

**FORSTLICHE SCHRIFTENREIHE  
UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR, WIEN**

**Band 21**

**Klaus Katzensteiner, Jörg Ewald und Axel Göttlein (Hrsg.)**

**WÄLDER DER KALKALPEN –  
STRATEGIEN FÜR DIE ZUKUNFT**

**StratAlp**

**FORESTS OF THE CALCAREOUS ALPS –  
STRATEGIES FOR THE FUTURE**

**StratAlp**

**ÖSTERR. GES. F. WALDÖKOSYSTEMFORSCHUNG  
UND EXPERIMENTELLE BAUMFORSCHUNG  
UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR**

**JUNI 2016**

## II

Prof. Dr. Klaus Katzensteiner  
Universität für Bodenkultur  
Institut für Waldökologie  
Department für Wald- und Bodenwissenschaften  
A-1190 Wien

Prof. Dr. Jörg Ewald  
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf  
Fakultät Wald und Forstwirtschaft  
D-85354 Freising

Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein  
Technische Universität München  
Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt  
D-85354 Freising

ISBN 978-3-900865-20-5  
Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien

© 2016 Österreichische Gesellschaft für Waldökosystemforschung und Experimentelle  
Baumforschung an der Univ. f. Bodenkultur Wien

*Schriftleitung:* Prof. Dr. Herbert Hager

*Bearbeiterin:* Mag. Judith Schaufler

**Katzensteiner, K., Ewald, J., Göttlein, A. (Hrsg.); 2016: Wälder der Kalkalpen – Strategien für die Zukunft (StratAlp).**

Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur, Wien; Bd. 21, 125 S.; Hrsg.: Österreichische Gesellschaft für Waldökosystemforschung und Experimentelle Baumforschung an der Univ. f. Bodenkultur, ISBN 978-3-900865-20-5

**Kurzfassung:** Die Wälder der Nördlichen Kalkalpen sind aufgrund ihrer Nutzungsgeschichte auf bedeutenden Flächen nicht in der Lage ihre Funktionen optimal zu erfüllen. Überalterung ohne ausreichende Verjüngung und vielfach nicht standortgerechte Baumartenzusammensetzung erhöhen ihre Anfälligkeit gegenüber großflächigen Störungen. Darüber hinaus werden mit der Klimaänderung große Verschiebungen der Wuchsbedingungen für die Bergwälder erwartet. Die Bewirtschaftung von Gebirgswäldern muss dementsprechend nicht nur an die heutigen, sondern auch an zukünftigen Wuchsbedingungen und Naturgefahren angepasst werden. Im Rahmen des Interreg-Projekts StratAlp wurden Methoden zur flächigen Ableitung von Bodeninformationen und im weiteren zur Evaluierung der Vulnerabilität der Böden gegenüber Störungen und Biomasseentzügen auf Basis vorhandener punktueller Bodendaten, flächig verfügbarer geologischer Karten, Geländemodelle und Waldtypenkarten entwickelt. Der Waldzustand bzw. die Verjüngungsnotwendigkeit wurde für Beispielregionen über Strukturparameter, welche aus Laserscan-Flügen zur Verfügung standen, abgeleitet. Aus Verschneidung dieser Informationen ergibt sich der Handlungsbedarf für forstliche Eingriffe. Besonderes Augenmerk wurde auf die Nährstoffnachhaltigkeit der Bewirtschaftung gelegt. Für die dominierenden Baumarten wurde der Einfluss von Standortseigenschaften auf die Bonität ermittelt, wobei das Substrat (und damit die Nährstoffversorgung) einen wesentlichen Einfluss zeigt. Für die Hauptbaumarten Fichte und Buche wurden für dominierende Substratgruppen durchschnittliche Nährelementgehalte der Baumkompartimente ermittelt. In Fallbeispielen wurden Nährstoffvorräte in Biomasse und Boden untersucht und Überlegungen zu Nährstoffentzügen bei unterschiedlichen Nutzungsintensitäten angestellt. In weiteren Detailstudien wurden der Einfluss von Vorausverjüngung und der Effekt von Femelhieben auf Humusdynamik, Bodenklima und Wasser- und Kohlenstoffhaushalt quantifiziert. Pflanzenphysiologische Untersuchungen zeigen die unterschiedliche Trockenstresstoleranz von Fichten-, Lärchen-, Bergahorn- und Buchenverjüngung auf unterschiedlichen Substraten und die hohe Bedeutung der Kaliumversorgung für die Photosynthese. Die Überlegenheit der Naturverjüngung gegenüber Kunstverjüngung bezüglich Wachstum und Ernährung konnte eindrücklich nachgewiesen werden. Des Weiteren konnte am Beispiel von Bergahorn gezeigt werden, dass einzelne Überhälter als Samenbäume wesentlich zur Verjüngung von Störungsflächen beitragen können.

**STICHWÖRTER:** Waldbewirtschaftung, Nachhaltigkeit, Vulnerabilität, Bodendegradation, Humusdynamik, Waldernährung, Verjüngung

**Katzensteiner, K., Ewald, J., Göttlein, A. (Eds.); 2016: Forests of the Calcareous Alps – Strategies for the Future (StratAlp).**

Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur, Wien; Vol. 21, 125 p.; Published by the Austrian Society for Forest Ecosystem Research and Experimental Tree Research at the University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna, ISBN 978-3-900865-20-5

**Abstract:** Ecosystem services from protective forests of the Northern Calcareous Alps are partially at risk. Due to historical land use and recent omission of management interventions stands are in many cases monospecific, overmature and lack regeneration. Thus their resilience to coarse scale disturbance and changing climatic conditions is low. Sustainable management has therefore to be adapted to future site conditions. Within the frame of the Interreg project StratAlp, methods for a vulnerability assessment of forest soils to disturbances like windthrow or biomass extraction have been developed. Spatial upscaling algorithms for soil information have been derived based upon point data from representative profiles, available areal data on geology and forest types and digital terrain models. Forest condition and regeneration status have been evaluated for test regions from stand structure parameters, which were derived from airborne laser scan data. The combination of this information is the basis for a risk assessment. Considering limited availability of financial resources for such interventions in protected forests, these can be targeted to areas where highest efficiency can be expected. Particular attention has been given to nutritional sustainability of forest management. The effect of site properties upon site index has been evaluated for dominating tree species. It could be shown that bedrock material for soil formation (and thus nutrient availability) is a major factor for tree growth. Average nutrient contents of tree compartments of beech and spruce have been analysed for major substrate groups. Nutrient stocks in tree compartments and soil have been analysed for selected sites. This data was used for the calculation of nutrient budgets of different harvesting intensities. Further investigations documented the ecological effect of pre-regeneration and gap formation on humus dynamics, soil climate, water household, and carbon budget. Performance and stress-tolerance of tree regeneration has been investigated and confirmed a strong interaction of gas exchange and nutrition. With respect to nutrition and growth natural regeneration was superior to artificial regeneration. For Sycamore maple it also could be shown that single standards (left over trees) can contribute substantially to regeneration of disturbed forest sites.

**KEYWORDS:** forest management, sustainability, vulnerability assessment, soil degradation, humus dynamics, forest nutrition, regeneration



## VORWORT UND DANKSAGUNG



### StratAlp: Wälder der Kalkalpen - Strategien für die Zukunft

**Leadpartner:** Ao. Univ.Prof. DI Dr. Klaus Katzensteiner, Institut Für Waldökologie, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich (BOKU)

**Projektpartner:** Prof. Dr.Dr. Axel Göttlein, Fachgebiet Waldernährung und Wasserhaushalt, TU München, Freising, Deutschland (TUM)  
 Prof. Dr. Jörg Ewald, Botanik und Vegetationskunde, Fakultät Wald und Forstwirtschaft, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising, Deutschland (HSWT)

#### Ausgangslage:

Die Wälder der Nördlichen Kalkalpen sind aufgrund ihrer Nutzungsgeschichte auf bedeutenden Flächen nicht mehr in der Lage ihre vielfältigen Funktionen optimal zu erfüllen. Überalterung ohne ausreichende Verjüngung und eine oft nicht standortgerechte Baumartenzusammensetzung machen die heutigen Bergwälder („Realwald“) anfällig gegenüber Störungen. Darüber hinaus werden mit der Klimaänderung große Verschiebungen der Wuchsbedingungen gerade für die Bergwälder erwartet. Die Bewirtschaftung von Gebirgswäldern muss dementsprechend nicht nur an die heutigen, sondern auch an zukünftige Wuchsbedingungen und Naturgefahren angepasst werden. Im Rahmen des Interreg-Projekts WINALP (2008-2011) wurden der Forstwirtschaft Flächeninformationen über Substrateigenschaften, potentielle Waldtypen („Idealwald“) sowie standortspezifische Wuchsleistungen und Klimarisiken bereitgestellt. Der Fokus des Interreg-Projekts SicALP (2010-2012) galt den durch Borkenkäferbefall und Sturmwurf erzeugten Katastrophenflächen in den Nördlichen Kalkalpen und den Möglichkeiten auf diesen „Kalamitätsflächen“ standortssichernde Maßnahmen durchzuführen. Für die Forstpraxis ist die Wiederherstellung und vorausschauende Sicherung der Waldfunktionen in überalterten und strukturverarmten Beständen des Realwaldes eine vordringliche Aufgabe (Projekt StratAlp 2013-2014). Ziel ist der Erhalt und die Ausschöpfung des Standortpotentials über strukturreiche

Bestände mit einer Baumartenzusammensetzung, die eine Flexibilität der Bewirtschaftung im Hinblick auf Standortserhalt und Klimaänderungen erlaubt. Mit dem Projekt StratAlp, dessen Ergebnisse in diesem Band der Forstlichen Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur Wien dargestellt werden, wird versucht fachliche Grundlagen zur Erreichung dieses Zieles beizutragen.

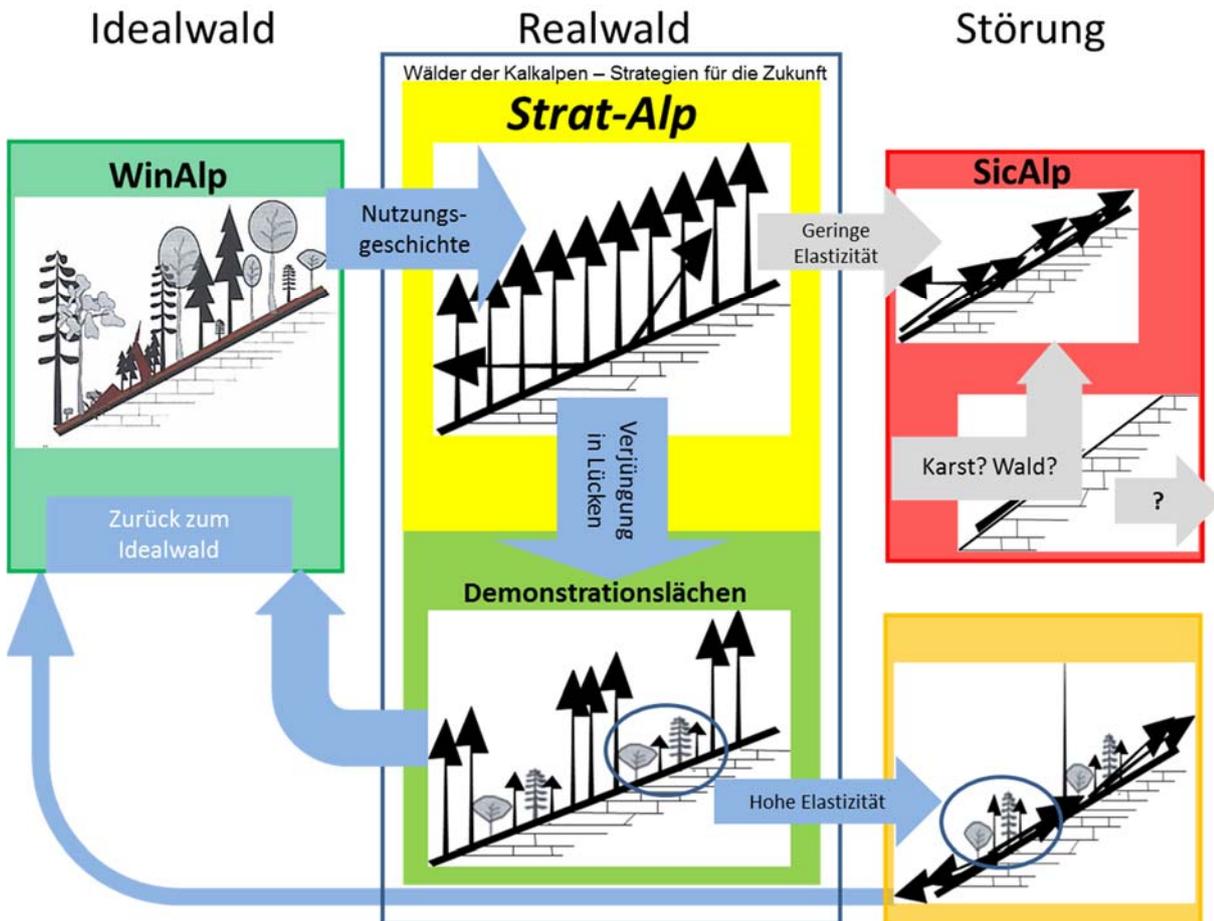


Abbildung 1: Projektziel von StratAlp: Strategien zur vorausschauenden Stabilisierung der Wälder in den Nördlichen Kalkalpen.

### Projektkonzept zur Sicherung der Standortpotenziale und Waldfunktionen in Wäldern der Nördlichen Kalkalpen:

Aufbauend auf vorhandenen Datengrundlagen (u.a. Flächen- und Prozessinformationen der Vorgängerprojekte) wurden Methoden zur Bewertung von Waldstandorten hinsichtlich ihrer Funktionen (Wasserspeicherung, Nährstoffverfügbarkeit) und ihrer Empfindlichkeit auf Standortdegradation bei Störungen (Anfälligkeit für Humusverlust, Erosion, Verlust von Nährstoffkapital und Wasserspeicherfähigkeit der Böden, auch durch unsachgemäße Nutzung) erarbeitet. Für ausgewählte Beispielgebiete in Oberösterreich, Salzburg, Tirol und Bayern wurden diese Standortinformationen mit Bestandesinformationen verschnitten um den forstlichen

Handlungsbedarf sowie dessen Dringlichkeit zu bewerten. Bei beschränkter Ressourcenverfügbarkeit können so die Mittel gezielt dort verwendet werden wo sie die größte Wirkung entfalten. Um der Forstpraxis eine standortsbezogene Basis für die Beurteilung von Nährstoffezügen bei Nutzung unterschiedlicher Biomassenkompartimente zu geben, wurden für die dominierenden Substratklassen und Baumarten Nährstoffkonzentrationen und deren Verteilung in Biomasse und Boden ermittelt und Entzugsberechnungen durchgeführt. Der kurz-, mittel- und langfristige ökologische Nutzen von Vorausverjüngung für Wald- und Bodenfunktionen wurde für Demonstrationsflächen dokumentiert und die Stresstoleranz der Verjüngung untersucht. Darüber hinaus wurde der unmittelbare Effekt von Femelhieben zur Verjüngungseinleitung auf Humusdynamik, Bodenklima und Wasserhaushalt untersucht.

Die Projektergebnisse werden in Form von abgeschlossenen Einzelbeiträgen von Autorenkollektiven in dem vorliegenden Band dargestellt.

#### **Projektfinanzierung und -unterstützung:**

Das Projekt wurde von der Europäischen Union im Rahmen des INTERREG Programmes aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.



**EUROPÄISCHE UNION**  
Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung

Die nationale Kofinanzierung erfolgte durch

#### **Österreich:**



**LAND  
SALZBURG**



#### **Deutschland:**



Bayerisches Staatsministerium für  
Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

## VIII

Über die finanzielle Unterstützung hinaus haben die MitarbeiterInnen dieser Organisationen durch ihre fachlichen Kommentare und ihre Diskussionsbereitschaft wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Die Mitglieder des Projektbeirats haben die Ausrichtung der Forschungsarbeiten wesentlich mitgestaltet. Ohne die zusätzliche Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Luftbildmaterial, Karten und Daten durch die Waldbesitzer und Behörden wären viele der flächenbezogenen Aussagen nicht möglich gewesen. Von den Waldeigentümern wurden Versuchsflächen zur Verfügung gestellt und die Freilandarbeiten begleitet. Die Heimatinstitutionen der Projektpartner (BOKU, TUM, HSWT) haben das Projekt über die Bereitstellung von Infrastruktur und Hilfe bei der rechnungstechnischen Projektabwicklung ermöglicht.

Als Projektleiter möchten wir uns bei den Geldgebern und allen Institutionen und Personen, die zum Gelingen des Projektes beigetragen haben, insbesondere den Projektbearbeitern, recht herzlich bedanken! Wir hoffen, dass der nun in Buchform vorliegende Abschlussbericht Anregungen zur vorausschauenden Planung der Waldbewirtschaftung auf den sehr sensitiven Standorten der Nördlichen Kalkalpen bietet und somit zur nachhaltigen Sicherung bzw. Wiederherstellung der Ökosystemleistungen unserer Wälder beiträgt.

Wien und Freising, Juni 2016

*K. Katzensteiner, J. Ewald, A. Göttlein*

## INHALT

### **KOLB E. und GÖTTLEIN A.**

Nährstoffnachhaltige Bewirtschaftung – Nutzung von Geoinformation zur Identifikation kritischer Waldstandorte <i>Nutrient-sustainable management – Use of geoinformation for identifying critical forest locations</i> .....	1
--	---

### **REGER B., GÖTTLEIN A., KATZENSTEINER K. und EWALD J.**

Risikoabschätzung für Standortsdegradation <i>Vulnerability assessment for site degradation</i> .....	9
--	---

### **MAYER M., MATTHEWS B. und KATZENSTEINER K.**

Humusdynamik auf Waldstandorten in den Nördlichen Kalkalpen <i>Humus dynamics at forest sites of the Northern Calcareous Alps</i> .....	39
--	----

### **PRÖLL G., KOHLPAINTNER M., GÖTTLEIN A. und KATZENSTEINER K.**

Untersuchungen zur Verjüngung im Bergwald der Nördlichen Kalkalpen <i>Studies on tree regeneration in mountain forests of the Northern Calcareous Alps</i> .....	61
---	----

### **WEIS W. und GÖTTLEIN A.**

Bewirtschaftungsmöglichkeiten zur Sicherung einer nachhaltigen Waldwirtschaft vor dem Hintergrund der Nährstoffversorgung kalkalpiner Standorte <i>Sustainable forest management based on the nutrient availability in the Northern Calcareous Alps</i> .....	97
---	----



# **NÄHRSTOFFNACHHALTIGE BEWIRTSCHAFTUNG – NUTZUNG VON GEOINFORMATION ZUR IDENTIFIKATION KRITISCHER WALDSTANDORTE**

## *NUTRIENT-SUSTAINABLE MANAGEMENT – USE OF GEOINFORMATION FOR IDENTIFYING CRITICAL FOREST LOCATIONS*

**Eckart KOLB, Axel GÖTTLEIN**

Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, Technische Universität München,  
D-85354 Freising

### **SUMMARY**

Within the scope of WINALP a substrate map which is derived from the stand quality interpretation of geologic maps was developed. Thus the rock qualities respectively their potential soil and stand site development are evaluated. The classification deliberately reduces to few, however, important characteristics: Substrate genesis, substrate chemistry and substrate physics. These three characteristics stand in no hierarchical dependence, as it is usual for a lot of soil and stand site classifications. Hence, queries can be structured very simply. Thus a cross-border presentation is possible, even though geologic maps are country specific. In a following step these substrate units were assessed for their sensitivity to nutrient removal. The substrate types were assigned to typical soil types especially in terms of pedogenetic soil development and divided into three sensitivity classes. For higher resolved information this map of substrate types can be intersected with other GIS informations as is explained in an example.

**KEYWORDS:** substrate map, stand site characteristics, sensitivity to nutrient removal

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Im Rahmen von WINALP wurde eine Substratkarte entwickelt, die sich aus der standortkundlichen Interpretation geologischer Karten ableitet. Hierbei werden die Gesteinseigenschaften bzw. ihr Boden- und Standortentwicklungspotential beurteilt. Die Klassifizierung reduziert bewusst auf wenige aber wichtige Kenngrößen: Substratgenese, Substratchemie und Substratphysik. Die drei Kenngrößen stehen in keiner hierarchischen Abhängigkeit, wie sonst bei vielen boden- und standortkundlichen Klassifikationen. Daher können Abfragen sehr einfach strukturiert werden. Hierdurch ist trotz länderspezifischer geologischer Karten eine länderübergreifende Darstellung möglich. In einem weiteren Schritt wurden die Substrateinheiten auf ihre Empfindlichkeit bezüglich Nährstoffentzügen bewertet. Den Substrattypen wurden charakteristische Bodentypen v.a. im Sinne von Entwicklungsreihen zugeordnet und diese anschließend in drei Empfindlichkeitsklassen unterteilt. Für flächig höher aufgelöste Informationen kann die Substrattypenkarte mit weiteren GIS-Informationen verschnitten werden, wie an einem Beispiel ausgeführt wird.

**STICHWÖRTER:** Substratkarte, Standortseigenschaften, Empfindlichkeit für Nährstoffentzüge

Im Rahmen von WINALP wurde eine Substratkarte entwickelt, die sich aus der standortkundlichen Interpretation geologischer Karten ableitet (Kolb 2011, 2012). Hierbei werden die Gesteinseigenschaften bzw. ihr Boden- und Standortentwicklungspotential beurteilt. Die Klassifizierung reduziert bewusst auf wenige aber wichtige Kenngrößen. Die erste Kenngröße, als „Genese“ bezeichnet, unterscheidet zwischen Festgesteinen und Lockergesteinen und bei letzteren die Art der Sortierung. Die zweite Kenngröße, als „Substratchemie“ bezeichnet, differenziert die Gesteine nach ihrem Carbonatgehalt. Unter den hochprozentigen Carbonatgesteinen (> 65 %) wird außerdem zwischen Kalken und Dolomiten unterschieden. Unter den Gesteinen mit geringen Carbonatgehalten (< 10 %) wird nach dem Basenreichtum der beteiligten Silikate differenziert. Durch die dritte Kenngröße, als „Substratphysik“ bezeichnet, wird v.a. das Bodenentwicklungspotential hinsichtlich der Wasserhaltekapazität beurteilt.

Alle Kenngrößen haben maximal 10 Klassen und können so mit einer Ziffer gekennzeichnet werden. Die Aneinanderreihung der drei Ziffern ergibt dann die Kennzahl des Substrattyps. Geologische Informationen, die für standörtliche Fragen irrelevant sind, wie beispielsweise das Alter der Gesteine, werden nicht berücksichtigt. Die meist recht differenzierten und „bunten“ Karten werden so übersichtlicher und weniger „bunt“. Vor allem kann der Nutzer standortsrelevante Informationen ohne Kenntnisse der lokalen geologischen Einheiten nutzen. Die Vereinfachung ermöglicht außerdem länderübergreifende Darstellungen und Auswertungen, auch wenn die Datenbasis sehr heterogen ist, z.B. aufgrund nicht harmonisierter Legenden, unterschiedlicher Maßstäbe oder der Einbeziehung eines etwas anderen Karteninhalts, wie im Fall Tirol mit einer schon vorhandenen Substratkarte. Die drei Kenngrößen stehen in keiner hierarchischen Abhängigkeit, wie sonst bei vielen boden- und standortkundlichen Klassifikationen. Daher können Abfragen sehr einfach strukturiert werden. Dies ist in Abbildung durch die Würfeldarstellung symbolisiert. In der Abbildung wurde beispielsweise nach Gesteinen gefragt, deren Bodenentwicklung zu flachgründigen, skelettreichen Böden mit geringer Wasserhaltekapazität neigen. Obwohl diese Eigenschaften bei Kalken, Dolomiten und verschiedenen Silikatgesteinen vorkommen, müssen nicht, wie in hierarchischen Systemen, mehrere Abfragen in den einzelnen Klassen durchgeführt werden.

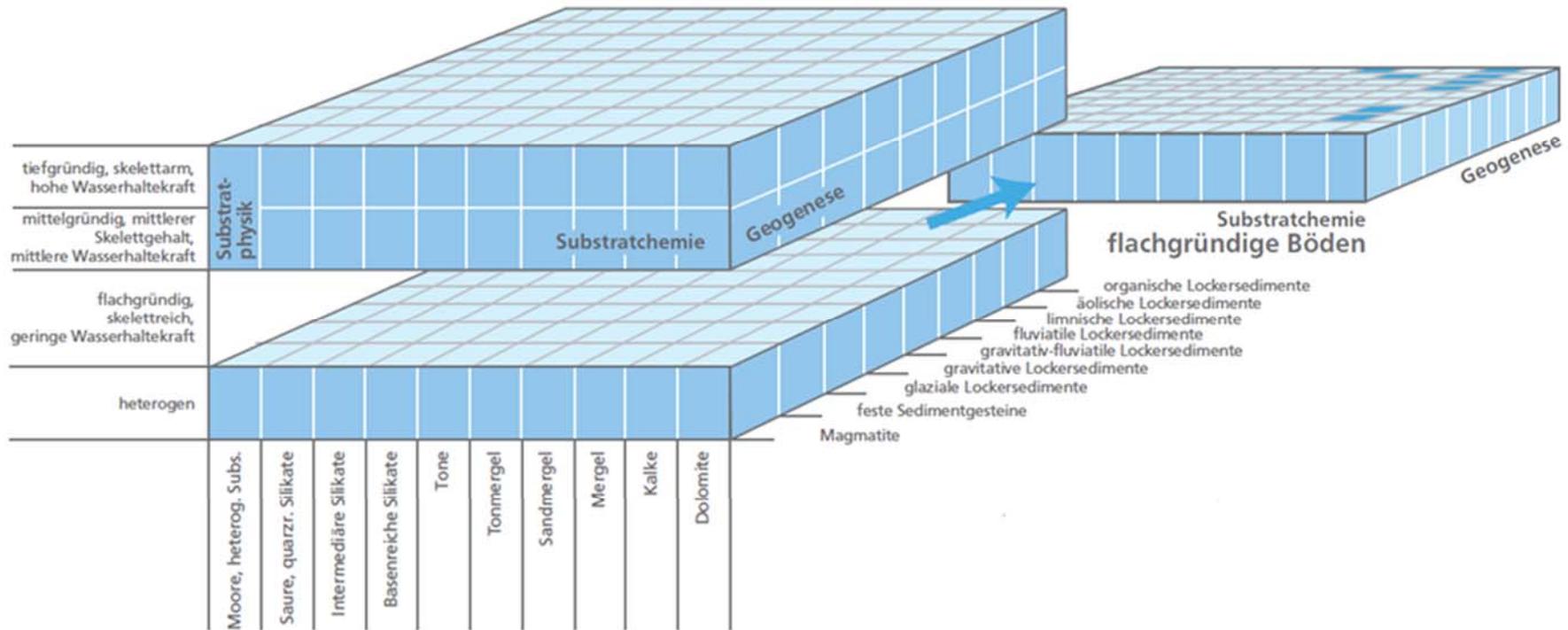


Abbildung 1: Der Würfel zeigt die hierarchiefreie Darstellung der drei Kenngrößen der Substrattypen. In diesem Beispiel wird in der dritten Gliederungsebene nach flachgründigem, skelettreichem Bodenentwicklungspotential mit geringer Wasserhaltekräft gefragt. Dies ist möglich ohne separate Abfragen auf den anderen Gliederungsebenen.

*The cube shows the three substrate type characteristics in a representation free of hierarchy. In this example a query at the third classification level is asking for shallow soils, rich in skeleton with low water capacity. This is possible without separate queries at the other classification levels.*

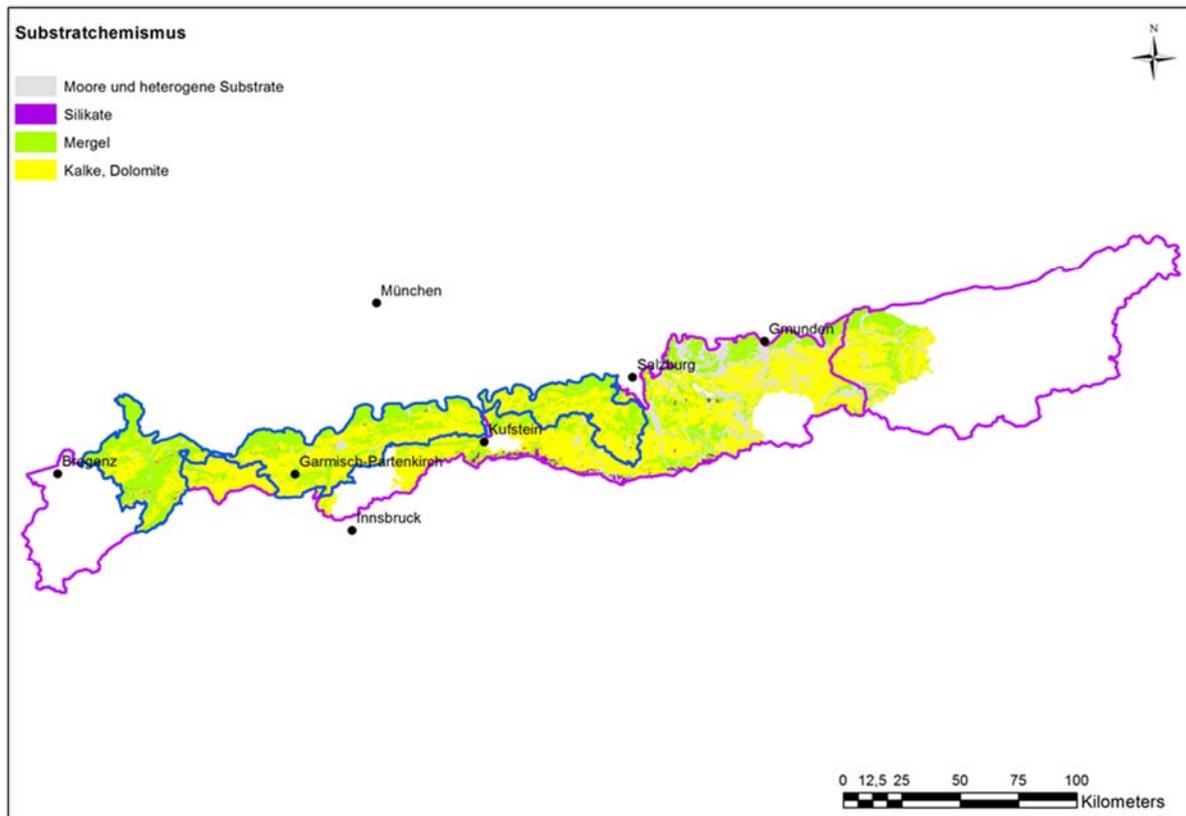


Abbildung 2: Länderübergreifende Darstellung der stark zusammengefassten substratchemischen Kenngröße.

*Cross-border representation of the highly compacted substrate-chemical characteristic.*

Für den bayerischen Alpenraum ist die kartenmäßige Darstellung online von einem GIS-Server unter „<http://arcgisserver.hswt.de/winalp/index.swf>“ abrufbar. Für die zuständigen Forstverwaltungen und Ministerien der in STRATALP beteiligten Länder stehen die Karten über große Teile des Projektgebietes zur Verfügung (Abbildung 2).

In Abbildung 3 ist das bearbeitete Gebiet länderübergreifend dargestellt. Sie zeigt außerdem die Möglichkeit der überregionalen Darstellung im Falle der substratchemischen Eigenschaften, da zwanglos die 10 ausgeschiedenen Klassen auf 4 reduziert werden können.

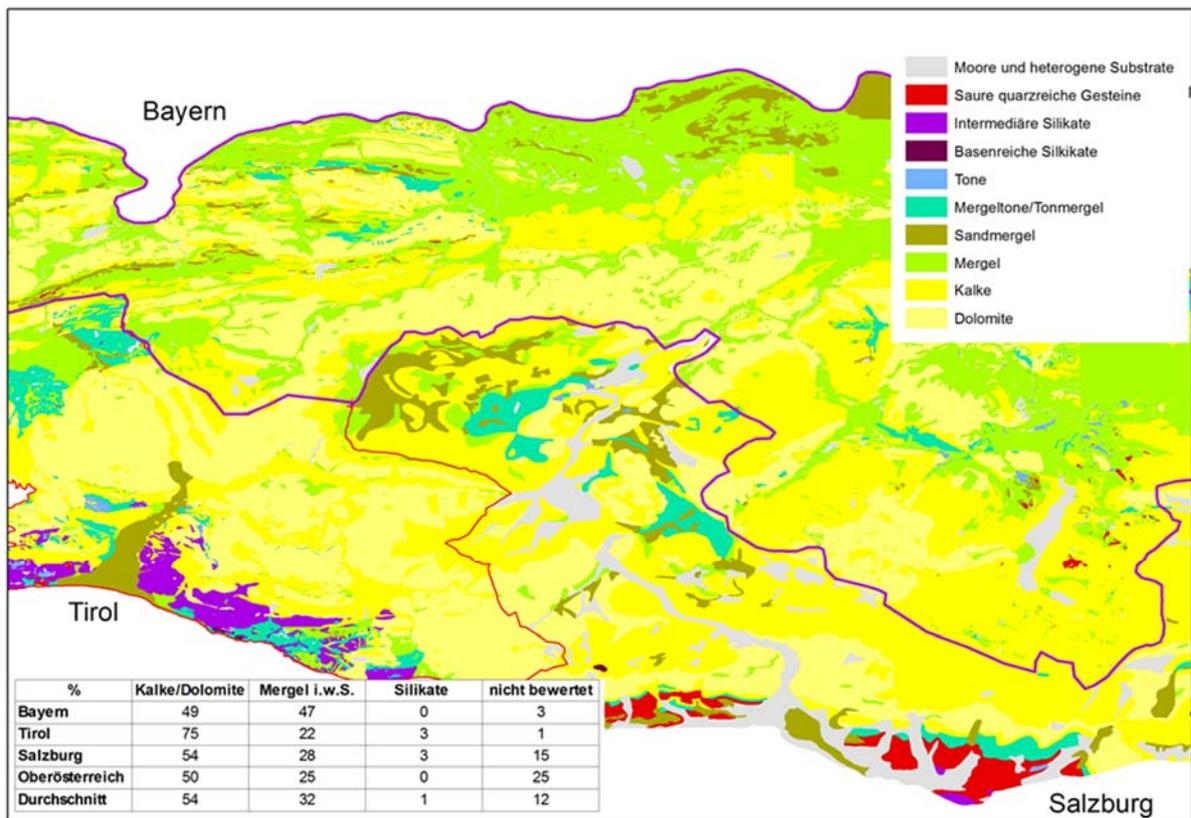


Abbildung 3: Länderübergreifende Darstellung der Substratchemie.

*Cross-border representation of the substrate chemistry.*

Abbildung 3 stellt eine detaillierte Karte mit differenzierter Darstellung der substratchemischen Eigenschaften dar. Die Berücksichtigung der genetischen und substratphysikalischen Eigenschaften ergäbe ein noch detaillierteres Bild. 54 % des Bearbeitungsgebietes ist aus Kalken und Dolomiten, 32 % aus Mergeln aufgebaut. In einem weiteren Schritt wurden die Substrateinheiten auf ihre Empfindlichkeit bezüglich Nährstoffentzügen bewertet. Den Substrattypen wurden charakteristische Bodentypen v.a. im Sinne von Entwicklungsreihen zugeordnet und diese anschließend in drei Empfindlichkeitsklassen unterteilt (Abbildung 4). Es handelt sich um eine relative Einwertung anhand von Expertenwissen, die das Nährstoffnachlieferungsvermögen nach Biomasseentzug durch Holzernte bewertet. Als sehr empfindlich gegenüber Standortsdegradation wurden hierbei Substrattypen bewertet, die zur Entwicklung von Felshumusböden, Skeletthumusböden, Kalk- oder Dolomit-Syrosemen und Podsolen neigen. Als empfindlich werden Bodentypen wie Rendzinen, Braunerde-Rendzinen, Pararendzinen, podsolige Braunerden und Ramblen eingewertet. Als schwach empfindlich bis unempfindlich werden Braunerden, Terrae fuscae, Pseudogley-Braunerden, Pseudogleye, Gley-Braunerden und Kalk-Paternien bewertet.

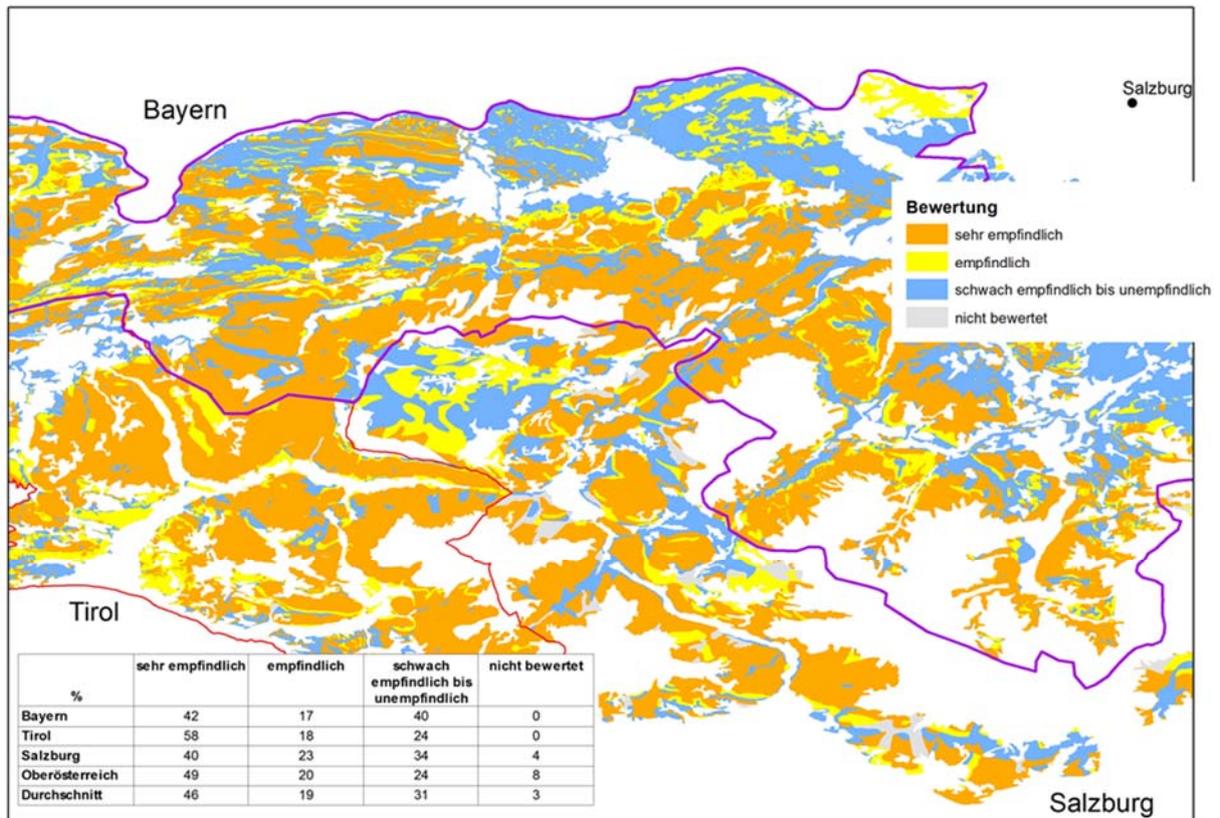


Abbildung 4: Bewertung der Empfindlichkeit auf Nährstoffentzüge. Die Karte wurde zusätzlich mit einem Waldecker verschritten, sodass nur Waldstandorte dargestellt sind.

*Assessment of the sensitivity to nutrient removal. The map was intersected, in addition, with a forest-layer, so that only forest sites are shown.*

46 % des bearbeiteten Teils der Nördlichen Randalpen sind als sehr empfindlich, 19 % als empfindlich und 31 % als schwach empfindlich bis unempfindlich eingestuft (Abbildung 4).

Für flächig höher aufgelöste Informationen kann die Substrattypenkarte mit weiteren GIS-Informationen verschritten werden. Beispielsweise können mit einem digitalen Geländemodell schatt- und sonnseitige Hänge unterschieden werden. So sind die zur Flachgründigkeit neigenden Kalke und Dolomite auf Sonnseiten bei Entwaldung durch Sturm oder Kahlschlag viel gefährdeter bezüglich Humusabbaus als die Schattseiten. In Abbildung 5 ist die Verschneidung mehrerer GIS-Layer am Beispiel der Hartcarbonate dargestellt. Die Bayerischen Alpen sind zu 34 % aus Hartcarbonaten (flachgründig verwitternde Kalke und Dolomite) aufgebaut. Davon sind 43 % sonnseitig exponiert, was insgesamt knapp 15 % der Fläche entspricht. Davon sind wiederum 65 % bewaldet. Das heißt knapp 10 % der Bayerischen Alpen tragen auf südseitigen Hartcarbonatstandorten Wälder. Diese Standorte sind bezüglich großflächiger Freistellung durch Sturm oder Kahlschlag besonders empfindlich.

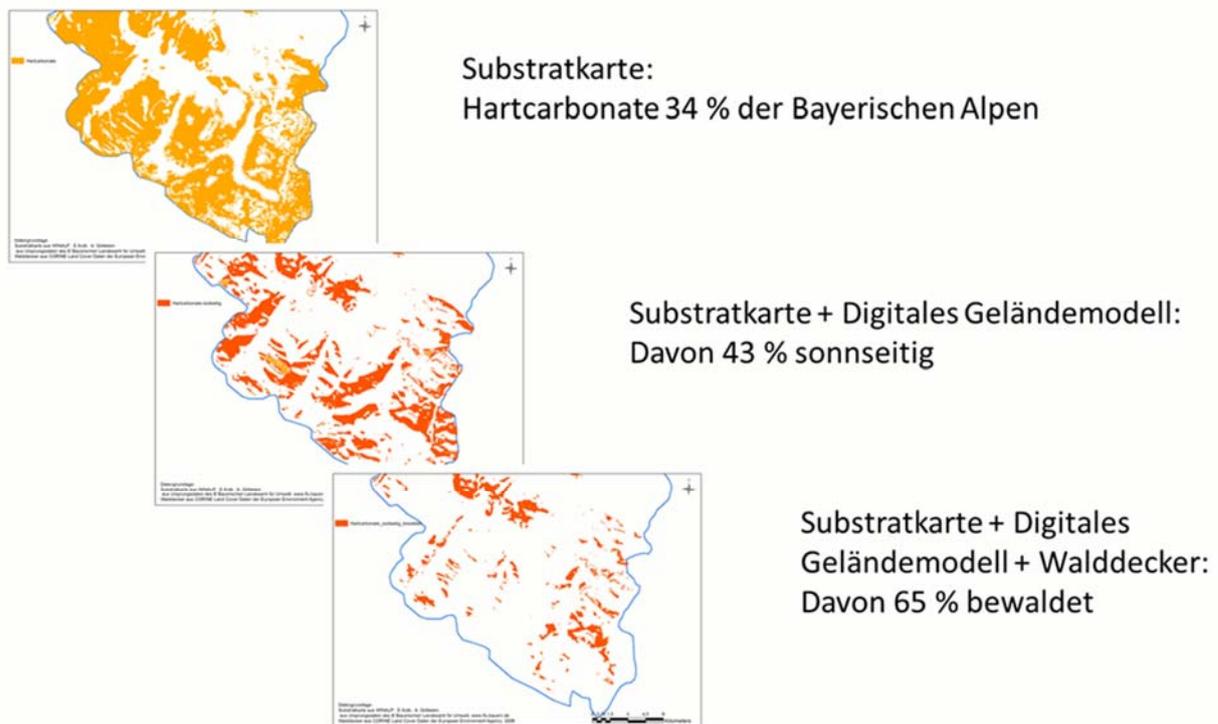


Abbildung 5: Die Substratkarte kann mit weiteren GIS-Informationen verschnitten werden. Das erste Teilbild stellt die Hartcarbonate im Berchtesgadener Land dar. Die zweite Teilabbildung stellt die entsprechenden südseitigen Flächen dar. Die dritte Teilabbildung stellt die Verschnidung mit einem Walddecker dar und zeigt wo auf diesen potentiell kritischen Flächen überhaupt Wälder vorkommen.

*The substrate map can be intersected with other GIS-information. The first subframe shows the 'Hartcarbonate' (slowly weathering carbonates) in the Berchtesgadener county. The second subframe shows the corresponding south-exposed sites. The third subframe shows the intersection with a forest-layer and reveals potentially critical forest sites.*

## LITERATUR

- Kolb, E. (2011): Eine hierarchiefreie Substratklassifizierung anhand der Geologischen Karte 1:200.000 am Beispiel der Bayerischen Alpen. **Freiburger Forstl. Forsch.** 88, 53-62.
- Kolb, E. (2012): Interaktive Karte der Gesteinseigenschaften in den Alpen. Eine neue Substratgliederung bringt schnelle Übersicht und viele Informationen über die Böden der Bayerischen Alpen. **LWF-aktuell** 87, 15-17.



# RISIKOABSCHÄTZUNG FÜR STANDORTSDEGRADATION

## VULNERABILITY ASSESSMENT FOR SITE DEGRADATION

**Birgit REGER<sup>1</sup>, Axel GÖTTLEIN<sup>2</sup>, Klaus KATZENSTEINER<sup>3</sup>, Jörg EWALD<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, D-85354 Freising

<sup>2</sup>Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, Technische Universität München, D-85354 Freising

<sup>3</sup>Institut für Waldökologie, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, A-1190 Wien

<sup>4</sup>Fakultät Wald und Forstwirtschaft, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, D-85354 Freising

### SUMMARY

Due to overstocking with wild ungulates, historical clear-cuts for mining and locally persisting forest pasture, protective forests in the montane vegetation belt of the Northern Calcareous Alps are nowadays frequently overaged and poorly structured over large areas. In many instances the tree layer is dominated by Norway spruce. Due to browsing by ungulates the stands often lack natural regeneration. During the past decade, windthrows and bark beetle infestations have generated disturbance areas, where forests lost their protective functions. Where unfavorable site conditions hamper regeneration for decades, severe losses of soil may ensue. To prioritize proactive management interventions, we developed a model framework for a GIS-based vulnerability assessment for site degradation and applied it to four test areas in the Northern Calcareous Alps of Austria and Bavaria. The model consists of (1) detection of sensitive site conditions for tree growth, (2) detection of sensitive forest stand structures, (3) vulnerability assessment for sites and stands, and (4) mapping of mountain forests, which are sensitive to site degradation. Site conditions were modelled using regression algorithms with available site parameters from pointwise soil and vegetation surveys as response and area-wide geo-data on climate, relief and substrate as predictors. The resulting predictor-response relationships were applied to test areas. Stand structure was detected from airborne laser scanning data. Sites and stand parameters were evaluated according to their vulnerability for site degradation. Vulnerabilities of sites and stands were summarized in intermediate-scale sensitivity maps. High site and stand vulnerability were prevailing in three test areas with pure limestone and dolomite. Moderately sensitive forests are dominating in a test area, where the bedrock in some strata contains larger amounts of siliceous components (marl, mudstone and moraines). Degraded or slightly sensitive forests were not or rarely identified. Providing a comprehensive overview on site and forest stand structure vulnerability to site degradation, our sensitivity maps can be used as a planning instrument in policy and in the practice of preventive management and protection of mountain forests.

**KEYWORDS:** Spatial modelling, site parameters, stand parameters, stand structure, sensitivity evaluation

### ZUSAMMENFASSUNG

Die Schutzwälder in der montanen Vegetationshöhenstufe der Nördlichen Kalkalpen sind aufgrund überhöhter Schalenwildbestände, historischer Kahlschläge für den Bergbau und lokal andauernder Waldweide gegenwärtig häufig überaltert und auf weiten Flächen strukturarm ausgebildet. In vielen Fällen ist die Baumschicht fichtendominiert. Aufgrund von Wildverbiss ist die Naturverjüngung oft nicht ausreichend gesichert. In der Vergangenheit haben Windwürfe und Borkenkäferbefall Freiflächen geschaffen, auf denen die Wälder ihre Schutzfunktion verloren haben. Wo ungünstige Standortbedingungen die Waldentwicklung für lange Zeit beeinträchtigen, können drastische Bodenverluste folgen. Um vorbeugende Waldbehandlungsmaßnahmen zu

priorisieren, wurde ein GIS-basiertes Modell zur Abschätzung der Empfindlichkeit für Standortsdegradation entwickelt und in vier Beispielgebieten in den Nördlichen Kalkalpen von Österreich und Bayern angewendet. Das Model umfasst (1) eine Standortdiagnose, (2) eine Strukturdiagnose, (3) eine Empfindlichkeitsbewertung der Standort- und der Strukturparameter und (4) eine zusammenfassende Bewertung und eine räumliche Abgrenzung von empfindlichen Waldflächen. Die Standortbedingungen wurden mit Hilfe von Regressionsalgorithmen und verfügbaren Standortparametern aus im Gelände punktuell erhobenen Boden- und Vegetationsaufnahmen als Response sowie flächenhaften Geodaten zu Relief und Substrat als Prädiktor modelliert. Die resultierenden Prädiktor-Response-Beziehungen wurden auf die Testgebiete angewendet. Die Bestandesstruktur wurde mit Hilfe von Laserscannerdaten erfasst. Die Standort- und Strukturparameter wurden hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit für Standortsdegradation bewertet und in Empfindlichkeitskarten zusammengefasst. Wälder mit einer hohen Empfindlichkeit dominieren in drei Beispielgebieten mit reinen Kalken und Dolomiten. Mäßig empfindliche Wälder dominieren in einem Beispielgebiet, welches zu einem Großteil aus silikatischem Ausgangsgestein (Mergel, Tonstein und Moränen) besteht. Degradierete oder Wälder mit geringer Empfindlichkeit wurden nicht oder selten identifiziert. Die Karten ermöglichen einen umfassenden Überblick über die Empfindlichkeit von Wäldern gegenüber Standortsdegradation. Sie eignen sich damit als Planungsinstrument in der Politik und in der Praxis zum vorausschauenden Management und Schutz der Bergwälder.

**STICHWÖRTER:** räumliche Modellierung, Standortparameter, Strukturparameter, Bestandesstruktur, Empfindlichkeitsbewertung

## 1 EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Die Wälder der Nördlichen Kalkalpen sind aufgrund standörtlicher Ungunst und ihrer Nutzungsgeschichte auf bedeutenden Flächen in einem forstlich unbefriedigenden Zustand. Zum Teil sind sie überaltert und weisen trotz standortgerechter Baumartenmischung im Altbestand keine ausreichende Verjüngung auf (Pröll et al. 2014). Noch kritischer ist die Situation in strukturarmen, fichtendominierten Beständen auf flachgründigen Extremstandorten (Hartkalk, Dolomit, Südexposition). Hier kann es im Falle von Kalamitäten (z.B. Sturmwurf, Lawinen und Borkenkäferbefall) zur schnellen Standortsdegradation (z.B. Nährstoffverluste, Humusschwund, Bodenverluste, abnehmende Wasserspeicherkapazität) kommen (Kohlpaintner und Göttlein 2009, Hollaus et al. 2013, Mayer et al. 2014). Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie empfindlich Waldstandorte auf kalkalpinen Standorten in den Nördlichen Kalkalpen für Standortsdegradation sind.

Ziel dieses Projektteils ist es,

- ein Regelwerk zur Abschätzung der Empfindlichkeit von kalkalpinen Waldstandorten für Standortsdegradation zu entwickeln und
- das Regelwerk in der Fläche in Beispielgebieten anzuwenden.

### 1.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Nördlichen Kalkalpen mit den Wuchsgebieten 4.1 „Nördliche Randalpen – Westteil“ und Teile von 4.2 „Nördliche Randalpen – Ostteil“ in Tirol, Salzburg und Oberösterreich sowie das Wuchsgebiet 15 mit den Wuchsbezirken „Mittlere Bayerische Kalkalpen“ (15.5), „Chiemgauer Alpen“ (15.6), „Allgäuer Hochalpen“ (15.7), „Karwendel und Wettersteingebirge“ (15.8) und „Berchtesgadener Hochalpen“ (15.9) in Bayern.

Innerhalb der Nördlichen Kalkalpen wurden als Beispielgebiete Reutte (Tirol), Hintersee (Salzburg), Höllengebirge (Oberösterreich) und das BWO-Projektgebiet Grünstein bei Berchtesgaden (Bayern) ausgewählt (Abbildung 1).

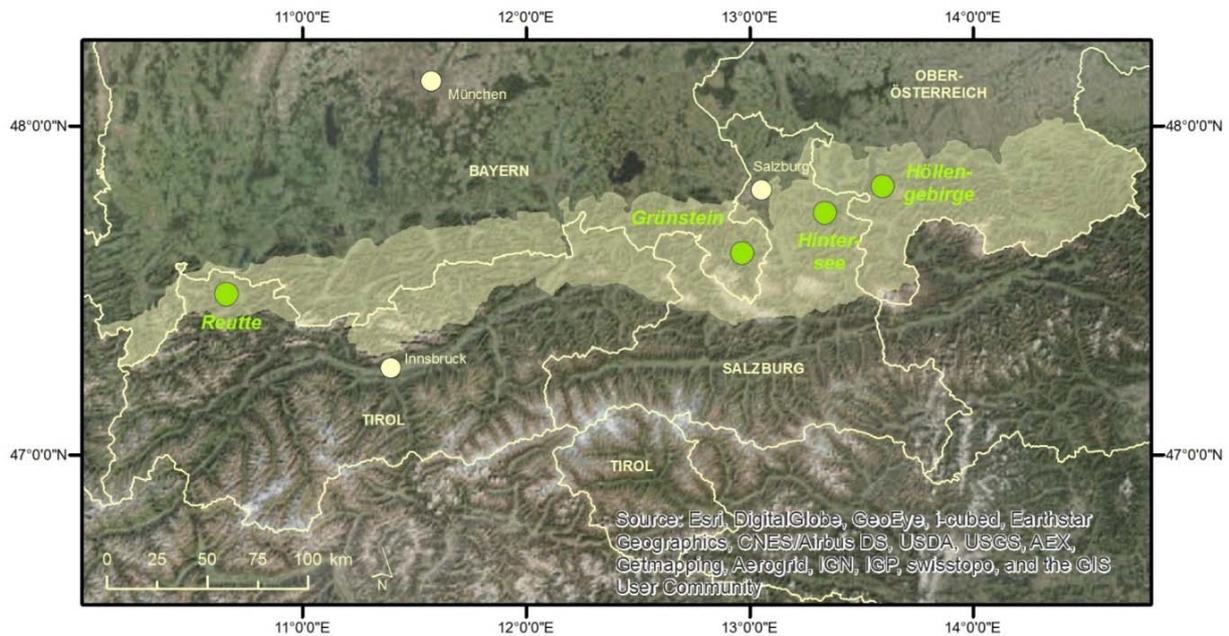


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet Nördliche Kalkalpen mit den Beispielgebieten Reutte, Grünstein, Hintersee und Höllengebirge.

*Study area Northern Calcareous Alps with the test areas Reutte, Grünstein, Hintersee and Höllengebirge.*

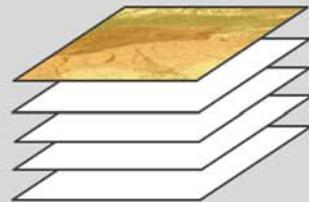
## 2 MATERIAL UND METHODEN

Zur Risikoabschätzung für die Empfindlichkeit von Waldstandorten für Standortsdegradation wurde ein regelbasiertes Modellkonzept (Reger et al. 2015) mit folgenden Arbeitsschritten erarbeitet (Abbildung 2): (1) Standortdiagnose anhand von Standortparametern, (2) Strukturdiagnose zur Feststellung des aktuellen Bestandeszustands anhand von Strukturparametern, (3) Bewertung der Standort- und der Strukturparameter und (4) zusammenfassende Bewertung und räumliche Abgrenzung von empfindlichen Waldflächen.

### (1) Standortdiagnose



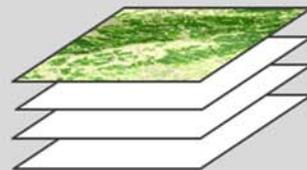
- effektive Gründigkeit
- nutzbare Wasserspeicherkapazität
- mittlere Nährstoffzahl
- Bodentyp
- Humusform



### (2) Strukturdiagnose



- Überschirmungsgrad
- Verjüngungsanteil
- Stufigkeit
- Mischungsform



### (3) Bewertung der Standort- und Strukturparameter

Standortparameter



Empfindlichkeit Standort




Strukturparameter



Empfindlichkeit Bestand




### (4) Empfindlichkeitsbewertung

		Einstufung Standort			
		1	2	3	4
Einstufung Bestand	1				
	2				
	3				
	4				

- Degraderte Wälder
- Wälder mit hoher Empfindlichkeit
- Wälder mit mittlerer Empfindlichkeit
- Wälder mit geringer Empfindlichkeit

Abbildung 2: Modellkonzept zur Abschätzung der Empfindlichkeit von Waldstandorten für Standortsdegradation.

*Approach to assessing the vulnerability of forest sites to site degradation.*

## 2.1 Standortdiagnose

In der Standortdiagnose wird untersucht, wo von Natur aus ungünstige, flachgründige, dürregefährdete und nährstoffarme Standorte vorliegen. Um diese ungünstigen Waldstandorte zu identifizieren, werden folgende Standortparameter als Proxies für die Standortfaktoren Wurzelraum, Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit ermittelt:

- **Effektive Gründigkeit:** Die effektive Gründigkeit ist eine um den Skelettanteil reduzierte Mächtigkeit aller Lockermaterialhorizonte des Bodens. Sie gibt den pflanzennutzbaren Feinerdeanteil des Bodens an. Die effektive Gründigkeit ist somit ein wichtiges Maß für die Durchwurzelbarkeit sowie das Wasser- und Nährstoffspeichervermögen von Böden.
- **Nutzbare Wasserspeicherkapazität:** Die nutzbare Wasserspeicherkapazität eines Bodens bzw. Horizontes ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation verfügbar ist. Sie beinhaltet damit die Wassermenge, die ein grundwasserferner Horizont in natürlicher Lagerung bei Saugspannungen von pF 1,8 - 4,2 nach ausreichender Sättigung gegen die Schwerkraft zurückhalten kann.
- **Mittlere Nährstoffzahl:** Die mittlere Nährstoffzahl ist ein Indikator für die Nährstoffverfügbarkeit von Stickstoff, Phosphor und Kalium. Sie wird nach Ellenberg et al. (2001) aus der Vegetation abgeleitet und zeigt eine enge Beziehung zur Wuchsleistung von Bäumen. Nährstoffarme Kalk- und Dolomitstandorte weisen in der Regel hohe Vorräte an Calcium und meist auch Magnesium auf, jedoch kann die Versorgung mit Stickstoff, Kalium und insbesondere Phosphor sowie Spurenelementen knapp sein.
- **Bodentyp:** Bodentypen sind durch eine charakteristische Abfolge der Horizonte mit bestimmten chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften definiert. In den Nördlichen Kalkalpen sind Bodentypen wie Fels- und Skeletthumusböden, Rendzinen und Kalklehmrendzinen weit verbreitet.
- **Humusform:** Die Humusform wird anhand der Auflagehumus- und humosen Mineralbodenhorizonte bestimmt. Sie ist ein integratives Maß für die ökologischen Standortverhältnisse. Unterschieden werden die terrestrischen Humusformen Mull, Moder und Rohhumus. Eine besondere Humusform in den Alpen sind die mächtigen Humusaufgaben (> 15 cm) des Tangelhumus. In der Österreichischen Bodensystematik werden diese bei einer Mächtigkeit < 15 cm als Alpenmoder, bei einer höheren Mächtigkeit als Tangelrohhumus bezeichnet (Nestroy et al. 2011).

In der Standortdiagnose werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt: (1) Aufbereitung der Response- und Prädiktordaten, (2) statistische Modellierung der Standortparameter und (3) räumliche Implementierung der Modelle.

### **2.1.1 Datengrundlage und Datenaufbereitung**

Die statistische Modellierung der Standortparameter basiert auf hochauflösenden, im Gelände punktuell erhobenen Boden- und Vegetationsdaten (Response) sowie auf flächig verfügbaren Geodaten zu Relief und Substrat (Prädiktoren).

#### **Boden- und Vegetationsdaten (Response)**

Hochauflösende Informationen zum Boden und zur Vegetation aus verschiedenen Geländeerhebungen dienen als Response- bzw. Validierungsdaten in der statistischen Modellierung.

Sie umfassen:

- 998 vegetations- und bodenkundliche Aufnahmen der WINALPecobase (Reger et al. 2012, ID EU-DE-003 in der Global Index of Vegetation Plot Database (Dengler et al. 2011)), erhoben im Rahmen des INTERREG-Projektes „Waldinformationssystem Nordalpen“ (WINALP) in den Waldflächen der Bayerischen Kalkalpen (Wuchsbezirke 15.5 - 15.9)
- 643 vegetations- und bodenkundliche Aufnahmen aus der SYSSI Datenbank des Amtes der Tiroler Landesregierung, Abt. Forstplanung, erhoben für die Waldflächen in Tirol, Wuchsgebiet 4.1
- 105 vegetations- und bodenkundliche Aufnahmen der Landesforstdirektion des Landes Salzburg, erhoben im Rahmen des INTERREG-Projektes „Waldinformationssystem Nordalpen“ (WINALP) in den Waldflächen bei Lofer
- 93 bodenkundliche Aufnahmen aus den Jahren 2012 und 2013, erhoben im Rahmen des Projektes „Die Kombination von Standortskarten, Standortertragsmodellen und Nährstoffbilanzmodellen als Basis für nachhaltige Waldbewirtschaftung in den Nördlichen Kalkalpen“ (Stomod) für die Waldflächen im Bezirk Reutte (Tirol)

Die Datensätze beinhalten eine Bodenansprache mit Angaben zu den Horizonten (z.B. Horizontmächtigkeit und Skelettgehalt) sowie zum Gesamtprofil (z.B. Bodentyp und Humusform).

Die Angaben zu den Bodentypen und Humusformen wurden vereinheitlicht in einer Datenbank zusammengeführt. Die nutzbare Wasserspeicherkapazität lag für 1.441 Bodenprofile vor. Die nutzbare Wasserspeicherkapazität des Mineralbodens wurde mit Hilfe von Pedotransferfunktionen nach Teepe et al. (2003) und Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (2003) abgeleitet. Die nutzbare Wasserspeicherkapazität der Humusaufgabe wurde aus der Humusmächtigkeit abgeleitet. Dabei wurde die effektive Gründigkeit der Humusaufgabe mit dem Faktor 0,4 multipliziert. Die effektive Gründigkeit wurde zunächst für einen Bodenhorizont aus der Horizontmächtigkeit und dem prozentualen Anteil des Skelettgehalts nach folgender Formel berechnet:

$$\text{eff. Gründigkeit} = \text{Horizontmächtigkeit} \times \left(1 - \frac{\text{Skelettgehalt}}{100}\right)$$

Durch Addition der horizontweise berechneten effektiven Gründigkeit erhält man die effektive Gründigkeit des Bodens. Die Bodenprofile reichen bis zum festen Gestein (Cn-Horizont) bzw. wurden auf 100 cm entsprechend der maximalen Bohrstocktiefe begrenzt. Aus den Vegetationsaufnahmen mit einer Angabe der Arten und ihrer Deckungen wurde die mittlere Nährstoffzahl abgeleitet. Zunächst wurden den einzelnen Arten nach Ellenberg et al. (2001) die entsprechenden Zeigerwerte zugewiesen. Auf der 9-teiligen Zeigerwert-Skala verweist eine Nährstoffzahl von 1 auf nährstoffärmste Standorte, während eine Nährstoffzahl von 9 sehr nährstoffreiche Standorte anzeigt. Für jede Aufnahme wurde die mit dem Logarithmus der Deckungsklassenmitte gewichtete mittlere Nährstoffzahl berechnet.

### **Geodaten zu Relief und Substrat (Prädiktoren)**

Als Prädiktoren für die statistischen Modellierungen wurden flächig verfügbare Geodaten zum Relief und Substrat aufbereitet und in einem GIS zusammengeführt. Die Geodaten wurden hinsichtlich ihrer potenziellen Relevanz für die Standortdiagnose ausgewählt.

Die Geodaten zum Relief basieren auf digitalen Geländemodellen (DGM) in 10 m Auflösung (Bayern: Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG); Tirol: Land Tirol - data.tirol.gv.at, TIRIS; Salzburg: www.salzburg.gv.at/sagis, SAGIS) bzw. auf digitalen Geländemodellen in 5 m Auflösung (Oberösterreich: Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, DORIS). Als Parameter für das Klima wurden die Höhe ü. NN. und die transformierte Exposition abgeleitet. Die Exposition wurde mit Hilfe des Surface Analysis Tools in der ArcGIS 10.2.1 Spatial Analyst Erweiterung (© 1999–2013 ESRI Inc.) in Grad berechnet und anschließend transformiert (vgl. Beers et al. 1966; Ewald 2009). Die Transformation erfolgte

nach der Formel  $\cos((202,5^\circ - a) * \pi / 180^\circ)$ , wobei  $a$  die Exposition in Grad und  $202,5^\circ$  die wärmebegünstigte Exposition darstellt (Reger et al. 2011). Die Werte der transformierten Exposition reichen von -1 (nicht wärmebegünstigte Exposition) bis 1 (wärmebegünstigte Exposition). Zur Beschreibung des Reliefs wurden die Hangneigung, die Wölbung und der Compound Topographic Index abgeleitet. Hangneigung und Wölbung (curvature) wurden mit Hilfe des Surface Analysis Tools in der ArcGIS 10.2.1 Spatial Analyst Erweiterung (© 1999–2013 ESRI Inc.) berechnet. Die Wölbung wurde nach Zevenbergen und Thorne (1987) berechnet. Der Compound Topographic Index (CTI) ist ein kombinierter Reliefparameter, der z.B. zur Vorhersage der Bodentiefe verwendet wird (Gessler et al. 1995). Er wird berechnet als  $\ln(a/\tan B)$ , wobei  $a$  die spezifische Einzugsgebietsgröße (Einzugsgebiet je Schichtenlinienabschnitt) und  $B$  die Hangneigung darstellt. Hohe Werte repräsentieren Abflussdepressionen, niedrige Werte Bergrücken und Berggipfel.

Geodaten zu chemischen und physikalischen Substrateigenschaften wurden aus Substratkarten bzw. aus geologischen Karten abgeleitet. Für Tirol und Bayern liegen Substratkarten im Maßstab 1:25.000 vor. Für die restlichen Gebiete liegen geologische Karten vor:

- Karte der Gesteinseigenschaften 1:25.000 für die Bayerischen Alpen (Kolb 2012): Die Substratklassifizierung wurde aus den geologischen Karten 1:25.000 und Bodenprofilaten des Landesamtes für Umwelt (LfU) abgeleitet und ordnet die bodenbildenden Gesteine nach Entstehung, chemischer Zusammensetzung und Körnung
- Substratkarte 1:25.000 für Tirol des Amtes der Tiroler Landesregierung, Abt. Forstplanung
- Kompilierte geologische Karten 1:20.000 für Oberösterreich der Geologischen Bundesanstalt (GBA)
- Geologische Karte von Salzburg 1:200.000 der Geologischen Bundesanstalt (GBA)

Die zahlreichen geologischen Einheiten der geologischen Karten und die Substrate von Tirol wurden in die jeweiligen Substrattypen nach Kolb (2012) überführt, welche das Substrat hinsichtlich Genese sowie chemischer und physikalischer Eigenschaften klassifizieren. Das Klassifikationssystem fasst die chemischen Substrateigenschaften hinsichtlich ihres Karbonatgehalts in die Klassen (0) Moore, heterogene Substrate, (1) saure, quarzreiche Silikate, (2) intermediäre Silikate, (3) basenreiche Silikate, (4) Tone, (5) Tonmergel, (6) Sandmergel, (7) Mergel, (8) Kalke und (9) Dolomite zusammen. Die physikalischen Substrateigenschaften wurden hinsichtlich ihrer Verwitterbarkeit in die drei Klassen (1) rückstandsarm, (2) mäßig rückstandsreich und (3) rückstandsreich gruppiert.

Neben den reliefbezogenen und substratbezogenen Effekten wurde in der Modellierung die räumliche Lage der Aufnahmen als räumlicher Effekt berücksichtigt. Die Prädiktoren wurden auf Multikollinearität getestet. Lineare Zusammenhänge zwischen den Prädiktoren wurden vermieden, indem in den Modellen nur Prädiktoren mit einer Spearman Korrelation kleiner 0,7 (Fielding und Haworth 1995) verwendet wurden. Substratchemie und Substratphysik wurden als nominale Prädiktoren in der statistischen Modellierung verwendet.

## **2.1.2 Statistische Modellierung der Standortparameter**

Für die Ableitung der Standortmerkmale wurden statistische Modelle entwickelt, welche die Standortmerkmale der im Gelände erhobenen Bodenprofile und Vegetationsaufnahmen mit den flächigen Geodaten zu Relief und Substrat in Beziehung setzen. Für die Modellierung wurden zwei verschiedene Verfahren genutzt: Generalisierte Additive Modelle (GAMs) für die metrischen Standortparameter effektive Gründigkeit, nutzbare Wasserspeicherkapazität und mittlere Nährstoffzahl sowie Random Forests (RFs) für die nominalen Standortparameter Bodentyp und Humusform.

GAMs (Hastie und Tibshirani 1990) sind nicht-parametrische Erweiterungen von generalisierten linearen Modellen (GLMs) und erlauben, Responsekurven mit Hilfe von nicht-parametrischen Glättungsfunktionen anzupassen. Sie sind in dem Package `mgcv` (Wood 2006) in R Version 3.1.0 (R Core Team 2014) implementiert. In den Modellen wurden Penalized Regression Splines und die Model Distribution Family Gamma mit log link Funktion verwendet. Die Glättungsparameter wurden mittels generalisierter Kreuzvalidierungen (GCV) optimiert, welche erlauben, die Vorhersagegenauigkeit der Modelle zu testen. Eine höhere Komplexität wurde nur für den räumlichen Effekt zugelassen (Paciorek 2009), um die räumliche Autokorrelation abzubilden. Die Auswahl der Variablen in den Modellen erfolgte auf der Grundlage von Signifikanzschätzungen in einer Rückwärtsselektion. Die relative Bedeutung der erklärenden Variablen wurde über die Spannweite der kategorialen bzw. Glättungseffekte (d.h. Maximumeffekt – Minimumeffekt, vgl. Mellert und Ewald 2014) bestimmt. Die Spannweiten aller Prädiktoren eines Modells wurden so skaliert, dass sie in Summe insgesamt 100 ergeben. Hohe Werte zeigen dabei eine hohe Variablenbedeutung an. Die Modellgüte wurde anhand der erklärten Devianz und des Bestimmtheitsmaßes adjustiertes R-Quadrat ( $\text{adj. } R^2$ ) bestimmt. Eine Validierung erfolgte durch eine 10-fache Kreuzvalidierung mit 10 zufälligen Datenaufteilungen in Test- und Trainingsdaten im Verhältnis 1:10.

Random Forests (Breiman 2001) sind eine Ensemble-Methode, in der viele verschiedene Klassifikationsbäume für eine stabile Klassifikation kombiniert werden. Zur Implementierung der Random Forests wurden Conditional Inference Trees als Base Learners verwendet, welche in der Funktion `cforest()` in dem Package `party` in R Version 3.1.0 (Hothorn et al. 2006, R Core Team 2014) verfügbar sind. Das Aufteilen in der rekursiven Partitionierung in Conditional Inference Trees basiert auf Signifikanztests der Unabhängigkeit zwischen den jeweiligen Prädiktoren und der Responsevariable. Die Klassenvorhersage erfolgt anhand vorhergesagter Wahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Standortparameter nach dem Mehrheitsprinzip. Die Klasse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit wird zugeordnet. Zur Einschätzung der Vorhersagegenauigkeit wurden auf Basis der Trainingsdatensätze die Genauigkeit (Accuracy) und die Fehlerrate Out-Of-Bag Error (OOB) ermittelt. Die relative Bedeutung der Variablen wurde mit Hilfe der `varimp` Funktion im Package `party` berechnet.

### 2.1.3 Regionalisierung

Die resultierenden Prädiktor-Response-Modelle wurden dazu verwendet, um die Standortparameter für die Beispielgebiete in einem 10 m-Raster zu regionalisieren. Die Regionalisierung wurde im Package `raster` (Hijmans et al. 2013) in R Version 3.1.0 (R Core Team 2014) umgesetzt.

## 2.2 Strukturdiagnose

Ziel der Strukturdiagnose ist es, ungünstige Bestandeszustände zu identifizieren und flächenmäßig darzustellen. So gilt es, strukturreiche Bergmischwaldbestände mit Verjüngung von überalterten, strukturarmen Bergwäldern zu unterscheiden.

Die Diagnose des Zustandes des aufstockenden Bestandes erfolgt mit Hilfe von Strukturparametern (vgl. Bockstahler 2006, Göttlein et al. 2009, 2011):

- **Überschirmungsgrad:** Der Überschirmungsgrad (Kronenschlussgrad, Deckungsgrad) gibt das Verhältnis der durch Baumkronen überschirmten Fläche zur Gesamtfläche der Untersuchungseinheit an. Alle Nadel- und Laubbäume sowie die Sträucher mit einer Höhe von mindestens 2 m gelten als Überschirmung. Der Überschirmungsgrad ist somit ein Maß für die Auflichtung bzw. Vergrasung von Beständen. Ein hoher Überschirmungsgrad trägt zur Verringerung des Oberflächenabflusses und ganz allgemein zum Bodenschutz bei (Ammer et al. 1995, Führer und Nopp 2001, Scheiring 1998).

- **Verjüngungsanteil:** Der Verjüngungsanteil gibt den Deckungsgrad entwicklungsfähiger Verjüngung zur Gesamtfläche der Untersuchungseinheit an. Als entwicklungsfähige Verjüngung wird hier die Jungwuchsphase von 2 bis 5 m Höhe betrachtet. Verjüngung unter Schirm wird nicht berücksichtigt. Eine ausreichende Verjüngung ist von entscheidender Bedeutung, um eine dauerhafte Bestockung zu sichern und damit eine langfristige Schutzwirkung zu ermöglichen (Wehrli et al. 2007).
- **Stufigkeit:** Die Stufigkeit (Schichtigkeit) eines Bestandes gibt die Anzahl der vertikalen Schichten mit einem Anteil von  $\geq 20\%$  an der Überschirmung an. Sie ist damit ein Maß für die Altersstruktur eines Bestandes und reicht von ein- bis mehrschichtig. Gut gestufte Waldbestände stellen die Schutzleistung gegen Naturgefahren sicher und verbessern die Bestandesstabilität (Führer und Nopp 2001, Scheiring 1998).
- **Mischungsform:** Mit der Mischungsform wird die räumliche Verteilung der vertikalen Schichten beschrieben. Der Grad der Mischung wird als Anzahl aller in einer Untersuchungseinheit räumlich verteilten vertikalen Schichten geteilt durch die maximal mögliche Durchmischung bestimmt. Hohe Werte zeigen dabei eine gute Durchmischung der vertikalen Schichten an.

Die Strukturdiagnose wird für die Beispielgebiete Reutte, Berchtesgaden, Hintersee und Höllengebirge durchgeführt.

### 2.2.1 Datengrundlagen und Datenaufbereitung

Die Diagnose der Bestandesstruktur erfolgte mit Hilfe von Daten aus einer aktuellen Laserscannerbefliegung. Dabei wird die Landschaft mit einem Laserstrahl von einem Flugzeug abgetastet. Die Pulse werden an der Oberfläche reflektiert und im Flugzeug wieder empfangen. Aus der Zeitdifferenz zwischen gesendetem und empfangenem Signal wird die Entfernung berechnet. Über bewaldeten Gebieten können die Lichtpulse am Kronendach, in der Krone, an den Stämmen und Zweigen oder am Boden reflektiert werden. Das Signal mit der kürzesten Laufzeit (first-pulse) stammt potenziell von der Kronenoberfläche, das Signal mit der längsten Laufzeit (last-pulse) potenziell vom Boden. Aus allen Punkten des first-pulse Datensatzes werden digitale Oberflächenmodelle (DOM) berechnet. Zur Berechnung der digitalen Geländemodellen (DGM) werden die last-pulse Punkte verwendet. Durch den Vergleich von DGM und DOM können so zum Beispiel Baumhöhen und weitere Bestandesstrukturparameter abgeschätzt werden (z.B. Rücker et al. 2010).

Die DOMs und DGMs wurden in 1 m Auflösung für Reutte vom Land Tirol (data.tirol.gv.at), für Berchtesgaden vom Bayerischen Landesamt für Vermessung und Geoinformation (Befliegung 2008-2009) und für Hintersee von SAGIS bzw. in 0,5 m Auflösung für das Höllengebirge vom Amt der Oberösterreichischen Landesregierung (Befliegung 2012) bereitgestellt.

Zur Strukturdiagnose wurden für die Waldbestände die Kronenhöhen als Differenz von DOM und DGM berechnet. In Einzelfällen ergaben sich negative Werte, die auf Null gesetzt wurden. Die Kronenhöhen wurden, wie in dem Beispiel für Reutte dargestellt (Abbildung 3), in die Schichten „etablierte Verjüngung“ (2 - 5 m), „Unterschicht“ (5 - 10 m), „Mittelschicht“ (10 - 25 m) und „Oberschicht“ (> 25 m) zusammengefasst und in einer Karte dargestellt.

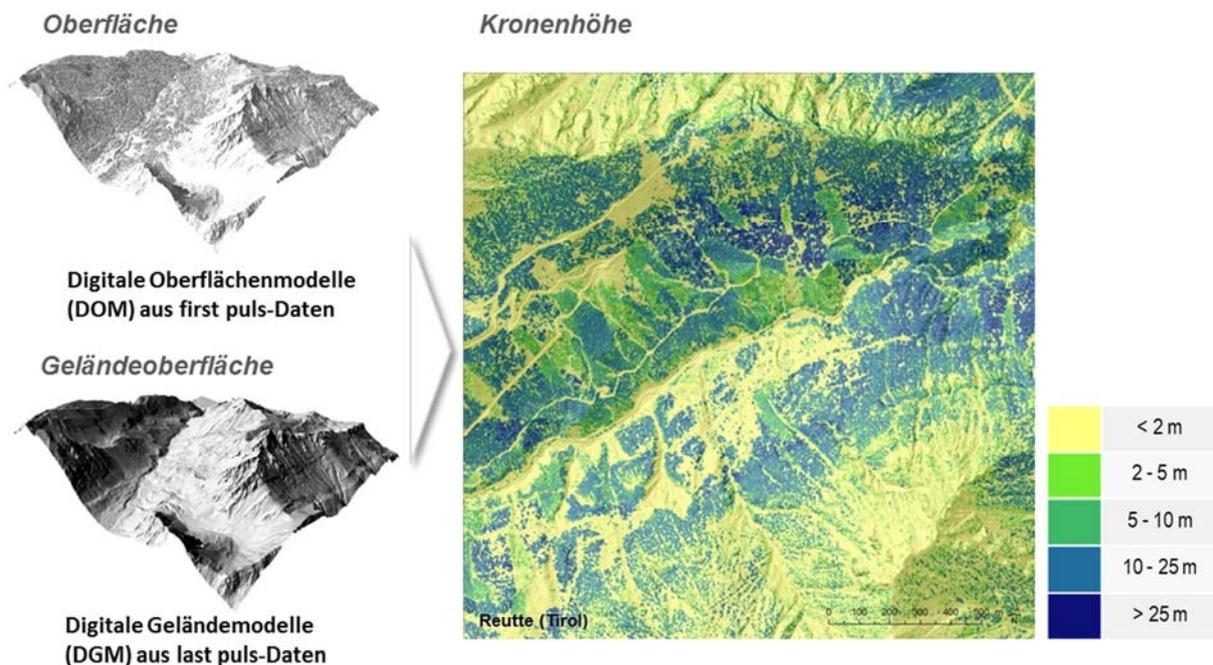


Abbildung 3: Aus digitalem Oberflächenmodell und digitalem Geländemodell abgeleitete Kronenhöhen für das Beispielgebiet Reutte.

*Crown heights derived from a digital surface model and a digital elevation model for the test area Reutte.*

## 2.2.2 Modellierung

Die Schichten aus den Kronenhöhen bildeten die Grundlage für die Ermittlung des Überschirmungsgrades, des Verjüngungsanteils, der Stufigkeit und der Mischungsform (d.h. die räumliche Verteilung der Höhenstufen).

Für die Ermittlung der Strukturparameter wurden GIS-Modelle mit Hilfe des Model Builders in ArcGIS 10.2.1 (© 1999-2013 Esri Inc.) entwickelt, welche mittels Blockstatistik und Resampling für 100 m<sup>2</sup> (10 m x 10 m) große Flächen die Strukturparameter berechnen. Der Überschirmungsgrad wurde aus der obersten Kronenhöhe durch eine Abfrage aller Rasterzellen mit Kronenhöhen > 2 m abgeleitet. Eine mehrfache vertikale Überschirmung bleibt unberücksichtigt, so dass der Überschirmungsgrad maximal den Wert 1 erreichen kann. Der Verjüngungsanteil wurde aus den Rasterzellen mit einer Kronenhöhe von 2 bis 5 m abgefragt. Die Stufigkeit wurde anhand der Anzahl der vertikalen Schichten > 2 m mit einem Anteil von mindestens 20 % an der Überschirmung ermittelt. Schichten unter der obersten Kronenschicht können nicht berücksichtigt werden. Die Mischungsform wurde als Anzahl aller in einer 100 m<sup>2</sup> - Fläche verteilten vertikalen Schichten geteilt durch die maximal mögliche Durchmischung von 100 berechnet.

### **2.3 Bewertung der Standort- und Strukturparameter**

Die Standort- und Strukturparameter wurden nach ihrer Merkmalsausprägung mit Hilfe von Bewertungstabellen nach einem Notensystem von 1 bis 5 beurteilt. Dabei bedeutet 1 eine positive (z.B. sehr tiefgründige Standorte) und 5 eine sehr negative Merkmalsausprägung (z.B. sehr flachgründige Standorte). Wegen der unterschiedlichen Bedeutung für die Abschätzung für Standortsdegradation wurden die Merkmalsausprägungen der einzelnen Parameter nach forstfachlichen Kriterien mit einem spezifischen Faktor gewichtet (Tabelle 1 und Tabelle 2 siehe Göttlein et al. 2009). Der gewichtete Mittelwert ergibt somit eine integrative Gesamtbewertung der Degradationsempfindlichkeit kalkalpiner Wälder.

Tabelle 1: Bewertungstabelle der Standortparameter.

*Evaluation table of the site parameters.*

Standortparameter	Empfindlichkeit					Stufe	Gewichtung	Gewicht. Risiko
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch			
effektive Gründigkeit [cm]	> 120	60 - 120	30 - 60	15 - 30	< 15		x 4	
nutzbare Wasserspeicherkapazität [mm]	> 180	120 - 180	90 - 120	30 - 90	< 30		x 2	
mittlere Nährstoffzahl	> 6,3	5,7 - 6,3	4,45 - 5,7	3,5 - 4,45	< 3,5		x 2	
Bodentyp	Braunerde/ Pseudogley/ Auboden	Kalkbraunlehm	Kalklehm- Rendzina	Rendzina	Felshumus- boden		x 3	
Humusform	Rohhumus/ Tangel (auf Pseudogley/ Kalkbraunlehm)	Moder	Mull	Tangel (auf Rendzina)	Initiale Humusform		x 3	
<b>Einstufung Standort</b>								

Tabelle 2: Bewertungstabelle der Strukturparameter.

*Evaluation table of the stand structure parameters.*

Strukturparameter	Empfindlichkeit					Stufe	Gewichtung	Gewicht. Risiko
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch			
Überschirmungsgrad	≥ 0,9	0,8 - 0,9	0,7 - 0,8	0,5 - 0,7	< 0,5		x 9	
Verjüngungsanteil	> 0,7	0,5 - 0,7	0,3 - 0,5	0,1 - 0,3	< 0,1		x 3	
Stufigkeit	≥ 3	2	1	1 (> 80%)	0		x 2	
Mischungsform	> 0,2	0,15 - 0,2	0,1 - 0,15	0,05 - 0,1	< 0,05		x 2	
<b>Einstufung Bestand</b>								

## 2.4 Empfindlichkeitsbewertung

Die Empfindlichkeitsbewertung dient dazu, einen Waldbestand nach seiner Empfindlichkeit für Standortsdegradation zu bewerten. Bei beschränkter Ressourcenverfügbarkeit können so die einzusetzenden Mittel gezielt dort verwendet werden, wo sie die größte Wirkung entfalten.

Für eine Gesamtbewertung der Empfindlichkeit kalkalpiner Bergwälder wurde ein Bewertungsschema nach derzeitigem Kenntnisstand erstellt (Abbildung 4).

Dies erlaubt eine Reihung der einzelnen Waldbestände nach ihrer Empfindlichkeit. Die Reihung der Waldbestände erfolgt in vier Empfindlichkeitsstufen:

- degradierte Wälder
- Wälder mit hoher Empfindlichkeit
- Wälder mit mittlerer Empfindlichkeit
- Wälder mit geringer Empfindlichkeit

Diese lassen sich kartographisch darstellen und mit waldbaulichen Zielen und Maßnahmen verknüpfen.

		Einstufung Standort			
		1 – 1,9	2 – 2,9	3 – 3,9	4 – 5
Einstufung Bestand	1 – 1,9				
	2 – 2,9				
	3 – 3,9				
	4 – 5				

}

degradierte Wälder

Wälder mit hoher Empfindlichkeit

Wälder mit mittlerer Empfindlichkeit

Wälder mit geringer Empfindlichkeit

Abbildung 4: Bewertungsschema zur Ermittlung der Empfindlichkeit eines Waldbestandes.

*Scheme to evaluate the sensitivity of forest sites.*

### 3 ERGEBNISSE

#### 3.1 Standortdiagnose

Die effektive Gründigkeit des Bodens wurde anhand von zwei reliefbezogenen und zwei bodenbezogenen Prädiktoren mit einer Modellgüte von adj.  $R^2 = 0,371$  und einer erklärten Devianz von 34,7 % modelliert. Hangneigung und Substratchemie erwiesen sich mit einer Variablenbedeutung von 36,0 % bzw. 29,8 % als wesentliche Prädiktoren, gefolgt von Seehöhe (22,6 %) und Substratphysik (11,6 %). Das Modell zur effektiven Gründigkeit wurde beispielhaft für einen Gebietsausschnitt im Bezirk Reutte regionalisiert (Abbildung 5).

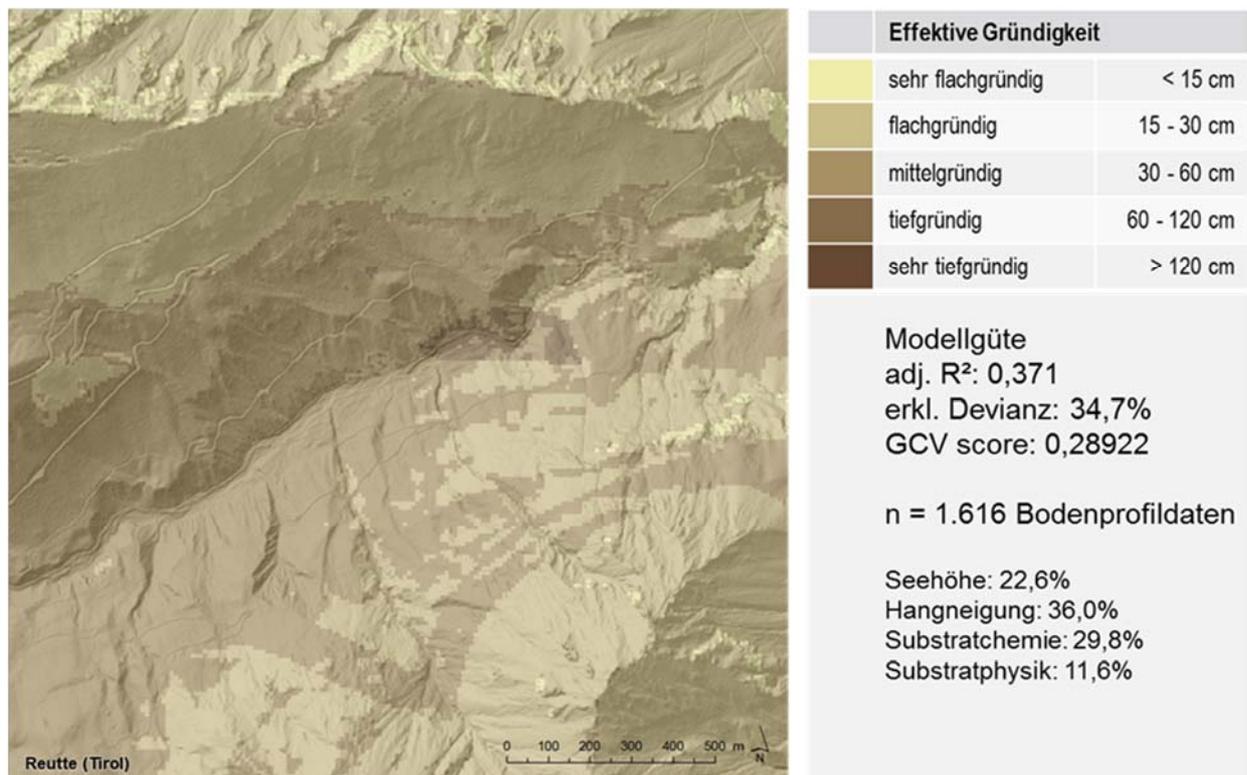


Abbildung 5: Modellierte effektive Gründigkeit des Bodens für das Beispielgebiet Reutte (Stufen der Gründigkeit nach Kilian 2002).

*Modelled effective soil thickness for the test area Reutte (levels of soil thickness according to Kilian 2002).*

Das Modell zur nutzbaren Wasserspeicherkapazität erzielt eine Modellgüte von  $\text{adj. } R^2 = 0,458$  und eine erklärte Devianz von 42,7 % (Abbildung 6). Das Modell wird vorrangig von der Substratchemie (Variablenbedeutung 38,7 %) und der Hangneigung (27,9 %) bestimmt. Als weitere Prädiktoren gingen die Seehöhe (12,6 %), der Bodenfeuchteindex (11,4 %) und die Substratphysik (9,3 %) in das Modell ein.

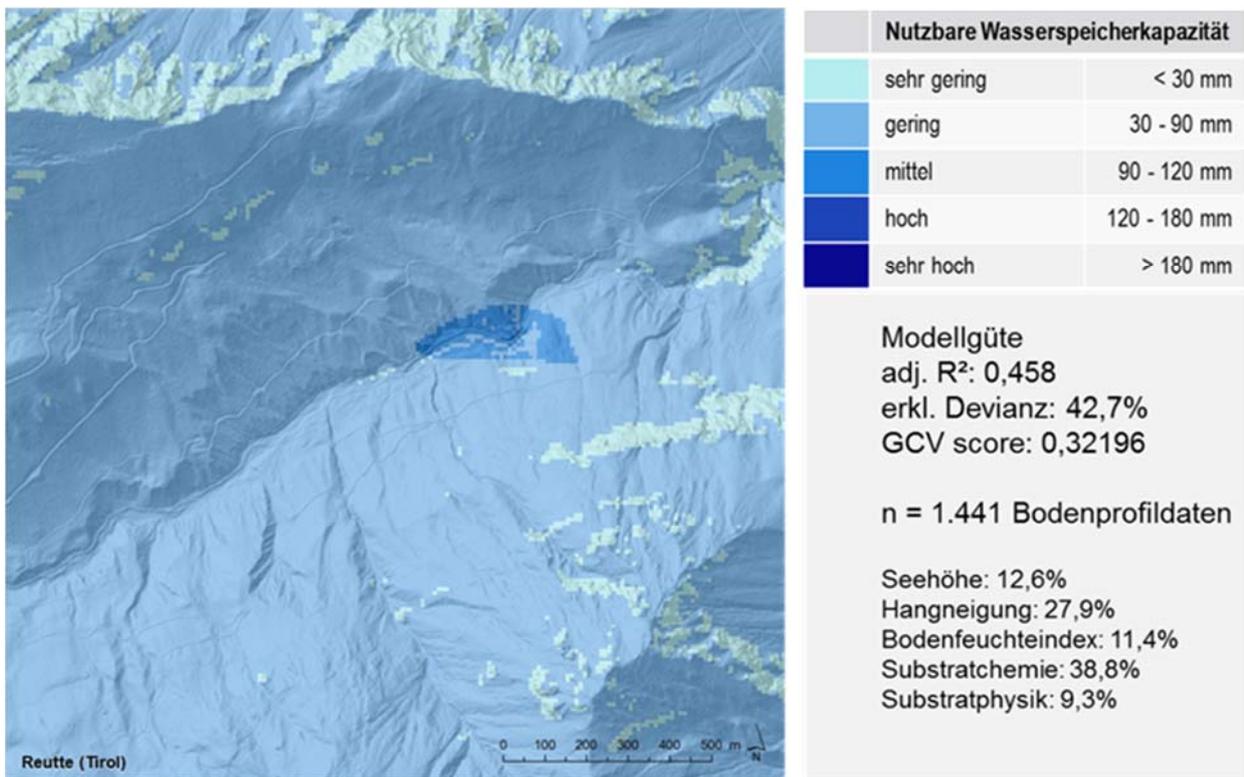


Abbildung 6: Modellierte nutzbare Wasserspeicherkapazität des Bodens für das Beispielgebiet Reutte.

*Modelled plant available water storage capacity for the test area Reutte.*

Die mittlere Nährstoffzahl weist eine Modellgüte von  $\text{adj. } R^2 = 0,468$  und eine erklärte Devianz von 49,3 % auf. Seehöhe (Variablenbedeutung 32,8 %), Substratchemie (23,3 %), Wölbung (11,3 %), Hangneigung (9,9 %), Bodenfeuchteindex (7,8 %), transformierte Exposition (7,5 %) und Substratphysik (7,4 %) gingen als signifikante Prädiktoren in das Modell ein (Abbildung 7).

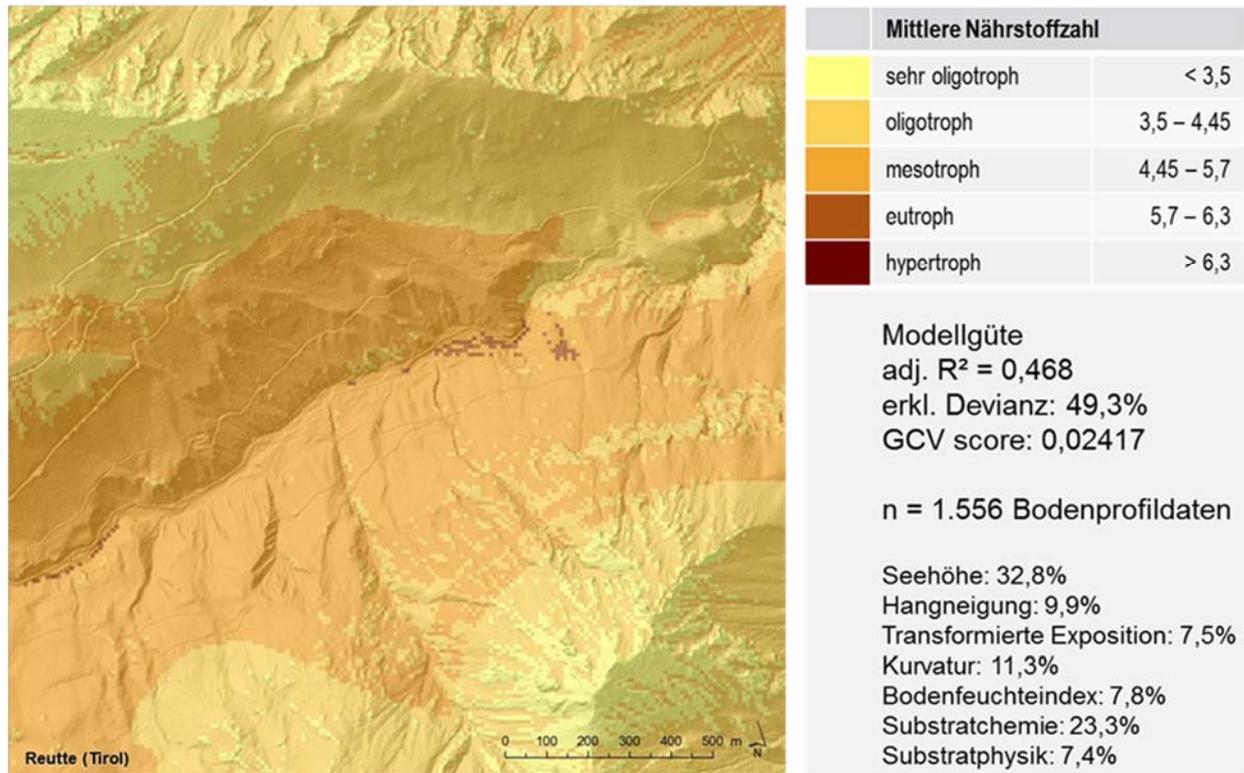


Abbildung 7: Modellierte mittlere Nährstoffzahl des Bodens für das Beispielgebiet Reutte (Stufen der mittleren Nährstoffzahl nach Ewald et al. 2013).

*Modelled average nutrient value for the test area Reutte (levels of average nutrient value according to Ewald et al. 2013).*

Das Random Forest-Modell der Bodentypen (Abbildung 8) zeigt eine Prognosesicherheit von 54,4 % und ist insbesondere geprägt von der Substratchemie (Variablenbedeutung 46,8 %) und der Substratphysik (32,2 %). Die reliefbezogenen Prädiktoren Hangneigung, Seehöhe, Bodenfeuchteindex, Wölbung und transformierte Exposition wiesen eine Variablenbedeutung von insgesamt 21 % auf.

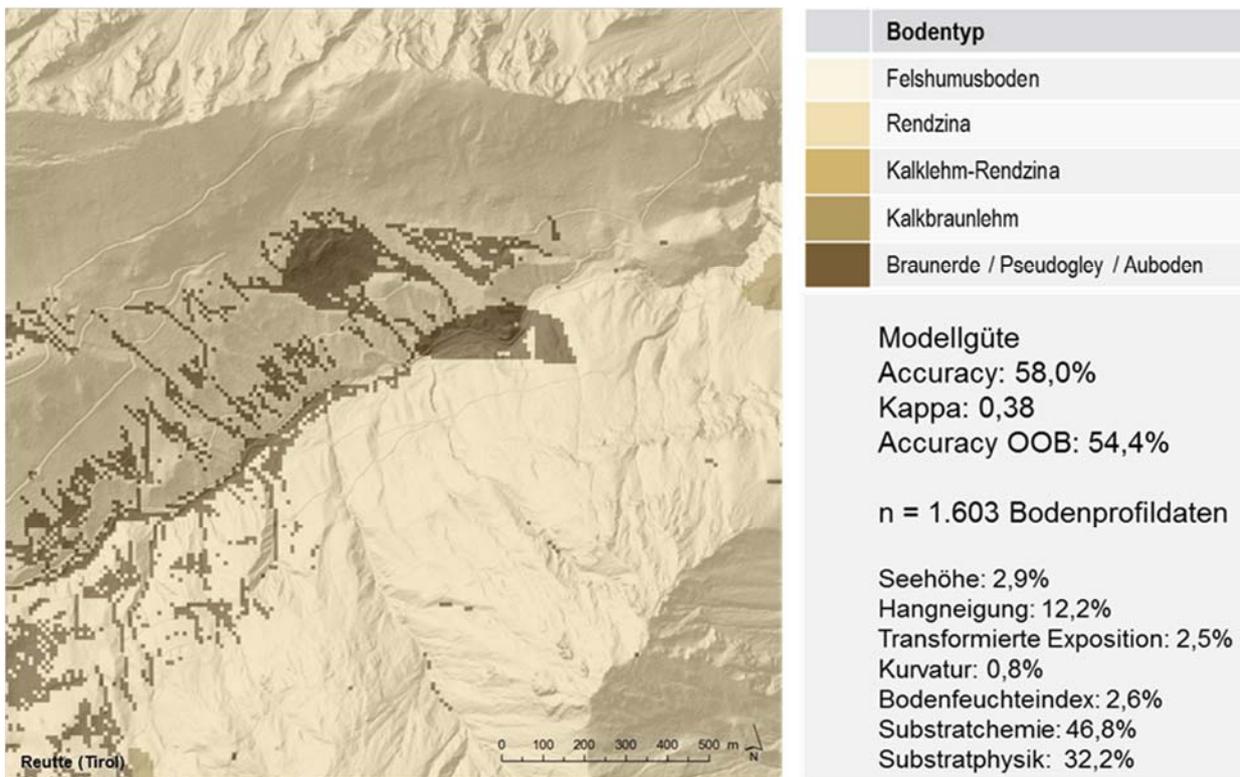


Abbildung 8: Modellierter Bodentypen für das Beispielgebiet Reutte.

*Modelled soil types for the test area Reutte.*

Die Humusform wurde mit einer Prognosesicherheit von 54,3 % modelliert (Abbildung 9). Als wesentliche Prädiktoren erwiesen sich die Substratphysik mit einer Variablenbedeutung von 32,1 % und die Seehöhe mit 25,2 %. Als weitere Prädiktoren gingen in das Modell die Hangneigung mit 14,7 %, die Substratchemie mit 13,2 %, der Bodenfeuchteindex mit 7,7 %, die Wölbung mit 4,1 % und die transformierte Exposition mit 2,9 % ein.

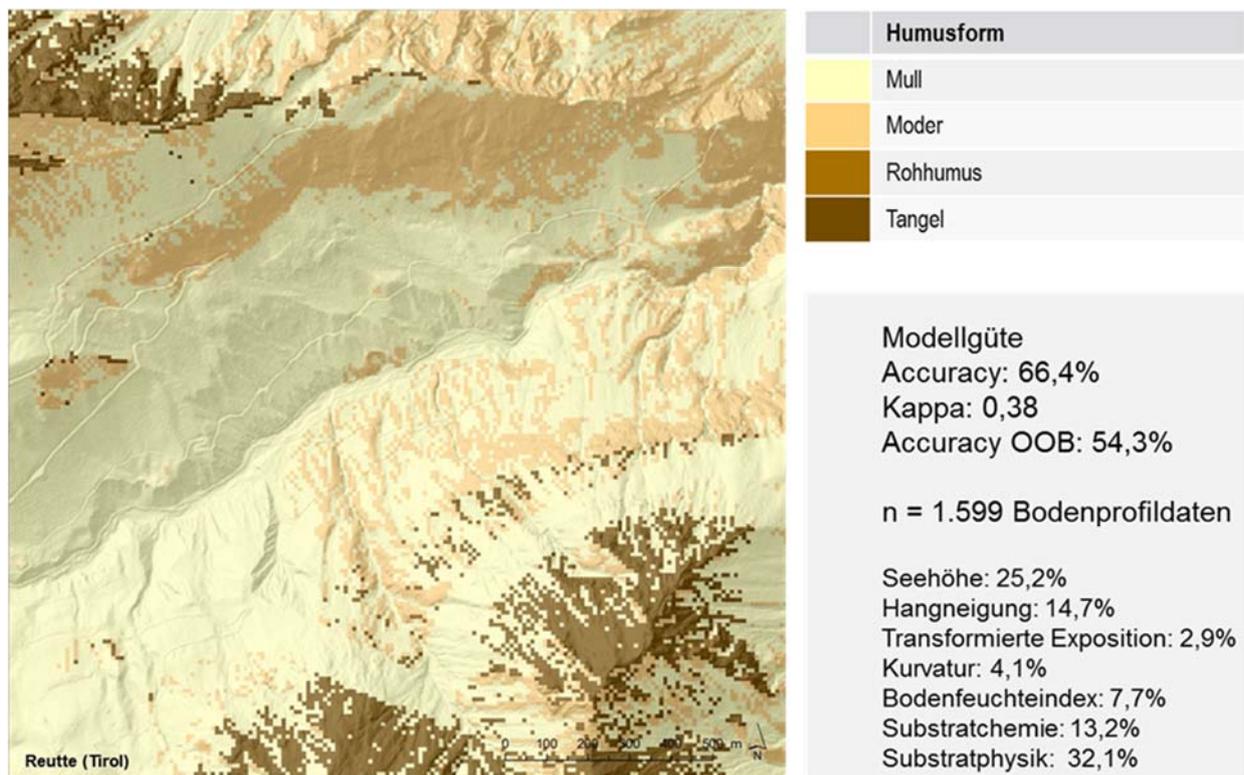
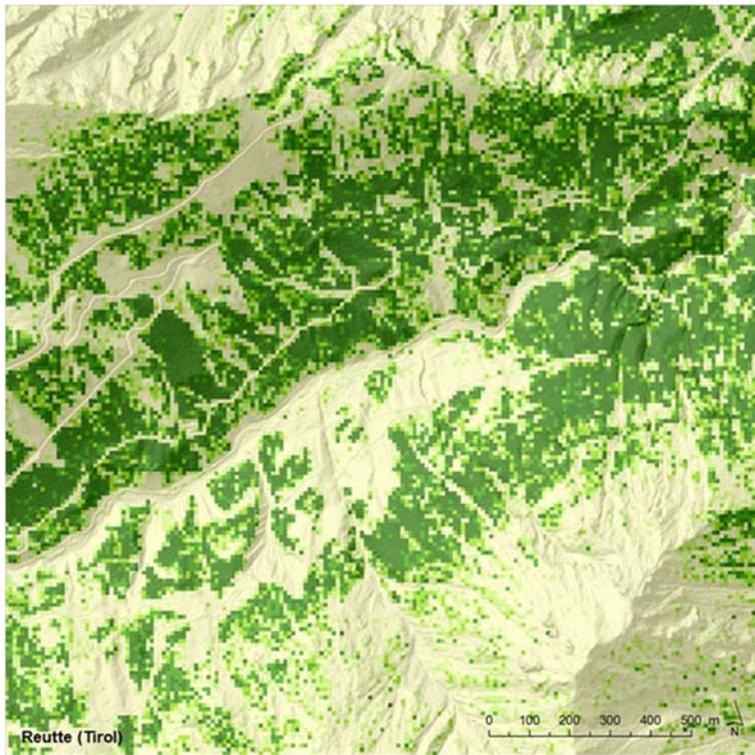


Abbildung 9: Modellierte Humusformen für das Beispielgebiet Reutte.

*Modelled humus forms for the test area Reutte.*

### 3.2 Strukturdiagnose

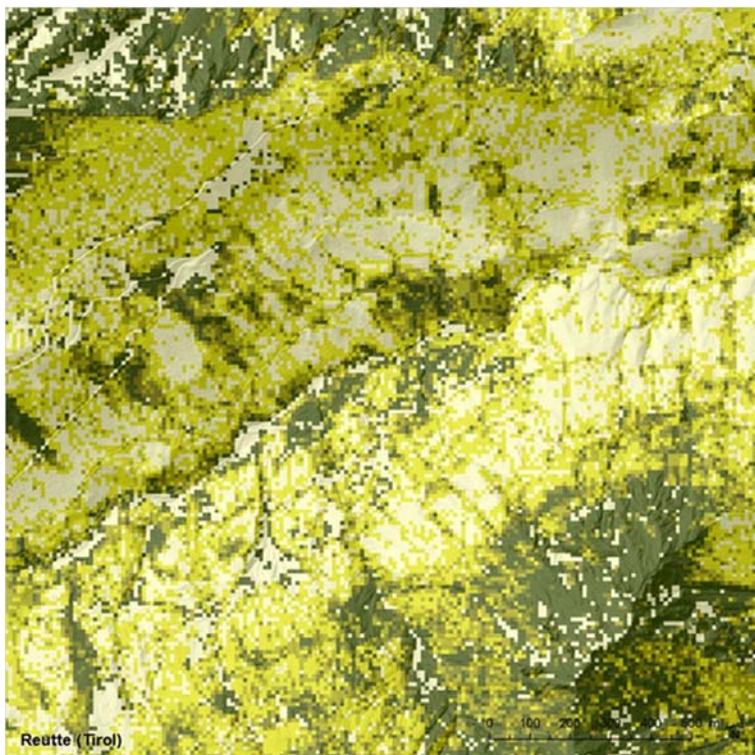
In der Strukturdiagnose wurden der Überschirmungsgrad (Abbildung 10), der Verjüngungsanteil (Abbildung 11), die Stufigkeit (Abbildung 12) und die Mischungsform (Abbildung 13) flächenhaft ermittelt.



Überschirmungsgrad (> 2 m Höhe)	
sehr gering	< 0,5
gering	0,5 - 0,7
mittel	0,7 - 0,8
hoch	0,8 - 0,9
sehr hoch	≥ 0,9

Abbildung 10: Überschirmungsgrad für das Beispielgebiet Reutte.

*Degree of canopy cover for the test area Reutte.*



Verjüngungsanteil (2-5 m Höhe)	
sehr gering	< 0,1
gering	0,1 - 0,3
mittel	0,3 - 0,5
hoch	0,5 - 0,7
sehr hoch	> 0,7

Abbildung 11: Verjüngungsanteil für das Beispielgebiet Reutte.

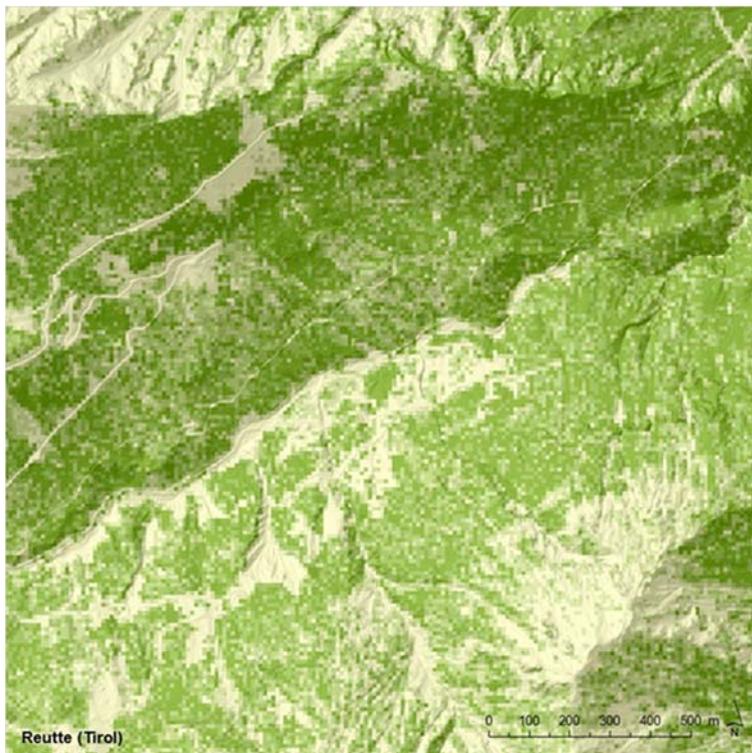
*Degree of regeneration for the test area Reutte.*



Stufigkeit (> 2 m Höhe)	
keine Schicht	0
einschichtig (80%)	1
einschichtig	1
zweischichtig	2
mehrschichtig	$\geq 3$

Abbildung 12: Stufigkeit für das Beispielgebiet Reutte.

*Horizontal canopy complexity for the test area Reutte.*



Mischungsform	
sehr gering	< 0,05
gering	0,05 - 0,1
mittel	0,1 - 0,15
hoch	0,15 - 0,2
sehr hoch	> 0,2

Abbildung 13: Mischungsform für das Beispielgebiet Reutte.

*Dispersion of canopy layers for the test area Reutte.*

### 3.3 Empfindlichkeit für Standortsdegradation

Ergebnis der Empfindlichkeitsbewertung ist eine Karte der Degradationsempfindlichkeit im Maßstab 1:25.000 für die vier Beispielgebiete (Abbildung 14).

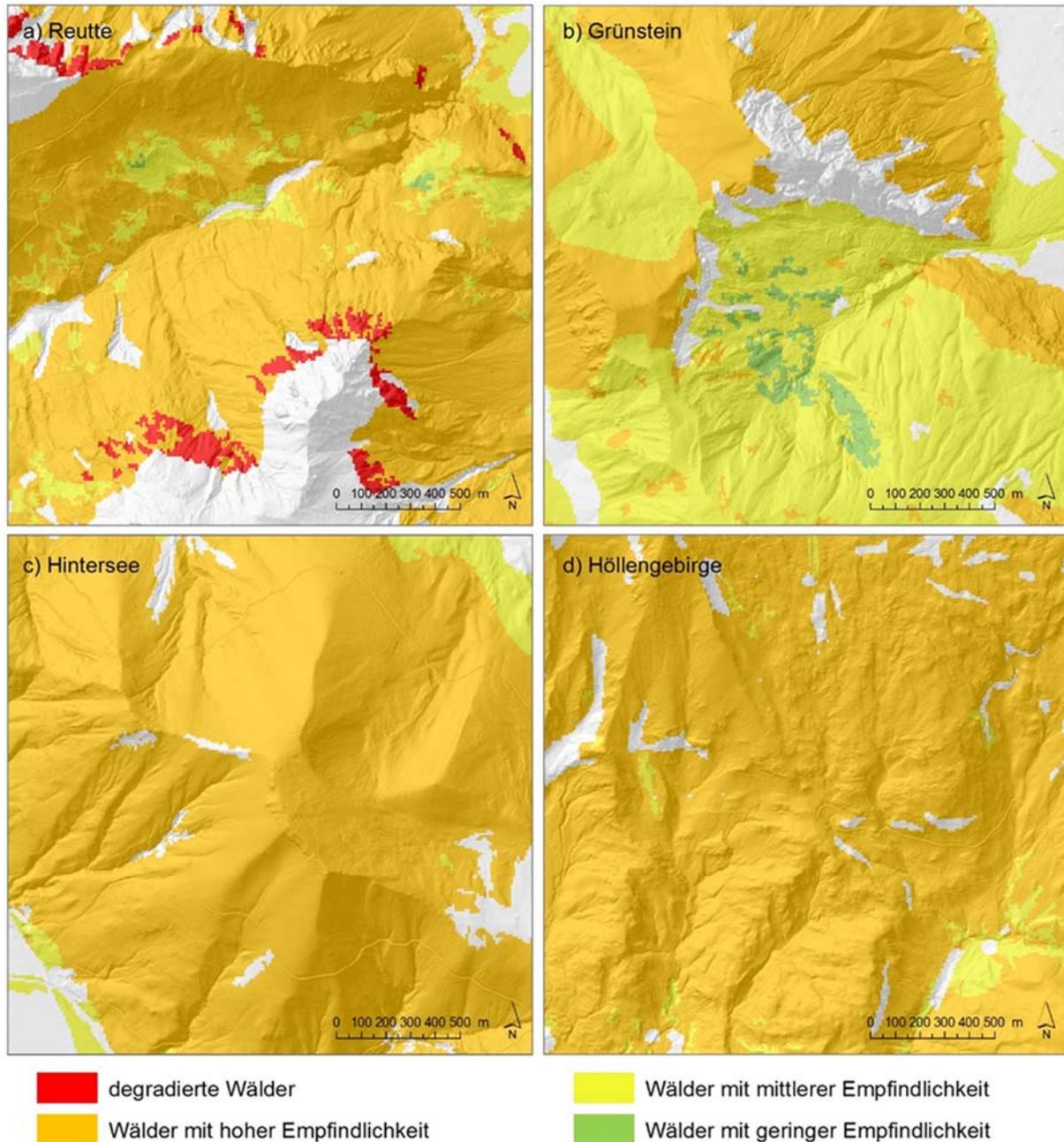


Abbildung 14: Empfindlichkeit der Bergwälder bezüglich Standortsdegradation in den Beispielgebieten Reutte, Grünstein, Hintersee und Höllengebirge.

*Sensitivity of mountain forests to site degradation in the test areas Reutte, Grünstein, Hintersee and Höllengebirge.*

Degradierete Wälder (z.B. nahezu waldfreie, vergraste Felshänge auf sehr flachgründigen Böden mit sehr geringer Wasserspeicherkapazität und Nährstoffversorgung) kommen derzeit nur im Beispielgebiet Reutte vor. Waldbauliches Ziel wäre hier der Aufbau der Humusaufgabe durch Humuspflge (z.B. Begründung eines Vorwaldes aus Pioniergehölzen, Belassen von Moderholz, Etablierung von Baumgruppen an günstigen Kleinstandorten).

Wälder mit hoher Empfindlichkeit sind in den Beispielgebieten weit verbreitet und umfassen oft strukturarme, einschichtige, lichte Wälder, z.T. auch Kalamitätsflächen auf flachgründigen Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität und angespannter Nährstoffversorgung. Der Aufbau der Humusaufgabe und der Aufbau mehrschichtiger Dauerbestockungen mit möglichst flächig vorhandener Verjüngung sind vorrangige Ziele auf diesen kritischen Flächen. So sollten nennenswerte Anteile des Holzvorrates als Totholz belassen werden. Die Verjüngung kann durch Einbringen von Mischbaumarten in vorhandene Bestandeslücken, durch rasche flächige Aufforstung von Kalamitätsflächen unter Nutzung von Kleinstandorten (ggf. Querleger zum Schutz der Pflanzungen) und ein angepasstes Jagdmanagement gefördert werden.

Wälder mit mittlerer Empfindlichkeit lassen sich in zwei Ausprägungen unterscheiden. In Wäldern mit ungünstigen Standortbedingungen aber günstiger Bestandesstruktur sollte die Humusaufgabe durch Humuspflge (z.B. Belassen des Schlagabraums, keine Nutzung im Baumverfahren) aufgebaut werden. Die günstige Bestandesstruktur kann durch Pflegemaßnahmen wie einzelstamm- bis gruppenweise Eingriffe und gezielte Förderung gewünschter Mischbaumarten erhalten werden. In Wäldern mit günstigen Standortbedingungen aber ungünstiger Bestandesstruktur hingegen sollten sich Maßnahmen auf die Bestandespflege durch Struktur-Durchforstung, die Förderung der Verjüngung (Nutzung von vorhandenen Bestandeslücken zur Vorausverjüngung, Einleitung der Naturverjüngung durch Plenter- und Femelhiebe, ggf. mit unterstützender Pflanzung) und ein angepasstes Jagdmanagement konzentrieren.

Wälder mit geringer Empfindlichkeit umfassen strukturreiche, mehrschichtige Wälder mit günstigen Standortbedingungen. Hier ist der Erhalt der vielfältigen, stabilen Bestandesstruktur und der funktionsfähigen Böden vorrangiges Ziel. Wesentliche waldbauliche Maßnahmen der Bestandespflege sind einzelstamm- bis gruppenweise Eingriffe und eine Förderung gewünschter Mischbaumarten. Die Naturverjüngung kann ggf. durch Plenter- bis Femelhiebe eingeleitet werden.

## 4 DISKUSSION

Im Rahmen des Teilprojektes wurde ein regelbasiertes Modellkonzept zur Abschätzung der Empfindlichkeit der kalkalpinen Bergwälder für Standortsdegradation entwickelt. Dabei wurden Techniken und Daten aus dem Bereich der digitalen Bodenkartierung und der Fernerkundung verwendet, die sich in der räumlichen Modellierung etabliert haben.

Die digitale Bodenkartierung ist weit verbreitet, um Bodeneigenschaften flächig abzuleiten (McBratney et al. 2003, Häring et al. 2012). Die verwendeten Regressions- und Klassifikationstechniken erlauben, Vorhersagen auch außerhalb des Untersuchungsgebietes zu treffen, wenn die Umweltbedingungen vergleichbar sind. Mit einer erklärten Devianz von 34,7 - 49,3 % bzw. einer Vorhersagewahrscheinlichkeit von 58,0 - 66,4 % liefern die Modelle eine zufriedenstellende Modellgüte. Die Modelle werden vorrangig von reliefbedingten Parametern aus hochaufgelösten Geländemodellen bestimmt. Trotz eines gröberen Maßstabes der Substratkarten spielen neben Reliefparametern auch chemische und physikalische Eigenschaften des Substrates als bodenbildende Faktoren in den Modellen eine wesentliche Rolle. Flächig vorliegende Geländemodelle und Substratkarten in hoher Auflösung sind daher gut geeignet, um statische, ökologisch relevante Informationen zu modellieren. Eine Verbesserung der Modellgüte könnte durch Einbeziehung von Informationen zum menschlichen Einfluss (z.B. Holznutzung, Weidenutzung) erzielt werden. Hier fehlen jedoch in der Regel flächendeckende Informationen.

In den vergangenen Jahren wurden Techniken der Fernerkundung verstärkt dazu genutzt, um die Effizienz und die Genauigkeit von Waldinventuren zu verbessern (McRoberts und Tomppo 2007). Eine Bestandesstrukturdiagnose ist dabei in hohem Maße abhängig von der Aktualität und einer hohen Auflösung der Fernerkundungsdaten. Die Qualität der Laserscannerdaten wird von der Punktdichte bestimmt. Die Kronenhöhe kann bei Laserscannerdaten unterschätzt werden (z.B. Naesset et al. 2004, Cashmer et al. 2006). Eine Unterschätzung der Kronenhöhe ist dabei im Allgemeinen größer bei kegelförmigen Kronen (z.B. Fichte) als bei kugelförmigen (Koch et al. 2008). Bei einer hohen Punktdichte jedoch liefern Laserscannerdaten zuverlässige Höhenschätzungen auch in unbelaubtem Zustand (Rönholm et al. 2004). Die verwendeten Informationen aus Laserscannerdaten werden deshalb oft zur Beschreibung der Bestandesstruktur von Wäldern genutzt (z.B. Naesset 2007, Hollaus et al. 2009). Als Alternative zu Laserscannerdaten können aber auch Kronenhöhen aus Luftbildern (z.B. Straub et al. 2012) und hochaufgelösten Satellitendaten (z.B. Straub et al. 2013) in Kombination mit digitalen Geländemodellen genutzt werden. Die abgeleiteten Kronenhöhen liefern horizontale Informationen zur Überschirmung. Eine Mehrfachüberschirmung kann mit diesem Verfahren nicht

berücksichtigt werden. Eine weitere Verbesserung würde die Integration der Baumartenzusammensetzung in der Strukturdiagnose liefern.

## 5 ANWENDUNG IN DER PRAXIS

Das entwickelte Verfahren ermöglicht es, die Empfindlichkeit der Bergwälder gegenüber Standortsdegradation abzuschätzen und daraus den forstlichen Handlungsbedarf abzuleiten. Bei beschränkter Ressourcenverfügbarkeit können so in der Forstpraxis die einzusetzenden Mittel gezielt dort verwendet werden, wo sie die größte Wirkung entfalten.

Die Hinweiskarte eignet sich als Entscheidungshilfe für die Planung auf der Ebene größerer Betriebseinheiten. Die Genauigkeit der Eingangsdaten begrenzt die Karte auf den Maßstab 1:25.000. Eine Beurteilung eines Einzelbestandes vor Ort für detaillierte Planungen kann sie jedoch nicht ersetzen.

## 6 LITERATUR

- Ammer, U., Breitsameter, J., Zander, J. (1995): Der Beitrag des Bergwaldes zum Schutz gegen Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. **Forstwissenschaftliches Centralblatt** 114, 232-249.
- Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (2003): Forstliche Standortaufnahme. 6. Auflage, IHW-Verlag, Eching bei München, 352 S.
- Beers, T.W., Dress, P.E., Wensel, L.C. (1966): Aspect transformation in site productivity research. **J. Forest** 64, 691-692.
- Bockstahler, T. (2006): Ein Verfahren zur Klassifikation von Schutzwäldern auf Hauptdolomitstandorten der Bayerischen Alpen. Diplomarbeit TU München, 142 S.
- Breiman, L. (2001): Random forests. **Machine Learning** 45(1), 5-32.
- Cashmer, L., Hopkinson, C., Treitz, P. (2006): Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. **Canadian Journal of Remote Sensing** 32(2), 116-125.
- Dengler, J., Jansen, F., Glöckler, F., Peet, R.K., De Cáceres, M., Chytrý, M., Ewald, J., Oldeland, J., Lopez-Gonzalez, G., Finckh, M., Mucina, L., Rodwell, J.S., Schaminée, J.H.J., Spencer, N. (2011): The Global Index of Vegetation-Plot Databases (GIVD): a new resource for vegetation science. **J. Veg. Sci.** 22, 582-597.
- Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W. (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* 18, Verlag Erich Goltze KG, Göttingen, 255 S.

- Ewald, J. (2009): Epigeic bryophytes do not improve bioindication by Ellenberg values in mountain forests. **Basic Appl. Ecol.** 10, 420-426.
- Fielding, A.H., Haworth, P.F. (1995): Testing the generality of bird-habitat models. **Conservation Biol.** 9, 1466-1481.
- Führer, E., Nopp, U. (2001): Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden. Facultas Universitätsverlag, Wien, S. 514.
- Gessler, P.E., Moore, I.D., McKenzie, N.J., Ryan, P.J. (1995): Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. **Int. J. Geogr. Inf. Systems** 9, 421-432.
- Göttlein, A., Baier, R., Bockstahler, T., Mellert, K.H. (2009): Schutzwirkungen zuverlässig beurteilen – Risikobasiertes Klassifikationsmodell für das Schutzwaldmanagement. **LWF aktuell** 71, 19-21.
- Göttlein, A., Kolb, E., Baier, R., Bockstahler, T., Mellert, K.H. (2011): Risikobasiertes Klassifikationsmodell für das Management von Schutzwäldern. **AFZ-DerWald** 15/2011, 32-35.
- Häring, T., Dietz, E., Osenstetter, S., Koschitzki, T., Schröder, B. (2012): Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision-tree based approach in Bavarian forest soils. **Geoderma** 185-186, 37-47.
- Hastie, T.J., Tibshirani, R.J. (1990): Generalized additive models. Chapman & Hall, London.
- Hijmans, R.J., van Etten, J., Mattiuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J.A., Lamigueiro, O.P., Bevan, A., Racine, E.B., Shortridge, A. (2013): raster: Geographic data analysis and modeling. R package version 2.1-66. Verfügbar unter: <http://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf>
- Hollaus, A.R., Katzensteiner, K., Mansberger, R. (2013): Methodische Ansätze zur Abschätzung der Erosion von Humuskarbonatböden. **Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft** 80, 3-12.
- Hollaus, M., Wagner, W., Schadauer, K., Maier, B., Gabler, K. (2009): Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach. **Canadian Journal of Forest Research** 39(7), 1387-1400.
- Hothorn, T., Hornik, K., Zeileis, A. (2006): Unbiased recursive partitioning: a conditional inference framework. **Journal of Computational and Graphical Statistics** 15, 651-674.
- Koch, B., Dees, M., Brusselen, J.v., Eriksson, L., Fransson, J., Gallaun, H., Leblon, B., McRoberts, R.E., Nilsson, M., Schardt, M., Seitz, R., Waser, L. (2008): Forestry applications. In: Li, Z., Chen, J., Baltsavias, E. (Hrsg.): Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information. ISPRS Congress Book, London, United Kingdom: Taylor & Francis Group, pp 439-465.

- Kolb, E. (2012): Interaktive Karte der Gesteinseigenschaften. **LWF aktuell** 87, 15-17.
- Kohlpaintner, M., Göttlein, A. (2009): Mit dem Wald verschwindet auch der Humus. **LWF aktuell** 71, 22–24.
- Mayer, M., Matthews, B., Schindlbacher, A., Katzensteiner, K. (2014): Soil CO<sub>2</sub> efflux from mountainous windthrow areas: Dynamics over 12 years post-disturbance. **Biogeosciences** 11, 6081-6093.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B. (2003): On digital soil mapping. **Geoderma** 117(1-2), 3-52.
- McRoberts, R.E., Tomppo, E.O. (2007): Remote sensing support for national forest inventories. **Remote Sensing and Environment** 110: 412-419.
- Mellert, K., Ewald, J. (2014): Regionalizing nutrient values of vegetation to assess site fertility of mountain forests in the Bavarian Alps. **Folia Geobotanica** 49, 407-423.
- Naesset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å., Söderman, U. (2004): Laser scanning of forest resources: the nordic experience. **Scandinavian Journal of Forest Research** 19(6), 482-499.
- Naesset, E. (2007): Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. **Scandinavian Journal of Forest Research** 22(5): 433-442.
- Nestroy, O., Aust, G., Blum, W.E.H., Englisch, M., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebel, P., Ortner, G., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W., Wagner, J. (2011): Systematische Gliederung der Böden Österreichs: Österreichische Bodensystematik 2000 in der Revidierten Fassung von 2011. **Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft** 79, 96 S.
- Paciorek, C.J. (2009): The importance of scale for spatial-confounding bias and precision of spatial regression estimators. Harvard University Biostatistics Working Paper Series, Working Paper 98. Verfügbar unter: <http://www.bepress.com/harvardbiostat/paper98>
- Pröll, G., Darabant, A., Gratzer, G., Katzensteiner, K. (2014): Unfavourable microsites, competing vegetation and browsing restrict post-disturbance tree regeneration on extreme sites in the Northern Calcareous Alps. **European Journal of Forest Research** 134(2), 293-308. DOI: 10.1007/s10342-014-0851-1
- R Core Team (2014): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Verfügbar unter: <http://www.R-project.org/>
- Reger, B., Kölling, C., Ewald, J. (2011): Modelling effective thermal climate for mountain forests in the Bavarian Alps: Which is the best model? **J. Veg. Sci.** 22, 677-687.

- Reger, B., Schüpferling, R., Beck, J., Dietz, E., Morovitz, D., Schaller, R., Wilhelm, G., Ewald, J. (2012): WINALPecobase - Ecological database of mountain forests in the Bavarian Alps. **Biodivers. Ecol.** 4, 167-171.
- Reger, B., Göttlein, A., Katzensteiner, K., Ewald, J. (2015): Assessing the Sensitivity of Mountain Forests to Site Degradation in the Northern Limestone Alps, Europe. **Mountain Research and Development** 35, 139-151.
- Rönholm, P., Hyypä, J., Hyypää, H., Haggrén, H., Yub, X., Kaartinen, H. (2004): Calibration of laser-derived tree height estimates by means of photogrammetric techniques. **Scandinavian Journal of Forest Research** 19(6), 524-528.
- Rücker, G., Mellert, K.H., Göttlein, A. (2010): Strukturdiagnose von Schutzwäldern mit Laserscannerdaten. In: Der gepixelte Wald – forstliche Fernerkundung vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen in Umwelt und Technik. **Forstliche Forschungsberichte München** 209, 9-17.
- Scheiring, H. (1998): Zum Sollzustand landeskulturell wichtiger (Berg)Wälder. In: Reimoser, F., Lackner, C., Schweiger-Adler, J., Hager, H. (Hrsg.): Zieldefinition bei der Waldsanierung. Österr. Ges. f. Waldökosystemforschung und experimentelle Baumforschung, **Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur** 12, 159-167.
- Straub, C., Seitz, R., Waser, L.T. (2012): Comparison of digital aerial images and airborne laser scanning data for timber volume estimation on plot level. ForestSAT 2012 conference, 11-14 September, Oregon State University, Corvallis, OR, USA.
- Straub, C., Tian, J., Seitz, R., Reinartz, P. (2013): Assessment of Cartosat-1 and WorldView-2 stereo imagery in combination with a LiDAR-DTM for timber volume estimation in a highly structured forest in Germany. **Forestry** 86(4), 463-473.
- Teepe, R., Dilling, H., Beese, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 166, 111-119.
- Wehrli, A., Brang, P., Maier, B., Duc, P., Binder, F., Lingua, E., Ziegner, K., Kleemayr, K., Dorren, L. (2007): Schutzwaldmanagement in den Alpen – eine Übersicht. **Schweiz. Z. Forstwes.** 158, 142-156.
- Wood, S.N. (2006): Generalized additive models – an introduction with R. Ed. 1. Chapman & Hall, Boca Raton, London, New York.
- Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R. (1987): Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms** 12, 47-56.

## HUMUSDYNAMIK AUF WALDSTANDORTEN IN DEN NÖRDLICHEN KALKALPEN

### *HUMUS DYNAMICS AT FOREST SITES OF THE NORTHERN CALCAREOUS ALPS*

**Mathias MAYER, Bradley MATTHEWS, Klaus KATZENSTEINER**

Institut für Waldökologie, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für  
Bodenkultur, A-1190 Wien

#### **SUMMARY**

In this study we investigated (1) the influence of tree regeneration on humus characteristics at windthrow sites, (2) the effect of forest gap harvest on soil carbon processes and (3) the effect of pioneer vegetation and tree regeneration on the carbon balance of a windthrow site. Tree regeneration had a generally positive influence on humus layer thickness and soil carbon stocks of windthrow sites; respective results were, however, statistically not significant. Canopy opening due to gap harvest increased soil temperature, which in turn might enhanced microbial decomposition of humus. Nevertheless, tree regeneration within the gap can dampen increased decomposition rates via shading. This was assessed to be positive for the sites humus stock. The carbon balance of a windthrow site was negative within the initial four years post-disturbance. This means the site was a carbon source to the atmosphere. An adequate tree regeneration is therefore a prerequisite in order to maintain site productivity at carbonate sites with shallow organic soils.

**KEYWORDS:** humus dynamics, soil carbon, windthrow, forest gap harvest

#### **ZUSAMMENFASSUNG**

Im Zuge des Teilprojektes Humusdynamik ist (1) der Einfluss von Vorverjüngung auf Humuseigenschaften nach Windwurf, (2) die Auswirkung eines Femelhiebes auf Bodenkohlenstoffprozesse sowie (3) der Effekt von Schlagvegetation und Verjüngung auf die Kohlenstoffbilanz einer Windwurffläche untersucht worden. Tendenziell haben sich vorverjüngte Bereiche positiv auf Humusmächtigkeit und Bodenkohlenstoffvorrat nach Windwurf ausgewirkt. Die diesbezüglichen Unterschiede zu nichtverjüngten Bereichen waren jedoch statistisch nicht gesichert. Die Femelhiebsstudie hat gezeigt, dass ein Anstieg der Bodentemperatur infolge der Öffnung des Kronendachs, Abbauprozesse im Humus sehr wahrscheinlich ankurbelt. Eine vorhandene Vorverjüngung im Femelloch kann einen temperaturbedingten, erhöhten mikrobiellen Abbau durch Bodenbeschattung jedoch abschwächen. In Bezug auf den Humusvorrat wird dies als positiv bewertet. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass es in den ersten vier Jahren nach Windwurf zu beträchtlichen Kohlenstoffverlusten an die Atmosphäre gekommen ist. Das heißt, die Windwurffläche hat eine negative Kohlenstoffbilanz vorgewiesen (=Kohlenstoffquelle). Damit sich das Standortpotential seichtgründiger Karbonatstandorte nach Störung langfristig nicht verschlechtert, ist eine adäquate Verjüngung demnach unumgänglich.

**STICHWÖRTER:** Humusdynamik, Bodenkohlenstoff, Windwurf, Femelhieb

## 1 EINLEITUNG

Auf montanen und alpinen Waldstandorten der Nördlichen Kalkalpen ist der durchwurzelte Boden in seiner Funktion als Nährstoff-, Kohlenstoff- und Wasserspeicher sehr oft auf geringmächtige Humusaufgaben über Gestein beschränkt. Nach großflächigen Störereignissen, wie Windwurf oder Borkenkäferbefall, kann eine erhöhte Mineralisierung zu drastischen Humus- bzw. Bodenkohlenstoffverlusten beitragen. Solche Verluste können langfristige, negative Auswirkungen auf Bodenfunktion und Standortseigenschaften mit sich führen. In einer Untersuchung aus der Schweiz, wurde eine Reduktion des Bodenkohlenstoffs (C) von bis zu  $25 \pm 3 \text{ t C ha}^{-1}$  20 Jahre nach einem Windwurf nachgewiesen (Rusch et al. 2009). Auch Spielvogel et al. (2006) haben festgestellt, dass die Bodenkohlenstoffvorräte auf 25-jährigen Borkenkäferflächen im Nationalpark Bayerischer Wald im Vergleich zu ungestörten Vergleichsbeständen um 30 % reduziert waren. Im Interreg Projekt „SicAlp – Standortssicherung im Kalkalpin“ konnte gezeigt werden, dass die Bodenatmung auf Windwurfflächen in den oberösterreichischen Kalkalpen bis zu  $\sim 5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  ausmachen kann (Mayer et al. 2014). Eine Ankurbelung der Kohlenstoffmineralisierung ist dabei mit einer erhöhten Bodentemperatur in Verbindung gebracht worden, welche wiederum aus einer fehlenden Beschattung durch Verjüngung resultierte. Eine praxisrelevante Empfehlung aus „SicAlp“ war daher, eine vitale Verjüngung auf Störungsflächen so rasch wie möglich zu etablieren, um einen Humusverlust durch erhöhte Mineralisierung zu reduzieren. Dies ist vor allem auf südexponierten Standorten mit organisch dominierten Auflagehumusböden von besonderer Bedeutung (Katzensteiner et al. 2009). Prietzel und Ammer (2009) konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass eine gesicherte Verjüngung generell einen günstigen Einfluss auf die Humuseigenschaften (z.B. Humusvorrat, Mächtigkeit, C/N-Verhältnis) montaner Bergmischwälder der Kalkalpen hat. Umgekehrt wies die Verjüngung unter günstigen Humuseigenschaften eine ausgewogenere Baumernährung auf. Demnach ist ein genaues Verständnis von Verjüngungseffekten auf die (Boden)Kohlenstoff- und Humusdynamik nach großflächigen Waldstörungen, gerade im Hinblick auf die langfristige Erhaltung des Standortspotentials, von großer Bedeutung.

### 3 FRAGESTELLUNGEN

Das StratAlp Teilprojekt „Humusdynamik“ hat sich im Wesentlichen in drei Versuche gegliedert, in welchen folgende Fragenstellungen behandelt worden sind:

- I. Wie wirkt sich eine bei Störungseintritt (Windwurf) vorhandene Baumverjüngung auf die Humusdynamik seichtgründiger Karbonatstandorte der Nördlichen Kalkalpen aus?
- II. Welchen Einfluss hat die verjüngungseinleitende waldbauliche Maßnahme eines Femelhiebes auf die Bodenkohlenstoffdynamik seichtgründiger Karbonatstandorte?
- III. Welchen Einfluss hat eine nach Windwurf aufkommende Schlagvegetation und Verjüngung auf die Kohlenstoffbilanz eines Standorts?

### 4 METHODIK

#### 4.1 Versuch 1 – Verjüngungseinfluss auf Humus

##### 4.1.1 Versuchsdesign

Die Untersuchungsflächen zu Versuch 1 befanden sich im Höllengebirge (Oberösterreich) und in Hintersee (Salzburg). In beiden Gebieten haben im Jahr 2007 verheerende Winterstürme zu großflächigen Windwürfen geführt (Abbildung 1). Um den Einfluss von Vorverjüngung auf die Humusdynamik nach diesem Störereignis zu untersuchen, wurden folgende Teilflächen ausgeschieden: *Windwurffläche ohne Verjüngung (WOV)*, *Windwurffläche mit Verjüngung (WMV)*, *Bestand ohne Verjüngung (BOV)* und *Bestand mit Verjüngung (BMV)*. Die Teilflächen BOV und BMV haben sich in zu den Windwurfflächen angrenzenden Altbeständen befunden. Bei diesen handelte es sich um weitestgehend intakte Mischwälder. Es wurde angenommen, dass die jeweiligen Bestandessituationen jenen der Windwurfflächen vor dem Störereignis entsprachen.



Abbildung 1: Die Windwurfflächen im Höllengebirge (links) und in Hintersee (rechts).

*Windthrow areas at Höllengebirge (left) and Hintersee (right).*

Pro Gebiet und Teilfläche wurden je 6 Aufnahmepunkte ausgewählt. Als Teilfläche WMV sind Bereiche gewählt worden, auf welchen bereits vor Störungseintritt eine Baumverjüngung etabliert war. Das Alter der verjüngten Bäume wurde dabei mittels Zählung der Astquirle bestimmt. Die Verjüngungsbereiche der Teilflächen BMV sind weitestgehend in kleineren (< 15 m), natürlichen Bestandeslücken zu finden gewesen. Im Untersuchungsgebiet Hintersee wurde auf Grund fehlender Verjüngung im Bestand keine Teilfläche BMV ausgewählt. Daher ergaben sich in Summe 24 Aufnahmepunkte im Höllengebirge und 18 Aufnahmepunkte in Hintersee.

Pro Aufnahmepunkt wurden auf einem festgelegten 3 x 3 m Bereich (welcher weiter unterteilt war in einen 1 x 1 m Raster, Abbildung 2) mittels Profilirohr (6 cm Durchmesser) 5 Bodenproben entnommen und deren Horizontmächtigkeiten bestimmt (Abbildung 2). Das Probenmaterial wurde horizontweise in Plastiksäcke verpackt und bis zur Laborüberstellung nach Wien gekühlt gelagert. Im Labor wurde das Probenmaterial in Wurzeln, Grobskelett und Feinboden getrennt. Die Proben wurden getrocknet (105 °C) und deren Trockenmassen bestimmt. Der Feinboden wurde pro Aufnahmepunkt und Horizont zu gleichen Teilen vermischt. Von diesen Mischproben wurde der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt bestimmt (LECO).

Die Probenahme im Höllengebirge wurde im Sommer 2013 im Zuge einer Bakkalaureatsarbeit durchgeführt. Die Probenahme in Hintersee wurde im späten Frühjahr 2014 durchgeführt. Die Aufarbeitung des Probenmaterials aus dem Höllengebirge und von Hintersee wurde im Winter 2013/2014 bzw. im Sommer 2014 durchgeführt.



Abbildung 2: Aufnahmepunkt (3 x 3 m) mit 1 x 1 m Raster (links) und ein entnommener Bohrkern (rechts).  
*Sampling plot (3 x 3 m) with 1 x 1 m raster (left) and a typical soil core (right).*

#### 4.1.2 Statistische Auswertung

Für die Analyse wurden die Humusmächtigkeit und der Kohlenstoffvorrat des L-, F-, H- und A-Horizontes der Bodenproben herangezogen. Das C/N-Verhältnis wurde nur für den H-Horizont untersucht. Mittels Varianzanalyse wurde getestet, ob sich die Teilflächen bezüglich der Humusparameter unterscheiden.

#### 4.2 Versuch 2 – Kohlenstoffflüsse Femelhieb

Der Einfluss eines verjüngungseinleitenden Femelhiebes auf die Humus- und Kohlenstoffdynamik wurde auf einer Intensivmessfläche im Hölleengebirge untersucht. Der Versuch wurde im Mai 2013 gestartet und bis Projektende weitergeführt. Die dabei durchgeführten Messungen umfassten Bodenatmungs- und Mineralisierungsmessungen, sowie Bodentemperatur- und Bodenfeuchtemessungen. Bodenatmung, -temperatur und -feuchte wurden in diskontinuierlicher (monatlich) und kontinuierlicher (halbstündlich) Form gemessen, um sowohl eine räumliche als auch zeitliche Variabilität der Parameter bestmöglich zu erfassen. Nach einer 3-monatigen Vorlaufphase der Messungen (Mai bis Anfang August 2013), wurde Mitte August 2013 ein Femelloch mit einem Durchmesser von ca. 1,5 Baumlängen geschlagert (Abbildung 3). Dabei wurde das gesamte Astmaterial von der Versuchsfläche entfernt, um möglichst extreme bodenklimatische Gegebenheiten zu schaffen.



Abbildung 3: Das im August 2013 geschlägerte Femelloch. Zu sehen ist der bereits vorverjüngte Bereich links im Bild (FMV) und der nicht verjüngte Bereich rechts im Bild (FOV).

*Experimental gap with a regenerated (on the left) and a non-regenerated (on the right) area. The gap was produced by stand harvesting in August 2013.*

#### 4.2.1 Versuchsdesign

Die Versuchsfläche zur intensiven Beobachtung der Humusdynamik wurde Anfang Mai 2013 auf einem ca. 40 x 40 m Bereich im selben Altbestand wie für Versuch 1 abgesteckt. Die Fläche umfasste einen nicht verjüngten sowie einen verjüngten Bereich, welcher je ca. 50 % der Fläche eingenommen hat. Die Überschildung des Altbestandes war ca. 90 % und relativ homogen. Die vorhandene Vorverjüngung war im Durchschnitt ca. 12 Jahre alt. Pro Teilfläche wurden je 12 Plastikringe mit 10 cm Durchmesser und 4 cm Höhe für Bodenatmungsmessungen installiert. Da diese Fläche im August 2013 geschlägert wurde (Abbildung 3), waren zusätzlich zwei Kontrollflächen, mit und ohne Verjüngung, ebenfalls mit 12 Ringen ausgestattet. Somit ergeben sich vier Teilflächen: *Femelloch ohne Verjüngung* (FOV), *Femelloch mit Verjüngung* (FMV), *Kontrollbestand ohne Verjüngung* (BOV) und *Kontrollbestand mit Verjüngung* (BMV). In Teilfläche BOV wurden bereits in SicAlp etablierte Messpunkte herangezogen. Um das Verhältnis der Bodenatmungskomponenten Wurzelatmung und mikrobielle Atmung (=Kohlenstoffmineralisierung) im Bestand zu ermitteln, wurden die ebenfalls im Projekt SicAlp installierten „Trenchingflächen“ weiter beprobt. Dabei wurden die Wurzeln rund um einen ca. 3

m<sup>2</sup> Bereich durchtrennt und ein Wiedereinwachsen durch eine Teichfolie verhindert. Es wurde angenommen, dass die darin gemessene Bodenatmung dem bei der Kohlenstoffmineralisierung entstehenden Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) entspricht.

#### 4.2.2 Messungen

Diskontinuierliche Bodenatmung wurde monatlich mit einem tragbaren Infrarotgasanalysator (EGM-4, PP-Systems, UK) gemessen, indem eine daran angeschlossene Messkammer auf die im Boden installierten Plastikringe aufgesetzt wurde. Zusätzlich dazu wurden Bodentemperatur und Bodenfeuchte mittels Einstichthermometer und mobiler TDR Sonde bestimmt. Kontinuierliche Bodenatmung wurde über automatische Messkammern erfasst, welche an einen stationären Infrarotgasanalysator (IRGA) angeschlossen waren. Jede Kammer hat zweimal pro Stunde gemessen. Im Bestand und im Femelloch sind je 4 Messkammern des Typs LI-8100 (Licor Biosciences, USA) installiert worden (Abbildung 4). Die kontinuierlichen Bodenatmungsmessungen wurden nur während der schneefreien Vegetationszeit 2013 und 2014 durchgeführt. Die Stromversorgung erfolgte über Batterien, welche mittels Solarstrom geladen wurden. Bodentemperatur und Bodenfeuchte wurden im Bestand und im Femelloch mit GS3 Sensoren (Decagon Devices, USA) gemessen. Die Daten wurden mit einem EM50 Datenlogger (Decagon Devices, USA) gespeichert. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an Messkammern und Sensoren ist nur in Bestand und Femelloch unterschieden worden. Eine weitere Unterteilung in verjüngte bzw. nicht verjüngte Teilflächen wurde nicht gemacht. Streufall im Bestand und im Femelloch wurde mit insgesamt 12 Plastikwannen (33 x 71 cm) und 8 Plastikkübeln (38 cm Ø) gesammelt. Die gesammelte Streu wurde bei 105 °C getrocknet und anschließend abgewogen.

Im Sommer 2014 wurde pro Teilfläche Humusmaterial (H-Horizont) geworben, das im Labor gesiebt (4 mm) und bei 15 °C für 2 Tage inkubiert wurde. Während der Inkubation wurde die mikrobielle Atmung (Kohlenstoffmineralisierung) an 20 Teilproben mittels IRGA (SBA-4, PP-Systems, UK) gemessen (Abbildung 5).



Abbildung 4: Automatische Kammer zur kontinuierlichen Messung der Bodenatmung (links) und Infrarotgasanalysator und Multiplexer (rechts).

*Automated chamber for continuous soil respiration measurements (left) and infrared gas analyser and multiplexer (right).*



Abbildung 5: Inkubator mit 20 Messkammern zur Messung von Kohlenstoffmineralisierung im Labor.

*Incubator with 20 chambers for carbon mineralisation measurements in the lab.*

### 4.2.3 Statistische Auswertung

Die monatlich gemessenen Werte der Bodenatmung, -temperatur und -feuchte wurden auf Unterschiede zwischen den Teilflächen mittels Varianzanalysen (mit Wiederholungsmessungsstruktur) (Pinheiro und Bates 2000) getestet. Bei entsprechend signifikanten Unterschieden wurde mittels Tukey's post-hoc Test geprüft, welche Teilflächen sich voneinander unterscheiden. Die Analysen wurden sowohl für den Zeitraum vor, als auch nach Etablierung des Femelhiebes durchgeführt. Die Zusammenhänge zwischen Bodentemperatur und Bodenatmung wurden mit einer  $Q_{10}$  Funktion ausgeglichen (Janssens et al. 2003). Dafür wurden die kontinuierlich gemessenen Daten für die Vegetationsperiode 2014 herangezogen. T-Tests wurden angewendet um zu prüfen, ob sich Bestand und Femelloch in Bezug auf den Streufall unterscheiden. Unterschiede zwischen den Teilflächen in Bezug auf mikrobielle Atmung wurden mit einer einfachen Varianzanalyse getestet. Alle Auswertungen wurden im Statistikprogramm R durchgeführt (R Core Team 2013).

## 4.3 Versuch 3 – Kohlenstoffbilanz Windwurf

Messungen zur Kohlenstoffbilanz nach Windwurf wurden im Höllengebirge auf einer bereits in SicAlp etablierten Versuchsfläche weitergeführt. Mit Hilfe der Eddy-Covarianz Technik ist der Kohlenstoff-, Energie- und Wasserdampfaustausch zwischen Atmosphäre und Ökosystem, zeitlich hochaufgelöst, während der Vegetationsperiode 2013 gemessen worden. So war es möglich die Netto-Ökosystemproduktion an Kohlenstoff zu ermitteln.

### 4.3.1 Messungen

Die verwendeten Messinstrumente waren ein open-path IRGA (LI-7500A, Licor, USA) und ein Sonic Anemometer (GILL, UK), angeschlossen an einen Datenlogger (Licor, USA). Die Stromversorgung erfolgte über Batterien, welche mittels Solarstrom geladen wurden. Zur Erfassung der Klimaparameter wurde die im Projekt SicAlp aufgebaute Wetterstation weiter betrieben (Abbildung 6).

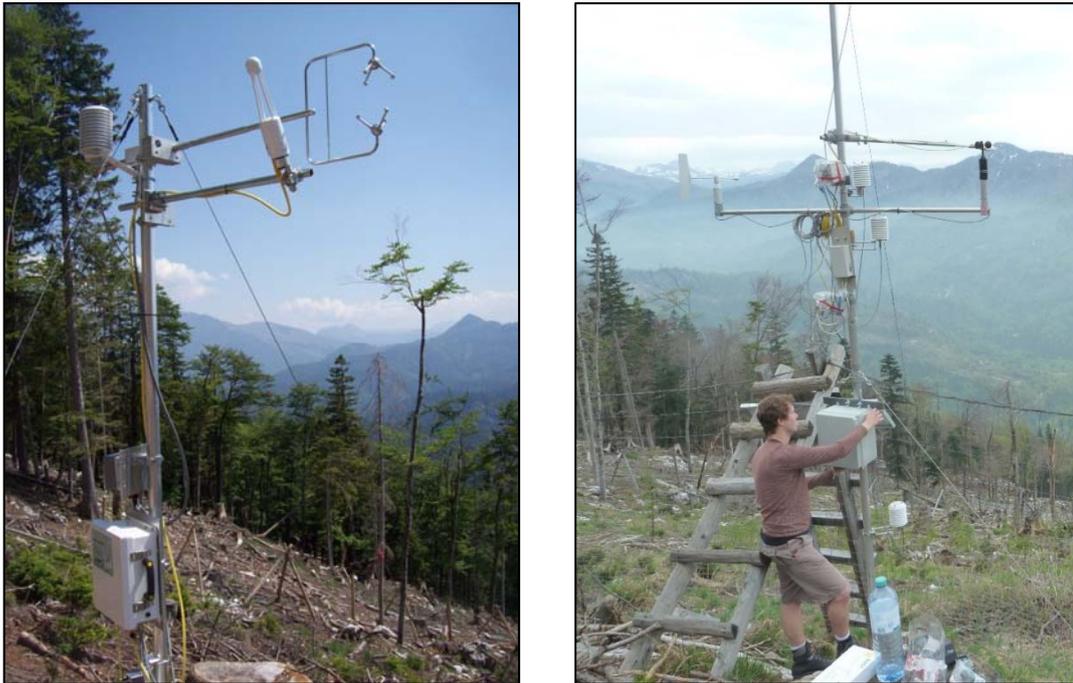


Abbildung 6: Eddy Covarianz Messturm (links) und Wetterstation (rechts) auf einer Windwurffläche im Höllengebirge.

*Eddy covariance tower (left) and weather station (right) at a windthrow site at Höllengebirge.*

### 4.3.2 Datenauswertung

Die Datenauswertung der Eddy-Covarianz Messungen erfolgte mit der Software Eddy-Pro (Licor, USA). Eine weitere Datenmanipulation (z.B. Footprint Analyse, Datenfilterung) erfolgte nach Standardmethoden der Qualitäts- und Genauigkeitsprüfung (Mauder et al. 2013). In die Analyse wurden auch die Daten aus dem Projekt SicAlp (2010 bis 2012) miteinbezogen.

## 5 ERGEBNISSE

### 5.1 Versuch 1 – Verjüngungseinfluss auf Humus

In Bezug auf die erhobenen Humusparameter konnte weder in Hintersee noch im Höllengebirge ein Unterschied zwischen den Teilflächen *Windwurf ohne Verjüngung* (WOV), *Windwurf mit Verjüngung* (WMV), *Bestand ohne Verjüngung* (BOV) und *Bestand mit Verjüngung* (BMV) festgestellt werden (Abbildung 7). Dennoch zeigte die Teilfläche WMV auf beiden Standorten tendenziell höhere Humusmächtigkeiten und Kohlenstoffvorräte. Dies war statistisch jedoch nicht gesichert ( $p > 0,05$ ).

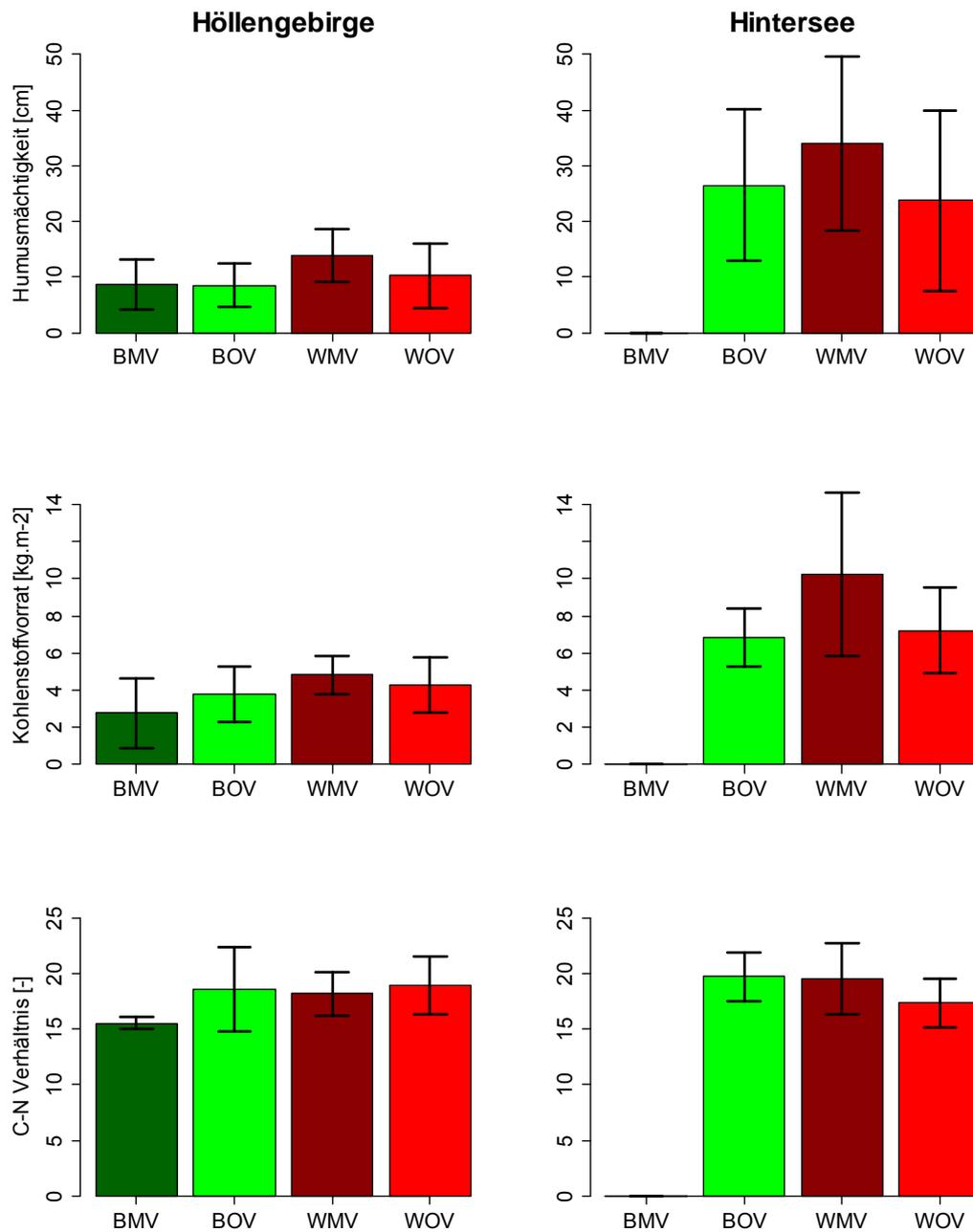


Abbildung 7: Mittlere Humusmächtigkeit (oben), Kohlenstoffvorrat (Mitte) und C/N-Verhältnis (unten) der Teilflächen „Windwurf ohne Verjüngung“ (WOV), „Windwurf mit Verjüngung“ (WMV), „Bestand ohne Verjüngung“ (BOV) und „Bestand mit Verjüngung“ (BMV), erhoben für die Versuchsgebiete Höllengebirge und Hintersee. Aufgrund fehlender Verjüngung im Bestand hat es in Hintersee keine Teilfläche BMV gegeben. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung.

*Average humus thickness (upper panel), soil carbon stocks (middle panel) and C/N ratio (lower panel) for Höllengebirge and Hintersee. Abbreviations: “windthrow without regeneration” (WOV), “windthrow with regeneration” (WMV), “stand without regeneration” (BOV) and “stand with regeneration” (BMV). No WMV treatment was established at Hintersee. Error bars represent standard deviation.*

## 5.2 Versuch 2 – Kohlenstoffflüsse Femelhieb

Für die Vorlaufphase (vor der Schlägerung des Femellochs) von Mai bis August 2013 konnte in Bezug auf Bodenatmung, -temperatur und -feuchte kein signifikanter Unterschied zwischen den Teilflächen BOV, BMV, FOV und FMV festgestellt werden (Abbildung 8). Somit war eine vergleichbare Ausgangssituation der Teilflächen sichergestellt. Auch nach Etablierung des Femellochs konnte zwischen den Teilflächen bezüglich Bodenfeuchte und Bodenatmung kein Unterschied festgestellt werden. In Bezug auf die Bodentemperatur konnte im nichtverjüngten Teil des Femellochs (FOV) ein signifikanter Anstieg ( $p < 0,05$ ) im Vergleich zu den beiden Teilflächen im Bestand nachgewiesen werden. Auch die zeitlich hochaufgelösten kontinuierlichen Messungen von Bodenatmung und Bodenfeuchte zeigten keine wesentlichen Unterschiede zwischen Bestand und Femelloch (Abbildung 8). Die Bodentemperatur im Femelloch war auch bei den kontinuierlichen Messungen deutlich höher als im Bestand. Die Temperatursensitivität der Bodenatmung war im Bestand ( $Q_{10}$  Wert = 2,6) deutlich höher als im Femelloch ( $Q_{10}$  Wert = 1,4) (Abbildung 9). Der Streufall war im Bestand signifikant ( $p < 0,05$ ) höher als im Femelloch (Abbildung 10). Bei der mikrobiellen Atmung bzw. Kohlenstoffmineralisierung bei 15 °C Inkubationstemperatur konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Teilflächen festgestellt werden (Abbildung 11).

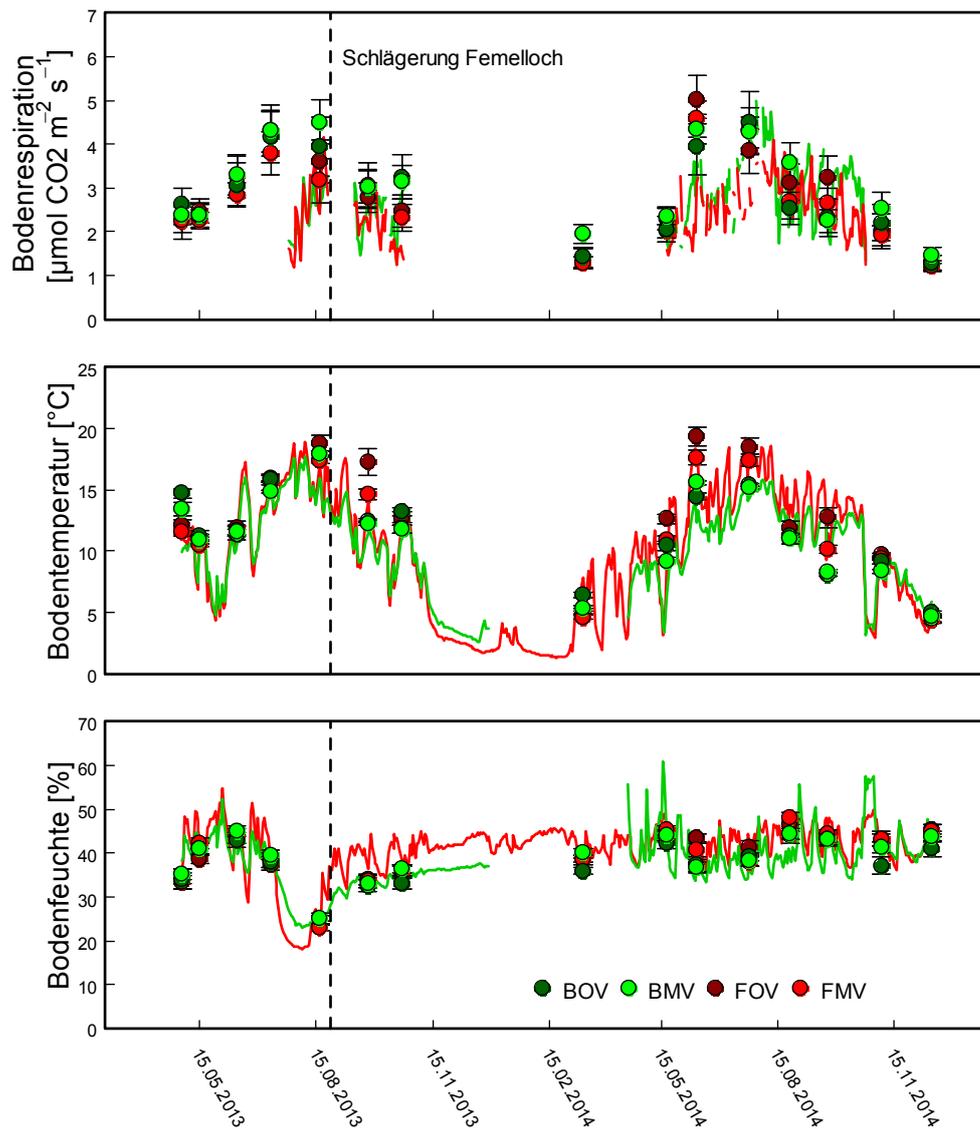


Abbildung 8: Bodenatmung (oben), Bodentemperatur (Mitte) und Bodenfeuchte (unten), gemessen in den Teilflächen „Bestand ohne Verjüngung“ (BOV), „Bestand mit Verjüngung“ (BMV), „Femelloch ohne Verjüngung“ (FOV) und „Femelloch mit Verjüngung“ (FMV). Die Punkte zeigen die diskontinuierlich gemessenen Daten und die durchgezogenen Linien zeigen die kontinuierlich gemessenen Daten für den Bestand (grün) und das Femelloch (rot). Bei den kontinuierlichen Messungen gibt es keine Unterscheidung in die Teilflächen mit/ohne Verjüngung. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte. Die gestrichelte Linie zeigt den Schlägerungstermin des Femelloches.

*Soil respiration (upper panel), soil temperature (middle panel) and soil moisture (lower panel) measured at the treatments 'stand without regeneration' (BOV), 'stand with regeneration' (BMV), 'gap without regeneration' (FOV) and 'gap with regeneration' (FMV). Dots represent discontinuous measurements at the treatments. Lines represent continuous measurements within stand and gap respectively. For continuous measurements we did not separate into without/with regeneration treatments. Error bars represent standard error of the mean. Dotted line represents date of the gap harvest.*

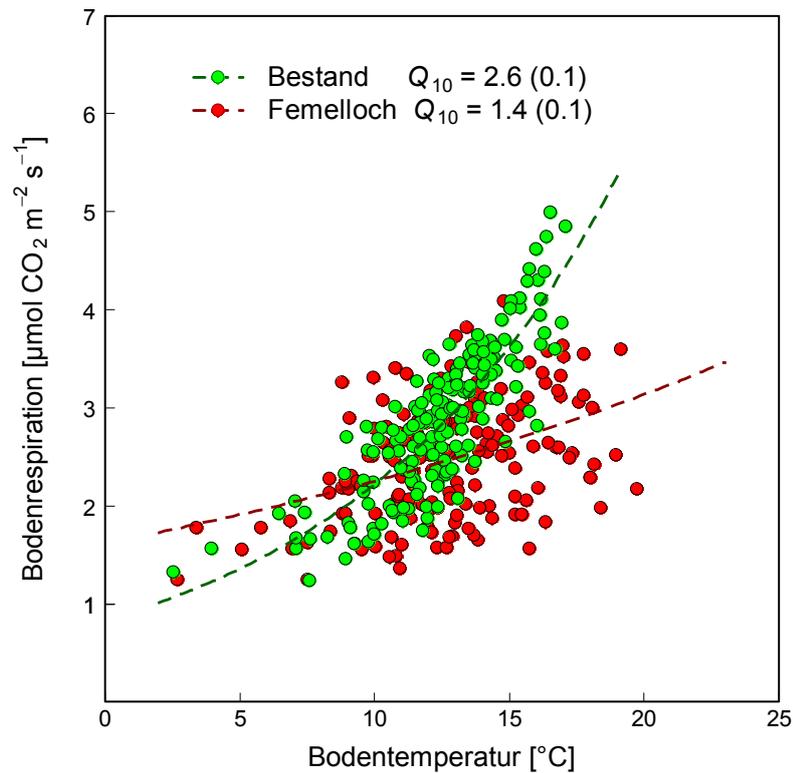


Abbildung 9: Temperatursensitivität der Bodenatmung für den Bestand und das Femelloch in der Vegetationsperiode 2014.

*Temperature sensitivity of soil respiration measured within the stand and the experimental gap respectively. Measurements were conducted during the vegetation period of 2014.*

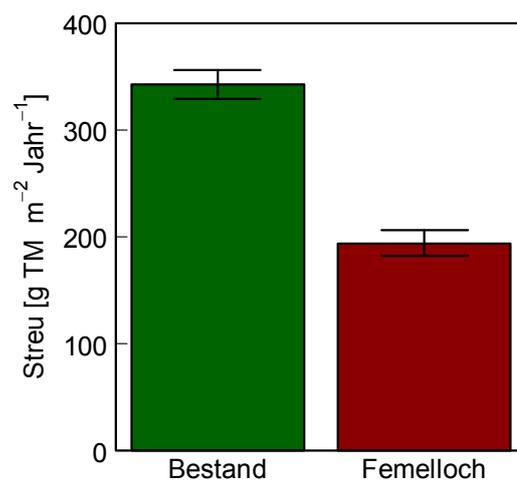


Abbildung 10: Jährlicher Streufall im Bestand und im Femelloch für die Versuchsfläche im Hölleengebirge. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte.

*Annual litterfall within the stand and the experimental gap respectively. Error bars represent standard error of the mean.*

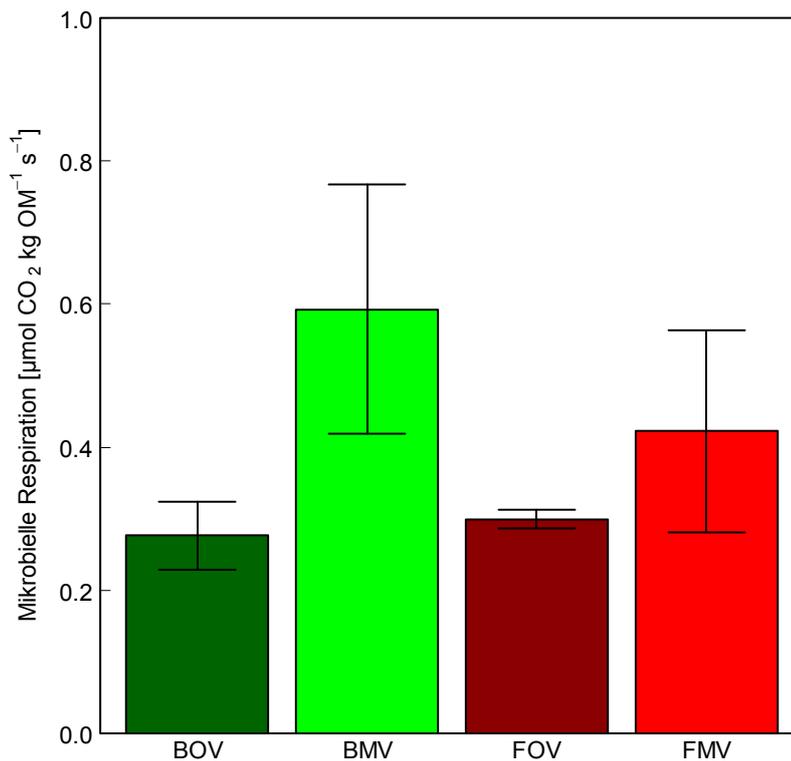


Abbildung 11: Mikrobielle Atmung gemessen an Humusproben der Teilflächen „Bestand ohne Verjüngung“ (BOV), „Bestand mit Verjüngung“ (BMV), „Femelloch ohne Verjüngung“ (FOV) und „Femelloch mit Verjüngung“ (FMV). Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte.

*Microbial respiration from humus samples from the treatments 'stand without regeneration' (BOV), 'stand with regeneration' (BMV), 'gap without regeneration' (BOV) and 'gap with regeneration' (BMV). Error bars represent standard error of the mean.*

### 5.3 Versuch 3 – Kohlenstoffbilanz Windwurf

Es konnte gezeigt werden, dass die Windwurffläche im Hölleengebirge während der Vegetationsperioden 2011 - 2013 eine negative Netto-Ökosystemproduktion (NEP) vorgewiesen hat (Abbildung 12). Nur im Sommer 2013 war die NEP leicht positiv. Die Fläche war demnach selbst 4 Jahre nach dem Windwurfereignis (2009) eine Kohlenstoffquelle.

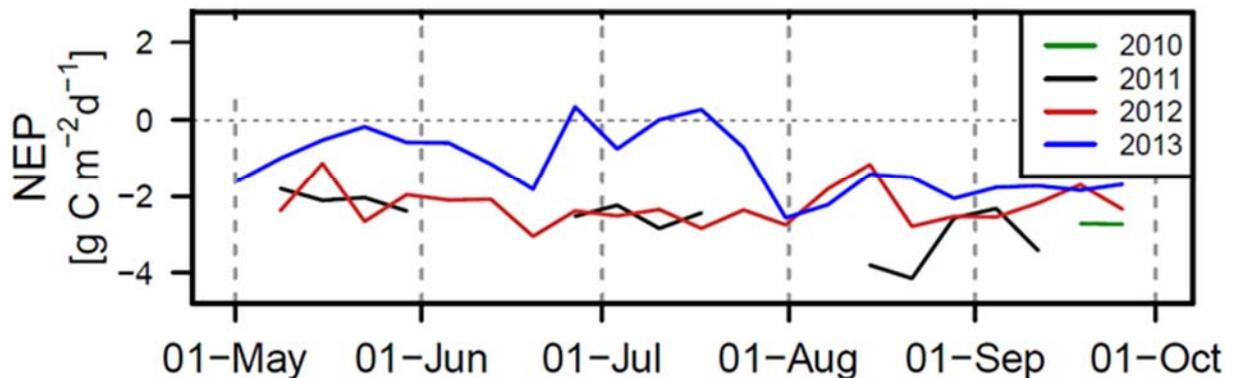


Abbildung 12: Verläufe von Netto-Ökosystemproduktion (NEP) auf einer Windwurffläche im Höllengebirge (2010 bis 2013).

*Net ecosystem production (NEP) from a windthrow site at Höllengebirge (2010 to 2013).*

## 6 DISKUSSION

### 6.1 Versuch 1 – Verjüngungseinfluss auf Humus

In diesem Versuch konnte ein möglicher Einfluss von Vorverjüngung auf die Humusdynamik bzw. -eigenschaften nach Windwurfereignissen nicht eindeutig nachgewiesen werden (Abbildung 7). Da die Bodentypen auf Standorten der Kalkalpen oft kleinräumig stark variieren können (Koeck 2008), ist davon auszugehen, dass die Wiederholungsanzahl von 6 Aufnahmepunkten pro Teilfläche nicht ausreichend war, um eine räumliche Variabilität gut abzudecken. Die vergleichsweise starke Streuung der Humusparameter innerhalb der einzelnen Teilflächen würde diese Annahme unterstützen (Abbildung 7). Es lässt sich dennoch eine tendenziell höhere Humusmächtigkeit innerhalb der Vorverjüngungsflächen auf den Windwürfen erkennen, welche statistisch jedoch nicht signifikant war ( $p < 0,05$ ). Dies wäre vergleichbar mit einer Studie von Prietzel und Ammer (2008), deren Ergebnisse generell einen positiven Zusammenhang zwischen Verjüngung und Humusmächtigkeit erkennen ließ.

### 6.2 Versuch 2 – Kohlenstoffflüsse Femelhieb

Während der gesamten Messperiode haben sich die Teilflächen *Bestand ohne Verjüngung* (BOV), *Bestand mit Verjüngung* (BMV), *Femelloch ohne Verjüngung* (FOV) und *Femelloch mit Verjüngung* (FMV) bezüglich der Bodenatmung nicht unterschieden – weder vor, noch nach Schlägerung des Femellochs (Abbildung 8). Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit einer Femellochstudie aus Nordamerika (Stoffel et al. 2010). In Bezug auf die Bodentemperatur ist es

ausschließlich in FOV zu einem signifikanten ( $p < 0,05$ ) Anstieg nach der Schlägerung gekommen. FMV hat sich diesbezüglich nicht von den Teilflächen im Bestand unterschieden (Abbildung 8). Da die Bodenatmung ein temperaturabhängiger Prozess ist (Abbildung 9), kann davon ausgegangen werden, dass ein schlägerungsbedingter Rückgang der Wurzelatmung in FOV, sowohl durch den Abbau toter Wurzelbiomasse, als auch durch einen temperaturbedingten Anstieg der mikrobiellen Atmung (Kohlenstoffmineralisierung) ausgeglichen wurde. Da es zwischen den Teilflächen, bei gleicher Inkubationstemperatur, keinen Unterschied in den Mineralisierungsraten gegeben hat (Abbildung 11), ist es sehr wahrscheinlich, dass es in FOV zu einer temperaturbedingten Ankurbelung der Humusmineralisierung gekommen ist. Eine geringere Temperatursensitivität ( $Q_{10}$ ) im Femelloch würde zudem die Annahme eines Wurzelatmungsrückgangs nach Schlägerung bekräftigen (Abbildung 9). Da die Wurzelatmung in Wäldern der gemäßigten Zone normalerweise einem saisonalen Muster folgt (höhere Aktivität im Sommer), kann davon ausgegangen werden, dass ein höherer  $Q_{10}$  im Bestand in erster Linie aus einer höheren Wurzelatmung im Sommer resultiert (Ruehr und Buchmann 2010, Schindlbacher et al. 2009) und nicht notwendigerweise aus einer schlägerungsbedingten Veränderung der mikrobiellen Temperatursensitivität. Ähnliche Ergebnisse haben auch die Untersuchungen auf der angrenzenden Windwurffläche gezeigt (Mayer et al. 2014). In der Teilfläche FMV hat vermutlich der Abbau toter Wurzeln, zusammen mit der verbleibenden Wurzelatmung der Verjüngung, die Bodenatmung auf Bestandesniveau gehalten. In Mayer et al. (2014) ist die jährliche Bodenatmung im Bestand (BOV) auf ca.  $5,5 \text{ C ha}^{-1}$  geschätzt worden. Die Trenching-Studie hat gezeigt, dass rund die Hälfte davon aus mikrobieller Atmung stammt. Da es zwischen den Teilflächen dieses Versuchs keinen Unterschied in der Bodenatmung gegeben hat, kann man davon ausgehen, dass es, vergleichbar zu Windwürfen, in nichtverjüngten Femellöchern ebenso zu großen Bodenkohlenstoff- bzw. Humusverlusten kommen kann. Nichtsdestotrotz ist es im Femelloch zu einer nicht unbeträchtlichen Menge an Streueintrag gekommen (Abbildung 10). Im Vergleich zu großflächigen Störungsflächen ist dies auf jeden Fall als positiv zu bewerten. Vor allem in den ersten Jahren nach Störung beschränkt sich der jährliche Eintrag oft auf die Streu der Schlagvegetation. Diese liefert jedoch qualitativ unterschiedliches Material an den Humusvorrat (Spielvogel et al. 2006). Auch nach verjüngungseinleitenden Verfahren, wie zum Beispiel dem Femelhieb, ist eine rasche Etablierung von Jungwuchs demnach unumgänglich, soll einem negativen Einfluss auf den Humusvorrat entgegengewirkt werden.

### **6.3 Versuch 3 – Kohlenstoffbilanz Windwurf**

Selbst im vierten Jahr nach dem Windwurf war die untersuchte Fläche, über die Vegetationsperiode betrachtet, eine eindeutige Kohlenstoffquelle (Abbildung 12). Dies ist vor

allem auf eine nicht zufriedenstellende Baumverjüngung zurückzuführen (Abbildung 13). Die aufkommende Vegetation bestand 2013 im Wesentlichen aus Gräsern (*Calamagrostis varia*) und krautiger Bodenvegetation (*Adenostyles glabra*, *Urtica dioica*). Es ist nicht absehbar, wann die Windwurffläche wieder zu einer Kohlenstoffsenke werden wird. Eine Studie aus Nordamerika hat gezeigt, dass die meisten Waldökosysteme nach Störung zwischen 10 und 20 Jahre benötigen, um wieder eine positive Netto-Ökosystemproduktion zu erreichen (Amiro et al. 2010). Geht man von einem Bodenkohlenstoffvorrat von  $75 \text{ t C ha}^{-1}$  (in der organischen Auflage) und einer jährlichen Kohlenstoffmineralisierung von mehreren Tonnen pro Hektar aus (Mayer et al. 2014), kann von einer wesentlichen und vor allem nachhaltigen Verschlechterung des Standortpotentials ausgegangen werden. Dies kann nur durch eine drastische Verbesserung der Verjüngungssituation verhindert werden.



Abbildung 13: Windwurf von 2009 auf der Versuchsfläche im Höllengebirge. Aufgenommen am 25. Oktober 2014.

*Windthrow site from 2009 at Höllengebirge. The picture was taken on 25.10.2014.*

## 7 LITERATUR

- Amiro, B.D., Barr, A.G., Barr, J.G., Black, T.A., Bracho, R., Brown, M., Chen, J., Clark, K.L., Davis, K.J., Desai, A.R., Dore, S., Engel, V., Fuentes, J.D., Goldstein, A.H., Goulden, M.L., Kolb, T.E., Lavigne, M.B., Law, B.E., Margolis, H.A., Martin, T., McCaughey, J.H., Misson, L., Montes-Helu, M., Noormets, A., Randerson, J.T., Starr, G., Xiao, J. (2010): Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. **J. Geophys. Res.** 115, G00K02.
- Janssens, I.A., Dore, S., Epron, D., Lankreijer, H., Buchmann, N., Longdoz, B., Brossaud, J., Montagnani, L. (2003): Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests. Valentini, R. (ed), pp. 233-253, Springer Berlin Heidelberg.
- Katzensteiner, K., Gratzler, G., Darabant, A., Dorji, S. (2009): Pilotstudie: Resilienz von Schutzwäldern in den Nördlichen Kalkalpen, Universität für Bodenkultur, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Waldökologie.
- Koeck, R. (2008): Waldhydrologische Aspekte und Waldbaukonzepte in karstalpinen Quellenschutzgebieten in den nördlichen Kalkalpen, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Mauder, M., Cuntz, M., Drüe, C., Graf, A., Rebmann, C., Schmid, H.P., Schmidt, M., Steinbrecher, R. (2013): A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements. **Agricultural and Forest Meteorology** 169(0), 122-135.
- Mayer, M., Matthews, B., Schindlbacher, A., Katzensteiner, K. (2014): Soil CO<sub>2</sub> efflux from mountainous windthrow areas: dynamics over 12 years post-disturbance. **Biogeosciences** 11, 6081-6093.
- Pinheiro, J.C., Bates, D.M. (2000): Mixed-Effects Models in S and S-Plus, Springer - Verlag, New York Berlin Heidelberg.
- R Core Team (2013): R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ruehr, N.K., Buchmann, N. (2010): Soil respiration fluxes in a temperate mixed forest: seasonality and temperature sensitivities differ among microbial and root-rhizosphere respiration. **Tree Physiology** 30(2), 165-176.
- Rusch, S., Hagedorn, F., Zimmermann, S., Lüscher, P. (2009): Bodenkohlenstoff nach Windwurf - eine CO<sub>2</sub> Quelle? Zürich, Switzerland, Swiss Federal Institute for Forest Snow and Landscape Research (WSL) and Swiss Federal Office for the Environment.
- Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Jandl, R. (2009): Carbon losses due to soil warming: Do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? **Global Change Biology** 15(4), 901-913.
- Spielvogel, S., Prietzel, J., Kögel-Knabner, I. (2006): Soil Organic Matter Changes in a Spruce Ecosystem 25 Years after Disturbance. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 70(6), 2130-2145.

Stoffel, J.L., Gower, S.T., Forrester, J.A., Mladenoff, D.J. (2010): Effects of winter selective tree harvest on soil microclimate and surface CO<sub>2</sub> flux of a northern hardwood forest. **Forest Ecology and Management** 259(3), 257-265.



## UNTERSUCHUNGEN ZUR VERJÜNGUNG IM BERGWALD DER NÖRDLICHEN KALKALPEN

### *STUDIES ON TREE REGENERATION IN MOUNTAIN FORESTS OF THE NORTHERN CALCAREOUS ALPS*

**Gisela PRÖLL<sup>1</sup>, Michael KOHLPAINTNER<sup>2</sup>, Axel GÖTTLEIN<sup>2</sup>, Klaus KATZENSTEINER<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institut für Waldökologie, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für  
Bodenkultur, A-1190 Wien

<sup>2</sup>Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, Technische Universität München,  
D-85354 Freising

#### **SUMMARY**

Mountain forest stands frequently show poor tree regeneration in the Northern Calcareous Alps. Multiple stresses impair tree regeneration, particularly on disturbed sites on shallow nutrient poor soils. Stress physiological measurements on tree saplings and afforestation experiments should give insights into the resilience of mountain forests post-disturbance. Pioneer tree species showed higher growth and survival than climax tree species in the mountain region of the Northern Calcareous Alps. As a consequence, pioneer species should be considered in afforestation planning of disturbed sites. All investigated tree species showed inhibited growth on dolomite compared to limestone sites. Moreover, photosynthesis and stomatal conductance differed between soils on limestone and dolomite. Lowest photosynthetic rates and stomatal conductance were documented on organic soil on dolomite with dense competing vegetation. Photosynthesis and stomatal conductance correlated with leaf potassium concentrations. All in all, tree establishment is particularly restricted on dolomite sites.

Mature *Acer pseudoplatanus* trees which survived the storm event significantly contributed to the natural reforestation of the investigated windthrow areas, provided that they were able to produce seeds when the disturbance event occurred. In our example with three old trees per hectare evenly distributed rejuvenation numbers of more than 2000 plants per hectare were achieved. The age structure of the regeneration suggests that the first three growing seasons after the storm were decisive for the establishment of young trees. Mature *Acer pseudoplatanus* trees thus significantly increase the resilience of our mountain forests (ability of a system to return to its initial state after disturbance) and therefore should be promoted. The temperature and water balance under 10 year old natural regeneration already resembles that of the mature forest. The soil temperature in regenerated plots or mature forests is significantly lower than under grassy vegetation, which indicates less humus decomposition. The water uptake in 20 cm soil depth is considerably higher in regenerated plots than below grass vegetation. Thus, regeneration increases the soil water storage capacity for further rain events after short dry periods. A lush natural tree regeneration therefore has a positive effect on water retention on windthrow areas and thus on the landscape hydrology and flood protection. Compared to planted saplings the natural regeneration showed increased biomass growth and higher nutrient concentrations in needles and leaves. This leads to a higher storage of nutrients and therefore reduces the nutrient losses of the ecosystem. In addition, a rapidly growing natural regeneration contributes to the shading of the soil and in this way reduces humus degradation. A lush natural regeneration is thus increasing the resilience of our mountain forests after disturbances.

**KEYWORDS:** Photosynthesis, drought stress, nutrient deficiency, soil types, competition, mountain forest, windthrow, reforestation, planting, natural regeneration

## ZUSAMMENFASSUNG

In von der Nutzungsgeschichte geprägten, strukturarmen Beständen mangelt es vielerorts an Verjüngung in den Nördlichen Kalkalpen. Multiple Stressfaktoren beeinträchtigen offensichtlich die Baumverjüngung, insbesondere auf Störungsflächen mit flachgründigen, nährstoffarmen Böden. Stressphysiologische Messungen an Jungbäumen und Versuchspflanzungen sollen wissenschaftliche Grundlagen für die Abschätzung der Resilienz von Bergwaldökosystemen nach Störungen liefern. Generell zeigten Pionierbaumarten bessere Überlebenschance und höheren Zuwachs als Klimaxbaumarten, demnach ist es wichtig Pionierbaumarten bei Pflanzungen zu beteiligen. Alle Baumarten zeigten auf Dolomit deutliche Wachstumseinbußen. Ebenso unterschieden sich die Photosyntheseleistung und die Blattleitfähigkeit zwischen den Bodentypen auf Kalk und Dolomit. Die niedrigste Photosyntheserate und Blattleitfähigkeit waren auf Auflagehumus auf Dolomit mit dichter Konkurrenzvegetation festzustellen. In Bezug auf die Physiologie spielte die Kaliumernährung eine wichtige Rolle. Dolomitstandorte sind allgemein schwieriger zu bewalden als Kalkstandorte und stellen besonders ungünstige Bedingungen für die Verjüngung dar.

Bergahornüberhälter können einen wesentlichen Beitrag zur Wiederbewaldung von Sturmwurfflächen leisten, vorausgesetzt sie fruktifizieren bereits bei Eintritt des Ereignisses. Mit drei Altbäumen pro Hektar können unter guten Voraussetzungen bereits Verjüngungszahlen von mehr als 2000 Pflanzen pro Hektar erreicht werden. Die Altersstruktur der Verjüngung zeigt, dass die ersten drei Vegetationsperioden nach dem Sturm die entscheidenden für die Etablierung waren. Bergahornaltbäume im Altbestand tragen damit entscheidend zu Erhöhung der Elastizität unserer Bergwälder bei (Fähigkeit eines Systems nach einer Störung wieder in den Ausgangszustand zurück zu gelangen). Der Temperatur- und Wasserhaushalt unter 10-jähriger Naturverjüngung ähnelt bereits demjenigen eines Altbestandes. Die Bodentemperatur gegenüber vergrasteten Flächen ist deutlich niedriger und damit dürfte auch der Humusabbau geringer sein. Unter Vorausverjüngung findet in 20 cm Bodentiefe eine starke Wasserentnahme statt und somit wird immer wieder neue Speicherkapazität für weitere Regenereignisse geschaffen. Auf vergrasteten Flächen dagegen findet keine Speicherentleerung statt und somit ist bei Regenereignissen schneller mit Oberflächenabfluss zu rechnen. Eine üppige Naturverjüngung wirkt sich also positiv auf den Wasserrückhalt von Sturmwurfflächen und damit auf den Landschaftswasserhaushalt und den Hochwasserschutz aus. Im Vergleich zur Pflanzung zeigt die Naturverjüngung höhere Biomassezuwächse und höhere Nährstoffkonzentrationen in Nadeln und Blättern. Dies führt zu einer höheren Speicherung von Nährstoffen und damit zur Reduzierung der Nährstoffausträge. Zusätzlich trägt eine rasch wachsende Naturverjüngung zur Beschattung des Bodens und damit zur Verringerung des Humusabbaus bei. Eine üppig vorhandene Naturverjüngung fördert somit die Elastizität unserer Bergwälder gegenüber Störungen.

**STICHWÖRTER:** Photosynthese, Trockenstress, Mangelernährung, Bodentypen, Konkurrenz, Bergwald, Sturmwurf, Wiederbewaldung, Pflanzung, Naturverjüngung

## 1 ALLGEMEINE EINLEITUNG

Seit der Mitte des 19. Jahrhunderts treten immer häufiger Sturmereignisse in Europa auf (Schelhaas et al. 2003). Aktuelle Sturmschadensprognosen zeigen, dass die Häufigkeiten und Massivität von Stürmen durch die Klimaänderung auch zukünftig ansteigen werden (Gardiner et al. 2010, Lindner et al. 2010). Durch die Klimaänderung werden auch steigende Temperaturen und länger anhaltende Trockenperioden, besonders für den Alpenraum prognostiziert (Gobiet et al. 2014). Insbesondere Bergwälder mit flachgründigen Böden auf Kalk sind besonders sensible Standorte hinsichtlich der Auswirkungen von Störungen und Trockenstress (Seidl et al. 2011b). Trockenstress in niederschlagsreichen Gebieten wie den Nördlichen Kalkalpen tritt aufgrund der Flachgründigkeit der Böden und des hohen Felsanteils auf (Dale et al. 2001, Seidl et al. 2011b). Die Wasser- und Nährstoffspeicherung bei diesen Böden beschränkt sich manchmal rein auf den Auflagehumus (Katzensteiner 2003). Ferner führt das Fehlen eines schützenden Kronendachs durch Störungseinwirkung zu Temperaturextremen und hohen Strahlungsintensitäten in Bodennähe, insbesondere auf mit schwarzem Humus bedeckten Südhängen (Aussenac 2000, von Arx et al. 2012, Diaci et al. 2005). Trotz der begünstigten Lichtsituation fehlt auf diesen Flächen vielerorts die Naturverjüngung. Durch die vermehrte Ausbreitung von Pioniervegetation auf Störungsflächen erhöht sich zunehmend der Konkurrenzdruck für Baumkeimlinge. Wie in einer Pilotstudie in den Nördlichen Kalkalpen demonstriert wurde, liegen sogar 30 Jahre nach Störungen noch Flächen mit unzureichender Verjüngung vor (Pröll et al. 2014). Die hemmenden Faktoren waren ungünstige Kleinstandorte, enormer Verbissdruck und dichte Konkurrenzvegetation auf den Untersuchungsflächen. In dieser Studie konnte auch gezeigt werden, dass vielerorts bereits vor Störungseintritt ungünstige Bedingungen die Etablierung von Naturverjüngung hemmen. In von der Nutzungsgeschichte geprägten, strukturarmen Beständen mangelt es bereits an Verjüngung. Bergwälder auf Dolomit stellen diesbezüglich Extremstandorte dar, da sie überdies auch durch Mangel an Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor gekennzeichnet sind. Die Auswirkungen von zunehmenden Störungsereignissen auf Bergwaldökosysteme sind schwer zu prognostizieren. Untersuchungen im Rahmen des StratAlp Projektes sollen wissenschaftliche Grundlagen für die Abschätzung der Resilienz von Bergwaldökosystemen nach Störungen liefern.

Wie im Rahmen von Versuchspflanzungen (Projekt SicAlp) bereits gezeigt werden konnte, ergaben sich deutliche Wachstumsunterschiede von Baumarten auf Kalk und Dolomit. Auf einem stark vergasteten Dolomitstandort traten enorme Wachstumseinbußen und geringere Überlebenschancen von Baumarten auf, welche zum Teil durch die starke Konkurrenz mit Gräsern und Mangelernährung erklärt werden konnten (vgl. Abbildung 1,

Abbildung 2).

Pionierbaumarten zeigten in den ersten drei Jahren nach der Pflanzung generell bessere Überlebenschancen und erhöhtes Wachstum (

Abbildung 2). Die einzelnen Baumarten zeigten aber nicht nur unterschiedliches Wachstum und Überleben auf Kalk und Dolomit, sondern auch auf den verschiedenen Bodentypen im Gebiet. Im Rahmen eines Gefäßversuches im Versuchsgarten Knödelhütte Wien mit verschiedenen Bodensubstraten von der Versuchsfläche Höllengebirge konnten deutliche Unterschiede bei den Baumarten hinsichtlich ihrer Physiologie auf unterschiedlichen Bodentypen unter Trockenstress gezeigt werden. Bei Ahorn und Fichte wurden die geringsten Photosyntheseraten sowie Blattleitfähigkeiten auf organischen Böden auf Dolomit mit Konkurrenzvegetation gemessen. Im Zuge von StratAlp wurden nun Vergleichsmessungen im Freiland vorgenommen, um die Stressresistenz ausgewählter Baumarten während der Sommertrockenheit 2013 unter Berücksichtigung der Bodentypen auf Kalk und Dolomit näher zu untersuchen. Ebenso wurden die biometrischen und kleinstandörtlichen Erhebungen auf den Versuchsflächen im Freiland im Rahmen von StratAlp fortgeführt.



Abbildung 1: Fichte mit Wuchsstockungen auf einem stark vergrasteten Dolomitstandort im Höllengebirge, Berg-Ahorn und Buche mit Chlorosen und Nekrosen auf Dolomitsubstrat im Versuchsgarten.

*Inhibited growth of spruce on a dolomite site with dense competing vegetation in the Höllengebirge mountain range, sycamore and beech with leaf chlorosis and necrosis growing on a dolomite substrate in the experimental garden.*

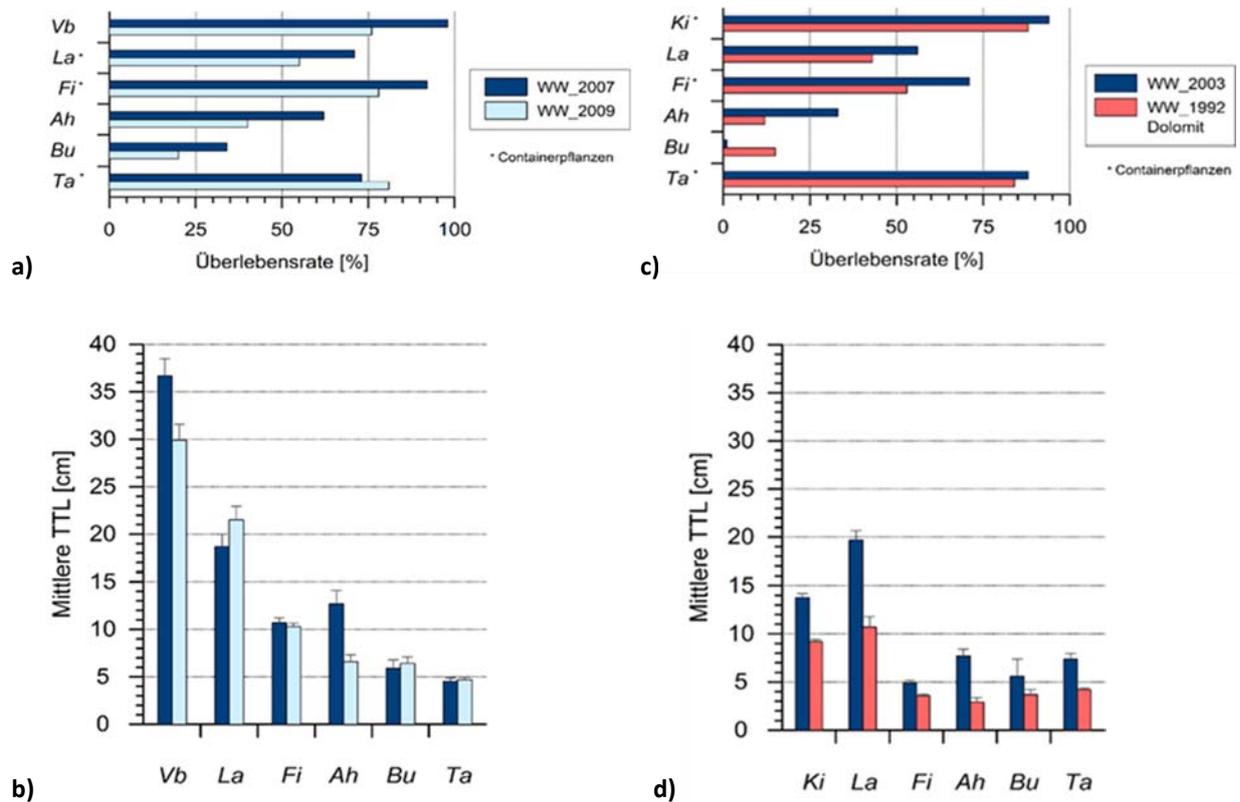


Abbildung 2: Überlebensraten (a) und mittleres Wachstum (b) von 2010 bis 2012 von Vogelbeere, Lärche, Fichte, Berg-Ahorn, Buche und Tanne im Höllengebirge auf einem Windwurf von 2007 bzw. 2009 und Überlebensraten (c) und Wachstum von 2010 bis 2012 (d) von Kiefer, Lärche, Fichte, Bergahorn, Buche und Tanne in den Lechtaler Alpen auf einem Windwurf von 2003 bzw. 1992.

*Survival rates (a) and mean terminal shoot increment (b) from 2010 until 2012 of rowan berry, larch, spruce, sycamore, beech and fir on a windthrow area of 2007 and 2009 respectively in the Höllengebirge and survival rates (c) and mean terminal shoot increment from 2010 until 2012 (d) of pine, larch, spruce, sycamore, beech and fir in the Lechtaler Alps on a windthrow site of 2003 and 1992 respectively.*

## 2 VERJÜNGUNGSSTRATEGIEN AUF FLACHGRÜNDIGEN BÖDEN AUF KALK UND DOLOMIT

### 2.1 Hypothesen

- Es gibt Unterschiede in der Stressresistenz der Baumarten in Bezug auf die drei häufigsten Bodentypen im Untersuchungsgebiet.
- Auf Dolomit sind die verschiedenen Baumarten stärker gestresst als auf Kalk. Sie zeigen bei niedrigeren Blattleitfähigkeiten negativere Wasserpotentiale.
- Die niedrigeren physiologischen Raten auf Dolomit sind auf den schlechten Ernährungszustand der Bäume zurückzuführen.

### 2.2 Methodik

#### 2.2.1 Versuchsdesign

Das Untersuchungsgebiet umfasst zwei Schutzwaldstandorte im Hölleengebirge (OÖ) auf unterschiedlichem Untergrundgestein (Kalk und Dolomit). Die Störungsfläche am Kalkstandort liegt auf ca. 950 m Seehöhe auf einem steilen, felsigen Südhang und ist von einem Mosaik aus Auflagehumusböden, Rendzinen und Kalkbraunlehm geprägt. Die großflächige, relativ junge Störungsfläche (ca. 31 ha) entstand im Januar 2007 durch den Windsturm Kyrill, die verdämmende Kahlschlagflora ist noch weitgehend lückenhaft etabliert. Die ebenfalls südseitig gelegene Störungsfläche über Dolomit liegt auf ca. 900 m Seehöhe und ist eine von Zwergsträuchern und Gräsern dominierte, mit Kiefern spärlich bestockte Fläche. Der Bodentyp entspricht einem Felsauflagehumusboden. Die Fläche liegt in einem teilweise von Bränden zu Beginn des vorigen Jahrhunderts geprägtem Gebiet und verjüngt sich unzureichend durch ehemals vielerorts hohen Beweidungs- und Verbissdruck. Wiederkehrende Lawinenabgänge prägten ebenso die Sukzession auf den Flächen. Aufgrund unzureichender Verjüngung auf den beiden Schutzwaldstandorten wurde auf beiden Untersuchungsflächen mehrmals aufgeforstet.

Während einer ausgeprägten Trockenperiode im Juli und August 2013 wurden Photosynthese- und Blattleitfähigkeits- sowie Blattwasserpotentialmessungen von den häufigsten Baumarten auf den zwei Untersuchungsflächen auf Kalk und Dolomit vorgenommen. Der Wasserhaushalt der Pflanzen und deren Reaktion auf Trockenstress wurde an Ahorn (*Acer pseudoplatanus* (L.)), Buche (*Fagus sylvatica* (L.)), Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) und Lärche (*Larix decidua* Mill.) unter

Berücksichtigung dreier unterschiedlicher Bodentypen näher untersucht. Die drei Bodenvarianten wurden stellvertretend für die häufigsten Bodentypen in den Nördlichen Kalkalpen gewählt: Auflagehumus über Kalk (AK), Kalklehmrendzina (KR) und Auflagehumus über Dolomit (AD) (vgl. Abbildung 3).

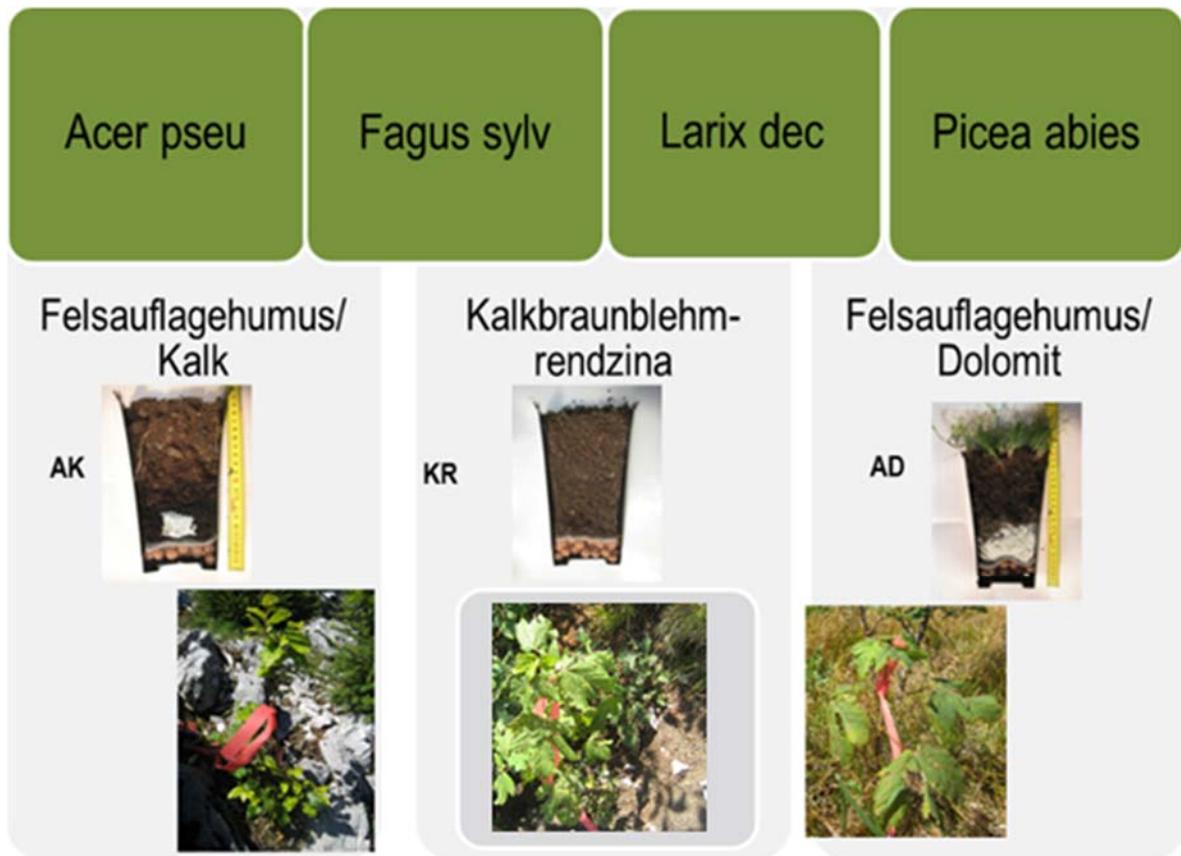


Abbildung 3: Versuchsdesign – physiologische Messungen. Vier Baumarten wurden auf drei verschiedenen Bodentypen auf Kalk und Dolomit ausgewählt. Bei der Versuchsfläche auf Kalk war die Konkurrenzvegetation nur spärlich, bei der Dolomitfläche sehr stark ausgeprägt.

*Sampling design – physiological measurements. Four tree species on three different substrates on limestone and dolomite were selected for the physiological measurements. Competing vegetation was sparsely developed on the limestone site while densely developed on the dolomite site.*

## 2.2.2 Messungen

### a) Bodenfeuchte

Das Bodenmatrixpotential wurde kontinuierlich mittels in 7 cm Bodentiefe eingegrabenen Gipsblöcken gemessen und mittels Mikrologger (EMS, Brno, Czech Republic) alle 60 Minuten

gespeichert. Eine mobile TDR Sonde (Fieldsout, Spectrum Technologies, Inc.) war bei jeder Messkampagne im Einsatz, um den relativen Bodenwassergehalt zu messen. Der relative Bodenwassergehalt wurde mithilfe von Wassergehalts-Matrixpotentialkurven in Saugspannung für die jeweiligen Bodentypen umgerechnet.

## **b) Physiologische Messungen**

Um die Trockenstressresistenz der unterschiedlichen Baumarten näher zu untersuchen, wurden Gaswechsel- und Blattwasserpotentialmessungen während einer ausgeprägten Trockenperiode im Sommer 2013 vorgenommen (Abbildung 4). Im Zuge von drei zweitägigen Messkampagnen wurden mithilfe des portablen Gaswechsellmessgeräts LI6400 XTP (Licor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) die Photosynthese und die Blattleitfähigkeiten der Baumarten untersucht. Die Messungen wurden unter gesättigtem Licht (PAR = 1500) und konstanter CO<sub>2</sub>-Zugabe (CO<sub>2</sub> = 400 ppm) sowie Temperatur (30 °C) von 11 - 15 Uhr durchgeführt. Pro Baumart und Standort wurde von 5 - 10 Individuen das oberste voll entwickelte, sonnenexponierte Blatt in eine Küvette gespannt und nach Erreichen eines Gleichgewichts der CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Konzentrationen die Gaswechsellparameter (maximale Photosyntheserate ( $A_{max}$ ) bzw. maximale stomatare Leitfähigkeit ( $g_s$ )) erfasst. Bei den Messungen von Lärche und Fichte mittels Koniferenkammer (6400-22L, Licor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) wurden im Anschluss an die Messungen mittels Scanner und WinRhizo Software die projizierte Nadelfläche berechnet und die korrespondierenden Photosyntheseraten und Blattleitfähigkeiten mit den berechneten Werten korrigiert.

Die Blatt- bzw. Zweigwasserpotentialmessungen wurden mit einer Scholanderdruckvorrichtung ermittelt. Das zuvor gemessene, unversehrte Blatt wurde mit einer Rasierklinge abgeschnitten, in Aluminiumsäckchen gepackt und in einer Kühlbox gelagert. Die Blätter wurden nach Beendigung der Gaswechsellmessungen einzeln rasch in die Druckvorrichtung mittels Gummiring eingespannt. Anschließend wurde Druck angelegt bis Xylemsaft an der Schnittstelle austrat. Der abgelesene Druck am Manometer entspricht der Kraft, mit der die Pflanze das Wasser zum Schutz vor Austrocknung zurückhält. Je negativer das Wasserpotential, desto gestresster ist die Pflanze und desto mehr Druck muss aufgewendet werden, um der Pflanze Wasser zu entziehen. Kombiniert man Wasserpotentiale mit der Blattleitfähigkeit einer Pflanze, kann man erkennen, ob bei stark negativen Potentialen auch der Gasaustausch der Pflanze (=niedrigere Blattleitfähigkeiten) eingeschränkt ist. Allgemein gilt, je niedriger die Blattleitfähigkeiten und je negativer die Blattwasserpotentiale, desto gestresster sind die Pflanzen.



Abbildung 4: Ausgetrocknete Auflagehumusböden (links) und durchgeführte Gaswechsellmessungen (rechts) an Lärche mittels Koniferenkammer (6400-22L, Licor) im Höllengebirge während der Trockenperiode im August 2013.

*Dry Follic Histosols (left) and leaf gas exchange measurements (right) with the conifer chamber (6400-22L, Licor) in the Höllengebirge during a drought period in August 2013.*

### c) Ernährung

Um zu beurteilen, inwiefern Mangelernährung den Gasaustausch der Pflanzen beeinträchtigt, wurden Nährstoffanalysen im Labor des Instituts für Waldökologie, Universität für Bodenkultur, durchgeführt. Das Blattmaterial (einjährig) wurde von Versuchspflanzen des Trockenstressexperiments im Versuchsgarten Knödelhütte (Projekt SicAlp) analysiert. Im Rahmen des Trockenstressexperiments wurde die Stressresistenz derselben Bäume (Berg-Ahorn, Buche, Fichte und Lärche) und Bodentypen (Auflagehumus auf Kalk, Kalklehmrendzina und Auflagehumus auf Dolomit) wie im Freiland aber unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Kombinierte Untersuchungen zur Ernährung der Jungbäume wurden durchgeführt. Stickstoff (N) und Kohlenstoff (C) wurden mit Leco Elementaranalysator TruSpec CN, andere Elementkonzentrationen (Schwefel (S), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und Zink (Zn)) wurden in HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> Extrakten durch Mikrowellenaufschluss mittels ICP-OES Analyse (Optima 8300 Perkin Elmer) gemessen.

## 2.3 Ergebnisse und Diskussion

### a) Bodenfeuchte

Anhand von kontinuierlichen Messungen des Bodenmatrixpotentials konnten wir eine ausgeprägte Trockenperiode von Mitte Juli bis Anfang August feststellen. Das Bodenmatrixpotential sank unter einen Wert von -11 bar und überstieg somit die obere Messgrenze der in den Boden eingegrabenen Gipsblöcke (Abbildung 5).

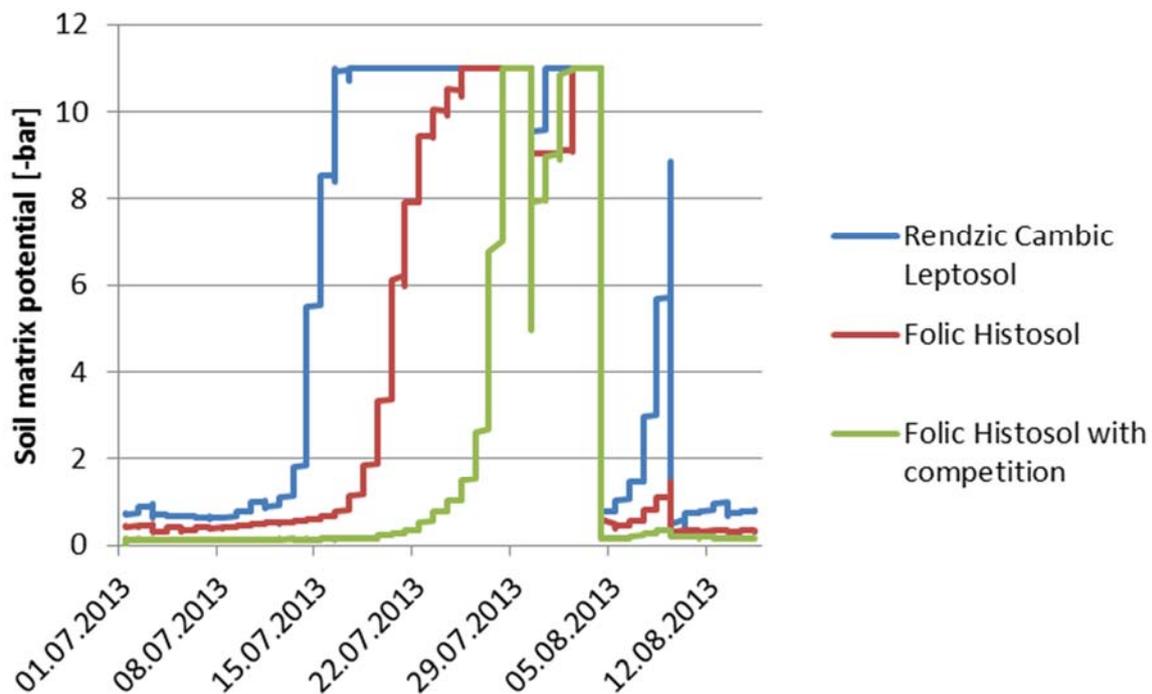


Abbildung 5: Bodenmatrixpotentialmessungen mittels Gipsblöcken (EMS, Brno) im Höllengebirge während der Hitzeperiode im Sommer 2013: Kalklehmrendzina (blau), Auflagehumusboden ohne (rot) und mit Konkurrenzvegetation (grün).

*Soil matrix potentials measured with gypsum blocks (EMS, Brno) in the Höllengebirge during a summer drought and heat wave in the year 2013: Rendzic Cambic Leptosol (blue), Folic Histosol without (red) and with competing vegetation (green).*

### b) Physiologische Messungen

Bei den physiologischen Messungen konnten deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten unter Trockenstress festgestellt werden (Abbildung 6). Betrachtet man die unterschiedlichen Baumarten, so erkennt man deutlich niedrigere physiologische Raten bei den Koniferen im Vergleich zu den Laubbäumen.

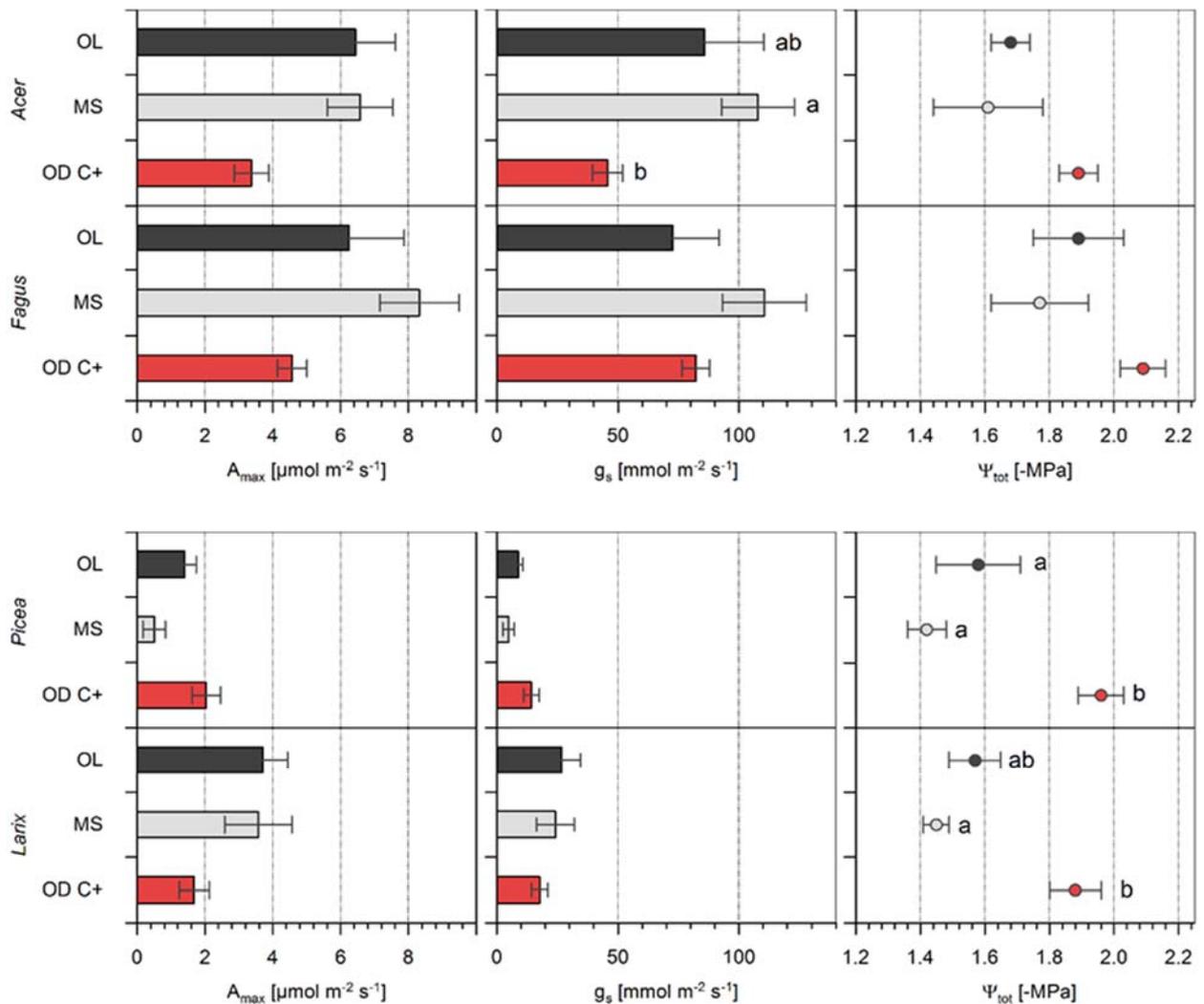


Abbildung 6: Mittlere maximale Photosyntheseraten ( $A_{max}$ ), Blattleitfähigkeiten ( $g_s$ ) für  $\text{H}_2\text{O}$  und korrespondierende Blattwasserpotentiale ( $\Psi_{tot}$ ) von Berg-Ahorn, Buche, Lärche und Fichte während der Trockenperiode im Sommer 2013. OL = Auflagehumus auf Kalk, MS = Kalklehmrendzina, OD C+ = Auflagehumus auf Dolomit mit Konkurrenzvegetation.

*Mean photosynthetic rates ( $A_{max}$ ), stomatal conductance ( $g_s$ ) and corresponding leaf water potentials ( $\Psi_{tot}$ ) of sycamore, beech, larch and spruce during a summer drought in 2013. OL = organic soil on limestone, MS = mineral soil, OD C+ = organic soil on dolomite with dense competing vegetation.*

Laub- und Nadelbäume müssen mit unterschiedlichen Kammern gemessen werden. Der primäre Fokus bei den Messkampagnen lag auf der Erfassung der Unterschiede zwischen den Bodentypen und nicht zwischen den Baumarten. Infolge dessen wurden Nadel- und Laubhölzer nicht parallel, sondern zeitlich nacheinander gemessen, da sonst die sich verändernden Umweltfaktoren den Effekt der Variabilität der Bodentypen überschattet hätten. Die Messungen für die Laubbäume fanden in der Mitte der Trockenperiode statt, die der Koniferen hingegen am

Ende der Trockenperiode. Folglich könnten die niedrigeren Raten der Koniferen auf die bereits fortgeschrittene Trockenperiode zurückzuführen sein. Die stärker negativen Bodenwasserpotentiale und die höheren Wasserdampfdruckdefizite zwischen Blatt und Luft bei den Koniferen geben einen Hinweis auf vergleichsweise etwas trockenere Böden (Abbildung 7).

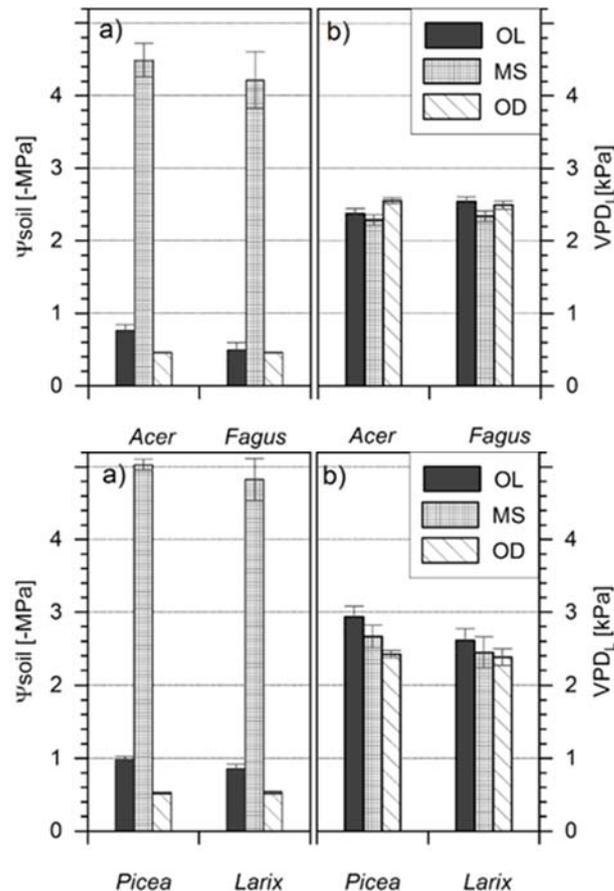


Abbildung 7: Mittlere Bodenmatrixpotentiale ( $\Psi_{\text{soil}}$ ) in 7 cm Bodentiefe (a) und Wasserdampfdruckdefizite (VpdL) zwischen Blatt und Luft (b) während der Messkampagnen in der Hitzeperiode im Sommer 2013. OL = Auflagehumus auf Kalk, MS = Kalklehmrendzina, OD = Auflagehumus auf Dolomit mit Konkurrenzvegetation. Bodenmatrixpotentiale wurden anhand von pF Kurven aus diskontinuierlichen Bodenfeuchtemesswerten (TDR, Fieldscout) ermittelt.

*Mean soil matrix potentials ( $\Psi_{\text{soil}}$ ) at 7 cm soil depth (a) and vapour pressure deficits (VpdL) between leaf and air (b) of the measurement campaigns during the summer drought of 2013. OL = organic soil on limestone, MS = mineral soil, OD = organic soil on dolomite with dense competing vegetation. Soil matrix potentials correspond to converted volumetric water contents (TDR, Fieldscout) derived from pF curves developed for the respective substrates.*

Alle Baumarten bis auf Buche zeigten bei Auflagehumus auf Dolomit entweder statistisch signifikant niedrigere Blattleitfähigkeiten (Berg-Ahorn) oder negativere Blattwasserpotentiale

(Lärche und Fichte) im Vergleich zur Mineralbodenvariante auf Kalk (Abbildung 6). In allen Fällen deuten die niedrigeren Raten auf dem stark vergrasteten Dolomitstandort auf höheren Trockenstress im Vergleich zum Mineralboden auf Kalk hin. In Anlehnung an eine Studie von Medrano et al. (2002) gilt eine Blattleitfähigkeit von unter  $50 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  als Indikator für extremen Trockenstress. Vergleicht man die gemessenen Werte mit dem Indikatorwert, so stellt man extremen Trockenstress bei Ahorn auf Dolomit und bei Fichte und Lärche auf allen Bodentypen fest. Die kombinierten negativeren Blattwasserpotentiale auf Dolomit bei allen drei Arten bestätigen die Annahme von erhöhtem Trockenstress auf Dolomit.

Bei Ahorn und Lärche unterschied sich die Mineralbodenvariante auf Kalk von der Auflagehumus/Dolomitvariante, jedoch nicht von der Auflagehumus/Kalkvariante. Die höheren Raten auf Mineralböden deuten auf die Bevorzugung von mineralreichen, in der Regel tiefgründigeren Böden beider Baumarten hin. Die vielerorts in den Nördlichen Kalkalpen durch Flachgründigkeit und geringe Wasser- und Nährstoffspeicherung gekennzeichneten Böden lassen auf ungünstige standörtliche Wuchsbedingungen schließen. Im Vergleich dazu sind Bäume auf mineralreicheren, tiefgründigeren Böden generell besser mit Wasser und Nährstoffen versorgt. Sie können bei trockenen Bedingungen mit ihren Wurzeln in tiefere Horizonte des Bodens vordringen und Wasser und Nährstoffe aufnehmen. Dieses Phänomen könnte auch eine Erklärung für die höheren Blattleitfähigkeiten von Berg-Ahorn und Buche trotz stark negativen Bodenmatrixpotentialen bei der Mineralbodenvariante sein. In bodennahen Schichten war das Bodenmatrixpotential negativer, also im Grunde Wasser schlechter für Pflanzen verfügbar als bei den Auflagehumusböden, dennoch zeigten die Pflanzen höhere Leitfähigkeiten. Dies könnte durch eine Wasseraufnahme aus tieferen Horizonten erklärbar sein. Bei Fichte unterschied sich nicht nur der Mineralboden, sondern auch der Auflagehumusboden auf Kalk von der Dolomitvariante: Die Fichte zeigte bei Auflagehumus auf Dolomit signifikant negativere Blattwasserpotentiale gegenüber den beiden Kalkvarianten. Stark negative Blattwasserpotentiale bei sehr geringen Blattleitfähigkeiten deuten auf stärkeren Wasserstress am flachgründigen vergrasteten Dolomitstandort als am Kalkstandort hin.

Im Rahmen eines Trockenstressexperimentes im Versuchsgarten der BOKU Wien während des bereits abgeschlossenen SicAlp Projekts konnten wichtige ergänzende Erkenntnisse über die unterschiedliche Sensitivität der im Freiland untersuchten Baumarten gegenüber Trockenstress gewonnen werden. Ähnlich zeigte Fichte unter Trockenstress unterschiedliche physiologische Raten in Bezug auf die häufigsten Bodentypen in den Nördlichen Kalkalpen (Abbildung 8), nämlich signifikant höhere Photosyntheseraten auf Auflagehumus/Kalk und Mineralboden als bei Auflagehumus/Dolomit mit ausgeprägter Konkurrenzvegetation.

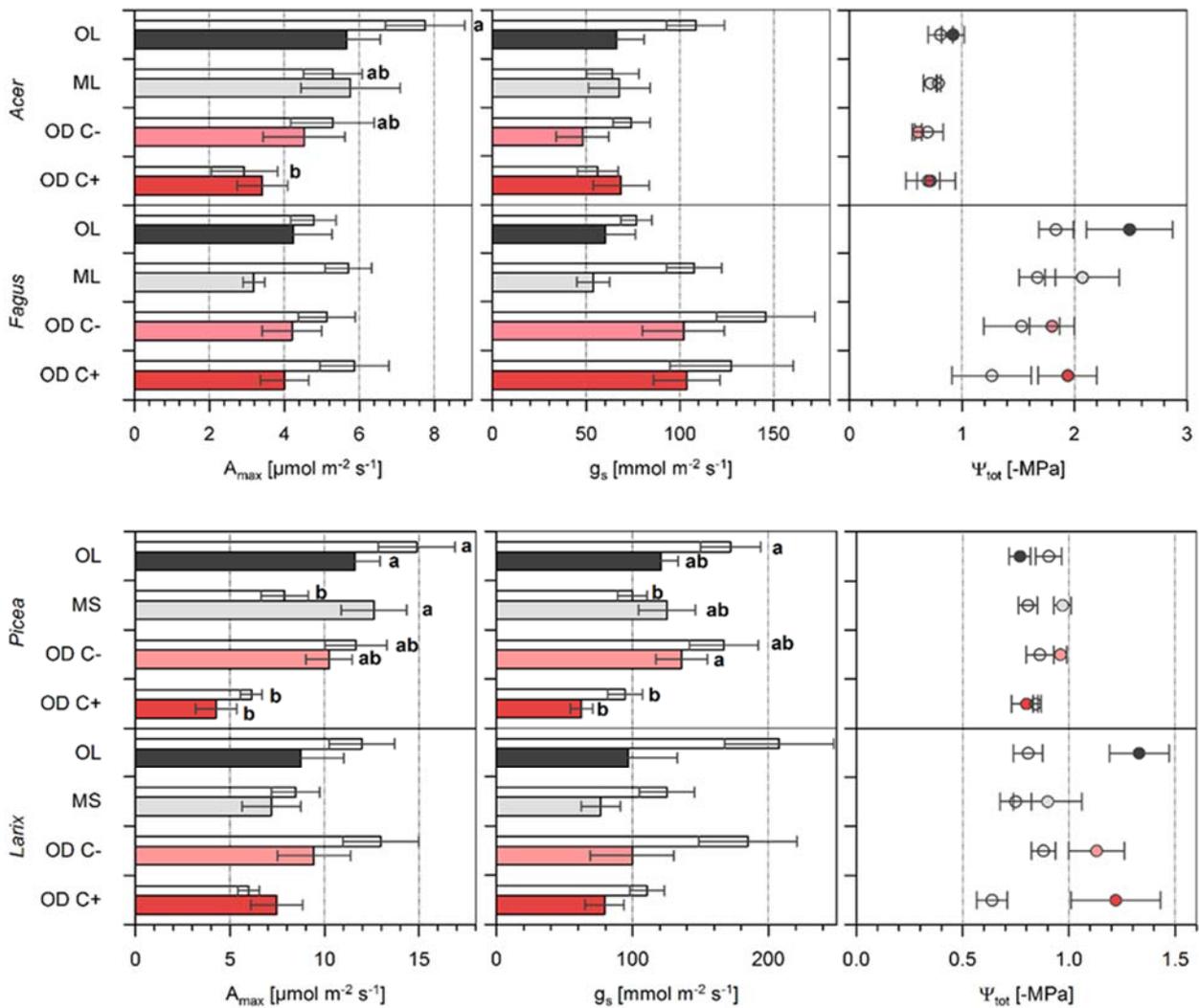


Abbildung 8: Mittlere max. Photosyntheseraten ( $A_{max}$ ), Blattleitfähigkeiten ( $g_s$ ) und Blattwasserpotentiale ( $\Psi_{tot}$ ) von 5 - 8 Individuen je Baumart, Bodenvariante und Behandlung (Kontrolle – weiß, Stress – gefärbt). OL = Auflagehumus/Kalk, MS = Kalklehmrendzina, OD C- = Auflagehumus/Dolomit ohne Konkurrenz, OD C+ = Auflagehumus/Dolomit mit Konkurrenzvegetation. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Treatments der Kontroll- bzw. Stressvariante.

*Mean photosynthetic rate ( $A_{max}$ ), stomatal conductance ( $g_s$ ) and leaf water potentials ( $\Psi_{tot}$ ) of 5 - 8 individuals of each species, substrate and treatment (control – white, stressed – coloured). OL = organic soil on limestone, MS = mineral soil, OD C- = organic soil on dolomite without competing vegetation and OD C+ = organic soil on dolomite with dense competing vegetation. Different letters indicate significant differences between the control and drought stress treatments.*

Vergleicht man die absoluten Blattwasserpotentialwerte der Baumarten zwischen Freiland und Gefäßversuch, so stellt man beträchtlich negativere Werte, also stärkeren Wasserstress im Freiland gegenüber dem Gefäßversuch fest. Eine Ausnahme bildet die Buche, die ähnlich negative Blattwasserpotentiale bei den Varianten aufweist, jedoch in beiden Versuchen ohne statistische Signifikanz. Überdies konnte beim Gefäßversuch der Einfluss von Konkurrenz durch Gräser durch die Kontrollvariante Auflagehumus auf Dolomit ohne Konkurrenzvegetation abgeschätzt werden. Die signifikanten Unterschiede in der Blattleitfähigkeit zwischen den zwei Dolomitvarianten mit und ohne Konkurrenz belegen die bereits in zahlreichen Studien diskutierte Sensitivität von Fichte gegenüber Konkurrenz im Hinblick auf den Wasserhaushalt. Im Gegensatz zum Freiland konnten bei Berg-Ahorn, Buche und Lärche keine signifikanten Ergebnisse unter kurzfristigem Trockenstress festgestellt werden.

### **c) Ernährungssituation**

Anhand der chemischen Blattanalysen und mittels Vergleichen von gemessenen Werten mit ernährungskundlichen Schwellenwerten von Van den Burg (Mellert und Göttlein 2012, Göttlein et al. 2011) konnte klar demonstriert werden, dass die Baumarten unzureichend mit Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) versorgt waren. Für alle vier Baumarten und Bodenvarianten lagen die Konzentrationen für P und K stark unter den kritischen Schwellenwerten. Die N-Versorgung unterschied sich deutlich zwischen den Substraten. Während bei der Auflage auf Kalk nur ein latenter (Ahorn) bzw. kein Mangel (Buche) vorlag, waren die Sämlinge im Auflagehumus auf Dolomit und Mineralboden stark N limitiert (Abbildung 9). Bei Ahorn bzw. Buche trat ein latenter Mangel von diversen Spurenelementen auf.

Bei Fichte stellte man bei Stickstoff einen ähnlichen Trend fest: Ausreichende Stickstoffversorgung bei Auflagehumus auf Kalk, latenter Mangel bei der Mineralbodenvariante, Mangel bei Dolomit ohne Konkurrenzvegetation und extremer Mangel bei demselben Substrat mit Konkurrenzvegetation. Im Gegensatz dazu war Lärche in allen Substraten gut mit Stickstoff versorgt. Bei Fichte und Lärche wurden ebenso kritische Blattkonzentrationen von einzelnen Spurenelementen (Fe, Mn) festgestellt.

Baumart	Substrat	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
		[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[µg/g]	[µg/g]	[µg/g]
Ahorn	Kalk <sub>Org.</sub>	17.2	0.77	2.29	28.3	6.5	82.2	281.5	85.9
	Dolo <sub>Org.</sub>	12.0	1.16	1.97	24.3	10.2	69.6	29.1	51.0
	Dolo <sub>Org.</sub> C+	11.0	1.18	1.95	27.6	10.0	68.5	55.0	72.0
	Koll <sub>Min.</sub>	16.1	0.97	2.25	25.6	8.2	80.3	35.3	68.7
Buche	Kalk <sub>Org.</sub>	19.1	0.75	2.79	17.7	3.9	115.5	339.7	66.9
	Dolo <sub>Org.</sub>	16.8	0.90	2.62	16.5	6.7	113.1	44.3	35.8
	Dolo <sub>Org.</sub> C+	15.0	0.71	2.80	15.1	6.2	117.6	60.3	48.1
	Koll <sub>Min.</sub>	16.6	0.73	2.57	14.7	5.5	115.1	67.5	36.0

Baumart	Substrat	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
		[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[µg/g]	[µg/g]	[µg/g]
Fichte	Kalk <sub>Org.</sub>	16.3	0.69	1.62	12.3	1.15	61.1	267	79.9
	Dolo <sub>Org.</sub>	11.2	0.59	1.83	15.7	4.31	62.1	24.6	75.3
	Dolo <sub>Org.</sub> C+	9.1	0.51	1.01	12.2	3.72	78.4	15.7	41.8
	Koll <sub>Min.</sub>	13.1	0.54	1.58	15.5	3.45	94.4	18.6	66.5
Lärche	Kalk <sub>Org.</sub>	21.8	0.58	2.17	5.4	2.75	51.9	201.5	42.0
	Dolo <sub>Org.</sub>	19.0	0.56	1.62	7.48	5.32	43.1	36.6	38.6
	Dolo <sub>Org.</sub> C+	17.7	0.56	1.38	7.10	5.64	38.8	28.9	29.7
	Koll <sub>Min.</sub>	22.9	0.55	1.54	11.2	6.63	130.5	24.0	30.5

Abbildung 9: Blattnährstoffkonzentrationen von Ahorn, Buche, Fichte und Lärche auf verschiedenen Substraten (Kalk<sub>org</sub> = Auflagehumus auf Kalk, Dolo<sub>org</sub> = Auflagehumus auf Dolomit ohne Konkurrenzvegetation, Dolo<sub>org</sub> C+ = Auflagehumus auf Dolomit mit Konkurrenzvegetation, Koll<sub>Min</sub> = Mineralboden). Dunkelgrün – Überschuss, grün – Normalbereich, gelb – latenter Mangel, orange – Mangel, rot – extremer Mangel.

*Leaf nutrient concentrations of sycamore, beech, spruce and larch growing on different substrates (Kalk<sub>org</sub> = organic soil on limestone, Dolo<sub>org</sub> = organic soil on dolomite without competing vegetation and Dolo<sub>org</sub> C+ = organic soil on dolomite with dense competing vegetation, Koll<sub>Min</sub> = mineral soil). Dark green – surplus, green – optimum, yellow – latent deficiency, orange – deficiency, red – extreme deficiency.*

Untersucht man nun den Einfluss von Blattnährstoffkonzentrationen (N, P und K) auf die physiologischen Raten, so stellt man hohe Korrelationen zwischen der Photosynthese bzw. Blattleitfähigkeit und den Kaliumkonzentrationen ( $r = 0,6 - 0,8$ ) sowie eine hohe, aber etwas niedrigere Korrelation zwischen der Photosynthese und den Blattstickstoffkonzentrationen ( $r = 0,5 - 0,6$ ) bei Ahorn und Fichte fest (Abbildung 10). Bei Buche und Lärche lag eine enge Beziehung zwischen der Blattleitfähigkeit und dem Bodenwassergehalt ( $r = 0,5$ ) vor. Das Wasserdampfdruckdefizit war eng mit der Photosynthese und Blattleitfähigkeit von allen Baumarten bis auf Fichte korreliert ( $r \geq -0,5$ ).

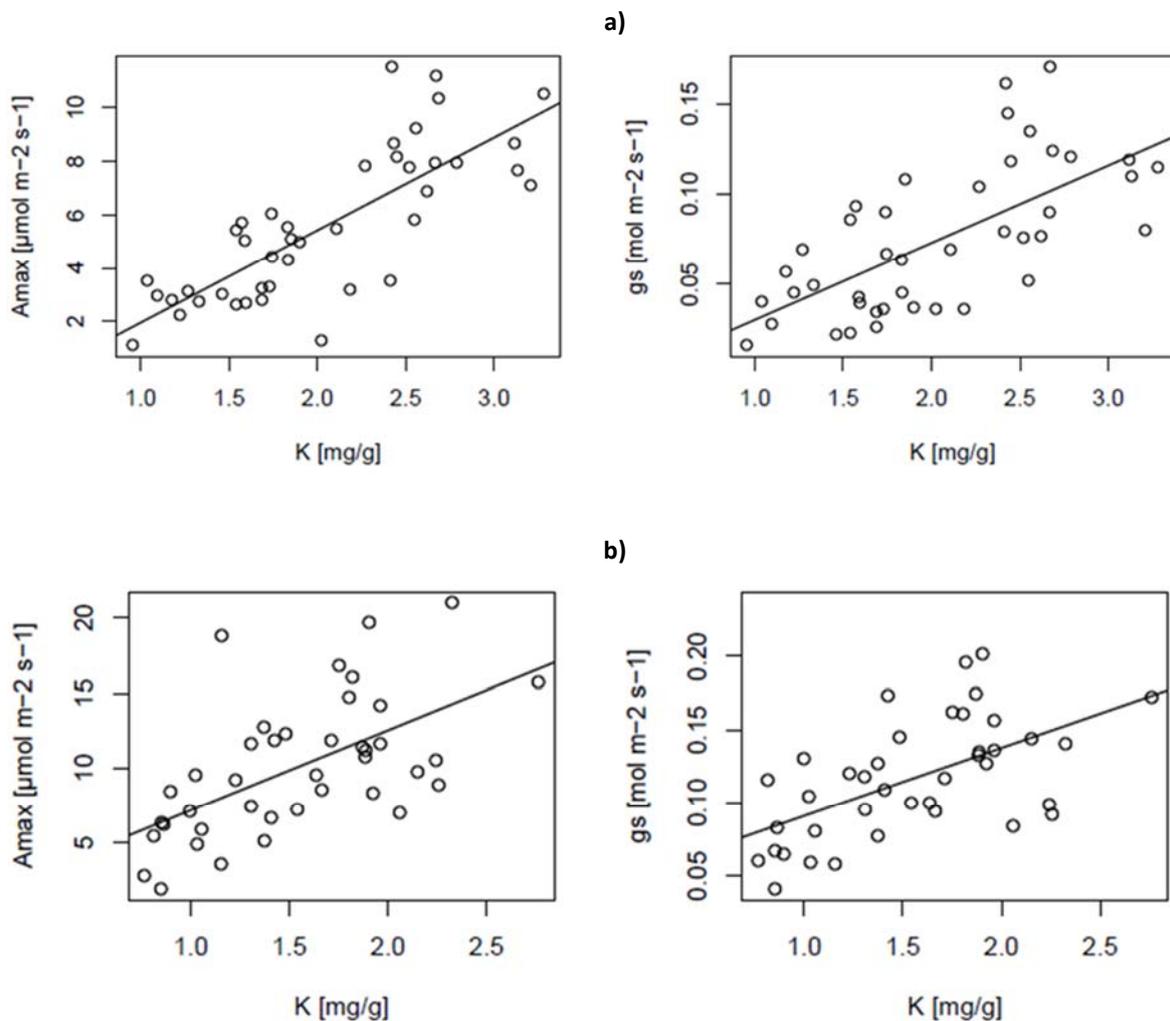


Abbildung 10: Korrelationen bei Ahorn (a) und Fichte (b) zwischen der Photosynthese ( $A_{max}$ ) bzw. Blattleitfähigkeit ( $g_s$ ) und den Kaliumgehalten (K) in den Blättern.

*Correlations between photosynthetic rate ( $A_{max}$ ) and stomatal conductance ( $g_s$ ) respectively and the leaf potassium concentrations (K) of sycamore (a) and spruce (b).*

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich erkennen, dass die Photosyntheseleistung und Blattleitfähigkeit bei Ahorn und Fichte stark von der Ernährung abhängen und bei kurzfristigem Trockenstress die Wasserverfügbarkeit im Boden einen geringeren Einfluss als die Nährstofflimitierung ausübt. Bei Buche und Lärche hingegen erkennt man einen deutlichen Einfluss des Bodenwassergehalts zumindest auf die Blattleitfähigkeit und demnach eine höhere Sensitivität gegenüber kurzzeitigem Trockenstress als bei Ahorn und Fichte.

### **3 ÖKOLOGISCHE BEDEUTUNG DER VORAUSVERJÜNGUNG FÜR DIE WIEDERBEWALDUNG VON STURMWURFFLÄCHEN**

#### **3.1 Fragestellungen**

- Was können Bergahornüberhälter für die Wiederbewaldung von Sturmwurfflächen im Kalkalpin leisten?
- Welchen Einfluss hat Vorausverjüngung auf den Bodentemperatur- und Wasserhaushalt von Sturmwurfflächen im Vergleich zu Grasvegetation und Altbestand?
- Wie unterscheiden sich Wachstum und Ernährung von Natur- und Kunstverjüngung auf Sturmwurfflächen im Kalkalpin?

#### **3.2 Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet liegt etwa 25 km südöstlich von Salzburg, nahe Bad Reichenhall, am südwestlichen Ende des Lattengebirges (Tabelle 1). Die Windwurfflächen sind im Januar 2007 durch den Sturm Kyrill entstanden. Bei einer Höhenlage von 1450 m ü. NN befindet sich das Gebiet im Übergangsbereich von der hochmontanen zur tiefsubalpinen Stufe und ist gekennzeichnet durch ein kühles (3 - 4 °C Jahresmitteltemperatur), humides (> 2000 mm Jahresniederschlag) Klima mit einer langen Schneebedeckung (i.d.R. bis Ende April/Anfang Mai). Über dem anstehenden Dachsteinkalk liegt ein kleinräumiges Mosaik aus Fels-Humusböden, Rendzinen und Terra-Fuscae. Äolische Flugstaubeinträge, die in den Humusaufgaben deutlich anhand von Glimmerblättchen zu erkennen sind, dürften zu einer Verbesserung der Standortseigenschaften beitragen. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf südost- bis südwestexponierte Flächen, die mittel bis stark geneigt sind. Tabelle 1 fasst die wichtigsten Informationen zum Untersuchungsgebiet zusammen.

Tabelle 1: Beschreibung des Untersuchungsgebietes.

*Description of the study area.*

Lage	25 km südöstlich von Salzburg; ca. 8 km südlich von Bad Reichenhall
Höhenlage	1450 m ü. NN; Übergang von der hochmontanen zur tiefsubalpinen Stufe
Jahresmitteltemperatur	3,5 °C
Jahresniederschlag	2000 - 2500 mm
Geologie	Dachsteinkalk; äolische, silikatische Feinstaubeträge; (evtl. auch Löss)
Böden	Fels-Humusböden, Rendzinen, Terra-Fuscae
Hangneigung	mittel bis stark
Exposition	SO bis SW (untersuchte Flächen)
Natürliche Waldgesellschaft	Carbonat-Bergmischwald im Übergang zum tiefsubalpinen Carbonat-Fichtenwald
Bestand vor dem Sturm	Einschichtiger ca. 200 Jahre alter fichtendominierter Altbestand
Nutzungsgeschichte	Salinenforst (wahrscheinlich); Waldweide (bis 2009)

### **3.3 Bedeutung von Bergahorn-Überhältern für die Verjüngung von Sturmwurfflächen im Kalkalpin**

#### **3.3.1 Methodik**

Im Gegensatz zu den Fichten haben auf den Kyrillflächen im Lattengebirge einige Bergahorne dem Sturm standgehalten. Da der Vorbestand fast nur aus Fichte bestand, scheint die Überlebenswahrscheinlichkeit für Bergahornaltbäume gegenüber Fichte um ein Vielfaches erhöht zu sein. Im Umkreis von einigen dieser Bäume hat sich eine üppige Bergahornverjüngung eingestellt, bei anderen wiederum nicht. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde versucht, den Beitrag dieser Überhälter zur Wiederbewaldung der Flächen zu quantifizieren und die Gründe für die unterschiedlichen Verjüngungsdichten zu finden.



Abbildung 11: Bergahornüberhälter im Gelände im Herbst 2013. Bei den Pflanzen mit orangen bis gelben Blättern handelt es sich um Bergahornverjüngung.

*Old Acer pseudoplatanus tree in the windthrow affected area in autumn 2013. The plants with orange and yellow leaves are Acer pseudoplatanus regeneration.*

Am Beispiel eines Überhälters (Abbildung 11), in dessen Umkreis (> 200 m) sich kein anderer Altbaum befindet bzw. vor dem Sturm befand, wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Wie weit reicht der Einfluss eines solchen Bergahornüberhälters?
- Mit welchen Verjüngungsdichten in Abhängigkeit von Entfernung und Himmelsrichtung vom Baum ist zu rechnen?
- Wie setzt sich die Altersstruktur der Verjüngung zusammen?

Um die Verjüngungsdichten und die Ausbreitungsabstände zum Mutterbaum festzustellen, wurden im Spätsommer 2013 in 5 m - Abständen die Verjüngungszahlen in Stickprobenkreisen von  $r = 2$  m in unterschiedlichen Himmelsrichtungen (insgesamt 10) aufgenommen. An jeder

aufgenommenen Pflanze wurde eine Altersbestimmung anhand der Zählung der Triebbasisnarben durchgeführt sowie die Gesamthöhe und die aktuelle Jahrestrieblänge gemessen. Mit Hilfe von geostatistischen Analysen wurde zwischen den Aufnahmepunkten interpoliert und eine Karte mit Verjüngungsdichten in Abhängigkeit vom Abstand zum Mutterbaum erstellt.

### **3.3.2 Ergebnisse und Diskussion**

#### **a) Flächenverteilung der Verjüngung von Bergahorn**

Abbildung 12 zeigt die aus den Stichprobenpunkten geostatistisch interpolierte flächendeckende Verteilung der Jungpflanzen. Auf einer Gesamtfläche von ca. 3500 m<sup>2</sup> um den Mutterbaum kann mit einer flächendeckenden Anzahl von mind. 2000 Jungbäumen pro ha, auf einer Fläche von 4700 m<sup>2</sup> mit mindestens 1000 Jungpflanzen pro ha gerechnet werden. Bis zu einem Abstand von 45 m wurde im Durchschnitt über alle Himmelsrichtungen noch mindestens eine Jungpflanze pro Stichprobenkreis gefunden. Bei einer günstigen Verteilung der Überhälter könnten bereits drei fruktifizierende Altbäume pro ha für eine flächendeckende Verjüngung von > 2000 Pflanzen pro ha sorgen.

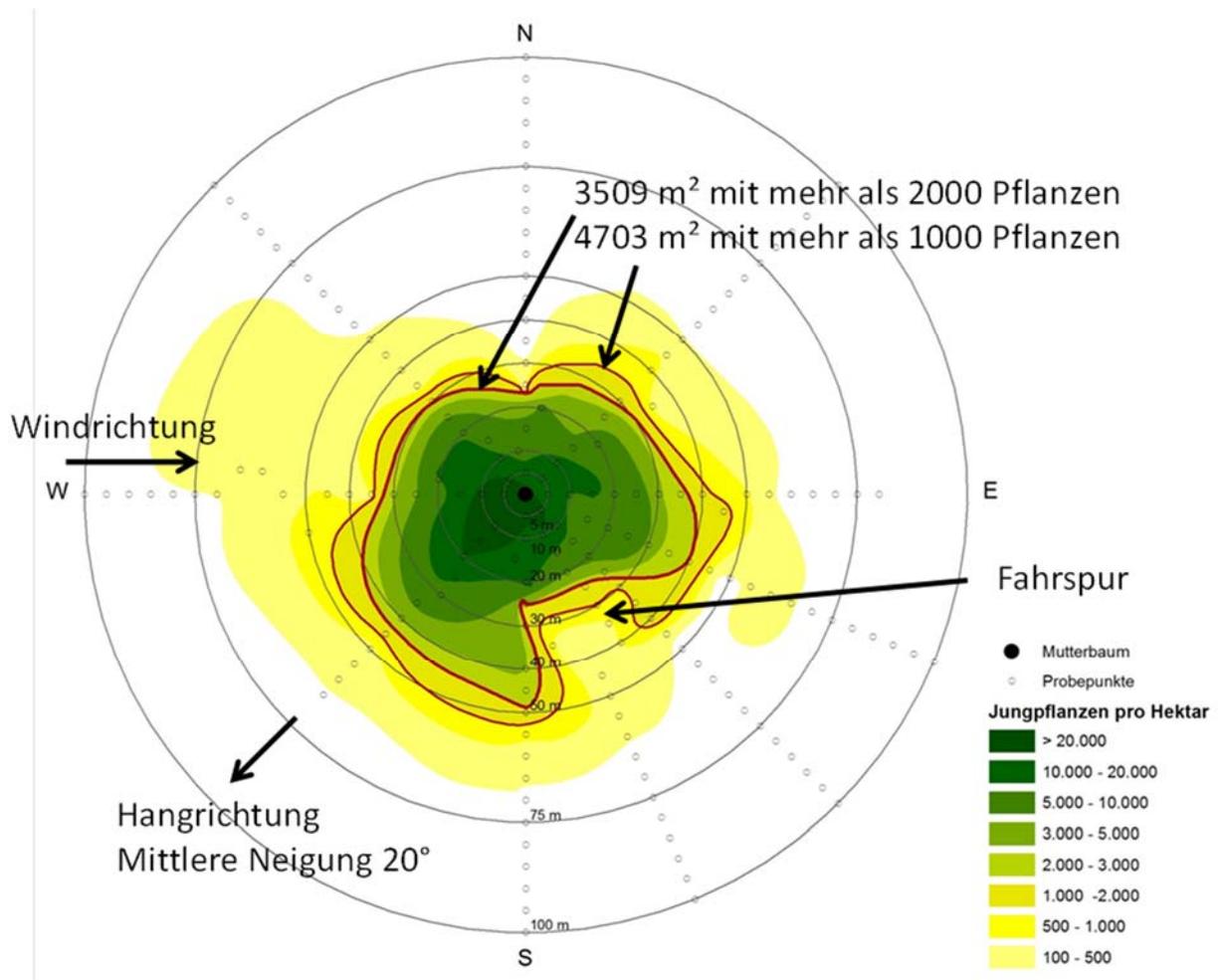


Abbildung 12: Dichte und Verteilung der Verjüngung um den Mutterbaum. Innere rote Linie: Grenze innerhalb der mindestens 2000 Pflanzen pro ha vorhanden sind; Äußere rote Linie: Grenze innerhalb der mindestens 1000 Pflanzen pro ha vorhanden sind.

*Density and distribution of *Acer pseudoplatanus* regeneration around the mother tree. Inner red line: area with at least 2000 juvenile plants per hectare; Outer red line: area with at least 1000 juvenile plants per hectare.*

Einen starken Einfluss auf die Verteilung der Verjüngung haben die Hangrichtung, die Windrichtung und allem Anschein nach auch Fahrspuren, die beim Räumen der Flächen entstanden sind. In Hangrichtung (SW) reicht die Grenze der Linie innerhalb derer mit mind. 2000 Jungpflanzen zu rechnen ist bis fast 45 m Entfernung vom Mutterbaum. Im Süden und Osten reicht diese Linie bis 50 bzw. 40 m vom Altbaum und dürfte von der vorherrschenden Windrichtungen West bis Nordwest beeinflusst sein. In nördlichen Richtungen (N, NO, NW) werden dagegen kaum 30 m erreicht. Die Depression in Richtung Südosten ist auf eine Fahrspur zurückzuführen, auf der der Boden so stark verdichtet war, dass sich keine Bergahornverjüngung etablieren konnte.

## b) Alters- und Höhenverteilung der Bergahornverjüngung

Die Altersverteilung der Bergahornverjüngung gibt wichtige Informationen über die Zeitpunkte, die für die Etablierung günstig sind. Abbildung 13 zeigt, dass über 30 % der Pflanzen aus dem Jahr 2008 stammen (ein Jahr nach dem Sturm). Insgesamt keimten 75 % der Bergahornverjüngung in den Jahren 2007 - 2009 nach dem Sturm. Die Samen der Pflanzen, die im Jahr 2007 gekeimt haben, wurden noch im Altbestand erzeugt, diejenigen von 2008 und 2009 bereits auf der Freifläche.

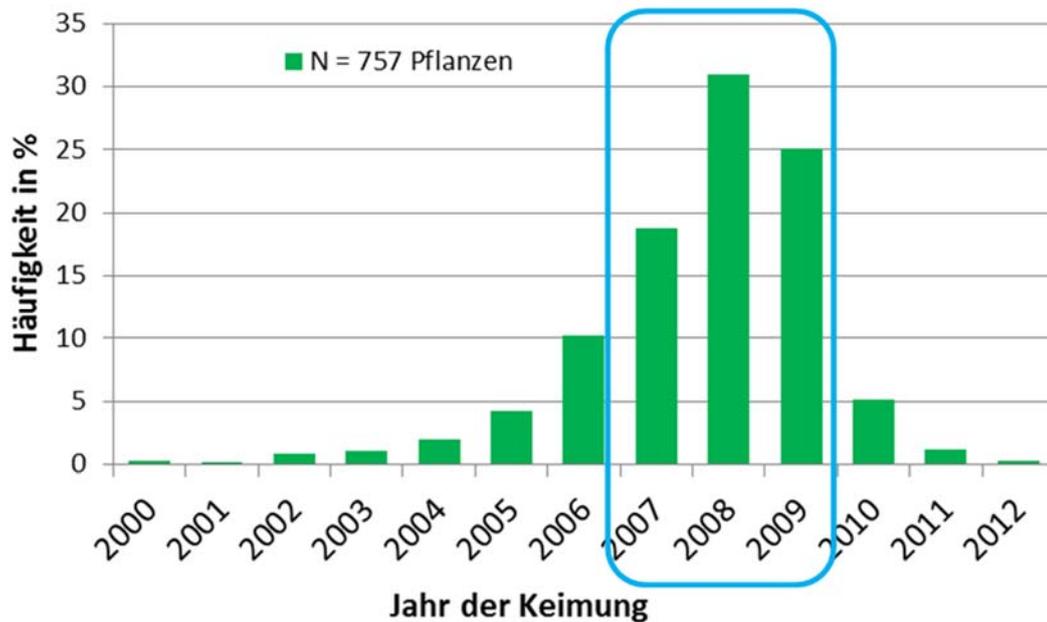


Abbildung 13: Altersverteilung der Bergahornverjüngung bezogen auf das Jahr der Keimung.

*Age distribution of Acer pseudoplatanus regeneration based on the year of germination.*

Die Fähigkeit zur Fruktifikation des Mutterbaumes bereits beim Eintritt der Kalamität scheint also eine essentielle Voraussetzung für eine erfolgreiche Verjüngungsetablierung zu sein. Dies zeigte sich auch bei der Untersuchung einiger Bergahorne, die dem Sturm zum Opfer gefallen sind. Um die Stümpfe dieser Bäume fand sich nämlich kaum Bergahornverjüngung. Auch Bergahorne, die zum Zeitpunkt des Sturms noch nicht fruktifiziert haben, weisen in ihrem Umfeld kaum Jungpflanzen auf. Die günstigste Zeit der Etablierung sind die ersten drei Vegetationsperioden nach dem Sturmwurf. Weniger als 20 % der Pflanzen keimten vor dem Sturm und weniger als 10 % nach 2009. Die zunehmende Vergrasung und Verkrautung der Fläche erschwerte ab 2010 wahrscheinlich die Etablierung von weiteren Sämlingen. Aus dem Jahr 2013 fanden sich schließlich keine Keimlinge mehr.

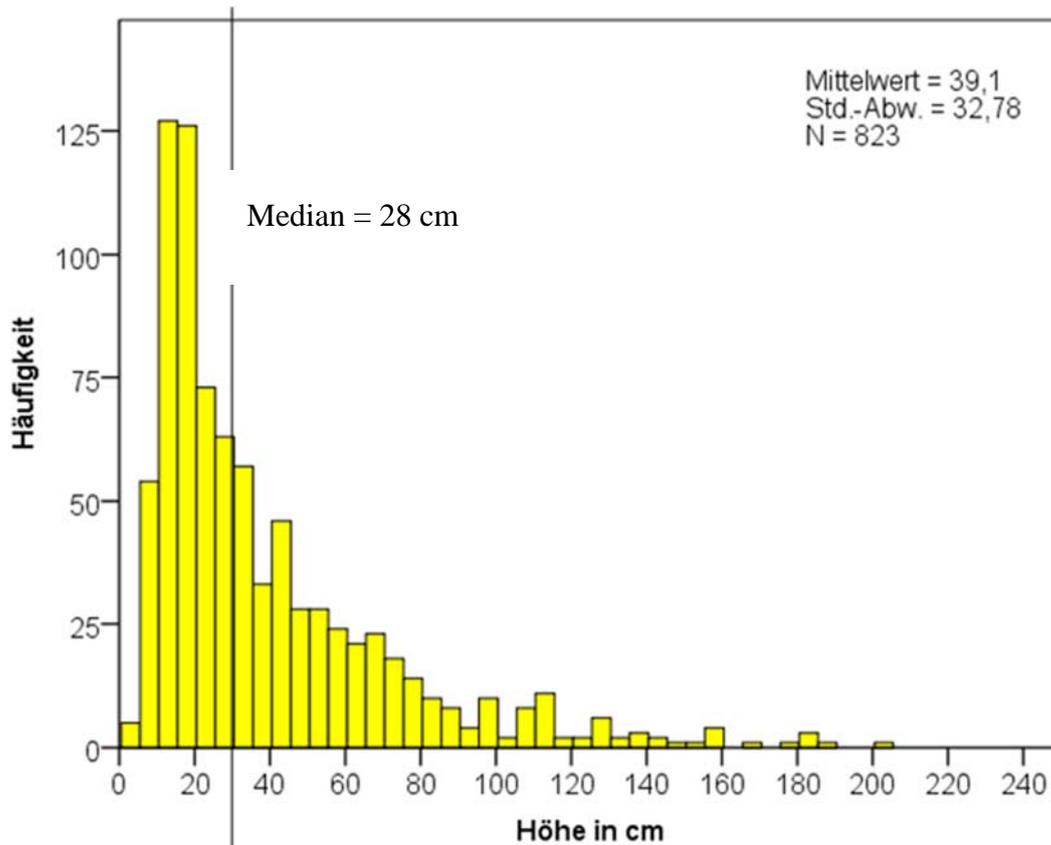


Abbildung 14: Verteilung der Höhe der Verjüngungspflanzen.

*Height distribution of the natural *Acer pseudoplatanus* regeneration.*

Im Mittel lag die Höhe der aufgenommenen Verjüngung bei 39 cm während die Hälfte aller Pflanzen größer als 28 cm war (Median) (Abbildung 14). Es ist zu erwarten, dass sich die Verjüngung bei einem angepassten Jagdmanagement gut entwickelt.

### c) Vorteile des Bergahorns bei der Wiederbewaldung

Ein großer Vorteil des Bergahorns ist, dass er jedes Jahr fruktifiziert und daher die guten Etablierungsbedingungen in den Jahren nach dem Sturm besser nutzen kann als Baumarten, die ihr Samenpotential auf wenige Mastjahre beschränken, wie z.B. Fichte, Tanne und Buche, wobei die Mastjahre im Gebirge zudem noch seltener sind als im Flachland. Die Ergebnisse zeigen, dass die ersten 3 - 4 Jahre nach dem Sturmwurf die entscheidenden für die Etablierung der Jungpflanzen sind. Danach ist das Ankommen von Verjüngung durch die sich ausbreitende Bodenvegetation erschwert und scheint nach 5 Jahren gänzlich zum Erliegen zu kommen.

Der Bergahorn wird durch Insekten bestäubt und Selbstbefruchtung ist die Regel (fakultativ autogam). Daher sind keine Mindestabstände zum Nachbarbaum einzuhalten. Windbestäubte

Lärchen sind dagegen in der Regel auf Fremdbefruchtung (fakultativ xenogam) angewiesen. Da die relativ schweren Pollen der Lärche nicht sehr weit fliegen, tragen Lärchenüberhälter auf großen Windwurfflächen oft kaum zur Wiederbewaldung bei.

Durch sein schnelles Jugendwachstum bei hohem Lichtgenuss kann der Bergahorn der Konkurrenzvegetation schnell entwachsen. Die hohe Biomasseproduktion bedeutet auch ein hohes Maß an Nährstoffspeicherung und damit eine Verringerung der Nährstoffverluste nach Kalamitäten. Das schnelle Wachstum sorgt zudem für eine rasche Beschattung des Bodens und reduziert damit durch niedrigere Bodentemperaturen den Humusabbau. Im Schatten eines Bergahornvorwaldes können sich Fichte, Tanne und auch Buche deutlich besser verjüngen als auf der Freifläche mit ihrer extremeren Einstrahlung.

### **3.4 Temperatur und Wasserhaushalt unter Vorausverjüngung im Vergleich zu vergrasteten Flächen und zum Altbestand**

#### **3.4.1 Methodik**

In den sieben Vegetationsperioden nach dem Sturm hat sich auf den Kahlflächen im Lattengebirge eine üppige Bodenvegetation eingestellt. Neben stark vergrasteten und verkrauteten Flächen haben sich auch kleinere Inseln aus naturverjüngten Fichten entwickelt. Im Rahmen von Bodentemperatur- und Wassergehaltsmessungen wurde untersucht, wie sich das Temperatur- und Wasserregime unter naturverjüngten Fichten, unter Grasvegetation sowie im Altbestand verhalten. Dazu wurden Messsonden in unterschiedlichen Bodentiefen (5, 10 und 20 cm) eingebaut und die Werte kontinuierlich im Halbstundenrhythmus mittels Dataloggern aufgezeichnet. Abbildung 15 gibt einen Überblick über die untersuchten Vegetationstypen.

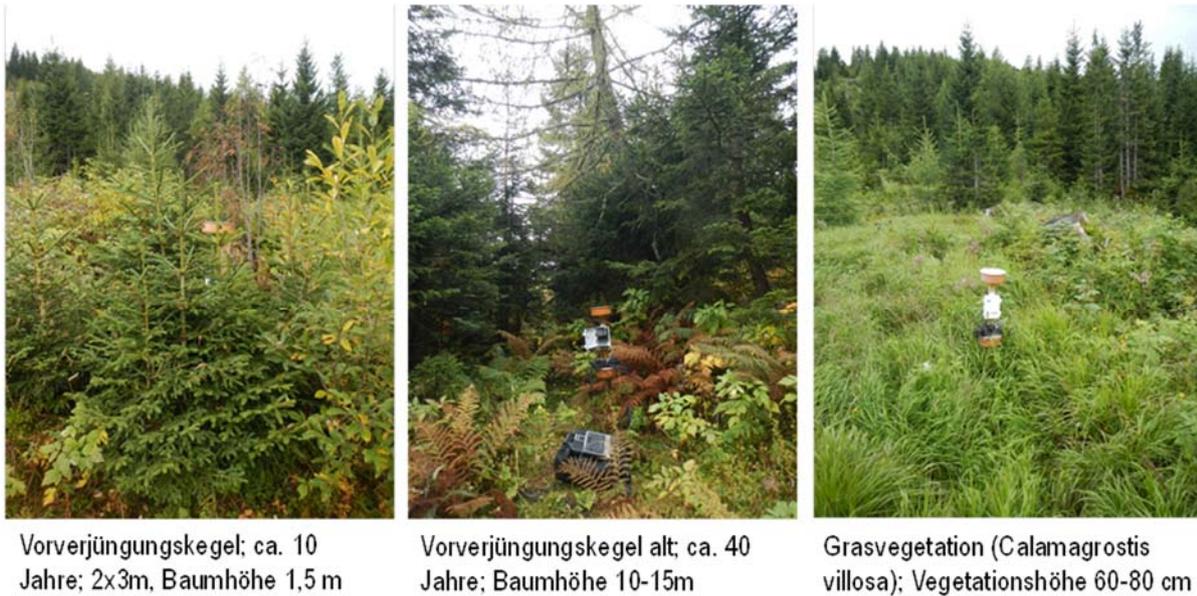


Abbildung 15: Darstellung der untersuchten Vegetationstypen: Verjüngungskegel ca. 10 Jahre alt (links), Verjüngungskegel ca. 40 Jahre alt (Mitte) und stark vergraste Fläche (rechts).

*Pictures of the studied vegetation types: spruce natural regeneration about 10 years old (left), spruce regeneration about 40 years old (center) and grass vegetation (right).*

### 3.4.2 Ergebnisse und Diskussion

#### a) Einfluss der Vorausverjüngung auf die Bodentemperatur

Die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe zeigte deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Vegetationseinheiten. Unter Grasvegetation lag zwischen Mitte Juni und Ende September die Temperatur permanent höher als im Altbestand und den Verjüngungskegeln. Spitzenwerte unter Gras lagen bei über 20 °C, während 10 °C kaum unterschritten wurde. Niedrigste Temperaturen wurden fast durchgehend im Altbestand gemessen. Die Temperaturen der Verjüngungskegel lagen meist deutlich näher an denen des Altbestandes (Abbildung 16).

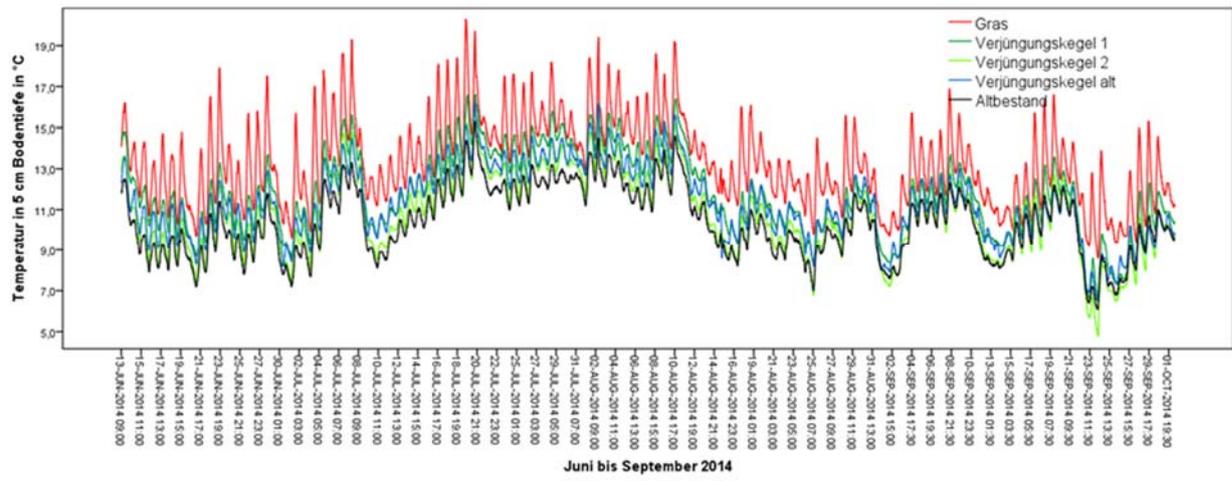


Abbildung 16: Bodentemperatur in 5 cm Tiefe von Mitte Juni bis Ende September unter Grasvegetation (rote Linie), unter zwei ca. 10-jährigen Fichtenverjüngungskegeln (grüne Linien), unter ca. 40 Jahre alter Fichtenverjüngung (blaue Linie) sowie unter einem Fichtenaltbestand (schwarze Linie).

*Soil temperature in 5 cm soil depth from mid-June to the end of September under grass vegetation (red line), two 10 year old spruce regeneration plots (green lines), a 40 year old spruce regeneration (blue line) and a spruce old growth forest (black line).*

In Abbildung 17 sind die Temperaturabweichungen zum Altbestand für den Monat Juli dargestellt. Hier wurde der direkte Temperaturunterschied der Vegetationsvarianten zum Altbestand, der hier als Referenz angenommen wird, ermittelt. Während die Abweichungen unter Gras die 5 °C - Marke regelmäßig überschritten, blieben die Abweichungen in den Verjüngungskegeln im Messzeitraum stets deutlich unter 3 °C. Im Mittel lag die Temperatur unter Gras um 3,1 °C und unter den Verjüngungskegeln um 0,7 bis 1,7 °C über der des Altbestandes.

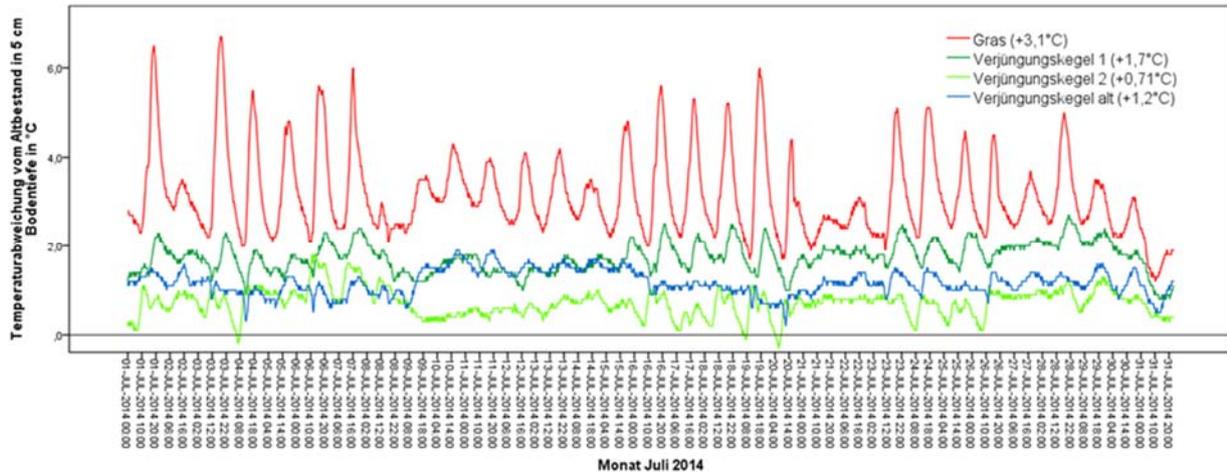


Abbildung 17: Temperaturabweichung zum Altbestand (schwarze Linie) im Monat Juli in 5 cm Bodentiefe unter drei unterschiedlichen Verjüngungskegeln sowie unter Grasvegetation.

*Temperature deviation compared to the old growth forest (black line) under three different regeneration plots (green and blue lines) and under grass vegetation (red line) in the month of July in 5 cm soil depth.*

Die Aktivität der Mikroorganismen ist stark von der Temperatur abhängig. Bei einem Temperaturanstieg von 10 °C erhöht sich diese Aktivität und den Faktor 2 - 3 ( $Q_{10}$ -Wert). Somit ist davon auszugehen, dass der Humusabbau unter Grasvegetation deutlich höher ist als im Altbestand und unter Vorausverjüngung. Außerdem erfolgt unter Vorausverjüngung durch den Eintrag von frischer Nadelstreu evtl. bereits wieder eine Akkumulation von Humus und damit eine  $CO_2$ -Speicherung, während die Grasvegetation weiterhin eine  $CO_2$ -Quelle darstellen dürfte.

## b) Einfluss der Vorausverjüngung auf den Wasserhaushalt

Die Wassergehalte sowie deren Dynamik zeigten in 20 cm Bodentiefe deutliche Unterschiede zwischen den Vegetationsformen. Unter Vorverjüngung zeigt sich ein deutlicher Wechsel zwischen Wasserentzug durch die Pflanzen und dem Auffüllen des Wasserspeichers durch Regenereignisse. Im Altbestand war diese Dynamik nicht so ausgeprägt. Das könnte daran liegen, dass die Messgeräte im Altbestand im Zwischenstammbereich eingebaut waren, wo weniger Feinwurzeln vorhanden sind und daher die Wasserentnahme geringer ist (Abbildung 18).

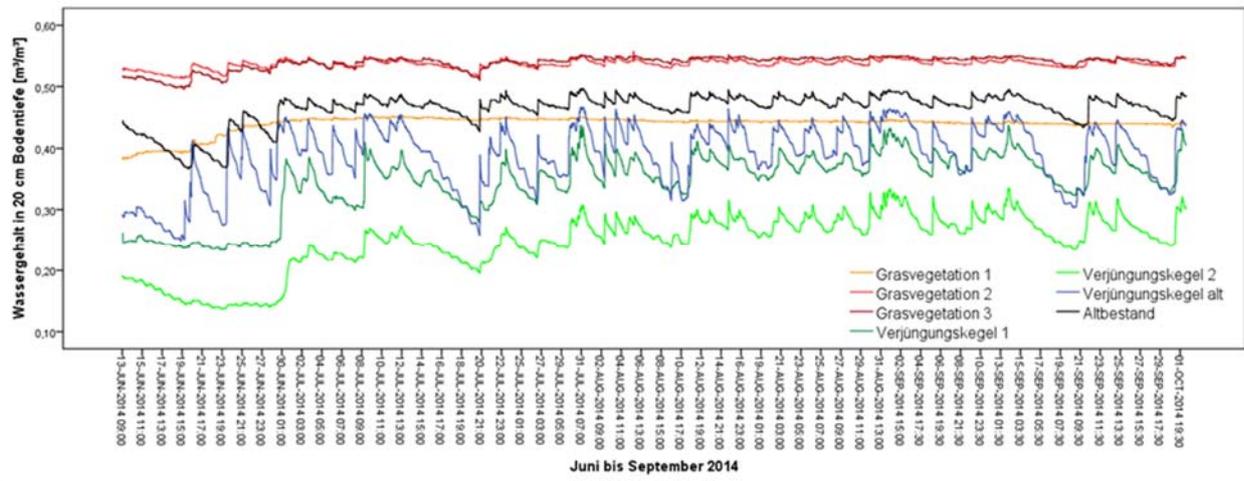


Abbildung 18: Bodenwassergehalte unter Grasvegetation (rote und orange Linien), Verjüngungskegeln (grüne und blaue Linien) sowie Altbestand (schwarze Linie) in 20 cm Bodentiefe.

*Soil water content under grass vegetation (red and orange lines), spruce regeneration (green and blue lines) and old growth forest (black line) in 20 cm soil depth.*

Unter Gras waren die Wassergehalte dagegen deutlich höher und es waren kaum zeitliche Veränderungen zu erkennen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Grasvegetation in 20 cm Bodentiefe kaum Wasser entnimmt. Sie trägt nicht zur Speicherentleerung bei und schafft damit auch keine neuen Aufnahmekapazitäten für kommende Regenereignisse. Auf großer Fläche wird sich das negativ auf den Landschaftswasserhaushalt auswirken und die Gefahr von Oberflächenabfluss steigt.

### 3.5 Wachstum und Ernährung – Naturverjüngung und Pflanzung im Vergleich

#### 3.5.1 Methodik

Das Wachstum und die Ernährung von Naturverjüngung und der 2008 angelegten Pflanzungen im Lattengebirge wurden im Jahr 2014 erneut aufgenommen und mit den Werten von 2008 verglichen.

### 3.5.2 Ergebnisse

#### a) Bergahorn

Trotz niedrigerer Ausgangshöhen der naturverjüngten Bergahorne im Jahr 2008 (Mittelwert 20 cm) im Vergleich zur Pflanzung (25 cm im Mittel), war die Naturverjüngung im Aufnahmejahr 2014 mit einer mittleren Höhe von 90 cm deutlich höher als die Pflanzung von 2008 mit 65 cm. Auch bei den Zuwächsen der Jahre 2013 und 2014 ist die Naturverjüngung mit ca. 25 % höheren Werten überlegen. Deutlich dickere Wurzelhäse sind zum einen auf eine größere Höhe der Naturverjüngung zurückzuführen, sprechen aber zusätzlich auch für eine höhere Stabilität der Naturverjüngung (Abbildung 19).

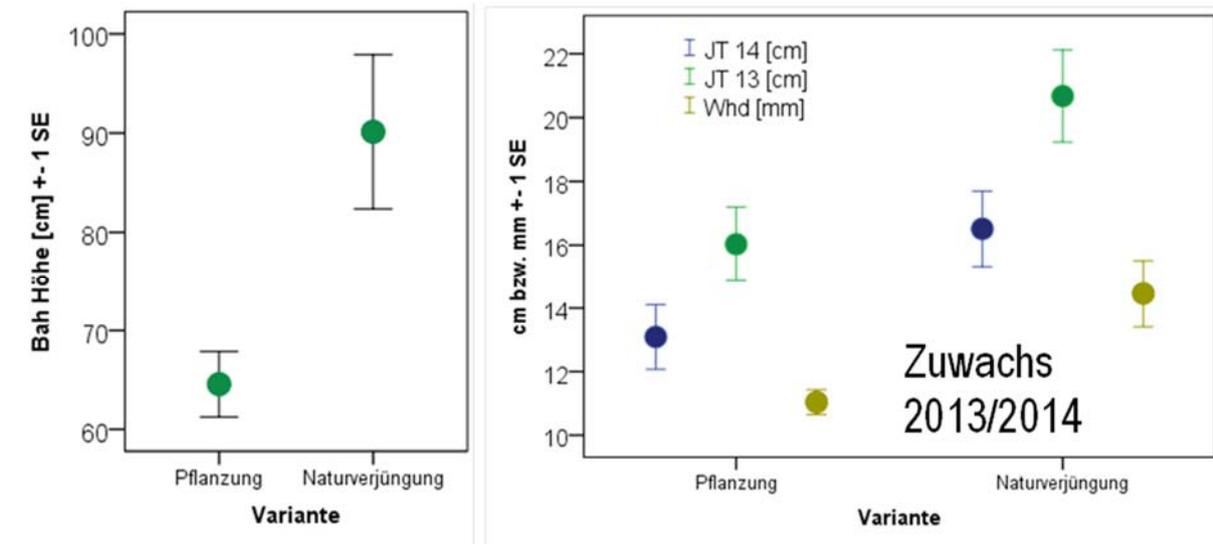


Abbildung 19: Mittlere Pflanzenhöhe in cm (2014; links) sowie Zuwächse in cm (2013 und 2014; rechts) und Wurzelhalsdurchmesser in mm (2014) für gepflanzte und naturverjüngte Bergahorne (JT = Jahrestrieb, Whd = Wurzelhalsdurchmesser).

*Average plant height in cm (2014; left diagram), annual shoot increment in cm (2013 and 2014; right) and root collar diameter in mm (2014) for planted and natural regenerated *Acer pseudoplatanus* saplings (JT = annual shoot increment, Whd = root collar diameter).*

## b) Vogelbeere

Die Ausgangshöhen der naturverjüngten Vogelbeeren lagen im Jahr 2008 im Mittel bei ca. 30 cm, bei der Pflanzung bei rund 40 cm. Hier kehrten sich die Verhältnisse noch deutlicher um als beim Bergahorn. Die Naturverjüngung ist mit 225 cm um ca. 50 % höher als die Pflanzung mit ca. 145 cm. Die mittleren Zuwächse liegen bei der Naturverjüngung um ca. 20 % höher, beim Wurzelhalsdurchmesser sogar um 60 % (Abbildung 20). Dies macht sich in einer höheren Stabilität bemerkbar. Während die Pflanzung durch die Schneesetzungsprozesse oft Brüche am Haupttrieb erleidet, ist dies bei der Naturverjüngung kaum der Fall. Zusätzlich ist die Naturverjüngung sehr oft mehrstämmig, was zu einer noch höheren Biomasseakkumulation und damit Nährstoffspeicherung führt. Auch die Beschattung des Bodens und der dadurch bedingte temperatursenkende Effekt werden verstärkt.

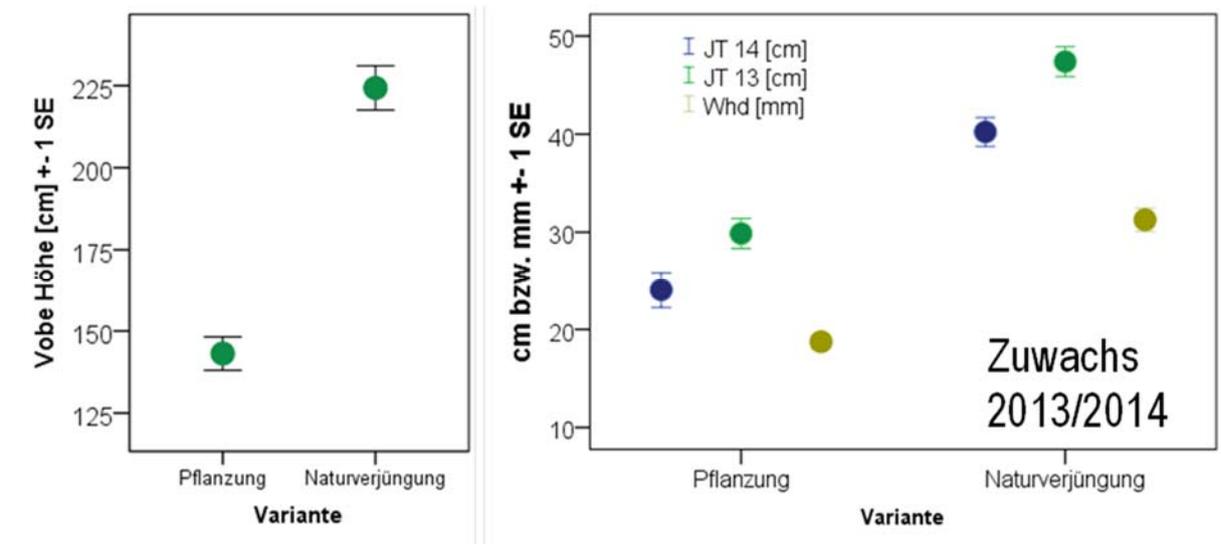


Abbildung 20: Mittlere Pflanzenhöhe in cm (2014; links), sowie Zuwächse in cm (2013 und 2014; rechts) und Wurzelhalsdurchmesser in mm (2014) für gepflanzte und naturverjüngte Vogelbeeren (JT = Jahrestrieb, Whd = Wurzelhalsdurchmesser).

*Average plant height in cm (2014; left diagram), annual shoot increment in cm (2013 and 2014; right) and root collar diameter in mm (2014) of planted and natural regenerated rowanberry saplings (JT = annual shoot increment, Whd = root collar diameter).*

Zusätzlich zur höheren Wuchsleistung ist die Naturverjüngung auf der Freifläche auch deutlich besser mit Nährstoffen versorgt. Die Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen der Blätter sind im Vergleich zu wurzelnackten Pflanzen und den Topfpflanzen von 2008 deutlich höher (Abbildung 21).

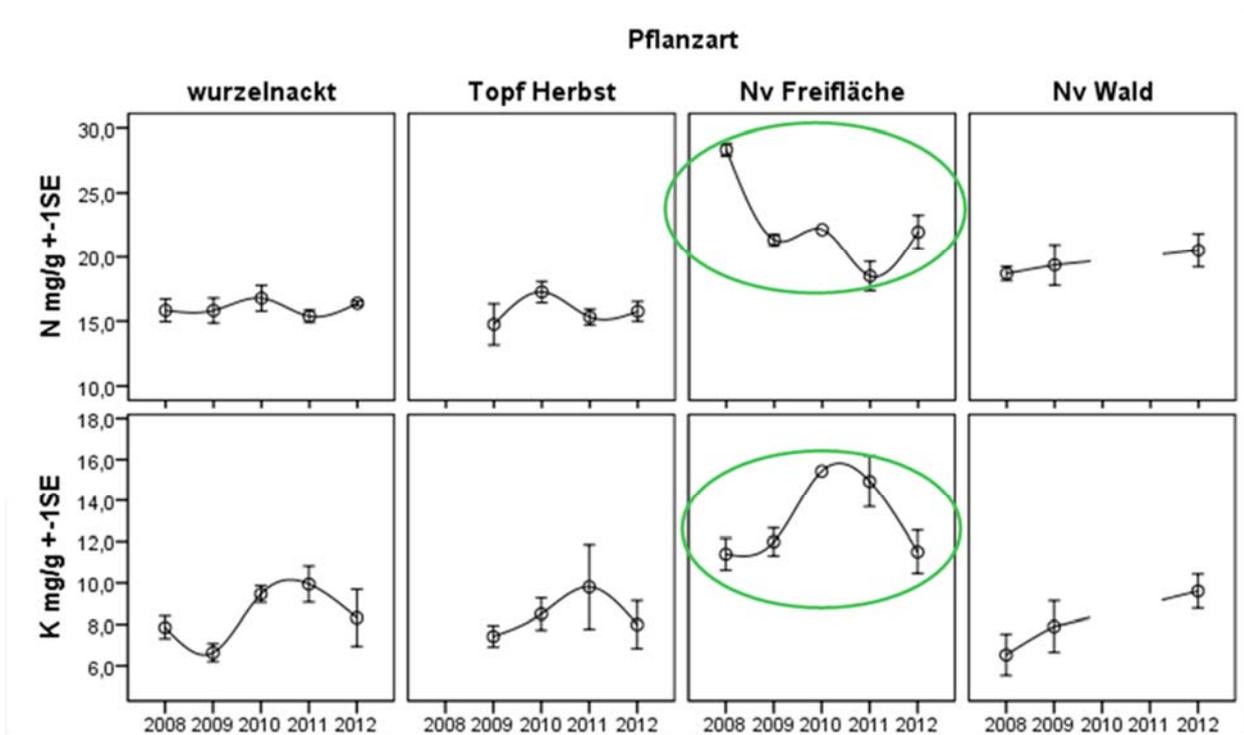


Abbildung 21: Verlauf der Nährstoffkonzentrationen für Stickstoff und Kalium in Blättern der Vogelbeere der Pflanzvarianten (wurzelackte Pflanzen und Topfpflanzen) sowie von naturverjüngten Pflanzen (Nv) (Pflanzen auf Freifläche und im Wald) von 2008 bis 2012.

*Trend of the nutrient concentrations of nitrogen and potassium in leaves of rowanberry of planted (bare rooted plants and potted plants) and natural regenerated saplings (Nv) (plants on wind throw area and plants in the mature forest) from 2008 until 2012.*

### c) Fichte

Die Ausgangshöhen bei Fichte waren bei der Naturverjüngung mit 35 cm etwas höher als bei der Pflanzung mit 30 cm. Diesen Vorsprung konnte die Naturverjüngung bis 2014 etwas ausbauen. Die mittleren Zuwächse unterscheiden sich kaum und liegen bei ca. 9 cm. Jedoch hat die Naturverjüngung einen deutlich größeren Wurzelhalsdurchmesser und in der Regel mehr Nadeljahrgänge vorzuweisen als die Pflanzung (Abbildung 22). Insgesamt ist die Naturverjüngung stärker benadelt, stabiler und vitaler als die Pflanzung.

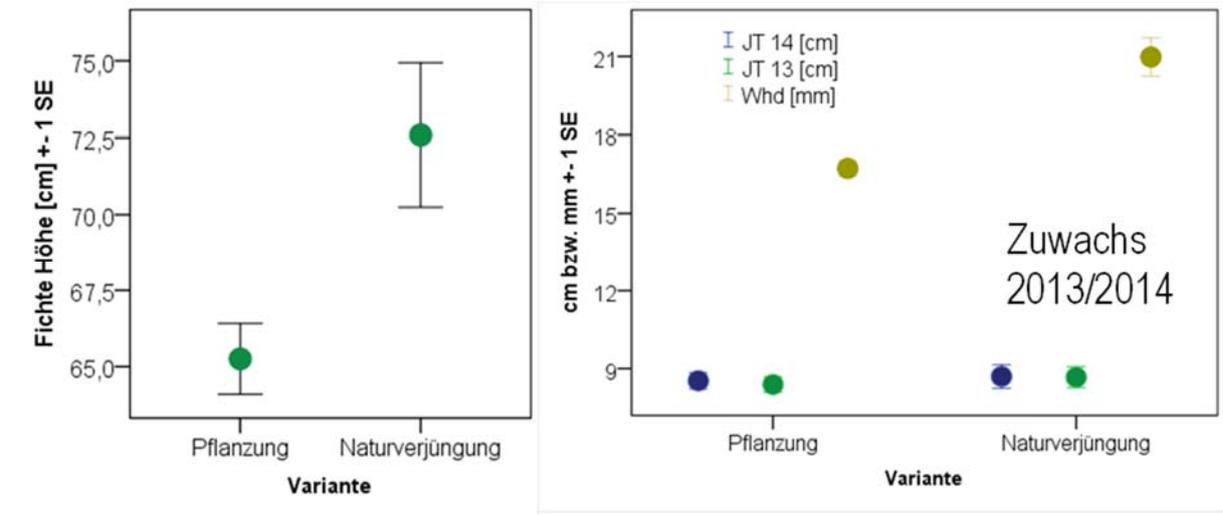


Abbildung 22: Pflanzenhöhe in cm (2014; links), sowie Zuwächse in cm (2013 und 2014; rechts) und Wurzelhalsdurchmesser in mm (2014) für gepflanzte und naturverjüngte Fichten (JT = Jahrestrieb, Whd = Wurzelhalsdurchmesser).

*Average plant height in cm (2014; left diagram), annual shoot increment in cm (2013 and 2014; right) and root collar diameter in mm (2014) of planted and natural regenerated spruce saplings (JT = annual shoot increment, Whd = root collar diameter).*

Bezüglich der Ernährung zeigt sich vor allem bei den Topfpflanzen ein deutlicher Pflanzschock, der sich in einem starken Nährstoffkonzentrationsabfall von 2008 auf 2009 äußert. Von diesem erholt sich die Pflanzung im darauffolgenden Jahr zumindest teilweise. Die Naturverjüngung auf der Sturmwurflläche weist ab 2009 (N) bzw. ab 2010 (P) höhere Nährstoffkonzentrationen in den Nadeln auf (Abbildung 23).

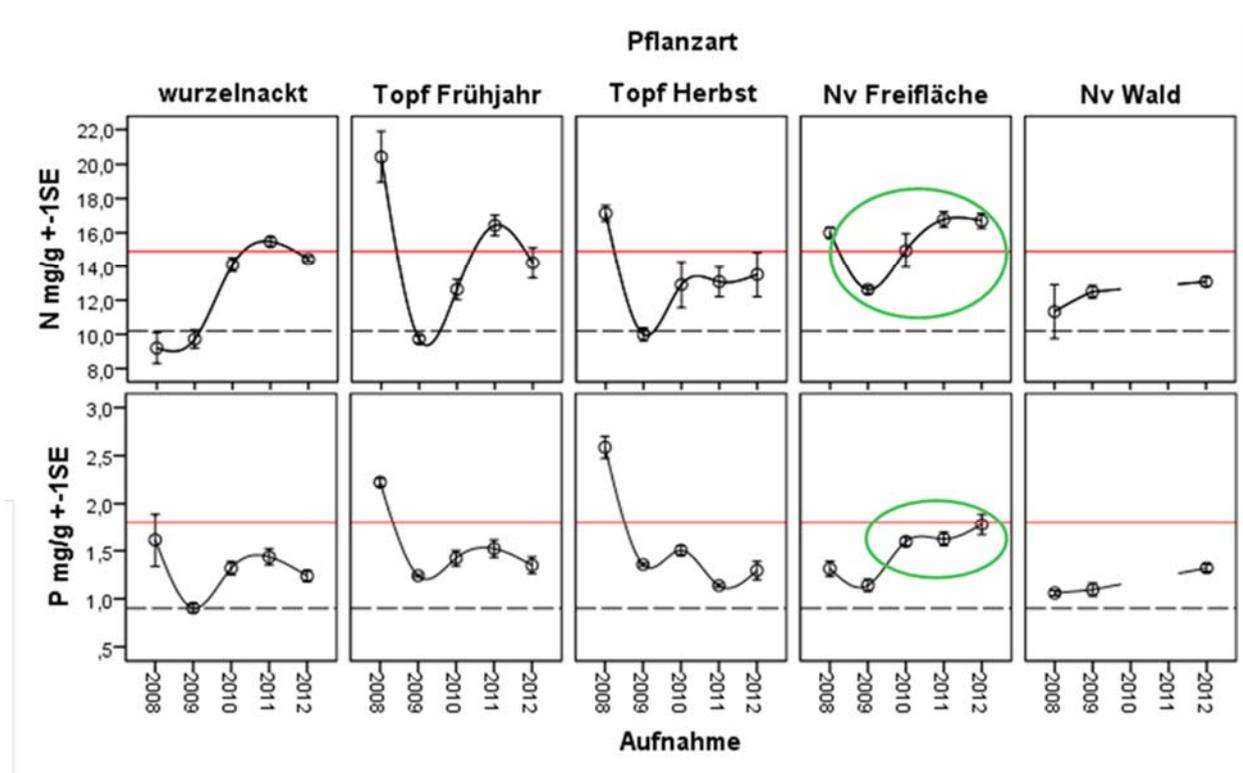


Abbildung 23: Verlauf der Nährstoffkonzentrationen für Stickstoff und Phosphor in den Nadeln der Pflanzvarianten (wurzelnackte Pflanzen und Topfpflanzen) sowie von naturverjüngten Pflanzen (Pflanzen auf Freifläche und im Wald) von 2008 bis 2012 (rote Linie: Grenzwert zur Mangelernährung; schwarze gestrichelte Linie: Grenzwert zum Extremen Mangel; jeweils nach Göttlein et al. 2011).

*Trend of the nutrient concentrations of nitrogen and potassium in the needles of planted (bare rooted plants and potted plants) and natural regenerated spruce saplings (Nv) (plants on wind throw area and plants in the mature forest) from 2008 to 2012 (red line: threshold for nutrient deficiency; black dotted line: limit for extreme deficiency; according to Göttlein et al. 2011).*

Bei den drei untersuchten Baumarten zeigt die Naturverjüngung auf den Sturmwurfflächen im Vergleich zur Pflanzung meist deutlich höhere Zuwächse und höhere Nährstoffkonzentrationen in Blättern und Nadeln. Daher trägt sie stärker zur Nährstoffspeicherung bei und damit auch zur Verringerung der Nährstoffverluste. Zusätzlich sorgt das schnellere Wachstum vor allem bei Vogelbeere und Bergahorn für eine stärkere Beschattung des Bodens und führt folglich zu niedrigeren Bodentemperaturen, die wiederum den Humusabbau bremsen.

### 3.6 Folgerungen für die Praxis

- Aufgrund der hohen Verjüngungszahlen wäre es besonders in fichtendominierten Beständen wichtig, einzelne Bergahorne regelmäßig über die Fläche verteilt zu fördern,

damit sie möglichst schnell zur Fruktifikation kommen. Dies würde die Elastizität der Wälder gegenüber Störungen deutlich erhöhen.

- Aufgrund der herausragenden Eigenschaften der Naturverjüngung bezüglich Nährstoffspeicherung, Reduzierung des Humusverlustes sowie Wasser- und Temperaturhaushalt sollte eine aktive Förderung bereits im Altbestand erfolgen. Dies umfasst sowohl waldbauliche (z.B. Steuerung des Lichtregimes, Pflanzung von Mischbaumarten,...) als auch jagdliche Maßnahmen, die eine optimale Entwicklung der Vorausverjüngung fördern.

#### 4 LITERATUR

- Aussenac, G. (2000): Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. **Ann For Sci** 57(3), 287-301.
- Diaci, J., Pisek, R., Boncina, A. (2005): Regeneration in experimental gaps of subalpine *Picea abies* forest in the Slovenian Alps. **Eur J For Res** 124, 29-36.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M. (2014): 21st century climate change in the European Alps—A review. **Sci Total Environ** 493(0), 1138-1151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.050
- Göttlein, A., Baier, R., Mellert, K. (2011): Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa – Eine statistische Herleitung aus VAN DEN BURG's Literaturzusammenstellung. **Allg Forst- u J-Ztg** 182(9/10), 173-186.
- Medrano, H., Escalona, J., Bota, J., Gulias, J., Flexas, J. (2002): Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. **Ann Bot** 89(7), 895-905.
- Mellert, K., Göttlein, A. (2012): Comparison of new foliar nutrient thresholds derived from van den Burg's literature compilation with established central European references. **Eur J For Res** 131(5), 1461-1472. DOI: 10.1007/s10342-012-0615-8
- Pröll, G., Darabant, A., Gratzer, G., Katzensteiner, K. (2014): Unfavourable microsites, competing vegetation and browsing restrict post-disturbance tree regeneration on extreme sites in the Northern Calcareous Alps. **Eur J For Res** 134(2), 1-16. DOI: 10.1007/s10342-014-0851-1
- von Arx, G., Dobbertin, M., Rebetez, M. (2012): Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. **Agric For Meteorol** 166, 144-155.



**BEWIRTSCHAFTUNGSMÖGLICHKEITEN ZUR SICHERUNG EINER  
NACHHALTIGEN WALDWIRTSCHAFT VOR DEM HINTERGRUND DER  
NÄHRSTOFFVERSORGUNG KALKALPNER STANDORTE**

*SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT BASED ON THE NUTRIENT AVAILABILITY  
IN THE NORTHERN CALCAREOUS ALPS*

**Wendelin WEIS, Axel GÖTTLEIN**

Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, Technische Universität München,  
D-85354 Freising

**SUMMARY**

Forest sites of the Northern Calcareous Alps cover wide gradients of climatic, geologic and nutritional characteristics. Nutrient cycling usually is dominated by high water fluxes and soils rich in carbonates but very different in depth, nutrient supply and gravel content. Nutrient investigations confirmed insufficient supply with important nutrients such as phosphorus, nitrogen and potassium especially on shallow soils derived from calcareous or dolomitic limestone. The assessment of forest inventory data proved that in addition to the obvious impact of climatic conditions on tree increment - with lower temperature and shorter vegetation periods at higher altitudes - forest growth is highly influenced by nutrient availability. Stands on dolomite and limestone often showed reduced productivity, whereas marly soils with high nutrient availability allowed exceptional high productivity, especially in stands of Norway spruce. Case studies on nutrient supply in soil and aboveground biomass of spruce forests confirmed the relationship between site specific nutrient supply, tree nutrition and productivity. In addition, the investigations gave clear evidence that large amounts of nutrients - for the critical elements N, P and K about 50 % - are stored in branches, twigs and needles. This material is frequently harvested in addition to stem wood with bark due to the rising demand for fuel wood, prevention against bark beetle calamities and the application of modern harvesting techniques. However, exemplary calculations showed that the additional financial profit from crown harvesting is small, especially if the deteriorating effect on site quality is taken into account. Sensitive sites frequently found in the Northern Calcareous Alps with humus over bedrock, very shallow soils or soils with high gravel content demand a careful forest management considering nutrient sustainability and site stability.

**KEYWORDS:** forest management, Northern Calcareous Alps, nutrient contents, nutrient supply, site conditions

**ZUSAMMENFASSUNG**

Die Wälder der Nördlichen Kalkalpen sind geprägt durch einen weiten Bereich klimatischer, geologischer und ernährungskundlicher Standortseigenschaften. Der Nährstoffhaushalt wird meist dominiert von hohen Wasserflüssen und karbonatreichen Böden mit hohen Unterschieden hinsichtlich Entwicklungstiefe, Nährstoffangebot und Skelettanteil. Ernährungskundliche Untersuchungen bestätigten, dass vor allem flachgründige Böden aus Kalk- und Dolomitverwitterung zu unzureichender Versorgung mit Phosphor, Stickstoff und Kalium neigen. Die Auswertung von Forstinventurdaten ergab, dass zusätzlich zu dem offensichtlichen Einfluss des Klimas auf den Zuwachs - mit niedrigerer Temperatur und kürzerer Vegetationsperiode in höheren Lagen - das Waldwachstum maßgeblich durch das Nährstoffangebot gesteuert wird. Bestände auf Dolomit und Kalk zeigten häufig geringe Produktivität, während nährstoffreiche Mergel außergewöhnlich gutes Wachstum vor allem für Fichte erlaubten. Fallstudien zur Nährstoffversorgung im Boden und der oberirdischen Biomasse von Fichtenbeständen bestätigten den Zusammenhang zwischen Nährstoffangebot, Ernährung und Wachstum. Zusätzlich zeigten die Untersuchungen, dass große Mengen an Nährstoffen - für die kritischen

Nährstoffe N, P und K etwa 50 % - in Ästen, Zweigen und Nadeln gebunden sind. Dieses Material wird häufig zusätzlich zum Stammholz mit Rinde geerntet, da die Nachfrage nach Energieholz steigt, Borkenkäferkalamitäten so vorgebeugt wird und moderne Holzerntetechniken zum Einsatz kommen. Beispielrechnungen zeigten allerdings, dass der zusätzliche finanzielle Erlös einer Kronennutzung gering ist, insbesondere dann, wenn die Verschlechterung der Standortqualität berücksichtigt wird. Empfindliche Standorte wie Fels-Humus-Böden, sehr flachgründige oder skelettreiche Böden, die häufig in den Nördlichen Kalkalpen anzutreffen sind, bedürfen einer besonders schonenden Waldbewirtschaftung, die die Aspekte der Nährstoffnachhaltigkeit und Standortstabilität berücksichtigt.

**STICHWÖRTER:** Waldbewirtschaftung, Nördliche Kalkalpen, Nährstoffgehalte, Nährstoffversorgung, Standortverhältnisse

## 1 EINLEITUNG

Das häufige Auftreten von Fels-Humus-Böden und flachgründigen Rendzinen mit geringem Feinbodenanteil auf Kalk und Dolomit steigert im Nördlichen Kalkalpin die Bedeutung des organischen Materials als Wasser- und Nährstoffspeicher (Weis et al. 2014, Göttlein et al. 2014). Die nachhaltige Bewirtschaftung der Bergwälder spielt diesbezüglich eine besondere Rolle um Nährstoffverluste, Humusabbau und Standortsdegradation zu vermeiden. Die Forstwirtschaft kann hier durch Steuerung der Ernteentzüge bedeutend zur Erhaltung der Standortsqualität beitragen. Im Folgenden werden die Ernährungssituation der Bäume in den nördlichen Kalkalpen dargestellt, die Auswirkungen von Nährstoffmangel auf das Wachstum beurteilt, gegenüber Nährstoffentzügen besonders anfällige Standorte identifiziert, Möglichkeiten zur Reduktion von Nährstoffentzügen aufgezeigt und deren wirtschaftliche Auswirkungen diskutiert.

## 2 NÄHRSTOFFANGEBOT IM KALKALPIN: EIN LIMITIERENDER FAKTOR?

Zunächst soll die Frage geklärt werden, inwieweit das Nährstoffangebot in den Nördlichen Kalkalpen das Wachstum negativ beeinflusst und welche Nährstoffe als besonders kritisch angesehen werden müssen. Dazu wurden Nährelementgehalte in Stammholz, Stammrinde, Ästen, Zweigen und Nadeln bzw. Blättern von Fichten und Buchen kalkalpiner Standorte mit Werten aus ganz Deutschland außerhalb der Kalkalpen verglichen. Für andere wichtige Baumarten der Bergmischwälder in den Alpen wie Bergahorn, Tanne oder Lärche war die Anzahl der Vergleichsdaten zu gering. Die kalkalpinen Standorte wurden in drei Standortgruppen unterteilt: tiefgründige mergelige Standorte, flach- bzw. mittelgründige Böden aus Kalkverwitterung (Calciumcarbonat) und Böden mit Dolomit (Calcium-Magnesium-Carbonat) als Ausgangssubstrat. Ausgewertet wurden Daten verschiedener Projekte zur Bestimmung von Biomassen und Nährelementgehalten (Weis und Göttlein 2012 a und b, Pretzsch et al. 2012, Göttlein et al. 2014), die Nährelementanalysen der bayerischen Punkte der zweiten Bodenzustandserhebung und die Daten der bayerischen Waldklimastationen (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Stetter und Raspe pers. Mittl.). Tabelle 1 gibt eine Übersicht der Anzahl der jeweils zur Verfügung stehenden Werte. Zu beachten ist, dass auf mergeligen Standorten nur für zwei Fichten und einen Buchenbestand (jeweils 7 Bäume) Analysen für Zweige, Äste, Rinde und Holz zur Verfügung standen. Hier sind vergleichende Aussagen dementsprechend schwach belegt.

In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Nährelementvergleiche für Fichte und Buche dargestellt. Der Boxplot gibt jeweils Median, 25 und 75 % Perzentil (Box) bzw. 5 und 95 %

Perzentil an. Standortgruppen im Kalkalpin (Mergel, Kalk, Dolomit), deren Werte sich signifikant von den deutschlandweiten Vergleichswerten unterscheiden (Mann-Whitney-U-Test) sind mit markiert ( $^{\circ}$   $p < 0,1$ ; \*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ).

Für die Baumart Fichte (Abbildung 1) lagen auf Kalk und Dolomit die Stickstoffgehalte in allen Baumkompartimenten außer im Holz signifikant unter den Vergleichswerten. Besonders deutliche Unterschiede ergaben sich hier für den jüngsten Nadeljahrgang und in der Rinde. Dolomitstandorte scheinen am schlechtesten mit Stickstoff versorgt zu sein.

Besonders auffällig im nördlichen Kalkalpin waren die niedrigen Phosphorgehalte in allen Baumteilen, vor allem in den älteren Nadeljahrgängen und in der Rinde. Selbst tiefgründige Mergel zeigten im Verhältnis zu den Vergleichswerten geringere Phosphorgehalte. Noch deutlich tiefer lagen sie jedoch auf Kalk und Dolomit.

Kalium zeigte für die jüngeren Nadeljahrgänge keine signifikanten Unterschiede zu den deutschlandweiten Vergleichsmessungen. Auf Kalk und Dolomit ergaben sich aber für die Nadelmischproben aus der gesamten Krone und die anderen Baumkompartimente signifikant niedrigere Werte.

Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Hauptnährelementen lag die Calciumversorgung im Kalkalpin auf Kalk- und Dolomitstandorten in allen Baumteilen erwartungsgemäß überdurchschnittlich hoch. Mergelstandorte zeigten dagegen in den Nadeln nur durchschnittliche Werte ohne signifikante Unterschiede zur den Vergleichsstandorten.

Die Magnesiumgehalte lagen für Bestände auf Mergel und Kalk generell im selben Bereich wie außerhalb der Kalkalpen. Kalkstandorte zeigten jedoch für Rinde und Holz signifikant niedrigere Werte. Erwartungsgemäß hoch waren die Magnesiumgehalte auf Dolomitstandorten.

Mangan und Eisen im Kalkalpin waren gegenüber den Vergleichswerten deutlich erniedrigt. Für Mangan hat dies wohl keine physiologischen Konsequenzen, da ernährungskundliche Grenzwerte zum Manganmangel in Fichtennadeln sehr niedrig liegen.

Unzureichende Nährstoffversorgung für Fichten im nördlichen Kalkalpin ist also vor allem auf Kalk- und Dolomitstandorten zu erwarten. Mergelige Böden schneiden deutlich besser ab. Die betroffenen Nährelemente sind vor allem Phosphor, daneben aber auch Stickstoff, Kalium, Mangan und Eisen. Auf reinem Kalk kann die Magnesiumversorgung ebenfalls unzureichend sein.

Die Nährelementgehalte für Buchen (Abbildung 2) zeigten ein ähnliches Bild wie für Fichte. Signifikant erniedrigte Werte fanden sich vor allem bei Phosphor, daneben auch bei Stickstoff und Mangan. Kalium und Eisen zeigten in manchen Baumkompartimenten vergleichsweise niedrige Werte, in anderen nicht. Betroffen von potentiellm Nährstoffmangel sind wie bei Fichte vor allem Böden mit deutlichem Kalk- oder Dolomiteinfluss. Die Einschätzung der Mergel ist auf Grund der geringen Anzahl zur Verfügung stehender Daten schwierig.

Die eingeschränkte Versorgung mit Phosphor, Stickstoff und Kalium in weiten Teilen der Nördlichen Kalkalpen wird seit langem mit als Grund für Nadelverfärbungen, schlechtes Wachstum und langsame Verjüngung der Bestände genannt (Baier et al. 2004, Ewald et al. 2005, Ewald 2000, Flückiger und Braun 1995). Neuere Untersuchungen (Mellert und Ewald 2013 und 2014) belegen ebenfalls die wachstumslimitierende Phosphorverfügbarkeit für Fichte in den Bayerischen Kalkalpen und zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Oberhöhenbonität von Fichten im Alter 100 und dem Nährstoffangebot am Standort.

Tabelle 1: Anzahl der Bäume (in Klammern der Bestände) mit Nährelementanalysen im Vergleich Kalkalpin (Mergel, Kalk, Dolomit) und Deutschland außerhalb der Kalkalpen (Vergleich).

*Number of trees (in parentheses: of stands) with nutrient analysis from different site groups in the Northern Calcareous Alps ("Mergel" = marl, "Kalk" = calcite, "Dolomit" = dolomite) and in the rest of Germany "Vergleich").*

Baumart	Standort	Blatt	Zweig	Ast	Rinde	Holz
Fichte	Vergleich	804 (359)	283 (48)	279 (48)	281 (48)	280 (48)
	Mergel	27 (15)	14 (2)	14 (2)	14 (2)	14 (2)
	Kalk	87 (23)	53 (11)	7 (1)	22 (9)	24 (10)
	Dolomit	109 (32)	58 (11)	21 (3)	33 (14)	34 (15)
Buche	Vergleich	364 (179)	402 (62)	402 (62)	354 (56)	354 (56)
	Mergel	9 (3)	7 (1)	7 (1)	7 (1)	7 (1)
	Kalk	48 (14)	36 (8)	0 (0)	14 (6)	15 (7)
	Dolomit	77 (25)	44 (9)	7 (1)	20 (13)	21 (14)

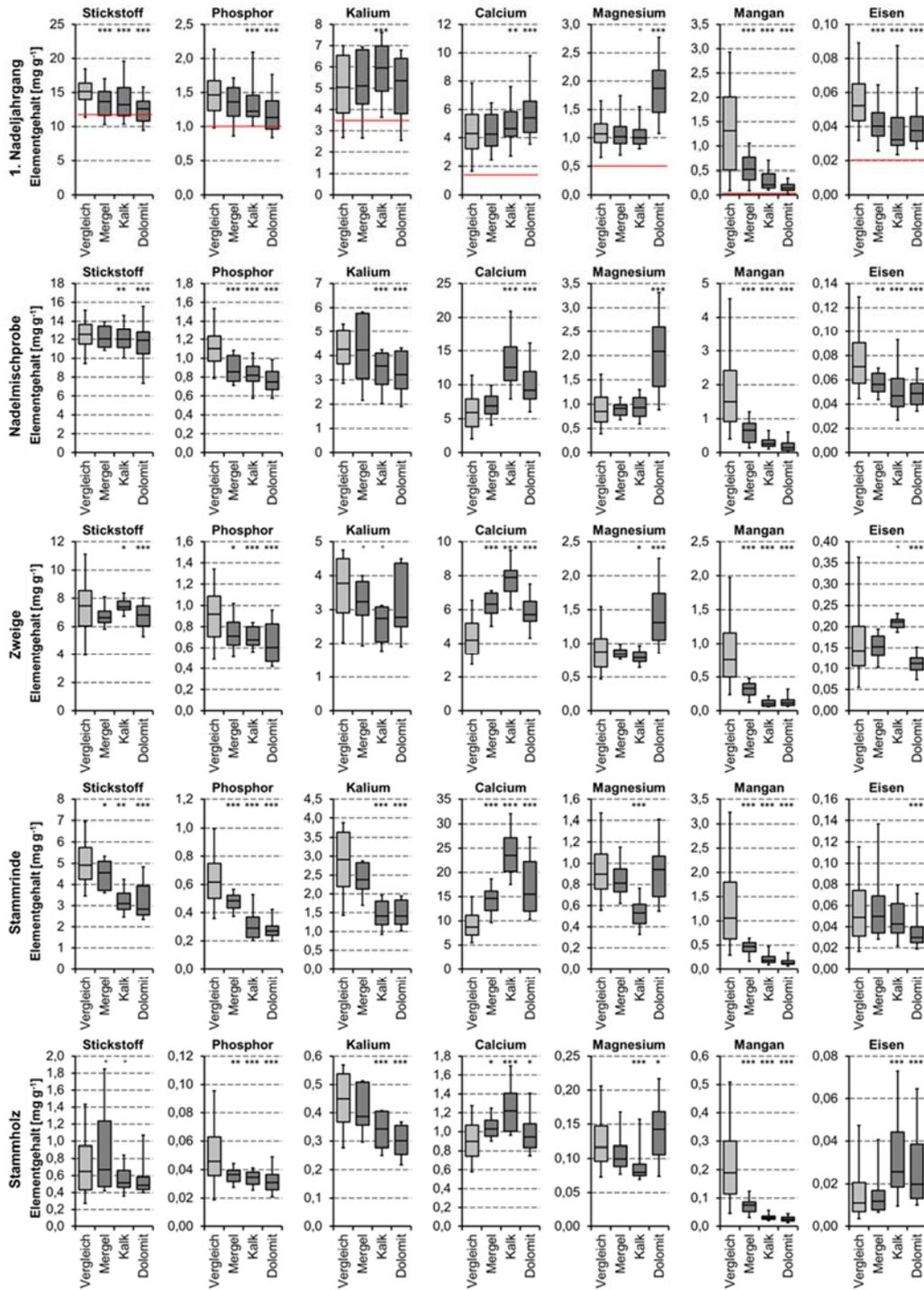


Abbildung 1: Nährelementgehalte für Fichte im Kalkalpin im Vergleich zu deutschlandweiten Werten: Median, 25 bzw. 75 % Perzentil (Box) und 5 bzw. 95 % Perzentil. Die rote Linie kennzeichnet für die Nadelspiegelwerte die Grenze zwischen latentem Mangel und Mangel nach Göttlein et al. 2011.

*Nutrient contents for Norway spruce in the Northern Calcareous Alps in comparison to values from Germany: median, 25 and 75 % percentiles (box) as well as 5 and 95 % percentiles. The red line marks the threshold between latent deficiency and deficiency reported in Göttlein et al. 2011 for needles.*

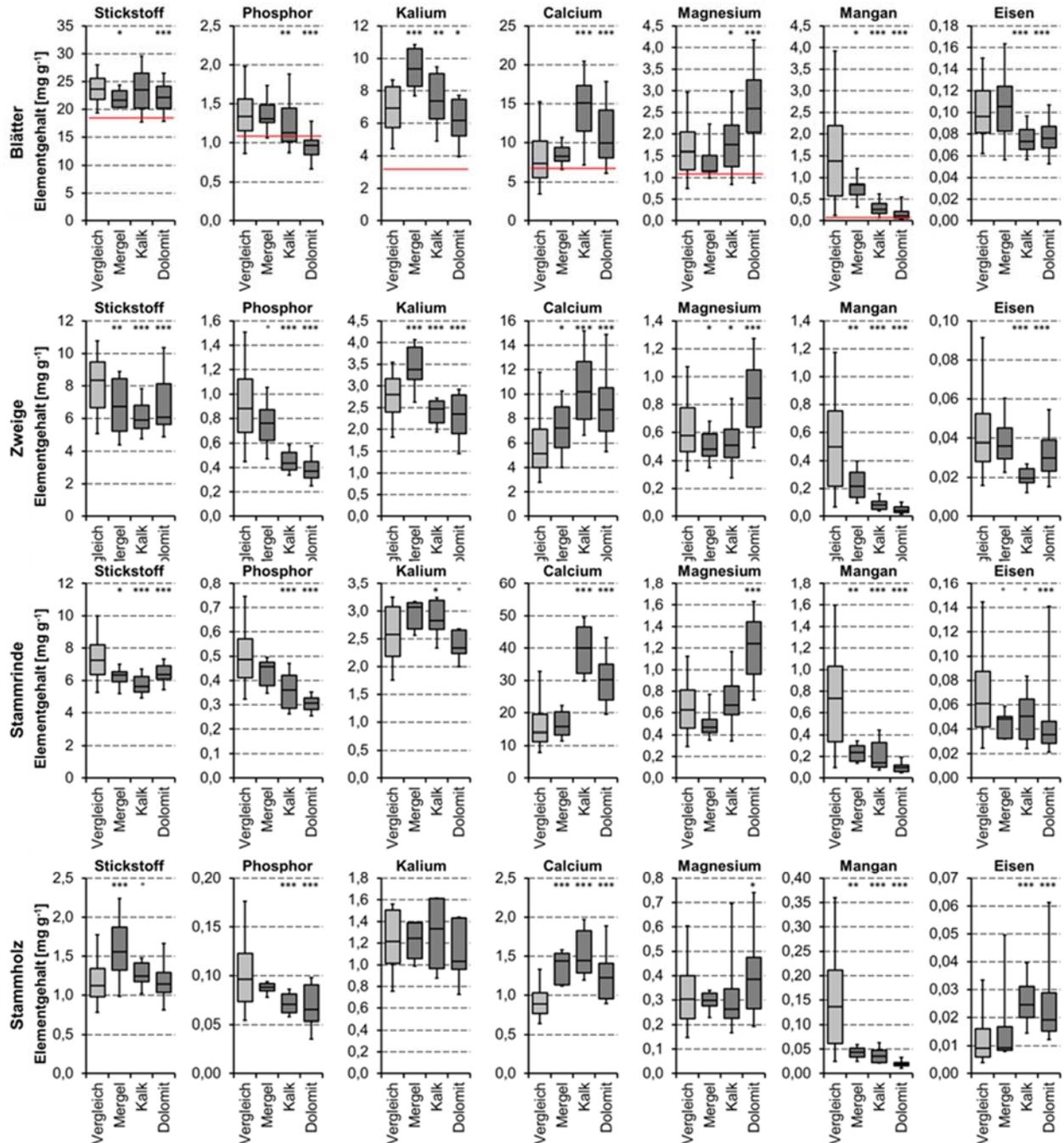


Abbildung 2: Nährlementgehalte für Buche im Kalkalpin im Vergleich zu deutschlandweiten Werten: Median, 25 bzw. 75 % Perzentil (Box) und 5 bzw. 95 % Perzentil. Die rote Linie kennzeichnet für die Blattspiegelwerte die Grenze zwischen latentem Mangel und Mangel nach Göttlein et al. 2011 (für Eisen lag kein Wert vor).

*Nutrient contents for European beech in the Northern Calcareous Alps in comparison to values from Germany: median, 25 and 75 % percentiles (box) as well as 5 and 95 % percentiles. The red line marks the threshold between latent deficiency and deficiency reported in Göttlein et al. 2011 for leaves (no threshold available for iron).*

### 3 STANDORT UND WACHSTUM IM NÖRDLICHEN KALKALPIN

Die angeführten Nährstoffuntersuchungen zeigen eindeutig ungünstige Bedingungen auf vielen Kalk- und Dolomit-Standorten in den Alpen. Um zu überprüfen, ob diese Befunde auch Auswirkungen auf das Wachstum der Bäume haben, wurden Inventurdaten der bayerischen Forstbetriebe Schliersee, Ruhpolding und Berchtesgaden genutzt, die freundlicherweise von den Bayerischen Staatsforsten (BAYSF) zur Verfügung gestellt wurden. Zunächst erfolgte eine Einteilung der Inventurpunkte hinsichtlich Baumart und Altersstufen (10-Jahres-Schritte). Mit Hilfe von Quantilregressionen wurde für jede Baumart an Hand der Höhenmessungen der Bäume bis Alter 100 ein Bonitätsfächer der Alters-Höhen-Beziehung gebildet. Verwendet wurde dabei die Chapman-Richards-Funktion:

$$H_0 = a * (1 - e^{-k * \text{Alter}})^p$$

Für  $H_0$  wurde dabei die maximal gemessene Höhe an einem Inventurpunkt für eine bestimmte Baumart und Altersklasse verwendet. Der Parameter  $a$  wurde als potentiell erreichbare maximale Höhe der Baumart interpretiert und für jede Baumart konstant gehalten. In Tabelle 2 finden sich für die bonitierten Baumarten die Werte der Parameter  $a$ ,  $k$  und  $p$  für Oberhöhenbonitäten im Alter 100 zwischen 8 und 42 m (soweit in den Inventurdaten belegt).

Tabelle 2: Ableitung der Alters-Höhen-Beziehung aus den Inventurdaten der bayerischen Forstbetriebe Schliersee, Ruhpolding und Berchtesgaden. Parametrisierung der Chapman-Richards-Funktion für wichtige Baumarten im Nördlichen Kalkalpin.

*Deduction of age-height-relationships from forest inventory data of the Bavarian State forest holdings in Schliersee, Ruhpolding and Berchtesgaden: Parameterization of the Chapman-Richards equation for the main tree species in the Northern Calcareous Alps.*

Bonität	Fichte (a = 60)		Tanne (a = 60)		Kiefer (a = 40)		Lärche (a = 50)		Buche (a = 50)		Bergahorn (a = 40)		Esche (a = 50)		Mehlbeere (a = 30)		Vogelbeere (a = 30)		
	k	p	k	p	k	p	k	p	k	p	k	p	k	p	k	p	k	p	
O08	0,00656	2,75	0,00722	3,03	0,00276	1,13	0,00787	3,02	0,00788	3,02	0,00525	1,80	0,00635	2,43	0,00617	1,70	0,00839	1,62	*
O10	0,00661	2,47	0,00654	2,44	0,00333	1,10	0,00966	3,36	0,00718	2,41	0,00444	1,35	0,00785	2,64	0,00485	1,15	0,00839	1,62	**
O12	0,00793	2,67	0,00803	2,71	0,00408	1,10	0,00951	2,92	0,00823	2,47	0,00531	1,36	0,00935	2,86	0,00571	1,10	0,00839	1,62	
O14	0,00844	2,59	0,00898	2,78	0,00487	1,10	0,00976	2,69	0,00833	2,23	0,00588	1,30	0,01084	3,09	0,00694	1,10	0,00822	1,32	
O16	0,00989	2,66	0,01023	2,97	0,00571	1,10	0,01068	2,70	0,00830	1,99	0,00649	1,24	0,01023	2,56	0,00832	1,10	0,00832	1,10	
O18	0,00962	2,50	0,01162	3,21	0,00662	1,10	0,01140	2,65	0,00892	1,94	0,00701	1,17	0,00835	1,80	0,00990	1,10	0,00990	1,10	
O20	0,01010	2,43	0,01204	3,08	0,00761	1,10	0,01125	2,33	0,00969	1,92	0,00836	1,22	0,00881	1,71	0,01177	1,10	0,01177	1,10	
O22	0,01054	2,34	0,01193	2,78	0,00869	1,10	0,01152	2,16	0,01045	1,89	0,00972	1,26	0,00951	1,68	0,01405	1,10	0,01404	1,10	
O24	0,01096	2,25	0,01258	2,74	0,00991	1,10	0,01215	2,08	0,01126	1,87	0,01091	1,25	0,00940	1,48			0,01695	1,10	
O26	0,01133	2,15	0,01317	2,68	0,01159	1,14	0,01282	2,01	0,01112	1,64	0,01218	1,23	0,00971	1,37					
O28	0,01150	2,00	0,01191	2,10	0,01375	1,22	0,01322	1,87	0,01150	1,52	0,01318	1,15	0,00978	1,23					
O30	0,01156	1,83	0,01157	1,84	0,01565	1,23	0,01368	1,74	0,01146	1,34	0,01498	1,14	0,00991	1,10					
O32	0,01183	1,72	0,01115	1,58	0,01776	1,20	0,01386	1,55	0,01180	1,22	0,01697	1,10	0,01098	1,10					
O34	0,01188	1,56	0,01140	1,47	0,02031	1,16	0,01505	1,54	0,01238	1,13	0,01987	1,10	0,01219	1,10					
O36	0,01163	1,36	0,01109	1,28			0,01531	1,35	0,01354	1,10			0,01355	1,10					
O38	0,01145	1,19	0,01119	1,15			0,01569	1,18	0,01508	1,10			0,01511	1,10					
O40	0,01186	1,11	0,01185	1,11			0,01757	1,18	0,01710	1,12			0,01696	1,10					
O42	0,01285	1,10																	

Abbildung 3 zeigt am Beispiel der Fichte den Bonitätsfächer und die Höhenmesspunkte aus den Inventurdaten. Ab dem Alter 100, also außerhalb des Bereichs, der zur Parametrisierung der Alters-Höhen-Kurven verwendet wurde, reichen immer weniger Punkte an die Kurven der hohen Bonitäten heran. Gut wüchsige Fichtenbestände werden in Bayern in der Regel nicht mit Umtriebszeiten von wesentlich mehr als 100 Jahren bewirtschaftet. Dementsprechend finden sich in den Inventurdaten nur wenige Bestände hoher Wuchsleistung mit einem Alter von mehr als 100 Jahren. Daraus ergibt sich aber auch, dass die Zuordnung von Beständen zu Bonitätskurven mit zunehmendem Alter immer ungenauer wird. Im Bergwald der Alpen macht aber eine Beschränkung auf Alter 100 wenig Sinn, da gerade dort langsam wüchsige Wälder hohen Alters zu finden sind. Als Kompromiss wurde deshalb einheitlich für alle Baumarten eine Bonitierung der Inventurpunkte bis zu einem Alter von maximal 200 Jahren durchgeführt. Verwendet wurde eine Zuordnung zur nächst niedrigeren Bonitätskurve, basierend auf dem höchsten Baum eines Inventurpunkts einer Baumart und Altersklasse.

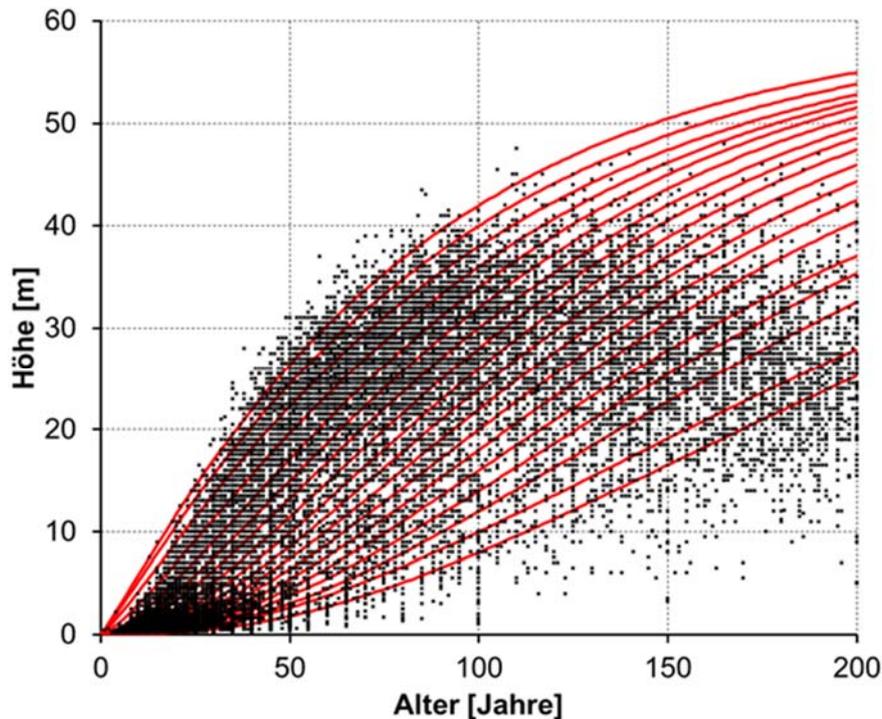


Abbildung 3: Bonitätsfächer für Fichte (Oberhöhenbonität im Alter 100 in 2 m Schritten von 8 bis 42 m) und Höhenmessungen der bayerischen Forstbetriebe Schliersee, Ruhpolding und Berchtesgaden.

*Yield classes for Norway spruce (top height at age 100 in steps of 2°m from 8 to 42°m) and height measurements from the Bavarian State forest holdings in Schliersee, Ruhpolding and Berchtesgaden.*

Das Wachstum im nördlichen Kalkalpin wird neben der Nährstoffversorgung besonders auch durch das Klima beeinflusst, welches stark durch die Höhenlage, die Hangneigung und die Exposition geprägt ist (Hartl-Meier und Rothe 2014, Dittmar und Elling 1999). Um herauszuarbeiten, wie stark das Wachstum der verschiedenen Baumarten neben dem Klima auch durch den Standortfaktor Boden beeinflusst wird, wurde eine multiple Klassifikationsanalyse durchgeführt. Die Klassen zur Charakterisierung des Bodens „Gründigkeit“ und „Ausgangsubstrat“ entsprechen in der Substrateinteilung nach Kolb (2012) den Klassen „Physik“ und „Chemie“, allerdings wurden beim Ausgangsubstrat nur vier der insgesamt 9 Klassen berücksichtigt, da nur diese eine ausreichende Belegung mit Inventurpunkten aufwiesen. Zusammen mit den Standortfaktoren Höhenlage, Hangneigung und Exposition, abgeleitet aus dem digitalen Geländemodell, wurde ihr Einfluss auf die Bonität der einzelnen Baumarten getestet. Tabelle 3 zeigt die Klasseneinteilung der Einflussfaktoren.

Tabelle 3: Klasseneinteilung für die multiple Klassifikationsanalyse der Bonitierung von Wäldern auf Basis der Inventurdaten der bayerischen Forstbetriebe Schliersee, Ruhpolding und Berchtesgaden.

*Classification used in the multiple class analysis for forest yield classes derived from inventories from the Bavarian State forest holdings in Schliersee, Ruhpolding and Berchtesgaden.*

Höhelage	Hangneigung	Exposition	Gründigkeit	Ausgangssubstrat
< 800 m	< 10°	S: $\geq 150^\circ$ ; < 210°	flachgründig	Dolomite
< 1000 m	10° bis 15°	SW: $\geq 210^\circ$ ; < 270°	mittelgründig	Kalke
< 1200 m	15° bis 20°	SO: $\geq 90^\circ$ ; < 150°	tiefgründig	Mergelgesteine
< 1400 m	20° bis 25°	NW: $\geq 270^\circ$ ; < 330°		Mergeltone und Tonmergel
$\geq 1400$ m	25° bis 30°	NO: $\geq 30^\circ$ ; < 90°		
	30° bis 35°	N: $\geq 330^\circ$ ; < 30°		
	$\geq 35^\circ$			

In Abbildung 4 ist zunächst die Abhängigkeit der Bonität für Fichte und Buche von den Einzelfaktoren dargestellt. Alle Einflussgrößen zeigten eine sehr weite Spreitung der Bonitätswerte. Dies liegt zum einen daran, dass die Standortsqualität natürlich durch die Kombination vieler Faktoren geprägt wird. Zum anderen brachte die Zuordnung der Inventurpunkte zu den Klassen der Standortfaktoren über geographische Informationssysteme und nicht durch Ansprache vor Ort eine höhere Unschärfe mit sich. Dennoch zeigten die Bonitäten von Fichten und Buchen eine deutliche Abnahme mit zunehmender Höhenlage. Auch steile Hanglagen zeigten eher gebremstes Wachstum. Verantwortlich ist hier wohl zunehmende Bodenerosion und damit eine Abnahme des Feinerdevorrats, was zu geringerem Wasserhaltevermögen und schlechterer Nährstoffversorgung führt. Kaum erkennbar waren Unterschiede der Bonitäten bei verschiedenen Expositionen. Nur bei NO-Exposition war im Datensatz geringfügig, aber signifikant besseres Wachstum erkennbar. Denkbar ist eine Kompensation des erhöhten Stresses durch Strahlung und Trockenheit bei Südexposition durch die geringere Dauer der Vegetationsperiode nordseitig. Bei den Bodeneigenschaften war klar der negative Einfluss flachgründiger Standorte erkennbar. Auch das Ausgangssubstrat zeigte deutliche Effekte. Böden auf Kalk und Dolomit zeigten im Mittel eine wesentlich geringere Produktivität als Tonmergel und Mergel. Allerdings ist dies auch bedingt durch die meist geringere Gründigkeit und damit den geringeren Feinerdevorrat von Kalk- und Dolomitstandorten. Die Reaktion der Bonität auf das Ausgangssubstrat spiegelt gut die Erkenntnisse aus den ernährungskundlichen Untersuchungen wieder. Auch dort zeigten Bestände auf Kalk und Dolomit die schlechteste Versorgung mit wichtigen Nährstoffen wie Phosphor, Stickstoff und Kalium.

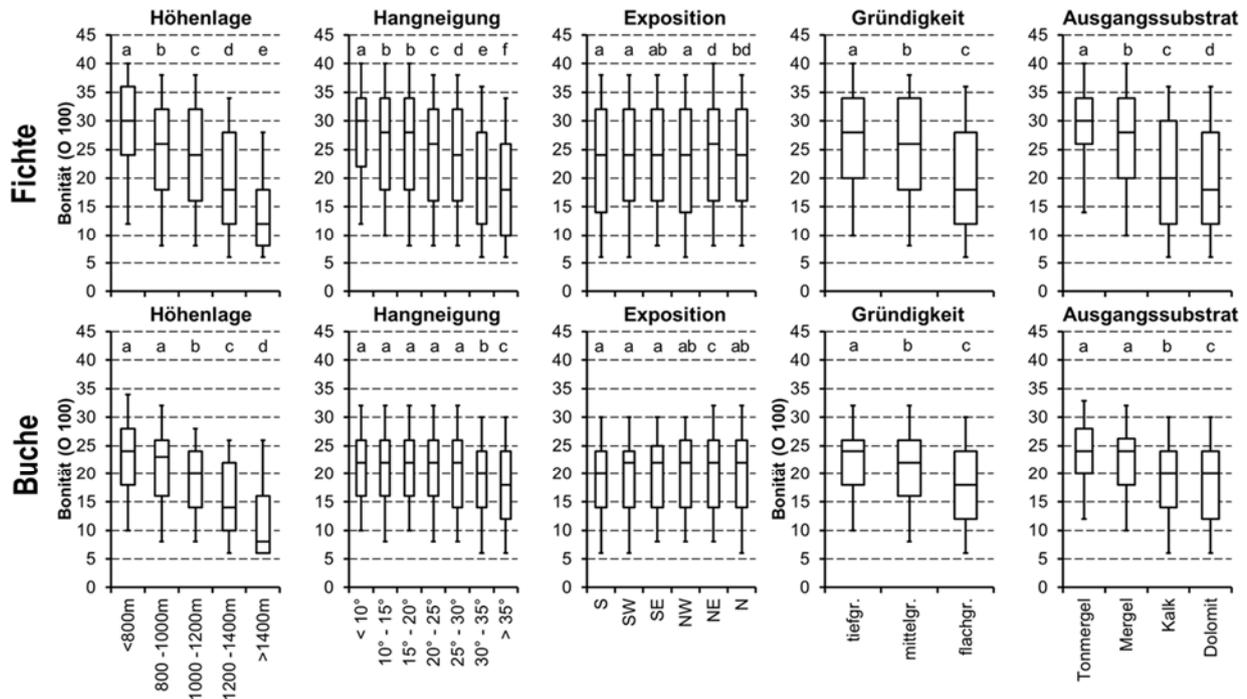


Abbildung 4: Boxplot-Darstellung des Einflusses von Standortfaktoren auf die Bonität von Fichten- und Buchen-Beständen im bayerischen Alpenraum. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ).

*Impact of site conditions on the yield class of Norway spruce and European beech in the Bavarian Calcareous Alps as boxplots. Different characters mark significant differences ( $p < 0.05$ ).*

Da die Einzelfaktoren nicht voneinander unabhängig sind, wurde über die multiple Klassifikationsanalyse der Einfluss unter Berücksichtigung der anderen Standortfaktoren geprüft (Tabelle 4). Für Fichte, Tanne und Buche wiesen alle getesteten Faktoren einen deutlich signifikanten Einfluss auf die Bonität auf. Fast immer signifikant waren Höhenlage und Hangneigung, genauso wie die Bodenfaktoren Ausgangssubstrat und Gründigkeit. Als Einzeleffekt erwies sich die Höhenlage gemessen an „Eta“, einem Maß für den Anteil erklärter Varianz, in der Regel als wichtigster Faktor. Nächstwichtigster Faktor war das Ausgangssubstrat, für viele Baumarten zusammen mit der Gründigkeit. Die Korrektur nach Faktoren (Beta) veränderte wenig an diesem Ergebnis. Die Bonität blieb für die meisten Baumarten in erster Linie abhängig von Höhenlage (Klima) und Ausgangssubstrat (Nährstoffversorgung).

Tabelle 4: Faktorenauswertung der multiplen Klassifikationsanalyse der Bonitierung von Waldbeständen auf Basis der Inventurdaten der bayerischen Forstbetriebe Schliersee, Ruhpolding und Berchtesgaden (Signifikanz: °p < 0,1; \*p < 0,05; \*\*p < 0,01; \*\*\*p < 0,001). Grau hinterlegt sind Faktoren mit hohem Einfluss auf die Bonität (je dunkler desto stärker der Einfluss).

*Factor evaluation of the multiple classification analysis of forest yield classes based on inventories from the Bavarian State forest holdings in Schliersee, Ruhpolding and Berchtesgaden. (Significance: °p < 0.1; \*p < 0.05; \*\*p < 0.01; \*\*\*p < 0.001). Shaded in gray are factors with high impact on the yield class (darker gray refers to higher impact)*

Baumart	Werte	Höhenlage	Hangneigung	Exposition	Gründigkeit	Substrat
Fichte	Eta	0,292	0,284	0,073	0,335	0,332
	Beta*	0,236	0,182	0,038	0,102	0,208
	p	***	***	***	***	***
Tanne	Eta	0,180	0,334	0,060	0,358	0,361
	Beta*	0,106	0,227	0,060	0,119	0,203
	p	***	***	***	***	***
Kiefer	Eta	0,292	0,385	0,162	0,333	0,357
	Beta*	0,239	0,295	0,141	0,102	0,175
	p	***	***			
Lärche	Eta	0,487	0,275	0,051	0,330	0,388
	Beta*	0,408	0,184	0,070	0,087	0,200
	p	***	***	*	***	***
Buche	Eta	0,324	0,178	0,059	0,236	0,236
	Beta*	0,295	0,119	0,051	0,080	0,149
	p	***	***	***	***	***
Bergahorn	Eta	0,307	0,083	0,052	0,133	0,136
	Beta*	0,309	0,064	0,038	0,013	0,093
	p	***	***	°		***
Esche	Eta	0,278	0,136	0,026	0,160	0,168
	Beta*	0,261	0,079	0,037	0,040	0,099
	p	***	**			***
Meelbeere	Eta	0,232	0,066	0,072	0,083	0,098
	Beta*	0,232	0,059	0,090	0,052	0,082
	p	***		°		*
Vogelbeere	Eta	0,114	0,120	0,061	0,154	0,126
	Beta*	0,080	0,090	0,059	0,107	0,043
	p	*	*		**	

\*korrigiert nach Faktoren

Festzuhalten ist dementsprechend, dass neben dem Klima das Nährstoffangebot (Phosphor, Kalium, Stickstoff) ein entscheidender Standortfaktor im Kalkalpin ist, der maßgeblich das Waldwachstum beeinflusst. Kritische Nährstoffversorgung ist vor allem auf Fels-Humus-Böden und flachgründigen Rendzinen auf Dolomit und Kalk zu erwarten.

#### **4 FALLBEISPIELE**

Zur weiteren Vertiefung des Verständnisses verschiedener Standorte im nördlichen Kalkalpin wurde in sechs Fichtenbeständen unterschiedlicher Standorte intensive Biomasse-, Nährelement- und Bodenuntersuchungen durchgeführt. Vier der Flächen wurden in Zusammenarbeit mit dem AELF Traunstein, insbesondere mit Herrn Sebastian Klinger von der Bergwaldoffensive Bayern, im Privatwald bei Ramsau und Berchtesgaden ausgewählt. Die beiden anderen Flächen liegen im Bereich des bayerischen Forstbetriebs Schliersee im Flysch bzw. Hauptdolomit des Mangfallgebirges. Tabelle 5 gibt Auskunft über Lage und Bestandseigenschaften der Untersuchungsflächen. Die Beprobung von Biomasse- und Boden sowie die Nährstoffanalytik erfolgte wie in Weis & Göttlein 2012 b beschrieben. Die Ergebnisse der Nährstoffuntersuchungen können Tabelle 6 entnommen werden. Zur Hochrechnung der Elementvorräte auf Flächenwerte (Tabelle 7) wurden auf ca. 0,1 ha die Brusthöhendurchmesser aller Bäume aufgenommen, mit Biomassefunktionen (Weis & Göttlein 2012 b) die Massen der Baumkompartimente bestimmt und diese mit den mittleren Nährelementgehalten der Untersuchungsbestände multipliziert. In Tabelle 8 finden sich wichtige bodenchemische Kenngrößen der Flächen. In Abbildung 5 sind für Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium die Vorräte in der oberirdischen Biomasse den Nährstoffvorräten im Boden gegenübergestellt. Verwendet wurden dazu für organischen Auflage und Mineralboden bis 80 cm der Zitronensäure lösliche Phosphor (König 2009 Methode 3.2.3.4) und die effektiv austauschbaren Kationen (Extraktion mit 0,1 M BaCl<sub>2</sub>-Lösung bei pH > 6,5 König 2009. Methode A 3.2.1.2 bzw. 1M NH<sub>4</sub>Cl-Lösung für pH < 6,5 nach König 2009 Methode 3.2.1.2).

Tabelle 5: Lage und Bestandsdaten der sechs Biomasseuntersuchungsflächen im Kalkalpin.

*Position and stand characteristics of the six biomass investigation plots in the Bavarian Calcareous Alps.*

Standort	RW GK4	HW GK4	Höhe [m]	Alter	N [ha <sup>-1</sup> ]	D <sub>G</sub> [cm]	H <sub>G</sub> [m]	D <sub>100</sub> [cm]	H <sub>100</sub> [m]	G [m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ]	Bonität O100
Tangel Kalk	4581380	5279640	1001	121	867	28,7	24,6	42,7	31,3	55,9	721,7	25
Dolomit flachgr.	4568880	5276060	1150	133	640	30,3	20,4	42,3	23,7	46,2	508,1	17
Dolomit mittelgr.	4499340	5276930	1080	187	604	31,9	23,7	45,5	30,5	48,2	637,3	24
Dolomit tiefgr.	4568870	5275990	1150	115	667	36,4	25,9	56,1	32,0	69,4	903,5	31
Mergel Kalk	4581830	5280080	1035	99	629	38,4	30,6	55,1	36,5	72,8	1059,1	36
Mergel Flysch	4486100	5287450	1070	65	853	31,6	26,1	44,4	29,8	66,8	828,1	37

N: Stammzahl

D<sub>G</sub>: Brusthöhendurchmesser des Grundflächenmittelstamms

H<sub>G</sub>: Höhe des Grundflächenmittelstamms

D<sub>100</sub>: Brusthöhendurchmesser des Grundflächenmittelstamms der 100 stärksten Bäume pro Hektar

H<sub>100</sub>: Höhe des Grundflächenmittelstamms der 100 stärksten Bäume pro Hektar

G: Grundfläche (Summe der Kreisflächen bei 1,3 m (Brusthöhe) aller Bäume)

V: Volumen Derbholz mit Rinde (Zopf 7 cm)

O100: Oberhöhe im Alter 100 (geschätzt)

#### 4.1 Tangel auf Kalkblockschutt

Der erste Standort, hier bezeichnet als „Tangel Kalk“ liegt nahe Berchtesgaden unterhalb des Zinkenkopfs und ist ein Fels-Humus-Boden. Eine mehr oder minder mächtige Humusaufgabe, ein sogenannter Tangel, liegt direkt auf groben Kalksteinen aus einem Felssturz der darüber liegenden Felswand. Mineralische Feinerde fehlt praktisch völlig. Wasserversorgung und Nährstoffaufnahme können damit nur aus dem organischen Material erfolgen, welches durch Streueintrag, tote Bäume und zu einem geringen Teil auch durch die absterbende Bodenvegetation aufgebaut wird. Dabei ist der Tangelhumus stark durch das Ausgangsmaterial Kalk geprägt und zeigte sehr hohe Calciumgehalte aber niedrige Werte für Magnesium und Kalium. Die Nährelementgehalte in der Biomasse wiesen zudem auf schlechte Versorgung mit Stickstoff und Phosphor hin. Auf Grund der schlechten Standortverhältnisse wurde nur eine Oberhöhenbonität im Alter 100 von 25 m erreicht. In Abbildung 5 ist deutlich die geringe Menge an Magnesium zu erkennen, die im Boden gespeichert ist. Die im Vergleich zu den anderen Beständen deutlich niedrigeren Magnesiumvorräte in der Biomasse belegen eindrucksvoll die Limitierung des Wachstums durch diesen überaus wichtigen Pflanzennährstoff. Tangel kommen im nördlichen Alpenraum in erster Linie auf Kalkblöcken vor, selten dagegen auf dem eher grusig verwitternden Dolomit. Der Schutz der organischen Auflage ist hier unabdingbar, da ohne Humus

kein Wasser- und Nährstoffspeicher mehr zur Verfügung steht und damit auf lange Zeit kein Baumwachstum möglich wäre. Die Bewirtschaftung solcher Bestände muss darauf abzielen, die knappe Nährstoffversorgung zumindest zu erhalten und wenn möglich zu verbessern. Zu empfehlen ist deshalb jeglichen vermeidbaren Nährstoffexport z.B. die Nutzung von Kronenmaterial zu unterlassen. Die Entrindung der Bäume bei Stammholznutzung würde einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Nährstoffversorgung leisten, da Magnesium zu einem großen Teil auch in der Rinde gespeichert ist. Die Verjüngung solcher Bestände sollte frühzeitig, langsam und ohne starke Auflichtung des Kronendaches erfolgen, um starken Strahlungseinfall auf den Boden und damit eine Temperaturerhöhung im Humus zu vermeiden. Humusabbau kann so minimiert werden. Ein Anstieg der Temperatur in der organischen Auflage um 10 °C führt in etwa zu einer Verdoppelung des Humusabbaus. Auf Freiflächen können im Humus Temperaturen von weit über 40 °C erreicht werden, während sie im geschlossenen Bestand auch im Sommer nur etwa 20 °C erreichen.

## 4.2 Hauptdolomit

Drei der untersuchten Bestände stocken auf Hauptdolomit. Der Standort mit der geringsten Wuchsleistung (bezeichnet als „Dolomit flachgr.“), ist eine flachgründige, nordexponierte Rendzina in der Nähe von Ramsau oberhalb Loiplsau. Die Mächtigkeit der Feinerdehorizonte lag im Durchschnitt unter 20 cm. Die Bäume zeigten geringe Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium. Im Boden lag der pH-Wert durchgehend sehr hoch (> 6 bis 10 cm Tiefe, ab 10 cm > 7). Die geschätzte Oberhöhenbonität betrug nur 17 m im Alter 100. Die geringe Bodenentwicklung zusammen mit dem ungünstigen Ausgangssubstrat führen hier zu einer schlechten Versorgung mit Stickstoff, Phosphor und Kalium. Der hohe pH-Wert im gesamten Bodenprofil reduziert die Verfügbarkeit von Phosphor. Das Wachstum ist deutlich nährstofflimitiert. Auch hier sollte bei der Bewirtschaftung möglichst viel nährstoffreiches Kronenmaterial am Standort verbleiben. Das langsame Wachstum bedingt lange Umtriebszeiten und langsames Aufkommen von Verjüngung. Die frühe Vorausverjüngung bei gleichzeitig vorsichtiger Auflichtung zur Vermeidung von Humusschwund ist für solche Standorte zu empfehlen. Möglicherweise bietet sich Lärche als Alternative mit geringerem Nährstoffbedarf als Fichte an. Auch Laubholz (Buche, Bergahorn) kann unter Umständen zur Standortsverbesserung beitragen. Es gibt Hinweise, dass insbesondere die Phosphoraufnahme von Laubbäumen auf carbonatreichen Böden besser funktioniert als bei Fichte. Durch die Laubstreu kann der aufgenommene Phosphor dann auch wieder der Fichte zu Gute kommen.

Auch der fast 200 Jahre alte Fichtenbestand am Hausberg bei Bayrischzell („Dolomit mittelgr.“) zeigte unzureichende Versorgung mit Phosphor und Kalium. Die geschätzte Bonität war zwar mit 24 etwas günstiger, im Wesentlichen gelten aber dieselben Empfehlungen wie für den vorherigen Bestand.

Der dritte Bestand („Dolomit tiefgr.“) auf Hauptdolomit liegt ebenfalls bei Ramsau, nur wenige 100 Meter von dem Bestand „Dolomit flachgr.“ entfernt. Wohl auf Grund von abgelagerten Fernmoränen Material ergab sich eine Feinbodenmächtigkeit von knapp 30 cm also etwa 10 cm mehr als im Nachbarbestand. Der pH-Wert der oberen 10 cm im Boden lag zwischen 5 und 6 und damit in einem Bereich, der eine gute Verfügbarkeit von Phosphor ermöglicht. Die günstigere Ernährungssituation für Stickstoff, Phosphor und Kalium verbessern das Wachstum deutlich und führten zu einer Bonität von 31. Damit entschärft sich auch die Problematik des Nährstoffentzugs bei Holzernte. Zu beachten ist jedoch, dass die höheren Nährelementgehalte in der oberirdischen Biomasse und die höheren Biomassevorräte auch zu einem höherem Nährelementexport z.B. bei der Nutzung von Kronenmaterial führen. Die Auswirkungen auf das zukünftige Wachstum sind dabei schwer vorherzusagen. Wenn es aus forsthygienischen und -technischen Gründen möglich ist das nährstoffreiche Kronenmaterial verteilt am Standort zu belassen ist dies sicher ein Beitrag zum Erhalt von Standortqualität, Humusschutz (Nährstoff- und Wasserspeicher) und Artenvielfalt (Totholz).

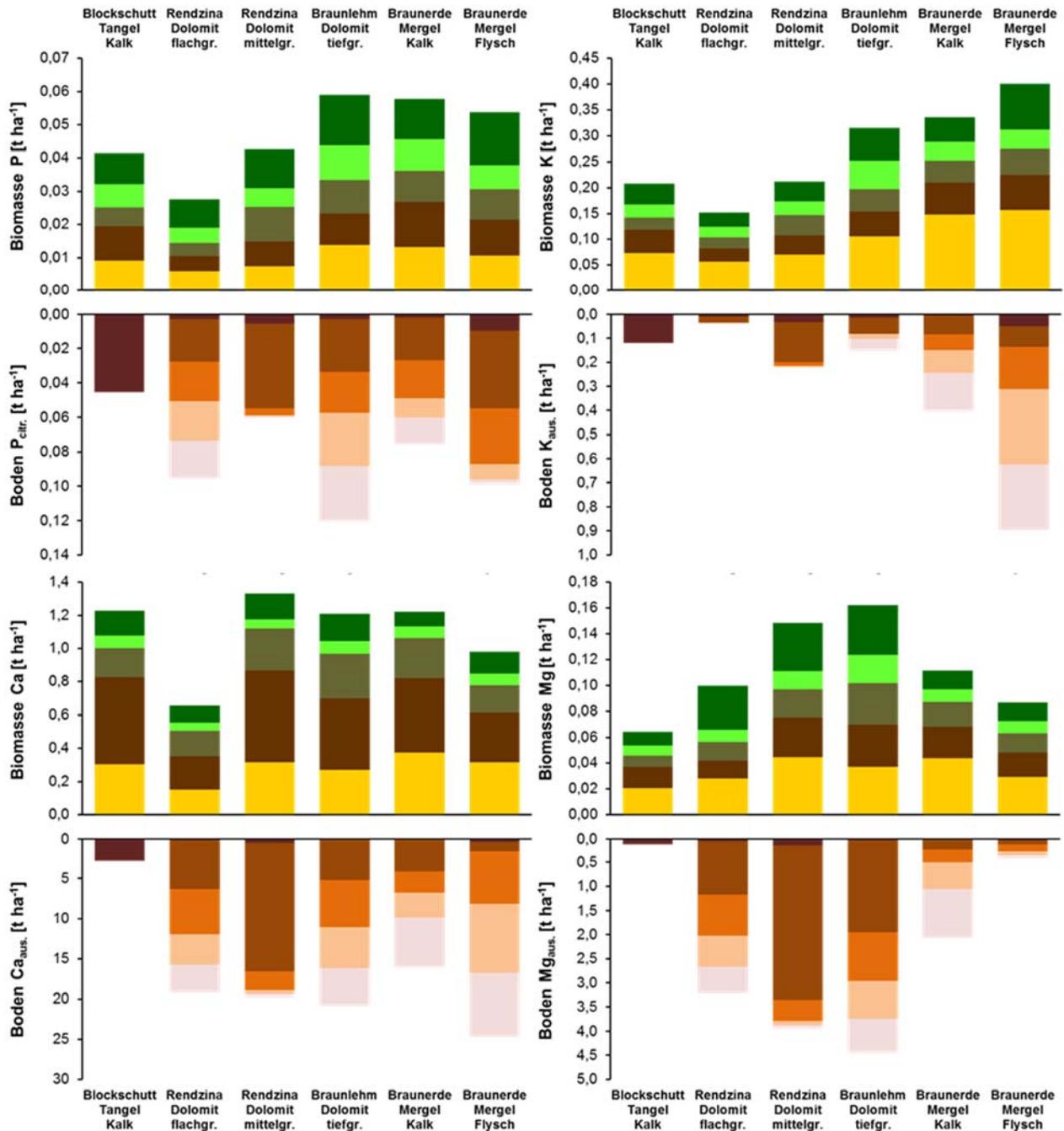


Abbildung 5: Vergleich der in der oberirdischen Biomasse und im Boden (Zitronensäure löslicher Phosphor, effektiv austauschbare Kationen) gespeicherten Närelemente auf den Biomasseflächen.

*Comparison of the nutrient supply in the aboveground biomass and in the soil (phosphorous extracted by citric acid, effectively exchangeable cations) of the biomass investigation plots.*

#### 4.4 Basenreicher Flysch und Mergel

Den häufig ungünstigen Verhältnissen auf Kalk- und Dolomit-Standorten stehen die Ergebnisse von Flächen auf tiefgründigen Mergeln entgegen. Der Bestand „Mergel Kalk“ befindet sich bei Berchtesgaden ca. 1 km entfernt von der Untersuchungsfläche „Tangel Kalk“. Der Boden ist nahezu skelettfrei und mindestens 80 cm mächtig. Bei dem hohen Vorrat an Feinerde und den dort vorherrschenden Niederschlagsbedingungen (ca. 1500 mm Jahresniederschlag) ist das Trockenheitsrisiko extrem gering. Der pH-Wert liegt im Mineralboden knapp um 6 und damit in einem günstigen Bereich für die Nährstoff- insbesondere die Phosphorversorgung. Gleichzeitig war die Basensättigung mit etwa 90 % noch sehr hoch, eine Versorgung mit Calcium und Magnesium also gesichert. Erstaunlicherweise spiegelten die Nährelementgehalte in der Biomasse diese günstigen Verhältnisse nur bedingt wieder. Besonders in den Nadeln waren Stickstoff, Phosphor und Kalium eher unterdurchschnittlich enthalten. Vor allem die tieferen Bodenschichten wiesen geringe Gehalte an Zitronensäure löslichem Phosphor auf, was für eine ursprünglich schlechte Versorgung des Ausgangssubstrats mit Phosphor spricht. Gleichzeitig zeugte das gute Wachstum mit einer Oberhöhenbonität von 36 m im Alter 100 aber von einer ausreichenden Nährstoffversorgung. Nährstoffentzüge mit der Holzernte sind hier wohl eher unkritisch. Dennoch gilt wie oben, dass auch auf guten Standort das Belassen von Schlagabraum positive Effekte hat.

Tabelle 6: Mittlere Nährelementgehalte der je sieben Bäume auf den sechs Biomasseflächen. In Klammer die relative Standardabweichung (Grundgesamtheit) in Prozent.

*Mean nutrient contents from seven trees on the six biomass investigation plots. In parenthesis the relative standard deviation (population) is given in per cent.*

Typ Standort	N	P	S	K	Ca	Mg	Mn	Fe	
[mg g <sup>-1</sup> ]									
1. Nadeljahrgang	Tangel Kalk	10,74 (5)	1,184 (7)	0,752 (9)	4,15 (17)	4,49 (15)	0,958 (11)	0,141 (32)	0,051 (40)
	Dolomit flachgr.	10,19 (4)	0,961 (12)	0,709 (5)	3,1 (24)	3,79 (23)	1,938 (18)	0,152 (24)	0,043 (15)
	Dolomit mittelgr.	11,14 (8)	1,068 (15)	0,751 (10)	3,67 (38)	5,17 (27)	2,24 (13)	0,204 (37)	0,032 (10)
	Dolomit tiefgr.	13,84 (16)	1,597 (29)	1,057 (13)	5,02 (25)	5,1 (19)	2,182 (19)	0,308 (33)	0,034 (22)
	Mergel Kalk	11,41 (5)	1,176 (17)	0,744 (12)	3,3 (21)	3,72 (32)	1,302 (35)	0,361 (51)	0,112 (125)
	Mergel Flysch	13,5 (12)	1,268 (20)	0,891 (15)	6,99 (24)	4,45 (23)	1,064 (20)	0,706 (31)	0,042 (19)
Nadelmischprobe	Tangel Kalk	11,04 (5)	0,698 (42)	0,64 (43)	3,03 (45)	10,96 (45)	0,785 (43)	0,162 (67)	0,069 (22)
	Dolomit flachgr.	11,74 (15)	0,683 (4)	0,759 (11)	2,2 (15)	8,05 (18)	2,683 (22)	0,168 (29)	0,048 (12)
	Dolomit mittelgr.	13,78 (14)	0,809 (11)	0,923 (4)	2,67 (17)	10,92 (22)	2,588 (21)	0,217 (36)	0,052 (14)
	Dolomit tiefgr.	13,22 (7)	0,913 (6)	1,03 (5)	3,76 (9)	10 (24)	2,301 (24)	0,413 (42)	0,04 (22)
	Mergel Kalk	11,18 (3)	0,759 (6)	0,669 (7)	2,92 (21)	5,59 (29)	0,912 (21)	0,317 (49)	0,054 (17)
	Mergel Flysch	13,4 (4)	1,006 (8)	1,015 (9)	5,59 (9)	8,24 (18)	0,89 (15)	0,964 (25)	0,06 (14)
Zweig	Tangel Kalk	7,49 (8)	0,704 (15)	0,61 (8)	2,58 (23)	7,78 (16)	0,803 (15)	0,121 (51)	0,209 (8)
	Dolomit flachgr.	5,99 (10)	0,517 (13)	0,449 (10)	2,35 (17)	5,58 (13)	1,033 (19)	0,091 (24)	0,135 (26)
	Dolomit mittelgr.	7,12 (16)	0,552 (20)	0,484 (15)	2,64 (17)	5,45 (16)	1,384 (26)	0,099 (26)	0,105 (18)
	Dolomit tiefgr.	7,27 (6)	0,895 (15)	0,777 (16)	4,68 (19)	6,56 (13)	1,915 (18)	0,243 (32)	0,101 (28)
	Mergel Kalk	7 (12)	0,853 (17)	0,545 (16)	3,27 (27)	6,34 (16)	0,9 (10)	0,238 (41)	0,157 (18)
	Mergel Flysch	6,57 (8)	0,627 (16)	0,52 (16)	3,26 (20)	6,14 (8)	0,814 (7)	0,402 (18)	0,145 (23)
Ast	Tangel Kalk	2,28 (12)	0,226 (21)	0,218 (25)	0,96 (21)	6,93 (23)	0,346 (16)	0,068 (46)	0,046 (33)
	Dolomit flachgr.	1,84 (10)	0,148 (10)	0,17 (8)	0,8 (15)	5,75 (19)	0,553 (16)	0,072 (21)	0,036 (20)
	Dolomit mittelgr.	2,4 (10)	0,337 (10)	0,249 (11)	1,25 (10)	8,12 (18)	0,699 (15)	0,087 (20)	0,036 (15)
	Dolomit tiefgr.	2,21 (13)	0,228 (20)	0,247 (18)	1 (16)	6,14 (7)	0,723 (22)	0,139 (29)	0,062 (92)
	Mergel Kalk	2,06 (8)	0,22 (6)	0,17 (6)	1,01 (17)	5,74 (18)	0,439 (17)	0,166 (46)	0,05 (32)
	Mergel Flysch	3,2 (5)	0,28 (15)	0,24 (11)	1,54 (19)	5,07 (14)	0,453 (10)	0,284 (18)	0,041 (14)
Stammrinde	Tangel Kalk	3,99 (10)	0,431 (20)	0,396 (14)	1,85 (22)	21,58 (19)	0,683 (18)	0,178 (44)	0,07 (99)
	Dolomit flachgr.	2,57 (8)	0,254 (15)	0,269 (9)	1,44 (30)	11,22 (16)	0,775 (20)	0,101 (23)	0,034 (29)
	Dolomit mittelgr.	4,55 (9)	0,263 (14)	0,281 (18)	1,31 (19)	19,23 (23)	1,068 (17)	0,15 (15)	0,044 (62)
	Dolomit tiefgr.	3,4 (14)	0,358 (21)	0,337 (16)	1,79 (15)	16,01 (21)	1,219 (20)	0,254 (31)	0,039 (70)
	Mergel Kalk	3,8 (6)	0,478 (12)	0,367 (10)	2,14 (17)	15,53 (23)	0,85 (25)	0,317 (43)	0,088 (60)
	Mergel Flysch	5,09 (4)	0,473 (15)	0,357 (11)	2,96 (26)	12,95 (19)	0,84 (15)	0,549 (16)	0,037 (30)
Stammholz	Tangel Kalk	0,48 (16)	0,037 (12)	0,057 (9)	0,3 (16)	1,26 (17)	0,085 (22)	0,031 (34)	0,018 (44)
	Dolomit flachgr.	0,47 (19)	0,033 (16)	0,051 (12)	0,31 (19)	0,84 (11)	0,157 (17)	0,026 (24)	0,015 (50)
	Dolomit mittelgr.	2,19 (7)	0,03 (10)	0,048 (9)	0,29 (12)	1,3 (14)	0,183 (16)	0,026 (12)	0,02 (59)
	Dolomit tiefgr.	0,47 (6)	0,045 (18)	0,054 (5)	0,34 (27)	0,87 (8)	0,121 (20)	0,036 (26)	0,047 (48)
	Mergel Kalk	0,46 (7)	0,036 (21)	0,055 (7)	0,41 (46)	1,03 (17)	0,122 (27)	0,052 (38)	0,021 (89)
	Mergel Flysch	2,05 (10)	0,036 (9)	0,056 (11)	0,52 (31)	1,06 (7)	0,098 (23)	0,096 (25)	0,013 (53)

Ähnlich gut wüchsig ist der Fichtenbestand in den oberbayerischen Flysch Alpen unterhalb der Gindlalm-schneid bei Schliersee („Mergel Flysch“). Wie alle Beprobungsflächen liegt der Standort auf ca. 1100 m Höhe und belegt deutlich, dass diese Höhenlage klimatisch für Fichte kein Problem darstellt. Sowohl Elementgehalte als auch die Bodenwerte und das hohe Wachstum belegten die optimale Nährstoffversorgung im Bestand. Die Gehalte an Phosphor und Kalium im Boden lagen deutlich über den Werten der anderen Untersuchungsflächen. Hohe Stickstoffeinträge aus dem Voralpenland verbessern die Nährstoffsituation zusätzlich. Gegenüber Nährstoffexporten dürfte dieser Bestand robust reagieren. Zu beachten sind jedoch die geringen Magnesiumvorräte im Boden. Hohe Nährelementexporte können dementsprechend auch hier langfristig negative Auswirkungen haben. Generell gilt im Flysch, dass neben den basenreichen Mergeln zu einem geringeren Anteil auch sandige und basenarme Böden vorkommen, deren Nährstoffsituation deutlich schlechter beurteilt werden muss.

Tabelle 7: Berechnete oberirdische Biomasse- und Elementvorräte der sechs Biomasseflächen.

*Calculated supply of aboveground biomass and nutrients on the six biomass investigation plots.*

Standort	Typ	Biomasse [t ha <sup>-1</sup> ]	N	----- [kg ha <sup>-1</sup> ] -----						
				P	S	K	Ca	Mg	Mn	Fe
Tangel Kalk	Nadel	13,5	149	9,4	8,6	41	148	10,6	2,18	0,93
	Zweig	9,8	74	6,9	6,0	25	77	7,9	1,19	2,05
	Ast	25,2	58	5,7	5,5	24	175	8,7	1,72	1,16
	Rinde	24,2	97	10,4	9,6	45	522	16,5	4,31	1,70
	Holz	242,5	115	9,1	13,9	73	306	20,7	7,49	4,28
	<b>Gesamt</b>	<b>315,2</b>	<b>492</b>	<b>41,6</b>	<b>43,6</b>	<b>208</b>	<b>1227</b>	<b>64,4</b>	<b>16,89</b>	<b>10,12</b>
Dolomit flachgr.	Nadel	12,6	148	8,6	9,6	28	102	33,9	2,13	0,60
	Zweig	9,0	54	4,6	4,0	21	50	9,3	0,82	1,22
	Ast	26,4	48	3,9	4,5	21	152	14,6	1,89	0,96
	Rinde	18,1	46	4,6	4,9	26	203	14,0	1,83	0,61
	Holz	179,1	84	5,9	9,1	56	151	28,1	4,59	2,64
	<b>Gesamt</b>	<b>245,3</b>	<b>381</b>	<b>27,7</b>	<b>32,1</b>	<b>152</b>	<b>657</b>	<b>99,9</b>	<b>11,26</b>	<b>6,02</b>
Dolomit mittelgr.	Nadel	14,3	198	11,6	13,2	38	157	37,1	3,11	0,75
	Zweig	10,2	73	5,6	4,9	27	56	14,1	1,01	1,08
	Ast	31,1	75	10,5	7,7	39	252	21,7	2,71	1,10
	Rinde	28,7	131	7,5	8,1	38	552	30,6	4,30	1,26
	Holz	244,7	535	7,4	11,7	70	317	44,8	6,36	4,98
	<b>Gesamt</b>	<b>329,0</b>	<b>1011</b>	<b>42,6</b>	<b>45,6</b>	<b>212</b>	<b>1333</b>	<b>148,4</b>	<b>17,48</b>	<b>9,16</b>
Dolomit tiefgr.	Nadel	16,6	220	15,2	17,1	63	166	38,3	6,88	0,67
	Zweig	11,6	84	10,4	9,0	54	76	22,3	2,82	1,17
	Ast	43,8	97	10,0	10,8	44	269	31,7	6,10	2,71
	Rinde	26,7	91	9,5	9,0	48	428	32,6	6,79	1,04
	Holz	309,0	144	13,9	16,6	106	270	37,4	11,16	14,53
	<b>Gesamt</b>	<b>407,8</b>	<b>637</b>	<b>59,0</b>	<b>62,6</b>	<b>315</b>	<b>1209</b>	<b>162,1</b>	<b>33,75</b>	<b>20,11</b>
Mergel Kalk	Nadel	15,9	178	12,1	10,6	46	89	14,5	5,05	0,86
	Zweig	11,2	78	9,5	6,1	36	71	10,0	2,65	1,75
	Ast	42,2	87	9,3	7,2	43	242	18,5	7,02	2,10
	Rinde	28,7	109	13,7	10,5	61	446	24,4	9,11	2,54
	Holz	362,1	168	13,2	20,0	148	374	44,0	19,00	7,56
	<b>Gesamt</b>	<b>460,0</b>	<b>620</b>	<b>57,8</b>	<b>54,5</b>	<b>335</b>	<b>1222</b>	<b>111,5</b>	<b>42,84</b>	<b>14,81</b>
Mergel Flysch	Nadel	15,9	212	16,0	16,1	89	131	14,1	15,29	0,95
	Zweig	11,4	75	7,2	5,9	37	70	9,3	4,58	1,66
	Ast	32,8	105	9,2	7,9	51	166	14,9	9,31	1,36
	Rinde	22,7	116	10,8	8,1	67	294	19,1	12,49	0,85
	Holz	299,6	615	10,7	16,6	157	318	29,2	28,87	3,90
	<b>Gesamt</b>	<b>382,4</b>	<b>1123</b>	<b>53,8</b>	<b>54,7</b>	<b>401</b>	<b>979</b>	<b>86,6</b>	<b>70,54</b>	<b>8,72</b>

Tabelle 8: pH-Wert, Gesamtstickstoff, zitronensäurelöslicher Phosphor und austauschbare Kationen im Boden der Biomasseflächen (KAK: Kationenaustauschkapazität; BS: Basensättigung).

*Table 11: pH, total nitrogen, phosphorous extracted by citric acid and exchangeable cations in the soil of the biomass investigation plots (KAK: cation exchange capacity; BS: base saturation).*

Ort	Tiefe [cm]	pH-Wert	N	P	H	Al	Mn	Fe	Ca	Mg	K	Na	KAK	BS [%]
		H <sub>2</sub> O	[%]	[ $\mu\text{mol g}^{-1}$ ]					[ $\mu\text{mol}_c \text{g}^{-1}$ ]					
Tangel Kalk	Humus	5,0	1,91	6,903	2,950	3,70	6,90	0,026	660	44,3	14,39	2,50	734	98,15
	Humus	5,7	1,47	5,014	-	4,98	7,74	0,026	465	213,4	12,09	1,22	705	98,19
Dolomit flachgr.	0-5	6,1	0,92	1,969	-	1,79	6,02	0,013	467	222,9	3,96	0,23	702	98,89
	5-10	6,7	0,37	0,974	-	3,95	0,14	0,673	503	135,3	1,26	7,77	652	99,27
	10-20	7,3	0,63	0,859	-	2,29	-	0,600	356	93,5	0,11	8,33	461	99,37
	20-30	7,7	0,31	0,483	-	3,33	-	0,721	160	40,9	0,01	8,30	213	98,10
	30-40	8,2	0,15	0,298	-	1,45	-	0,392	124	30,9	0,01	9,30	166	98,89
	40-60	8,2	0,08	0,279	-	2,21	-	0,370	72	19,9	0,01	7,91	103	97,49
	60-80	8,2	0,05	0,247	-	1,36	-	0,105	60	16,1	0,01	6,46	84	98,26
Dolomit mittelgr.	Humus	5,5	1,46	3,291	-	1,32	5,93	-	448	200,4	15,24	0,37	672	98,92
	0-5	6,7	0,89	0,991	-	2,56	0,20	0,405	473	157,1	2,62	0,09	636	99,50
	5-10	6,7	0,89	0,991	-	2,56	0,20	0,405	473	157,1	2,62	0,09	636	99,50
	10-20	7,6	0,39	0,298	-	3,66	0,08	0,726	245	76,8	0,96	0,16	327	98,63
	20-30	7,6	0,39	0,298	-	3,66	0,08	0,726	245	76,8	0,96	0,16	327	98,63
	30-40	7,8	0,22	0,169	-	3,91	0,04	0,562	199	58,9	0,56	-	263	98,29
	40-60	7,8	0,22	0,169	-	3,91	0,04	0,562	199	58,9	0,56	-	263	98,29
	60-80	7,8	0,22	0,169	-	3,91	0,04	0,562	199	58,9	0,56	-	263	98,29
Dolomit tiefgr.	Humus	4,9	1,41	6,012	3,445	5,34	25,45	0,026	454	155,6	23,90	2,35	670	94,89
	0-5	5,0	0,69	1,881	-	5,08	17,08	0,463	240	115,6	3,55	0,73	383	94,09
	5-10	5,5	0,49	1,259	-	2,93	9,11	0,044	221	125,9	1,98	0,76	362	96,66
	10-20	6,3	0,30	0,586	-	2,21	3,43	0,013	225	147,9	1,06	0,35	380	98,51
	20-30	6,7	0,17	0,502	-	7,25	-	1,529	152	46,4	0,01	10,86	218	95,97
	30-40	7,1	0,13	0,289	-	3,95	-	1,317	137	36,4	0,01	10,09	189	97,21
	40-60	7,2	0,08	0,449	-	4,42	-	1,000	115	29,3	0,22	12,03	162	96,66
	60-80	8,1	0,06	0,403	-	2,00	-	0,894	90	22,6	0,49	8,16	124	97,67
Mergel Kalk	Humus	5,2	1,22	5,002	2,267	9,08	18,58	0,423	262	45,8	13,27	0,86	352	91,38
	0-5	5,4	1,08	0,678	0,775	4,80	11,23	-	191	22,0	3,42	0,70	234	92,80
	5-10	5,6	0,46	1,523	0,062	3,47	7,54	-	202	16,7	2,37	0,59	233	95,24
	10-20	5,9	0,23	0,484	-	3,17	3,42	-	171	13,6	1,26	0,47	193	96,57
	20-30	5,4	0,14	0,792	1,059	9,69	2,80	-	112	12,0	1,14	1,14	140	90,32
	30-40	5,4	0,10	0,320	1,440	23,15	2,01	-	87	21,4	1,30	1,07	137	80,63
	40-60	5,5	0,09	0,232	1,486	22,98	1,36	-	97	28,9	1,53	1,32	155	83,31
	60-80	5,7	0,06	0,225	1,102	9,29	0,61	-	140	37,6	1,87	1,33	192	94,27
Mergel Flysch	Humus	4,2	1,55	8,911	22,007	8,72	37,80	2,098	515	60,2	36,97	1,06	684	89,68
	0-5	3,6	0,41	2,091	27,940	90,77	4,46	28,621	71	9,2	2,93	0,19	235	35,31
	5-10	3,7	0,27	1,912	19,054	106,83	6,75	22,519	44	6,1	2,02	0,20	207	25,11
	10-20	4,0	0,13	0,991	13,885	104,52	4,58	6,625	58	6,0	1,84	0,01	196	33,72
	20-30	4,3	0,10	0,549	12,267	104,56	2,88	2,295	97	8,3	2,88	0,14	231	47,12
	30-40	6,4	0,08	0,937	-	0,34	1,46	-	367	9,2	3,57	0,05	382	99,53
	40-60	7,6	0,10	0,209	-	3,95	0,05	1,383	315	5,9	5,83	2,60	335	98,39
	60-80	7,8	0,09	0,066	-	2,00	0,04	0,661	291	2,8	5,14	0,87	303	99,11

## 5 NÄHRSTOFFENTZUG DURCH HOLZERNTE

Vor allem dort wo in den nördlichen Kalkalpen Standortsqualität und Wachstum stark von Humusvorrat und Nährstoffangebot abhängen, also vor allem auf Fels Humus Böden und flachgründigen Rendzinen aus Kalk und Dolomit Verwitterung, muss das forstliche Management und die Holzernte neben dem Gewinn stets auch den Erhalt der Standortsqualität im Auge behalten. Dabei ist die ungleiche Verteilung der Nährstoffe im Baum zu berücksichtigen (Abbildung 6). In Fichtenaltbeständen nimmt das für die Nutzung im Vordergrund stehende Stammholz fast 80 % der oberirdischen Gesamtbiomasse ein. Die in der Krone gespeicherte Biomasse, die zur Hackschnitzelproduktion genutzt werden kann, beläuft sich auf deutlich weniger als 20 %. Ganz anders verhält es sich mit den Nährstoffen. Phosphor als häufig wachstumslimitierendes Element ist zu fast 60 % im Kronenmaterial gespeichert. Auch für Stickstoff, Kalium und Magnesium befinden sich etwa die Hälfte der im Baum gespeicherten Vorräte in Ästen, Zweigen und Nadeln. Darüber hinaus sind zwischen 15 und 20 % der kritischen Nährelemente in der Stammrinde enthalten.

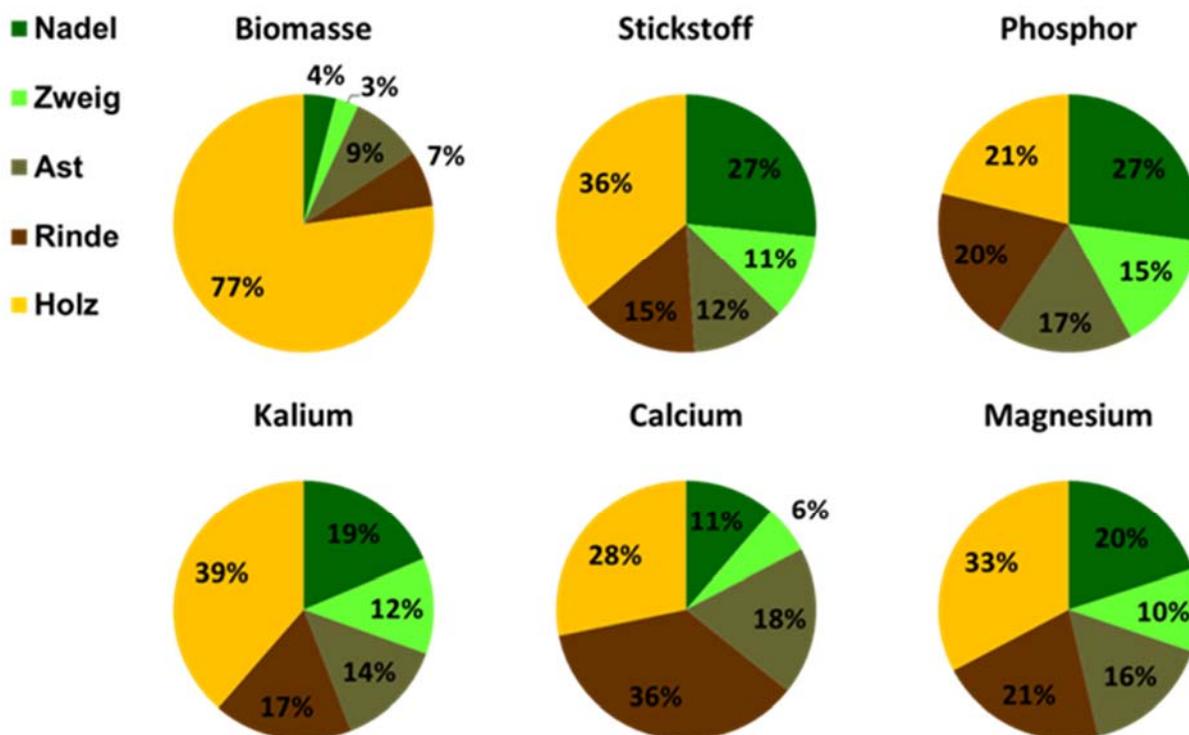


Abbildung 6: Typische Biomasse- und Nährstoffverteilung in der oberirdischen Biomasse für Fichtenbestände im Nördlichen Kalkalpin.

*Distribution of aboveground biomass and nutrients typical for Norway spruce in the Northern Calcareous Alps.*

Werden die erntekostenfreien Erlöse und die Nährstoffentzüge der möglichen Biomassenutzung gegenübergestellt (Abbildung 7), fällt sofort ins Auge, dass die Nutzung von Stammholz mit Rinde zumindest für Fichte eine vergleichsweise nährstoffschonende Erntevariante sein kann. Grund sind die hohen Erlöse vor allem für Stammholz ab einer Sortierung von 2b (Mittendurchmesser der Stamm Fixlängen von 25 cm und mehr) und der vergleichsweise niedrige Nährstoffgehalt im Holz. Industrieholz und Kronenmaterial zur Hackschnitzelerzeugung werden geringer vergütet, erfordern einen höheren Ernteaufwand durch das Hacken und führen im Vergleich zur nutzbaren Biomasse zu stark überproportionalen Nährstoffentzügen.

Am Beispiel eines durchschnittlich wüchsigen Fichtenbestands (Fallbeispiel „Dolomit tiefgr.“) sind die potentiell zu erwartenden Gewinne bei einem Entnahmevermögen von 100 Festmetern pro Hektar in Abbildung 8 gezeigt. Angenommen wurden dabei Holzerntekosten von 35 € pro Festmeter, was in etwa den Kosten einer Vollbaumbringung mit Seilkran im Hochgebirge entspricht (Richter 2010). Die Holzpreise wurden auf Basis der Werte verschiedener Waldbesitzervereinigungen für 2014 mit 84 (Sortierung 1b), 94 (Sortierung 2a) und 98 (ab Sortierung 2a) angesetzt. Die Berechnung der zusätzlichen Kosten für die Hackschnitzelproduktion erfolgte nach KWF 2004 mit 37 € pro Tonne Trockengewicht für das Hacken der Kronen und 17 € t<sup>-1</sup> für den Transport. Der Preis für Hackschnitzel frei Werk wurde auf 15 € pro Schüttraummeter gesetzt, das entspricht etwa 100 € pro Tonne Trockengewicht. Die Holzerntekosten wurden anteilig nach den erreichten Biomassen auf die verschiedenen Sortimente und das Kronenmaterial verteilt, die Kosten für Hackschnitzel dagegen nur auf das Kronenmaterial.

Der so berechnete erntekostenfreie Erlös für Hackschnitzel aus Kronenmaterial lag deutlich unter 10 % des Gesamterlöses, wobei der größte Anteil auf das Astmaterial entfiel. Dagegen betrug der Anteil der mit dem Kronenmaterial exportierten Nährelemente ca. 70 %. In Anlehnung an Ettl und Göttlein 2007 bzw. Frisch 2012 wurden auch die Kosten einer theoretischen Nährstoffrückführung in die Betrachtung miteinbezogen um einen monetären Vergleich von Nährstoffentzug und Ernteerlös zu ermöglichen. Die durch Hackschnitzelproduktion erzielten Gewinne würden demnach durch Nährstoffrückführung komplett aufgezehrt.

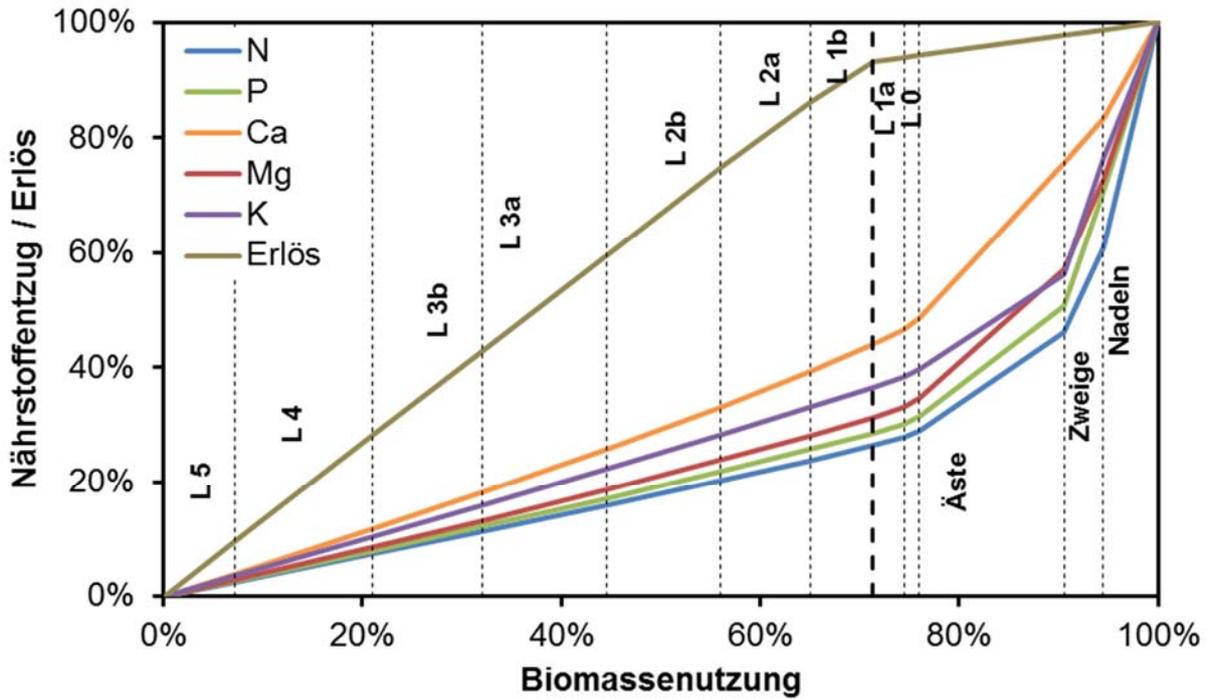


Abbildung 7: Gegenüberstellung von Biomassenutzung, Nährstoffentzug und Erlös für einen 115-jährigen Bestand auf Hauptdolomit (Oberhöhenbonität im Alter 100: 31).

*Comparison of harvested biomass, nutrient removal and proceeds for a stand of Norway spruce aged 115 on dolomitic limestone (yield class: 31 m dominant height at age 100).*

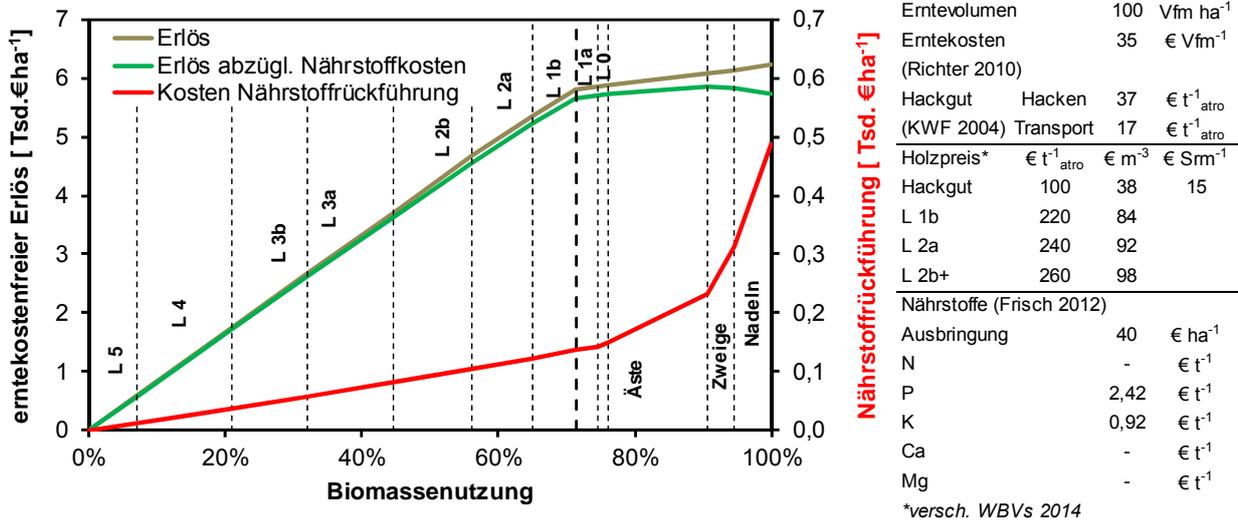


Abbildung 8: Gegenüberstellung von Biomassenutzung, dem erntekostenfreien Erlös und der potentiellen Nährstoffrückführungskosten.

*Comparison of harvested biomass, net proceeds and hypothetical costs for compensatory fertilization.*

Aus dem oben gesagten ist klar abzuleiten, dass eine nährstoffschonende Bewirtschaftung darauf abzielen muss vor allem das Kronenmaterial verteilt im Bestand zu belassen und einen Export bzw. das konzentrierte Ablagern an den Forststraßen vermeiden. Technische ist dies vor allem bei motormanueller Aufarbeitung z.B. in Kombination mit Seilkranrückung im steilen Gelände möglich. Die damit verbundenen Mehrkosten lassen sich teilweise durch arbeitsextensivere Aufarbeitungsverfahren reduzieren. Möglich sind z.B. verschiedenen Aufarbeitungsgrenzen (Zopfstärken) bei Vollbaumbringung oder das „Stummeln“ der Äste bei motormanueller Aufarbeitung im Vergleich zur konventionellen Entastung bündig am Schaft.

Tabelle 9: Vergleich des Nährstoffentzugs in Fichtenbeständen des Nördlichen Kalkalpins bei unterschiedlicher Aufarbeitung und Zopfdurchmessern.

*Percentage of biomass and nutrients left on the site in relation to different harvesting procedures (Norway spruce in the Northern Calcareous Alps).*

		<b>potentiell im Bestand verbleibender Anteil [%]</b>				
		<b>Biomasse</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>
	<b>Vollbaum</b>	–	–	–	–	–
	<b>Vollbaum gezopft</b>					
	7 cm	2	2	7	8	6
	10 cm	7	7	18	22	17
	15 cm	16	17	38	45	35
	<b>Rohschaft</b>					
	7 cm	16	16	49	59	44
	10 cm	17	17	50	60	45
	15 cm	22	22	54	63	49
	<b>Sortimente</b>					
	7 cm	18	19	50	60	46
	10 cm	21	21	52	62	47
	15 cm	29	29	57	66	53

Tabelle 9 zeigt die Auswirkungen ausgewählter Verfahren auf den Nährstoffentzug in Fichtenaltbeständen der nördlichen Kalkalpen. Während bei einem Zopfdurchmesser von 7 cm weniger als 10 % der hier kritischen Nährelemente Phosphor, Stickstoff und Kalium am Standort verbleiben, sind es bei Zopf 10 bereits ca. 20 % und bei Zopf 15 fast 40 %. Letzteres bringt allerdings vor allem bei Beständen mit hoher Stammzahl aber geringen Durchmessern eine deutliche Reduktion der Ernte im Stammholzsortiment 1b mit sich. Sehr günstig wirkt sich das „Stummeln“ der Äste (Rohschaft) auf den Nährstoffexport aus. Selbst bei Zopf 7 verbleiben etwa 50 % der Nährstoffe im Bestand, was praktisch dem entspricht, was bei kompletter motormanueller Aufarbeitung erreicht werden kann. Etwas anders stellt sich die Lage im

Dickungsstadium von Fichtenbeständen da (Tabelle 10). Hier kann bereits bei einem Zopfdurchmesser von 10 cm ein Nährstoffverbleib von mehr als 60 % erreicht werden. Stärkere Aufarbeitungsgrenzen würden hier bedeuten, dass die Bäume zwar gefällt, jedoch kein Holz geerntet wird. Es fände also reine Bestandspflege ohne Holzernte statt.

Tabelle 10: Vergleich des Nährstoffentzugs im Dickungsstadium und im Altbestand für Fichten im Nördlichen Kalkalpin (Katzensteiner 2014).

*Percentage of biomass and nutrients left on the site in young and mature stands of Norway spruce in the Northern Calcareous Alps (Katzensteiner 2014).*

<b>potentiell im Bestand verbleibender Anteil [%]</b>					
	<b>Biomasse</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>
<b>Entwicklungsstadium (Zopf 10 cm)</b>					
<b>Dickung</b>	39	39	63	65	61
<b>Altbestand</b>	6	6	17	19	16

## 6 FOLGERUNGEN

Die forstlichen Bewirtschaftungsmöglichkeiten im nördlichen Kalkalpin werden geprägt durch die Vielfalt und Besonderheiten der Standortverhältnisse in den Alpen. Das Vorherrschen steiler Hanglagen, das mit zunehmender Höhenlage ungünstigere Klima und die oft ungünstige Nährstoffversorgung reduzieren die Produktivität der Wälder und steigern gleichzeitig den zur Bestandspflege und Ernte nötigen Aufwand. Dabei finden sich im nördlichen Alpenraum sowohl sehr gut wüchsige Bestände besonders auf tiefgründigen Mergeln z.B. in der Flyschzone als auch durch Klima, Wasserversorgung, insbesondere aber durch mangelnde Nährstoffversorgung im Wachstum stark beeinträchtigte Wälder. Besonders hervorzuheben ist die unzureichende Nährstoffversorgung vor allem mit Phosphor, häufig auch mit Stickstoff und Kalium auf Felshumusböden und flachgründigen Böden aus Kalk und Dolomit Verwitterung. Auf sehr reinen Kalken ohne Dolomitbeimengung kann auch die schlechte Magnesiumversorgung das Wachstum limitieren. Der Erhalt der Standortsqualität ist gerade auf solchen Standorten vordringlich.

Da die wichtigen Nährelemente in hohem Anteil in der Baumkrone (Äste, Zweige, Nadeln und Blätter) gespeichert sind, muss eine Nutzung von Kronenmaterial kritisch beurteilt werden. Ökonomisch gesehen sind die zusätzlichen Gewinne durch Nutzung von Kronenbiomasse gering und werden unter Umständen durch die Verschlechterung des Standorts neutralisiert oder sogar in Verluste umgewandelt. Die Palette standortsschonender Holzerntevarianten muss

dementsprechend auch bei Gewinnreduktion voll ausgeschöpft bzw. noch erweitert werden. Harvestereinsatz und motormanuelle Aufarbeitung sollten in eine Richtung optimiert werden, die das Verbeiben möglichst hoher Mengen an Kronenmaterial am Standort ermöglichen. Eine zusätzliche Möglichkeit die Nährstoffexporte bei Holzernte zu minimieren ist die Rückkehr zur Entrindung der Stämme vor Ort. Der damit verbundene Aufwand ist aber sicher nur auf extrem anfälligen Standorten (Fels-Humus-Böden) gerechtfertigt. Neue technische Entwicklungen sollten in zukünftigen Bewirtschaftungskonzepten berücksichtigt werden. Beispiele sind entrindende Harvesterköpfe, deren Einsatz in Fichtenbeständen zurzeit in einem Projekt der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf untersucht wird, oder auch Entrindungsaufsätze für Motorsägen. Neben dem Belassen der in der Rinde gespeicherten Nährstoffe am Standort würde gleichzeitig das Borkenkäferisiko in Fichtenbeständen minimiert. Zusätzlich kann die finanzielle Förderung der Waldbewirtschaftung in den Alpen (z.B. Bergwaldoffensive Bayern) als Steuerinstrument für ein angepasstes und nachhaltiges Forstmanagement eingesetzt werden um den hohen Aufwand auf anfälligen Standorten teilweise zu kompensieren.

## 7 LITERATUR

- Baier, R. (2004): Ernährungszustand und mögliche Anpassungsmechanismen der Fichte (*Picea abies* L. [Karst.]) auf Dolomitstandorten der Bayerischen Kalkalpen - Ergebnisse eines Düngeversuches an jungen Schutzwaldsanierungspflanzen. **Schweizer Zeitung für Forstwesen** 155, 378-391.
- Dittmar, C., Elling, W. (1999): Radial growth of Norway spruce and European beech in relation to weather and altitude. **Forstwissenschaftliches Centralblatt** 118, 251-270.
- Ettl, R., Göttlein, A. (2007): Waldhackschnitzelproduktion in Fichtenreinbeständen – Monetäre Bewertung des Nährstoffexportes bei Biomassenutzung. **AFZ-Der Wald** 14, 756-758.
- Ewald, J. (2005): Ecological background of crown condition, growth and nutritional status of *Picea abies* (L.) Karst. in the Bavarian Alps. **European Journal of Forest Research** 124, 9-18.
- Ewald, J. (2000): Ist Phosphormangel für die geringe Vitalität von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) in den Bayerischen Alpen verantwortlich? **Forstwissenschaftliches Centralblatt** 119, 276-296.
- Flückiger, W., Braun, S. (1995): Revitalisation of alpine protection forest by fertilization. **Plant and Soil** 168, 481-488.

- Frisch, C. (2012): Biomasse- und Nährelementexport in zwei Fichtenbeständen unterschiedlicher Nährstoffausstattung – Einfluss der Nutzungsintensität auf ökologische und ökonomische Größen. Masterarbeit an der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement der Technischen Universität München, Fachgebiet Waldernährung und Wasserhaushalt, 92 S.
- Göttlein, A., Katzensteiner, K., Rothe, A. (2014): Standortsicherung im Kalkalpin – SicALP, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt INTERREG BY/Ö J00183.
- Hartl-Meier, C., Rothe, A. (2014): Zuwachsreaktionen des Bergwaldes auf Klimaänderungen. **LWF aktuell** 99, 44-46.
- Katzensteiner, K., Reger, B., Eckmüller, O. (2014): How much is too much? Sustainability concerns about forest biomass extraction. XXIV IUFRO World Congress 2014 – Salt Lake City, UT, United States, 5-11 October 2014 "Sustaining Forests, Sustaining People: The Role of Research".
- König, N. (2009): Handbuch forstlicher Analytik, herausgegeben vom Gutachterausschuss Forstliche Analytik, BMVEL, Bonn.
- Kolb, E. (2012): Interaktive Karte der Gesteinseigenschaften in den Alpen. Eine neue Substratgliederung bringt schnelle Übersicht und viele Informationen über die Böden der Bayerischen Alpen. **LWF aktuell** 87, 15-17.
- KWF (2004): Daten-CD Holzernteverfahren. Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Bundesrepublik Deutschland im Anhalt an KWF-Bericht Nr. 25 (Holzernteverfahren) und diverse Tagungsführer der KWF-Tagungen. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.
- Mellert, K. H., Ewald, J. (2013): Regionalizing Nutrient Values of Vegetation to Assess Site Fertility of Mountain Forests in the Bavarian Alps. *Folia Geobotanica* 49(3), 407-423.
- Mellert, K. H., Ewald, J. (2014): Nutrient limitation and site-related growth potential of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) in the Bavarian Alps. **European Journal of Forest Research** 133(3), 433-451.
- Pretzsch, H., Moshammer R., Dieler J., Böttcher, M., Göttlein, A.; Weis, W., Block, J., Schuck, J., Gauer, J., Wunn, U. (2012): Entscheidungsstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte. Abschlussbericht zum Projekt 25966-33/0 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 204 S.
- Richter, S. (2010): Seilbringung im Hochgebirge. Vortrag im Forstlichen Bildungszentrum Laubau, 03. November 2010.
- Weis, W., Blumenthal, B., Göttlein, A. (2014): Wälder der nördlichen Kalkalpen: Ernährung, Wasser- und Stoffhaushalt. **LWF aktuell** 99, 38-41.
- Weis, W., Göttlein, A. (2012 a): Nährstoffnachhaltige Biomassennutzung. **LWF aktuell** 90, 44-47.

Weis, W., Göttlein, A. (2012 b): Stoffliche Nachhaltigkeitskriterien für die bayerische Forstwirtschaft. Abschlussbericht zum Projekt B67 des Kuratoriums für forstliche Forschung in Bayern, 39 S. + 140 S. Anhang.