

Göbl, F. & Mutsch, F. (1985): Schwermetallbelastung von Wäldern in der Umgebung eines Hüttenwerks in Brixlegg/Tirol - I. Untersuchung der Mykorrhiza und Humusaufklage. - Centralblatt für das gesamte Forstwesen, 102 (1): 28-40, 5 Abb., 2 Tab.; Wien.

„Cbl. ges. Forstwesen“ 102 (1985), 1, 28—40

Schwermetallbelastung von Wäldern in der Umgebung eines Hüttenwerkes in Brixlegg/Tirol

I. Untersuchung der Mykorrhiza und Humusaufklage

Von F. GÖBL und F. MUTSCH

1. Einleitung

Boden und Baumbestand am Matzenköpfl, einer ca. 45 m hohen Erhebung aus Triaskalken westlich von Brixlegg, waren vermutlich seit dem 15. Jahrhundert gewissen Immissionen einer Silber- und Kupferschmelzstätte ausgesetzt. Diese wurde 1463 zum ersten Mal urkundlich erwähnt. Ein Schriftstück aus dem Jahr 1831 bezieht sich auf angebliche Hüttenrauchschäden (Riedl, 1984).

Seit 1946 erzeugt der Betrieb „Montanwerke“ u. a. reines Nickelsulfat, Kupferoxychlorid und Reinkupfer, vorwiegend aus Altmetall. 1954 wurde die Kohlefeuerung durch Ölfeuerung ersetzt.

Messungen der Landesforstinspektion Tirol im Raum Brixlegg ab 1973 ergaben sehr hohe Emissionen von SO_2 und von Metallstäuben, u. a. von Blei und Kupfer (Zusammenfassung Brenninger, 1981).

Die Ablagerungen am etwa 1 km vom Emittenten entfernten Matzenköpfl werden durch den Wind begünstigt.

Schwefelgehalte von Fichtennadeln betragen dort 0,17 und 0,12 % S im 1. und 3. Nadeljahrgang und charakterisieren den Standort ebenfalls als stark belastet.

Ob eine nennenswerte Veränderung von Wald und Boden bereits in vergangenen Jahrhunderten begonnen hat, lässt sich nicht mehr feststellen; die starke Schädigung dürfte mit Beginn der Ölfeuerung eingesetzt haben.

Nach Riedl kannte man zumindest schon vor 20 Jahren die „eigenartige Humusform“ des Matzenköpfl; es handelt sich dabei um eine 20—30 cm mächtige, graue bis graubraune, lockere Auflage aus nahezu unzersetzten Nadeln und Blättern.

In den letzten Jahren war an den Steilhängen eine verstärkte Erosion dieses Materials zu beobachten.

Die Schlägerungen von Schadholz auf einem Areal von ca. 3 ha zeigten entsprechend den Erhebungen der Bezirksforstinspektion Wörgl ebenfalls eine deutliche Progression:

1970—1980	10 fm Laubholz	53 fm Nadelholz
1981—1984	23 fm Laubholz	39 fm Nadelholz

Die überlebenden Fichten und Kiefern haben ausgelichtete, zum Teil abgestorbenen Kronen, ein bis drei Nadeljahrgänge, Nadeln mit stark geschädigter Cuticula (Benetzbartigkeit). Das Wachstum der Bäume dürfte minimal sein; für eine 33jährige überlebende Fichte wurde ca. 1 m Höhe und an der Basis ein Durchmesser von 14 mm bestimmt.

Die Buche zeigt entsprechende Symptome. Fruchtkörper diverser holzzerstörender Pilze sind häufig.

Auf den Prallhängen, etwa in Höhe des Schornsteins, fehlen bodendeckende Moose oder krautiger Unterwuchs völlig. Für weniger extreme Standorte sind tiefwurzelnde Arten und solche, die Rhizome oder Zwiebeln ausbilden, charakteristisch (z. B *Berberis vulgaris*, *Daphne mezereum*, *Convallaria majalis*, *Polygonatum officinale* und *verticillatum*, *Lilium martagon*, *Silene inflata*, *Deschampsia caespitosa*).

Es war Ziel vorliegender Arbeit, die Böden am Matzenköpfl durch chemische Analysen und durch einen biologischen Test zu charakterisieren, weiters die Mykorrhizaausbildung an diesen und an unbelasteten Vergleichsstandorten zu untersuchen.

Das Matzenköpfl umfaßt ein relativ kleines Areal, das einem lokalen Emittertenden zuzuordnen ist. Es bietet aber die Möglichkeit festzustellen, wie sich die lange anhaltende Einwirkung verschiedener Schadstoffe in hoher Konzentration auf Boden- und Mykorrhizabildung auswirkt.

Da es andererseits von größtem Interesse wäre, nach emissionsmindernden Maßnahmen des Betriebes den geschädigten Waldstandort zu regenerieren, sind die Untersuchungen als eine der Grundlagen dafür angelegt.

2. Material und Methode

2.1 Standorte

Matzenköpfl: drei vergleichbare Standorte unter Fichte im östlichen Teil, eben bis schwach geneigt, mit tiefer, ungestörter Streuauflage. Der Horizontaufbau ist weitgehend gleichartig:

O ₁	27—25 cm	hellbraune, unzersetzte Nadeln
O ₂	25—15 cm	graubraune, lose, unzersetzte Nadeln
O ₃	15— 5 cm	graubraune, etwas verklebte, unzersetzte Nadeln
O ₄	5— 0 cm	dunkelbraun, beginnende Fermentierung, Nadeln kaum zersetzt
A	0— 4 cm	dunkelgrau, mineralreich
AB	4—30 cm	heller Mineralboden

Für Buche wurde ein Standort in einer etwas entfernteren Mulde gewählt.

Vergleichsstandorte: wüchsige, artenreiche Wälder der Umgebung bei Wiesing („Tiergarten“, eine dem Matzenköpfl ähnliche Erhebung, etwa 6 km weiter im Westen), Zimmermoos im Südosten von Brixlegg und am Beginn des Brandenbergtales nördlich von Kramsach. Sie liegen nach Schwefelanalysen von Fichtennadeln (Landesforstinspektion Tirol, 1971—1979) in nicht bis kaum belastetem Gebiet.

2.2 Streuuntersuchungen

Die Proben (Fichte, Buche) wurden zu drei verschiedenen Terminen (Oktober 1983, April 1984, Mai 1984) den angeführten Horizonten entnommen.

2.2.1 Chemische Aufbereitung

Für die chemischen Analysen der Streu (O_1 — O_4) erfolgte die Probenahme im April 1984, für den AB-Horizont im Mai 1984.

Die pH-Werte wurden in 0,1 n KCl-Suspension gemessen. Die Analyse des Kohlenstoffs erfolgte durch Verbrennung der organischen Substanz im O_2 -Strom und die Erfassung des dabei gebildeten CO_2 durch einen Infrarot-Gasanalysator. Der Gesamtstickstoff wurde nach Kjeldahl bestimmt. Für die Analyse der übrigen Nährelemente und Schwermetalle wurden die Proben mit einem Salpetersäure-Perchlorsäure-Gemisch (5 : 1) aufgeschlossen. P wurde photometrisch, die übrigen Elemente mittels der Atomabsorptionsspektroskopie (Perkin Elmer 2380) bestimmt. Meist wurde die Luft-Acetylen-Flamme verwendet, nur für Cr die Lachgas-Acetylen-Flamme. Zur Cd-Bestimmung wurde die Graphitrohrküvette (Perkin Elmer, HGA 400) herangezogen.

2.2.2 Biologische Charakteristik der Streu

40 ml durchmisches, feuchtes, nach Horizonten getrenntes Material wurde in Glaspetrißschalen sterilisiert und mit 1 cm^2 großen Mycelstücken vier Wochen alter Pilzkulturen beimpft. Fallweise wurden Proben des AB-Horizontes untersucht.

Testpilze waren streubewohnende Arten, die 1983 im Bereich des Matzenköpfl oder an den Vergleichsstandorten gefunden und auf Agarnährböden kultiviert wurden (Moser-b- und Kernschrotnährboden). Nach vier Wochen Kulturdauer wurden Durchmesser und Wuchsform des Mycels bestimmt.

Die Proben vom Oktober 1983 wurden in fünffacher, alle übrigen in dreifacher Wiederholung getestet.

2.3 Mykorrhizauntersuchungen

Die Proben für die Mykorrhizauntersuchungen von Fichte und Buche wurden im Mai 1984 an den Standorten Matzenköpfl, Wiesing und Brandenberg, nach Horizonten getrennt und jeweils von einer Fläche von $20 \times 20 \text{ cm}$ entnommen; am Matzenköpfl bis zum anstehenden Gestein, an den Vergleichsstandorten bis max. 15 cm. Die Probeflächen lagen im Kronbereich, ca. 1 m vom Stamm entfernt. Insgesamt wurden 15 Profile untersucht.

Feinwurzeln und Mykorrhizen wurden vorsichtig ausgewaschen und präpariert und die Vitalität bzw. Schädigung der Mykorrhizen durch Vergleich ihrer morphologischen und anatomischen Merkmale charakterisiert.

Zahlenmäßige Vergleiche waren nur begrenzt möglich.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Chemische Analysen

Die Ergebnisse der Tabelle 1 weisen für K und Mg in den Streuhorizonten (O_{11} — O_{14}) durchwegs extrem niedrige Werte auf, welche erst im AB- bzw. O_{14} -Horizont leicht ansteigen. Auswaschung dürfte Ursache für solche Ergebnisse sein.

Tabelle 1. Analysenergebnisse der Fichtenstreu und des darunterliegenden Bodenhorizonts vom Matzenköpfel

	Angaben in mg/g Tr. S.								
	pH	P	K	Ca	Mg	Fe	N	C	
Standort 1									
O_{11}	4,6	0,6	<0,1	3,8	0,5	6,9	13,4	446	
O_{12}	4,6	0,7	<0,1	5,0	0,6	11,6	15,8	431	
O_{13}	4,4	0,7	<0,1	5,0	0,6	17,6	18,0	419	
O_{14}	4,5	0,7	<0,1	5,6	1,0	11,2	16,9	378	
AB	5,6	0,1	0,3	7,6	33,0	26,0	0,5	16	
Standort 2									
O_{11}	4,3	0,6	<0,1	3,4	0,6	8,2	17,6	439	
O_{12}	4,2	0,6	<0,1	3,2	0,6	13,2	17,4	437	
O_{13}	4,2	0,7	<0,1	3,8	0,6	17,4	18,9	421	
O_{14}	4,7	0,6	<0,1	18,5	5,1	10,3	15,5	387	
AB	6,9	0,4	1,2	15,0	35,5	28,0	0,9	19	
Standort 3									
O_{11}	4,5	0,6	<0,1	3,4	0,5	6,2	14,5	454	
O_{12}	4,3	0,8	<0,1	2,9	0,8	19,3	15,9	366	
O_{13}	4,2	0,6	<0,1	3,0	0,7	11,3	19,7	396	
O_{14}	4,2	1,1	<0,1	4,2	2,0	21,2	15,4	291	
AB	6,2	0,2	0,3	40,5	34,5	25,0	1,0	36	
 Angaben in $\mu\text{g/g}$ Tr. S.									
pH	Cu	Mn	Zn	Co	Cr	Ni	Pb	Cd	
Standort 1									
O_{11}	4,6	8 100	50	4 500	6	23	125	2950	97
O_{12}	4,6	11 000	85	8 600	13	11	250	3250	102
O_{13}	4,4	16 500	85	10 900	19	8	355	5050	67
O_{14}	4,5	8 400	80	9 200	21	10	180	4350	61
AB	5,6	225	220	360	21	51	47	147	7
Standort 2									
O_{11}	4,3	9 700	40	4 300	9	10	140	3450	74
O_{12}	4,2	10 500	45	5 200	12	13	215	3700	71
O_{13}	4,2	13 500	45	7 500	19	13	315	4100	72
O_{14}	4,7	10 100	245	1 700	18	7	105	4350	107
AB	6,9	265	535	285	18	57	44	175	4
Standort 3									
O_{11}	4,5	10 200	40	1 700	5	15	95	4700	54
O_{12}	4,3	17 500	70	4 050	20	19	370	5700	91
O_{13}	4,2	11 500	70	4 250	13	8	220	6100	71
O_{14}	4,2	10 500	80	2 950	36	13	155	5050	38
AB	6,2	525	370	395	24	54	65	295	23

nisse sein. Die übrigen Makronährelemente erreichen Konzentration, die auch auf unbelasteten Standorten möglich sind.

Die Schwermetalle zeigen im Vergleich zu den Richtwerten für Kulturböden nach Kloke (1980) eine starke Überhöhung: für Ni wurde etwa die 10fache, für Zn etwa die 200fache, für Cd etwa die 300fache, für Pb etwa die 500fache und für Cu etwa die 1000fache Konzentration bestimmt. Im AB-Horizont konnte für Ni keine, für die übrigen Elemente eine höchstens 25fache Überhöhung bei Gegenüberstellung zu häufig vorkommenden Werten festgestellt werden. Co und Cr zeigen in allen Horizonten übliche Werte.

In den meisten Fällen weisen die Elemente Cu, Zn, Ni und Pb in der jüngsten Streuschicht (O_{t1}) die niedrigsten, in der dritten Streuschicht (O_{t3}) die höchsten Gehalte auf. Die Höhe der Cd-Gehalte war von der Zugehörigkeit zu einem bestimmten Streuhorizont unabhängig.

Die Werte für Mn entsprechen durchaus Nadelanalysen (O_{t1} — O_{t4}) bzw. Bodenanalysen (AB-Horizont).

3.2 Biologischer Test

Als Testpilze wurden Arten gewählt, die im pH-Bereich der untersuchten Streu- und Bodenproben (pH 4,0—5,0) in der Regel gutes Wachstum zeigen: *Macrolepiota procera*, *Lepista nuda*, *Clitocybe nebularis* und *geotropa* als streubewohnende Arten, *Laccaria amethystina* als Mykorrhizapilz.

Tabelle 2. Wuchsverhalten von Testpilzen nach 4 Wochen Kulturdauer auf Substraten des vorderen Matzenköpfli und auf Vergleichssubstraten unter Fichte (Myceldurchmesser in cm)

Substrat-horizont	<i>Macrolepiota procera</i>	<i>Lepista nuda</i>	<i>Clitocybe nebularis</i>	<i>Clitocybe geotropa</i>	<i>Laccaria amethystina</i>
O_{t1}	—	—	—	—	—
O_{t2}	—	—	—	—	—
O_{t3}	—	—	—	—	—
O_{t4}	—	—	—	—	—
A	++ schwaches Wachstum	++ schwaches Wachstum	+	Impfstück ausgehypht	Impfstück ausgehypht
AB	9 cm kräftige Mycelstränge	5,5 cm Mycel zart	5,5 cm Mycel zart	4 cm Mycel zart	4 cm Mycel sehr zart
Wiesing	9 cm Mycel dicht, kräftig, zoniert	9 cm Mycel fädig, kräftig	7 cm Mycel dicht	5 cm Mycel sehr dicht, Luft- mycel	9 cm Mycel sehr zart
Zimmermoos	9 cm Mycel dicht, fädig	9 cm Mycel dicht, fädig	9 cm Mycel dicht	6 cm Mycel sehr dicht	9 cm Mycel sehr zart

Ihr Wuchsverhalten hat sehr große Unterschiede für die belasteten Standorte am Matzenköpfli gegenüber allen Vergleichsstandorten ergeben (Tabelle 2). Innerhalb dieser beiden Gruppen waren die Unterschiede gering. Auch in bezug

auf die verschiedenen Entnahmetermine bzw. Wiederholungen wurde keine oder nur geringfügige Abweichungen beobachtet. Für das Mycelwachstum wurden daher Mittelwerte angegeben.

In allen Fichtenstreuhorizonten der geschädigten Standorte wuchsen die geimpften Mycelstücke überhaupt nicht. Schwaches Wachstum war erst im A-Horizont zu beobachten. Daraufhin wurden Mycelstücke getestet, die auf einem zweischichtigen Nährboden kultiviert waren. Dessen untere Schicht war mit feinst gemahlenem Traubenkernkompost angereichert — das oberhalb die-

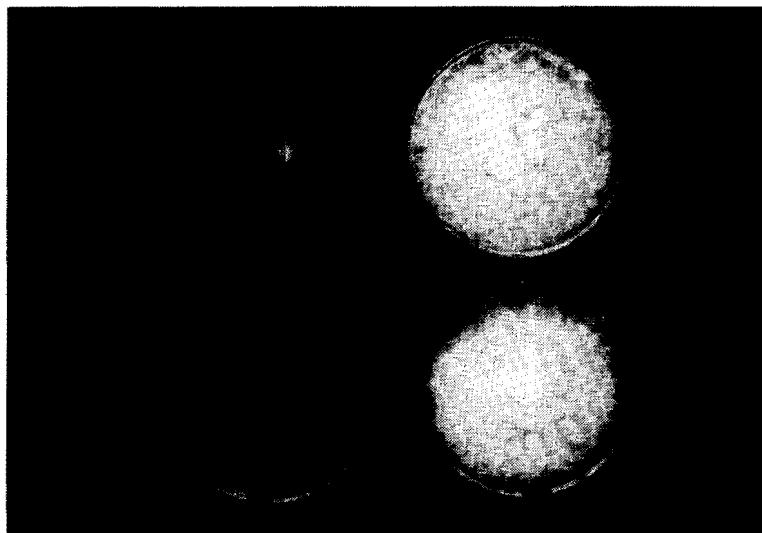


Abb. 1. Wuchsverhalten von *Macrolepiota procera* auf Fichtenstreu nach vier Wochen Kulturdauer — links: Matzenköpfl, Horizonte O_{i2} (oben) und O_{i3} (unten), vgl. Tabelle 2; rechts: Vergleichsstandort Wiesing A_1 und A_2

ser Schicht gewachsene Mycel war dadurch gewissermaßen isoliert; es ist im Bereich des Impfstückes gut gewachsen, jedoch nicht oder wenig auf der ver-gifteten Streu. Auf den Vergleichssubstraten hingegen entwickelten sich alle Pilze sehr gut und mit nur geringen Unterschieden der spezifischen Wuchsform oder Pigmentierung (Abb. 1).

Auffallend gut wuchs das Mycel der Testpilze auf Proben tiefer Bodenschichten (AB-Horizont) des Matzenköpfl (Abb. 2). Nach den chemischen Analysen waren in diesen Schichten die Schwermetallgehalte wesentlich niedriger. Pilzmycelien reagieren auf solche Konzentrationen offensichtlich weniger emp-findlich und können in diesen Horizonten überleben.

Um das Pilzwachstum mit zunehmender Entfernung vom Emittenten zu testen, wurden Fichtenstreuproben vom Matzenköpfl und vom Zimmermoos in verschiedenem Verhältnis gemischt und beimpft. Der Verdünnungseffekt macht sich durch eine Wachstumsprogression des Mycels deutlich bemerkbar (Abb. 3).

Auf Buchenstreu waren die Ergebnisse etwas anders; auf den letzjährigen Blättern war das Mycelwachstum nur gehemmt und erst in den unteren Streuschichten unterdrückt.

3.3 Mykorrhizauntersuchungen

3.3.1 Verteilung der Mykorrhizen

In gesunden Waldböden ist die Hauptmasse der Mykorrhizen in den gut durchlüfteten, humusreichen Streuhorizonten zu beobachten, auch an Grenzflächen zu Gestein oder altem Holz. Das trifft für alle Vergleichsstandorte zu. In Wiesing wurden z. B. für 220 cm^3 Boden (einmalige Probenahme mit Stahlzylinder, Höhe 5 cm in oberster Bodenschicht) unter Fichte 1540 aktive Mykorrhizen bestimmt, in einem Buchenbestand 1810.

In einem Bodenziegel von $20 \times 20 \text{ cm}$ und 10 cm Höhe (Wiesing, Mai 1984) wurden u. a. 27 Fruchtkörper von *Elaphomycetes* (Hirschtrüffel) in Größen von 0,4—2,5 cm gefunden, und der Boden war von Mycel des Pilzes durchsetzt.

In sämtlichen untersuchten Streuhorizonten des Matzenköpfl fehlen Mykorrhizen. Sie waren erst im AB-Horizont in geringer Anzahl vorhanden, vorwiegend zwischen Gesteinsbrocken des felsigen Untergrundes bzw. in Spalten und nur vereinzelt im A-Horizont.

Auf Flächen von $20 \times 20 \text{ cm}$ und insgesamt 60 cm Tiefe wurden zwischen 90—135 lebende Mykorrhizen bestimmt, durchwegs an Wurzeln, die durch ihre abgelöste Rinde als sehr stark geschädigt einzustufen sind.

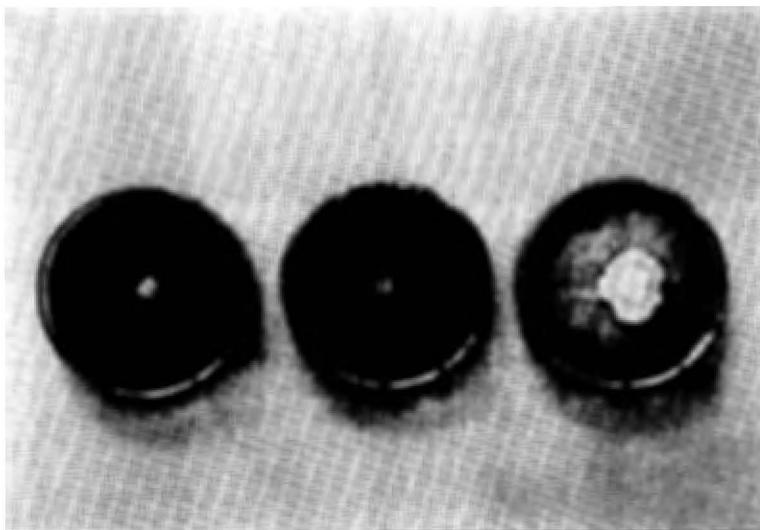


Abb. 2. Wuchsverhalten von *Lepista nuda* auf Substraten des Matzenköpfl aus verschiedenen Horizonten nach vier Wochen Kulturdauer — links: Horizonte $O_{1/2}$, $O_{1/4}$ und AB (vgl. Tabelle 2)

Auffallend war eine 1 cm dicke Schicht von abgestorbenen, dicht gelagerten Mykorrhizen an der unteren Grenzschicht der Streu ($O_{1/4}$ —A). Sie wurden sowohl unter Fichte und Buche als auch unter Kiefer gefunden. Die abgestorbenen Mykorrhizen waren gut erhalten, sehr dunkel und kaum brüchig, wie imprägniert. Dadurch war eine Präparierung für die chemische Analyse möglich (Tabelle 3).

Bei der Analyse der abgestorbenen Mykorrhizen fällt wieder der niedrige K-Gehalt auf. Die Werte für Cu, Zn, Ni und Pb liegen meist deutlich unter den Gehalten der Streuhorizonte, doch ebenso deutlich über den Gehalten des AB-Horizonts. Das sehr bewegliche und leicht aufnehmbare Cd weist ebenfalls einen extrem hohen Wert auf, der etwa den Werten der Streuhorizonte entspricht.

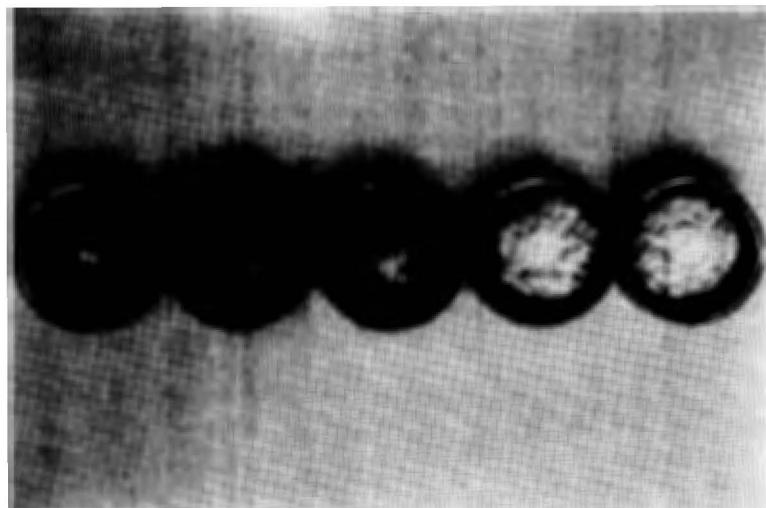


Abb. 3. Wuchsverhalten von *Macrolepiota procera* auf Fichtenstreu vom *Matzenköpfel* (Horizont O_{t_2} , vgl. Tabelle 2) mit Zusätzen von 2 %, 10 %, 90 % und 100 %, Vergleichsboden *Zimmermoos*, von links. Kulturdauer drei Wochen

An zwei Probestellen wurden unmittelbar unter dem „Mykorrhizahorizont“, der in dieser Ausbildung weder in einer einzigen noch in wenigen Vegetationsperioden gebildet werden konnte, einzelne lebende Mykorrhizen gefunden.

Tabelle 3. Gehalte an Makronährlementen und Schwermetallen von Mykorrhizen an der Grenzschicht Streu-Boden

Elementgehalte in mg/g Tr. S.							
P	K	Ca	Mg	Fe			
0,3	0,3	41,0	34,5	2,1			
Elementgehalte in $\mu\text{g/g}$ Tr. S.							
Cu	Mn	Zn	Co	Cr	Ni	Pb	Cd
5400	70	410	6	12	100	2045	53

Eine Erklärung für sein Zustandekommen wäre eine wiederholte Regeneration von Mykorrhizen an der Grenzschicht zur vergifteten, tiefen Streu. Diese bietet kaum Lebensraum mehr für Mykorrhizapilze oder Streubewohner, die dem Baum die vorhandenen Nährstoffe, die mit Ausnahme von K und Mg ausreichend vorhanden sind, zugänglich machen könnten (vgl. Tabelle 2). Dieser Umstand führt u. a. letztlich zur Bildung dieser mächtigen Streuauflagen.

Die Immission hat für den Bereich der Streuablagerungen denselben Effekt, wie ihn eine extreme Streunutzung hätte.

Mykorrhizauntersuchungen in streugenutzten Wäldern im Zillertal (Göbl, 1967) ergaben, daß durch das Entfernen der Streuschicht auch ein Großteil der aktiven Mykorrhizen verlorengeht.

Wachstumsdepressionen in Beständen mit geschädigten Böden sollten auch in diesem Zusammenhang gesehen werden.

Das Vorhandensein einer dichten Schicht von abgestorbenen Mykorrhizen könnte ein Hinweis sein, daß vor einer gewissen Zeit eine stärkere Schädigung des Bodens eingesetzt hat (Ölfeuerung?).

Nach Mejstrik (1980) steigt die Anzahl abgestorbener Mykorrhiza mit zunehmender Schädigung eines Standortes durch SO_2 .

Abgesehen davon, daß die schlechte Mykorrhizaausbildung sicher in Korrelation zu der geringen Assimilationsfläche der geschädigten Baumkronen steht, ist am Matzenköpfel das Wurzelsystem der älteren überlebenden Bäume dem Standort angepaßt und in Felsspalten verankert, und Feinwurzeln können sich in diesen Bereichen noch einigermaßen entwickeln.

In den stark belasteten Flächen am vorderen Matzenköpfel wurden 1984 Fruchtkörper folgender Pilzarten gefunden: *Laccaria laccata* und *bicolor*, *Lactarius necator*, *Xerocomus badius*, *Tylopilus felleus*, *Amanita rubescens*. Einige dieser Arten ertragen erwiesenermaßen hohe Schwermetallkonzentrationen; sehr stark belastete Böden werden von Pilzen aber gemieden (Ernst, 1974).

Das Vorkommen dieser Mykorrhizapilze auf der Streu des Matzenköpfel war erst nach vorsichtigen Präparierarbeiten zu erklären. Die Mycelien der Pilze bildeten relativ auffallende Mycelstränge, die aus tieferen Schichten immer in mehr oder weniger stark zersetzt Holz nach oben gewachsen waren.

In diesem Zusammenhang scheint ein Saatversuch erwähnenswert. Im Frühjahr 1984 wurden Fichtensamen großflächig ausgestreut. In der tiefen Streu war eine Keimung offensichtlich nicht möglich, alle bisher überlebenden Sämlinge stehen zum Teil üppig an der Basis vermoderter, faserig zersetzer Strünke.

Dasselbe gilt für einzelne Pflänzchen aus natürlicher Verjüngung, die auch eine schwache Verpilzung der Wurzeln aufweisen.

Im Urwald von Brigels ist z. B. die Verjüngung, als Folge der Lichtverhältnisse, ebenfalls auf die vermoderten Stämme beschränkt und die Wurzeln von Sämlingen waren verpilzt (Göbl, 1968). Es hat den Anschein, daß für diese spezielle Art der Verjüngung sehr unterschiedliche Faktoren maßgebend bzw. im Minimum sein können.

3.3.2 Ausbildung der Mykorrhizen

Der Verzweigungsmodus der Mykorrhizen wird durch die Baumart bestimmt, Farbe und Form des Pilzmantels durch den Pilzsymbionten; die genannten Merkmale werden durch den Standort beeinflußt und ändern sich etwas im Verlauf einer Vegetationsperiode. Mykorrhizen mit gleichen Merkmalen werden als Mykorrhizatypen bezeichnet. In gesunden Waldböden sind die Feinwurzeln in der Regel üppig mit mehr oder weniger reich verzweigten Mykorrhizen besetzt. Gut ausgebildete, funktionsfähige Mykorrhizen sind in der Regel verdickt, von einem Mantel aus zarten Pilzhypfen umgeben, die häufig in den Boden ausstrahlen und in der Regel als „Netz“ zwischen die Zellwände der Wurzelrinde wachsen.

Auf nährstoffarmen oder für eine Holzart ungeeigneten Standorten können Zellwände dieser Pilzwurzeln verkorken, und es wachsen Hyphen innerhalb der Rindenzellen. Eine schlechte Ausbildung der Mykorrhizen geht erfahrungsgemäß mit schlechtem Pflanzenwachstum parallel.

An den Vergleichsstandorten Wiesing und Brandenberg waren die Mykorrhizen durchwegs gut ausgebildet und entsprechen obiger Beschreibung. Ihre Ausbildung variiert nach der im Boden vorhandenen Pilzpopulation. An den einzelnen Probestellen wurden zwischen vier und acht verschiedene Typen gefunden, insgesamt zwölf bis dreizehn für Fichte bzw. Buche für jeweils einen der Standorte. Fünf dieser Typen wurden an den Wurzeln beider Baumarten gefunden.

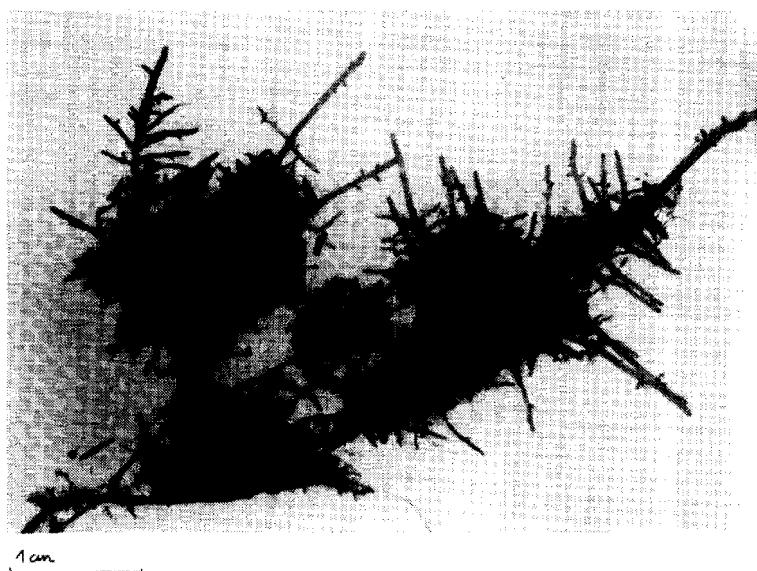


Abb. 4. Fichtenwurzel mit gutem Mykorrhizabesatz aus Streuhorizont. Vergleichsstandort Wiesing, Mai 1984

Abb. 4 zeigt eine Fichtenwurzel mit zwei verschiedenen Typen und mit üppiger Verzweigung.

Die Mykorrhizen vom Matzenköpfli unterscheiden sich auch in bezug auf ihre Ausbildung von jenen der Vergleichsstandorte. An den Langwurzeln, von denen sich in der Regel die Rinde löst, finden sich relativ viele abgestorbene, sehr dunkle und meist gut erhaltene Mykorrhizen, weiters Stümpfe von abgestorbenen Feinwurzelkomplexen. Die Schädigung der lebenden Mykorrhizen ist enorm. Es konnten zwar für Fichte insgesamt sieben, für Buche vier verschiedene Typen, davon ein gemeinsamer, bestimmt werden, doch waren nur einzelne dieser Pilzwurzeln normal ausgebildet. Die morphologischen Veränderungen sind auffallend und beim dominierenden Typ am stärksten ausgeprägt.

Die Mykorrhizen waren entweder schwach verzweigt (Abb. 5), verkürzt, gestaucht oder dicht traubenförmig bzw. als Klumpen ausgebildet — Wuchsformen, die in gesunden Beständen weder bei Fichte noch bei Buche vorkommen.

Vielfach wuchsen neben abgestorbenen Kurzwurzeln sehr kurze, einfache Mykorrhizen aus der Rinde, eine weitere Regeneration oder Verzweigung unterbleibt.

Einzelne verdickte Mykorrhizen wiesen breite Risse im Pilzmantel auf oder sie waren dünn und unregelmäßig weitergewachsen.

Mit wenigen Ausnahmen waren die Mykorrhizen hinter den hellen Spitzen sehr dunkel. Ursache dafür sind intensive Verkorkung der Rindenzellen, auch des Zentralzylinders, Einlagerungen in den Rindenzellen sowie dunkle Pilzhyphen, die knäuelförmig ganze Zellen ausfüllen und parasitischen Charakter haben dürften. Die Zellwände sind verdickt und kaum mehr permeabel; für das Rindenparenchym einzelner Mykorrhizen wurden Wanddicken von etwa $3,5-5,2 \mu\text{m}$ bestimmt (Vergleich Brandenberg: $1,7-2 \mu\text{m}$).

Da diese Verkorkung häufig direkt hinter den Spitzen der Mykorrhizen beginnt, dürfte sie rasch vor sich gehen und wäre nach Liss et al. (1948) als vorzeitige Seneszenz zu bezeichnen.

Die Einlagerungen würden erklären, warum abgestorbene Mykorrhizen gut erhalten bleiben (vgl. „Mykorrhizahorizont“).

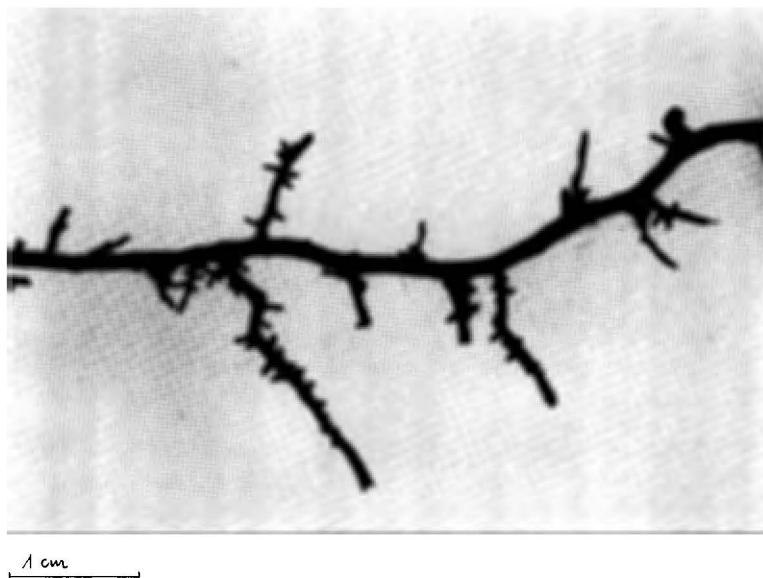


Abb. 5. Fichtenwurzel mit stark reduziertem Mykorrhizabesatz aus Mineralboden (AB-Horizont). Matzenköpfl, Mai 1984

Die Befunde zeigen deutlich, daß die Mykorrhiza des Matzenköpfl als Folge der Schädigung des Bodens ihre Funktion als nährstoffaufnehmende Organe weitgehend eingebüßt haben und daß eine Regeneration kaum stattfindet, in einem geringen Maß in größeren Bodentiefen.

Es dürfte von Interesse sein, daß Mykorrhizen von Standorten in anderen Waldschadensgebieten mit mehr oder weniger versauerten Böden ebenfalls Schäden ähnlicher Art aufweisen (Liss et al., 1984; Meyer, 1984; Stienen et al., 1984).

4. Zusammenfassung

Am Matzenköpfl bei Brixlegg wurde der Einfluß langjähriger, starker Immissionen von Schwermetallen und SO_2 auf den Boden und auf die Mykorrhizaentwicklung untersucht.

1. Chemische Analysen ergaben, daß eine starke Akkumulation von Schwermetallen (Cu, Pb, Cd, Zn und Ni) vorwiegend auf die mächtige, unzersetzte Streuauflage beschränkt ist, daß in einer Schicht abgestorbener Mykorrhizen insbesondere Cu, Pb und Cd angereichert sind.
 2. Ein Test, bei dem Mycelien streubewohnender Pilze in vitro auf den entsprechenden Substraten getestet wurden, brachte adäquate Ergebnisse. Das Wachstum war in der Streu stark belasteter Standorte völlig unterdrückt, konnte aber für tiefere Bodenschichten nachgewiesen werden.
 3. Mykorrhizen fehlen in der Streuschicht völlig, während im Unterboden an mehr oder weniger stark geschädigten Wurzeln ein sehr schwacher Besatz gefunden wurde. Die Mykorrhizen weisen zum Großteil schwere Schäden auf, die bis zu Deformationen von knollen- oder traubenförmigem Habitus reichen. Die Zellwände der Rinde, auch der Endodermis, verkorken sehr rasch, sind auffallend verdickt, und intrazellulare Hyphen sind häufig. Die Art der Schäden, die an den Mykorrhizen auftritt, ist vergleichbar mit Befunden, die von anderen Autoren für vorhandene Waldschadensgebiete erstellt wurden.
- Die Wurzeln älterer Bäume sind in Felsspalten verankert, und Mykorrhizen werden vermutlich in tieferen Schichten gebildet.

Die Ergebnisse der drei angeführten Untersuchungen ergänzen sich.

Die Immissionen haben für die Böden des Matzenköpfl denselben Effekt, wie ihn eine sehr intensive Streunutzung hätte. Die in der mächtigen Streuschicht deponierten Nährstoffe können weder durch Mykorrhizen noch durch streuzersetzende Pilzarten für den Baum nutzbar gemacht werden.

Summary

Heavy-Metal Damage to Forests in the Vicinity of a Smelter in Brixlegg (Tyrol, Austria). — I. Investigations on Mycorrhiza and Forest Floor Humus

The influence of long lasting heavy-metals and SO_2 pollution on forest soils and mycorrhiza development was investigated.

Chemical analysis showed extreme accumulation of heavy-metals (Cu, Pb, Cd, Zn, Ni) in the undecomposed litter layer and much less accumulation in deeper soil strata.

Mycelia from fungi common to the litter horizon of forest soils showed adequate growth on unpolluted reference substrates, but complete inhibition on polluted litter from the vicinity of the smelter. In deeper soil strata from these sites some activity could be observed.

Mycorrhizas were completely missing in the polluted litter layers, whereas weakly developed mycorrhizas on seriously damaged and deformed roots could be found in deeper soil horizons.

In the forest ecosystems of the heavily exposed "Matzenköpfl", immission has a similar effect on tree nutrition as litter removal: nutrients, contained in the deep layer can not be mobilized, neither by mycorrhizal nor by litter degrading fungi.

Wir danken unseren Mitarbeitern, Frau E. Mayrhofer, Frau S. Fink und Frau E. Fink, für die Hilfe bei den Auswertungen und die Durchführung der chemischen Analysen, Herrn M. Mair zusätzlich für die Photodokumentation.

Literatur

- Brenninger, C. (1981): Einfluß von SO_2 auf Wachstum, Photosynthese, Transpiration und Diffusionswiderstand junger Laub- und Nadelbäume unter Freilandbedingungen und bei künstlicher Begasung. Dissertation, Universität Innsbruck.
- Ernst, W. (1974): Schwermetallvegetation der Erde. Gustav Fischer, Stuttgart.
- Göbl, F. (1967): Mykorrhizauntersuchungen im subalpinen Wäldern. Mittl. Forstl. Bundesversanst. Wien, Heft 75/1976, 335—336.
- Göbl, F. (1968): Mykorrhizauntersuchungen an Jungfichten im Urwald von Brigels. Schweiz. Zeitschr. f. Forstw., Zürich, 119. Jg., Nr. 2, 148—150.
- Kloke, A. (1980): Richtwerte '80, Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden. Mitt. VDLUFA, H. 1-3, 9—11.
- Liss, B., H. Blaschke und P. Schütt (1983): Vergleichende Feinwurzeluntersuchungen an gesunden und erkrankten Altfichten auf zwei Standorten in Bayern — ein Beitrag zur Waldsterbensforschung. Eur. J. For. Path. 14 (1984), 90—102.
- Mejstrik, V. K. (1980): Proceedings of the IIIrd Intern. Conference Bioindicat. Deteriorationis Regionis, Sept. 1977, Lublice, Czechoslov. Ed. by J. Spaleny, Academia Praha, 1980.
- Meyer, F. H. (1984): Mykologische Beobachtungen zum Baumsterben. Allg. Forstzg. 39, 212—228.
- Riedl, H. (1984): „Rauschäden“ nichts Neues. Tiroler Forstdienst 27.1.
- Stienen, H., R. Backhausen, H. Schaub und J. Bauch (1984): Mikroskopische und röntgenenergiedispersive Untersuchungen an Feinwurzeln gesunder und erkrankter Fichten [*Picea abies* (L.) Karst.], verschiedener Standorte. Forstw. Cbl. 103, 262—274.

Anschrift der Verfasser: Dr. Friederike Göbl, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Außenstelle für subalpine Waldforschung, Hofburg, Rennweg, A-6020 Innsbruck; Dr. Franz Mutsch, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Institut für Standort, A-1131 Wien.

Eingelangt: November 1984.