

Speicherung von Radiocaesium in Moosen des Oberen Gauertais (Montafon/Vorarlberg)

von

Hermann Muhle
Brigitte Rabuser
Universität Ulm

Keywords: Mosses, Radiocaesium, Alps

Abstract: Accumulation of radioactive Caesium in mosses of the upper Gauer-Valley of the Austrian Alps (Montafon, Vorarlberg)

Mosses can be used as accumulation indicators for radioactive fallout of the Chernobyl accident

In the peat mosses decomposing parts may release radiocaesium and reaccumulation may occur in the upper parts of *Sphagnum* species, whereas the annual growth parts of *Hylocomium splendens* and other mosses tends to accumulate the radioactive compounds in a specific growth segment.

In the Western Austrian mountains the concentration of radiocaesium in mosses is increasing uphill for *Pogonatum urnigerum* on acidic soils, whereas in calcareous areas species like *Ptychodium plicatum* show an decrease in radioactive compounds. The great Variation in concentration of these compounds along elevational gradients of some other mosses is related to microhabitat distribution along the investigated transects.

Zusammenfassung

Moose können als Anreicherungszeiger für radioaktive Substanzen des Tschernobylunfalles dienen. Die abgestorbenen Torfmoosteile können radioaktives Caesium freisetzen und wieder in den wachsenden Bereich akkumulieren. Im Gegensatz dazu halten die jährlichen Wachstumsabschnitte des Etagenmooses (*Hylocomium splendens*) und andere Laubmoose die radioaktiven Substanzen in einem bestimmten Wachstumsabschnitt gebunden.

In den österreichischen Alpen des Montafons konnte ein Anstieg des Radiocaesiums auf sauren Böden mit steigender Meereshöhe festgestellt werden. Auf Kalkböden zeigte Material von *Ptychodium plicatum* dagegen mit zunehmender Höhe eine Abnahme, während andere Laubmoose entsprechend ihrer Kleinstandorte keinen Höhengradienten der Akkumulation erkennen ließen.

Einleitung

Viele Kryptogamen haben die Fähigkeit, Schadstoffe in großen Mengen über die Pflanzenoberfläche aufzunehmen. Dieses passive Akkumulationsverhalten in den Zellen von Moosen, Flechten und Algen wird häufig genutzt, um nähere Hinweise über den geochemischen Hintergrund z. B. eines Wassereinzugsgebietes zu erhalten, oder in einer Überwachungsfunktion die Ausbreitung von Verunreinigungen eines industriellen Verschmutzers nachzuweisen.

Schon GORHAM (1959) nutzte die Anhäufung von Radionukliden in Moosen, darunter auch Caesium 137, eines Isotops des Alkalimetalls der ersten Hauptgruppe. Er fand im Bereich der Englischen Seenplatte im Vergleich zu Phanerogamen viel höhere Werte in den Moosen. Auch im nordenglischen Einzugsgebiet der Wiederaufbereitungsanlage Sellafield haben sich *Pseudoscleropodium purum* und *Hypnum cupressiforme* als Bioindikatoren für Speicherung von Radionukliden bewährt (SUMERLING 1984). In experimentellen Studien von HEBRARD et al. (1972) konnte die Aufnahme von Radionukliden durch das Laubmoos *Grimmia orbicularis* gezeigt werden. Weitere Arbeiten von KULIKOV et al. (1976), HOFFMANN (1972) und RICKARD (1966) lassen deutlich erkennen, daß generell Moose als passive Speicherorganismen für Radionuklide geeignet sind.

Erst mit dem Reaktorunglück von Tschernobyl wurden so große Mengen an radioaktivem Material freigesetzt, daß es auch in Mitteleuropa zu größeren regionalen Anreicherungen kam (APSIMON et al. 1986; OBERHAUSEN 1987; LINDNER et al. 1988). Kurze Zeit nach dem Unfall und auch noch drei Jahre später konnte noch eine Erhöhung der Radioaktivität in Moosproben festgestellt werden (FEIGE et al. 1988; ELSTNER et al. 1989; HEINRICH 1987).

Untersuchungsprogramm

In der Folge des Reaktorunfalls in Tschernobyl vom 26. 4. 86 wurde im mittleren Deutschland das kleinräumige Kontaminationsmuster von NIEMANN et al. (1989) untersucht. 1989/90 lagen noch sehr wenig Informationen zu dem Verbleib der "radioaktiven Markierung" in alpinen Höhengradienten vor. So

wurde eine Studie im Montafon (Vorarlberg) geplant, der einige Messungen im Wurzacher Becken vorausgingen. Dieser Bereich Oberschwabens wurde gewählt, da hier sehr hohe Werte in Pilzen gemessen worden waren (DIETL 1986, 1989).

Untersuchungsgebiet

Geologie

Die Geländeuntersuchungen wurden im oberen Gauertal im Montafon (Österreich) am Talende im Gebiet um die Lindauer Hütte (1744 m) durchgeführt. Dieses ist ein 8,6 km langes Seitental der Ill und öffnet sich bei dem Städtchen Tschagguns. Dort mündet der Rasafeibach in die Ill der das Gauertal entwässert.

Die Wände des "Kessels" um die Lindauer Hütte, die selbst auf einem Moränenrücken steht, formen im Süden und Südosten die mächtigen Felsen der Drusen- und der Sulzfluh. Beide bestehen aus Tithon oder Malmkalk.

Im Norden an die Sulzfluh angelagert, sind die Matten von Tilisuna und mehrere Felsberge kristalliner Herkunft. Dazu gehört der sogenannte Bilkengrat aus Granitgneis und Ver- spalaflisch, der von NW nach SO verläuft und die Lindauer Hütte mit der Tilisuna Hütte verbindet.

Als Nordgrenze des Tales zieht ein Grat von der Geißspitze (2334 m) in nordwestlicher Richtung zum Öfakopf (2291 m). Sein Aufbau ist sehr inhomogen und reicht vom Musko- witgranitgneis und den Hornsteinkalken der Geißspitze zu den Aptychenkalken und Schiefen des Öfakopfes (HEISSEL et al. 1953-61)

Vegetation

Die Vegetation des Gebietes insbesondere die schützenswerten Biotope sind von GRABHERR (1983) und GRABHERR & POLATSCHKE (1986) erfaßt worden. Durch die variablen Gesteine finden sich neben reicher Kalkflora auch alle alpinen Vegetationseinheiten von bodensauren, silikatbeherrschten Böden (GAMS 1931).

Klima

Das Klima des Untersuchungsgebietes ist bestimmt durch seine Lage in den Ostalpen. So erhält das Gebiet seine Hauptniederschläge im Sommer (Juli/August), Winter und Frühling sind sehr trocken. Die weiteren Angaben

stammen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Regionalstelle für Tirol und Vorarlberg. Sie geben 10-jährige Mittel (1971-80), für den Raum Montafon, gemessen an der Station Obervermunt.

Station: Obervermunt Höhe:	1986m
Jährliches Temperaturmittel:	0,8° C
Mittlere Jahresschwankung zwischen dem wärmsten und dem kältesten Monat:	14,8° C
Zahl der Frosttage (Jahr):	220,0
Zahl der Eistage (Jahr):	96,3
Mittlerer Dampfdruck (Jahr):	5,0 mB
Mittlere relative Feuchte:	69,0 %
Zahl der heiteren Tage (Jahr):	67,3
Zahl der trüben Tage (Jahr):	145,6
Zahl der Tage mit Nebel (Jahr):	93,0
Zahl der Tage mit mindestens Niederschlag (Jahr):	179,8
Zahl der Tage mit mindestens 10 mm Niederschlag (Jahr):	29,5
Zahl der Tage mit Gewitter (Jahr):	12,2
Zahl der Tage mit Schneefall (Jahr):	97,1
Zahl der Tage mit mindestens 1 cm Schneehöhe	234,2
Zahl der Tage mit mindestens 50 cm Schneehöhe	176,0

Mittlere maximale Schneehöhe (cm):

Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
147	174	176	180	125	32	13	5	14	38	94	123

Mittlere Niederschlagsmenge vom 29. April 1986, 20 Uhr bis 3. Mai 1986, 20 Uhr (Vorarlberg): 10-15 mm (HAUNOLD et al. 1986)

Der zeitliche Verlauf der niederschlagsrelevanten Luftströmung für den 27. 4. 86 geht aus den Unterlagen vom MELUF (1987) hervor, wobei aber nicht ganz klar wurde, wo genau es in dem kritischen Zeitraum im engeren Untersuchungsgebiet Niederschlag gegeben hat.

Material und Methoden

Um methodenkritische Untersuchungen der Radioaktivitätsverteilung zu ermöglichen, wurden Voruntersuchungen in einem hochbelasteten Gebiet in Baden Württemberg durchgeführt (MELUF, 1987).

Die Hauptuntersuchungen wurden im Gauertal (Montafon, Vorarlberg) durchgeführt. Vor den eigentlichen Untersuchungen wurde gründlich die Moosflora des Oberen Gauertales untersucht und eine Artenliste mit kurzer Charakterisierung der Arten erstellt. In Tab. 1 werden die bedeutensten Arten vorgestellt, während in Tab. 2 die Verteilung auf die wichtigsten Kleinstandorte im engeren Untersuchungsgebiet dargestellt sind. Die Nomenklatur der Moose richtet sich nach FRAHM & FREY (1992).

Nach diesen Voruntersuchungen wurden zwei Pfade im Oberen Gauertal ausgewählt, mit entsprechender Höhenzunahme (von ca. 1700 m bis 2300 m), jedoch unterschiedlicher Geologie und Exposition.

Der erste Weg führt von der Lindauer Hütte (1744 m) zum Öfapaß (2291 m). Er verläuft in westlicher Richtung und liegt auf ganzer Länge offen da. Nach einem langgezogenen nur leichten Anstieg, zieht der Weg plötzlich steil aufwärts und gewinnt rasch an Höhe bis zum Gipfelpunkt bei 2291 m. In diesem Bereich stellt er gewissermaßen einen ansteigenden Taleinschnitt dar. Durch die Hänge der Drusenfluh stark beschattet, bleibt der Schnee hier bis weit in den Monat Juli hinein liegen. Die Probennahmestellen liegen im Kalkschotterfeld unterhalb der Drusenfluh, an dem der Weg entlang läuft. Dabei machen oft riesige Blöcke das Geröllfeld selbst unpassierbar. Diese sind zum Teil Abkömmlinge aus Schiefer und Sandstein vom Öfenkopf bzw. aus den roten Lagen ("couche rouge") des Drusenfluhmassives.

Ebenfalls an der Hütte beginnt der zweite Pfad, der über den sogenannten Bilkengrat in südöstlicher Richtung zur Tilisunahütte führt. Nachdem man beim Durchqueren des Porza- lengawaldes etwas an Höhe verliert, erreicht der Weg eine offen gelegene Senke, durchschreitet sie und zieht in mäßigem auf und ab an den Hängen der Sulzfluh entlang. Schließlich erreicht man den eigentlichen Bilkengrat, an dem der Weg in Serpentinaen zuerst am Südhang, dann auf dem Grat entlangläuft.

Der Bilkengrat ist aufgebaut aus Granitgneis und Flysch und trägt in den unteren Lagen stellenweise kleinere Fichtenwaldbestände, während in höheren Lagen bodensaure Zwergstrauchheiden das Bild bestimmen.

Tab. 1: Artenliste mit kurzer Charakterisierung der Arten.

a = acidophil, b = basiphil, n-b = neutro-basiphil, a-n = acido-neutrophil, n = neutrophil, a-b = acido-basiphil, xe = xerophil, hy = hydrophil, me = mesophil, he = hcliphil, sc = sciaphil, lu lucilug, s = saxicol, t = terricol, H = Humus besiedelnd, Ho = Holz besiedelnd

Laubmoose	Acidität	Licht	Feuchte	Substrat
Brachythecium erythrorrhizon	-	-	hy	-
Bryum capillare	a-b	-	xe	t
Bryum sp.	-	-	-	-
Campylium calcareum	b	-	xe	s/t
C. chrysophyllum	b	-	-	t
Cratoneuron commutatum	b	-	hy	s
Ctenidium molluscum	b	-	hy	s
Dichodontium pellucidum	n	-	hy	s
Dicranodontium denudatum	a	lu	-	H
Dicranum elongatum	a-n	-	xe-hy	s/t
Dicranum scoparium	a-n	-	xe	H
Distichium capillaceum	n-b	-	hy	s
Ditrichum flexicaule	b	he	xe-hy	s/t
Encalypta alpina	b	-	xe	t
E. streptocarpa	n-b	lu	-	s/t
Eucladium verticillatum	b	-	hy	s
Eurhynchium Striatum	a-b	lu	xe	t/H
Fissidens cristatus	b	lu	hy	s/t
Grimmia alpestris	n	he	xe	s
Hylocomium splendens	a-n	-	xe	t/H
Hypnum pallescens	-	-	-	Ho
H. sauteri	b	-	-	s
Mnium marginatum	-	lu	hy	t
Myurella julacea	n-b	-	xe	H
Orthothecium intricatum	b	lu	hy	s
O. rufescens	b	lu	hy	s
Plagiomnium affine	b	sc	hy	t
Plagiopus oederi	b	sc	hy	s
Pleurozium schreberi	a-n	-	-	H/t
Pohlia cruda	a-b	sc	hy	t
P. drummondii	a-n	-	-	-
Pogonatum urnigerum	a-n	-	xe	t
Pseudoleskea incurvata	-	-	xe-hy	s
Ptychodium plicatum	n	-	xe	t/s
Rhizomnium punctatum	-	-	hy	t/s/Ho
Rhytidiadelphus triquetrus	a-n	-	-	H
Sanonia uncinata	a-n	-	hy	t/s/Ho

(Fortsetzung Tab. 1)

Laubmoose	Acidität	Licht	Feuchte	Substrat
Schistidium apocarpum	n-b	he	xe	s
Timmia bavarica	b	sc	hy	t
Tortella bambergeri	b	-	-	s
Tortella tortuosa	n-b	-	xe	s
Tortula norvegica	b	he	xe	s
T. ruralis	b	he	xe	s
Lebermoose				
Barbilophozia floerkei	a	sc	-	H/s/t
B. lycopodioides	a	sc	-	t/s
Blepharostoma trichophyllum	a	-	-	Ho/H
Calypogeia neesiana	a	-	-	Ho/H
Lophocolea cuspidata	a	-	hy	H/t/s
Marchantia polymorpha	b	-	hy	-
Plagiochila asplenioides	a-n	lu	-	H/Ho
Preissia quadrata	b	sc	hy	t/s
Riccardia pinguis	n-b	-	hy	t/s
Scapania aequiloba	b	sc	me-xe	s
Sphenobolus minutus	a	sc	hy	Ho/H/s
Tritomaria exsecta	a	-	hy	t/Ho

Artenzusammensetzung der Proben

Aufgrund des unterschiedlichen Substrates der beiden Höhengradienten, kalkarmes Gestein des Bilkengrates - kalkreiches Gestein des Öfapaßweges, bestanden die Proben aus verschiedenen Arten.

Entlang des Öfapaßweges waren es *Tortella tortuosa* und *Ptychodium plicatum*, die auf den Blöcken des Gehängeschuttes in Höhen von 1750, 1850, 2000, 2120 und 2220 m gesammelt werden konnten. Dabei stammten beide Arten nicht immer von ein- und demselben Block und besetzten nicht gleich exponierte und gestaltete Seitenflächen und Nischen (Tab. 2). *Tortella tortuosa* besitzt außerdem einen zusätzlichen Sammelpunkt bei 2291 m.

Desweiteren war es möglich, zwei Sammelpunkte der Art *Hylocomium splendens* bei 1750 m und 2000 m und drei Meßpunkte der Art *Pogonatum urnigerum* bei 1750 m, 2000 m und 2291 m festzulegen.

Tab. 2: Verteilung der Arten auf die verschiedenen Untersuchungsgrößen (%)

Art	Große Blöcke	Mittelgroße Blöcke	Kleine Blöcke	Groß-nischen
Saxicole				
Brachythecium erythrorrhizon-	-	-	100	-
Cratoneuron commutatum	9,1	20,5	-	70,5
Ctenidium molluscum	30,2	19,5	-	50,3
Dichodontium pellucidum	-	-	-	100
Distichium capillaceum	43,6	20,7	-	37,5
Eucladium verticillatum	100	-	-	-
Grimmia alpestris	100	-	-	-
Hypnum sauteri	30,7	69,1	-	-
Ortothecium intricatum	68,9	31,1	-	-
O. rufescens	60,7	-	-	39,3
Plagiopus oederi	-	-	-	100
Pseudoleskea incurvata	7	19,8	52,7	20,5
Schistidium apocarpum	17,6	23	55,7	3,7
Tortella bambergeri	-	22,5	-	77,5
T. tortuosa	22,5	17,5	42	18
Tortula norvegica	10,3	7,7	68,6	13,3
Tortula ruralis	100	-	-	-
Scapania aequiloba	17,5	55,3	-	27,2
Gesamtanteil	34,3	17	12,2	36,4
Saxi-/terricole				
Campylium calcareum	30,7	69,3	-	-
Dicranum elongatum	100	-	-	-
Ditrichum flexicaule	45,5	24,4	21,7	8,4
Encalypta streptocarpa	100	-	-	-
Fissidens cristatus	6,2	14,1	31,2	48,5
Ptychodium plicatum	5,3	21	53,1	20,6
Barbilophozia lycopodioides	12,9	87,1	-	-
Preissia quadrata	-	-	-	100
Riccardia pinguis	100	-	-	-
Gesamtzahl	44,5	24	11,8	20

(Fortsetzung Tab. 2)

Art	Große Blöcke	Mittelgroße Blöcke	Kleine Blöcke	Groß-nischen
Terricole				
Bryum capillare	18,2	34,4	-	47,4
Campylium chrysophyllum	34	-	-	66
Encalypta alpina	7,9	-	-	92,1
Mnium marginatum	15,2	6,9	30,5	47,4
Plagiomnium affine	-	69,9	-	30,1
Pogonatum urnigerum	-	-	-	100
Pohlia cruda	53,2	17,2	-	29,6
Timmia bavarica	10,7	48	-	41,3
Gesamtanteil	17,4	22,1	3,8	57
Humus besiedelnd				
Dicranodontium denudatum				100
Dicranum scoparium	56,7	23,3	-	20
Eurhynchium Striatum	-	-	-	100
Hylocomium splendens	54,1	45,9	-	-
Hypnum pallescens	-	-	-	100
Myurella julacea	100	-	-	-
Pleurozium schreberi	100	-	-	-
Rhytidiadelphus triquetrus	19,2	43,4	-	37,4
Barbilophozia floerkei	-	-	-	100
Blepharostoma trichophyllum	24,4	7,9	-	67,7
Calypogeia neesiana	100	-	-	-
Plagiochila asplenioides	14	15,8	-70	-
Sphenobolus minutus	100	-	-	-
Tritomaria exsecta	100	-	-	-
Gesamtanteil	47,8	9,7	5	37,5
Ubiquitär				
Rhizomnium punctatum	100	-	-	-
Sanionia uncinata	20,5	-	-	79,5
Lophocolea cuspidata	-	36,7	-	63,3
Marchantia polymorpha	24,8	-	-	75,2
Gesamtanteil	36,3	9,2		54,5

(Fortsetzung Tab. 2)

Art	Große Blöcke	Mittelgroße Blöcke	Kleine Blöcke	Groß-nischen
Sonstige				
Bryum sp.				
Pohlia drummondii	-	-	-	100

Aus den beiden letztgenannten Arten bestanden auch die Proben, die entlang des Bilkengrates gesammelt wurden.

Hylocomium splendens stammte aus den Höhen 1760, 1850, 2000 und 2100 m aus der Vaccinium-Zwergstrauchheide des Bilkengrates. Der erste Sammelpunkt bei 1650 m lag dagegen am Fuße des Sulzfluh nordhanges, ebenfalls zwischen Zwergsträuchern. In einem hanglagigen Fichtenwäldchen auf Humus lag der zweite Standort bei 1710 m.

Bei der zweiten Art *Pogonatum urnigerum* war der erste Sammelpunkt in einer Höhe von 1660 m am Rande des Porzallengawaldes, der nächste bei 1710 m am Südwest-Hang des Bilkengrates zwischen Zwergsträuchern. Alle folgenden Meßpunkte (1760, 1850, 1900, 2000 und 2100 m) fanden sich zwischen Granitblöcken, die mit wenig Erde bedeckt waren und in offener Zwergstrauchheide lagen.

Sammeln und Probenaufbereitung

Gemäß der Verfügbarkeit wurde versucht, in Abständen von nicht mehr als 100 Höhenmetern Proben in ausreichender Menge zu nehmen. Wegen der abnehmenden Dichte der Moosbesiedlung mit zunehmender Höhe gestaltete sich dies etwas schwierig, und es konnten nicht immer alle gewünschten Arten an den einzelnen Standorten gesammelt werden. Das Moosmaterial wurde noch an Ort und Stelle von Fremdmaterial wie Holz und Erde gereinigt und in mehrere ineinandergeschobene Papiertüten verpackt.

Zum Trocknen wurden die eingetüteten Proben im beheizten Trockenraum der Hütte ausgelegt, mit Papiertüchern abgedeckt und etwa 4-5 Tage bei ca. 35°C getrocknet. Der weitere Transport erfolgte nach dem Trocknen in Plastiktüten.

Die Entnahme und Aufbereitung der Proben aus dem Wurzacher Becken erfolgte ähnlich, doch hier wurden darunterliegende Humus- bzw. Weißtorfschichten separat eingesammelt, von Fremdanteilen befreit und im Trockenschrank bei 50°C für 4 Tage getrocknet.

Nach nochmaliger Säuberung des Trockenmaterials erfolgte eine vertikale Zerteilung der einzelnen Moospflänzchen, um feststellen zu können, in welchen Abschnitten sich der Hauptanteil der Radioaktivität befindet. Dabei ist eine relative Alterszuordnung möglich, da jüngere Moosteile meist deutlich von Wuchsperioden früherer Vegetationsperioden getrennt werden können. *Hylocomium splendens* und häufig auch *Thuidium tamariscinum* bilden nach TAMM (1953) und CALLAGHAN et al. (1978) während jeder Wachstumsphase einen Seitenast, und verleiht so den Moosen ihre stockwerkartige Gliederung. *Hylocomium* zeigt diese Abgrenzung der einzelnen Etagen dabei sehr viel eindeutiger als *Thuidium*, welches aber auch meist einen deutlich erkennbaren Jahreszuwachs zeigt.

Zur Fraktionierung wurden jeweils zwei Etagen von oben nach unten zusammen abgetrennt, so daß sich drei Abschnitte unterschiedlichen Alters ergaben.

Die Abgrenzung dder Wuchsabschnitte bei *Ptychodium plicatum*, *Tortelia tortuosa* und *Pogonatum urnigerum* war schwierig. Da sie keine eindeutige Kennzeichnung der jährlich hinzukommenden sproßabschnitte zeigen, trennte man die oberen, noch grünen Stämm- chenteile von den unteren braun gefärbten und damit nicht mehr assimilierenden Teilen ab. Als eine dritte Fraktion konnten die blattlosen, unterirdischen Stämmchen der *Pogonatum*- Art vom Bilkengrat abgegrenzt werden. Zuletzt entfernte man von *Polytrichum commune* die Blättchen, so daß sie getrennt vom Stämmchen gemessen werden konnten.

Probenaufbereitung im Labor

Die mit der Schere zerkleinerten Moosfraktionen wurden in der Achatkugelmühle bei 40 U/min bis zur Pulverform zermahlen. Die Mahldauer variierte je nach Art zwischen einigen Minuten (*Sphagnum*) und mehreren Stunden (*Polytrichum*). Das erhaltene Moospulver wurde gewogen und in Plastikproberöhrchen eingefüllt.

Radioaktivitätsmessung

Die Messung der caesiumspezifischen Radioaktivität (Cs-134, Cs-137) der Proben erfolgte im Isotopenlabor der Universität in einem Ge(Li)- Halbleiterdetektor im Energiefenster von 662 keV. Die Zählzeit betrug je 40 min. Zur Bestimmung der Untergrundstrahlung wurden die Probenröhrchen vor dem Füllen ebenfalls jedes für sich je 40 min. gemessen. Man erhielt für

jedes Röhrchen eine spezifische Hintergrundstrahlung, die insgesamt zwischen 23 und 27 cpm lag.

Die Nacliweisgrenze der Meßmethode ergab sich aus der Formel

$$A_{\min} = \frac{U_{\text{cpm}}}{t}$$

wobei U = Untergrund in cpm, t = Zählzett. Sie betrug $A_{\min} = 2,3$ cpm

Auswertung der Meßergebnisse

Nach Abzug der Hintergrundstrahlung errechnete sich die Caesium-Aktivität der Proben unter Zuhilfenahme einer organischen Substanz bekannter Aktivität. Die Ergebnisse sind angegeben in Bq/kg Trockengewicht. Aufgrund der meist geringen Menge an Probenmaterial konnte nur mit den Proben aus Bad Wurzach/Dietmanns und wenigen Proben aus Österreich eine Mehrfachbestimmung durchgeführt werden.

Die daraus errechneten Standardabweichungen ergaben im Mittel eine Abweichung von 2,2 %.

Ergebnisse

Proben Wurzacher Becken

An den Proben aus Bad Wurzach, die auch Humus und Weißtorf beinhalten, kann die Ver teilung der Radioaktivität zwischen Moos und Boden und damit das Ausmaß der Aufnahme, des Transportes und der Speicherung des radioaktiven Caesiums verdeutlicht werden. Es können neben den Arten auch die Standorte unterschieden werden: Fichtenwald mit Humusboden - Hochmoor mit Torfuntergrund.

Aus dem Fichtenwald bei Dietmanns (Wurzacher Becken) stammen *Thuidium tamaris-ci- num*, *Polytrichum commune* und *Sphagnum palustre*. Die Meßergebnisse zeigt Tabelle 3.

Tab.: 3 Caesium-Aktivität in Moosen und Humus aus einem Fichtenwald bei Dietmanns (Bq/kg Trockengewicht)

	Thuidium	Sphagnum	Polytrichum
Humus	2.000	12.955	5.507
Pflanzen	8.077	8.090	11.764
in%	60	62	29
	40	38	71

Mit Werten von 5.000 bis 13.000 Bq/kg Trockengewicht ist die Caesium-Aktivität in den drei Moosen sehr hoch.

Auffällig unterschiedlich ist die Verteilung zwischen Humus und Pflanze bei *Thuidium* und *Sphagnum* gegenüber *Polytrichum*.

Polytrichum zeigt im Mooskörper über 70 % der Strahlung, der darunterliegende Humus nur 29 %. Demnach muß in den nach Tschernobyl gewachsenen Pflanzenteilen die Aufnahme von Caesium-137 in hohen Konzentrationen verlagert worden sein. Dabei wurde das Caesium von alten in jüngere Pflanzenteile transportiert und zwar so effektiv, daß auch nach drei Jahren der größte Teil in der Moospflanze erscheint. *Polytrichum* ist dazu imstande aufgrund seines gut ausgebildeten Leitgewebesystems (HEBANT 1977).

Im Vergleich zu *Polytrichum* sind die Ergebnisse für *Thuidium* und *Sphagnum* genau gegensätzlich. Im Humus wurden ca. 60 %, in den Moosen selbst nur 40 % der Radioaktivität gemessen, d. h., daß *Thuidium* und *Sphagnum palustre* aus einem höheren Substratangebot geringere Mengen an Caesium aufgenommen haben als *Polytrichum* bzw. nicht in der Lage sind, das gespeicherte Caesium in neugebildete Pflanzenteile zu transportieren.

Wie Tab. 4 zeigt, ist auch bei den Sphagnen aus dem Hochmoorrand (*S. rubellum*, *S. medium*) die Radioaktivität mit Werten bis 18.000 Bq/kg Trockengewicht sehr hoch. Dabei gleichen sich die Aktivitäten beider Arten sehr, was sich aus ihren Standorten erklären läßt, die nur wenige Meter auseinander liegen.

Tab. 4: Caesium-Aktivität in Sphagnen und Weißtorf aus dem baumfreien offenen Moor (Bq/kg Trockengewicht)

	Sphagnum medium	Sphagnum rubell um
Weißtorf	6.645	7.843
Pflanze	17.968	17.880
in%	38	43
	62	57

Beide Arten zeigen in der vitalen Pflanze sehr viel höhere Caesium-Aktivität als im Weißtorf, (im Verhältnis ca. 60 : 40). Dies bedeutet, daß das in das Moor eingetragene Caesium zum größten Teil von den Sphagnen inkorporiert wurde und dort über die Jahre verblieb. Dazu mußten die Torfmoose in der Lage sein, über den Stofftransport Caesium in neu gebildete Pflanzenteile zu verlagern. Da sie kein Leitgewebesystem besitzen, könnte diese Substanz

innerhalb der Rindenzellen bzw. im interorganen Kapillarsystem zusammen mit dem Wasserstrom (BUCH 1947) verlagert worden sein.

Neben den bereits diskutierten Ähnlichkeiten zwischen *S. palustre* und *Thuidium* fallen die Übereinstimmungen in der Aktivitätsverteilung zwischen *Polytrichum* und den beiden Sphagnen aus dem Wurzacher Ried auf. Beide Gruppen zeigen höhere Aktivitäten in der Pflanze im Vergleich zum Untergrund. Dabei sind *Polytrichum* und *Sphagnum* in ihrer Anatomie verschieden. Man erkennt, daß sich die Ergebnisse mit dem Substrat ändern. Die Caesium-Aufnahme läuft über Ionenaustausch, wobei Kationen gegen H⁺ - Ionen ausgetauscht werden (CLYMO 1973; BREHM 1968). Da Caesium-Ionen sich wie Kalium-Ionen verhalten, wird es in Konkurrenz zu diesen in die Pflanze aufgenommen. Die Affinität zu Kalium-Ionen ist hierbei größer als zu Cs-137 (HORAK 1986), d. h. je größer die Konzentration von Kalium im Substrat ist, umso kleiner ist die Aufnahme von Caesium.

Im mineralstoffarmen Hochmoor hat Caesium somit größere Chancen von den Sphagnen inkorporiert zu werden als im nährstoffreicheren Fichtenwald. Hier wird es zusätzlich an Bodenbestandteile gebunden und festgehalten (BOVARD und GRAUBY 1966). Dagegen bleibt es im sauren Moorwasser verfügbar.

Verteilung der Radioaktivität in verschiedenen Abschnitten der Moose

Sprosse unterschiedlichen Alters

Bei sämtlichen Arten kann man eine Abnahme der Radioaktivität von den älteren zu den jüngeren Pflanzenteilen erkennen (Tab. 5 und 6).

Eine Aufnahme bzw. Speicherung von Caesium scheint demnach in früheren Vegetationsperioden erfolgt zu sein, wobei nur ein Teil des Caesiums mit in die Neubildung von Sproßabschnitten eingeschlossen wurde. Die größte Menge verbleibt in den früher gebildeten Abschnitten oder den oberflächennahen älteren Pflanzenteilen die vor 1986 gewachsen waren und das Radiocaesium passiv eingelagert halten.

Eine Erklärung liegt wiederum im Vorhandensein eines Leitgewebesystems, das nur bei den Polytrichales vollständig, mit Verbindungen zwischen Blattspur und Zentralstrang ausgebildet ist (HEBANT 1977). Bei allen anderen Ordnungen fehlt es oder zeigt sich nur mangelhaft. *Pogonatum urnigerum* steht zwar in der Ordnung Polytrichales, verhält sich aber nicht anders als die übrigen untersuchten Moose. Demnach gehört es zu dem Organisationstyp

unter den Polytrichales, die nach HEBANT (1977) nur eine sehr lose Verbindung zwischen Blattspur und Zentralstrang aufweisen.

Zuordnung der Sproßteile zu bestimmten Jahren

Hylocomium splendens zeigt zwei Wachstumsschübe pro Jahr, einen im Frühjahr, den anderen im Herbst. Dabei wachsen die einzelnen Seitenzweige nur zwei Jahre lang. Sie bilden erst im zweiten Jahr selbst wieder neue Seitensprosse, die stockwerkartig auf den älteren entstehen. Zur Messung wurden jeweils zwei Etagen als eine Fraktion zusammengefaßt. Ordnet man den obersten Abschnitt dem Jahr Null zu (1989), kann man die einzelnen anderen Teile datieren: jung = Sproßteile von 1989 und 1988, mittelalt = von 1988, 1987 und teilweise 1986, alt = 1986 und früher. Damit fallen die hohen Caesium-Aktivitäten der mittelalten und besonders der älteren Abschnitte in das Jahr, in dem sich das Reaktorunglück in Tschernobyl ereignete (Abb. 1).

Im Gegensatz zu *Hylocomium* konnten bei *Polytrichum commune* der jeweilige Jahreszuwachs nicht sicher getrennt werden, aber eine Fraktionierung in Stämmchen und Blättchen war möglich. Aus der getrennten Messung von Stämmchen und Blättchen traten folgende Werte zu Tage:

Stämmchen 9.764 Bq/kg Trockengewicht
Blättchen 9.274 Bq/kg Trockengewicht

Tab.: 6 Meßwerte der Arten am Bilkengrat (in Bq/kg Trockengewicht)

Höhe / Art	<i>Hylocomium splendens</i>				<i>Pogonatum urnigerum</i>			
	alt	mittel	jung	gesamt	alt	mittel	jung	gesamt
1710	310	229	179	718	0	0	0	0
1650	600	54	176	1317	913	758	707	2378
1710	0	0	0	0	151	107	60	315
1760	3834	2377	1457	7668	693	528	274	1495
1850	244	117	74	435	0	0	0	0
1900	0	0	0	0	1128	774	375	2277
2000	2012	865	704	3581	853	642	375	1871
2100	865	536	328	1730	4844	3207	2010	10061
Mittelwert des Anteils an der Gesamtbelastung in %	50	31	19		48	34	19	

Tab.: 5 Meßwerte der Arten am Öfapaß (in Bq/kg Trockengewicht)

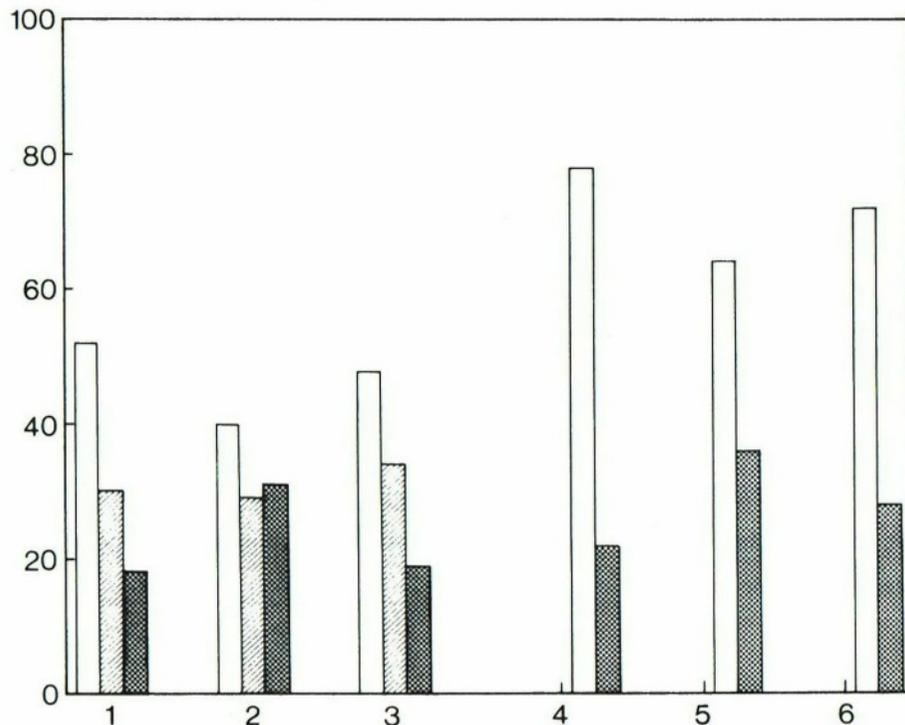
Höhe/Art	<i>Hylocomium splendens</i>				<i>Pogonatum urnigerum</i>			<i>Tortella tortuosa</i>			<i>Ptychodium plicatum</i>		Mittelwert des Anteils an der Gesamtbelastung in %
	alt	mittel	jung	gesamt	alt	jung	gesamt	alt	jung	gesamt	alt	gesamt	
1750	1903	1092	684	3679	1165	642	1807	3063	839	3902	533	718	
1850	807	414	277	1498				1369	436	1805	786	918	
2000					366	273	639	2218	1180	3398	18975	22357	
2120								1565	544	2109	2723	3404	
2220								892	462	1354	4889	7534	
2291					639	255	894				706	947	
Mittelwert des Anteils an der Gesamtbelastung in %	53	29	18		64	36		72	28		78	22	

Die Differenz beträgt nur 5 %, so daß man sagen kann, die Caesium-Konzentration verteilt sich gleich-mäßig zwischen beiden Pflanzen-teilen. Durch das hochentwickelte Leitgewebesystem von *Polytrichum commune* können Mineralstoffe einheitlich über die ganze Pflanze verteilt werden, wobei sich keine besondere Speicherfunktion bestimm-ter Organe speziell für Caesium erkennen läßt.

Radioaktivität in verschiedenen Moosen entlang eines Höhengradienten

Nachdem bisher die Aufnahme und Verteilung des radioaktiven Caesiums in verschiedenen Moosarten im Vordergrund standen, soll nun erläutert werden, ob sich aus den Messungen entlang zweier Höhengradienten Zusammenhänge zwischen Caesium-Gehalt und geographischer Höhe erkennen lassen.

Die auf diesem Höhenweg ausreichend sammelbaren Proben bestehen aus den Arten *Pty- chodium plicatum*, *Tortelia tortuosa*, *Hylocomium splendens* und *Pogonatum urnigerum* (Tab. 5).



Ptychodium plicatum

Ptychodium plicatum konnte über den gesamten Wegverlauf von 1750 bis 2291 m entnommen werden. Als Kalkfelsesmoos stammt es von den Kalkblöcken in den Geröllfeldern entlang des Weges. Dabei variiert die Exposition und der Wuchsort am Fels bei jedem Standort.

Abbildung 2 zeigt die Caesium-Werte mit zunehmender Höhe. Für *Ptychodium* schwanken sie stark. Während zunächst ein nur leichter Anstieg von 718 auf 918 Bq/Ag erfolgt, erscheint bei 2000 m abrupt der extrem hohe Wert von über 22.000 Bq. Es ist die für dieses Gebiet höchste Caesium-Konzentration überhaupt. Nach diesem Gipfel sinken die ermittelten Aktivitäten wieder stark ab, wobei ein zweites, jedoch tiefer liegendes Maximum bei 2220 m erreicht wird. Am höchsten Punkt bei 2291 m sinkt die Aktivität mit 947 Bq fast wieder auf die Ausgangswerte von 1750 und 1850 m.

Insgesamt läßt sich sagen, daß in größeren Höhen auch steigende Konzentrationen gefunden wurden. Mit Ausnahme des Maximums bei 2000 m und dem Meßpunkt in 2291 m nehmen die Werte stetig zu.

Tortella tortuosa

Auch bei *Tortella* waren die Probennahmestellen sehr inhomogen, aus ähnlichen Gründen wie bei *Ptychodium* ausgeführt.

Abb. 3 kennzeichnet die gemessene Caesium-Aktivität in den gesammelten Polstern von *Tortella* entlang des Öfapaß-Weges.

Man sieht, daß auch *Tortella* ein Maximum bei 2000 m besitzt, dies jedoch näher an den anderen Meßwerten liegt. Von diesem Punkt an fallen die Aktivitäten mit zunehmender Höhe ab und erreichen am höchsten Punkt bei 2220 m das Minimum der Meßreihe. Der größte gemessene Wert liegt für *Tortella* bei 1750 m mit 3.902 Bq/kg Trockengewicht. Zusammenfassend kann man sagen, daß *Tortella* nur mäßig starke Schwankungen der Radioaktivität im Verlauf des Höhengradienten besitzt, und daß man keine eindeutige Tendenz über eine Zu- oder Abnahme des Caesium-Gehaltes mit steigender Höhe feststellen kann.

Abb.: 1 Mittelwerte der Verteilung der Caesium-Aktivität in Pflanzenabschnitten verschiedenen Alters (%) 1 = *Hylocomium splendens*, 2 = *Thuidium tamariscinum*; 3 = *Ptychodium plicatum*, 4 = *Pogonatum urnigerum* (Öfapaß), 5 = *Pogonatum urnigerum* (Bilkengrat), 6 = *Tortella tortuosa*

Abb.: 2 Caesium-Aktivität in Proben von *Ptychodium plicatum* aus verschiedenen Höhen entlang des Öfapaßweges. Die durchgehende Linie zeigt den Höhenverlauf des Weges.

schwarz: ältere Pflanzenabschnitte,
 schraffiert: jüngere Pflanzenabschnitte
 leer: Gesamtwert

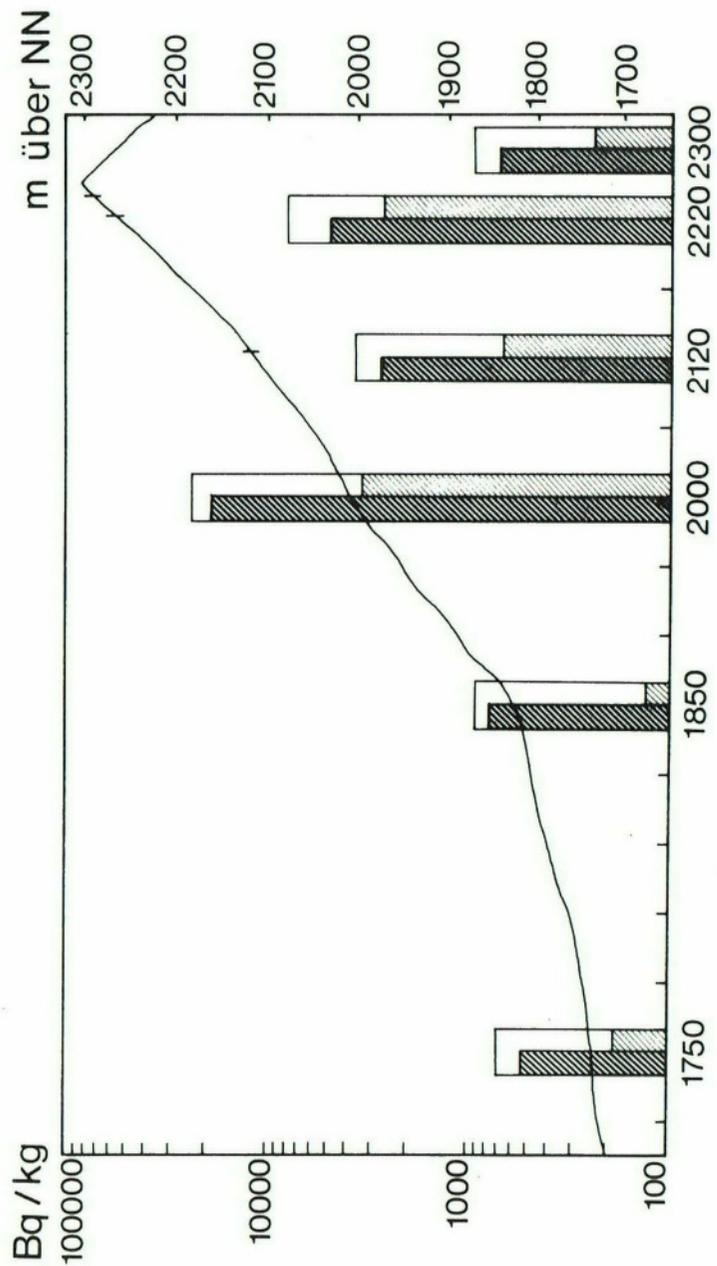
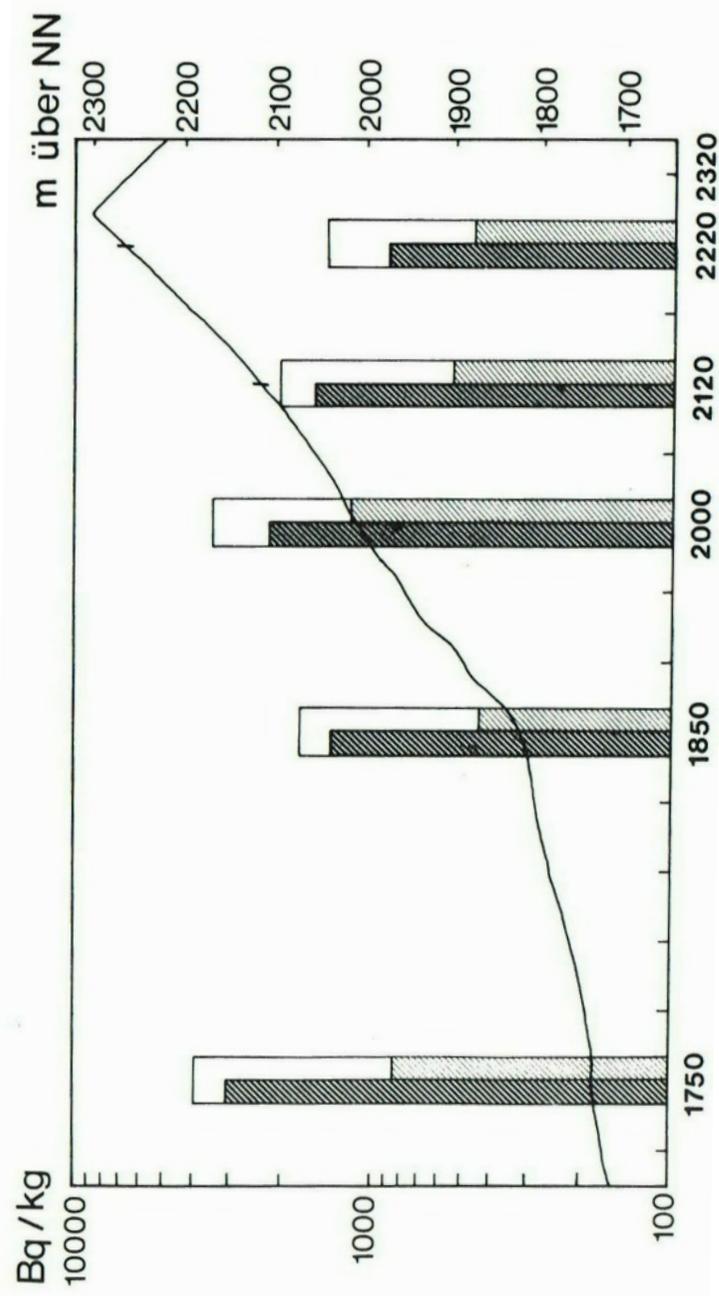


Abb.: 3 Caesium-Aktivität in Proben von *Tortelia tortuosa* aus verschiedenen Höhen entlang des Öfapaßweges. Die durchgehende Linie zeigt den Höhenverlauf des Weges.

schwarz: ältere Pflanzenabschnitte
 schraffiert: jüngere Pflanzenabschnitte
 leer: Gesamtwert



Hylocomium splendens* und *Pogonatum urnigerum

Anders als bei den obengenannten Arten handelt es sich bei *Hylocomium* und *Pogonatum* um kalkmeidende Moose. Beide sind säuretolerant und somit im Kalkgebiet am Öfapaß nur auf rohhumusbedeckten Blöcken bzw. auf kalkarmem Gestein, das vom naheliegenden Geißspitzengrat stammt, zu finden. Von *Hylocomium* konnten zwei, von *Pogonatum* drei Proben in unterschiedlicher Höhe genommen werden. Die erste lag bei beiden in 1750 m und beträgt bei *Hylocomium* 3.679 Bq, bei *Pogonatum* 1.807 Bq. Der zweite Meßpunkt bei 2000 m ergibt wiederum bei beiden niedrigere Werte als bei 1750 m. Damit zeigen sie im Bereich von 1750 bis 2000 m ebenso wie *Tortella* eine Abnahme der Radioaktivität, während *Ptychodium* stark zunehmende Werte aufweist.

Für *Hylocomium* und *Pogonatum* verringern sich diese Konzentrationen um die Hälfte, für *Tortella* mißt man dagegen nur eine geringe Abnahme.

Bilkengrat

Für diesen Höhenweg konnten ausreichende Mengen von *Pogonatum urnigerum* und *Hylocomium splendens* zwischen 1650 und 2200 m gesammelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 und in Abbildung 4 und 5 dargestellt.

Pogonatum urnigerum

Das Sammeln der Proben von *Pogonatum* erfolgte mit Ausnahme der ersten Probennahme gleichmäßig entlang des Weges. Der erste Standort bei 1660 m befand sich noch vor dem eigentlichen Bilkengrat am Rande des Porzalengawaldes in einer Senke.

Aus der Abbildung 4, die die Meßergebnisse bei Höhenzunahme zeigt, erkennt man ab 1700 m deutlich ansteigende Caesium-Konzentrationen. Ab dieser Höhe verläuft der Weg an den Hängen des Bilkengrates.

Obgleich bei 2000 m eine leichte Abnahme abgelesen werden kann, ist doch deutlich die Tendenz ansteigender Radioaktivität im Verlauf des Weges erkennbar.

Abb.: 4 Caesium-Aktivität in Proben von *Pogonatum urnigerum* aus verschiedenen Höhen entlang des Bilkengrates. Die durchgehende Linie zeigt den Höhenverlauf des Weges

schwarz: älteste Pflanzenabschnitte
schraffiert: mittelalte Pflanzenabschnitte
gepunktet: jüngste Pflanzenabschnitte
leer: Gesamtwert

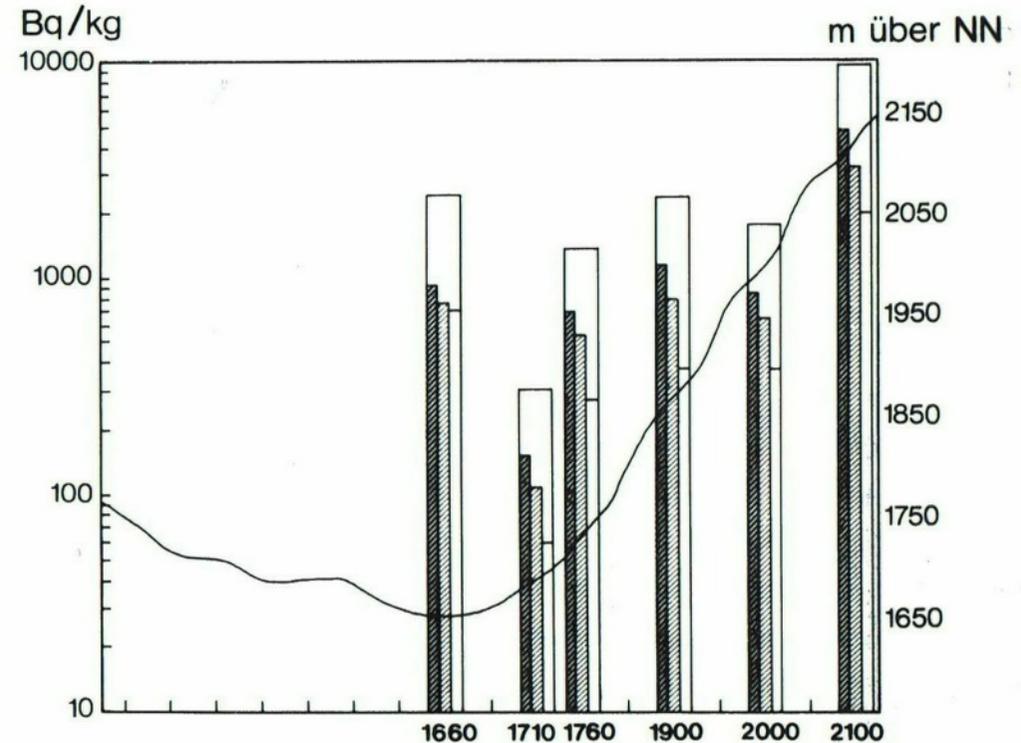
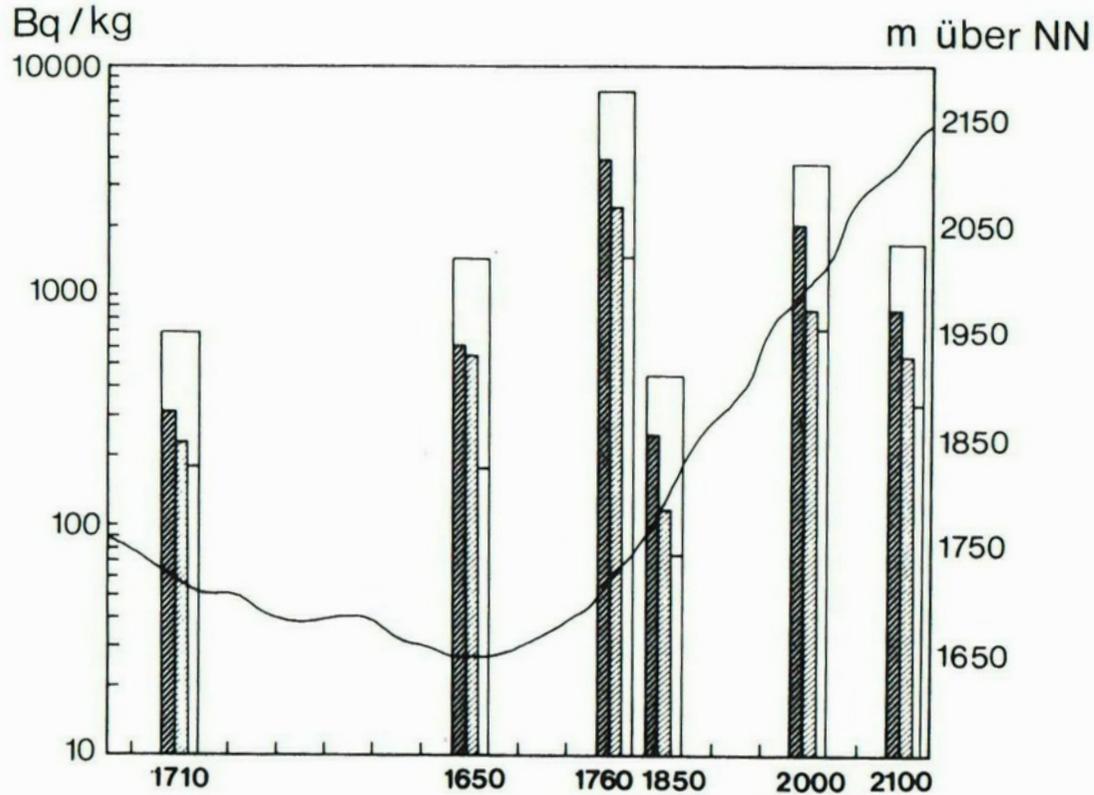


Abb.: 5 Caesium-Aktivität in Proben von *Hylocomium splendens* aus verschiedenen Höhen entlang des Bilkengrates. Die durchgehende Linie zeigt den Höhenverlauf des Weges.

schwarz: älteste Pflanzenabschnitte
 schraffiert: mittelalte Pflanzenabschnitte
 gepunktet: jüngste Pflanzenabschnitte
 leer: Gesamtwert



Hylocomium splendens

Der Kurvenverlauf für *Hylocomium* zeigt im Gegensatz zu *Pogonatum* keine eindeutigen Tendenzen (Abb. 5). Es gibt zwei Maxima, einmal bei 1750 m mit ca. 7.600 Bq/kg, zum anderen bei 2000 m mit ca. 3.500 Bq. Alle anderen Werte liegen niedriger, womit starke Schwankungen in den Meßergebnissen bei Höhenzunahme auftreten. Wie bei *Pogonatum* liegt der erste Standort (1710 m) noch außerhalb des Bereiches Bilkengrat, diesmal im Porzalengawald auf Humus. Alle anderen Probenahmestellen befanden sich auf dem Weg am Grat und unterschieden sich in ihrer Ökologie. Bei 1850, 2000 und 2100 m wuchs *Hylocomium* auf mineralischer Erde zwischen Heidelbeersträuchern in offener Zwergstrauchheide. Die Proben von 1750 m

stammen von einem Steilhang aus einem kleinen Fichtenwäldchen am Bilkengrat.

Diskussion

Die Abhängigkeiten der Caesium-Aufnahme zeigten sich deutlich an den Analysen aus dem Bad Wurzacher Becken. Man kann zusätzlich zum Einfluß des Substrates auch die Auswirkungen der unterschiedlichen Anatomie der diversen Arten die Caesium-Akkumulation erkennen. Die Moosproben stammen von verschiedenen Standorten (Fichtenwald und offenes Moor) mit jeweils anderen Arten von Moosen. Zwischen den Arten aus dem Fichtenwald, die insgesamt hohe Werte zeigten, ergaben sich Differenzen dahingehend, daß die größten Caesium-Aktivitäten bei *Polytrichum* in der Pflanze selbst, bei *Thuidium* und *Sphagnum palustre* in der Unterlage erschienen.

Sphagnum und *Thuidium* gehören zu den ektohydren Moosen (BUCH 1947) und besitzen demnach gar kein oder ein nur unzureichend ausgebildetes Leitgewebe (HEBANT 1977).

Sie nehmen Mineral- und Nährstoffe direkt über die Blattoberfläche auf und speichern sie dort. Ein Austausch zwischen den einzelnen Organen findet nur in geringem Maße statt (BUCH 1947). Deswegen ist anzunehmen, daß die geringere Radioaktivität in *Thuidium* und *Sphagnum* darauf beruht, daß die Caesium-Aufnahme bereits geringer war (schnelle Absättigung der Caesium-Bindungsstellen) bzw. das gespeicherte Caesium mit den "alten" Moosteilen wieder dem Humus zugeführt wurde und dort gebunden bleibt (HORAK 1986). Da sie alle aus dem Wurzacher Becken stammen, können die Unterschiede nicht im Eintrag des Caesiums mit der Luft und dem Regen liegen. Dies beweist auch die Ähnlichkeit der Höchstwerte (ca. 12-13.000 Bq/kg). Nach GREBE (1918) und HEBANT (1977) besitzt *Polytrichum* ein gut ausgebildetes Leitgewebesystem mit Hydroiden und Leptoiden zum Wasser- und Stofftransport innerhalb des Pflanzenkörpers. Zentralstrang und Blattspur stehen darüberhinaus in Verbindung miteinander. Außer über die Blattoberfläche kann *Polytrichum* auch über die Rhizoiden und das unterirdische Rhizom Wasser und Nährstoffe aufnehmen und über einen Transpirations- und Assimilatestrom über den ganzen Pflanzenkörper verteilen (BUCH 1945). Damit erfolgt die Caesium-Aufnahme auch in späteren Jahren aus dem Boden, und eine Fixierung findet auch in jüngeren Sproßteilen statt. *Thuidium* dagegen besitzt keinen Zentralstrang und nimmt Ionen über die Oberfläche auf. Dazu gehört ein kapillares Wassertransportsystem bestehend aus dem Stengelfilz der Paraphyllien und Rhizoiden (GREBE 1918).

Thuidium nimmt Caesium nur über direkte Blattkontamination oder aus dem aufgesaugten Wasser auf; zu dem im Rohhumus fixierten Caesium hat es keine Verbindung.

Ähnlich sieht es für *Sphagnum palustre* aus. Ihm fehlt ebenfalls ein Zentralstrang. Wasseraufnahme, -Speicherung und -leitung erfolgt sehr effektiv durch die toten Rindenzellen.

Wie *Thuidium* hat auch *Sphagnum* relativ große Mengen an Caesium aufgenommen. Daß die Hauptmenge davon aus Tschernobyl stammt, zeigt die Tatsache, daß bei der fraktionierten Messung die höchsten Aktivitäten in den ältesten Abschnitten zu finden sind.

Da *Thuidium* im Gegensatz zu *Polytrichum* keinen Zentralstrang besitzt, ist es nur schwer in der Lage, die aufgenommenen Mineralstoffe im Gewebe über weitere Strecken zu transportieren. Es verbleibt in den Teilen der Pflanze, die es inkorporierten.

Vergleicht man *Polytrichum* und die Torfmoose aus dem Hochmoor, die ebenfalls den Hauptanteil der Radioaktivität im Pflanzenkörper aufweisen (nicht im Torf), erkennt man deutlich höhere Absolutwerte in den Torfmoosen (12.000 im Vergleich zu 18.000 Bq/kg), obwohl beide Standorte nur wenige Kilometer voneinander entfernt liegen. Es bestätigt die Vermutung, daß durch Fichtenkronen bereits radioaktive Teilchen abgefangen wurden, während im freiliegenden Moor der regionale Eintrag gefunden wurde. Entsprechendes berichten ECKL et al. (1984) bei der Untersuchung von Flechten auf Radionuklide. Nach ihren Angaben akkumulieren epiphytische Arten Caesium in geringerer Dosis, da sie durch die Baumkronen geschützt sind.

Zwischen *Polytrichum* und den beiden *Sphagnum*-Arten aus dem Moor differieren zwar die Absolutkonzentrationen an Caesium, doch erscheint dieselbe Verteilung des Caesiums zwischen Pflanze und Humus/Weißtorf. Aufgrund der doch stark divergierenden Anatomie beider Gattungen, liegt es nahe, eine Erklärung dafür im unterschiedlichen Substrat zu suchen. Dies wird bekräftigt durch das ungleiche Verhalten der Sphagnen aus dem Moor und *S. palustre* aus dem Fichtenwald.

Im Moor bleibt Caesium also lange verfügbar, da es im sauren Milieu wieder gelöst werden kann. Wenn die alten Moosteile nicht unter Sauerstoffabschluß kommen, kann es von den Torfmoosen ständig von neuem aufgenommen werden, da es bei der Zersetzung der toten Sphagnen offensichtlich wieder frei wird. Mit dem kapillaren Wasserstrom kann es dann auch in die jüngsten Pflanzenabschnitte transportiert werden.

Moose des Rohhumus (Fichtenwald bei Dietmanns) von zeitweise trockenen alpinen Böden (Gauertal) zeigen andere Tendenzen. Aber auch hier ist

Polytrichum in der Lage als endohydreres Moos, Stoffe im Pflanzenkörper zu verteilen. Deswegen ergaben sich auch nur geringe Aktivitätsunterschiede zwischen den Blättchen und dem Stamm. Anders sind die Ergebnisse aus den fraktionierten Messungen der Moosproben aus dem Montafon. Die höchsten Anteile findet man bei allen Arten in den ältesten Abschnitten. Die Radioaktivität bleibt in jenen Organen fixiert, die an der erstmaligen Akkumulation beteiligt waren. Ein Austausch zwischen älteren und neu hinzukommenden Sprossen erfolgt nur in geringem Ausmaß. DAROCZY et al. (1988) untersuchten Moospolster der Art *Ceratodon purpureus* von Hausdächern in Ungarn auf ihre Radioaktivität und stellten fest, daß in Sporophyten die zwei Jahre nach Tschernobyl gebildet wurden, nur 1 % der Gesamtaktivität enthalten war. Der Hauptanteil fand sich in den Moospolstern selbst und war dort über die Jahre konstant geblieben.

Bei den Arten, die zur fraktionierten Messung herangezogen wurden, handelt es sich nach GREBE (1918) und BUCH (1947) durchweg um ektohydre Moose. *Tortelia*, *Hylocomium* und *Thuidium* besitzen keinen Zentralstrang. Zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen dienen neben den Blättchen auch der dichte Stengelfilz, aus Paraphyllien (wenn vorhanden) und Rhizoiden, die das interorgane Kapillarsystem bilden (BUCH 1947).

Mit diesen Einrichtungen fangen die diversen Moose große Mengen an radioaktiven Partikeln aus der Luft oder dem Regen. Bei Anwesenheit von Feuchtigkeit lösen sich die Nuklide in Form ihrer Ionen und gehen absorptive Bindungen mit den Zellwänden ein oder werden ins Zellinnere transportiert.

Die große Effektivität der Aufnahme von Caesium aus der Luft hängt nach GORHAM (1959) mit der Wuchsform der Moospflanzen zusammen. Sie bilden Polster und dichte Decken aus, in deren großer Oberfläche die Partikel gefangen und nur schwer wieder ausgewaschen werden.

Tortelia, *Ptychodium*, *Pogonatum* und *Hylocomium* aus dem Montafon wurden, neben der fraktionierten Messung, im eigentlichen zur Feststellung der Radioaktivität entlang eines Höhengradienten entnommen. Hinweise auf größere Konzentrationen in höheren Lagen geben ECKL et al. (1984). Danach steigt die Caesium-Konzentration in Pflanzen mit der Meereshöhe aufgrund der Nähe zur radioaktiven Wolke und der veränderten Wetterbedingungen (höhere Niederschlagsmengen, andere Windgeschwindigkeiten), die die feuchte wie auch die trockene Deposition von Partikeln intensivieren.

Eine Zunahme der Kontamination mit der Seehöhe hält dagegen HEINRICH (1987) nicht für unbedingt zwingend. Er gibt zwei Beispiele, in denen an höheren Standorten niedrigere Werte gemessen wurden als 700 m weiter unten im Tal.

Bei beiden Autoren lagen allerdings die Meßstandorte weit voneinander entfernt. Zum einen in verschiedenen Teilen Österreichs (ECKL et al. 1984) zum anderen 700 Höhenmeter getrennt, wobei insgesamt nur zwei Meßpunkte gemacht wurden (HEINRICH 1987). Darüber hinaus werden keine Angaben über die Ökologie der Probenstellen gegeben.

Im Oberen Gauertal wurde versucht festzustellen, ob man eindeutig von einer Höhenzunahme der Radioaktivität in Moosen ausgehen kann. Deswegen wurde ein begrenztes Gebiet gewählt und man achtete darauf, daß die Probestellen nicht zu weit auseinander lagen. Dabei war es schwierig, genügend große Mengen an Moosmaterial zu finden, so daß Mehrfachbestimmungen nicht erfolgen konnten.

Einen Anstieg mit der Höhe erkennt man recht eindeutig in den Proben von *Pogonatum* entlang des Bilkengrates und bei *Ptychodium* vom Öfapaßweg. Die anderen Moose zeigen starke Schwankungen in den Ergebnissen. Um Erklärungen für die Schwankungen zu geben, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, die auf die Kontamination und damit auf die Akkumulation von Caesium durch die Moose Einfluß haben.

Der erste Punkt ist die Wasserversorgung. Durch Niederschläge wird einerseits Caesium auf den Moosen deponiert, andererseits erleichtert die Durchfeuchtung die Aufnahme in die Zellen (ECKL et al. 1984).

Tortelia und *Ptychodium* stammen von Blöcken eines Schuttfeldes, wo sie an verschiedenen Seitenflächen sitzen. Man kann nicht eindeutig sagen, inwieweit sich die Feuchtigkeitsverhältnisse im speziellen Fall ändern, beeinflusst durch die Bedeckung und Beschattung durch den Fels. Je nach Windrichtung liegen die Moospolster einmal im Regenschatten, einmal auf der Regenseite. Dies gilt hauptsächlich für *Tortella*, das alle Seitenflächen besiedeln kann.

Im Mai, in dem 1986 die Hauptmenge an Radioaktivität niederging, lag am Öfapaßweg meist noch Schnee. Dieser bleibt an manchen Stellen (Schneetälchen) bis weit in den Juli hinein liegen. An großen Blöcken rutscht er schnell ab, während er auf kleineren liegen bleibt. Dieses Schmelzwasser hat sicher lokal zur Befeuchtung der Moose beigetragen.

Nach ECKL et al. (1984) nehmen Flechten, die von Schnee bedeckt sind durch die Benetzung mit Schneewasser erhöhte Mengen an Caesium auf.

Die Standorte am Öfapaß und Bilkengrat waren durchwegs offen, über wenig mineralischem Boden. Während *Pogonatum* am Weg unter vergleichbaren Verhältnissen gefunden wurde, kam *Hylocomium* an unterschiedlichen Kleinstandorten vor. Die Feuchtigkeits- und Windbedingungen, die hauptsächlich auf die Deposition Einfluß nehmen, dürften sich hier im Gegensatz zum Öfapaß in unterschiedlicher Weise ausgewirkt haben. Schnee

spielt am Bilkengrat nur eine geringe Rolle, da er sehr früh im Jahr gleichmäßig schneefrei ist (Südseite).

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß eine Zunahme der Caesium-Aktivität mit der Seehöhe durchaus zutreffend ist (vgl. Proben von *Pogonatum* vom Bilkengrat).

Es ist jedoch wichtig, in jedem Höhenabschnitt an verschiedenen Stellen Proben zu entnehmen, um die standörtlichen Variablen einzugrenzen. Schwierigkeiten ergeben sich dabei allerdings hinsichtlich der Verfügbarkeit genügender Probemengen, da auch diese mit steigender Höhe abnimmt.

Nach GORHAM (1959) eignen sich Moose zur Messung von Caesium weit mehr als höhere Pflanzen. Jene stehen stark unter dem Einfluß des Bodens der die Aufnahme von Caesium in die Pflanze weitestgehend bestimmt (KORANDA und ROBINSON 1978). Bei der überwiegenden Zahl der Moose wirkt sich dagegen die Bodenstruktur und ihre Zusammensetzung nur in geringem Maße aus (Ausnahmen sind, wie gezeigt Torfmoose und endohydre Gattungen). Sie stehen nur mit der Bodenoberfläche allenfalls mit der obersten Bodenschicht in Verbindung. Deshalb eignen sich in den Alpen vor allem die Gesteins- und Bodenmoose in größeren Höhen als Anzeiger für die Caesium-Deposition. Sie erhalten Caesium aus der Luft und dem Niederschlag, wobei sie der radioaktiven Wolke näher sind als im Tiefland. Außerdem handelt es sich bei diesen Moosarten hauptsächlich um solche, die dichte Polster und breite Decken bilden, also große Oberflächen besitzen. Man kann letztlich davon ausgehen, daß in den Alpen aufgrund der Höhe, und den damit verbundenen ausgiebigeren Niederschlägen große Quantitäten an radioaktiven Elementen, vor allem Caesium, hauptsächlich in den Kryptogamen angesammelt wurden.

Vergleicht man die Niederschlags- und die Aktivitätsverteilung in Österreich vom April und Mai 1986, so ist zu erkennen, daß zum einen hohe Niederschlagsmengen mit großer Caesium-Deposition verbunden sind und zum anderen, daß die tiefer gelegenen Teile Österreichs (Niederösterreich und andere östliche Teile) geringer belastet wurden als z.B. Oberösterreich und Salzburg (HORAK 1986). In Vorarlberg brachten Regenwolken vom 29. April bis 3. Mai 1986 ca. 10 mm Niederschlag und damit verbunden eine in Grasproben gemessene Aktivität von 10-15 nCi/kg Trockengewicht (= 370 - 555 Bq/kg) (HAUNOLD et al. 1986).

Verglichen mit Werten aus Bodenmessungen des Forschungszentrums Seibersdorf, die für Österreich eine Belastung von von 100-2000 nCi/m² (= 3700 - 74000 Bq/kg) ergaben, mutet die Caesium-Aktivität in den Pflanzen relativ gering. In den Moosproben dagegen, die in dieser Arbeit auf Caesium untersucht wurden, liegen die Werte nach drei Jahren zwischen 315 und

22.350 Bq/kg Trockengewicht, wobei nur etwa 1% der Proben Werte unter 500 Bq aufweisen.

Die Unterschiede erscheinen doch bedenklich, da man davon ausgehen kann, daß weit größere Mengen an Radioaktivität deponiert wurden als in höheren Pflanzen festzustellen sind. Es ist deshalb wichtig, bei der Erfassung der radioaktiven Belastung neben höheren Pflanzen, durch die die Nuklide in die Nahrungskette gelangen, auch Kryptogamen mit einzubeziehen; vor allem in höheren Lagen, wo sie genauere Auskunft über die Strahlenbelastung geben als dies Phanerogamen tun.

Danksagung

Wir möchten Frau Dr. Gudrun Dietl-Starnecker für apparative Hilfe (Projekt Nr. 62-87.39) und Herrn Dr. D. Breitig, Leiter des Isotopenlabors der Universität Ulm, für gute Zusammenarbeit danken. Weiterhin bedanken wir uns für die Unterstützung der Feldarbeiten (Lindauer Hütte) bei der Sektion Lindau des Deutschen Alpenvereins.

Literaturverzeichnis

APSIMON, H. und J. WILSON (1986): Tracking the cloud from Chernobyl. *New Scientist* 111: 42-45

BOVARD, P. and A. GRAUBY (1966): The fixation of radionuclides from atmospheric fall out in peat-bog *Sphagnum* sp., *Polytrichum* und *Myriophyllum* in: HUNGATE, F.P., ABERG, B. (Hrsg.): Radioecological concentration processes. (Proceedings of an international Symposium held in Stockholm 25.-29. April 1966) Oxford, S. 533-537

BREHM, K. (1968): Die Bedeutung des Kationenaustausches für den Kationengehalt lebender Sphagnen. *Planta* 79: 324-345

BUCH, H. (1945): Über die Wasser- und Mineralstoffversorgung der Moose I. *Soc. Seien. Fenn. Com. Biol.* 9(16): 1-44

(1947): Über die Wasser- und Mineralstoffversorgung der Moose II. *Soc. Seien. Fenn. Com. Biol.* 9(20): 1-49

CALLAGHAN, T.V., COLLINS, N.J. and C.H. CALLAGHAN (1978): Photosynthesis, growth and reproduction of *Hylocomium splendens* and *Polytrichum commune* in Swedish Lapland. Strategies of growth and population dynamics of tundra plants 4. *Oikos* 31: 73-88

CLYMO, R.S. (1973): The growth of *Sphagnum*: Some effects of environment. *Journal of Ecology* 61: 849-869

DAROCZY, S., BOLYOS, A., DESZÖ, Z., PAZSIT, A. and J. NAGY (1988): Could mosses be used for the subsequent mapping of the Chernobyl fallout? *Naturwissenschaften* 75: 569-570

DIETL, GUDRUN (1986): Großpilze als Bioindikatoren - Möglichkeiten und Beispiele. *Ulmer Pilzflora I, 10 Jahre Arbeitsgemeinschaft Mykologie Ulm (AMU)*: 142-151

DIETL, GUDRUN (1989): Zur Verteilung radioaktiver Cäsiumnuklide im Pilzfruchtkörper. *Zeitschrift für Mykologie* 55(1): 131-134

ECKL, P., TÜRK, R. and W. HOFMANN (1984): Natural and man-made radionuclide concentrations in lichens at several locations in Austria. *Nordic Journal of Botany* 4: 521 - 524

ELSTNER, E.F., FINK, RITA, HÖLL, W., LENGFELDER, E. and H. ZIEGLER (1989): Radioactivity in mushrooms, mosses and soil samples of defined biotops in SW-Bavaria - two years after "Chernobyl". *Oecologia* 80: 173-177

FEIGE, G.B., JAHNKE S. und L. NIEMANN (1988) Tschernobyl belastet uns weiter. *Essener Universitätsberichte* 2: 8-14

FRAHM, J.-P. und W. FREY (1992): *Moosflora*. 3. überarbeitete Auflage, Stuttgart: Eugen Ulmer

GAMS, H. (1931): *Die Pflanzenwelt Vorarlbergs*. Wien: Schulwissenschaftlicher Verlag Haase.

GORHAM, E. (1959): A comparison of lower and higher plants as accumulators of radioactive fall-out. *Canadian Journal of Botany* 37: 327-329

GRABHERR, G. (1983): *Flora des Montafon*. 1. Teil: Neufunde und seltene Arten. *Ber. nat.- med. Ver. Innsbruck* 70: 45-59

GRABHERR, G. und A. POLATSCHKE (1986): *Lebensräume in Vorarlberg. Ökosysteme, Vegetation, Flora mit Roten Listen*. Hrsg. Vorarlberger Landschaftspflegefonds.

GREBE, C. (1918): *Studien zur Biologie und Geographie der Laubmoose*. *Hedwigia* 59: 1-

DAROCZY, S., BOLYOS, A., DESZÖ, Z., PAZSIT, A. and J. NAGY (1988): Could mosses be used for the subsequent mapping of the Chernobyl fallout? *Naturwissenschaften* 75: 569-570

DIETL, GUDRUN (1986): Großpilze als Bioindikatoren - Möglichkeiten und Beispiele. *Ulmer Pilzflora I, 10 Jahre Arbeitsgemeinschaft Mykologie Ulm (AMU)*: 142-151

DIETL, GUDRUN (1989): Zur Verteilung radioaktiver Cäsiumnuklide im Pilzfruchtkörper. Zeitschrift für Mykologie 55(1): 131-134

ECKL, P., TÜRK, R. and W. HOFMANN (1984): Natural and man-made radionuclide concentrations in lichens at several locations in Austria. Nordic Journal of Botany 4: 521 - 524

ELSTNER, E.F., FINK, RITA, HÖLL, W., LENGFELDER, E. and H. ZIEGLER (1989): Radioactivity in mushrooms, mosses and soil samples of defined biotops in SW-Bavaria - two years after "Chernobyl". Oecologia 80: 173-177

FEIGE, G.B., JAHNKE S. und L. NIEMANN (1988) Tschernobyl belastet uns weiter. Essener Universitätsberichte 2: 8-14

FRAHM, J.-P. und W. FREY (1992): Moosflora. 3. überarbeitete Auflage, Stuttgart: Eugen Ulmer

GAMS, H. (1931): Die Pflanzenwelt Vorarlbergs. Wien: Schulwissenschaftlicher Verlag Haase.

GORHAM, E. (1959): A comparison of lower and higher plants as accumulators of radioactive fall-out. Canadian Journal of Botany 37: 327-329

GRABHERR, G. (1983): Flora des Montafon. 1. Teil: Neufunde und seltene Arten. Ber. nat.- med. Ver. Innsbruck 70: 45-59

GRABHERR, G. und A. POLATSCHEK (1986): Lebensräume in Vorarlberg. Ökosysteme, Vegetation, Flora mit Roten Listen. Hrsg. Vorarlberger Landschaftspflegefonds.

GREBE, C. (1918): Studien zur Biologie und Geographie der Laubmoose. Hedwigia 59: 1-

NIEMANN, L., JAHNKE, S. und G.B. FEIGE (1989): Radioaktive Kontamination von Pflanzen und Boden nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie (Essen 1988) 18: 873-882

OBERHAUSEN, E. (Hrsg.) (1987): Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl auf die Bundesrepublik Deutschland. Veröff. Strahlenschutzkomm., Band 7: 1-237. Fischer, Stuttgart

RICKARD, W.H. (1966): Accumulation of Cs-137 in litter and understory plants of forest Stands from various climatic zones of Washington, in:

ABERG, B., HUNGATE, F.P. (1967): Radioecological concentration processes. (Proceedings of an international Symposium held in Stockholm 25-29. April 1966). Oxford

SUMERLING, T.J. (1984): The use of mosses as indicators of airborne radionuclides near a major nuclear installation. The Science of the total Environment 35: 251-265

TAMM, C.O. (1953): Growth, yield and nutrition in carpets of a forest moss (*Hylocomium splendens*). Medd. Stat. Skogsforskningsinst. 43: 1-140

Autorenadressen:

Dr. Hermann Muhle
Dipl. Biol. Brigitte Rabuser
Universität Ulm
Spezielle Botanik
Oberer Eselsberg
89069 Ulm