

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Eine Jugend forscht – Arbeit
von
Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Physik-AG am Hans-Thoma-Gymnasium Lörrach

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
1.1 <i>Material</i>	1
2. DIE MESSUNGEN	2
2.1 <i>Die Messmethode</i>	2
2.2 <i>Die Funktionsweise des Szintillationszählers</i>	3
2.3 <i>Interpretation des Energiespektrums</i>	3
2.4 <i>Die Auswertung der Messergebnisse</i>	5
2.5 <i>Die Berechnung der Ansprechwahrscheinlichkeit des Zählers</i>	6
3. ERGEBNISSE	8
3.1 <i>Durchgeführte Messungen</i>	8
3.2 <i>Belastung bei Pilzen</i>	9
3.3 <i>Belastung der Bodenproben</i>	10
3.4 <i>Sonstige durchgeführte Messungen</i>	11
3.5 <i>Unterschiede in der Belastung</i>	11
4. ABSCHÄTZUNG DER AUSWIRKUNG AUF DEN MENSCHEN	13
5. AUSBLICK	14
6. DANKSAGUNGEN	14
7. QUELLENVERZEICHNIS	15

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

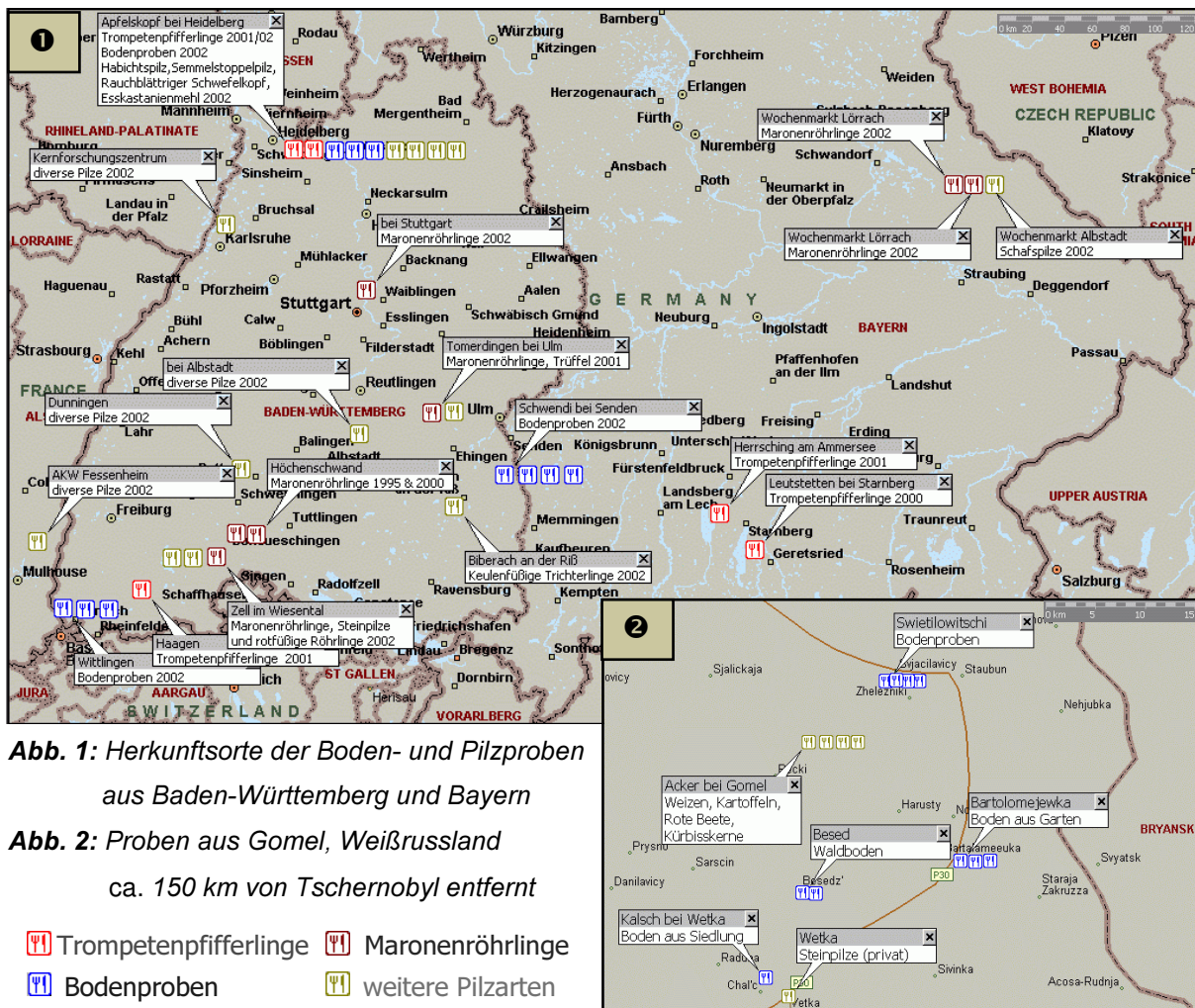
1. EINLEITUNG

Siebzehn Jahre nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl wollten wir untersuchen, in wie weit die damals freigesetzte Radioaktivität heute noch in gesammelten Pilzen vorhanden ist. Von den Radionukliden, welche hauptsächlich durch Wolken in Form von Regen ungleichmäßig auf Böden in ganz Europa verteilt wurden, ist heute vor allem noch das ^{137}Cs zu finden, da es eine Halbwertszeit von 30 Jahren besitzt. Diese Belastung entnehmen Pilze bei ihrer Nährstoffaufnahme über das Pilzgeflecht (Myzel) dem Boden. Wir untersuchten Pilze aus verschiedenen Orten (hauptsächlich in Baden-Württemberg und Bayern), um festzustellen, welche Belastung auch heute noch vorhanden ist und somit die Gefahr für die Konsumenten abschätzen zu können. Um aus unseren Messungen möglichst genaue Aussagen folgern zu können, reichten die Angaben und Methoden des Herstellers des Szintillationszählers (Leybold-Didactic) nicht aus. Wir entwickelten daher eine neue Methode, um die Daten auszuwerten.

Die Erforschung der Radioaktivität in Pilzen ist für uns besonders faszinierend, da hier nicht nur reines physikalisches Fachwissen gefragt ist, sondern auch zusätzlich Aspekte aus der Biologie und Umwelt berücksichtigt werden müssen.

1.1 Material

Die folgenden Karten (Abb. 1 und 2) zeigen die Herkunftsorte der Proben:



Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Da unsere Geräte erst Ende Oktober 2002 geliefert wurden – also zu einem Zeitpunkt, da die Pilzsaison weitgehend vorüber war, konnten nur begrenzt Pilze selbst gesammelt werden (aus der Gegend um Lörrach, Albstadt und Biberach), in denen kaum eine Belastung festgestellt wurde. Wir kauften auf dem Wochenmarkt in Lörrach und Albstadt Pilze mit Herkunftsort „Bayerischer Wald“ und überprüften im normalen Handel erhältliche Trockenpilze und Pilzmischungen. Wir nahmen außerdem Kontakt zu Pilzsachverständigen, Pilzverbänden und Pilzvereinen auf, um möglichst weit gestreute Pilzproben zu erhalten. Insbesondere von Mitgliedern der Deutschen Gesellschaft für Mykologie, denen wir über ein Internetforum (www.dgfm-ev.de/phorum) eine kostenlose Radioaktivitätsmessung anboten, erhielten wir Unterstützung in Form von getrockneten Pilz- und Bodenproben aus Baden-Württemberg und Bayern und guten Ratschlägen. Wir bekamen zudem über einen Hilfskonvoi Boden- und Pilzproben aus Gomel (Weißrussland), die wir näher untersuchten. Im Verlauf des gesamten Projektes schrieben wir über 700 E-Mails an mind. 60 verschiedene Personen, was den Aufwand bei der Probenbeschaffung verdeutlicht.

2. DIE MESSUNGEN

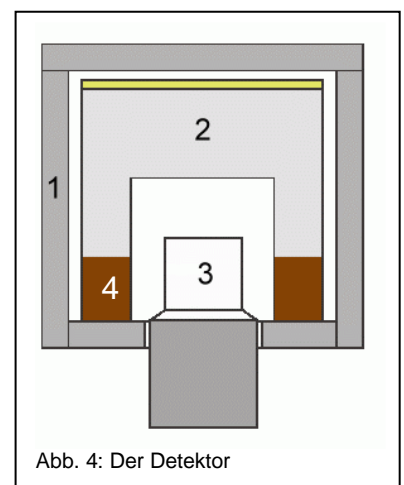
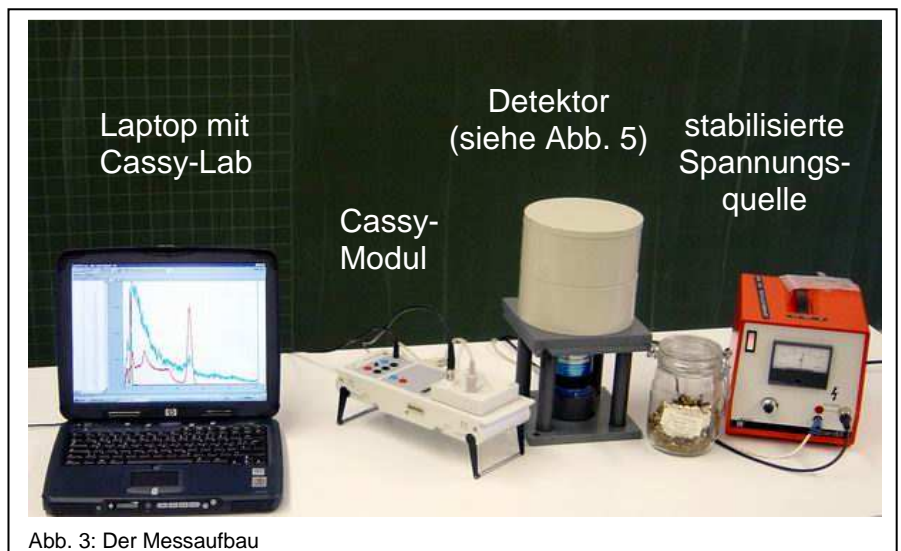
2.1 Die Messmethode

Für unsere Messungen verwendeten wir einen Szintillationszähler mit Bleiburg der Firma Leybold-Didactic, welcher über ein Messinterface (Cassy-Modul) an den Laptop angeschlossen wird (siehe Abb. 3).

Wie man aus Abb. 4 erkennen

kann, füllt man die Probe (4) in den Marinelli-Becher (2), der in der Mitte eine Aussparung für den Szintillationszähler (3) besitzt. Somit ist der Zähler von der Probe umgeben. Er besteht aus einem NaJ-Kristall und einem Fotomultiplier – zusammen mit dem Cassy-Modul bildet dies einen Vielkanalanalysator (genaue Funktionsweise wird unter 2.2 beschrieben). Durch die Bleiburg (1) wird der Einfluss der Umgebungsradioaktivität auf die Messung minimiert. Dies bestätigten wir durch eine Messung ohne Bleiburg.

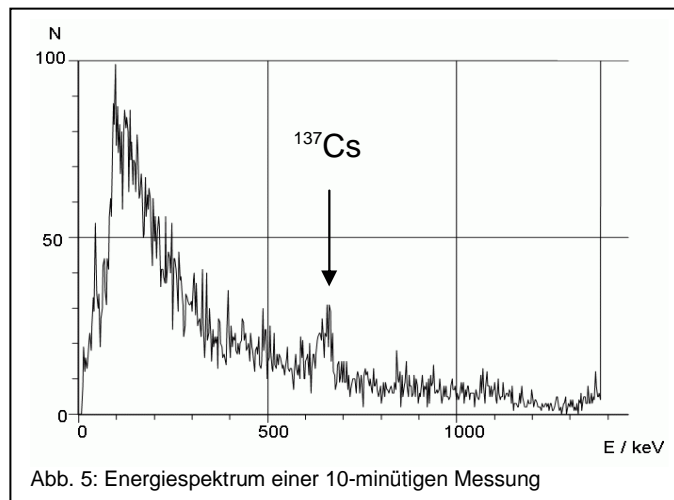
Für die Auswertung auf dem Laptop verwendeten wir Cassy-Lab, ein Programm von Leybold-Didactic, bei dem in einem Energiespektrum auf der x-Achse die Energie in keV aufgetragen ist und auf der y-Achse die Anzahl der Zerfälle dargestellt wird.



Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Mit der stabilisierten Spannungsquelle kann die Breite des Energiespektrums eingestellt werden.



Aus diesem kann man bei einer mit ¹³⁷Cs belasteten Probe einen charakteristischen Peak (Photopeak) bei ca. 662 keV erkennen.²⁾

Als Erstes führten wir mit jeder Probe eine kurzzeitige Messung durch (siehe Abb. 5), um die Aktivität abzuschätzen. Sämtliche Proben, welche wir als untersuchenswert einstufen, wurden länger vermessen, um statistische Schwankungen auszugleichen.

2.2 Die Funktionsweise des Szintillationszählers:

Aus ¹³⁷Cs entsteht durch einen β^- -Zerfall metastabiles ¹³⁷Ba. Dieses geht unter Aussendung eines γ -Quants der Energie hf in den Grundzustand ¹³⁷Ba über. Trifft dieses γ -Quant auf den Kristall im Szintillationszähler, kann es seine Energie an ein Elektron übergeben, welches auf seinem Weg durch den Kristall Lichtblitze auslöst. Die Anzahl der Lichtblitze (Photonen) ist proportional zur Energie der Elektronen und somit auch zu der des γ -Quants.

Beim Auftreffen auf die Photokatode lösen die Photonen Elektronen aus. Im Photomultiplier wird die Zahl der Elektronen durch die Dynoden vervielfacht und diese ergeben einen Strom- bzw. Spannungsimpuls.²⁾ Je nach Größe der Spannung wird dem Ereignis einer der 512 Energiekanäle zugeordnet und mit Cassy-Lab in einem Diagramm aufgetragen.

2.3 Interpretation des Energiespektrums

a) Photopeak

Das γ -Quant übergibt seine gesamte Energie in Form von kinetischer Energie an ein Elektron.

Nach der Lichtquantentheorie gilt: $hf = W_a + W_{kin}$ wobei W_a die Ablösearbeit, h die Plancksche Konstante, f die Frequenz des γ -Quants, und W_{kin} die Bewegungsenergie des Elektrons angibt.⁶⁾

Durch die Kalibrierung über die Photolinie des ¹³⁷Cs-Präparats (unter 2.4 beschrieben) wird in der Energieskala schon die Ablösearbeit berücksichtigt.

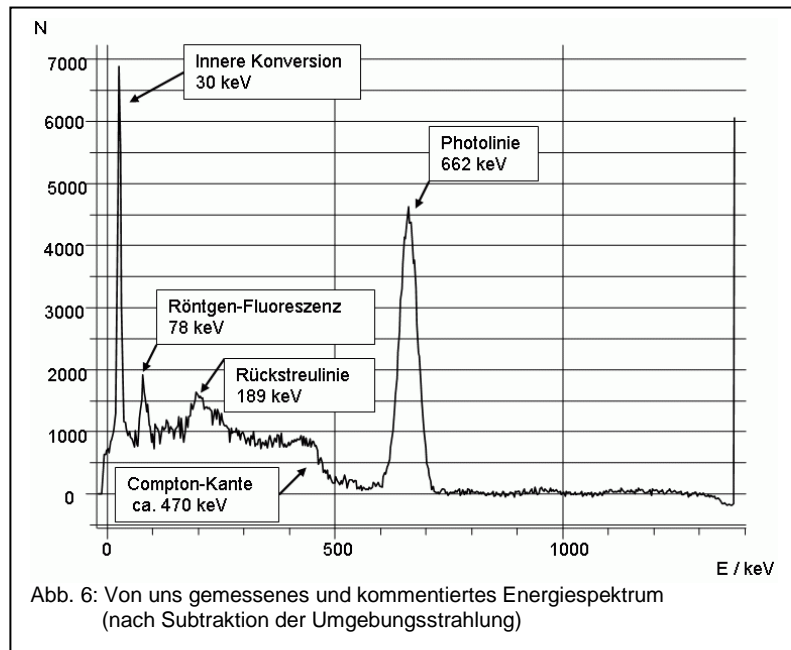
Außer diesem deutlichen Peak bei 662keV (dem Photopeak), sind im Differenzspektrum auch noch andere Effekte zu erkennen, die durch Streuung zustande kommen (siehe Abb. 6).

b) Compton-Effekt

Beim Compton-Effekt übernimmt ein quasi-freies Elektron nur einen Teil der Energie des γ -Quants in Form von Bewegungsenergie. Die höchste Energie wird bei einem Stoß von 180° erreicht.

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller



Für die maximale Energie des Elektrons, die auch als Compton-Kante bezeichnet wird, gilt²⁾:

$$E_c = hf - \frac{hf}{1 + (2hf / (mc^2))}$$

Dabei gibt hf die Energie des γ -Quants, also 662 keV an, mc^2 ist die „Massenenergie“ des Elektrons und liegt bei 511 keV⁶⁾ – somit berechnen wir $E_c = 477$ keV.

Im Diagramm liegt dieser Wert ca. bei 470 keV – dies stimmt also in etwa mit der berechneten Energie überein.

c) Rückstreuung

γ -Quanten können, wenn sie auf die Bleiabschirmung auftreffen, dort durch Compton-Effekt gestreut werden. Wenn sie unter einem Winkel von ca. 180° zurückfliegen, treffen sie wieder auf den Szintillationszähler. Dort können sie durch Photoeffekt absorbiert werden und erzeugen dann die so genannte Rückstreulinie. Für diese Linie gilt²⁾:

$$hf_{\min} = \frac{hf}{1 + 2 \frac{hf}{mc^2}}$$

Mit den schon oben verwendeten Werten erhalten wir eine Energie von ca. 184 keV – in unserem Spektrum findet man einen Peak im Bereich von 189 keV.

d) Röntgen-Fluoreszenzstrahlung

γ -Quanten, die auf die Bleiabschirmung treffen, können dort auch durch Photoeffekt absorbiert werden. Anschließend werden Röntgen-K-Quanten ausgesandt, die, wenn sie in die entsprechende Richtung fliegen, in der Photokatode registriert werden. Dieser Effekt hinterlässt einen charakteristischen Peak, der für Blei bei ca. 76 keV liegt²⁾.

e) Innere Konversion

Wenn das angeregte ^{137}Ba in den Grundzustand übergeht, kann es die so frei werdende Energie auch an ein Elektron in der K-Schale abgeben, das ausgesandt wird. Das Loch in der K-Schale wird dann aus einer höheren Schale aufgefüllt, wobei ein Photon emittiert wird, das eine Energie von 32 keV hat, die man auch deutlich in unserem Energiespektrum erkennen kann.

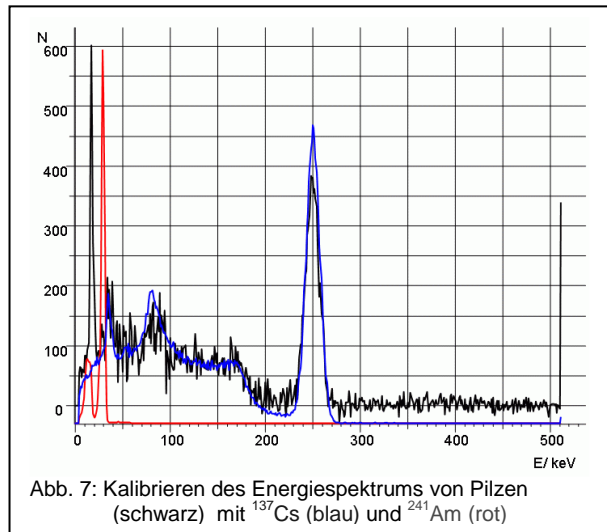
Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

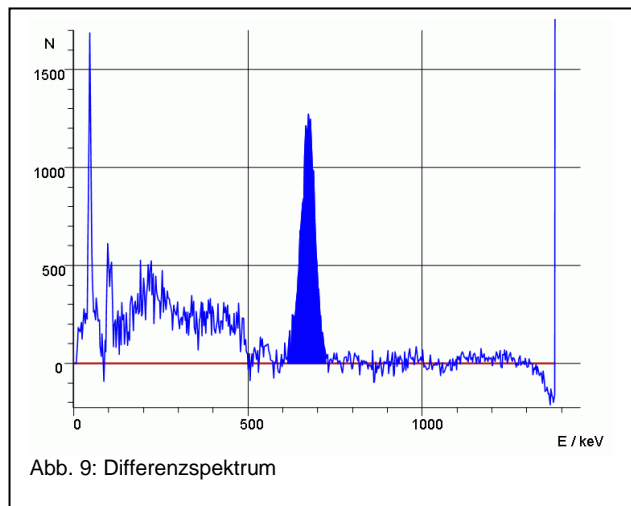
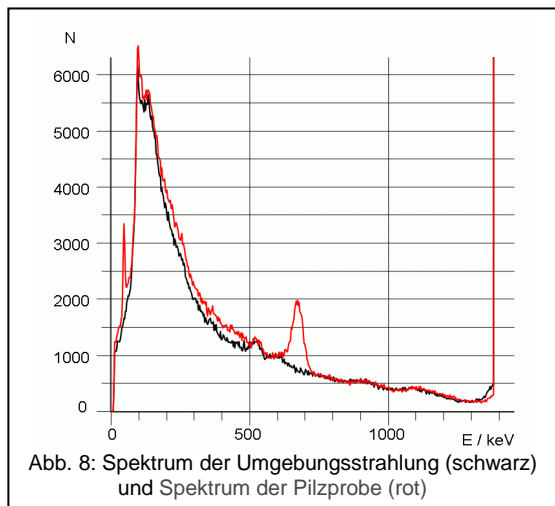
2.4 Die Auswertung der Messergebnisse

Bevor wir eindeutige Aussagen über die Belastung der vermessenen Proben machen konnten, mussten wir erst die Skala des Energiespektrums festlegen. Zu dieser Energiekalibrierung wurde ein ^{137}Cs - und ein ^{241}Am -Präparat verwendet, bei denen die jeweilige Energie des Peaks bekannt ist:

^{137}Cs : 661,66 keV; ^{241}Am : 59,54 keV ²⁾ – siehe Abb. 7. Die so bestimmte Skala verwendeten wir für unsere Pilzproben.



Nun subtrahierten wir vom gemessenen Spektrum der Probe (rotes Spektrum in Abb. 8) das Spektrum der Umgebungsstrahlung, welche trotz Bleiabschirmung noch vorhanden ist (schwarzes Spektrum in Abb. 8). Damit erhielten wir das Differenzspektrum (Abb. 9).



Um nun auf die Aktivität zu schließen, berücksichtigten wir nur die unter dem Photopeak auftretende Strahlung (blaue Färbung in Abb. 9) und ignorierten die anderen Messwerte, da sie auch vom Zerfall anderer Radionuklide herrühren könnten.

Wir bestimmten die Anzahl n der im Photopeak registrierten ^{137}Cs -Zerfälle, indem wir das Integral (also die Fläche zur x-Achse) berechneten. Den erhaltenen Wert teilten wir durch die Messzeit t und das Gewicht m der Probe.

Also ist die über die Umgebungsstrahlung hinausgehende gemessene massenspezifische Aktivität

$$R = \frac{n}{t \cdot m}$$

$$[R] = \text{Bq/kg}$$

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

2.5 Berechnung der Ansprechwahrscheinlichkeit des Zählers

Da jedoch nur ein Teil der durch Zerfall ausgelösten γ -Quanten auf den NaJ-Kristall im Zähler trifft und dort auch registriert wird, muss man eine Methode bestimmen, um von der gemessenen Aktivität R auf die insgesamt auftretende Aktivität A schließen zu können. Dazu schlägt Leybold-Didactic ⁷⁾ eine Messung mit einem Kunststoff in der Größe des Marinelli-Bechers vor, in dem das radioaktive Cäsium homogen verrührt ist (Kalibrierpräparat 559 885). Der so bestimmte Kalibrierfaktor ($k_{Cs} = 155$) würde jedoch nur für die Raumgeometrie eines komplett gefüllten Marinelli-Bechers gelten – was uns zu ungenau war. Um den benötigten Korrekturfaktor experimentell genau zu bestimmen, hätte man Vergleichsmessungen mit einer ^{137}Cs -Lösung mit bekannter Aktivität bei verschiedenen Füllhöhen durchführen müssen. Dies ist im Schulgebrauch nicht erlaubt und vor allem auch sehr aufwendig. Auf Nachfrage bei Leybold-Didactic wurde uns von Herrn Dr. Wietzke noch eine andere Methode vorgeschlagen, mit der man den Kalibrierfaktor $k_{Cs} = 155$ verwenden kann. Hierbei werden die gemahlene Pilzproben mit einem Küchenmixer in einer Gelatine-Lösung verrührt und dann in die Form des Marinelli-Bechers gefüllt. Dies wäre jedoch ebenfalls sehr aufwendig und außerdem würden die Proben dann bald zu schimmeln beginnen und könnten nicht konserviert werden.

Daher entwickelten wir ein theoretisches Modell, mit dem wir über Vektorrechnung die Bahn eines γ -Quants simulierten und die Detektionswahrscheinlichkeit bestimmten.

Bei der von uns in C programmierten Monte-Carlo Simulation werden die geometrischen Daten des Marinelli-Bechers und des Szintillationszählers eingegeben. Der Grundgedanke dabei ist folgender (siehe Abb. 10):

Man bestimmt zufällig einen Startpunkt P aus dem Füllbereich h des Marinelli-Bechers, wählt eine zufällige Richtung v_g und stellt damit die Gleichung der Geraden g auf. Nun berechnet man (falls vorhanden) die Schnittpunkte S_1 und S_2 von g mit dem Zähler und überprüft, ob das γ -Quant auch auf den Zähler zufliegt. Ist dies der Fall bestimmt man die im Zähler zurückgelegte Wegstrecke l . Über das Absorptionsgesetz erhält man die Detektionswahrscheinlichkeit w für diese γ -Quant: $w = 1 - e^{-\mu l}$

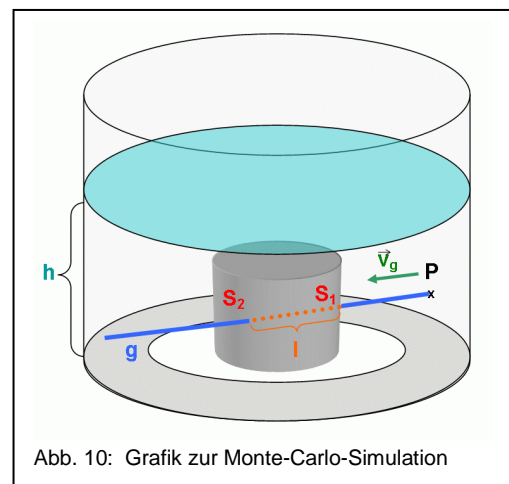


Abb. 10: Grafik zur Monte-Carlo-Simulation

mit linearem Schwächungskoeffizient $\mu = 28 \text{ m}^{-1}$ für NaJ bei Quanten der Energie 662 keV ⁹⁾.

Diese Rechnung wird 1.000.000 Mal wiederholt und somit die prozentuale Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit der ein in dieser Geometrie ausgesandtes γ -Quant den NaJ-Kristall trifft. Der Kehrwert dieser Wahrscheinlichkeit ist der gesuchte Korrekturfaktor k_1 , mit dem man die gemessene Aktivität R multiplizieren muss, um auf die Gesamtaktivität A schließen zu können.

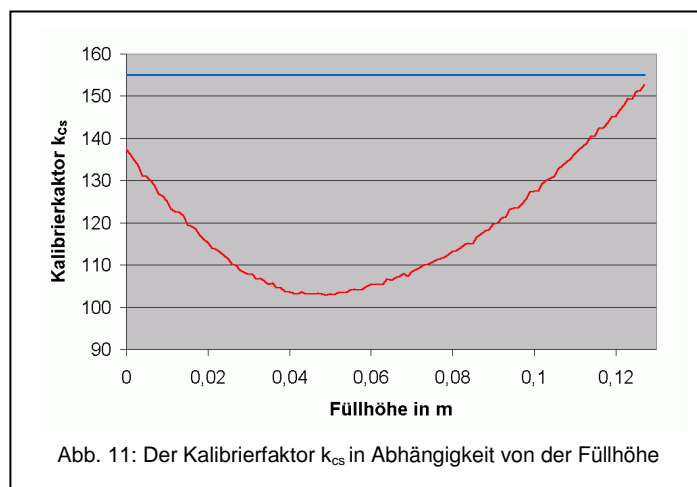
Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Allerdings wurde bei der Auswertung ja nur die Aktivität im Photopeak bestimmt. Daher muss man auch noch das Peak-Total-Verhältnis (also das Verhältnis der Energien im Peak zu denen in anderen Energiebereichen) berücksichtigen. Dies bestimmten wir experimentell aus unserer Messung mit dem zur Energiekalibrierung verwendeten ^{137}Cs -Präparat (siehe 2.4), indem wir die Fläche F_p unter dem Peak im Verhältnis zu der Gesamtfläche F_g , also der Gesamtzahl der registrierten Zerfälle betrachteten. Hierbei erhielten wir mit F_p : 56490 und F_g : 140636 ein Peak-Total-Verhältnis von 1:2,5 und somit einen Korrekturfaktor $k_2 = 2,5$.

Dieser Faktor stimmt mit den Angaben für unseren Detektor der ETH Zürich ⁹⁾ überein.

Nun multipliziert man k_2 jeweils mit den aus der Simulation erhaltenen Korrekturfaktoren k_1 für die



unterschiedlichen Füllhöhen und erhält somit den gesuchten Kalibrierfaktor k_{Cs} , der im folgenden Diagramm (Abb. 11) aufgetragen ist:

Der Kalibrierfaktor für den komplett gefüllten Becher liegt laut Leybold ⁷⁾ bei 155 – mit unserer Simulation erhalten wir den Wert 153.

Der berechnete Wert stimmt also sehr gut mit den Angaben des Herstellers überein.

Um die Simulation schließlich auch am Experiment zu überprüfen, führten wir Langzeitmessungen mit KCl für unterschiedliche Füllhöhen durch. KCl ist ein Salz mit radioaktiven Isotopen, deren Aktivität A_{KCl} wir berechnen können, um sie mit der gemessene Aktivität R_{KCl} zu vergleichen:

Man bestimmt zuerst die Anzahl N der ^{40}K -Kerne, die in 1 kg KCl vorhanden sind.

$$N = \frac{1000 \text{ g}}{M} N_A r$$

Mit $M =$ Molare Masse des KCl (74,55 g/mol); $N_A =$ Avogadro-Zahl ($6,022 \cdot 10^{23}$ 1/mol); $r =$ Isotopenhäufigkeit von ^{40}K in KCl = 0,0118 % folgt: in 1 kg KCl sind $N = 9,53 \cdot 10^{20}$ radioaktive Atome enthalten.

Nach dem Zerfallsgesetz gilt für die Aktivität $A = \frac{N \cdot \ln 2}{T_{1/2}}$

Mit $T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9 \text{ a} = 4,04 \cdot 10^{16} \text{ s}$ sowie dem oben berechneten N folgt

$A_{KCl} = 16,37 \text{ kBq/kg}$ – dies ist also die berechnete massenspezifische Gesamtaktivität.

Die experimentelle Aktivität R_{KCl} bestimmten wir aus Messungen für die jeweilige Füllhöhe.

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Daraus berechneten wir die Kalibrierfaktoren k_{KCl} für verschiedene Füllhöhen und verglichen sie mit dem aus der Simulation erhaltenen Kalibrierfaktor k_{Cs} . Dieser ist niedriger, da ^{40}K ein anderes Peak-Total-Verhältnis sowie eine andere Absorbtiionswahrscheinlichkeit als ^{137}Cs aufweist. Dividiert man jedoch nun die beiden Kalibrierfaktoren der verschiedenen Füllhöhen, müsste ein konstanter Wert erreicht werden.

Füllhöhe h in m	^{40}K -Kalibrierfaktor k_{KCl}	^{137}Cs -Kalibrierfaktor k_{Cs}	k_{KCl} / k_{Cs}
0,035	2792,6	105,4	26,49
0,073	2997,8	110,0	27,25
0,090	3241,2	119,6	27,10

Tabelle 1: Vergleich der Kalibrierfaktoren k_{KCl} und k_{Cs}

Die Werte für k_{KCl} stimmen in etwa mit dem von Leybold ⁷⁾ angegebenen Wert 2888 überein.

Man kann sehen, dass die Werte alle in etwa in einem gleichen Bereich liegen und wir daher unsere Theorie auch experimentell bestätigen konnten.

Man muss natürlich beachten, dass in unserer Simulation keine Absorptions- und Streueffekte in der Probe berücksichtigt wurden. Diese sind bei der Messung mit Pilzen jedoch vernachlässigbar.

Für die Berechnung der Gesamtaktivität A unserer Pilzproben müssen wir also die gemessene Aktivität R mit dem in Abb. 11 ersichtlichen Kalibrierfaktor k_{Cs} der jeweiligen Füllhöhe multiplizieren

$$A = R \cdot k_{Cs} = \frac{n}{t \cdot m} \cdot k_{Cs}$$

Beispielrechnung: Messung an Maronnröhrlingen mit Herkunftsort Bayerischer Wald
 $n = 80788$; $t = 43200$ s, $m = 0,075$ kg (Trockengewicht); $h = 5,0$ cm $\rightarrow k_{Cs}$ (5 cm) = 103

\Rightarrow ^{137}Cs -Aktivität der Probe: $A = 80788 \cdot 103 / (43200 \cdot 0,075 \text{ kg}) = 2\,568$ Bq/kg

Diesen Wert runden wir aufgrund unvermeidbarer Messungenauigkeit auf 2570 Bq/kg.

3. ERGEBNISSE

3.1 Durchgeführte Messungen

Insgesamt führten wir über 150 Messungen an Pilzen, Bodenproben und Kalibrierpräparaten durch. Wir untersuchten hauptsächlich die Pilzarten Maronnröhrling (*Xerocomus badius*) sowie Trompeten-Pfifferling (*Cantharellus tubaeformis*) und diverse Bodenproben aus Deutschland und Weißrussland.

Eine Übersicht über die Herkunftsorte ist in Abb. 1 und 2 zu sehen.

Die in den folgenden Tabellen angegebenen Aktivitäten beziehen sich auf das Trockengewicht (TG) – wenn nicht ist dies mit Frischgewicht (FG) gekennzeichnet. Um aus dem Trockengewicht die Aktivität der frischen Proben (FG) zu erhalten, teilt man den jeweiligen Wert durch den Faktor 10 (dies kann jedoch nach unseren Erfahrungen im Einzelnen um bis zu 20 % variieren).

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

„< NWG“ bedeutet, dass wir bei der Kurzzeitmessung keine Belastung feststellen konnten und daher keine Langzeitmessung durchgeführt wurde. Die Nachweisgrenze (NWG) liegt bei einer typischen Pilzprobe mit 20 g TG bei etwa 50 Bq/kg TG.

Wir bestimmten zudem die Aktivität A_0 im Sammeljahr, für die gilt: $A(t) = A_0 e^{-\ln 2 \frac{t}{T_{1/2}}}$

3.2 Belastung bei Pilzen

Wir untersuchten zunächst verschiedene Pilzarten, um herauszufinden, welche noch eine Belastung aufwiesen und somit für eine genauere Untersuchung geeignet wären.

Pilzart	Herkunftsort	Jahr	TG in g	Gesamtaktivität
Habichtspilz (<i>Sarcodon imbricatus</i>)	Apfelskopf/Heidelberg	2002	30,5	< NWG
		1999	36,8	< NWG
2002		33,8	< NWG	
2002		34,4	< NWG	
Semmelstoppelpilz (<i>Hydnum repandum</i>)	Biberach an der Riß	2002	61,7	< NWG
Rauchblättriger Schwefelkopf (<i>Hypholoma capnoides</i>)		2002	30	< NWG
Keulenfüßiger Trichterling (<i>Clitocybe clavipes</i>)	Tomerdingen/Ulm	2001	30	< NWG
Mäander-Trüffel (<i>Choiromyces venosus</i>)	Bayerischer Wald	2002	17,5	< NWG
Diverse Pilzarten	Dunningen/Rottweil	2002	10-20	< NWG
Diverse Pilzarten	Albstadt	2002	10-20	< NWG
Diverse Pilzarten	AKW Fessenheim (F)	2002	FG je 10-20	< NWG
Diverse Pilzarten	Forschungszentrum Karlsruhe	2002	FG je 20-100	< NWG
Steinpilz (<i>Boletus edulis s.l.</i>)	Wetka/Gomel	2002	80	36 400

Tabelle 2: Weitere untersuchte Pilzarten

Wir entschieden uns dafür, uns besonders auf die Belastung bei Maronenröhrlingen und Trompeten-Pfifferlingen aus Süddeutschland zu konzentrieren.

Pilzart	Herkunftsort	Jahr	TG in g	heutige Aktivität in Bq/kg TG	Aktivität im Sammeljahr in Bq/kg TG
Maronenröhrling (<i>Xerocomus badius</i>)	Bayerischer Wald	2002	75	2 570	2 630
			100 FG	400	400
	Höchenschwand	1995	20	1 210	1 460
		2000	15	< NWG	<NWG
	Tomerdingen/Ulm bei Stuttgart	2001	23	300	320
2001	28	100	100		
Trompeten-Pfifferling (<i>Cantharellus tubaeformis</i>)	Leutstetten/Starnberg	2000	11	4 600	4 930
	Herrsching am Ammersee	2001	15	4 400	4 580
	Apfelskopf/Heidelberg	2001	30	1 860	1 950
		2002	31	870	890
Haagen/Lörrach	2000	15	< NWG	<NWG	

Tabelle 3: untersuchte Maronenröhrlinge und Trompeten-Pfifferlinge

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Zudem überprüften wir auch noch im Handel erhältliche Pilze.

Pilzart	Herkunftsort	TG in g	Gesamtaktivität
Steinpilz (<i>Boletus edulis</i>)	Markt in Gomel	40	840
	Rond Point (Supermarkt F)	200	< NWG
Ulmenseitling (<i>Hypsizygus ulmarius</i>)	Thumser Myko-Holz Service Zeulenroda, Thüringen	20	< NWG
Semmelstoppelpilz (<i>Hydnum repandum</i>)	Marktkauf (Supermarkt D) Herkunftsland: Türkei	FG 200	< NWG
Herbsttrompeten (<i>Craterellus cornucopioides</i>)	Migros (Supermarkt CH) Herkunftsland: Ungarn	50	< NWG
Pilzmischung	Firma Wagner (D)	34	< NWG

Tabelle 4: Im Handel erhältliche Pilze

3.3 Belastung der Bodenproben

Außerdem bestimmten wir die radioaktive Belastung bei einigen Bodenproben und deren Bewuchs, aus der Umgebung der gesammelten Pilze bei Heidelberg, südlich von Ulm und aus Wittlingen (bei Lörrach).

Probenart	Herkunftsort	FG in g	Gesamtaktivität in Bq/kg FG
Farne	Schwendi/Ulm	74	1 730
Moos (0-5 cm)	Schwendi/Ulm	63	630
	Apfelskopf/Heidelberg	241	< NWG
	Wittlingen/Lörrach	268	< NWG
Humus (5-8 cm)	Schwendi/Ulm	471	250
	Schwendi/Ulm	520	200
	Apfelskopf/Heidelberg	600	20
	Wittlingen/Lörrach	917	< NWG
Unterboden (8-20 cm)	Schwendi/Ulm	557	60
	Apfelskopf/Heidelberg	550	< NWG
	Wittlingen/Lörrach	698	< NWG

Tabelle 5: Belastung von Bodenproben

Wir wollten die gemessenen Bodenkontaminationen mit einer von der Tschernobyl-Katastrophe stärker belasteten Region vergleichen und untersuchten daher Proben aus Gomel, Weißrussland.

Bodenart	Herkunftsort	FG in g	Höhe in cm	Gesamtaktivität in Bq/kg FG
Waldboden	Besed	50	1,5	26 780
Waldboden, 15cm tief	Besed	188	2,5	880
Birkenwaldboden	bei Wetka	262	3,3	700
Wiese	Bartolomejewka	206	2	4 040
Garten	Bartolomejewka	143	1,5	4 350
Garten	Bartolomejewka	288	3	4 300
Garten in Siedlung	Kalsch bei Wetka	213	2	900
Privatgrundstück	Swietilowitschi	602	5,8	123
Privatgrundstück	Swietilowitschi	531	6	89
Privatgrundstück	Swietilowitschi	566	5,6	60
Privatgrundstück	Swietilowitschi	520	4	56

Tabelle 6: Bodenproben aus Gomel, Weißrussland

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

3.4 Sonstige durchgeführte Messungen

Wir untersuchten noch weitere Nahrungsmittel, die ca. 85 km von Tschernobyl entfernt geerntet wurden. Außerdem erhielten wir direkt nach dem GAU gesammelte Proben aus Heidenheim.

Probenart	Herkunftsort	Sammeljahr	TG in g	heutige Aktivität in Bq/kg TG	Aktivität im Sammeljahr in Bq/kg
Kartoffeln	Acker/Gomel	2002	301	< NWG	< NWG
Rote Beete	Acker/Gomel	2002	51	< NWG	< NWG
Kürbiskerne	Acker/Gomel	2002	38	< NWG	< NWG
Weizen	Acker/Gomel	2002	90	< NWG	< NWG
Esskastanienmehl	bei Heidelberg	1998	88	100	110
Straßenstaub	bei Heidenheim	1986	508	4 500	6 670
Heu (1. Schnitt)	bei Heidenheim	1986	48	2 180	3 220

Tabelle 7: Belastung von Nahrungsmitteln

3.5 Unterschiede in der Belastung

Die ^{137}Cs -Konzentration im Pilz ist hauptsächlich von folgenden Faktoren abhängig:

1. Dem Vorhandensein von ^{137}Cs im Boden
2. Der Bodenart und deren physikalisch/chemischen Eigenschaften
3. Der artspezifischen Anreicherungsfähigkeit des Pilzes
4. Den physiologischen Eigenschaften des Symbionten

a) Zusammenhang zwischen Bodenbelastung und Pilzbelastung

Vorab gilt zu erwähnen, dass bei Zuchtpilzen keine Belastungen erkennbar sind – dies konnten wir auch an einem Ulmenseitling (*Hypsizygos ulmarius*), der auf Holz angebaut wurde, bestätigen.

Die Kontamination mit radioaktivem Cäsium im Boden ist regional sehr unterschiedlich und hängt in erster Linie von der Verteilung des radioaktiven Niederschlages im Mai 1986 ab. Die Bodenbelastung in Deutschland 1986 ist in Abb. 12 dargestellt. Die Kontamination in Weißrussland ermittelten wir mit Hilfe des „Chernobyl Atlas“⁸⁾ des „Joint Research Centre“ der Europäischen Kommission (Italien), zu der wir über den Kontakt mit Imanaka Tetsuji vom Research Reactor Institute Kyoto (Japan) Zugang erhielten. Sie lag in dem von uns untersuchten Gebiet 1986 bei ca. 1500 kBq/m² - in Deutschland waren es in den höchstbelasteten Gebieten ca. 40 kBq/m². Somit kann man erklären, dass sowohl die Pilz- als auch die Bodenproben aus Weißrussland um ein

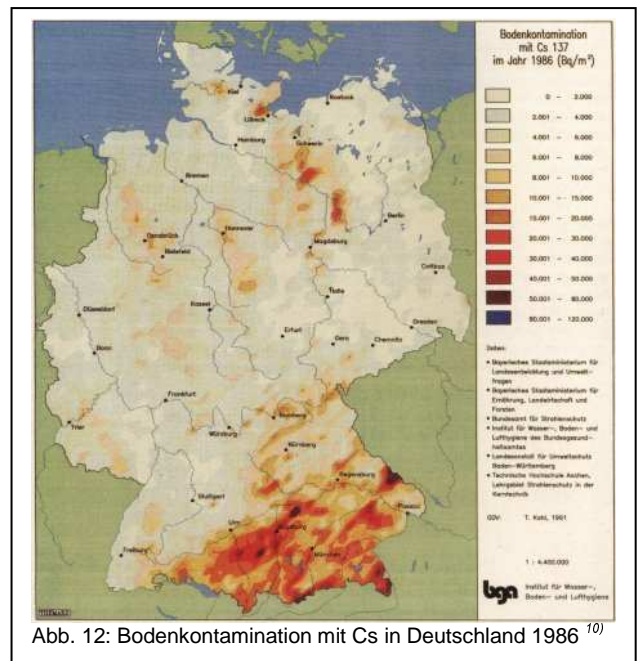


Abb. 12: Bodenkontamination mit Cs in Deutschland 1986¹⁰⁾

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Vielfaches höher belastet sind als die Proben aus Deutschland.

Waldböden sind im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Böden stärker belastet, da sie nicht bearbeitet werden.

Dies erklärt auch, dass wir die höchste Belastung bei einem Waldboden aus Besed/Gomel fanden.

In den letzten Jahren nahm die Höhe der Kontamination bei den meisten Pilzen ab. Ursachen dafür sind neben dem Zerfall des ^{137}Cs , das eine Halbwertszeit von 30 Jahren hat, vor allem das Tiefenwandern der Radionuklide. Dadurch kann der Pilz über das Myzel weniger ^{137}Cs aufnehmen. Dies erklärt z.B., dass Trompetenpfeifferlinge aus Heidelberg des Jahres 2001 etwa die doppelte Belastung aufwiesen als 2002 gesammelte. Dasselbe Phänomen kann man auch an der Maronenröhrlingsprobe aus Höchenschwand von 1995 und 2000 erkennen.

Doch auch die Eigenschaften des Bodens spielen für die Aufnahme des ^{137}Cs eine wichtige Rolle. Je saurer der Boden ist, desto besser wird das Cäsium gelöst und kann somit besser von den Pilzen aufgenommen werden. Dies trifft z.B. auf Moor- und Waldböden zu. Da kalkhaltige Böden einen sehr hohen pH-Wert besitzen, ist in ihnen hingegen das Cäsium kaum für die Pilze verfügbar. Noch stärker hindern Tonmineralien im Boden die Aufnahme von Cäsium, da diese das Cäsium binden, das somit von den Pilzen nicht mehr aufgenommen werden kann. Durch das Tiefenwandern der Radionuklide in Bodenschichten, in denen sich mehr Tonmineralien befinden, wird dieser Effekt verstärkt.⁴⁾

b) Zur Aufnahme der Radioaktivität

In den meisten Nahrungsmitteln findet sich kaum eine Cäsiumbelastung. Dies liegt am geringen Transferfaktor Boden-Pflanze – d.h. die Pflanze nimmt nur sehr wenig Cäsium auf.

Dies konnten wir auch durch unsere Messungen an Lebensmitteln aus Weißrussland bestätigen, die keine Kontamination aufwiesen.

Pilze hingegen nehmen vor allem deswegen Cäsium auf, weil Cäsium dem Kalium ähnelt, welches im Fruchtkörper des Pilzes den osmotischen Druck aufrechterhält. Das Cäsium wird von der Ionenpumpe verwechselt und ebenfalls in die Pilzzellen transportiert.

Außerdem ist das Kalium bei Pilzen – wie bei Menschen auch – ein lebenswichtiges Nährelement. Auch in dieser Funktion wird das Cäsium manchmal von den Pilzen mit dem Kalium „verwechselt“, es hat allerdings keine biologische Funktion. (*G. Bahnweg in litt.*)

Jedoch gibt es Unterschiede in der Aufnahmefähigkeit der Pilze: Parasiten (z.B. der Hallimasch), die auf Kosten ihres Wirts leben und Saprobionten (z.B. Ulmenseitling), die sich v. a. von abgestorbenen Pflanzen ernähren, speichern kaum Radioaktivität. Symbionten (z.B. Röhrlinge) leben dagegen in einer Zweckgemeinschaft mit anderen Gefäßpflanzen (Mykorrhiza), denen sie vor allem Mineralstoffe beschaffen und von diesen Photosyntheseassimilate wie z.B. Zucker

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

erhalten. Dadurch nehmen die Pilze mehr Mineralstoffe auf als sie selbst brauchen und speichern somit ungewollt auch Cäsium ⁴⁾.

c) Vergleich von Maronenröhrling und Trompeten-Pfifferling

Da der Maronenröhrling fast flächendeckend in ganz Deutschland vorkommt, eignet er sich besonders gut als Bioindikator für die Belastung des Bodens.

Des Weiteren sind Maronenröhrlinge und Trompeten-Pfifferlinge Speisepilze und somit ist deren Kontamination für den Verbraucher von Interesse. Beide gehören zur Gruppe der Symbionten (Mykorrhizapilze) und kommen zudem bevorzugt auf sauren Böden vor. Des Weiteren beziehen beide ihre Nährstoffe aus den oberen Bodenschichten (*Ch. Hahn in litt.*), in denen wir an unseren Bodenproben aus Deutschland und Gomel eine erhöhte Belastung feststellen konnten.

All diese Faktoren bedingen eine erhöhte Radioaktivitätsaufnahme.

Beim Maronenröhrling bildet zudem das Cäsium mit dem Farbstoff Norbadion A, der u.a. in der Huthaut vorkommt eine chemische Komplexverbindung. ¹²⁾ Normalerweise wird hierzu Kalium eingesetzt, doch da Cäsium ähnlichen Ionenradius und Ladung hat, kann es mit dem Kalium „verwechselt“ werden und führt somit zu einer Anreicherung mit Cäsium ⁵⁾. Vom Trompeten-Pfifferling ist so ein Mechanismus noch nicht bekannt – auch hier wäre es interessant, dies näher zu erforschen.

4. ABSCHÄTZUNG DER AUSWIRKUNG AUF DEN MENSCHEN

Bei der Wechselwirkung radioaktiver Strahlung mit dem Organismus kommt es sowohl bei der inneren als auch bei der äußeren Strahlung zunächst zu physikalischen Prozessen (wie Ionisation oder Anregung von Atomen und Molekülen), dann zu chemischen und biochemischen Prozessen (Bildung von Peroxiden, Veränderung von Aminosäuren und Enzymen oder Zerbrecen von Makromolekülen, DNS-Schäden, Chromosomenbrüchen) und dann - wenn vorher keine Selbstreparatur wie z.B. bei DNS eintritt - die biologische Phase mit somatischen Schäden, genetischen Schäden oder Zelltod. ⁵⁾

Das mit der Nahrung verschluckte Cäsium ist nach 24 h fast vollständig vom Körper aufgenommen. Es wird im Wesentlichen in der Muskulatur bis zu einer maximalen Menge von 10 mg aufgenommen. Da es vorwiegend über die Nieren wieder ausgeschieden wird, beträgt die Biologische Halbwertszeit 70 Tage für den Gesamtkörper und 140 Tage für die Muskulatur. ¹³⁾

Zum Schutz der Bürger gibt es eine EU-Richtlinie, die für importierte Lebensmittel eine Höchstkontamination von 600 Bq/kg Frischgewicht vorsieht ¹⁾ – diese wurde bei unseren Untersuchungen in Deutschland nicht überschritten.

Da die Belastung jedoch sehr vom jeweiligen Sammelort abhängt, muss man gerade bei gesammelten Pilzen vorsichtig sein. Auch importierte Pilze werden nur stichprobenartig kontrolliert und somit ist selbst hier Vorsicht angebracht.

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

Interessant ist nun natürlich, wie stark die Belastung beim Genuss von Pilzen für den Menschen ist. Eine Aufnahme von 80 000 Bq ^{137}Cs entspricht einer Strahlenexposition von 1 mSv. ⁵⁾

Dazu ein Beispiel: Bei einer Mahlzeit von 400 g Trompeten-Pfifferlingen mit einer Kontamination von 500 Bq/kg FG entsteht eine Belastung von 0,0025 mSv. Da normalerweise Wildpilze nicht in größeren Mengen verzehrt werden, ist die Belastung selbst dann noch gering, wenn einige Pilze ^{137}Cs -Gehalte über dem EU-Grenzwert von 600 Bq/kg aufweisen. Im Vergleich dazu: Die durchschnittliche radioaktive Strahlenbelastung in Deutschland liegt bei ca. 4 mSv pro Jahr. ¹⁾ Trotzdem: Jede zusätzliche Belastung sollte vermieden werden.

5. AUSBLICK

Wir planen, am nächsten Hilfskonvoi nach Gomel teilzunehmen und dabei auch noch mehr Bodenproben zu entnehmen. So wäre z.B. eine genaue Untersuchung des Bodenhorizontes möglich, um Aussagen über die Versickerung zu treffen.

Außerdem werden wir an einem Universitätsinstitut Messungen der Proben mit einem Germanium-Lithium-Detektor durchführen, um noch genauere Aufschlüsse über die nuklidspezifische Zusammensetzung unserer Proben (z.B. das Vorhandensein von ^{134}Cs) zu erhalten.

6. DANKSAGUNGEN

Unser besonderer Dank gilt:

Herrn Bernd Kretschmer (Physik-AG Lörrach), für seinen unermüdlichen Einsatz, dem Schüler-Forschungs-Zentrum Bad Saulgau für Motivation und Unterstützung, der Sparkassenstiftung „Jugend und Umwelt“ für die Finanzierung der Geräte, Naturenergie für das Projekt „Woodland“, Natalie Müller (Physik-AG Lörrach) für die Hilfe beim Programmieren der Simulation, unseren Schulen für offene Räume und bereitwillige Unterstützung, Prof. Gregor Zibold (FH Ravensburg-Weingarten), Dr. Karlheinz Wietzke (Leybold-Didactic), Christoph Hahn (LMU München), Detlef Beltz (TÜV Hannover) und Dr. Harald Genz (TU Darmstadt) für viele Ratschläge und Infos, Gerd Fischer (Arbeitsgemeinschaft Mykologie Ulm) und Dr. Manuel Sittig (Heidelberg) für Pilze, Bodenproben und gute Ratschläge, Peter Karasch (Gauting-Unterbrunn), Werner Edelmann (München), Gottfried Thumser (Myko-Service Thumser), Wolf-Peter Hirlinger (Werkgymnasium Heidenheim) und Fam. Martin Butzer (Linkenheim) für Pilz- und Bodenproben, Dr. Reinhard Jaki (Chefarzt, Klinik Schillerhöhe Stuttgart), Albert Landwehr (Stuttgart), Ludmila Rudenok (Gomel, Weißrussland) und Alexander Nartschuk (Uni Gomel) für die Proben aus Weißrussland, Imanaka Tetsuji (Kyoto University; Reactor Research Institute), Marc de Cort (EC-Joint Research Centre, Italien), dem Otto Hug Strahleninstitut München für Informationsmaterialien und unseren Eltern für logistische Unterstützung.

Radioaktive Belastung bei Pilzen

Jugend forscht - Arbeit von Jochen Butzer, Hannah Tomczyk und Florian Müller

7. QUELLENVERZEICHNIS

- 1) LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: Radioaktivität in Baden-Württemberg, Jahresbericht 96 & 97, Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität, Jahresbericht 2001, Karlsruhe
- 2) GÖHLER, H.: Szintillationszähler für γ - und β -Strahlung, 1982, Köln
- 3) MICHEL, R.: 15 Jahre nach dem Unfall von Tschernobyl, 28/29 Juni 2001, München
- 4) RAUCH, W.: Forschungsberichte der Sektion VI des österreichischen Bundeskanzleramtes über Radioaktivitätsmessungen in Österreich 9/99, Wien
- 5) LENGFELDER, E.: Strahlenwirkung, Strahlenrisiko, 2. Auflage, 1990, Ecomed Landsberg/Lech
- 6) BADER, F.: Dorn-Bader Physik 12/13, 2000, Hannover
- 7) WIETZKE, K.: Handblätter Physik P.6554:
Identifizierung und Aktivitätsbestimmung an schwach radioaktiven Proben, 2002, Hürth
- 8) DE CORT, M.: Atlas of Caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident, European Commission - Joint Research Centre (Environment Institute), 1998, Ispra (Italien)
- 9) FLUCK, O.: Versuch zur Gamma-Spektroskopie, 31.08.2000, Zürich
(www.phys.ethz.ch/phys/dep/dienste/unterrichtsbetr/vb/VP-Expliste/Gamma-Spektroskopie.pdf)
- 10) KAHL, T.: Bodenkontamination mit ^{137}Cs im Jahr 1986, 1991, Bonn
- 11) KRIEGLSTEINER, G.J.: Die Großpilze Baden-Württembergs Band 2, Ulmer-Verlag, 2000
- 12) STEGLICH, W.: Die Hutfarbstoffe des Maronenröhrlings, 1996, Bonn
- 13) VOLKMER, M.: Radioaktivität und Strahlenschutz, 1998, Hamburgische Elektrizitätswerke, Schulinformationen

Verwendete Internetadressen: www.bfs.de/info/themen/st0102/st0102.htm
www.umweltinstitut.org/frames/faq/faq_radio.htm
www.m-ww.de/enzyklopaedie/strahlenmedizin/radio_pilze.html
www.oh-strahlen.org
www.chernobyl.info
www.unscear.org

Weitere Informationen zum Projekt sowie einige der angegebenen Quellen erhalten Sie unter

<http://radioaktive-pilze.physikag.de>