

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 155 (2004)

**Heft:** 9

**Artikel:** Ernährungszustand und mögliche Anpassungsmechanismen der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) auf Dolomitstandorten der Bayerischen Kalkalpen : Ergebnisse eines Düngungsversuches an jungen Schutzwaldsanierungspflanzen

**Autor:** Baier, Roland

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1098134>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Ernährungszustand und mögliche Anpassungsmechanismen der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) auf Dolomitstandorten der Bayerischen Kalkalpen

## Ergebnisse eines Düngeversuches an jungen Schutzwaldsanierungspflanzen

ROLAND BAIER

Keywords: *Picea abies*; fertilisation; NPK; biosol; Bavarian Limestone Alps; dolomite. FDK 161 : 232 : 237 : (430)

**Abstract:** At two dolomite sites in the Bavarian Limestone Alps we studied the benefits of NPK- and Biosol-fertilisation on young, planted Norway spruces and how Norway spruce is naturally adapted to this nutrient poor environment. Based on our results we deduced recommendations for forest practice.

**Abstract:** Auf zwei Dolomitstandorten der Bayerischen Kalkalpen wurde untersucht, wie sich NPK- und Biosol-Düngungen auf junge, gepflanzte Fichten auswirken und inwieweit die Fichte an diese nährstoffarmen Standorte adaptiert ist. Hieraus wurden Empfehlungen für die Forstpraxis abgeleitet.

### 1. Einleitung und Fragestellung

In der Montanstufe der Bayerischen Kalkalpen dominieren mässig trockene bis mässig frische, extrem vergraste Karbonat-Bergmischwälder (*Aposerido-Fagetum caricetosum albae* bis *Aposerido-Fagetum caricetosum ferrugineae*) (EWALD 1997). Diese sind aufgrund fehlender Vorausverjüngung – vielfach bedingt durch überhöhte Schalenwildbestände – häufig verlichtet und überaltert. Darüber hinaus sind viele Standorte durch Beweidung und/oder wiederholte forstliche Nutzung (ehemalige Kahlschläge) degradiert und verändert. In beiden Fällen dienen Pflanzmassnahmen der langfristigen Sicherung dieser Schutzwälder. Zahlreiche Studien in den Bayerischen (ZECH 1968; BOSCH 1986; GULDER & KÖLBEL 1993; MÖSSNANG 1992; LIU *et al.* 1994; EWALD *et al.* 2000; ZOLLNER 2000) und den benachbarten Tiroler (HERMAN 1994; HAUPOLTER 1999) Kalkalpen belegen für Fichten auf diesen flachgründigen Standorten einen bodenbedingten Nährstoffmangel. Flächenmässig ist insbesondere die Unterversorgung mit Stickstoff und Phosphor von Bedeutung.

Darüber hinaus zeigen junge, gepflanzte Fichten auf süd-exponierten Schutzwaldsanierungsflächen insbesondere auf Hauptdolomitstandorten über das natürliche Mass hinausgehende Wuchsstockungen. Ein Verjüngungsziel mit mindestens 30% Fichte scheint dort gefährdet. Dies ist besonders gravierend, da die Fichte aufgrund ihrer wintergrünen Krone neben der Kroneninterzeption auch zu einer ungleichmässigen Schneeeablagerung im Bestand führt und so der Bildung von Lawinen entgegenwirkt. Auf bayerischen Dolomitstandorten treten vielfach wenig vitale Altbestände auf. Dieses für Dolomitstandorte typische und daher als «Dolomitphänomen» bezeichnete Erscheinungsbild (HÖLZEL 1996), wurde bereits 1968 von Glatzel für das benachbarte Österreich beschrieben (GLATZEL 1968). Düngeversuche an Fichtenalt- (BACHMANN *et al.* 2000; FLÜCKIGER & BRAUN 1995; KATZENSTEINER 1993; HAUPOLTER 1997b, 1999) und Jungbeständen (KRAPPENBAUER 1969; GLATZEL 1971) sollten diese Standortungunst ausgleichen und speziell bei Aufforstungen die kritische Anwuchs- und Jugendphase der Sanierungspflanzen verkürzen.

Auch im Bayerischen Alpenraum wurde in einem früheren Projekt die Wirkung organischer und mineralischer Düngemittel (Biosol und NPK) auf Ernährung und Triebblängenwuchs von Schutzwaldsanierungspflanzen vergleichend untersucht (ZOLLNER 2000). Dabei war auffällig, dass innerhalb einer Behandlungseinheit die gepflanzten Jungfichten sehr unterschiedlich im Sprosslängenwachstum reagierten. Manche

Bäume sprachen sehr gut auf Düngung an, andere dagegen wenig. Die NPK-Düngung erbrachte regelmässig die deutlichste Reaktion.

Andererseits entwickelten Bäume natürliche Anpassungsmechanismen an schwierige Umweltverhältnisse. Strategien wie langsames Wachstum bei geringem Nährstoffangebot (MARSCHNER 1995) oder frühe Investition in ein gut ausgebildetes Wurzelsystem (LÜSCHER 1990) als Schlüssel einer ungehinderten späteren Entwicklung zählen hierzu.

Ausgehend von diesen Beobachtungen wurde mittels boden- und ernährungskundlichen Methoden auf zwei ausgewählten Düngeversuchsflächen von 1995 (ZOLLNER 2000) folgenden Fragen nachgegangen:

- Wie wirkt die Düngung nach sieben Jahren auf Boden, Ernährung und Biomassenentwicklung?
- Können physiologische Anpassungen der Fichten auf kalkalpinen Standorten erkannt werden?
- Welche Folgerungen ergeben sich hieraus für die Forstpraxis?

### 2. Beschreibung der Versuchsanlagen und Methodik

#### 2.1 Flächenauswahl und Düngeprogramm

Die Auswahl der Untersuchungsflächen orientierte sich an den Ergebnissen des Vorgängerprojektes (ZOLLNER 2000). Der Versuchsstandort Rottauer Alm (durchschnittlicher Pflanzenzustand) erlaubte den Vergleich von NPK-Düngung mit einem vergleichsweise moderat wirkenden organischen Düngemittel (Biosol). Mit der Fläche Fischbachkopf wurde die in ihrer Gesamtreaktion auffälligste, da mit gering benadelten, nur wenig vitalen Fichten bestockte Fläche ausgewählt. Hier kam nur Biosoldünger zur Anwendung. Die beiden Flächen repräsentieren mögliche Ausgangssituationen für Sanierungsfälle. Die Rottauer Alm entspricht dem mehr oder weniger intakten «Waldbodentyp», die Fläche Fischbachkopf dem durch starke Vergrasung und Almwirtschaft veränderten «Weidebodentyp».

Die Dünger wurden 1995 einzelbaumweise in Form einer Kopfdüngung ausgebracht (Tabelle 1). Nach Herstellerangaben betragen die Prozentanteile der Elemente N/P/K in Biosol 7/1,5 und 3,5 und im NPK-Dünger 12/12/17. Um einen Vergleich mit flächigen Düngeverfahren, Depositionswerten oder Bodenvorräten zu erlauben, wurden diese auf fiktive Hektarwerte hochgerechnet.

**Tabelle 1: Kurzbeschreibung der beiden Versuchsflächen.**

<sup>1)</sup> eigene Jahrringzählungen inklusive Pflanzgartenanzucht; <sup>2)</sup> nach ZOLLNER 2000; <sup>3)</sup> zum Vergleich berechnet aus Herstellerangaben und einer gedüngten Fläche je Baum von 25\*25 cm bis 30\*30 cm.

*Table 1: Characteristics of the two study sites.*

<sup>1)</sup> tree ring countings incl. years in nursery; <sup>2)</sup> ZOLLNER 2000; <sup>3)</sup> for comparison calculated with manufacturers specifications and a fertilised area per tree from 25\*25 cm to 30\*30 cm).

	Rottauer Alm	Fischbachkopf
Forstamt	Marquartstein	Mittenwald
Wuchsbezirk	15.6 «Chiemgauer Alpen und Saalforstamt Unken»	15.5 «Mittlere Bayerische Kalkalpen»
Lage / Exposition	1050 m ü.NN / südexponierter Hang	1550 m ü.NN / südexponierter Hang
Mittlere Jahrestemperatur	4,8 °C	2,5 °C
Mittlerer Jahresniederschlag	1900 mm	2150 mm
Geologie	Raibler Dolomit	Hauptdolomit
Böden (nach ARBEITSGRUPPE BODEN 1994)	Skelett – Humus – Boden (O / C – Boden), Rendzina, Braunerde – Rendzina, Braunerde – <i>Terra fusca</i>	Rendzina
Humusform	Moder	(F-) Mull
Vegetation (nach EWALD 1997)	Mässig trockener Karbonat-Bergmischwald ( <i>Aposerido-Fagetum caricetosum albae</i> )	Degradierter hochmontaner Karbonat-Bergmischwald mässig frischer Standorte ( <i>Aposerido-Fagetum caricetosum ferrugineae</i> )
Nutzungsgeschichte	Vermutlich ohne, höchstens geringer Weideeinfluss	Starker Weidedruck
Alter, Sortiment und Herkunft der Pflanzen <sup>1), 2)</sup>	17 Jahre, vierjährige verschulte Containerpflanzen, Alpenherkunft	17 Jahre, vierjährige verschulte Containerpflanzen, Alpenherkunft
Pflanzverband	Flächenverband im Abstand von etwa 1,5 * 1,5 m	Rottenverband mit 20 Bäumchen je Rotte
Pflanzengrösse 2001	60 cm (Minimum 30 cm, Maximum 100 cm)	42 cm (Minimum 24 cm, Maximum 64 cm)
Düngegabe je Pflanze <sup>2)</sup>	120 g Biosol und 120 g NPK	100 g Biosol
Jahr der Düngung <sup>2)</sup>	1995	1995
Aufwandsmenge nach Elementen / ha <sup>3)</sup>	13–19 t/ha Gesamtmenge N <sub>Biosol</sub> : 900–1300 kg/ha N <sub>NPK</sub> : 1600–2300 kg/ha P <sub>Biosol</sub> : 195–285 kg/ha P <sub>NPK</sub> : 1600–2300 kg/ha K <sub>Biosol</sub> : 455–665 kg/ha K <sub>NPK</sub> : 2200–3200 kg/ha	11–16 t/ha Gesamtmenge N <sub>Biosol</sub> : 800–1100 kg/ha P <sub>Biosol</sub> : 165–240 kg/ha K <sub>Biosol</sub> : 385–560 kg/ha

## 2.2 Untersuchungsgebiete

Tabelle 1 informiert auch über die wichtigsten Charakteristika der Aufforstungsflächen. Diese liegen im Wuchsgebiet 15 «Bayerische Kalkalpen» (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1985) in einem Höhenbereich von 1050 bis 1550 m ü. NN. Das Klima ist «randalpin» (EWALD 2001), die Jahresmitteltemperatur liegt bei 2,5 bis 4,8 °C (interpoliert nach FLIRI 1975) und die mittleren Jahresniederschläge zwischen 1900 und 2150 mm. Diese wurden mit der Höhenfunktion  $N = 100 * [221,7 + 7,9 * z + 0,505 * z^2]^{1/2}$  (mit z = Höhe über NN in 100 m) berechnet (ENDERS 1979). Trotz der hohen Niederschläge sind sommerliche Trockenphasen nicht auszuschliessen (LIU *et al.* 1994). Eine Besonderheit sind die aus Südwesten bis Südosten stammenden Föhnwinde, die auf südexponierten Prallhängen die edaphische Trockenheit fördern.

Im Untersuchungsgebiet treten vor allem Meeresablagerungen der Alpinen Trias auf (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT 1981). Der im Karn (Keuper) sedimentierte Raibler Dolomit bildet das Ausgangsgestein der Bodenbildung auf der Fläche Rottauer Alm. Im Nor (ebenfalls Keuper) wurde der Hauptdolomit (Fischbachkopf) unter weniger wechselhaften Flachmeerbedingungen ausgefällt. Er ist das Hauptgestein der Bayerisch-Tiroler Kalkalpen. Beide Dolomite verwittern feinsandig-schluffig. Gerade der Hauptdolomit ist sehr rein und daher arm an Lösungsrückstand (BOSCH 1986).

Bedeutend für die Bodenbildung sind ausserdem (rezente) äolische Einträge (FRANZ & SOLAR 1961; ZECH & VÖLKL 1979;

BAIER 1998). Aufgrund dieses silikatischen Fremdmaterials treten auf der Fläche Rottauer Alm keine reinen, sondern Subtypen der *Terra fusca* (z.B. Braunerde – *Terrae fuscae*) auf. Zusätzlich kommen mächtige Humusaufgaben über Lockergestein (Skelett-Humus- bzw. O/C-Böden, sogenannter «Tangelhumus») vor. Nach BOCHTER (1984) entstehen diese bevorzugt bei fehlender Feinerde. Die Untersuchungsflächen liegen in der höhenzonalen Stufe des mittelmontanen Fichten-Tannen-Buchenwaldes (Rottauer Alm) bis zur Untergrenze des subalpinen Fichtenwaldes (Fischbachkopf). Definitionsgemäss gehören diese zur montanen Bergwaldzone («Bergstufe»), die sich ökologisch deutlich von dem darüber folgenden, buchenfreien subalpinen Gebirgswald («Gebirgsstufe») unterscheidet (LEIBUNDGUT 1986; BRANG 1996; OTT *et al.* 1997; EWALD 1997, 1999).

Bedeutend ist die unterschiedliche Nutzungsgeschichte der beiden Flächen. Während die Untersuchungsfläche Fischbachkopf einem vermutlich jahrhundertlangen, intensiven Weidedruck ausgesetzt ist, wurde die Fläche Rottauer Alm (trotz des Sanierungsflächennamens) nicht oder nur geringfügig durch Waldweide belastet.

## 2.3 Untersuchte Baumkollektive und Probenahme

Die beiden Versuchsflächen wurden 1995 angelegt (ZOLLNER 2000). Bei der Rottauer Alm handelte es sich um eine Aufforstung von rund 0,5 ha Grösse im Flächenverband. Zur Vermeidung von Randeffekten (Düngemittleintrag in benachbarte

**Tabelle 2: Bodenreaktion, Gesamtgehalte an C, N und P, C/N-Verhältnis und austauschbare bzw. extrahierbare Kationen untersuchter Rendzinen im Vergleich zu Daten aus REHFUESS (1990; verändert).**

*Table 2: Soil pH-values, total contents of C, N, and P, C:N ratios and exchangeable resp. extractable cations of the examined Rendzic Leptosols compared to datas of REHFUESS (1990; modified).*

Mull- Rendzina-	Tiefen- stufe [cm]	Horiz- zont	pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ]	C [%]	N [%]	C/N	P [mg/g]	Ca BaCl <sub>2</sub> -austauschbare Kationen in [mmol IE/kg] und in [%]-Anteilen der KAK	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al + H
Hauptdolomit REHFUESS 1990	-11	Ah	6,8	16	1,02	16	1,19	607 76	154 19	4 1	2 0	-	-	21 4
	-32	AhCv	7,1	8	0,52	14	1,00	459 84	80 15	3 1	2 0	-	-	-

	Tiefen- stufe [cm]	Horiz- zont	pH-Wert [KCl]	C [%]	N [%]	C/N	P [mg/g]	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al	H
Mull- Rendzina- Fischbach- kopf	L	L/Of	6,92	46	1,23	37	0,79	164 63	82 32	3 3	4,3 2	0,3 0	1,2 0	0,8 0	0,0 0
	0-5	Ah1	7,09	16	1,14	14	0,90	244 68	104 29	3 1	4,2 1	0,2 0	0,3 0	0,7 0	0,0 0
	5-10	Ah1	7,13	15	0,94	16	0,85	253 69	106 29	3 1	4,4 1	0,2 0	0,3 0	0,7 0	0,0 0
	10-20	Ah2	7,06	13	0,85	15	1,48	257 69	108 29	3 1	4,4 1	0,2 0	0,3 0	0,6 0	0,0 0
Moder- Rendzina- Rottauer Alm	L/Of	L/Of	5,88	49	1,94	25	1,11	176 68	71 27	3 2	4,2 2	0,2 0	0,9 0	0,8 0	0,0 0
	0-5	Oh	6,83	39	1,62	24	1,10	300 68	129 29	3 1	4,3 1	0,2 0	0,5 0	0,6 0	0,0 0
	5-10	Ah1	7,06	18	0,96	19	0,89	234 68	102 30	3 1	4,2 1	0,2 0	0,3 0	0,7 0	0,0 0
	10-15	Ah2	7,34	15	0,67	23	0,52	178 70	69 27	3 1	4,2 2	0,2 0	0,3 0	0,7 0	0,0 0

Parzellen), die bei einer Blockversuchsanlage in dem steilen Gelände zu erwarten gewesen wären, wurden die NPK-, Bio- und Kontrollfläche räumlich getrennt angelegt. Dem geringeren Nachteil der fehlenden räumlichen Wiederholungen (zum Ausgleich kleinstandörtlicher Unterschiede) wurde bei der Probenahme durch die einzelbaumbezogene Bodenanalyse Rechnung getragen. Die Rottauer Alm war die einzige Versuchsfläche, auf der NPK- und Biosoldünger am selben Standort verglichen werden konnten. Daher wurden nur dort die sehr aufwendigen Feinstwurzelstudien durchgeführt. Bei der Fläche Fischbachkopf handelte es sich um eine Aufforstung von Baumrotten im Abstand von rund 10 m verteilt auf etwa 1,5 ha. Dort wurden zu Versuchsbeginn Rotten markiert und zufällig zu düngende Rotten und ungedüngte Kontrollrotten ausgewählt. Wie einleitend dargelegt, bildeten sich im Düngerversuch Gruppen unterschiedlicher Düngereaktion heraus. Um diese zu erfassen, wurden Kollektive unterschiedlicher Düngereaktion als «relative Zuwachsgruppen» gebildet. Hierzu diente der Quotient aus der Summe der Triebblängenzuwächse (1996 bis 2001) nach der Düngemassnahme zur Grösse vor der Düngung. Dadurch werden unterschiedliche Ausgangsgrößen der Pflanzen als Einflussfaktor auf die Düngereaktion eliminiert. Ausgewählt wurden je Düngervariante 40 unverbissene Pflanzen mit ähnlichen Überschirmungsverhältnissen. Schliesslich bildeten die sechs «mattwüchsigsten» (geringer Triebblängenzuwachs bezogen auf die Ausgangsgrösse vor der Düngung) bzw. «wüchsigsten» (hoher Triebblängenzuwachs nach der Düngung bezogen auf die Ausgangsgrösse) Pflanzen ein zu beprobendes Kollektiv. Da am Fischbachkopf die Kontrollbäume sehr einheitlich waren, wurde hier auf die Kollektivbildung verzichtet. Für einen zusätzlichen Vergleich wurden je Fläche die Nadelproben von sechs ungedüngten Naturverjüngungsfichten gewonnen.

Im Einzelbaumansatz wurden Informationen über Boden, Ernährung, Biomassenentwicklung und Wurzeldichte (nur Rottauer Alm) gewonnen:

### Bodenkundliche Aufnahmen

Für die Interpretation kleinstandörtlicher Unterschiede wurde an jedem Probestaum der Boden in Anhalt an die Definitionen der ARBEITSGRUPPE BODEN (1994) beschrieben. Um den rezenten Düngereinfluss zu untersuchen, wurden an sechs Boden-

paaren gedüngte (Probe am Baum entnommen) vs. ungedüngte (Probe etwa 50 cm rechts vom Baum entnommen) Proben verglichen. Vorratsberechnungen und Vergleiche waren aufgrund der sehr heterogenen Lagerungsdichten und Skelettanteile nicht möglich. Zusätzlich wurden auf der Fläche Rottauer Alm die Elementgehalte der Horizonte aus den Wurzelbeprobungen untersucht. Für die Laboranalysen wurden die Proben bei 45 °C getrocknet, gesiebt und ein Aliquot gemahlen. Die Analysen erfolgten nach BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1990): pH-Wert in H<sub>2</sub>O und 1 m KCl mit Glaselektrode; Gesamtelementgehalte mittels Salpetersäure-Druckaufschluss und Messung am ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000; Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte durch vollständige oxidative Verbrennung am CHN-1000-Analyser LECO. Da bei gleicher Methode die sauren organischen Auflage- und basischen Mineralbodenhorizonte besser vergleichbar sind, wurden extrahierbare Kationen einheitlich mittels 1 m NH<sub>4</sub>Cl-Extrakt und Messung am ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000 bestimmt. Da hierdurch in basischen Böden die Kationenaustauschkapazität (KAK) durch Lösung von Karbonaten und damit Kalzium und Magnesium erhöht wird, wurde auf die Berechnung der KAK und der Basensättigung verzichtet. Das gedüngte Kalium, auf das es besonders ankam, wird durch diese Methode für saure und basische Horizonte gleichermaßen extrahiert.

### Oberirdische Biomasse und Ernährungskennwerte

Die zur Beprobung bestimmten Bäume wurden nach Ende der Vegetationszeit (Oktober 2002) am Wurzelanlauf abgesägt und komplett in das Labor verbracht. Dort wurden je Baum sämtliche jüngsten Jahrestriebe abgetrennt und bei 45 °C getrocknet. Ein Aliquot dieses ersten Nadeljahrganges diente zur Bestimmung der Elementgehalte an C, N, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Al, Cu, Zn, und P mittels Standardmethoden. Die 100-Nadelgewichte wurden nach Trocknung bei 105 °C ermittelt. Die gesamten restlichen Nadeln je Baum wurden bei 45 °C getrocknet und gewogen.

### Wurzeluntersuchungen (nur Rottauer Alm)

Nach LÜSCHER (1990) befindet sich bei Jungfichten im Gebirge die Hauptwurzelmasse oberhalb des Baumes und bei einer Baumgrösse bis etwa 1 m auch noch innerhalb der Kronen-

**Tabelle 3:** Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumgehalte sowie extrahierbares Kalium der gedüngten (D) und ungedüngten (ND) Standorte im Vergleich (höhere Gesamtgehalte der gedüngten Bereiche sind grau hinterlegt).

*Table 3: Nitrogen, phosphorous and potassium contents, as well as extractable potassium of fertilised (D) versus unfertilised (ND) sites (higher total contents of fertilised plots are grey shaded).*

Fläche Bodentyp/ Dünger	Hori- zont	N [%]		P [mg/g]		K [mg/g]		K extrahierbar			
		D	ND	D	ND	D	ND	D		ND	
								µmol IE/g	%	µmol IE/g	%
Rottauer Alm Rendzina Biosol	L/Of	2,12	1,94	1,20	1,11	2,43	2,88	3	3	3	2
	Oh	1,82	1,62	1,11	1,10	2,31	2,96	3	2	3	1
	Ah1	0,85	0,96	0,71	0,89	1,52	2,45	3	1	3	1
	Ah2	0,24	0,47	0,36	0,52	0,95	1,39	3	1	3	1
Rottauer Alm Tangelhumus Biosol	L/Of	2,22	2,12	1,19	0,94	2,27	1,72	3	2	3	2
	Oh1	1,98	2,02	1,18	0,93	2,41	2,10	3	1	4	1
	Oh2	1,54	1,62	1,08	0,88	2,42	2,08	4	1	3	1
	Ah	0,49	1,22	0,54	0,77	1,15	1,87	3	1	4	0
Rottauer Alm Rendzina NPK	L/Of	1,43	2,01	1,05	1,03	2,17	1,59	3	2	3	2
	Oh	1,62	1,78	1,06	0,98	2,10	1,78	3	1	3	1
	Ah1	1,18	1,31	0,96	0,90	1,89	1,77	3	1	3	1
	Ah2	0,66	0,81	0,72	0,70	1,46	1,62	3	1	3	1
Rottauer Alm Tangelhumus NPK	L/Of	2,06	2,12	0,96	0,92	1,53	1,59	3	4	3	2
	Oh1	2,32	2,02	1,10	0,86	1,79	1,43	3	4	4	1
	Oh2	1,92	1,62	1,08	0,85	2,39	1,78	4	2	4	1
	Ah	0,98	1,22	0,76	0,72	1,70	1,73	4	1	3	1
Fischbachkopf Rendzina Biosol mattwüchsig	L/Of	1,48	1,23	0,56	0,65	1,30	1,95	3	6	3	3
	Ah	1,14	1,45	0,95	1,15	3,20	4,48	3	1	4	1
	Ah	0,94	1,34	0,78	1,10	2,89	4,41	3	1	4	1
	Ah	0,85	1,12	0,95	1,00	3,72	4,32	3	1	3	1
Fischbachkopf Rendzina Biosol wüchsig	L/Of	1,51	1,47	0,54	0,47	1,71	1,37	3	6	4	6
	Ah	0,99	1,23	0,83	0,83	7,61	6,96	3	1	3	1
	Ah	0,94	1,17	0,79	0,81	7,72	6,71	3	1	3	1
	Ah	0,81	1,02	0,83	0,78	7,86	6,67	3	1	4	1

projektionsfläche. Aus diesem Grund und weil im Gebirge bei Einzelbaumdüngung der Dünger wegen Abwaschung Gefahr stets oberhalb der Pflanze ausgebracht wird, wurden die Wurzelproben ebenfalls oberhalb des Baumes gewonnen. Dazu wurden hangseits eines jeden Baumes auf einem Halbkreis mit halbem Kronenradius und dem Wurzelanlauf als Zentrum fünf Bohrungen gleichmässig verteilt. Die Wurzelproben wurden bis einschliesslich dem Ah-Horizont mit dem Probenentnahmerohr der Fa. Eijkelkamp® gewonnen. Anschliessend wurden je Einstich die Horizonte Of, Oh und Ah getrennt und horizontweise zu Baum-Mischproben vereinigt. Nach Wässern der Proben wurden die Fichtenfeinstwurzeln (Durchmesser kleiner 1 mm) aussortiert und deren Längen mit Hilfe der WinRhizo™ – Bildanalyse – Software (Version 4b, Fa. Regent Instruments Inc., Quebec, Canada) bestimmt. Hierzu wurden Digitalbilder mit Massstab (für die Kalibrierung der Software) aufgenommen, in Grautöne umgewandelt (Adobe Photoshop), kodiert (dies ermöglicht eine automatisierte Auswertung der Bilder) und im .tif-Format abgespeichert.

### Statistik

Die Bearbeitung der Daten und Darstellung der Graphiken erfolgte mit SPSS (Version 11.5). Für die Mehrfachvergleiche der nicht verbundenen Stichproben diente der Tukey-Mittelwertvergleichstest. Als Fehlerbalken wird im Wesentlichen der Standardfehler des Mittelwertes angegeben. Dieser Schätzwert des wahren Mittelwertes in der Grundgesamtheit ist ebenfalls besonders für kleine Stichproben geeignet (LOZAN & KAUSCH 1998).

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Böden

Tabelle 2 zeigt bodenchemische Kennwerte typischer Böden der Untersuchungsflächen im Vergleich zu einer Rendzina aus Hauptdolomit nach REHFUESS (1990). Die untersuchten kalkalpinen Böden zeichneten sich aus durch:

- eine schwach saure (vor allem organische Auflagen Rottauer Alm) bis schwach alkalische (Mineralböden) Bodenreaktion im Karbonatpufferbereich;
- einen hohen Anteil extrahierbaren Kalziums und (da Dolomit) Magnesiums;
- dagegen einen geringen Kaliumanteil an den Basenkationen, aber biogene Anreicherung dieses Elementes im Oberboden;
- hohe Humus- und, korrespondierend dazu, Stickstoffgehalte.

In dieser Studie wurde auf eine exakte Ermittlung der Kationenaustauschkapazitäten und der Basensättigungswerte zugunsten einer Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Horizonte bezüglich dem extrahierbaren Kalium verzichtet. Nach REHFUESS (1990) und GULDER & KÖLBEL (1993) besitzen diese Böden aber hohe Kationenaustauschkapazitäten und Basensättigungswerte um 100%.

Die einzelbaumbezogene Bodenansprache nach ARBEITSGRUPPE BODEN (1994) ergab für die Fläche Rottauer Alm vor allem Rendzinen und Braunerde-Rendzinen mit Moderhumus (selten kamen dagegen O/C-Böden und Braunerde – *Terraefuscae* vor), auf der Fläche Fischbachkopf Rendzinen mit F-Mull.

In der Auswertung wurde den gedüngten Elementen Stickstoff, Phosphor und Kalium besonderes Augenmerk ge-

	Of – wüchsiges Kollektiv			Of – mattwüchsiges Kollektiv		
	NPK	Biosol	Kontrolle	NPK	Biosol	Kontrolle
N [mg/g]	16,70 a	19,26 a	16,44 a	16,86 a	15,84 a	17,30 a
P [mg/g]	1,10 a	1,02 a	0,87 a	0,95 a	1,01 a	0,94 a
K [mg/g]	2,11 a	1,86 a	2,81 ab	1,69 a	2,26 a	3,54 b
	Oh – wüchsiges Kollektiv			Oh – mattwüchsiges Kollektiv		
	NPK	Biosol	Kontrolle	NPK	Biosol	Kontrolle
N [mg/g]	15,52 ab	18,87 b	14,52 a	16,31 ab	15,92 ab	15,07 a
P [mg/g]	1,14 a	1,05 a	0,90 a	1,02 a	1,18 a	1,08 a
K [mg/g]	2,47 a	2,18 a	4,36 b	1,96 a	2,65 a	4,37 b
	Ah – wüchsiges Kollektiv			Ah – mattwüchsiges Kollektiv		
	NPK	Biosol	Kontrolle	NPK	Biosol	Kontrolle
N [mg/g]	11,53 a	11,49 a	10,34 a	10,74 a	11,51 a	11,71 a
P [mg/g]	0,96 a	1,05 a	0,92 a	0,79 a	1,02 a	0,89 a
K [mg/g]	2,11 a	2,56 ab	4,74 ab	1,93 a	2,62 ab	5,63 b

**Tabelle 4: Gesamtnährelementgehalte (Mittelwerte) im Of-, Oh- und Ah-Horizont der Fläche Rottauer Alm und homogene Untergruppen gemäss dem Mittelwertvergleichstest nach Tukey.**

(Gleiche Buchstaben kennzeichnen homogene Untergruppen für die jeweilige Zeile.)

*Table 4: Total nutrient concentrations (mean values) in Of-, Oh-, and Ah-horizons of the study site Rottauer Alm and homogeneous subgroups according to the mean value-test of Tukey.*

schenkt. Zur Beurteilung des Verbleibs der Düngergabe im Boden bestanden zwei Möglichkeiten: Zum einen wurden die Nährelemente in einem Paarvergleich am Einzelbaum (Düngefläche am Baum vs. ungedüngter Bereich direkt neben dem Baum) verglichen. Zusätzlich konnten die mittleren Elementgehalte in den Horizonten Of, Oh und Ah aus der Wurzelprobenahme der Fläche Rottauer Alm herangezogen werden. *Tabelle 3* zeigt die Ergebnisse des Paarvergleiches gedüngt – ungedüngt. Ausser für Phosphor auf der Rottauer Alm war bezüglich der untersuchten Elementgesamtgehalte kein einheitlicher Trend zwischen den gedüngten und ungedüngten Bodenpaaren zu erkennen. Die Kaliumdüngung führte nicht zu höheren extrahierbaren Kaliumanteilen. Im Flächenvergleich waren die niedrigen Stickstoff- und höheren Kaliumgesamtgehalte auf der Fläche Fischbachkopf auffallend.

In *Tabelle 4* sind die Ergebnisse des Mittelwertvergleichstests der Gesamtelementgehalte (Druckaufschluss) der Horizonte Of, Oh und Ah aus der Wurzelbeprobung der Rottauer Alm dargestellt. Dieser ergab höhere Stickstoffgehalte vor allem im Oh des Biosol-wüchsig-Kollektives. Die Phosphorwerte waren tendenziell, aber nicht signifikant bei den wüchsigen Kollektiven der NPK- und Biosol-Varianten erhöht. Kalium hatte die höchsten Werte auf der nicht gedüngten Kontrollfläche. Da die einzelbaumbezogene Bodenansprache dort einen höheren Anteil bereits weiter entwickelter Braunerde-Rendzinen mit höherem, kaliumreichen Kalklösungsrückstandsanteil bzw. äolischen Einträgen ergab, kann dies den hohen Kaliumgehalt im Boden erklären. Insgesamt war die Düngung nicht deutlich im Boden nachzuweisen.

### 3.2 Ernährungskennwerte

Die Beurteilung der Ernährungssituation erfolgte anhand der Gehalte in [mg/g], deren Relationen zueinander und der absoluten Nährelementmengen je 100 Nadeln des ersten Nadeljahrganges.

Nachfolgende *Tabelle 5* gibt einen Überblick über die Nadelspiegelwerte und die dazugehörigen Grenzwerte zum

Mangelbereich (nach dem ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996). Für die Rottauer Alm ergab sich eine ausreichende Ernährung mit den Makronährelementen Kalium und eine sehr hohe Kalzium- sowie Magnesiumversorgung. Die Ernährungssituation mit Stickstoff war mangelhaft, die von Phosphor sehr mangelhaft. Die Versorgung mit den Mikronährstoffen Eisen, Mangan, Kupfer und Zink war dagegen ausreichend. Die Gehalte von Mangan zeigten eine sehr grosse Schwankungsbreite, waren jedoch zumeist im Mangelbereich. Insgesamt war auffällig, dass sich mattwüchsige und wüchsige Bäume nur wenig in ihren Gehalten unterscheiden; der Mittelwertvergleichstest trennte daher ausser für Kalzium keine Untergruppen. Auch ein Einfluss verschiedener Düngevarianten auf die aktuellen Nadelspiegelwerte war kaum mehr festzustellen.

Auf der Fläche Fischbachkopf waren dagegen stärkere Unterschiede zwischen den untersuchten Kollektiven erkennbar. Die Versorgung mit den Elementen Kalzium, Magnesium, Eisen, Mangan, Kupfer und Zink ist ausreichend. Die Versorgung mit Kalium war ebenfalls meist mangelhaft; auch die höheren Bodengehalte dieses Elements am Fischbachkopf äusserten sich nicht in höheren Nadelspiegelwerten. Vergleichbar niedrig wie auf der Rottauer Alm waren die Phosphorgehalte, die Stickstoffgehalte lagen sogar noch unter denen der Rottauer Alm. Trotz Biosoldüngung waren die mattwüchsigen Fichten vor allem bei den Elementen Stickstoff, Phosphor und Kalium signifikant schlechter ernährt.

Die Naturverjüngung (NVJ) hatte sehr hohe Kalzium- und Magnesiumgehalte sowie hohe bis sehr hohe Zinkgehalte. Die Stickstoffgehalte der Naturverjüngung waren auf der Fläche Rottauer Alm nahe am Grenzwert zur ausreichenden Versorgung, am Fischbachkopf deutlich im Mangelbereich. Auf beiden Flächen war die Versorgung mit Phosphor und Kalium unzureichend.

*Tabelle 6* zeigt die Nährelementquotienten und die Bereiche harmonischer Ernährung nach HÜTTL (1992). Auf der Fläche Rottauer Alm war das N/P-Verhältnis sehr unausgewogen und zu hoch. Da bereits die Stickstoffversorgung unzurei-

**Tabelle 5: Nährelementgehalte (Mittelwerte) nach Versuchsfläche, Kollektiv und Düngevariante sowie homogene Untergruppen gemäss Tukey (Grenzwertunterschreitungen mit Grauton hinterlegt; NVJ = Naturverjüngung).**  
(Gleiche Buchstaben kennzeichnen homogene Untergruppen für die jeweilige Zeile und Untersuchungsfläche.)

*Table 5: Total nutrient concentrations in needles (mean values) depending on study site, collective, and fertilisation form, as well as homogeneous subgroups according to Tukey (nutrient deficiencies are grey shaded; NVJ = natural regeneration).*

Element	Einheit	Grenzwert	Nährelementgehalte und homoge Untergruppen										
			Rottauer Alm							Fischbachkopf			
			wüchsig			mattwüchsig			NVJ	wüchsig		mattw. Biosol	NVJ
NPK	Biosol	Kontrolle	NPK	Biosol	Kontrolle	Biosol	Kontrolle						
N	[mg/g]	13	11,29 a	11,67 a	12,66 a	10,73 a	10,41 a	11,82 a	12,99 a	9,28 b	8,07 ab	6,89 a	9,50 b
P	[mg/g]	1,2	0,86 a	0,80 a	0,81 a	0,84 a	0,73 a	0,84 a	0,77 a	0,89 b	0,88 b	0,67 a	0,91 b
K	[mg/g]	3,5	3,78 a	4,47 a	4,44 a	4,08 a	4,73 a	4,15 a	2,76 a	3,26 ab	4,96 ab	2,05 a	3,23 b
Ca	[mg/g]	1	3,81 ab	3,12 a	4,14 ab	5,71 ab	3,59 a	3,92 ab	7,45 b	4,98 ab	4,96 ab	3,60 a	7,85 b
Mg	[mg/g]	0,75	1,53 a	1,51 a	1,60 a	1,65 a	1,44 a	1,63 a	2,15 a	1,53 a	1,84 a	2,01 a	2,12 a
Fe	[µg/g]	20	29,03 a	28,21 a	35,18 a	33,19 a	28,53 a	38,66 a	32,36 a	36,04 a	39,43 a	29,60 a	37,69 a
Mn	[µg/g]	50	34,71 a	44,59 a	70,46 a	12,84 a	24,73 a	13,53 a	10,48 a	55,10 ab	85,25 b	23,85 a	11,22 a
Cu	[µg/g]	2	2,64 a	2,76 a	3,07 a	2,77 a	3,47 a	2,85 a	3,24 a	2,32 a	2,83 a	1,97 a	2,68 a
Zn	[µg/g]	15	36,46 a	36,80 a	41,45 a	57,46 a	39,72 a	41,08 a	58,81 a	40,67 a	43,81 a	33,14 a	77,82 b

chend war, spiegelte dies einen starken Phosphormangel wider. Lediglich die NPK-Düngung erbrachte eine leichte Verbesserung dieses Verhältnisses. Der N/K- und N/Ca-Quotient war dagegen, bis auf die Naturverjüngung, ausgewogen. Durchgehend zu niedrig war das Verhältnis von N/Mg. Dies lag an geringen Stickstoff- in Verbindung mit sehr hohen Magnesiumgehalten. Das Verhältnis von K/Ca und K/Mg war in der Regel harmonisch. Für die Fläche Rottauer Alm zeigte sich folglich ein Stickstoff- und noch stärkerer Phosphormangel bei Magnesiumüberschuss. Auf der Fläche Fischbachkopf war dagegen das N/P- und N/K-Verhältnis im Rahmen harmonischer Ernährung. Dies war aber Folge der im Vergleich zu P und K noch geringeren Stickstoffgehalte. N/Ca und N/Mg zeigten dagegen einen starken Überschuss an Ca und Mg an. Auch das Verhältnis von K zu Ca und zu Mg war auf die geringen Kaliumgehalte bei Ca- und Mg-Überangebot zurückzuführen. Aus der Beurteilung der Nährelementver-

hältnisse ergab sich für die Fläche Fischbachkopf Stickstoff-, Phosphor- und Kaliummangel bei Kalzium- und Magnesiumüberschuss.

In *Tabelle 7* sind die absoluten Nährelementmengen in 100 Nadeln des jüngsten Jahrganges dargestellt. Für diese sind die 100-Nadelgewichte bedeutsam. Diese waren für Naturverjüngung jeweils am höchsten. Auf der Rottauer Alm waren die Nadelgewichte des wüchsigen NPK-Kollektiv vergleichbar hoch wie die Naturverjüngungsnadeln. Die mattwüchsigen Bäume zeigten dort geringere Nadelgewichte als die wüchsigen Bäume. Die Nadeln vom Fischbachkopf waren (mit Ausnahme der Naturverjüngung) durchgehend leichter als die der Rottauer Alm. Die Nährelementmengen der gedüngten Bäume auf der Rottauer Alm zeigten dementsprechend deutliche Differenzen zwischen den wüchsigen und den mattwüchsigen Kollektiven. Ein Düngeeffekt zeigte sich bei den wüchsigen Pflanzen vor allem für die Elemente Stickstoff und

**Tabelle 6: Nährelementverhältnisse nach Versuchsfläche, Kollektiv und Düngevariante und die zugehörigen Bereiche harmonischer Ernährung nach HÜTTL (1992) (unausgewogene Bereiche mit Grauton hinterlegt; NVJ = Naturverjüngung).**

*Table 6: Element relations depending on study site, collective, and fertilisation form, and the ranges of harmonic nutrition according to HÜTTL (1992) (unbalanced ranges are grey shaded; NVJ = natural regeneration).*

Elementverh.	Bereich harmonischer Ernährung (HÜTTL 1992)	Nährelementverhältnisse										
		Rottauer Alm							Fischbachkopf			
		wüchsig			mattwüchsig			NVJ	wüchsig		mattw. Biosol (-)	NVJ
NPK	Biosol	Kontrolle	NPK	Biosol	Kontrolle	Biosol (+)	Kontrolle					
N/P	6-12	13,13	14,59	15,63	12,77	14,26	14,07	16,87	10,43	9,17	10,28	10,44
N/K	1-3	2,99	2,61	2,85	2,63	2,20	2,85	4,71	2,85	1,63	3,36	2,94
N/Ca	2-20	2,96	3,74	3,06	1,88	2,90	3,02	1,74	1,86	1,63	1,91	1,21
N/Mg	8-30	7,38	7,73	7,91	6,50	7,23	7,25	6,04	6,07	4,39	3,43	4,48
K/Ca	0,8-2,4	0,99	1,43	1,07	0,71	1,32	1,06	0,37	0,65	1,00	0,57	0,41
K/Mg	2,2-6,4	2,47	2,96	2,78	2,47	3,28	2,55	1,28	2,13	2,70	1,02	1,52

**Tabelle 7: Nährelementmengen (Mittelwerte) in 100 Nadeln nach Fläche, Düngereaktion und Düngevariante und homogene Untergruppen gemäss Tukey (NVJ = Naturverjüngung).**

(Gleiche Buchstaben kennzeichnen homogene Untergruppen für die jeweilige Zeile und Untersuchungsfläche.)

Table 7: Total nutrient contents in 100 needles (mean values) depending on study site, growth response after fertilisation, and fertilisation form, as well as homogeneous subgroups according to Tukey (NVJ = natural regeneration).

Element	Einheit	Nährelemente / 100 Nadeln und homogene Untergruppen										
		Rottauer Alm							Fischbachkopf			
		NPK	wüchsig Biosol	Kontrolle	NPK	mattwüchsig Biosol	Kontrolle	NVJ	wüchsig Biosol	Kontrolle	mattw. Biosol	NVJ
N	[mg/100 Nd.]	1,31 <i>b</i>	1,20 <i>ab</i>	1,16 <i>ab</i>	0,78 <i>a</i>	0,73 <i>a</i>	0,75 <i>a</i>	1,92 <i>c</i>	0,68 <i>a</i>	0,50 <i>a</i>	0,38 <i>a</i>	1,42 <i>b</i>
P	[mg/100 Nd.]	0,10 <i>ac</i>	0,08 <i>abc</i>	0,07 <i>ab</i>	0,06 <i>a</i>	0,05 <i>a</i>	0,05 <i>a</i>	0,11 <i>c</i>	0,07 <i>a</i>	0,05 <i>a</i>	0,04 <i>a</i>	0,14 <i>b</i>
K	[mg/100 Nd.]	0,45 <i>a</i>	0,45 <i>a</i>	0,41 <i>a</i>	0,31 <i>a</i>	0,33 <i>a</i>	0,27 <i>a</i>	0,40 <i>a</i>	0,24 <i>a</i>	0,29 <i>ab</i>	0,12 <i>a</i>	0,49 <i>b</i>
Ca	[mg/100 Nd.]	0,47 <i>a</i>	0,32 <i>a</i>	0,39 <i>a</i>	0,42 <i>a</i>	0,26 <i>a</i>	0,26 <i>a</i>	1,12 <i>c</i>	0,37 <i>a</i>	0,28 <i>a</i>	0,20 <i>a</i>	1,12 <i>b</i>
Mg	[mg/100 Nd.]	0,18 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>	0,32 <i>c</i>	0,11 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>	0,31 <i>b</i>
Fe	[µg/100 Nd.]	3,59 <i>ab</i>	2,85 <i>ab</i>	3,32 <i>ab</i>	2,61 <i>ab</i>	2,05 <i>a</i>	2,39 <i>ab</i>	4,74 <i>c</i>	2,66 <i>a</i>	2,33 <i>a</i>	1,61 <i>a</i>	5,31 <i>b</i>
Mn	[µg/100 Nd.]	4,02 <i>a</i>	4,64 <i>a</i>	6,75 <i>a</i>	1,17 <i>a</i>	1,88 <i>a</i>	0,83 <i>a</i>	1,56 <i>a</i>	4,11 <i>a</i>	5,79 <i>a</i>	1,36 <i>a</i>	1,69 <i>a</i>
Cu	[µg/100 Nd.]	0,31 <i>a</i>	0,27 <i>a</i>	0,28 <i>a</i>	0,21 <i>a</i>	0,23 <i>a</i>	0,18 <i>a</i>	0,48 <i>a</i>	0,18 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>	0,35 <i>a</i>
Zn	[µg/100 Nd.]	4,53 <i>ab</i>	3,78 <i>a</i>	3,92 <i>a</i>	4,34 <i>ab</i>	2,87 <i>a</i>	2,66 <i>a</i>	8,75 <i>b</i>	2,98 <i>a</i>	2,46 <i>a</i>	1,86 <i>a</i>	11,10 <i>b</i>

Phosphor über die Varianten NPK grösser Biosol grösser Kontrolle. Auch Kalium war tendenziell bei den wüchsigen gedüngten gegenüber der Kontrolle erhöht. Am Fischbachkopf lagen die Nährelementmengen maximal auf dem Niveau des mattwüchsigen Kollektives der Rottauer Alm. Die mattwüchsigen Biosol-Bäume waren wiederum am schlechtesten versorgt und die Düngung insgesamt nur noch im wüchsigen Biosol-Kollektiv auszumachen.

Herausragend war in Folge der hohen 100-Nadelgewichte die Naturverjüngung bei den absoluten Elementmengen je 100 Nadeln. Die Naturverjüngung hatte für Stickstoff, Phosphor, Kalzium, Magnesium, Eisen, Kupfer und Zink die jeweils höchsten Werte. Diese Unterschiede waren meist signifikant und trennten Untergruppen auf.

### 3.3 Biomassenentwicklung

Abbildung 1 gibt die Triebblängensummen seit der Düngung und die Gesamtnadelmassen der wüchsigen Bäume wieder. Da die Einteilung zu Versuchsbeginn aufgrund der Wüchsigkeit erfolgte, wurde auf die Darstellung der mattwüchsigen Kollektive verzichtet. Auf der Fläche Rottauer Alm lag die Triebblängenentwicklung der NPK-Variante signifikant höher als die von Biosol- und Kontroll-Bäumen. Biosol führte zu tendenziell, aber nicht signifikant höheren Zuwächsen gegenüber der Kontrolle. Auf der Fläche Fischbachkopf lag zwar das Biosol-wüchsig-Kollektiv signifikant über der Kontrolle, aber selbst die höchsten Zuwächse seit der Düngung erreichten dort etwa nur die Hälfte der Zuwächse von den Kontrollbäumen der Rottauer Alm.

Wie bei den Zuwächsen führte die NPK-Düngung auf der Fläche Rottauer Alm auch zur höchsten Nadelmenge. Mit fast doppelt so hohen Werten unterschied diese sich signifikant von der Kontrolle. Die Gesamtnadelmassen der Fläche Fischbachkopf erreichten selbst im Biosol-Kollektiv nur etwa ein

Viertel derer von der Rottauer Alm. Nadelmassen von nur rund 5 g bei 17-jährigen Kontrollbäumen am Fischbachkopf verdeutlichten die geringe Vitalität der Fichten dieser Fläche.

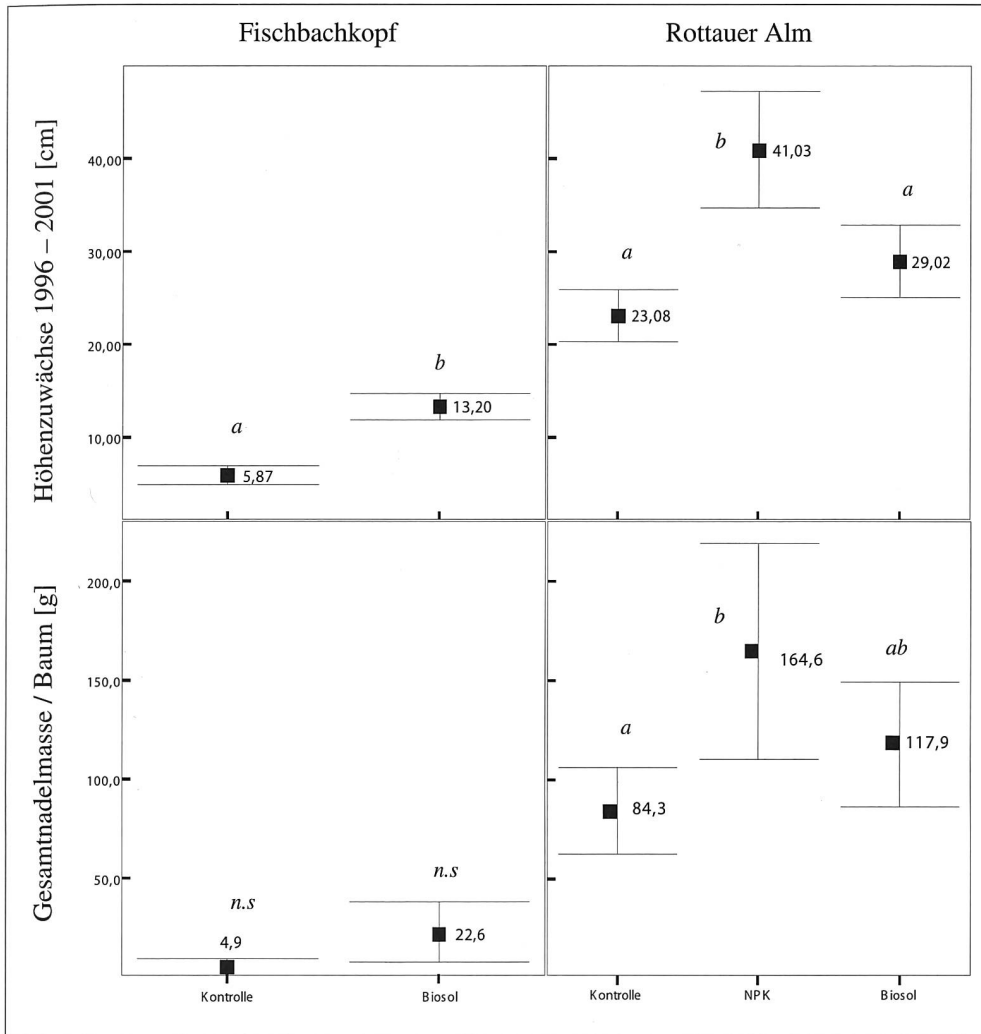
### 3.4 Wurzeldichte

Ein sehr guter Weiser der unterirdischen Raumnutzung ist die Feinstwurzeldichte berechnet als Wurzellänge pro Bodenvolumen. Mattwüchsige und wüchsige Bäume zusammengefasst, zeigten die ungedüngten Kontrollbäume die höchste Feinstwurzeldichte (Abbildung 2). Die Werte für die gedüngten Flächen lagen im Mittel deutlich darunter. Der Unterschied zwischen Biosol und Kontrolle ist signifikant. Die höchste Feinstwurzeldichte pro Bodenvolumen fand sich im Oh-Horizont. Ah und Of zeigten etwa gleich hohe Durchwurzelung.

## 4. Diskussion

### 4.1 Ökologische Bewertung der untersuchten Böden und Düngeeinfluss

Trotz sehr ähnlicher bodenchemischer Eigenschaften waren die beiden Versuchsflächen hinsichtlich der Auflagehumusform deutlich verschieden. Während auf der Rottauer Alm flächig mächtiger Moder aus Wald- und Rasenstreu vorkam, war es am Fischbachkopf F-Mull aus Rasendetritus. Diese Humusform kann wegen der lichten Rasen-Mosaik-Struktur an der Grenze zum subalpinen Fichtenwald natürlich sein, wurde jedoch vermutlich durch die lange, meist seit Jahrhunderten bestehende Almnutzung hervorgerufen. Beweidung führt nach BOCHTER *et al.* (1981) zum Humusverlust und zur Änderung der Humusqualität. Für die als «Humusschwund» bezeichnete Folge der Beweidung spielen nicht nur der echte Nährelemententzug und biologische Abbauprozesse eine Rolle, sondern auch der Massenverlust in Folge Narbenversatz und



**Abbildung 1:** Höhenzuwächse [cm] (Summe 1996 bis 2001) und durchschnittliche Gesamtnadelmasse je Baum [g] der wüchsigen Kollektive nach Flächen- und Düngewarianten.

Fehlerbalken zeigen Standardfehler des Mittelwertes; gleiche Buchstaben bilden homogene Untergruppen; n.s. Unterschiede sind nicht signifikant.

Figure 1: Shoot growth [cm] (total of 1996-2001) and average total needle mass per tree [g] of the collectives with a high increment depending on study site and fertilisation form.

Error bars are indicating the standard error of the mean; same letters mark homogeneous subgroups; n.s. not significant.

Sneeschurf (LAATSCH & GROTTENTHALER 1973). Die oft flachgründigen Dolomitböden werden so in ihrer Pedogenese in ein früheres Stadium zurückversetzt.

Bei Temperaturabnahme sinken die Abbauraten durch Mikroorganismen stärker ab als die Biomasseproduktion der Pflanzen. Daher müsste bei ähnlichem Niederschlag der Stickstoffgehalt im Boden dieser höher gelegenen Fläche grösser sein (KOLB 1995; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). EWALD (2000) stellte fest, dass in Folge Beweidung die Zahl der für Magerrasen typischen Pflanzenarten, mit hoher Reaktions- und niedriger Stickstoffzahl (nach Ellenberg), zunimmt. Die Stickstoffnachlieferung mit der Streu nimmt in Folge ab. Die niedrigen Stickstoffgehalte im Boden der Fläche Fischbachkopf könnten – keine grundsätzlichen Standortsunterschiede im Stickstoffgehalt beider Versuchsflächen vorausgesetzt – auch eine Folge der Beweidung sein. Standortsdegradierung und Nährstoffentzüge aufgrund von Beweidung stellte auch HAUPOLTER (1997b) auf vergleichbaren Standorten fest.

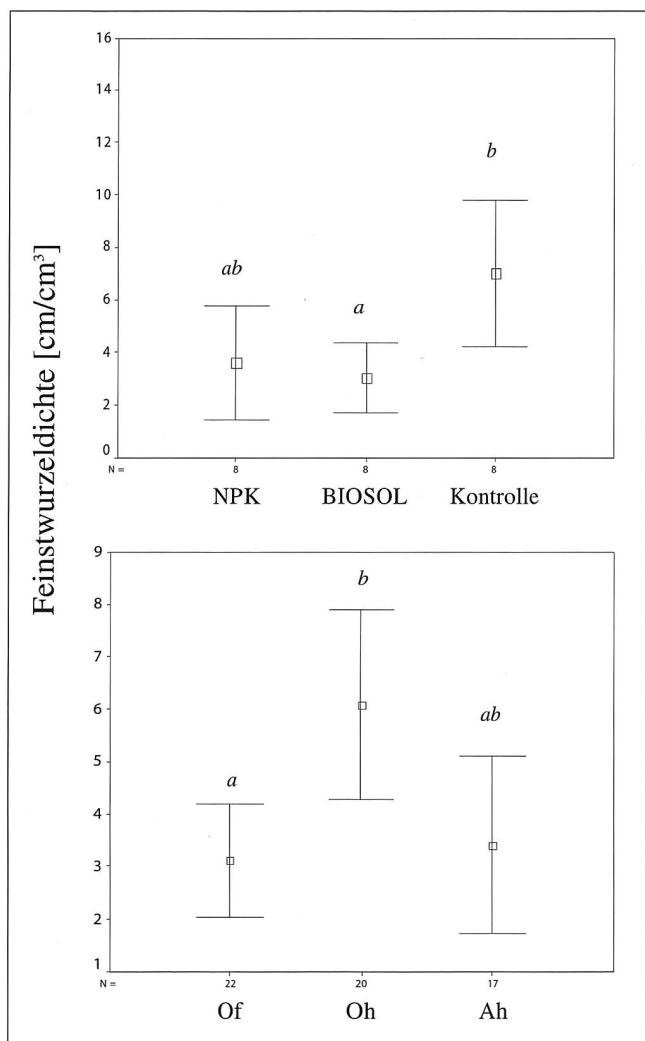
Die gedüngten Elemente Stickstoff, Phosphor und Kalium waren kaum mehr im Boden nachweisbar. Vermutlich ging der Grossteil der ausgebrachten Nährstoffe bei den hohen Niederschlägen von rund 2000 mm/a und hohem Oberflächenabfluss in dichter Bodenvegetation (Graswurzelfilz) in kurzer Zeit verloren. Im NPK-Dünger liegt Stickstoff als Ammonium und Kaliumnitrat vor – beide Stickstoffformen und Kalium als Begleitkation sind sehr mobil und unterliegen stärkster Auswaschung. Daher dürfte auch Kalium nicht mehr an den Austauschern zu finden sein, wobei hier sicher auch das Überangebot an Kalzium und Magnesium eine Rolle spielt. Beide Ionen sind gerade an Huminstoffen besonders stark gebunden, Kalium dagegen nur schwach (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Die Stickstoffgehalte der Biosolvariante waren noch etwas höher (Tabelle 4). Dies könnte auf die geringere Löslichkeit dieses organischen Düngers zurückzuführen sein. Da Phosphor schwer lösliche Ca-Phosphate (Apatit) bildet, ist dieser Nährstoff bei hoher Kalziumaktivität im Boden wenig mobil (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Daher überraschten die nur noch geringfügig erhöhten Gesamtphosphorgehalte im Boden nach der Düngung. WEBER (1997) fand in subalpinen Rasengesellschaften rund 5 kg/ha Phosphor gespeichert in der gesamten (ober- und unterirdischen) Rasenbiomasse. Eine Bindung in der Vegetation scheidet daher aus. Vermutlich war auch Phosphor zum Grossteil durch Oberflächenabfluss aus dem System verloren gegangen.

Trotz der hohen Auswaschungsgefahr übersteigen die ausgebrachten Düngemengen von rund 2000 kg/ha Stickstoff und Phosphor, sowie 2500 kg/ha Kalium (kalkuliert aus der Kopfdüngung mit 120 g NPK) den Bedarf der Pflanzen um ein Vielfaches. FINCK (1979) gibt für einen Pflanzgarten mit acht Millionen (!) Nadelholzpflanzen einen Nährstoffbedarf von 60 kg Stickstoff, 7,5 kg Phosphor und 25 kg Kalium pro Jahr an. Die Pflanzen können daher dieses Überangebot, besonders bei der kurzen Vegetationszeit, unmöglich ausschöpfen. Grosse Nährelementverluste und die fehlende Aufnahmemöglichkeit durch die Bäume sprechen für kleinere Düngegaben und häufigere Wiederholung der Massnahme.

#### 4.2 Ernährung

Charakteristikum der Mineralböden beider Untersuchungsstandorte war das sehr unausgeglichene Mineralstoffangebot (Überangebot der Nährelemente Kalzium und Magnesium)



**Abbildung 2:** Dünge- und Horizonteinfluss auf die Feinstwurzel-dichte [cm/cm<sup>3</sup>] aller untersuchten Bäume der Fläche Rottauer Alm. Fehlerbalken zeigen das 90%-Konfidenzintervall des Mittelwertes; gleiche Buchstaben bilden homogene Untergruppen.

Figure 2: Fertilisation and soil horizon effects on fine root density [cm/cm<sup>3</sup>] of the study site Rottauer Alm.

Errors bars are indicating the 90% confidence intervall; same letters mark homogeneous subgroups.

bei hohem Boden-pH. Dies begünstigt Ionenantagonismus (vgl. REHFUESS 1990) und schränkt die Verfügbarkeit von Phosphor, Kalium, Eisen und Mangan ein (ZECH 1968).

Das hohe Bodenangebot an Kalzium und Magnesium äusserte sich erwartungsgemäss in einer sehr hohen Versorgung der Pflanzen mit Kalzium und Magnesium. Nicht erwartet wurde dagegen, dass der von ZECH (1968) für karbonatbeeinflusste Böden beschriebene Kaliummangel (auch auf der ungedüngten Kontrolle) selten auftrat. Da ZECH (1970) ausserdem fand, dass Fichten aufgrund von Eisen- und Manganmangel erhöhte Kaliumgehalte aufweisen können, könnten die hohen Kaliumgehalte auch durch den Manganmangel bedingt gewesen sein. Eventuell wird Kalium zum Teil auch aus äolisch eingetragenen Glimmern nachgeliefert. Kupfer, das sich in der Studie von EWALD *et al.* (2000) als Mangel-element erwies, war unproblematisch. Auffällig hoch ist die Versorgung der Naturverjüngung mit dem Spurenelement Zn. Dieses ist nach MARSCHNER (1995) neben dem Phosphor in karbonathaltigen Böden besonders schwer verfügbar. Da die Naturverjüngung jedoch auf saurem Tangelhumus losgelöst vom Mineralboden wuchs, könnte dies die höheren Zn-Gehalte erklären.

Besonders hervorzuheben war – trotz Düngung – der Mangel an Stickstoff und der ausgesprochene Phosphormangel beider Versuchsflächen. Dies deckte sich mit Ergebnissen anderer Studien im Kalkalpin (z.B. MÖSSNANG 1992; GULDER & KÖLBEL 1993; HAUPOLTER 1997a, 1999; EWALD *et al.* 2000). Auf vergleichbaren Hauptdolomitstandorten fanden LIU *et al.* (1994) bei niedrigen Bodenstickstoffgehalten auch geringe Nadel-N-Konzentrationen. Daher könnten die geringeren Stickstoffgehalte der Nadeln der Fläche Fischbachkopf zum Teil auch bodenbedingt sein. Insgesamt ist dieses weit verbreitete Phänomen des Stickstoff- und Phosphormangels auf Dolomitstandorten bis heute nicht geklärt. Neben der bekannten Festlegung von Phosphor im Boden als Apatit, führte GLATZEL (1968) dies vor allem auf das Überangebot an Magnesium und dessen Wechselwirkung mit Phosphor zurück, indem in der Pflanze Phosphat durch Magnesium inaktiviert wird. P-Mangel würde dann als Folge auch den N-Stoffwechsel verändern. Erkenntnisse über die Folgen eines Mg-Überangebotes im Boden liegen bisher nur spärlich vor allem für krautige Pflanzen auf Serpentin vor (KINZEL 1982). Nach MARSCHNER (1995) kann aber Magnesiumüberschuss gerade bei Trockenstress zu Stoffwechselstörungen in der Pflanze führen. Im Gegensatz zu Kalzium, welches bei Fichten auf Rendzinen zu rund 90% als Ca-Oxalat in den Nadeln vorlag, war Mg zu mehr als 90% wasserlöslich (MARSCHNER 1995). Dies kann an der hundertfach höheren Löslichkeit von Mg-Oxalat im Vergleich zu Ca-Oxalat liegen (WEAST 1983), so dass für Magnesiumüberschuss eventuell kein so guter Schutzmechanismus in der Pflanze besteht wie für Kalzium. Auch die Nähr-elementverhältnisse dieser Studie ergaben auf beiden Versuchsflächen Stickstoff- und noch deutlicher Phosphormangel bei Magnesium und zum Teil auch Kalziumüberschuss. Auch HAUPOLTER (1997a) fand eine enge Korrelation hoher Mg- und Ca-Nadelspiegelwerte mit geringen Phosphorgehalten und eine zunehmende Kronenverlichtung der untersuchten Fichten mit steigenden Mg-Nadelspiegelwerten. Das «Dolomitphänomen» könnte damit auf eine geringe, bodenbedingte Phosphorverfügbarkeit und zusätzlich auf physiologische Störungen, hervorgerufen durch Magnesiumüberschuss, zurückzuführen sein. Da meist südexponierte, flachgründige Standorte betroffen sind, kann zusätzlich edaphische Trockenheit eine Rolle spielen (HÖLZEL 1996). Wenn nicht auch die Stickstoffnachlieferung durch Trockenphasen eingeschränkt wird, könnten physiologische Störungen durchaus auch die niedrigen Stickstoffgehalte in den Nadeln erklären. Die in der Regel hohen Bodenstickstoffgehalte kalkalpiner Standorte (GULDER & KÖLBEL 1993) würden eher eine bessere Versorgung mit Stickstoff erwarten lassen.

Deutlich verschieden waren die wüchsigen gedüngten Kollektive von den mattwüchsigen Bäumchen in den absoluten Nährelementmengen in 100 Nadeln – herausragend war die Naturverjüngung mit Nährstoffen ausgestattet. Der, trotz Stickstoff- und Phosphormangel, Überschuss an Stickstoff aus dem N/P-Verhältnis und die höheren Nadelgewichte bei den gedüngten wüchsigen Bäumen der Rottauer Alm deuteten auf einen Verdünnungseffekt für Phosphor hin (LYR *et al.* 1992). Bei gesteigertem Wachstum nach Düngung war folglich Phosphor – obwohl ebenfalls gedüngt und die absoluten P-Mengen in den Nadeln, vor allem bei NPK-Düngung am höchsten waren – nicht in ausreichendem Mass verfügbar. Andererseits deuten die günstigeren Verhältnisse von N zu P bei den mattwüchsigen Bäumen der Rottauer Alm und das sogar ausgewogene Verhältnis dieser Nährelemente der Bäume am Fischbachkopf auf einen Konzentrationseffekt für Stickstoff hin.

Diese Reaktionen in der Ernährung sind bezüglich der «Nährstoffökologie» von Fichten bedeutsam. Wie bereits DY-

RENKOV & GLATZEL (1976) belegten, führt langsames Wachstum der Fichten zu einem Konzentrationseffekt und damit zu höheren Gehalten. Langsames Wachstum als Reaktion auf ein geringes Nährstoffangebot des Bodens ist nach MARSCHNER (1995) eine verbreitete Strategie von Pflanzen, den «slow growers». Die langsam wachsenden, mattwüchsigen Bäume der Rottauer Alm und die insgesamt wenig vitalen Bäume der Fläche Fischbachkopf halten damit ähnliche Relationen der Elemente aufrecht wie die wüchsigen Bäume und sichern so zumindest vorübergehend ihr Überleben. Ausserdem ist die an nährstofflimitierte Umweltbedingungen adaptierte Fichte nach GROSSNICKLE (2000) nicht in der Lage, ein plötzliches, sehr grosses Nährstoffangebot – wie hier im Fall einer Düngung – in vollem Umfang zu nutzen. Auf vergleichbaren Standorten stellte auch HAUPOLTER (1997b) fest, dass die gedüngten Fichten die hohen Nährstoffgaben nicht auszuschöpfen vermochten. Daher konnten vermutlich selbst die wüchsigen Fichtenkollektive die Nährelementgehalte in den Nadeln nicht langfristig steigern. Nach ZOLLNER (2000) waren diese auf den beiden Flächen bereits zwei Vegetationsperioden nach der Düngemassnahme wieder im Mangelbereich. Bei Düngerversuchen an Douglasie, einer Baumart mit vergleichbarem ökologischen Verhalten, stellte auch REHFUESS (1997) fest, dass Düngemassnahmen nur zu einem vorübergehenden Mehrzuwachs und Erhöhung der Nadelspiegelwerte führten.

Aufgrund ihrer hohen Nadelgewichte besaßen die Naturverjüngungsfichten auf Humusaufgaben («Stockachselverjüngung») auffallend hohe absolute Elementmengen. Mehrere Autoren (VON LEININGEN 1908, 1909; LEYS *et al.* 1970; LEIBUNDGUT 1986) weisen auf die Bedeutung der Humusaufgabe als wichtige Nährstoffquelle im Gebirge hin. Aufgrund der dargestellten ungünstigen bodenchemischen Eigenschaften von Dolomitböden kann die Menge pflanzenverfügbarer Nährstoffe sehr von der Qualität und Vorratshöhe des Humus abhängen (GLATZEL 1968). Daneben speichern diese mächtigen Humusaufgaben und -böden viel Wasser (BOCHTER 1984), so dass auch eine gute Wasserversorgung der Pflanzen für die hohen absoluten Nährelementmengen in Naturverjüngungsnadeln verantwortlich sein könnte. Positiv auf den Nährelementumsatz in Humusaufgaben dürften sich auch die auf den Abbau von organischer Substanz spezialisierten Mykorrhizen auswirken (READ & PEREZ-MORENO 2003).

### 4.3 Biomassenentwicklung

Auf der untersuchten Fläche Rottauer Alm hatte sich vor allem die NPK-Düngung positiv auf das Triebblängenwachstum und die Nährelementmengen in den Nadeln ausgewirkt. Dies bestätigen auch bereits frühe Versuche von KRAPPENBAUER (1969) und GLATZEL (1971) die ebenfalls bei NPK-Düngung die grösste Steigerung des Triebblängenwachstums feststellten. Beide Autoren weisen auf die Bedeutung eines angemessenen Verhältnisses von N, P und K hin. Da Phosphor das limitierendste Element auf diesen Standorten zu sein scheint, könnte die geringere Reaktion der Biosolvariante auf einen zu niedrigen Phosphorgehalt in diesem Dünger beruhen.

Die untersuchten wüchsigen Pflanzen hatten in Folge der Düngung ein gesteigertes Sprosslängenwachstum, das aber nach fünf Jahren wieder nachliess. Nach REHFUESS (1997) ist dies darauf zurückzuführen, dass das Speicherparenchym dieser kleinen Bäume noch zu wenig ausgebildet ist und daher der Dünger nicht in ausreichendem Mass in das interne Nährelementdepot angelegt werden kann. Einmalige Düngemassnahmen würden dann zwar zum Teil Nährstoffreserven in der Pflanze erhöhen (daher die höheren Nadelmassen), wiederholte Düngung ist jedoch zur Steigerung des Höhenwachstums nötig. Düngemassnahmen sind folglich so lange ange-

zeigt, bis ausreichend Speicherorgane als langfristiges Nährstoffdepot zur Verfügung stehen. In dieselbe Richtung weisen auch die Ausführungen von DYRENKOV & GLATZEL (1976). Demnach ist die Fichte eine Baumart mit einer sehr kurzen, intensiven Phase des Streckenwachstums währenddessen sie einen erhöhten Nährelementbedarf hat. Wichtig für das Sprosslängenwachstum junger Fichten ist daher (neben exogenen Faktoren wie vor allem Strahlung bzw. Wärme) die in der Nadelmasse gespeicherte Nährelementmenge. Gerade diese inneren Reservestoffe wurden vor allem durch die NPK-Düngung erhöht (grosse Nadelmasse). Mit zunehmender Grösse des Baumes und damit des Wurzelsystems werden ausserdem neue Nährstoffreserven im Boden (diese liegen auf flachgründigen Standorten im Gebirge häufig als Spaltenfüllungen vor!) erschlossen. Dies führt dazu, dass der Baum ab einer bestimmten Grösse nicht mehr im Triebblängenwachstum zurückfällt.

Die extrem geringe Nadelmasse und die dadurch fehlende Möglichkeit, Nährstoffe zu verlagern, wird die Kontrollbäume und auch die mattwüchsigen Biosol-Bäume am Fischbachkopf langfristig mit grosser Wahrscheinlichkeit zum Absterben bringen. Dies gilt umso mehr, wenn man berücksichtigt, dass Bäume grösserer Höhenlage naturgemäss mehr Nadeljahrgänge aufweisen müssten (SCHÜTT *et al.* 1992).

Die geringe Reaktion auf Biosoldüngung und der insgesamt schlechte Pflanzenzustand am Fischbachkopf gegenüber der Rottauer Alm könnten eine Folge unzureichender Wurzelentwicklung und damit Nährelementaufnahme sein (GROSSNICKLE 2000). Zum einen konnten die Fichtenwurzeln die organische Auflage nur wenig durchdringen, da nur F-Mull vorhanden war. Daher wurden die Wurzeln in das für die Fichte bodenchemisch ungünstige Milieu des Mineralbodens gezwungen. Ausserdem sind die Containerpflanzen in saurem Substrat angezogen worden. Daher ist der basische Mineralboden vermutlich auch eine physiologische Barriere, die eine Regeneration des Wurzelwerkes nach dem Verpflanzen behindert. Gerade unter diesen standörtlich schwierigen Verhältnissen müssten die jungen Bäume bevorzugt in eine ausreichende Bodenerschliessung investieren, um später in ungehindertes Höhenwachstum übergehen zu können (LÜSCHER 1990; OTT *et al.* 1997). Neben der ungünstigeren Humusform (als Folge der Beweidung) könnten nach RÖHRIG (1966) und KÖSTLER *et al.* (1968) auch die tiefere Bodentemperatur und die kürzere Vegetationszeit an der Obergrenze des Hochmontan im Vergleich zum Montanbereich die Entwicklung der Wurzeln behindert haben. GÖBL (1995) stellte ausserdem auf beweideten Flächen Feinstwurzelschäden und abgestorbene Mykorrhizen fest. Vermutlich besteht in den Rasenflächen auch keine zusammenhängende Mykorrhizazönose wie im relativ intakten Wald der Rottauer Alm. Eventuell fehlte auch den mattwüchsigen Bäumen der Rottauer Alm zum Zeitpunkt der Düngung ein gut entwickeltes Wurzelsystem als Voraussetzung für die Nährstoffaufnahme. Lüscher (1990) stellte fest, dass Naturverjüngungsfichten die Hauptwurzelmasse hangseitig ausbilden. Es könnte jedoch durchaus sein, dass nicht alle gepflanzten Containerfichten hierzu in der Lage waren und gerade die mattwüchsigen ihre Wurzeln talseits bildeten und daher der oberhalb der Bäumchen ausgebrachte Dünger nicht wirken konnte.

### 4.4 Wurzeldichte

POLOMSKI & KUHN (1998) sowie BABEL (1981) beschreiben, dass geringe Nährstoffvorräte zu erhöhter Wurzelproduktion führen. Diese war besonders hoch bei den ungedüngten Kontrollpflanzen, obwohl die Düngewirkung auch bei den gedüngten Bäumen nur mehr schwer im Boden nachweisbar

war. Vermutlich war der «innere» (in dem Fall niedrigere) Nährstoffvorrat ein Schlüssel für erhöhte Feinstwurzelproduktion der Kontrollpflanzen. Die Vorliebe der Fichte, den Schwerpunkt der Feinstwurzeln in der organischen Auflage zu bilden, spiegelte sich in der hohen Feinstwurzel-dichte im Oh-Horizont wider. Auch KUTSCHERA & LICHTENEGGER (2002) beschreiben den höchsten Feinstwurzelbesatz der Fichte im Übergangsbereich von der Auflage zum Mineralboden. Da hier saure Verhältnisse herrschen, dürfte dies der Fichte in ihrem Nährstoffaneignungsvermögen, insbesondere für Kalium, entgegenkommen. Auch SANDHAGE-HOFMANN (1993) fand die höchste Feinstwurzel-dichte bei gleichzeitig engem Ca/K-Verhältnis der Bodenlösung in der organischen Auflage. Dies unterstreicht die Bedeutung der organischen Auflage bei Böden mit Kalzium/Magnesium-Überschuss und könnte andererseits das schlechte Gelingen der Aufforstung auf der durch Beweidung und Humusverlust degradierten Fläche Fischbachkopf erklären.

## 5. Synthese – Düngewirkung, Anpassung der Fichte und Folgerungen für die Schutzwaldsanierungspraxis

### 5.1 Wirkung der Düngung auf Boden, Ernährung und Biomassenentwicklung

Die vergleichsweise hohen Düngegaben gingen bis auf Phosphor, das vermutlich als Apatit im Boden festgelegt wurde, zum Grossteil verloren. Dieser stellte sich auch als problematischstes Nährelement heraus. Wie ein Verdünnungseffekt für Phosphor zeigte, war dieses Nährelement bei gesteigertem Wachstum in Folge der Düngung nicht in ausreichendem Mass verfügbar. Innerhalb der wüchsigen Bäume führte jedoch die NPK-Düngung auf der Rottauer Alm zu deutlichen Trieb-längenzuwachs- und Nadelbiomassesteigerungen. Die geringere Dünge-reaktion auf der Fläche Fischbachkopf könnte daher einerseits auf den zu geringen Phosphoranteil in Biosol zurückzuführen sein. Weitere Gründe können das ungünstigere Bodenmilieu auf dieser durch Beweidung stark veränderten Fläche und eine unzureichende Wurzelentwicklung sein. Trotz Düngung zeigte sich das Hauptproblem der Fichtenernährung auf Rendzinen aus Dolomitgestein: Stickstoff- und starker Phosphormangel bei einem Überschuss an Magnesium.

### 5.2 Mögliche Anpassung der Fichte an schwierige Standortverhältnisse

Die Alpenfichte ist ernährungsphysiologisch an ein niedriges Nährstoffpotenzial (in unserem Fall vor allem Stickstoff und Phosphor, verstärkt durch Trockenphasen) adaptiert. Mit langsamem Wachstum in der Jugend, jedoch hohem erreichbaren Endalter, ist sie eine klare Klimaxbaumart. Hohe Nährstoffgaben können daher vor allem von jungen Fichten mit geringer Wurzelentwicklung nicht vollständig ausgenutzt werden. Aufgenommene Nährstoffe werden nur kurzzeitig in gesteigertes Wachstum und höhere Nadelspiegelwerte investiert. Dagegen wird, wie vor allem die gedüngten Bäume auf der Rottauer Alm verdeutlichen, das interne Nährelementdepot in der Nadelmasse erhöht. Zusätzlich gleicht die Fichte ein geringes Nährstoffangebot durch eine erhöhte Wurzel-dichte aus. Die Naturverjüngung zeigt auf mächtigen Skelett-Humus-Böden («Tangelrendzinen») im Stockbereich abgestorbener Altfichten hohe Nährelementvorräte in den Nadeln und ist in ihrer Gesamterscheinung sehr vital. Sie unterscheidet sich dadurch deutlich von den gepflanzten Bäumen. Entscheidend scheint hierbei die Faktorenkombination ungestörte

Wurzelentwicklung, vitale Mykorrhizierung und die mächtige, vom Ca-/Mg-reichen Substrat losgelöste, organische Auflage bei gleichzeitig hoher Wasserspeicherkapazität zu sein. Hier kommen auch verstärkt Mykorrhizen vor, die Feinstwurzeln vor Trockenschäden schützen können (z.B. *Cenococcum geophilum*) (INGENHAAG 2003). Unter den beschriebenen Standortverhältnissen konzentriert die Fichte, ähnlich Bäumen in tropischen Regenwäldern, ihre Nährelementaufnahme auf die Humusaufgabe.

### 5.3 Empfehlungen aus dieser Studie an die Forstpraxis

- 1) Die Aufwandsmenge von 100 g NPK/Pflanze aus der Versuchsanlage war aufgrund der geringen Aufnahmefähigkeit durch die jungen Fichten und der Auswaschungsgefahr zu hoch. Je nach Baumgrösse dürften 30 bis 45 g NPK ausreichen. Anstelle von granuliertem Dünger könnten langsam lösliche Düngetabletten (keine Aufnahme durch Rauhfusshühner als Mahlsteine und längerer Verbleib im System) ausgebracht werden. Diese sind oberhalb des Baumes zu verteilen und leicht in die feinstwurzelreiche Humusaufgabe einzuarbeiten.
- 2) Da vergleichsweise kleine, vitale Pflanzen gut auf die Düngung angesprochen haben, sollten nicht nur grosse Pflanzen gedüngt werden. Wenig vitale Pflanzen (zwei Nadeljahrgänge) sind nicht düngewürdig, da vermutlich auch deren Wurzelsystem verkümmert ist. Dasselbe gilt auch für eine wiederholte Düngung von Pflanzen, die nicht auf eine Erstdüngung reagierten.
- 3) Da die Trieb-längensteigerung nach Düngung nur kurzzeitig wirkte ist diese in der Regel nach spätestens fünf Jahren zu wiederholen (REHFUESS 1997; GROSSNICKLE 2000).

Im Einzelfall ist zu Prüfen, ob eine Düngung notwendig und langfristig zielführend ist. Mögliche Entscheidungsgrundlagen für Düngemassnahmen an einer Fläche können ein bestimmtes Schutzgut (Objektschutz), zumeist verbunden mit hohen Investitionen (Verbauungen) und/oder hoher Ver-bissdruck sein. Orientiert am Einzelbaum, sollten Pflanzen auf ungünstigen Kleinstandorten, z.B. bei Schneeschimmelbefall, Schneegleiten und allgemein geringer Vitalität, von der Düngung ausgespart werden. Ab vier bis fünf sattgrünen Nadeljahrgängen ist eine Fichte aber als ausreichend vital zu beurteilen. Wenn nicht Wachstumssteigerung das Ziel ist, kann auf eine Düngung verzichtet werden. Die Vitalität der zu düngenden Bäume und damit der Erfolg einer Düngemassnahme scheint umso günstiger, je mehr der ursprüngliche Waldbodencharakter, insbesondere Humusvorrat und -form, erhalten ist. Auf in Folge Jahrhunderte anhaltender Beweidung extrem veränderten Dolomitstandorten, wie im Fall der Fläche Fischbachkopf, kann die Fichte nicht (mehr) standortsgemäss und daher auch nicht düngewürdig sein.

## 6. Ausblick

Nach wie vor ungeklärt sind Mangelgrenzen der Fichtenernährung für kalkalpine Standorte, insbesondere aufgrund möglicher Verdünnungs- und Konzentrationseffekte (vgl. VAN DEN BURG 1985; STEENBJERG 1951, 1954). Hierbei sind Unterschiede im Nährelementbedarf bei verschiedenen Fichtenherkünften (EVERS 1973, 1976) und in unterschiedlichen Höhenlagen (LYR *et al.* 1992; BERG & MEENTEMEYER 2002) zu beachten. Forschungsbedarf besteht weiterhin zum «Dolomitphänomen» und die dabei auftretende unzureichende Stickstoff- und Phosphorennährung bei einem Magnesiumüberangebot.

Zum Schluss der Hinweis von BAVIER (1910), der bei der Beurteilung des Baumwachstums im Gebirge und bei geplanten Düngemassnahmen auf Schutzwaldstandorten berücksichtigt werden sollte: «Wenn irgendwo das Sprichwort «Gut Ding will Weile haben» angewendet werden kann, dann sicherlich bei der Durchführung der Verjüngung im Gebirge».

## Zusammenfassung

Junge, gepflanzte Fichten auf Schutzwaldsanierungsflächen der Bayerischen Kalkalpen, insbesondere auf Hauptdolomitstandorten, zeichnen sich durch mangelhafte Ernährung vor allem mit Stickstoff und Phosphor und durch Wuchsstockungen aus. Daher wurde auf zwei Dolomitstandorten untersucht, wie sich NPK- und Biosol-Düngung auf die Sanierungspflanzen auswirken und inwieweit die Fichte an nährstoffarme Verhältnisse adaptiert ist. Die Düngewirkung war insgesamt sehr kurz, da vermutlich ein Grossteil der ausgebrachten Nährstoffe wegen der hohen Niederschläge oberflächlich ausgewaschen wurde und die Fichte hohe Nährstoffgaben nicht vollständig nutzen kann. Trotz der Düngung zeigte sich wiederholt Stickstoff- und noch stärkerer Phosphormangel. Ausserdem wurde ein Überangebot an Magnesium deutlich, das auf Dolomit zu physiologischen Störungen führen könnte. Bei den untersuchten Düngemitteln hatte NPK die grösste Wirkung. Langsames Wachstum und Erhöhung der Feinstwurzelndichte sind mögliche Anpassungen an diese nährstoffarmen Standorte. Hier hat auch die organische Auflage grosse Bedeutung für die Baumernährung. Als Empfehlung für die Forstpraxis wurden geringere Düngemengen an NPK und eine häufigere Wiederholung der Massnahme abgeleitet.

## Summary

### Nutrition status and possible adaptation mechanisms of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) on dolomite sites in the Bavarian Limestone Alps: Results from a fertilisation experiment on young plantations in protection forests

Young, planted Norway spruces in protection forests of the Bavarian Limestone Alps, in particular on dolomite sites, are characterised by insufficient supplies of phosphorous and nitrogen combined with inadequate growth. On two dolomite sites we studied the benefits to the plants of NPK- and Biosol-fertilisation and examined how spruce is naturally adapted to this nutrient poor environment. Effects of fertilisation were short-lived, because the majority of the nutrients were washed out as a result of high precipitation. Moreover, spruce is not able to scoop out nutrients in great quantities. Although fertilisation was carried out, lack of nitrogen – and, even more acutely – lack of phosphorus were obvious. An over-supply of magnesium can lead to physiological disfunctions on dolomite sites. The examined fertiliser NPK had the greatest effect. Slow growth rates and a higher fineroot density are adaptations on these nutrient poor sites. The organic layer here plays an important role for tree nutrition. Recommendations for forest practice are smaller amounts but more frequent applications of NPK.

## Résumé

### L'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst.) dans les stations dolomitiques des Alpes calcaires bavaroises. Résultats d'un essai de fertilisation de jeunes plantations destinées à l'assainissement de forêt protectrice

De jeunes épicéas plantés dans des surfaces d'assainissement de forêt protectrice dans les Alpes calcaires bavaroises (notamment dans des stations dolomitiques) présentent des carences, avant tout en azote et en phosphore, et un ralentissement de la croissance. Suite à ces constatations, on a étudié l'effet d'un épandage d'engrais de type NPK ou biosol sur deux stations dolomitiques et observé le degré d'adaptation de l'épicéa aux mauvaises conditions nutritives. L'effet des engrais a été très bref dans son ensemble. La raison en est la suivante: une grande partie des éléments nutritifs apportés a été vraisemblablement lessivée en surface par les fortes précipitations et l'épicéa n'a pas pu utiliser entièrement la forte concentration de nutriments. Des carences en azote et plus encore en phosphore sont à nouveau apparues malgré l'apport d'engrais. On a en outre décelé un net excédent de magnésium susceptible d'entraîner des perturbations physiologiques sur les stations dolomitiques. Parmi les engrais testés, c'est le mélange NPK qui a eu le plus grand effet. Une croissance lente et une densification des racelles constituent des adaptations possibles à ce type de stations pauvres en éléments nutritifs. L'horizon organique revêt, ici aussi, une grande importance pour l'alimentation de l'arbre. Cette étude a permis d'adresser aux praticiens forestiers la recommandation suivante: utiliser l'engrais NPK à faible dose et répéter fréquemment l'opération.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

## Literatur

- ARBEITSGRUPPE BODEN 1994: Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 392 S.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1985: Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland. Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag, 170 S.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996: Forstliche Standortaufnahme. Eching, IHW-Verlag, 352 S.
- BABEL, U. 1981: Humusmorphologische Untersuchungen in Nadelholzbeständen mit Wuchsstörung. Mitt. Ver. forstl. Standortskd. Forstpflanzenzücht. 29: 7–20.
- BACHMANN, M.; PREUHLER, T.; PRETZSCH H. 2000: Lassen sich stark geschädigte Schutzwaldbestände durch organische Spezialdünger nachhaltig vitalisieren? Forstarchiv 71: 183–189.
- BAIER, R. 1998: Böden aus Raibler Schichten in den Nördlichen Kalkalpen – Entstehung, Eigenschaften und Einfluss einer Klimaerwärmung auf die potenzielle Standortqualität für Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.). Diplomarbeit der LMU; unveröffentlicht, 186 S.
- BAVIER, B. 1910: Was sind die Ursachen des so häufigen Fehlens der natürlichen Verjüngung in alten Fichtenbeständen hoher Lagen, und wie kann dieser Zustand beseitigt werden? Wie sind solche Bestände inskünftig zu behandeln? Schweiz. Z. Forstwes. 61, 5: 145–152 u. 195–236.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT 1981: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000. München, Bayerisches Geologisches Landesamt, 168 S.
- BERG, B.; MEENTEMEYER V. 2002: Litter quality in a north European transect versus carbon storage potential. Plant Soil 242: 83–92.
- BOCHTER, R. 1984: Böden naturnaher Bergwaldstandorte auf carbonatreichen Substraten – Beitrag zu Genese, Ökologie und Systematik. Nationalpark Berchtesgaden Forschungsberichte 6.
- BOCHTER, R.; NEUERBURG, W.; ZECH, W. 1981: Humus und Humuschwund im Gebirge. Nationalpark Berchtesgaden. Forschungsberichte 2, 110 S.

- BOSCH, C. 1986: Standorts- und ernährungskundliche Untersuchungen zu den Erkrankungen der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in höheren Gebirgslagen. Forstl. Forsch.ber. Münch. 75, 241 S.
- BRANG, P. 1996: Experimentelle Untersuchungen zur Ansammlungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald. Beiheft Schweiz. Z. Forstwes. 77, 375 S.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.) 1990: Bundesweite Bodenzustandserfassung im Wald - Arbeitsanleitung. Bonn, 147 S.
- DYRENKOV, S.A.; GLATZEL, G. 1976: Mineralstoffernährung der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.): Konzentrationseffekte in Folge von Nadelverlusten. Mitt. Ver. forstl. Standortskd. Forstpflanzenzücht. 25: 59-68.
- ENDERS, G. 1979: Theoretische Topoklimatologie. Nationalpark Berchtesgaden Forschungsberichte 1, 92 S.
- EVERS, F.H. 1973: Genetische Unterschiede im Mineralstoffgehalt der Nadeln junger Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.). Mitt. Ver. forstl. Standortskd. Forstpflanzenzücht. 23: 67-71.
- EVERS, F.H. 1976: Über bleibende Differenzierungen im Mineralstoffgehalt der Nadeln bei verschiedenen Klonen der Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.). Mitt. Ver. forstl. Standortskd. Forstpflanzenzücht. 27: 60-65.
- EWALD, J. 1997: Bergmischwälder der Bayerischen Alpen - Soziologie, Standortsbindung und Verbreitung. Berlin u. Stuttgart, Cramer, 234 S.
- EWALD, J. 1999: Soziologie und Standortsbindung subalpiner Fichtenwälder in den Bayerischen Alpen. Göttingen, Tuexenia 19: 107-125.
- EWALD, J. 2000: Long-term impact of forest pasture on the understorey of mountain forests in the Tegernsee Alps (Bavaria). Z. Ökol. Nat.schutz 9: 161-170.
- EWALD, J. 2001: Regionale natürliche Waldzusammensetzung im Wuchsgebiet 15 Bayerische Alpen. In: Die regionale natürliche Waldzusammensetzung Bayerns. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.), 98 S.
- EWALD, J.; REUTHER, M.; NECHWATAL, J.; LANG, K. 2000: Monitoring von Schäden in Waldökosystemen des bayerischen Alpenraumes. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung u. Umweltfragen, Materialien 55, 235 S.
- FINCK, A. 1979: Dünger und Düngung. Weinheim u. New York, Verlag Chemie, 442 S.
- FLURI, F. 1975: Das Klima der Alpen im Raume von Tirol. Innsbruck u. München, Wagner, 454 S.
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S. 1995: Revitalisation of an protective forest by fertilisation. Plant Soil 168-169: 481-488.
- FRANZ, H.; SOLAR, F. 1961: Das Raxplateau und seine Böden. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 6: 81-101.
- GLATZEL, G. 1968: Probleme der Beurteilung der Ernährungssituation von Fichte auf Dolomitmöden. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 12: 14-46.
- GLATZEL, G. 1971: Ein Versuch zur Frage der Mineralstoffernährung von Fichtenpflanzungen in Hochlagen. Cent.bl. gesamte Forstwes. 88: 195-223.
- GÖBL, F. 1995: Mykorrhiza- und Feinwurzeluntersuchungen in einem Wald- und Weidegebiet. In: Herman, F.; Smidt, S. (Hrsg.): Ökosystemare Studien im Kalkalpin - Bewertung der Belastung von Gebirgswäldern - Schwerpunkt Rhizosphäre. Wien, Berichte FBVA 87: 201-214.
- GROSSNICKLE, S.C. 2000: Ecophysiology of Northern Spruce Species - The Performance of Planted Seedlings. Ottawa, NRC Research Press, 407 p.
- GULDER, H.-J.; KÖLBEL, M. 1993: Waldbodeninventur in Bayern. Forstl. Forsch.ber. Münch. 132, 243 S.
- HAUPOLTER, M. 1997a: Mineralstoffernährung und Baumvitalität auf Standorten sensibler Bergwaldökosysteme der nördlichen Kalkalpen Tirols. Abschlussbericht Teil I. Institut für Waldökologie, Boku Wien, 156 S.
- HAUPOLTER, M. 1997b: Bodenmelioration degradierter Waldstandorte der nördlichen Kalkalpen Tirols. Abschlussbericht Teil II. Institut für Waldökologie, Boku Wien, 94 S.
- HAUPOLTER, M. 1999: Zustand von Bergwäldern in den nördlichen Kalkalpen Tirols und daraus ableitbare Empfehlungen für eine nachhaltige Bewirtschaftung. Diss. Univ. f. Bodenkultur, Wien, 316 S.
- HERMAN, F. 1994: Nährstoffgehalte von Fichtennadeln sowie Schadstoffgehalte in Fichtennadel- und -borkenproben des Untersuchungsgebietes Achenkirch. In: Herman, F.; Smidt S. (Hrsg.): Ökosystemare Studien im Kalkalpin. Wien, Berichte FBVA 78: 59-71.
- HÖLZEL, N. 1996: Schneeheide-Kiefernwälder in den mittleren Nördlichen Kalkalpen. Laufener Forschungsberichte 3, 192 S.
- HÜTTL, R.F. 1992: Die Blattanalyse als Diagnose- und Monitoringinstrument in Waldökosystemen. Freibg. bodenk. Abh. 30: 31-59.
- INGENHAAG, J. 2003: Zusammensetzung der Mykorrhizazönose eines montanen Fichtenjungbestandes in den Bayerischen Kalkalpen (Raibler Dolomit): Auswirkungen von Düngemassnahmen und vertikale Verteilung im Oberboden. Diplomarbeit der LMU München, Fachbereich Biologie, unveröffentlicht, 88 S.
- KATZENSTEINER, K. 1993: Die Waldsanierungsversuche Lech. ÖFZ 3: 35-38.
- KINZEL, H. 1982: Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel. Stuttgart, Ulmer, 534 S.
- KOLB, E. 1995: Einfluss einer Klimaerwärmung auf den Stickstoffhaushalt von Waldböden. Forstl. Forsch.ber. Münch. 149, 126 S.
- KÖSTLER, J.N.; BRÜCKNER, E.; BIBELRIETHER, H. 1968: Die Wurzeln der Waldbäume. Berlin, Hamburg, Parey, 284 S.
- KRAPFENBAUER, A. 1969: Böden aus Dolomit und Serpentin in ihrer Auswirkung auf die Waldernährung. Cent.bl. gesamte Forstwes. 86: 189-219.
- KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E. 2002: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Graz, Stocker, 604 S.
- LAATSCH, W.; GROTTENTHALER, W. 1973: Labilität und Sanierung der Hänge in der Alpenregion des Landkreises Miesbach. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten, 57 S.
- LEIBUNDGUT, H. 1986: Unsere Gebirgswälder. Bern, Stuttgart, Haupt, 84 S.
- LEYS, E.; NEUWINGER, I.; HEUMADER, J.; STOLZE, W. 1970: Bericht über Versuchsflächen bei Hochlagenaufforstungen. Cent.bl. gesamte Forstwes. 87: 116-124.
- LIU, J.C.; KELLER, T.; RUNKEL, K.H.; PAYER, H.D. 1994: Bodenkundliche Untersuchungen zu Ursachen des Nadelverlustes der Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) auf Kalkstandorten der Alpen. Forstwiss. Cent.bl. 113: 86-100.
- LOZAN, J.; KAUSCH, H. 1998: Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler. Berlin, Parey, 287 S.
- LÜSCHER, F. 1990: Untersuchung zur Höhenentwicklung der Fichten-naturverjüngung im inneralpinen Gebirgswald. Diss. ETH Zürich, Nr. 8879, 138 S.
- LYR, H.; FIEDLER, H.J.; TRANQUILLINI, W. 1992: Physiologie und Ökologie der Gehölze. Jena u. Stuttgart, Fischer, 620 S.
- MARSCHNER, H. 1995: Mineral nutrition of higher plants. London, Academic Press, 889 S.
- MÖSSNANG, M. 1992: Elementgehalte von Fichten entlang eines Höhenprofils im Bayerischen Alpenraum. Abschlussbericht des Lehrstuhls für Forstpflanzenzüchtung und Immissionsforschung LMU München, unveröffentlicht, 96 S.
- OTT, E.; FREHNER, M.; FREY, H.-U.; LÜSCHER, P. 1997: Gebirgswälder. Bern, Stuttgart u. Wien, Paul Haupt, 287 S.
- POLOMSKI, J.; KUHN, N. 1998: Wurzelsysteme. Bern, Stuttgart u. Wien, Haupt, 290 S.
- READ, D.J.; PEREZ-MORENO, J. 2003: Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems - a journey towards relevance? New Phytol. 157: 475-492.
- REHFUESS, K.E. 1990: Waldböden. Hamburg u. Berlin, Paul Parey, 294 S.
- REHFUESS, K.E. 1997: Düngerversuche zum Anbau von Douglasie auf durch frühere Streunutzung degradierten Standorten in der Oberpfalz. Forstwiss. Cent.bl. 116: 65-78.
- RÖHRIG, E. 1966: Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen. Forstarchiv 10: 217-229 u. 237-249.
- SANDHAGE-HOFMANN, A. 1993: Wachstum und Nährstoffversorgung von Feinwurzeln unterschiedlich geschädigter Fichten auf Böden aus Kalkgestein (Wank-Massiv). Abschlussbericht Lehrstuhl für Bodenkunde und Bodengeographie, Universität Bayreuth, 242 S.
- SCHAEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. 2002: Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart, Enke, 593 S.
- SCHÜTT, P.; SCHUCK, H.J.; STIMM, B. 1992: Lexikon der Forstbotanik. Landsberg a. Lech, Ecomed.
- STEENBJERG, F. 1951: Yield curves and chemical plant analyses. Plant Soil III: 97-103.
- STEENBJERG, F. 1954: Manuring, plant production and the chemical composition of the plant. Plant Soil V: 226-242.
- VAN DEN BURG, J. 1985: Foliar analysis for determination of tree nutrient status - a compilation of literature data. Rijksinstituut

- voor Onderzoek in de bos- en Landschapsbouw «De Dorschkamp», Wageningen, 615 p.
- VON LEINIGEN, W. 1908: Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. Naturwissenschaftliche Zt. für Forst- und Landwirtschaft: 529–538
- VON LEINIGEN, W. 1909: Über Humusablagerungen in den Kalkalpen. Naturwissenschaftliche Zt. für Forst- und Landwirtschaft: 8–32 u. 160–173 u. 249–273.
- WEAST, R.C. (Hrsg.) 1983: Handbook of Chemistry and Physics 64th edition 1983–1984. Boca Raton, CRC Press.
- WEBER, P. 1997: Jahreszeitliche Dynamik der Nährstoffe und der Phytomasse in Kalkmagerrasen und Borstgrasrasen der subalpinen Höhenstufe im Wettersteingebirge (Nördliche Kalkalpen). Diplomarbeit TU München, Lehrstuhl Vegetationsökologie, unveröffentlicht, 110 S.
- ZECH, W. 1968: Kalkhaltige Böden als Nährsubstrat für Koniferen. Diss. der LMU, 165 S.
- ZECH, W. 1970: Besonderheiten im Ernährungszustand chlorotischer Fichten auf kalkreichen Böden. Forstwiss. Cent.bl. 89: 1–9.
- ZECH, W.; VÖLKL, W. 1979: Beitrag zur bodensystematischen Stellung kalkalpiner Verwitterungslehme. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 29: 661–668.
- ZOLLNER, A. 2000: Unveröffentlichter Abschlussbericht zum Projekt ST 22, Möglichkeiten und Grenzen der organischen Düngung mit Biosol zur Unterstützung der Schutzwaldsanierung. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 88 S.

#### Dank

Das Projekt ST 121 wurde dankenswerterweise vom Kuratorium der Bayerischen Staatsforstverwaltung gefördert. Der Autor bedankt sich ausserdem bei den beiden anonymen Gutachtern für die kritische und hilfreiche Durchsicht des Manuskriptes.

#### Autor

Forstrat ROLAND BAIER (Dipl. Forstwirt Univ.), Fachgebiet Waldernährung und Wasserhaushalt, Wissenschaftszentrum Weihestephan, Am Hochanger 13, DE-85354 Freising. E-Mail: baierr@forst.tu-muenchen.de.