und Humusschwund sowie
4. Maßnahmen und Verbesserungsbedarf zur Humuspflege

einteilen lassen. Die Umfragestatistik und die Daten wurden mittels CSV-Dateien exportiert, zusammengefasst und deskriptiv ausgewertet.

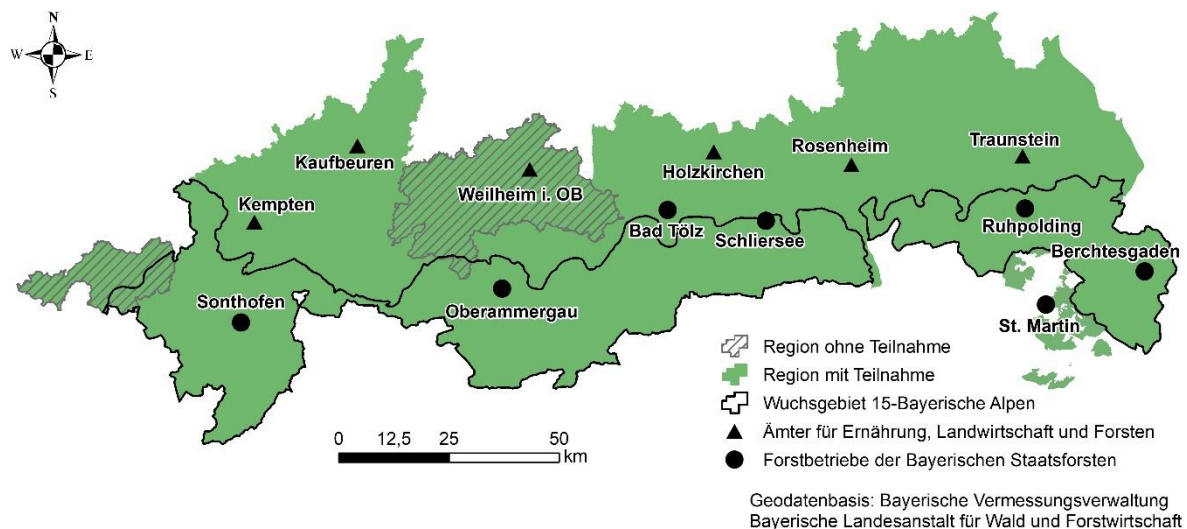


Abb. 9: Übersichtskarte des Umfragegebietes in Südbayern und den in Österreich liegenden Bayerischen Saalforsten St. Martin. Aus den schraffierten Landkreisen wurden keine Umfrageergebnisse übermittelt (Olleck et al. 2022).

4 Publikationen im Rahmen dieser Dissertation

4 Publikationen im Rahmen dieser Dissertation

Publikationsübersicht

Diese Arbeit umfasst drei Artikel, welche in Fachzeitschriften mit einem Peer-Review-Verfahren veröffentlicht wurden. Für jeden der drei Artikel werden eine Zusammenfassung, der Veröffentlichungsstatus und die Beiträge der einzelnen Autoren angegeben. Weitere Publikationen (Vorträge etc.), welche innerhalb des Promotionsprojektes veröffentlicht wurden, finden sich am Ende diese Publikationsübersicht. Die Reihenfolge der Artikel orientiert sich an der vorangehenden Darstellung der Methodik: Regionalisierung auf Landschaftsebene, Lokalisation auf Bestandesebene und Wissensstand zur Humuspflge. Ein gesondertes Verzeichnis der in den drei Publikationen zitierten Literaturstellen findet sich im zweiten Teil des Literaturverzeichnisses dieser Arbeit in Kapitel 6.

Publikation 1

Thick forest floors in the Calcareous Alps - distribution, ecological functions and carbon storage potential

Michelangelo Olleck, Michael Kohlpaintner, Karl Heinz Mellert, Birgit Reger, Axel Göttlein, Jörg Ewald

Publiziert in *Catena*, 2021; 207:105664.

Impact Factor: 5.198, Stand 2020 (Journal Citation Reports (Clarivate Analytics): 12/198 Water Resources; 7/37 Soil Science; 22/199 Geosciences, Multidisciplinary)

Leistungsbeiträge: Michelangelo Olleck, Jörg Ewald, Michael Kohlpaintner, Axel Göttlein, Karl Heinz Mellert und Birgit Reger haben die Forschungsidee entwickelt. Michelangelo Olleck organisierte die Datenerhebung im ALPENHUMUS-Projekt, stellte die Daten zusammen, führte die Analysen durch und schrieb die Arbeit. Jörg Ewald und Karl Heinz Mellert unterstützten die Datenanalyse. Jörg Ewald und Birgit Reger stellten die Datenbank mit den WINALP-Daten zur Verfügung. Michael Kohlpaintner führte die Kohlenstoffanalyse durch. Alle Koautoren überprüften die Entwurfsfassungen.

Die Mächtigkeit und Zusammensetzung der Waldböden spielt eine wesentliche Rolle für die Effizienz und Resilienz von Bergwäldern bei der Speicherung von Kohlenstoff, Wasser und Nährstoffen. Bislang ist die Verteilung der besonders mächtigen organischen Humusauflagen (im Manuskript als TOFF = *thick organic forest floors* bezeichnet) in den bayerischen Kalkalpen kaum bekannt und ihre Ökosystemleistungen verdienen im Kontext mit dem voranschreitenden Klimawandel eine stärkere Berücksichtigung. Mit dieser Studie sollte das Wissen über die Verbreitung von TOFF und seiner ökologischen Funktion als Kohlenstoffspeicher untersucht werden. Das Ziel war es, das Kohlenstoffspeicherungspotential dieser Böden zu quantifizieren und Gebiete zu modellieren, in denen eine humuspfliegende Waldbewirtschaftung für eine nachhaltige Waldnutzung unerlässlich ist.

Datengrundlage waren stratifizierte Stichproben von Bodenprofilen. Durch die Kombination von Relief- und Bodenparametern wurden entscheidende Kontrollvariablen identifiziert und die tatsächliche und potentielle (ohne menschliche Eingriffe) Auflagehumusmächtigkeit in den bayerischen Kalkalpen auf der Grundlage von Quantilsregression und Generalisierten Additiven Modellen (GAM) modelliert.

Auf etwa 10% der Waldfläche der Bayerischen Alpen kommen TOFF vor. Eine entscheidende Voraussetzung für die Entstehung von TOFF ist das Fehlen oder die nur geringe Ausprägung von Mineralboden. Entgegen der verbreiteten Meinung wurden diese TOFF in einem breiten Spektrum von Höhenlagen (montan bis subalpin) gefunden. Die C-Speicherung der TOFF beträgt ca. 6,9 t C/ha pro cm Humusmächtigkeit und insgesamt ca. 5,2 Mt C im Untersuchungsgebiet. Diese C-Akkumulationen sind durchaus mit Mooren vergleichbar und solche Waldstandorte können somit als carbon-rich ecosystems bezeichnet werden. TOFF sind für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen insbesondere in den Schutzwäldern der bayerischen Kalkalpen, entscheidend. Aufgrund des gänzlich fehlenden oder nur in geringem Maße vorhandenen Mineralbodens, hängen fast alle ökologischen Funktionen vom Auflagehumus ab. Daher ist der sorgfältige Umgang mit dem Humuskapital für eine nachhaltige Bewirtschaftung dieser Wäldern unerlässlich.

Publikation 2

Plant indicators for Follic Histosols in mountain forests of the Calcareous Alps

Michelangelo Olleck, Birgit Reger, Jörg Ewald

Publiziert in *Applied Vegetation Science*, 2020; 23:285–296.

Impact Factor: 3.252, Stand 2020 (Journal Citation Reports (Clarivate Analytics): 58/166 Ecology; 8/67 Forestry; 66/235 Plant Sciences)

Leistungsbeiträge: Michelangelo Olleck und Jörg Ewald entwickelten die Forschungsidee. Jörg Ewald und Birgit Reger stellten die für die Auswertung zugrundeliegende Datenbank zur Verfügung. Michelangelo Olleck organisierte die Daten, führte die Analysen durch und schrieb den Artikel. Jörg Ewald las Korrektur.

Mächtige Humusauflagen (Tangelhumus) über unverwittertem Kalk- oder Dolomitgesteinen spielen eine entscheidende Rolle für die Waldfunktionen der bayerischen Bergwälder. Doch trotz der großen Bedeutung ist über die tatsächliche Verbreitung dieser Bergwaldstandorte wenig bekannt und die Lokalisation im Gelände schwierig. Daher waren die drei Hauptfragestellungen des Artikels: 1) Wie ist die spezifische Artzusammensetzung der Bodenvegetation auf Tangelhumusstandorten, 2) können spezielle Indikatorpflanzen verwendet werden, um diese Böden in den Bergwäldern zu finden und 3) was sagen die funktionalen Merkmale dieser Indikatorarten über die ökologischen Eigenschaften von Tangelhumus aus?

Basierend auf repräsentativ und stratifiziert erfassten Vegetations- und Bodendaten wurden die Häufigkeiten und Mächtigkeiten von Tangelhumus ermittelt. Mittels geeigneter, tlw. partieller Ordinationsverfahren wurden für Umweltvariablen die erklärenden Anteile an der Gesamtvarianz der Artzusammensetzung ermittelt. Eine durchgeführte Indikatorartenanalyse sollte spezifische Pflanzen aufzeigen, welche Tangelhumus indizieren. Außerdem suchten wir nach typischen Merkmalen und ökologischen Ansprüche dieser Indikatorarten.

Das räumliche Nebeneinander von kalkliebenden und säureliebenden Pflanzen ist typisch für die mosaikartige Verbreitung von Tangelhumus. Die Lokalisation von mächtigen Humusauflagen mittels Bodenvegetation funktioniert auf unverwittertem Kalk- und Dolomitgestein sehr gut. Insbesondere säureliebende Pflanzen wie Heidekrautgewächse (*Ericaceae*) und Bärlappe (*Lycopodiaceae*) sind dort sehr brauchbare Indikatoren. Die hohen Indikatorwerte von Moosen hängen vermutlich mit deren Besiedlung von sich zersetzendem Totholz zusammen. Eine soziologisch sehr breitgefächerte Vielfalt der Indikatorarten, welche von Offenlandarten bis zu Arten dunkler Wälder reicht, spiegelt die sukzessionale Entwicklung von Tangelhumus wieder.

In Bergwäldern wechseln sich auf Kalk- oder Dolomitsubstraten dicke Humuspakete oft mit anstehendem Fels ab. Diese mosaikartige Struktur kann mithilfe von Indikatorarten der Bodenvegetation erkannt werden. Es wechseln sich kalk- und säureliebende Arten kleinräumig ab. Das Erkennen von empfindlichen Tangelhumus anhand der Bodenvegetation ist eine einfache und kostengünstige Methode und kann zum Schutz dieser Standorte einen entscheidenden Beitrag leisten.

Publikation 3

Humuspfl ege in Gebirgswäldern der Kalkalpen - Wissensstand und Massnahmen

Michelangelo Olleck, Birgit Reger, Jörg Ewald

Publiziert in Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 2022;173 (1): 36-43

Impact Factor: 0.27, Stand 2020

Leistungsbeiträge: Michelangelo Olleck, Jörg Ewald und Birgit Reger haben die Forschungs idee entwickelt. Michelangelo Olleck setzte die Umfrage in der Software um, wertete die Daten aus und schrieb die Arbeit. Jörg Ewald und Birgit Reger berieten die Auswertung und überprüften die Entwurfsfassungen.

Bis zur Durchführung des vom Waldklimafonds geförderten Projektes ALPENHUMUS war es weitgehend unklar, welche Rolle die Humuspfl ege bei der Bewirtschaftung der Bergwälder der Bayerischen Alpen spielt. Eine 2019 durchgeführte Umfrage im Rahmen des Projektes „Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald“ sollte den Wissensstand in der forstlichen Praxis klären und untersuchen, ob und in welchem Ausmaß unterstützende Maßnahmen notwendig sind, um die Humuspfl ege und den Humusaufbau in den Bayerischen Alpen zu verbessern.

Die Rückmeldungen aus 29 Fragebögen (Rücklaufquote 28%, Beantwortungsquote 50%) ergeben folgendes Bild zum Wissensstand und zu den Maßnahmen in Bezug auf die Humuspfl ege in den Gebirgswäldern der Bayerischen Alpen:

Die Schätzungen des Anteils der Standorte auf Tangelhumus mit mehr als 15 cm Humusmächtigkeit liegen im Durchschnitt bei knapp 20% der Flächen im Zuständigkeitsbereich der befragten Förster/innen. Hochgerechnet auf die Waldfläche des Wuchsgebiets „Bayerische Alpen“ bedeuten dies ca. 48.250 ha. Wichtigster Indikator des Forstpersonals für die Lokalisation mächtiger Humusauf lagen im Gelände ist die Bodenvegetation. Etwa 20% der Befragten geben einen sichtbaren Rückgang von Tangelhumus in ihrem Zuständigkeitsgebiet an. Dieser Humusschwund ist überwiegend durch Luftwurzeln (ggf. Verwechslungsgefahr mit Entstehung durch Rannenverjüngung) und Wurzelstöcken auf Fels erkennbar. Als Hauptgefährdung für Tangelhumusstandorte wird in der Praxis die Bodenerosion, die Klimaerwärmung, das Ausbleiben der Verjüngung und die Kronennutzung angegeben. Die Befahrung durch Forstmaschinen und die Stammholzernte werden als kaum relevante Gefährdungen eingestuft. Das Belassen von Kronenmaterial im Bestand, die Einleitung/Sicherstellung der Verjüngung, sowie Jagd werden als relevante Maßnahmen bewertet um diese Standorte zu erhalten und deshalb auch regelmäßig durchgeführt. Zur Verbesserung des Humusaufbaus wünschen sich die Förster/innen gezieltere Planungen (Schutzwald und Sanierungsflächen), Änderung im Schalenwildmanagement und Schulungen der Waldbesitzer. Verbesserte Karten/Geodaten, eine Förderung natürlicher Waldentwicklung sowie ein Leitfaden zur Humuspfl ege sollen dabei zusätzlich unterstützen.

Weitere Veröffentlichungen im Themenkontext des Dissertationsprojektes

Schriften:

Ewald, J.; Göttlein, A.; Prietzel, J.; Kohlpaintner, M.; Reger, B.; Olleck, M. (2022): Humuspflge in den Bayerischen Alpen. In: *AFZ-Der Wald* 3, S. 22–25.

Ewald, J.; Göttlein, A.; Prietzel, J.; Kohlpaintner, M.; Reger, B.; Olleck, M. (2020): Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald - Synthese und Ausblick. In: *Forstliche Forschungsberichte. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan* (220), S. 5–19.

Olleck, M.; Reger, B.; Ewald, J. (2020): Verbreitung und Vorkommen von Alpenhumus – Regionalisierung auf Landschaftsebene (Teilprojekt Makroskala). In: *Forstliche Forschungsberichte. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan* (220), S. 21–60.

Wissenschaftliche Vorträge: (* Review-Verfahren, Referent/en fettgedruckt)

* **Olleck, M.** & Ewald, J. (2019): Black beauty on the rocks – distribution, function and C-storage potential of Tangel humus in the Calcareous Alps. Vortrag auf dem 10th IALE World Congress in Mailand.

* **Olleck, M.** & Ewald, J. (2018): Verbreitung von mächtigen Humusauflagen und deren Potential als C-Speicher in den Bayerischen Kalkalpen. Vortrag auf der Forstwissenschaftlichen Tagung in Göttingen.

* Ewald, J.; Reger, B.; **Olleck, M.** (2017): More than we ever thought - distribution and function of lithic histosols in the Calcareous Alps. Vortrag auf dem 125th IUFRO Anniversary Congress in Freiburg i. Br.

Olleck, M. & Ewald, J. (2020): Schwarz-weiße Schönheit „on the Rocks“: Die Bedeutung des Tangelhumus für die Bergwälder der Kalkalpen - Wie man dicke Humuspolster an ihrem Bewuchs erkennt und was getan werden kann um sie zu schützen. Vortrag an der Bayerischen Botanischen Gesellschaft in München

Prietzel, J.; Kohlpaintner, M.; Olleck, M. (2019): Skeletthumusböden als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Faktor für die Ökosystemfunktionen von Bergwäldern der Kalkalpen. Vortrag im Weihenstephaner Kolloquium zur Angewandten Ökologie und Planung in Freising.

Olleck, M. & Ewald, J. (2019): Tangelhumus in den Bayerischen Alpen - Verbreitung & Detektion anhand der Bodenvegetation. Vortrag in der Seminarreihe "Aspekte der Waldökosystemforschung" in Freising.

Olleck, M. & Ewald, J. (2017): Mehr als gedacht - Verbreitung und ökologische Bedeutung mächtiger Humusauflagen in den Kalkalpen. Vortrag auf der ANL-Fachtagung „Naturschutz: Von der Forschung in die Praxis“ in Freising.

Olleck, M. & Ewald, J. (2017): Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald. 2. ZWFH-Forum zum Erhalt der Biodiversität in Wäldern und Mooren in Freising.

4 Publikationen im Rahmen dieser Dissertation

Poster Präsentationen:

Olleck, M. & Ewald, J. (2019): Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald. Jahreskolloquium des Bayerischen Wissenschaftsforums in Regensburg.

Olleck, M. & Ewald, J. (2017): Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald. 2. ZWFH-Forum zum Erhalt der Biodiversität in Wäldern und Mooren in Freising.

Sonstige Beiträge:

Olleck, M.; Reger, B.; Ewald, J. (2020): Plant indicators for Follic Histosols in mountain forests of the Calcareous Alps. jvsavsblog.org Official blog of the Journal of Vegetation Science & Applied Vegetation Science.

Abschlussarbeiten: (vom Verfasser mitbetreut)

Bauer, K. (2018): Die kleinräumige Variation des Alpenhumus unter Berücksichtigung vorhandener Sonderstrukturen - Am Beispiel der südexponierten Untersuchungsgebiete in der Lange Au. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.

Feulner, S. (2017): Vorkommen und Mächtigkeit von Humusaufgaben auf kalkalpinen Waldstandorten im Berchtesgadener Land. Bachelorarbeit. Technische Universität München, München. Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt.

Haunstetter, M. (2018): Verteilung und Vorhersagbarkeit von Tangelhumus in den Bergwäldern der Allgäuer Alpen. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.

Jakob, J. (2018): Verteilung von Tangelhumus in den Bergwäldern des Mangfallgebirges. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.

Lawrenz-Grunow, D. (2018): Verteilung und Vorhersagbarkeit mächtiger Tangelhumusaufgaben auf kalkalpinen Bergwaldstandorten des Werdenfelser Landes und Isarwinkels. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.

Schnell, H. (2018): Die kleinräumige Variation des Alpenhumus unter Berücksichtigung vorhandener Sonderstrukturen - Am Beispiel der nordexponierten Untersuchungsgebiete in der Lange Au. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.

Stimmelmayer, M. (2019): Verteilung von Alpenhumus entlang von bewaldeten Berggraten der Chiemgauer Alpen. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.

Wagner, L. (2018): Landschaftliche und kleinräumige Verteilung von Tangelhumus in den Bergwäldern der Chiemgauer Alpen. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.

5 Publikationsübergreifende Diskussion

5.1 Regionalisierung von Tangelhumus in der Landschaft

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Das Phänomen des Tangelhumus ist bereits seit langem bekannt (Sendtner 1854; Ebermayer 1888; Leiningen 1908, 1912, 1909; Kubiëna 1948). Münichsdorfer (1932) merkte in seinem Werk über die Böden Südbayerns sogar an, dass Alpenhumus „überaus häufig gefunden wird“. Jedoch befassten sich die Studien über die Verbreitung von Tangelhumus in den Bayerischen Alpen bislang allenfalls lokal mit bestimmten Regionen. So untersuchte Bochter (1984a) im Nationalpark Berchtesgaden die Böden auf naturnahen Bergwaldstandorten in der montanen bis subalpinen Stufe. Im Wettersteingebirge forschte Zöttl (1965a, 1965b) ebenfalls über die Entwicklung von Waldböden auf Carbonatgesteinen. Durch die vorliegende Arbeit konnte erstmals die Verbreitung von Tangelhumus auf der Landschaftsebene „Bayerische Alpen“ mit einer hohen Stichprobenzahl inventarisiert und modelliert werden und aufzeigen, dass Tangelhumus weiter verbreitet ist als bisher angenommen. Mit ca. 10% der gesamten Waldfläche (nach Großregionen: Allgäu 5%, Werdenfelser Land 13%, Mangfallgebirge 7%, Chiemgauer Alpen 6% und Berchtesgadener Land 19%) des Wuchsgebiets 15 (Foerst und Kreutzer 1977) und einer mittleren Auflage von knapp 30 cm sind Tangelhumus-Standorte keine seltenen Phänomene und sollten in der Gebirgswaldbewirtschaftung berücksichtigt werden. Ein klarer Ost-West-Gradient, welcher auf historische Waldnutzung oder Kontinentalität hinweisen könnte, ist in der Verbreitung von Tangelhumus nicht feststellbar. So waren auch die X- und Y-Koordinaten der Untersuchungsfläche - weder original noch quadratisch oder kubisch (vgl. Legendre 1990 und Borcard et al. 1992) - signifikante Prädiktoren für die Modellierung der Auflagemächtigkeit.

Die Verbreitung von Tangelhumus über der Meereshöhe zeigt eine sehr große Spannweite und reicht bimodal von der tiefmontanen bis zur subalpinen Stufe, wo auch die Verbreitungsmaxima liegen. In den tieferen Lagen könnten diese Tangelhumusstandorte vor allem Schotterlagen sein, welche weniger steil sind, eine geringe Bodenentwicklung vorweisen. Ein Einfluss von Kaltluftströmen ist in diesen Lagen ebenfalls denkbar. Das Maximum in den höheren Lagen ist vermutlich den kalten Temperaturen und der weiten Verbreitung von relativ reinen Carbonatgesteinen geschuldet.

Somit kommt Tangelhumus auch unter verschiedensten Waldtypen (nach Reger und Ewald 2012) vor, weist jedoch auf subalpinen, sonn- und schattseitigen Felshänge, in subalpinen, mäßig frischen Carbonat-Fichtenwäldern und in montanen, mäßig frischen Carbonat-Bergmischwäldern die höchsten Präferenzindizes auf (Olleck et al. 2021). Diese weite Verbreitung vermuteten bereits Kolb und Baier (2001) sowie Kolb und Kohlpaintner (2018) und verdeutlichen, dass auch in den tieferen Lagen eine unangepasste Forstwirtschaft negative Auswirkungen auf den Tangelhumus haben kann. Diese Ergebnisse stützen auch die in Kolb und Baier (2001) geschilderte Entwicklung, dass frühere bodenkundliche oder standörtliche Werke, welche die höheren Lagen noch als Bedingung für Tangelhumus erwähnten, stetig um die tieferen Lagen ergänzt und das Tangel-Verbreitungsgebiet somit erweitert wurde.

Am stärksten wird die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tangelhumus durch die Geologie und die daraus resultierende Mineralbodentiefe (erklärter Anteil 40%) beeinflusst (vgl. Abb. 8). Es zeigt sich, dass nahezu alle mächtigen Tangelhumusauflagen im Bereich einer

Mineralbodentiefe von kleiner 20 cm liegen. Diese Mineralbodenentwicklung wird wiederum durch die Substratchemie (60%, Ansatz nur mit bodenkundlichen Prädiktoren) und die Hangneigung (28%, Ansatz mit Boden- und Reliefparametern) bestimmt. So bestätigt sich ganz klar die Annahme von Kolb und Kohlpaintner (2018), dass sich auf Waldstandorten mit carbonatreichen Kalken und Dolomiten ($\text{Ca/MgCO}_3 >90\%$) mit niedrigen Residualton-Anteilen die mächtigsten Tangelauflagen entwickeln können. Aufgrund des Gletscherschurfs finden sich im Kalkalpin ausschließlich junge Böden (Baier 2015), was die ökologische Bedeutung der Humusauflagen für den Waldstandort hervorhebt. Auf diesen Böden übernimmt die Humusaufgabe den größten Teil der Speicherfunktionen und stellt das Wurzelsubstrat dar. Ein Verlust durch Erosion oder Mineralisation kann demnach zu folgeschweren Degradationen und im schlimmsten Fall zu einer Verkarstung bzw. einem kompletten Waldverlust führen.

Die Exposition spielt nach den Erkenntnissen dieser Arbeit eine unbedeutendere Rolle bei der Entwicklung von mächtigen Humusauflagen. Haber (1985) erwähnt, dass die Einstrahlung und somit die Temperatur am Boden hauptsächlich vom Bestockungsgrad des Waldbestandes abhängt und weniger von der Exposition. Auch Bochter (1984a) bewertet klimatische Faktoren für die Ausbildung von Tangelhumus als zweitrangig und ordnet dem Fehlen des Mineralbodens die Schlüsselrolle zu. Die Kombination aus Hangrichtung und -neigung (vgl. Tab. 4) zeigt in der Präferenzindex-Berechnung einen klaren Trend zu steileren Lagen, unabhängig von der Himmelsrichtung. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass an steilen Hängen die Mineralböden weniger tief entwickelt sind, da sie dort leichter erodieren. Die fehlende Signifikanz der Exposition in Verbindung mit der breiten Höhenamplitude lassen vermuten, dass die Entwicklung von Tangelhumus weniger von der Temperatur abhängt als bisher angenommen.

Die bisherige Erfahrung im Gelände zeigt, dass sich Tangelhumus, neben der charakteristischen Bodenvegetation, auf Kalk oder Dolomit auch durch einen federnden Gang äußert. Dieser ist insbesondere entlang von Gratstrukturen vermehrt anzutreffen. So befasste sich Stimmelmayer (2019) mit der Verbreitung von Tangelhumus auf bewaldeten Gratstrukturen in den Chiemgauer Alpen und fand heraus, dass die organischen Auflagen auf dem Grat signifikant höher waren als jene an den Ober- und Unterhängen (sonn- wie schattseitig). Eine plausible Erklärung für dieses Phänomen ist schwierig zu finden. Zum einen könnten die Abgelegenheit und die schlechte Zugänglichkeit dieser Waldbestände eine Rolle spielen. Die Gratstrukturen waren somit in der Vergangenheit bis heute wenig interessant für die Bewirtschaftung der Wälder. Es bleibt mehr Biomasse im Bestand zurück und konnte so zum Humusaufbau beitragen. Auch die exponierte Lage könnte dafür verantwortlich sein, dass sich an Graten weniger Mineralboden akkumulieren konnte. Nach Laatsch (1977) bleiben nur die Geländerippen und blockbestreute Hangteile dauerhaft bestockt, wogegen es an vielen Steilhängen aufgrund von Schneeschurf zu Verlust von Wald kommt. Dass eine dauerhafte Bestockung grundlegend für den Erhalt von Tangelhumus ist, konnten verschiedene Studien belegen (Kohlpaintner und Göttlein 2009; Prietzel und Christophel 2013).

Die Ergebnisse der Modellierungen weisen mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 0,28-0,35 nur mittlere Modellgüten auf. Dies könnte mehrere Ursachen haben (vgl. Olleck et al. 2021). Zum einen ist die Humusmächtigkeit eine sehr instabile Bodeneigenschaft, welche empfindlich auf flächig schwer messbare Größen (wie z.B. Bodentemperatur, Wasserhaushalt) reagiert. Ein weiteres Argument für diese mäßigen Modellgüten (Eingangsvariablen überwiegend 10 m

Auflösung) ist der Tatsache geschuldet, dass Tangelhumus im Gelände häufig sehr kleinräumig vorkommt, weshalb sich mächtige Humusauflagen und anstehendes Ausgangsgestein mosaikartig abwechseln (Kolb und Kohlpaintner 2018; Ewald 1999). Diese kleinräumige Verbreitung von Tangelhumus im Gelände wurde im Rahmen des Alpenhumus-Projektes ebenfalls untersucht. Die Histogramme der erfassten Humusmächtigkeiten zeigen, dass die große Mehrheit der Aufnahmeflächen stark rechtsschiefe Verteilungen der Aufagemächtigkeiten aufweisen. Demnach sind die Schwerpunkte der Humusmessungen weniger mächtig. Dies unterstreicht die Beobachtung, dass es eine enorme kleinräumige Variabilität gibt, was auch durch Rasterkartierungen in der Langen Au von Bauer (2018) und Schnell (2018) bestätigt wurde. Diese lokalen, hohen Humusvorräte könnten Hinweise auf punktuelle Biomasseinträge durch Totholz sein (vgl. Abschnitt „Maßnahmen und Status quo der Humuspflge“ in dieser Diskussion).

Auf welche Art dieser kleinräumige Wechsel von geringen und mächtigen Humusauflagen im Gelände erkannt werden kann, wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit untersucht und wird im nächsten Abschnitt näher dargestellt.

Fazit

- ☞ Tangelhumus nimmt ca. 10% der Waldfläche der Bayerischen Alpen ein und ist somit kein marginaler Sonderstandort.
- ☞ Tangelhumus ist nicht nur auf kühle, nordexponierte Hochlagen beschränkte Humusform.
- ☞ Die entscheidende Grundlage für die Entstehung von Tangelhumusauflagen ist die rückstandarme Verwitterung von sehr reinen Kalk- und Dolomitsubstraten.
- ☞ Die aus den Modellierungen abgeleitete Suchkulisse ist gut geeignet, um Tangelhumusvorkommen grob abzugrenzen.
- ☞ Bewaldete Grat- und Kuppenstrukturen auf Kalk- oder Dolomitgesteinen weisen häufig Tangelhumus auf.

5.2 Lokalisierung von Tangelhumus auf Bestandesebene

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Die Modellierungsergebnisse sind, u.a. aufgrund der groben Auflösung der Eingangsdaten (10 m x 10 m) und der kleinräumigen Verbreitung von Tangelhumus, im Waldbestand nur als Orientierungshilfe und Suchkulisse verwendbar. Für das Lokalisieren von Tangelhumus in den Waldbeständen wurde daher im Rahmen dieser Arbeit eine vegetationsbasierte Lösung gesucht und gefunden.

Eine kostengünstige und schnelle Methode zur Bewertung der Standortsbedingungen ist die Ansprache der Bodenvegetation (McGeoch und Chown 1998; Carignan und Villard 2002). Dieses Vorgehen basiert auf der engen Beziehung zwischen der Bodenvegetation und der unmittelbar darunter herrschenden Bodeneigenschaften, was sich auch im Zeigerwert-Prinzip von Ellenberg widerspiegelt (Ellenberg und Leuschner 2010). Reger et al. (2014a) verwendeten diesen Ansatz um nährstoffarme Bergwaldstandorte in den Bayerischen Alpen zu lokalisieren. In der Bestimmung von bayerischen Gebirgswaldtypen nach Ewald und Binner (2007) spielt die Bodenvegetation ebenfalls eine zentrale Rolle. Auch die Ergebnisse dieser Arbeit (vgl. Publikation II, Olleck et al. 2019) zeigen, dass die Lokalisation des oft kleinräumig verteilten Tangelhumus anhand der Bodenvegetation sehr gut möglich ist. Die sichersten „Tangelzeiger“ (Indikatorwerte zwischen 0,50-0,83) auf Kalk oder Dolomitstandorten sind die leicht zu bestimmenden säurezeigenden Arten *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Lycopodium annotinum* und *Huperzia selago*. Das Vorkommen dieser Arten auf diesen normalerweise sehr basischen Standorten ist auf die chemische Entkopplung der mächtigen sauren Humusaufgabe vom Ausgangsgestein (mit seinem sehr hohem pH-Wert) zurückzuführen ist (Olleck et al. 2020). Die genannten Arten sind im Gelände auch ohne umfangreiche Pflanzenbestimmungskennntnisse sehr gut zu erkennen, was die Umsetzung eines vegetationsbasierten Lokalisierungs-Konzeptes in der Praxis erleichtert. Kubiëna (1953) nennt zwei Heidekrautgewächse, *Erica carnea* und *Rhododendron hirsutum*, als Beispiele für typische Tangelpflanzen, welche rohfaserreiche Pflanzenreste anhäufen. Mit neun von 63 tangelzeigenden Arten (insgesamt 754 Arten) stellen die Ericaceae auch bei Olleck et al. (2019) die größte Pflanzenfamilie. Dass die schwer abbaubare Streu von Heidekräutern und Koniferen neben dem Totholz maßgeblich zur Humusakkumulation beiträgt, wird von einigen Studien bestätigt (Kubiëna 1953, Kolb und Baier 2001, Kolb und Kohlpaintner 2018).

Der Schwerpunkt der Tangelzeiger liegt im Bereich der Bodenreaktion klar im stark sauren bis sehr stark sauren Bereich (Abb. 10). Die Indikatorartenanalyse wies jedoch auch einige Basenzeiger (z.B. *Erica carnea* oder *Geranium sylvaticum*) als Zeiger für mächtige Humusaufgaben aus. Dies ist vermutlich das Resultat des kleinräumigen Wechsels von Tangelhumus und anstehendem Kalk- oder Dolomitgestein, was zu einer Kombination von säure- und basenliebenden Arten führt (Ewald 1999, Olleck et al. 2019). Dieses Phänomen beschreibt Baier (2015) in den Bergwäldern als regelmäßig verbreitet und Ewald (1998) als ein typisches Muster der Sauerhumus-Carbonat-Fichtenwälder (*Adenostylo-Piceetum lycopodietosum*) mit Tangelhumusaufgaben. Diesen Wechsel von mächtigen Humusaufgaben, insbesondere im Stammbereich der Bäume, und Rendzinen im Zwischenbaumbereich erwähnen auch Baier und Göttlein (2004), welche aber auch flächigen Tangelhumus bis einige Hektar Ausdehnung beschreiben.

Die vegetationskundlichen Auswertungen von Olleck et al. (2019) deuten ebenfalls darauf hin, dass Waldbestände mit Tangelhumus sehr moosartenreiche Standorte sind. Knapp ein Drittel (20) der Tangelzeiger sind Bryophyten aus diversen Familien, überwiegend Säurezeiger. Nach Schmidt et al. (2011) besiedeln 15 dieser Arten (*Bazzania trilobata*, *Blepharostoma trichophyllum*, *Campylopus flexuosus*, *Dicranella heteromalla*, *Dicranodontium denudatum*, *Dicranum majus*, *Dicranum montanum*, *Hylocomium splendens*, *Hylocomium umbratum*, *Leucobryum glaucum*, *Mylia taylorii*, *Plagiothecium undulatum*, *Pleurozium schreberi*, *Ptilium crista-castrensis* und *Tetraphis pellucida*) neben sauren Humusauflagen auch Totholz. Es ist anzunehmen, dass sie sich oft auf Totholz etablieren und im Zuge der Zersetzung auf die Humusauflagen übergreifen.

Eine pflanzensoziologische Zuordnung (Ellenberg und Leuschner 2010) der Tangelpflanzen zeigt eine sehr breite Streuung der Klassen und Klassengruppen, welche von Felsspalten- und Mauerfugen-Gesellschaften (*Asplenietea trichomanis*) über die montan-subalpine Hochstauden- und Hochgras-Gesellschaften (*Mulgedio-Aconitetea*) bis zu den Nadelwald-Gesellschaften mittlerer Standorte (*Vaccinio-Piceetea*) reichen. Bezüglich der Waldbindung nach Schmidt et al. (2011) gehört ein großer Teil der Arten der Kategorie „Wald wie im Offenland“ an. Es könnte daraus resultieren, dass diese Arten in Wäldern aber auch unter den Latschengebüschen vorkommen. Ebenso könnten es aber auch Arten sein, welche aus lichtereren Strukturen (Rodungen, Kulturlandschaften) einwandern bzw. überdauerten (Olleck et al. 2019). Auch die Studien von Kolb und Kohlpaintner (2018) und Kolb und Baier (2001) weisen darauf hin, dass Tangelhumus unter den verschiedensten Wald- und Vegetationsformen auftritt. Ewald und Endres (2015) fanden außerdem sehr mächtige Tangelhumusauflagen in einem buchendominierten Waldbestand auf der montan gelegenen Insel Sassau im Walchensee was zeigt, dass nicht nur saure Koniferenstreu eine große Humusakkumulation bewirken kann.

Die Tatsache, dass Heidekraut- und Bärlappgewächse oft flächendeckend auf Tangelhumus konkurrenzstark vorkommen, könnte auch mit ihrer Mykorrhizierung zusammenhängen. *Ericaceae* und *Lycopodiaceae* leben in Symbiose mit Mykorrhiza-Pilzen, welche eine Anpassung an nährstoffarme und saure Standorte ermöglicht (Bradley et al. 1982; Haselwandter 1986; Winther und Friedman 2008). Die schwer zersetzliche Streu von Heidekrautgewächsen trägt neben Koniferennadeln und Totholz maßgeblich zur Humusakkumulation bei (Kubiëna 1953; Kolb und Baier 2001; Kolb und Kohlpaintner 2018). Heidekräuter können eine charakteristisch hohe Konzentration von löslichen und unlöslichen Phenolen anreichern (Jalal et al. 1982; Bending und Read 1996). Die löslichen Phenole, z.B. Tannine sowie Polyphenole wie Chinone sowie Humin- und Fulvosäuren, können die Zersetzung von organischem Material hemmen (Benoit et al. 1968; Lewis und Starkey 1968; Harrison 1971; Bending und Read 1996). Die Ektomykorrhizapilze entziehen den humuszersetzenden Mikroorganismen und saprotrophen Pilzen die Nährstoffe, wobei die Stickstoffverfügbarkeit eine Schlüsselrolle einzunehmen scheint (Bending und Read 1995; Gangkofner und Göttlein 2014; Park 1976). Gadgil und Gadgil (1975) fanden bestätigend heraus, dass das Entfernen der Ektomykorrhiza an *Pinus radiata* zu einem raschen Humusabbau führt.

5 Publikationsübergreifende Diskussion

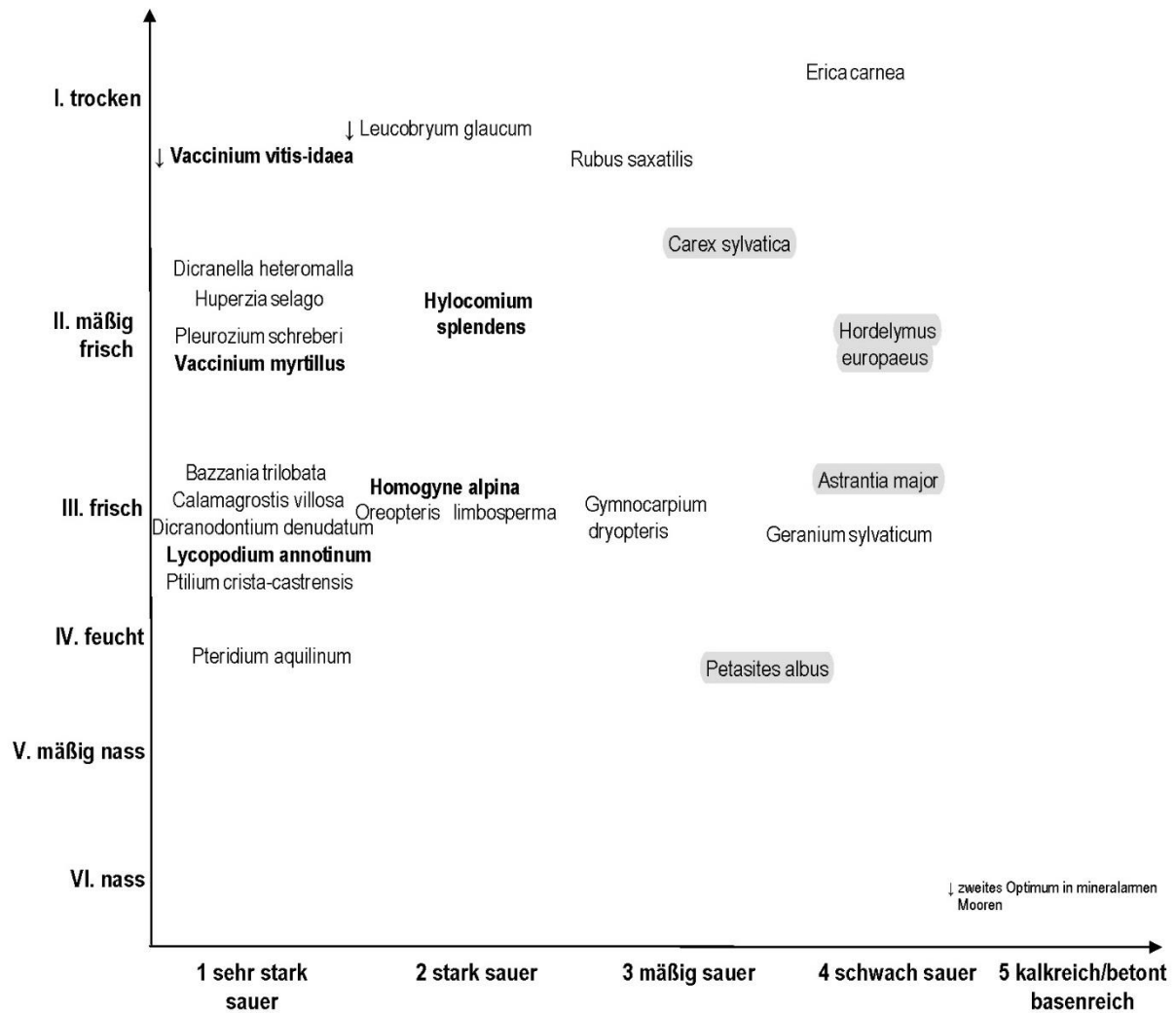


Abb. 10: Ökogramm: Wichtige Tangelzeiger der Bodenvegetation im Zeigerarten-Ökogramm (abgeändert nach Ewald 2007a). Die fünf fettgedruckten Arten weisen die höchsten Indikatorwerte für Tangelhumusstandorte auf. Tangelmeidende Gebirgsarten sind grau hinterlegt.

Fazit

- ☞ Die Lokalisation des oft kleinräumig verteilten Tangelhumus ist anhand der Bodenvegetation sehr gut möglich.
- ☞ Die Säurezeiger *Vaccinium myrtilus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Lycopodium annotinum* und *Huperzia selago* sind auf Kalk- oder Dolomitstandorten sehr gute Tangelzeiger.
- ☞ Auf den moosreichen Tangelstandorten überwiegen totholzbewohnende Bryophyten.

5.3 Maßnahmen und Status quo der Humuspflege

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Es stellt sich die Frage, ob humuspflgende Maßnahmen Dank der Arbeiten von Bochter et al. (1981), Haber (1985), Kohlpaintner und Göttlein (2009), Gangkofner und Göttlein (2014), Baier (2015) oder Baier et al. (2016) in der Praxis bereits angekommen sind, umgesetzt werden und ob diese für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung auf Tangelhumus ausreichend sind (Olleck et al. 2022). Tangelhumus ist laut der durchgeführten Umfrage allerdings in der Forstpraxis nicht überall bekannt. Knapp ein Viertel der Umfrageteilnehmer definierten Tangelhumus zutreffend (nach Definition der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Eckelmann et al. 2005)), der überwiegende Teil jedoch diffus (Olleck et al. 2022). Es besteht demnach durchaus Bedarf an Aufklärung bzw. Wissensvermittlung zum Thema. Unabhängig von der genauen Definition von Tangelhumus konnten ca. 20% der Befragten erkennbare Humusverluste in ihrem Zuständigkeitsbereich ausmachen. Dieser Trend wurde insbesondere durch Luftwurzeln und alten Wurzelstöcke auf nacktem Fels erkannt, was auch von Gangkofner und Göttlein (2014) als Indikator für Humusschwund genannt wird. Dieser Abschnitt der Arbeit soll einen Überblick über die Funktionen und Bedeutung von Tangelhumus geben, auf einschlägige Publikationen zu diesem Thema verweisen sowie humusförderliche Maßnahmen darstellen und diskutieren. Am Ende dieses Kapitels wird auf ein Folgeprojekt hingewiesen, in welchem die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald“ durch Untersuchungen zum aktuellen Status quo der Humuspflege ergänzt wurden.

Tangelhumus ist aufgrund der oft fehlenden oder flach ausgebildeten Mineralböden für den darauf stehenden Waldbestand das essentielle Wurzelsubstrat, und der Verlust der organischen Auflage geht mit erheblichen Nährstoffverlusten einher (Katzensteiner 2000; Kohlpaintner und Göttlein 2009; Kohlpaintner et al. 2014; Göttlein et al. 2014). Diese besondere Bedeutung erkannte bereits Leiningen (1909) und erklärte, dass „Alpenhumus, auch auf meterdicken Schichten, schöne Waldbestände aller Art zu tragen (vermag), welche häufig aus ihm alleine ihre Nährstoffe schöpfen“. Da die pH-Werte in einem Tangelhumusprofil über Kalk- oder Dolomitgestein von sehr stark sauer bis neutral reichen können, dürfte die Nährstoffverfügbarkeit für die meisten Nährelemente ausreichend sein und nur durch den Nährelementvorrat limitiert sein (Baier et al. 2006; Kohlpaintner und Göttlein 2020). Auch die Wasserspeicherkapazität liegt in den Tangelhumusaufgaben deutlich höher als in Mineralböden, weshalb diese Waldstandorte derzeit noch gut wassersorgt sind und eine zentrale Rolle im dezentralen Hochwasserschutz spielen (Kohlpaintner und Göttlein 2020). Dies konnte auch in einem Vergleich von intakten Bergmischwäldern und ehemaligen Kahlschlagflächen von Wilnhammer et al. (2011) festgestellt werden.

Das Vorkommen von Offenlandarten auf Tangelhumus in Wäldern könnte auch ein Relikt früherer Landnutzungen sein (Olleck et al. 2019). So fördern Waldweiden die Entstehung von Waldlücken (Laatsch 1977) und die Artenzusammensetzung, der Reichtum sowie die Struktur der Bergwälder wird durch sie wesentlich beeinflusst (Ewald 2000). Unter dem Begriff Waldweide versteht man den Eintrieb von Vieh auf eine mit Wald bestockte Fläche zum Zweck der Futteraneignung (Grossmann 1927). Nach einer Ablösung der Weiderechte regenerieren sich die Wälder, was zu einem gemeinsamen Vorkommen von Weiderelikten und Waldarten führen könnte (Olleck et al. 2019). Diese photophilen Pflanzen in Verbindung

mit den durch Weide entstandenen Strukturen sind aus Naturschutz- und Biodiversitätsgründen sehr wertvoll. So schaffen die Weidetiere Strukturvielfalt, bringen Dynamik in die Bestände und können eine Verzahnung verschiedener Biotoptypen fördern (Rupp und Michiels 2020). Doch besonders auf Gebirgsböden befindet sich die organische Substanz in einem sehr labilen Gleichgewicht und reagiert überaus empfindlich auf Veränderungen, welche oft auf den wirtschaftenden Menschen zurückzuführen sind (Haber 1985). Durch den Viehtritt geht die günstige Bodenstruktur verloren, was zu Verdichtung, Erosion und Nährstoffverlust führt und sich somit auch nachteilig für das Pflanzen- und Wurzelwachstum auswirkt (Leitgeb et al. 2013; Ewald 2000; Grossmann 1927). Aber auch am Waldbestand entstehen Schäden wie Wurzelverletzungen, Zertreten und Umbiegen von Keimlingen und jungen Bäumen durch Viehtritt sowie Zuwachsverluste und Wunden durch Verbiss (Grossmann 1927). Bochter et al. (1981) konnten auf Lichtalmflächen in den Berchtesgadener Alpen Humusverluste zwischen 18 und 33% feststellen.

Ein deutlicher Humusverlust in den Bayerischen Alpen wurde auch von anderen Autoren festgestellt. So reduzierte sich, vermutlich klimagetrieben der Humusvorrat auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen zwischen 1987 und 2011 um 14%, auf anderen Untersuchungsflächen innerhalb von 35 Jahren um 17% (Prietzl und Christophel 2013; Prietzl et al. 2016). Auch Wiesmeier et al. (2013) konnten einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffvorrat im Boden und der Jahresdurchschnittstemperatur feststellen. Laborversuche von Kohlpaintner und Göttlein (2020) konnten für Tangelhumus ebenfalls eine sehr hohe Temperatursensitivität nachweisen. Die Alpen haben nach Angaben der EEA (European Environment Agency 2009) zwischen dem späten 19. und dem frühen 21. Jahrhundert einen außergewöhnlich starken Temperaturanstieg von etwa + 2 °C erlebt. Wenn die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf den Humusschwund hat, die Höhenlage und Relief aber keine eindeutigen, liegt es nahe, dass die Bodenbeschattung und Mikroklima sehr relevant sind. Die Erhaltung einer dauerhaften, angepassten und ausreichend dichten Waldbestockung ist für die Humuserhaltung ein entscheidender Faktor. Maßnahmen wie die Förderung von Verjüngung, ein angepasstes Schalenwildmanagement und das Liegenlassen von ausreichend Totholz wirken sich positiv auf die Humusaufgabe aus (Mellert und Ewald 2011; Prietzl und Christophel 2013; Göttlein et al. 2014; Kohlpaintner et al. 2014).

Die Anpassung des kontrovers diskutierten Schalenwildmanagements wurde von knapp einem Drittel der Umfrageteilnehmer (Olleck et al. 2022) als außerordentlich notwendig betrachtet. Dass Wild auch Einfluss auf den Humusvorrat hat, konnte Prietzl und Ammer (2008) in den Bayerischen Kalkalpen bestätigen. Dort verdreifachte sich nach 30 bis 40 Jahren der Vorrat an organischem Kohlenstoff innerhalb einer gezäunten Fläche. Schalenwild hat einen entscheidenden Einfluss auf die Artzusammensetzung, Struktur und Dynamik der Waldverjüngung und kann mitunter erhebliche Schäden an den Jungpflanzen anrichten (Ammer 1996; Motta 1996). Die Studie von Prietzl und Ammer (2008) macht jedoch auch Hoffnung, dass Humusaufbau bereits nach wenigen Jahrzehnten einsetzen kann, auch wenn die Bildung von mächtigen Tangelhumusaufgaben mehrere 1000 Jahre dauern kann (Zöttl 1965b; Weber 1999; Baier 2006). Die Degradation der Humusaufgabe ist in jedem Fall rascher und daher ist ein behutsamer Umgang mit dem Humuskapital notwendig (Mayer et al. 2014; Prietzl et al. 2016).

Ein weiteres wichtiges Thema in der Bergwaldbewirtschaftung ist das Verbleiben von Biomasse und Totholz im Bestand. Dem Belassen von Nadelholz wird häufig das Argument Waldschutz entgegengebracht. Auf den empfindlichen Tangelhumus-Waldstandorten sollte

ein Liegenlassen von Biomasse, insbesondere von handentrindeten Stämmen, in Erwägung gezogen werden. Die Gründe werden in folgendem Abschnitt erläutert und diskutiert.

Totholz bildet kleinräumige Mikroreliefs und hat auch indirekt eine wichtige Auswirkung auf die Humusaufgabe. So werden die Risiken für Bodenerosion, Steinschläge und Lawinenabgänge durch liegendes Totholz vermindert (Kupferschmid et al. 2003). Die Aufräumung der Bodenoberfläche führt vermutlich ebenso zu geringeren Schneebewegungen, was für den Humusaufbau zusätzlich als positiv zu bewerten ist.

Ob stehend oder liegend bilden abgestorbene Stämme wichtige verjüngungsökologische Nischen, insbesondere für Nadelholz (Eichrodt 1969; Kupferschmid et al. 2004; Baier und Göttlein 2006). Modernes Holz bietet aufgrund seines ausgeglichenen Wärme- und Wasserhaushalts sowie dem Schutz vor Konkurrenzvegetation ideale Keimbedingungen für Nadelholzsämlinge (Eichrodt 1969; Ott et al. 1997). Die ersten Sämlinge wachsen bereits in der zweiten Dekade nach dem Umfallen der Bäume, das optimale Zerfallsstadium für Fichtensämlinge setzt jedoch erst zwischen der 3. und 6. Dekade ein (Zielonka 2006). In dieser Phase dürfte das Totholz auch zu einem Teil zu Tangelhumus übergehen.

Die hohe Anzahl an totholzbesiedelnden Moosarten unter den Tangelzeigern könnten Relikte von bereits verrottetem Totholz sein (Olleck et al. 2019), welches u.a. als gutes Substrat für Rannenverjüngung fungiert (Baier und Göttlein 2006). Studien von McFee und Stone (1966) ergaben Totholzanteile im Auflagehumus zwischen 14% und 30%, Laiho und Prescott (2004) fanden einen Anteil bis zu 54% der organischen Masse im Boden. Auch Baier (2006) konnte in rund 15% der Humusproben noch deutliche Totholzreste feststellen und vermutet, dass Totholz einen wichtigen Beitrag zur Tangelhumusbildung liefert. Daten, welche von Bauer (2018) und Schnell (2018) auf vier Untersuchungsflächen in der Langen Au erfasst, und vom Autor näher ausgewertet wurden zeigten bei 12%-26% der über 1.100 Bohrstockeinschlägen rötliche Totholzeinschlüsse (Olleck et al. 2020). Die Humusaufgaben mit Totholzanteilen waren dort signifikant mächtiger als jene ohne solche rötlichen Einschlüsse. Demnach scheint Totholz insbesondere zu lokalen, kleinen standörtlichen Maxima einen wichtigen Beitrag zu liefern. Wie lange die rötliche Struktur erkennbar bleibt und aus welchem Baumbestandteil sie stammt (Wurzel oder oberirdisch), ist nicht zu unterscheiden. McFee und Stone (1966) geben an, dass nach 50 Jahren die wesentlichen Holzstrukturen nicht mehr erkennbar sind, wohl aber die rötlichen Einschlüsse. Die Verrottungsgeschwindigkeit von Holz ist jedoch auch anhängig von Baumart, Temperatur und Niederschlägen, wobei sich Laubhölzer an feuchteren Standorten mit Verweilzeiten von 45 bis 92 Jahren tendenziell schneller zersetzen (Hararuk et al. 2020). Nadelholz verrottet nach dieser Studie in Schweizer Wäldern an trockenen Standorten am langsamsten und konnte Zeiträume zwischen 78 bis 286 Jahre überdauern. Totholz kann jedoch auch ohne Erreichen des finalen Zersetzungsstadiums bereits nach 30-60 Jahren ein für die Verjüngung empfängliches Substrat werden (Zielonka 2006).

Neben den Aspekten für die Humuspflge sei hier auch die wichtige Rolle von liegendem Totholz als Lebensraum genannt. Dass viele wirbellose Tiere, Wirbeltiere, Pilze und Pflanzen auf Totholz angewiesen sind, allgemein bekannt und wird durch viele wissenschaftliche Studien bestätigt (z.B. Harmon et al. 1986). Entscheidend für die Habitateignung des Totholzes sind neben der Baumart die Dimension und die Form (z.B. stehend oder liegend) wobei auch Besonnung, Niederschlagshöhe und Bodenkontakt die Zersetzungsgeschwindigkeit beeinflussen (Albrecht 1991). Insbesondere stärkere Durchmesser bieten durch geringere

Schwankungen der inneren Holztemperatur und -feuchte für holzbesiedelnde bzw. -abbauende Tiere und Pflanzen konstante Bedingungen (ebenda). Außerdem stehen dickere Stämme für einen längeren Zeitraum zur Verfügung und sind für seltene Arten mit geringerem Ausbreitungspotential von hoher Bedeutung (Ódor und Standovár 2001). Neben zahlreichen xylobionten Insektenarten (vgl. u.a. Andersson et al. 2015; Müller et al. 2015; Brin et al. 2011; Grove 2002) bietet Totholz auch eine Vielzahl von Mikrohabitaten für Schnecken, welche wiederum verschiedenste biologische Funktionen im Waldboden verbessern können (Kappes 2005; Müller et al. 2005). Auch Flechten und Moose finden sich auf Totholz ein, wobei sich die Artenzahlen der Moose mit zunehmendem Zersetzungsgrad erhöhen und die der Flechten verringern (Friedel 2005). So fördern humuspfliegende Maßnahmen auch die Biodiversität in Bergwäldern, was insbesondere naturschutzfachlich relevanten Arten wie dem Alpenbock (*Rosalia alpina*) helfen kann.

Ein wichtiger Aspekt insbesondere in Zeiten des Klimawandels ist die Kohlenstoffspeicherkapazität organischer Böden. Im Gegensatz zu Moorböden sind Tangelhumusaufgaben im Gebirge in der Gesellschaft und in den Medien deutlich weniger präsent. Jedoch speichert Tangelhumus ab einer Mächtigkeit von nur 14 cm bereits mehr C als die von Wiesmeier et al. (2013) berechneten 98 t C/ha für durchschnittliche bayerische Waldböden (Kohlpaintner und Göttlein 2020; Olleck et al. 2021). Neben dem im Boden gespeicherten Kohlenstoff stellt auch die lebende Biomasse (Waldbestand, Bodenvegetation, ...) sowie das ober- und unterirdische Totholz ein großes Kompartiment für gespeicherten Kohlenstoff dar (Krüger et al. 2012). Das zuvor bereits diskutierte Totholz stellt auch als Kohlenstoffspeicher ein wichtiges Bindeglied zwischen der stockenden Biomasse und dem Boden dar.

Rechnet man diese C-Speicherkapazität mit den mittleren Tangelhumusmächtigkeiten von knapp 30 cm auf 10% der Waldfläche hoch binden diese Böden mehr als 5 Megatonnen Kohlenstoff. Somit verdienen Gebirgswälder auf Tangelhumus das Prädikat „carbon-rich ecosystems“ gemäß Goldstein et al. (2020) (Ewald et al. 2020). Dieser C-Speicher kann jedoch sehr schnell wieder zu einer C-Quelle werden. So zeigten Untersuchungen von Göttlein et al. (2014) Verluste von bis zu 2,6 cm Humusaufgabe in 3 Jahren nach einem Windwurf und Räumung. Dieses Phänomen des verhältnismäßig schnellen Abbaus von Alpenhumus ist nicht neu und wurde bereits durch Münichsdorfer (1932) beschrieben.

Abschließend lässt sich sagen, dass Humuspfliegung ein prioritäres Ziel in der Bergwaldbewirtschaftung auf Tangelhumusstandorten sein sollte. Eine Verbesserung der Kartenbasis und ein geeignetes Konzept zum Auffinden dieser sensiblen Standorte konnten durch die Ergebnisse dieser Arbeit erreicht werden. Es sollte weiterhin in Aufklärungsarbeit und Schulungen investiert werden, damit die auf den Flächen wirtschaftenden Personen entsprechend sensibilisiert werden. Ein auf den Ergebnissen des ALPENHUMUS-Projektes basierendes Forschungsprojekt (ST372-Machbarkeitsstudie Humuspfliegung) konnte bereits durch Workshops und Exkursion das Wissen zum Tangelhumus auf der Fläche erweitern. Ggf. tragen die Ergebnisse dieser Arbeit und die des Projektes ST372 auch dazu bei, dass finanzielle Anreize zur Humuspfliegung geschaffen werden und die vielfältigen Ökosystemleistungen von Tangelhumus entsprechend abgegolten werden können.

Fazit

- ☞ Das Phänomen Tangelhumus ist in den Bayerischen Alpen nur diffus geläufig.
- ☞ Es werden bereits einige Maßnahmen (Belassen von Stamm- und Kronenmaterial, Verjüngungssicherung) zur Humuspflge in den Wäldern der Bayerischen Alpen durchgeführt.
- ☞ Tangelhumus hat für den darauf stockenden Wald eine entscheidende ökologische Bedeutung. Die Bewahrung dieses Humuskapitals sollte auf diesen Flächen ein Hauptziel der Forstwirtschaft sein.
- ☞ Totholz spielt eine wichtige Rolle in der Verjüngungsdynamik der Bergwälder und für den Humusaufbau.
- ☞ Aufgrund der hohen Kohlenstoff-Speicherleistung von Tangelhumus sollte über finanzielle Förderungen Anreize geschaffen werden um humuspflgliche Maßnahmen wie z.B. Handentrindung und belassen von Kronenmaterial durchzuführen.

5.4 Das Dreisäulenprinzip der Tangelhumuspflge

Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits in Olleck et al. 2020 vorveröffentlicht!

Tangelhumusstandorte können als Brennpunkte des Bodenschutzes in den Alpen angesehen werden, weshalb die Humuspflge dort über die allgemeinen Prinzipien einer sachgerechten Behandlung von Berg- und Schutzwäldern hinausgehen sollte (Ewald et al. 2022). Die Ergebnisse des ALPENHUMUS-Projektes und dieser Arbeit lassen sich abschließend im Dreisäulenprinzip der Humuspflge (Abb. 11) gemäß Ewald et al. (2022) eingliedern. Da dieses Prinzip als Grundlage für eine humuspflgliche Bewirtschaftung von Bergwäldern dient, soll es in diesem Abschnitt kurz erläutert werden.



Abb. 11: Das Dreisäulenmodell der Humuspflge auf Waldstandorten mit Tangelhumus. (abgeändert aus Ewald et al. 2022).

1. Säule: Erkennen von Tangelhumus

Die Lokalisation und das Auffinden von Tangelhumus ist die Grundlage für deren Schutz sowie eine humuspflgliche, nachhaltige Waldbewirtschaftung in den Bergwäldern (Olleck et al. 2022). Aufgrund der kleinräumigen Verbreitung von Tangelhumus sollte die Verortung in zwei Schritten erfolgen (Ewald et al. 2020; Ewald et al. 2022).

a) Abgrenzung der Flächenkulisse: Die leicht modifizierten (ergänzt um typische Waldtypen mit Tangelhumusvorkommen) Modellierungsergebnisse aus Olleck et al. (2021) und die daraus abgeleitete Tangelhumuspflgekulisse (Projekt „Machbarkeitsstudie Humuspflge“, ST-372 2021, gefördert von der Bayerischen Forstverwaltung) stellt eine Abgrenzung der potentiellen Verbreitungskulisse von Tangelhumus dar. Diese ist eine sehr gute Ergänzung zur Substratkarte von Kolb (2012).

b) Ist eine Orientierung anhand dieser Karte vollzogen, erfolgt die Lokalisation des Tangelvorkommens auf Waldbestandsebene visuell anhand der dominant vorkommenden säurezeigenden Heidekraut- und Bärlappgewächse (Olleck et al. 2019). Aufgrund der leicht zu erkennenden wichtigsten Tangelzeiger ist dies eine praxistaugliche und schnelle Methode zur genauen Lokalisation mächtiger Humusaufgaben auf reinen Kalk- oder Dolomitgesteinen.

2. Säule: Bewahren vor Humusabbau

Innerhalb der Tangelhumusgebiete sollten gegen Bestandesstörungen resiliente Dauerbestockungen das priorisierte Ziel der Waldbewirtschaftung sein. Randbedingungen dafür sind: a) die Freistellung von Waldweide, b) angepasste Schalenwildbestände, welche eine erfolgreiche Naturverjüngung zulassen, c) Vorausverjüngung von walddgesellschaftstypischen Haupt- und Begleitbaumarten und d) strukturreiche, gestufte geschlossene Bestände mit hoher Einzelbaumstabilität (Ewald et al. 2022; Olleck et al. 2022). Eine dauerhafte Beschattung des Bodens ist grundlegend für den Erhalt der organischen Auflage.

3. Säule: Humusvorräte wiederherstellen

Auf Tangelhumusstandorten, wo es durch Borkenkäferkalamitäten, Windwürfe oder langfristiges Ausbleiben von Naturverjüngung zu einer lichten Waldsituation gekommen ist, sollte das zentrale Ziel das Belassen von Stamm- und Kronenholz sein (Olleck et al. 2022; Ewald et al. 2022). Ist im Umfeld mit waldschutzfachlichen Problemen zu rechnen, sollte unbedingt eine Handentrindung in Erwägung gezogen werden. Dies ist mit hohen Kosten verbunden, weshalb das Belassen von entrindetem Holz vor allem in der Schutzwaldsanierung mit finanziellen Anreizen unterstützt werden sollte (Mellert und Ewald 2011). Die Umsetzung der Forschungsergebnisse in betriebliche Konzepte und Richtlinien, die Einführung von staatlichen Förderprogrammen und die Vermarktung von Ökosystemdienstleistungen bedürfen aber der weiteren Forschung (Ewald et al. 2020; Olleck et al. 2022), wobei das Projekt „Machbarkeitsstudie Humuspflge“ (ST-372, 2021), welches auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbaute, bereits weitere wichtige Bausteine liefern konnte.

6 Literaturverzeichnis

- Aberegg, I.; Egli, M.; Sartori, G.; Purves, R. S. (2009): Modelling spatial distribution of soil types and characteristics in a high Alpine valley (Val di Sole, Italy). In: *Studi Trentini di Scienze Naturali* 85, S. 39–50. DOI: 10.5167/UZH-23750.
- Albrecht, L. (1991): Die Bedeutung des toten Holzes im Wald. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter Forstliches Jahrbuch* 110 (1), S. 106–113.
- Amelung, W.; Blume, H.-P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I. et al. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Ammer, C. (1996): Impact of ungulates on structure and dynamics of natural regeneration of mixed mountain forests in the Bavarian Alps. In: *Forest Ecology and Management* 88 (1-2), S. 43–53. DOI: 10.1016/S0378-1127(96)03808-X.
- Andersson, J.; Hjältén, J.; Dynesius, M. (2015): Wood-Inhabiting Beetles in Low Stumps, High Stumps and Logs on Boreal Clear-Cuts: Implications for Dead Wood Management. In: *PloS one* 10 (3), e0118896. DOI: 10.1371/journal.pone.0118896.
- Arbeitskreis Standortkartierung (2016): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 7. Auflage. Eching, Kr. Freising: IHW-Verlag.
- Baier, R. (2015): Dynamik und ökologische Bedeutung der Humusaufgabe in kalkalpinen Wäldern. In: *Schriften des Nationalparks Gesäuse* 12, S. 38–46.
- Baier, R. (2006): Wurzelentwicklung, Ernährung, Mykorrhizierung und “positive Kleinstandorte” der Fichtenverjüngung (*Picea abies* [L.] Karst.) auf Schutzwaldstandorten der Bayerischen Kalkalpen. Dissertation. Technische Universität München, München. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt.
- Baier, R.; Wilnhammer, M.; Göttlein, A. (2016): Ohne Humus geht’s bergab. Alpenhumus ist ein bestimmender Faktor für die Vitalität der Bergwälder im Kalkalpin. In: *LWF aktuell* 23 (111), S. 42–45.
- Baier, R.; Ettl, R.; Hahn, C.; Göttlein, A. (2006): Early development and nutrition of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedlings on different seedbeds in the Bavarian limestone Alps – a bioassay. In: *Annals of Forest Science* 63 (4), S. 339–348. DOI: 10.1051/forest:2006014.
- Baier, R. & Göttlein, A. (2006): Verjüngung der Fichte im naturnahen Bergmischwald und auf Schutzwald-Sanierungsflächen. In: *AFZ-Der Wald* 15, S. 820–823.
- Baier, R. & Göttlein, A. (2004): Böden der Kalkalpen – Entstehung, Eigenschaften und Bedeutung für die forstliche Praxis. In: *AFZ-Der Wald* 9, S. 481–483.
- Bauer, K. (2018): Die kleinräumige Variation des Alpenhumus unter Berücksichtigung vorhandener Sonderstrukturen. Am Beispiel der südexponierten Untersuchungsgebiete in der Lange Au. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Bayerischer Landtag (2005): Bekanntmachung der Neufassung des Waldgesetzes für Bayern (Bay-WaldG). GVBl. S. 313, BayRS 7902-1-L. In: Gesetz- und Verordnungsblatt (15), S. 313–326.

- Bending, G. D. & Read, D. J. (1996): Effects of the soluble polyphenol tannic acid on the activities of ericoid and ectomycorrhizal fungi. In: *Soil Biology and Biochemistry* 28 (12), S. 1595–1602. DOI: 10.1016/S0038-0717(96)00257-X.
- Bending, G. D. & Read, D. J. (1995): The structure and function of the vegetative mycelium of ectomycorrhizal plants. V. Foraging behaviour and translocation of nutrients from exploited litter. In: *The New phytologist* 130 (3), S. 401–409. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1995.tb01834.x.
- Benoit, R. E.; Starkey, R. L.; Basaraba, J. (1968): Effect of Purified Plant Tannin on Decomposition of Some Organic Compounds and Plant Materials. In: *Soil Science* 105 (3), S. 153–158. DOI: 10.1097/00010694-196803000-00004.
- Binder, F.; Macher, C.; Müller, K. (2019): Dem Schutzwald auf der Spur. In: *LWF aktuell* 1 (120), S. 11–13.
- Bochter, R. (1984a): Böden naturnaher Bergwaldstandorte auf carbonatreichen Substraten. In: *Nationalpark Berchtesgaden Forschungsbericht* 6.
- Bochter, R. (1984b): Bodenbildung auf Kalk-und Gneisbergsturzblöcken unter subalpinem Fichtenwald. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 147 (5), S. 604–613.
- Bochter, R. (1984c): Vorschlag zur Gliederung von Humusprofilen auf Kalkfels in der Waldstufe der Alpen. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 147 (2), S. 232–241.
- Bochter, R.; Neuerburg, W.; Zech, W. (1981): Humus und Humusschwund im Gebirge. In: *Nationalpark Berchtesgaden Forschungsbericht* 2.
- Borcard, D.; Legendre, P.; Drapeau, P. (1992): Partialling out the spatial component of ecological variation. In: *Ecology* 73 (3), S. 1045–1055. DOI: 10.2307/1940179.
- Bradley, R.; Burt, A. J.; Read, D. J. (1982): The biology of mycorrhiza in the Ericaceae. VIII. The role of mycorrhizal infection in heavy metal resistance. In: *New Phytologist* 91 (2), S. 197–209. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1982.tb03306.x.
- Brang, P.; Schönenberger, W.; Ott, E.; Gardner, B. (2001): Forests as Protection from Natural Hazards. In: Julian Evans (Hg.): *The forests handbook*. Oxford, Malden, MA, USA: Blackwell Science, S. 53–81.
- Braun-Blanquet, J. (1964): *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde*. 3. Aufl. Wien: Springer-Verlag.
- Breiman, L. (2001): Random Forests. In: *Machine Learning* 45 (1), S. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- Brin, A.; Bouget, C.; Brustel, H.; Jactel, H. (2011): Diameter of downed woody debris does matter for saproxylic beetle assemblages in temperate oak and pine forests. In: *Journal of Insect Conservation* 15 (5), S. 653–669. DOI: 10.1007/s10841-010-9364-5.
- Buchanan, B. P.; Fleming, M.; Schneider, R. L.; Richards, B. K.; Archibald, J.; Qiu, Z. et al. (2014): Evaluating topographic wetness indices across central New York agricultural landscapes. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (8), S. 3279–3299.
- Bürger-Arndt, R.; Ohse, B.; Meyer, K.; Höltermann, A. (2012): Ökosystemdienstleistungen von Wäldern. Workshopbericht Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm 16. - 19. November 2011. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz. Bonn-Bad Godesberg (BfN-Skripten).

- Carignan, V. & Villard, M. (2002): Selecting Indicator Species to Monitor Ecological Integrity: A Review. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 78 (1), S. 45–61. DOI: 10.1023/A:1016136723584.
- Christophel, D.; Spengler, S.; Schmidt, B.; Ewald, J.; Prietzel, J. (2013): Customary selective harvesting has considerably decreased organic carbon and nitrogen stocks in forest soils of the Bavarian Limestone Alps. In: *Forest Ecology and Management* 305, S. 167–176. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.054.
- De Cáceres, M. & Jansen, F. (2013): Studying the statistical relationship between species and groups of sites. In: *Package 'indicspecies' version 1.7.6*.
- Dengler, J.; Jansen, F.; Glöckler, F.; Peet, R. K.; Cáceres, M. de; Chytrý, M. et al. (2011): The Global Index of Vegetation-Plot Databases (GIVD): a new resource for vegetation science. In: *Journal of Vegetation Science* 22 (4), S. 582–597. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2011.01265.x.
- Dormann, C. F.; Elith, J.; Bacher, S.; Buchmann, C.; Carl, G.; Carré, G. et al. (2013): Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46. In: *Ecography* 36 (1), S. 27–46. DOI: 10.1111/J.1600-0587.2012.07348.X.
- Dormann, C. F. & Kühn, I. (2009): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. In: Helmholtz Zentrum für Umweltforschung-UFZ 2.
- Dufrêne, M. & Legendre, P. (1997): Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. In: *Ecological monographs* 67 (3), S. 345–366. DOI: 10.2307/2963459.
- Ebermayer, E. (1888): Buchbesprechung zu: P.E. Müller. Studien über die natürlichen Humusformen und deren Einwirkungen auf Vegetation und Boden. In: *Forschungen auf den Gebieten der Agrikulturphysik* 10, S. 383–385.
- Eckelmann, W.; Sponagel, H.; Grottenthaler, W.; Hartmann, J.-K. (Hg.) (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. verbesserte und erweiterte Auflage. 5. Aufl. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers.
- Eichrodt, R. (1969): Über die Bedeutung von Moderholz für die natürliche Verjüngung im subalpinen Fichtenwald. Dissertation. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich.
- Ellenberg, H. & Leuschner, C. (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 6., vollständig neu bearbeitete und stark erweiterte Aufl. Stuttgart: E. Ulmer (UTB, 8104).
- ESRI Inc. (2020): ArcGIS software. Version 10.7.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- European Environment Agency (2009): *Regional climate change and adaptation. The Alps facing the challenge of changing water resources*. Luxembourg (EEA report, DOI: 10.2800/12552).
- Ewald, J. (2007a): Beurteilung von Waldstandorten und Waldgesellschaften mit Zeigerarten-Ökogrammen. In: *Tuexenia* 27, S. 7–18.
- Ewald, J. (2007b): Ein pflanzensoziologisches Modell der Schattentoleranz von Baumarten in den Bayerischen Alpen. In: *Forum Geobotanicum* 3 (3), S. 11–19.

- Ewald, J. (2004): Ökologie der Weißtanne (*Abies alba* Mill.) im bayerischen Alpenraum. In: *Forum Geobotanicum* 1, S. 9–18.
- Ewald, J. (2000): Long-term impact of forest pasture on the understorey of mountain forests in the Tegernsee Alps (Bavaria). In: *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz* 9 (3), S. 161–170.
- Ewald, J. (1999): Relationships between floristic and micro site variability in coniferous forests of the Bavarian Alps. In: *Phytocoenologia* 29 (3), S. 327–344. DOI: 10.1127/phyto/29/1999/327.
- Ewald, J. (1998): Subalpine Fichtenwälder in den Bayerischen Alpen - ein standortkundlicher Überblick. In: *AFZ-Der Wald* 8, S. 406–408.
- Ewald, J. (1997): Die Bergmischwälder der Bayerischen Alpen: Soziologie, Standortbindung und Verbreitung. Berlin: Cramer (*Dissertationes Botanicae*, 290), S. 1–234.
- Ewald, J.; Göttlein, A.; Prietzel, J.; Kohlpaintner, M.; Reger, B.; Olleck, M. (2022): Humuspflge in den Bayerischen Alpen. In: *AFZ-Der Wald* 3, S. 22-25.
- Ewald, J.; Göttlein, A.; Prietzel, J.; Kohlpaintner, M.; Reger, B.; Olleck, M. (2020): Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald - Synthese und Ausblick. In: *Forstliche Forschungsberichte. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan* (220), S. 5–19.
- Ewald, J. & Endres, U. (2015): Waldvegetation der Sassau im Walchensee: Vergleich von Naturwald und Wirtschaftswald, Insel und Halbinsel. In: *Tuexenia* 35, S. 131–153. DOI: 10.14471/2015.35.014.
- Ewald, J. & Binner, S. (2007): Werkzeuge zur Bestimmung der Waldtypen im bayerischen Hochgebirge. In: *Waldökologie online* 5, S. 25–77.
- Feulner, S. (2017): Vorkommen und Mächtigkeit von Humusaufgaben auf kalkalpinen Waldstandorten im Berchtesgadener Land. Bachelorarbeit. Technische Universität München, München. Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt.
- Fliri, F. (1975): Das Klima der Alpen im Raume von Tirol. Innsbruck: Wagner (Monographien zur Landeskunde Tirols).
- Foerst, K. & Kreutzer, K. (1977): Regionale natürliche Waldzusammensetzung und Forstliche Wuchsgebietsgliederung Bayerns. München.
- Franz, H. (1979): Ökologie der Hochgebirge: Ulmer.
- Friedel, A. (2005): Artenvielfalt und Standort von Moosen und Flechten in unbewirtschafteten und bewirtschafteten Buchenwäldern des nordostdeutschen Tieflandes. Dissertation. Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg. Fachbereich Umweltwissenschaften.
- Gadgil, R. L. & Gadgil, P. D. (1975): Suppression of litter decomposition by mycorrhizal roots of *Pinus radiata*. In: *New Zealand journal of forestry science* (5), S. 33–41.
- Gangkofner, R. & Göttlein, A. (2014): Wurzeln fliegen nicht! Merklicher Humusschwund im kalkalpinen Bergwald festgestellt. In: *AFZ-Der Wald* 5, S. 30–34.
- Goldstein, A.; Turner, W. R.; Spawn, S. A.; Anderson-Teixeira, K. J.; Cook-Patton, S.; Fargione, J. et al. (2020): Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. In: *Nature Climate Change* 10 (4), S. 287–295. DOI: 10.1038/s41558-020-0738-8.

- Göttlein, A.; Katzensteiner, K.; Rothe, A. (2014): Standortsicherung im Kalkalpin - SicALP. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt INTERREG BY/Ö J00183. Hg. v. Zentrum Wald-Forst-Holz Weihenstephan. Freising (Forstliche Forschungsberichte München, 212).
- Grossmann, H. (1927): Die Waldweide in der Schweiz. Promotionsarbeit. ETH Zurich.
- Grove, S. J. (2002): Saprophytic Insect Ecology and the Sustainable Management of Forests. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 33 (1), S. 1–23. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150507.
- Haber, J. (1985): Beziehungen zwischen dem Humusgehalt/Humusvorrat bayerischer Bergwaldböden und steuernden Standorts- und Bestandsfaktoren. Dissertation. Universität Bayreuth, Bayreuth. Fakultät Biologie, Chemie und Geowissenschaften.
- Hararuk, O.; Kurz, Werner A.; Didion, M. (2020): Dynamics of dead wood decay in Swiss forests. *Forest Ecosystems*, 7(1). In: *For. Ecosyst.* 7 (1). DOI: 10.1186/S40663-020-00248-X.
- Harmon, M. E.; Franklin, J. F.; Swanson, F. J.; Sollins, P.; Gregory, S. V.; Lattin, J. D. et al. (1986): Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. In: *Advances in ecological research*, Bd. 15. Unter Mitarbeit von A. Macfadyen und E. D. Ford. New York: Academic Press (Advances in Ecological Research, 15), S. 133–302.
- Harrison, A. (1971): The inhibitory effect of oak leaf litter tannins on the growth of fungi, in relation to litter decomposition. In: *Soil Biology and Biochemistry* 3 (3), S. 167–172. DOI: 10.1016/0038-0717(71)90011-3.
- Haselwandter, K. (1986): Mykorrhiza-Forschung unter besonderer Berücksichtigung alpiner Ökosysteme. In: *Berichte des naturwissenschaftlich-medizinischen Vereins in Innsbruck* (Band 73), S. 223–228.
- Hastie, T. J. & Tibshirani, R. J. (1990): Generalized additive models. London United Kingdom: Chapman & Hall/CRC.
- Haunstetter, M. (2018): Verteilung und Vorhersagbarkeit von Tangelhumus in den Bergwäldern der Allgäuer Alpen. Bachelorarbeit, unveröffentlicht. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Hellwig, N.; Tatti, D.; Sartori, G.; Anschlag, K.; Graefe, U.; Egli, M. et al. (2019): Modeling Spatial Patterns of Humus Forms in Montane and Subalpine Forests: Implications of Local Variability for Upscaling. In: *Sustainability* 11 (1), S. 48. DOI: 10.3390/su11010048.
- Hellwig, N.; Gómez-Brandón, M.; Ascher-Jenull, J.; Bardelli, T.; Anschlag, K.; Fornasier, F. et al. (2018): Humus Forms and Soil Microbiological Parameters in a Mountain Forest: Upscaling to the Slope Scale. In: *Soil Systems* 2 (1), S. 12. DOI: 10.3390/soilsystems2010012.
- Heuvelink, G.B.M & Webster, R. (2001): Modelling soil variation: past, present, and future. In: *Geoderma* 100 (3-4), S. 269–301. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00025-8.
- Huber, S. & Englisch, M. (1997): Auswertung von Waldbodeninventuren im Bereich von Arge Alp und Arge Alpen-Adria. Studie im Auftrag der gemeinsamen Arbeitsgruppe "Waldschäden und Luftreinhaltung" der Arbeitsgemeinschaft Alpenländer und der Arbeitsgemeinschaft Alpen-Adria. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien. München.

- Jakob, J. (2018): Verteilung von Tangelhumus in den Bergwäldern des Mangfallgebirges. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Jalal, M. A.F.; Read, D. J.; Haslam, E. (1982): Phenolic composition and its seasonal variation in *Calluna vulgaris*. In: *Phytochemistry* 21 (6), S. 1397–1401. DOI: 10.1016/0031-9422(82)80150-7.
- Jenny, H. (1941): Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. New York: McGraw-Hill.
- Kappes, H. (2005): Influence Of Coarse Woody Debris On The Gastropod Community Of A Managed Calcareous Beech Forest In Western Europe. In: *Journal of Molluscan Studies* 71 (2), S. 85–91. DOI: 10.1093/mollus/eyi011.
- Katzensteiner, K. (2000): Wasser- und Stoffhaushalt von Waldökosystemen in den nördlichen Kalkalpen. Wien: Österr. Ges. für Waldökosystemforschung und experimentelle Baumforschung (Forstliche Schriftenreihe, Bd. 15).
- Katzensteiner, K.; Ewald, J.; Göttlein, A. (Hg.) (2016): Wälder der Kalkalpen - Strategien für die Zukunft StratAlp. (Forests of the Calcareous Alps - Strategies for the Future StratAlp). Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur 21. Wien.
- Kohlpaintner, M. & Göttlein, A. (2020): Nährstoff- und Wasserhaushalt des Systems „Alpenhumus“ (Teilprojekt Makroskala). In: *Forstliche Forschungsberichte. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan* (220), 61–100.
- Kohlpaintner, M.; Huber, C.; Göttlein, A. (2014): Wiederbewaldung und Stoffhaushalt auf Windwurfflächen im Kalkalpin. Ergebnisse von den SicAlp Untersuchungsflächen im Lattengebirge. In: *LWF aktuell* (99), S. 34–37.
- Kohlpaintner, M. & Göttlein, A. (2009): Mit dem Wald verschwindet auch der Humus. Großflächige Störungen in Hochgebirgswäldern führen zu Nährstoffverlusten und beeinträchtigen langfristig die Waldentwicklung. In: *LWF aktuell* 16 (71), S. 22–24.
- Kolb, E. (2012): Interaktive Karte der Gesteinseigenschaften. Eine neue Substratgliederung bringt schnelle Übersicht und viele Informationen über die Böden der Bayerischen Alpen. In: *LWF aktuell* (87/12), S. 15–17.
- Kolb, E. & Göttlein, A. (2021): Die Herkunft des Begriffs TANGEL, seine derzeitige Definition und eine Möglichkeit zu dessen Weiterentwicklung. In: *AFSV-Schriftenreihe „Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz“* (20), S. 5–19.
- Kolb, E. & Kohlpaintner, M. (2018): Tangel humus forms – genesis and co-evolution with vegetation. In: *Applied Soil Ecology* 123, S. 622–626. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.09.040.
- Kolb, E. & Baier, R. (2001): Tangel–die wenig bekannte Humusform. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hg.): Exkursionsführer zur Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Forstliche Standorts- und Vegetationskunde (AFSV) im Werdenfelser Land. Grainau, 19.–22.09.2001, S. 20–24.
- Krüger, I.; Schulz, C.; Borken, W. (2012): Totholz als Kohlenstoffsенke. Ein Vergleich in bewirtschafteten und unbewirtschafteten Wäldern. In: *LWF aktuell* 87, 24-26, zuletzt geprüft am 18.02.2022.
- Kubiëna, W. L. (1948): Entwicklungslehre des Bodens. Wien: Springer.

- Kubiëna, W. L. (1953): Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas: Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Kupferschmid, A. D.; Brang, P.; Bugmann, H. (2004): Wie gut schützen Totholzbestände vor Naturgefahren? Schutzwirkung von Gebirgsfichtenwäldern nach Buchdruckerbefall. In: *Wald und Holz* 85 (1), S. 33–36.
- Kupferschmid, A. D.; Brang, P.; Schönenberger, W.; Bugmann, H. (2003): Decay of *Picea abies* snag stands on steep mountain slopes. In: *Forestry Chronicle* 79 (2), S. 247–252. DOI: 10.5558/tfc79247-2.
- Laatsch, W. (1977): Zur Struktur und Bewirtschaftung der Wälder im bayerischen Alpenraum. Die Entstehung von Lawinenbahnen im Hochlagenwald. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 96 (1), S. 89–93. DOI: 10.1007/BF02736494.
- Laiho, R. & Prescott, C. E. (2004): Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis. In: *Canadian Journal of Forest Research* 34 (4), S. 763–777. DOI: 10.1139/x03-241.
- Lawrenz-Grunow, D. (2018): Verteilung und Vorhersagbarkeit mächtiger Tangelhumusaufgaben auf kalkalpinen Bergwaldstandorten des Werdenfelser Landes und Isarwinkels. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Legendre, P. (1990): Quantitative Methods and Biogeographic Analysis. In: D. J. Garbary und G. R. South (Hg.): Evolutionary biogeography of the marine algae of the north atlantic: Springer-Verlag Berlin, S. 9–34. DOI: 10.1007/978-3-642-75115-8_2.
- Leiningen, W. v. (1912): Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. In: *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft* (10), S. 465–486.
- Leiningen, W. v. (1909): Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. 2. Abschnitt. In: *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft* (5), S. 8–32.
- Leiningen, W. v. (1908): Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. 1. Abschnitt. In: *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft* (11), S. 35–44.
- Leitgeb, E.; Reiter, R.; Englisch, M.; Lüscher, P.; Schad, P.; Feger, K.-H.; (2013): Waldböden. Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz. 1. Aufl. Weinheim: Wiley VCH.
- Lewis, J. A. & Starkey, R. L. (1968): Vegetable Tannins, Their Decomposition and Effects on Decomposition of Some Organic Compounds. In: *Soil Science* 106 (4), S. 241–247. DOI: 10.1097/00010694-196810000-00001.
- Mayer, M.; Matthews, B.; Schindlbacher, A.; Katzensteiner, K. (2014): Soil CO₂ efflux from mountainous windthrow areas: dynamics over 12 years post-disturbance. In: *Biogeosciences* 11 (21), S. 6081–6093. DOI: 10.5194/bg-11-6081-2014.
- McFee, W. W. & Stone, E. L. (1966): The Persistence of Decaying Wood in the Humus Layers of Northern Forests. In: *Soil Science Society of America Journal* 30 (4), S. 513–516.
- McGeoch, M. A. & Chown, S. L. (1998): Scaling up the value of bioindicators. In: *Trends in Ecology & Evolution* 13 (2), S. 46–47. DOI: 10.1016/s0169-5347(97)01279-2.

- McBratney, A. B.; Mendonça Santos, M. L.; Minasny, B. (2003): On digital soil mapping. In: *Geoderma* 117 (1), S. 3–52. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- Mellert, K. H. & Ewald, J. (2014a): Nutrient limitation and site-related growth potential of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) in the Bavarian Alps. In: *European Journal of Forest Research* 133 (3), S. 433–451. DOI: 10.1007/s10342-013-0775-1.
- Mellert, K. H. & Ewald, J. (2014b): Regionalizing nutrient values of vegetation to assess site fertility of mountain forests in the Bavarian Alps. In: *Folia Geobotanica* 49 (3), S. 407–423. DOI: 10.1007/s12224-013-9167-z.
- Mellert, K. H. & Ewald, J. (2011): Wie viel Biomassenutzung verträgt der Bergwald. Empfindlichkeit von Wäldern gegenüber Biomassenutzung. In: *AFZ-Der Wald* 24 (24/2011), S. 19–21.
- Mertens, M.; Nestler, I.; Huwe, B. (2002): GIS-based regionalization of soil profiles with Classification and Regression Trees (CART). In: *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenk.* 165 (1), S. 39. DOI: 10.1002/1522-2624(200202)165:1<39::AID-JPLN39>3.0.CO;2-X.
- Meynen, E.; Schmithüsen, J.; Gellert, J.; Neef, E.; Müller-Miny, H.; Schultze, J. H. (Hg.) (1953-62): *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung. 9 Bände. Remagen, Bad Godesberg: Selbstverlag.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005): *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, D.C.
- Motta, R. (1996): Impact of wild ungulates on forest regeneration and tree composition of mountain forests in the Western Italian Alps. In: *Forest Ecology and Management* 88 (1), S. 93–98. DOI: 10.1016/S0378-1127(96)03814-5.
- Müller, J.; Brustel, H.; Brin, A.; Bussler, H.; Bouget, C.; Obermaier, E. et al. (2015): Increasing temperature may compensate for lower amounts of dead wood in driving richness of saproxylic beetles. In: *Ecography* 38 (5), S. 499–509. DOI: 10.1111/ecog.00908.
- Müller, J.; Strätz, C.; Hothorn, T. (2005): Habitat factors for land snails in European beech forests with a special focus on coarse woody debris. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 124 (3), S. 233–242. DOI: 10.1007/s10342-005-0071-9.
- Münichsdorfer, Franz (1932): *Bayerns Boden 1. Teil: Südbayern*. München: Knorr & Hirth.
- Ódor, P. & Standovár, T. (2001): Richness of Bryophyte Vegetation in Near-Natural and Managed Beech Stands: The Effects of Management-Induced Differences in Dead Wood. In: *Ecological Bulletins* (49), S. 219–229.
- Olleck, M.; Reger, B.; Ewald, J. (2022): Humuspflege in Gebirgswäldern der Kalkalpen – Wissensstand und Massnahmen. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 173 (1), S. 36–43.
- Olleck, M.; Kohlpaintner, M.; Mellert, K. H.; Reger, B.; Göttlein, A.; Ewald, J. (2021): Thick forest floors in the Calcareous Alps - Distribution, ecological functions and carbon storage potential. In: *CATENA* (207). DOI: 10.1016/j.catena.2021.105664.
- Olleck, M.; Reger, B.; Ewald, J. (2020): Verbreitung und Vorkommen von Alpenhumus - Regionalisierung auf Landschaftsebene (Teilprojekt Makroskala). In: *Forstliche Forschungsberichte. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan* (220), S. 21–60.

- Olleck, M.; Reger, B.; Ewald, J. (2019): Plant indicators for Follic Histosols in mountain forests of the Calcareous Alps. In: *Applied Vegetation Science* 23 (2), S. 285–296. DOI: 10.1111/avsc.12470.
- Ott, E.; Frehner, M.; Frey, H.-U.; Lüscher, P. (1997): Gebirgsnadelwälder. Praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern: Haupt.
- Park, D. (1976): Carbon and nitrogen levels as factors influencing fungal decomposers. In: Jonathan Michael Anderson und A. Macfadyen (Hg.): The role of terrestrial and aquatic organisms in decomposition processes. The 17th symposium of the British Ecological Society, 15 - 18 April 1975. Oxford: Blackwell.
- Prietzl, J. & Wiesmeier, M. (2019): A concept to optimize the accuracy of soil surface area and SOC stock quantification in mountainous landscapes. In: *Geoderma* 356, S. 113922. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113922.
- Prietzl, J.; Zimmermann, L.; Schubert, A.; Christophel, D. (2016): Organic matter losses in German Alps forest soils since the 1970s most likely caused by warming. In: *Nature Geoscience* 9 (7), S. 543–548. DOI: 10.1038/ngeo2732.
- Prietzl, J. & Christophel, D. (2014): Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps. In: *Geoderma* 221-222, S. 28–39. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.01.021.
- Prietzl, J. & Christophel, D. (2013): Humusschwund in Waldböden der Alpen. Die vermutliche Auswirkung des Klimawandels ist eine große Herausforderung für die nachhaltige Forstwirtschaft. In: *LWF aktuell* 20 (97), S. 44–47.
- Prietzl, J. & Ammer, C. (2008): Montane Bergmischwälder der Bayerischen Kalkalpen: Reduktion der Schalenwildichte steigert nicht nur den Verjüngungserfolg, sondern auch die Bodenfruchtbarkeit. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* (179), S. 105–113.
- Reger, B.; Göttlein, A.; Katzensteiner, K.; Ewald, J. (2015): Assessing the Sensitivity of Mountain Forests to Site Degradation in the Northern Limestone Alps, Europe. In: *Mountain Research and Development* 35 (2), S. 139–151. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00094.1.
- Reger, B.; Mellert, K. H.; Ewald, J. (2014a): Indikatorarten für nährstoffarme Standorte in den Bergwäldern der Bayerischen Alpen. In: *Tuexenia* (34), S. 39–51.
- Reger, B.; Häring, T.; Ewald, J. (2014b): The TRM Model of Potential Natural Vegetation in Mountain Forests. In: *Folia Geobot* 49 (3), S. 337–359. DOI: 10.1007/s12224-013-9158-0.
- Reger, B. & Ewald, J. (2012): Die Waldtypenkarte »Bayerische Alpen«. Eine neue Planungsgrundlage für die forstliche Praxis. In: *LWF aktuell* (87), S. 11–14.
- Reger, B.; Schüpferling, R.; Beck, J.; Dietz, E.; Morovitz, D.; Schaller, R. et al. (2012): WINALPecobase – ecological database of mountain forests in the Bavarian Alps. In: *Biodivers. Ecol.* 4, S. 167–171. DOI: 10.7809/b-e.00072.
- Rehfuess, K-E. (1990): Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. 2. Aufl. Hamburg: Parey (Pareys Studentexte, 29).
- Rupp, M. & Michiels, H.-G (2020): Waldweide im Waldnaturschutz (wood pasture in forest nature conservation). In: *Mitteilungen des VFS: standort.wald* 51, S. 153–172.
- Saborowski, J. & Cancino, J. (2008): About the benefits of poststratification in forest inventories. In: *Journal of Forest Science* 53 (No. 4), S. 139–148. DOI: 10.17221/2171-JFS.

- Saborowski, J. & Dahm, S. (1997): Möglichkeiten zur Stratifizierung bei Waldinventuren. In: *Tagungsband 1996 Sektion forstliche Biometrie und Informatik DVFF*, S. 92–100.
- Schirpke, U.; Leitinger, G.; Tasser, E.; Schermer, M.; Steinbacher, M.; Tappeiner, U. (2013): Multiple ecosystem services of a changing Alpine landscape: past, present and future. In: *International journal of biodiversity science, ecosystem services & management* 9 (2), S. 123–135. DOI: 10.1080/21513732.2012.751936.
- Schmidt, B. (2010): Humusausstattungen von Gebirgswäldern der bayerischen Kalkalpen mit unterschiedlicher Nutzungsgeschichte. Diplomarbeit. Fachhochschule Weihenstephan, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Schmidt, M.; Kriebitzsch, W.-U.; Ewald, J. (2011): Waldartenlisten der Farn- und Blütenpflanzen, Moose und Flechten Deutschlands. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN) (BfN-Skripten, 299).
- Schnell, H. (2018): Die kleinräumige Variation des Alpenhumus unter Berücksichtigung vorhandener Sonderstrukturen. Am Beispiel der nordexponierten Untersuchungsgebiete in der Lange Au. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Schubert, A.; Falk, W.; Stetter, U. (2015): BZE II - Waldböden in Bayern. In: *Ergebnisse der BZE II. Forstliche Forschungsberichte München* (213).
- Sendtner, O. (1854): Die Vegetations-Verhältnisse Südbayerns: nach den Grundsätzen der Pflanzengeographie und mit Bezugnahme auf Landescultur. München: Literarisch-Artistische Anstalt (3).
- Stahr, K.; Kandeler, E.; Herrmann, L.; Streck, T. (2016): Bodenkunde und Standortlehre. 3., überarbeitete Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Stimmelmayer, M. (2019): Verteilung von Alpenhumus entlang von bewaldeten Berggraten der Chiemgauer Alpen. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- van Husen, D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Veit, H. (2002): Die Alpen. Geoökologie und Landschaftsentwicklung. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB, 2327: Geowissenschaften, Ökologie, Biologie).
- Wagner, L. (2018): Landschaftliche und kleinräumige Verteilung von Tangelhumus in den Bergwäldern der Chiemgauer Alpen. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Walentowski, H.; Gulder, H. J.; Kölling, C.; Ewald, J.; Türk, W. (2001): Die regionale natürliche Waldzusammensetzung Bayerns: Bayer. Landesanst. für Wald u. Forstwirtschaft (*Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft*, 32).
- Wallner, A. M. E. (2021): Informationserfassung für ein forstliches Inventur- und Monitoring-System aus hochaufgelösten Fernerkundungsdaten – Ansätze zur Stratifizierung und räumlichen Kenngrößen-schätzung. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Weber, K. (1999): Vegetations- und Klimageschichte im Werdenfelser Land. In: *Augsburger geographische Hefte* Heft Nr. 13.

- West, P. W. (2015): *Tree and Forest Measurement*. 3rd ed. 2015. Cham: Springer (Springer eBook Collection Biomedical and Life Sciences).
- Wiesmeier, M.; Prietzel, J.; Barthold, F.; Spörlein, P.; Geuß, U.; Hangen, E. et al. (2013): Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria)-Implications for carbon sequestration. In: *Forest Ecology and Management* 295, S. 162–172. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.01.025.
- Wilnhammer, M.; Baier, R.; Göttlein, A. (2011): Standortsdegradation im Kalkalpin. In: *AFZ-Der Wald* 22, S. 13–15.
- Winther, J. L. & Friedman, W.E. (2008): Arbuscular mycorrhizal associations in Lycopodiaceae. In: *The New phytologist* 177 (3), S. 790–801. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2007.02276.x.
- Wood, S. N. (2017): *Generalized Additive Models. An Introduction with R*. Second Edition. Portland: CRC Press (Chapman & Hall / CRC Texts in Statistical Science).
- Zielonka, T. (2006): When does dead wood turn into a substrate for spruce replacement? In: *Journal of Vegetation Science* 17 (6), S. 739–746. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2006.tb02497.x.
- Zöttl, H. (1965a): Zur Entwicklung der Rendzinen in der subalpinen Stufe. I. Profilmorphologie. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 110 (2), S. 109–114. DOI: 10.1002/jpln.19651100204.
- Zöttl, H. (1965b): Zur Entwicklung der Rendzinen in der subalpinen Stufe. II. Chemisch-biologische Dynamik. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 110 (2), S. 115–126. DOI: 10.1002/jpln.19651100205.
- Zöttl, H. (1966): Kalkböden der Alpen. In: *Jahrbuch des Vereins zum Schutze der Alpenpflanzen und -Tiere* (31), S. 160–164.

Literaturverzeichnis der drei aufgeführten Publikationen

Arbeitskreis Standortkartierung, 2016. Forstliche Standortaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen, 7. Auflage ed. IHW-Verlag, Eching, Kr. Freising, p. 400.

Baier, R. (2015). Dynamik und ökologische Bedeutung der Humusaufgabe in kalkalpinen Wäldern. *Schriften des Nationalparks Gesäuse*, 12, 38–46.

Baier, R. (2006): Wurzelentwicklung, Ernährung, Mykorrhizierung und "positive Kleinstandorte" der Fichtenverjüngung (*Picea abies* [L.] Karst.) auf Schutzwaldstandorten der Bayerischen Kalkalpen. Dissertation. Technische Universität München, München. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt.

Baier, R.; Wilnhammer, M.; Göttlein, A. (2016): Ohne Humus geht's bergab. Alpenhumus ist ein bestimmender Faktor für die Vitalität der Bergwälder im Kalkalpin. In: *LWF aktuell* 23 (111), S. 42–45.

Baier, R. & Göttlein, A. (2006). Verjüngung der Fichte im naturnahen Bergmischwald und auf Schutzwald-Sanierungsflächen. *AFZ-Der Wald*, 15, 820–823.

Baier, R. & Göttlein, A. (2004). Böden der Kalkalpen – Entstehung, Eigenschaften und Bedeutung für die forstliche Praxis. *AFZ-Der Wald*, 9, 481–483.

Beck, J. & Kölling, C. (2013): Das bayerische Standortinformationssystem. Das neue Standortinformationssystem mit seinen zahlreichen Themenkarten ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Beratung der Waldbesitzer. In: *LWF aktuell* 94, S. 4–7.

Binder, F. & Höllerl, S., 2018. Schutzwaldsanierung – ein Beitrag zum Hochwasserschutz. *LWF-Wissen* 82, 50–58.

Bochter, R. (1984): Böden naturnaher Bergwaldstandorte auf carbonatreichen Substraten. In: *Nationalpark Berchtesgaden Forschungsbericht* 6.

Bochter, R.; Neuerburg, W.; Zech, W. (1981): Humus und Humusschwund im Gebirge. In: *Nationalpark Berchtesgaden Forschungsbericht* 2.

Borcard, D.; Gillet, F.; Legendre, P. (2011). *Numerical ecology with R*. New York, NY: Springer.

Bradley, R.; Burt, A. J.; Read, D. J. (1982). The biology of mycorrhiza in the Ericaceae. VIII. The role of mycorrhizal infection in heavy metal resistance. *New Phytologist*, 91(2), 197–209. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1982.tb03306.x.

Brang, P.; Schönenberger, W.; Ott, E., Gardner, B., 2001. Forests as Protection from Natural Hazards. In: Evans, J. (Ed.), *The forests handbook*. Blackwell Science, Oxford, Malden, MA, USA, pp. 53–81.

Braun-Blanquet, J. (1964): *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde*. 3. Aufl. Wien: Springer-Verlag.

Brosinger, F. & Rothe, A., 2003. Intakter Bergwald – unverzichtbar für den Hochwasserschutz. *Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* 40, 34–38.

Bürger-Arndt, R.; Ohse, B.; Meyer, K.; Höltermann, A., 2012. Ökosystemdienstleistungen von Wäldern: Workshopbericht Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm 16. - 19. November 2011. *BfN-Skripten*, Bonn-Bad Godesberg, 142 Seiten.

- Cairney, J. W. G. & Meharg, A. A. (2003). Ericoid mycorrhiza: A partnership that exploits harsh edaphic conditions. *European Journal of Soil Science*, 54(4), 735–740. DOI: 10.1046/j.1351-0754.2003.0555.x
- Carignan, V. & Villard, M.-A. (2002): Selecting Indicator Species to Monitor Ecological Integrity: A Review. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 78 (1), S. 45–61. DOI: 10.1023/A:1016136723584.
- Christophel, D.; Höllerl, S.; Prietzel, J.; Steffens, M. (2015): Long-term development of soil organic carbon and nitrogen stocks after shelterwood- and clear-cutting in a mountain forest in the Bavarian Limestone Alps. In: *European Journal of Forest Research* 134 (4), S. 623–640. DOI: 10.1007/s10342-015-0877-z.
- Christophel, D.; Spengler, S.; Schmidt, B.; Ewald, J.; Prietzel, J. (2013): Customary selective harvesting has considerably decreased organic carbon and nitrogen stocks in forest soils of the Bavarian Limestone Alps. In: *Forest Ecology and Management* 305, S. 167–176. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.054.
- De Cáceres, M.; Jansen, F. (2013): Studying the statistical relationship between species and groups of sites. In: Package ‘indicspecies’ version 1.7.6.
- De Cáceres, M.; Legendre, P.; Moretti, M. (2010). Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos*, 119(10), 1674– 1684. DOI:10.1111/j.1600-0706.2010.18334.x.
- Dengler, J.; Jansen, F.; Glöckler, F.; Peet, R. K.; Cáceres, M.; Chytrý, M. et al. (2011): The Global Index of Vegetation-Plot Databases (GIVD): a new resource for vegetation science. In: *Journal of Vegetation Science* 22 (4), S. 582–597. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2011.01265.x.
- Dormann, C. F.; Elith, J.; Bacher, S.; Buchmann, C.; Carl, G.; Carré, G. et al. (2013): Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. In: *Ecography* 36 (1), S. 27–46. DOI: 10.1111/J.1600-0587.2012.07348.X.
- Dufrêne, M. & Legendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* 67(3), 345–366. DOI: 10.2307/2963459.
- Eckelmann, W.; Sponagel, H.; Grottenthaler, W.; Hartmann, J.-K. (Hg.) (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung. verbesserte und erweiterte Auflage. 5. Aufl.* Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers.
- Eichrodt, R. (1969): Ueber die Bedeutung von Moderholz für die natürliche Verjüngung im subalpinen Fichtenwald. Dissertation. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich.
- Ellenberg, H. (2001). *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*, 3rd ed. Göttingen: Erich Goltze.
- ESRI Inc. (2020): ArcGIS software. Version 10.7.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Ewald, J. (2007): Ein pflanzensoziologisches Modell der Schattentoleranz von Baumarten in den Bayerischen Alpen. In: *Forum Geobotanicum* 3 (3), S. 11–19.
- Ewald, J. (2004): Ökologie der Weißtanne (*Abies alba* Mill.) im bayerischen Alpenraum. In: *Forum Geobotanicum* 1, S. 9–18.

- Ewald, J. (2000): Long-term impact of forest pasture on the understorey of mountain forests in the Tegernsee Alps (Bavaria). In: *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz* 9 (3), S. 161–170.
- Ewald, J. (1999). Relationships between floristic and micro site variability in coniferous forests of the Bavarian Alps. *Phytocoenologia*, 29(3), 327–344. DOI: 10.1127/phyto/29/1999/327.
- Ewald, J. (1998). Subalpine Fichtenwälder in den Bayerischen Alpen - ein standortkundlicher Überblick. *AFZ-Der Wald*, 8, 406–408.
- Ewald, J.; Göttlein, A.; Prietzel, J.; Kohlpaintner, M.; Reger, B.; Olleck, M. (2020): Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald - Synthese und Ausblick. In: *Forstliche Forschungsberichte*. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan (220), S. 5–19.
- Ewald, J. & Endres, U. (2015). Waldvegetation der Sassau im Walchensee: Vergleich von Naturwald und Wirtschaftswald, Insel und Halbinsel. *Tuexenia*, 35, 131–153. DOI: 10.14471/2015.35.014.
- Ewald, J. & Binner, S. (2007): Werkzeuge zur Bestimmung der Waldtypen im bayerischen Hochgebirge. In: *Waldökologie online* 5, S. 25–77.
- Fischer, H. S.; Michler, B.; Ewald, J. (2014). Environmental, Spatial and Structural Components in the Composition of Mountain Forest in the Bavarian Alps. *Folia Geobotanica*, 49(3), 361–384. DOI: 10.1007/s12224-013-9185-x.
- Foerst, K. & Kreutzer, K. (1977): Regionale natürliche Waldzusammensetzung und Forstliche Wuchsgebietsgliederung Bayerns. München.
- Freudenberger, W. & Schwerd, K. (1996). Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1: 500 000. München: Bayerisches Geologisches Landesamt.
- Gadgil, R. L. & Gadgil, P. D. (1971). Mycorrhiza and Litter Decomposition. *Nature*, 233, 133. DOI: 10.1038/233133a0.
- Gangkofner, R. & Göttlein, A. (2014): Wurzeln fliegen nicht! Merklicher Humusschwund im kalkalpinen Bergwald festgestellt. In: *AFZ-Der Wald* 5, S. 30–34.
- Goldstein, A.; Turner, W. R.; Spawn, S. A.; Anderson-Teixeira, K. J.; Cook-Patton, S.; Fargione, J. et al. (2020): Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. In: *Nature Climate Change* 10 (4), S. 287–295. DOI: 10.1038/s41558-020-0738-8.
- Göttlein, A.; Katzensteiner, K.; Rothe, A. (2014): Standortsicherung im Kalkalpin - SicALP. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt INTERREG BY/Ö J00183. Hg. v. Zentrum Wald-Forst-Holz Weihenstephan. Freising (*Forstliche Forschungsberichte München*, 212).
- Gračanin, Z. (1970): Nutzung und Schutz von Boden aus Carbonatgesteinen im Bereich der alpinen Waldgrenze. In: *Forstarchiv* 41, S. 169–173.
- Grime, J. P. (1979). *Plant strategies and vegetation processes*. Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- Haber, J. (1985): Beziehungen zwischen dem Humusgehalt/Humusvorrat bayerischer Bergwaldböden und steuernden Standorts- und Bestandsfaktoren. Dissertation. Universität Bayreuth, Bayreuth. Fakultät Biologie, Chemie und Geowissenschaften.

- Haselwandter, K. (1986). Mykorrhiza-Forschung unter besonderer Berücksichtigung alpiner Ökosysteme. *Berichte des naturwissenschaftlich-medizinischen Vereins in Innsbruck* (Band 73): 223–228.
- Haselwandter, K. & Read, D. J. (1980). Fungal associations of roots of dominant and sub-dominant plants in high-alpine vegetation systems with special reference to mycorrhiza. *Oecologia*, 45(1), 57–62.
- Hastie, T. J. & Tibshirani, R. J. (1990): Generalized additive models. London United Kingdom: Chapman & Hall/CRC.
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65–70.
- Hölzel, N. (1996): Schneeheide-Kiefernwälder in den mittleren Nördlichen Kalkalpen. Laufen: ANL (*Laufener Forschungsberichte*, 3).
- IUSS Working Group WRB (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO.
- Jansen, F. & Dengler, J. (2010). Plant names in vegetation databases - a neglected source of bias. *Journal of Vegetation Science*, 21(6), 1179– 1186. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2010.01209.x.
- Jansen, F. & Dengler, J. (2008). GermanSL – Eine universelle taxonomische Referenzliste für Vegetationsdatenbanken in Deutschland. *Tuexenia*, 28, 239–253.
- Joa, B. & Schraml, U. (2019): Die Bedeutung lokalen ökologischen Wissens für den Erhalt der Waldbiodiversität. In: Horst Korn und Harald Dünfelder (Hg.): Treffpunkt Biologische Vielfalt XVII - Interdisziplinärer Forschungsaustausch im Rahmen des Übereinkommens über die biologische Vielfalt: BfN-Skripten 527. Bundesamt für Naturschutz (BfN).
- Klotz, S.; Kühn, I.; Durka, W. (2002). BIOLFLOR - Eine Datenbank zu biologisch-ökologischen Merkmalen der Gefäßpflanzen in Deutschland. Schriftenreihe für Vegetationskunde (38).
- Kohlpaintner, M. & Göttlein, A. (2020): Nährstoff- und Wasserhaushalt des Systems "Alpenhumus" (Teilprojekt Makroskala). In: Forstliche Forschungsberichte. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan (220), 61–100.
- Kohlpaintner, M.; Huber, C.; Göttlein, A. (2014): Wiederbewaldung und Stoffhaushalt auf Windwurf Flächen im Kalkalpin. Ergebnisse von den SicAlp Untersuchungsflächen im Lattengebirge. In: *LWF aktuell* (99), S. 34–37.
- Kohlpaintner, M. & Göttlein, A. (2009). Mit dem Wald verschwindet auch der Humus. Großflächige Störungen in Hochgebirgswäldern führen zu Nährstoffverlusten und beeinträchtigen langfristig die Waldentwicklung. *LWF Aktuell*, 16(71), 22–24.
- Kolb, E. & Kohlpaintner, M. (2018). Tangel humus forms – genesis and co-evolution with vegetation. *Applied Soil Ecology*, 123, 622–626. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.09.040.
- Kolb, E. (2012). Interaktive Karte der Gesteinseigenschaften. Eine neue Substratgliederung bringt schnelle Übersicht und viele Informationen über die Böden der Bayerischen Alpen. *LWF aktuell* (87/12): 15–17.
- Kolb, E. & Baier, R. (2001): Tangel–die wenig bekannte Humusform. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hg.): Exkursionsführer zur Jahrestagung der

- Arbeitsgemeinschaft Forstliche Standorts- und Vegetationskunde (AFSV) im Werdenfeller Land. Grainau, 19.–22.09.2001, S. 20–24.
- Kubiëna, W. L. (1953). Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas. Stuttgart, Germany: Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Kubiëna, W. L. (1948). Entwicklungslehre des Bodens. Wien: Springer.
- Kupferschmid, A. D.; Brang, P.; Bugmann, H. (2004). Wie gut schützen Totholzbestände vor Naturgefahren? Schutzwirkung von Gebirgsfichtenwäldern nach Buchdruckerbefall. *Wald und Holz*, 85(1), 33–36.
- Kupferschmid, A.; Brang, P.; Schönenberger, W.; Bugmann, H. (2003): Decay of *Picea abies* snag stands on steep mountain slopes. In: *Forestry Chronicle* 79 (2), S. 247–252. DOI: 10.5558/tfc79247-2.
- Laatsch, W. (1977). Zur Struktur und Bewirtschaftung der Wälder im bayerischen Alpenraum. Die Entstehung von Lawinenbahnen im Hochlagenwald. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 96(1), 89–93.
- Laatsch, W. & Grottenthaler, W. (1973): Labilität und Sanierung der Hänge in der Alpenregion des Landkreises Miesbach. mit einer Karte der Hanglabilitätsformen und-stufen im Maßstab 1: 25000. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- Laatsch, W. (1971): Bodenschutz im Bergwald des bayerischen Alpengebietes. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 90 (1), S. 159–174. DOI: 10.1007/BF02753248.
- Landtag, B., 2005. Bekanntmachung der Neufassung des Waldgesetzes für Bayern (Bay-WaldG):. GVBl. S. 313, BayRS 7902-1-L. Gesetz- und Verordnungsblatt 15, 313–326.
- Legendre, P. (1990). Quantitative Methods and Biogeographic Analysis. In D. J. Garbary, & G. R. South (Eds.), *Evolutionary biogeography of the marine algae of the north atlantic* (pp. 9–34). Berlin: Springer-Verlag.
- Leiningen, W. v. (1912): Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. In: *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft* (10), S. 465–486.
- Leiningen, W. v. (1909): Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. 2. Abschnitt. In: *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft* (5), S. 8–32.
- Leiningen, W. v. (1908): Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. 1. Abschnitt. In: *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft* (11), S. 35–44.
- Lepš, J. & Šmilauer, P. (2003). *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Leuschner, C. & Ellenberg, H. (Eds.) (2017). *Ecology of central European forests. Revised and extended version of the 6th German edition. Vegetation ecology of central Europe, Volume, Vol. 1*. Cham: Springer International Publishing.
- Liss, B.-M. (1988): Der Einfluß von Weidevieh und Wild auf die natürliche und künstliche Verjüngung im Bergmischwald der ostbayerischen Alpen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 107 (1), S. 14–25. DOI: 10.1007/BF02742169.
- Mangiafico, S. (2019). rcompanion: Functions to Support Extension Education Program Evaluation. Version 2.1.1. rcompanion: Functions to Support Extension Education Program Evaluation. Version 2.1.1. Retrieved from: <https://CRAN.R-project.org/package=rcompanion>

- Mayer, M.; Matthews, B.; Schindlbacher, A.; Katzensteiner, K. (2014). Soil CO₂ efflux from mountainous windthrow areas: Dynamics over 12 years post-disturbance. *Biogeosciences*, 11(21), 6081–6093. DOI : 10.5194/bg-11-6081-2014.
- McCune, B. & Mefford, M. J. (2016). PC-ORD: multivariate analysis of ecological data; Version 7.05. Gleneden Beach, OR, USA: MjM software design.
- McFee, W. W. & Stone, E. L. (1966). The persistence of decaying wood in the humus layers of northern forests. *Soil Science Society of America Journal*, 30(4), 513–516.
- McGeoch, M. A. & Chown, S. L. (1998). Scaling up the value of bioindicators. *Trends in Ecology & Evolution*, 13(2), 46–47. DOI: 10.1016/S0169-5347(97)01279-2.
- Meister, Georg (1969): Ziele und Ergebnisse forstlicher Planung im oberbayerischen Hochgebirge. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88 (1), S. 97–130. DOI: 10.1007/BF02741767.
- Mellert, K. H. & Ewald, J. (2014a): Nutrient limitation and site-related growth potential of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) in the Bavarian Alps. In: *European Journal of Forest Research* 133 (3), S. 433–451. DOI: 10.1007/s10342-013-0775-1.
- Mellert, K. H. & Ewald, J. (2014b): Regionalizing nutrient values of vegetation to assess site fertility of mountain forests in the Bavarian Alps. In: *Folia Geobotanica* 49 (3), S. 407–423. DOI: 10.1007/s12224-013-9167-z.
- Mellert, K. H. & Ewald, J. (2011). Wie viel Biomassenutzung verträgt der Bergwald. Empfindlichkeit von Wäldern gegenüber Biomassenutzung. *AFZ-Der Wald*, 24(24/2011), 19–21.
- Michiels, H.-G. (1993): Die Stellung einiger Baum- und Straucharten in der Struktur und Dynamik der Vegetation im Bereich der hochmontanen und subalpinen Waldstufe der Bayerischen Kalkalpen. In: *Forstliche Forschungsberichte München* (135).
- Millennium Ecosystem Assessment (2005): *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, D.C.
- Oksanen, J.; Blanchet, F. G.; Friendly, M.; Kindt, R.; Legendre, P.; McGlinn, D. et al. (2018). *vegan: Community Ecology Package*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Olleck, M.; Kohlpaintner, M.; Mellert, K. H.; Reger, B.; Göttlein, A.; Ewald, J. (2021): Thick forest floors in the Calcareous Alps - Distribution, ecological functions and carbon storage potential. In: *CATENA* (207).
- Olleck, M.; Reger, B.; Ewald, J. (2020): Verbreitung und Vorkommen von Alpenhumus - Regionalisierung auf Landschaftsebene (Teilprojekt Makroskala). In: *Forstliche Forschungsberichte*. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan (220), S. 21–60.
- Olleck, M.; Reger, B.; Ewald, J. (2019): Plant indicators for Follic Histosols in mountain forests of the Calcareous Alps. In: *Applied Vegetation Science* 23 (2), S. 285–296. DOI: 10.1111/avsc.12470.
- Ott, E.; Frehner, M.; Frey, H.-U.; Lüscher, P. (1997): *Gebirgsnadelwälder. Praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung*. Bern: Haupt.

- Prietzl, J. & Wiesmeier, M. (2019): A concept to optimize the accuracy of soil surface area and SOC stock quantification in mountainous landscapes. In: *Geoderma* 356, S. 113922. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113922.
- Prietzl, J.; Zimmermann, L.; Schubert, A.; Christophel, D. (2016). Organic matter losses in German Alps forest soils since the 1970s most likely caused by warming. *Nature Geoscience*, 9(7), 543–548. DOI: 10.1038/ngeo2732.
- Prietzl, J. & Christophel, D. (2014). Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps. *Geoderma*, 221–222, 28–39. 10.1016/j.geoderma.2014.01.021
- Prietzl, J. & Christophel, D. (2013). Humusschwund in Waldböden der Alpen. Die vermutliche Auswirkung des Klimawandels ist eine große Herausforderung für die nachhaltige Forstwirtschaft. *LWF Aktuell*, 20(97), 44–47.
- Prietzl, J. (2010): Schutzwälder der Nördlichen Kalkalpen: Verjüngung, Mikroklima, Schneedecke und Schalenwild. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 161 (1), S. 12–22. DOI: 10.3188/szf.2010.0012.
- Prietzl, J. & Ammer, C. (2008): Montane Bergmischwälder der Bayerischen Kalkalpen: Reduktion der Schalenwildichte steigert nicht nur den Verjüngungserfolg, sondern auch die Bodenfruchtbarkeit. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* (179), S. 105–113.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Core Team.
- Read, D. J. & Perez-Moreno, J. (2003). Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems - a journey towards relevance? *New Phytologist*, 157(3), 475–492. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00704.x.
- Reger, B.; Göttlein, A.; Katzensteiner, K.; Ewald, J. (2015): Assessing the Sensitivity of Mountain Forests to Site Degradation in the Northern Limestone Alps, Europe. In: *Mountain Research and Development* 35 (2), S. 139–151. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00094.1.
- Reger, B.; Häring, T.; Ewald, J. (2014). The TRM Model of Potential Natural Vegetation in Mountain Forests. *Folia Geobotanica*, 49(3), 337–359. DOI: 10.1007/s12224-013-9158-0.
- Reger, B.; Schüpferling, R.; Beck, J.; Dietz, E.; Morovitz, D.; Schaller, R.; et al. (2012). WINALPecobase – ecological database of mountain forests in the Bavarian Alps. In: *Biodiversity & Ecology*, 4, 167–171.
- Reger, B. & Ewald, J. (2012): Die Waldtypenkarte »Bayerische Alpen«. Eine neue Planungsgrundlage für die forstliche Praxis. In: *LWF aktuell* (87), S. 11–14.
- Reger, B.; Kölling, C.; Ewald, J. (2011). Modelling effective thermal climate for mountain forests in the Bavarian Alps: Which is the best model? *Journal of Vegetation Science*, 22(4), 677–687. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2011.01270.x.
- Roßkopf, N.; Fell, H.; Zeitz, J. (2015): Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. In: *CATENA* 133, S. 157–170. DOI: 10.1016/j.catena.2015.05.004.
- Schirpke, U.; Leitinger, G.; Tasser, E.; Schermer, M.; Steinbacher, M.; Tappeiner, U. (2013): Multiple ecosystem services of a changing Alpine landscape: past, present and future. In: *International journal of biodiversity science, ecosystem services & management* 9 (2), S. 123–135. DOI: 10.1080/21513732.2012.751936.

- Schmidt, Björn (2010): Humusausstattungen von Gebirgswäldern der bayerischen Kalkalpen mit unterschiedlicher Nutzungsgeschichte. Diplomarbeit. Fachhochschule Weihenstephan, Freising. Fakultät Wald und Forstwirtschaft.
- Schmidt, M.; Kriebitzsch, W.-U.; Ewald, J. (2011). Waldartenlisten der Farn- und Blütenpflanzen, Moose und Flechten Deutschlands. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN).
- Schnell, A. & Bauer, A. (2005). Die zweite Bundeswaldinventur 2002: Ergebnisse für Bayern. *LWF-Wissen* (49).
- Sendtner, O. (1854). Die Vegetations-Verhältnisse Südbayerns: Nach den Grundsätzen der Pflanzengeographie und mit Bezugnahme auf Landescultur. München: Literarisch-Artistische Anstalt.
- Simbeck, C. & Faißt, G. (2010): Bayerisches Wald-Informationssystem: Projektstand und nächste Schritte. Ausschreibung des ersten Entwicklungspakets »BayWIS 1.0« in diesem Jahr. In: *LWF aktuell* 17 (77), S. 50–51.
- Standortskartierung, A. (2016). Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching, Kr Freising: IHW-Verlag.
- StMELF 2020: StMELF - Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, WALDFÖPR 2020, vom Az. F2-7752.1-1/234. In: Richtlinie für Zuwendungen zu waldbaulichen Maßnahmen im Rahmen eines forstlichen Förderprogramms.
- ter Braak, C. J. F. (1988). Partial canonical correspondence analysis. In H. H. Bock (Ed.), *Classification and related methods of data analysis* (pp. 551–558). Amsterdam: North Holland Press.
- Thiele, K. (1978). Vegetationskundliche und pflanzenökologische Untersuchungen im Wimbachgries, 1st ed. München: Oldenbourg.
- van Husen, D. (1987). Die Ostalpen in den Eiszeiten. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Veit, H. (2002): Die Alpen. Geoökologie und Landschaftsentwicklung. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB, 2327 : Geowissenschaften, Ökologie, Biologie).
- Walentowski, H.; Ewald, J.; Fischer, A.; Kölling, C.; Türk, W. (2006). Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns. Ein auf geobotanischer Grundlage entwickelter Leitfaden für die Praxis in Forstwirtschaft und Naturschutz, 2nd ed. Freising: Verlag Geobotanica.
- Weber, K. (1999). Vegetations- und Klimageschichte im Werdenfelser Land. *Augsburger geographische Hefte*, Heft Nr. 13.
- Wiesmeier, M.; Prietzel, J.; Barthold, F.; Spörlein, P.; Geuß, U.; Hangen, E. et al. (2013): Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria)-Implications for carbon sequestration. In: *Forest Ecology and Management* 295, S. 162–172. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.01.025.
- Wiesmeier, M.; Spörlein, P.; Geuß, U.; Hangen, E.; Haug, S.; Reischl, A. et al. (2012): Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. In: *Global change biology* 18 (7), S. 2233–2245. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02699.x.
- Wilnhammer, M.; Baier, R.; Göttlein, A. (2011): Standortdegradation im Kalkalpin. In: *AFZ-Der Wald* 22, S. 13–15.

- Winther, J. L. & Friedman, W. E. (2008). Arbuscular mycorrhizal associations in Lycopodiaceae. *The New Phytologist*, 177(3), 790–801. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2007.02276.x.
- Wisskirchen, R. & Haeupler, H. (1998). Standardliste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands. Stuttgart: Ulmer.
- Wood, S. N. (2017): Generalized Additive Models. An Introduction with R. Second Edition. Portland: CRC Press (Chapman & Hall / CRC Texts in Statistical Science).
- Zanella, A.; Ponge, J.-F.; Jabiol, B.; Sartori, G.; Kolb, E.; Gobat, J.-M. et al. (2017): Humusica 1, article 4: Terrestrial humus systems and forms—Specific terms and diagnostic horizons. In: *Applied Soil Ecology*, 122,75-86. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.07.005.
- Zanella, A.; Jabiol, B.; Ponge, J.-F. ; Sartori, G. ; de Waal, R. ; van Delft, B. ; Langohr, R. (2011). *European Humus Forms Reference Base*.
- Zimmermann, L.; Rötzer, T.; Hera, U.; Maier, H.; Schulz, C.; Kölling, C. (2007). Konzept für die Erstellung neuer hochaufgelöster Klimakarten für die Wälder Bayerns als Bestandteil eines forstlichen Standortinformationssystems. In A. Matzarakis, & H. Mayer (Eds.) Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg (6(16), pp. 152–159).
- Zöttl, H. (1965a): Zur Entwicklung der Rendzinen in der subalpinen Stufe. I. Profilmorphologie. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 110 (2), S. 109–114. DOI: 10.1002/jpln.19651100204.
- Zöttl, H. (1965b): Zur Entwicklung der Rendzinen in der subalpinen Stufe. II. Chemisch-biologische Dynamik. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 110 (2), S. 115–126. DOI: 10.1002/jpln.19651100205.