

Verfahren zur gammaspektrometrischen Bestimmung von Radionukliden in Lebensmitteln

E- γ -SPEKT-LEBM-01

Bearbeiter:

O. Frindik
M. Heilgeist
W. Kalus
R. Schelenz

Leitstelle für Boden, Bewuchs, Futtermittel und
Nahrungsmittel pflanzlicher und tierischer Herkunft

1 Verfahren zur gammaspektrometrischen Bestimmung von Radionukliden in Lebensmitteln

1 Anwendbarkeit

Die nachstehend beschriebenen Verfahren sind bei der Untersuchung aller Lebensmittel (außer Milch und Milchprodukten, Fisch und Fischprodukten) anzuwenden, die nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz (1) und der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (2) im Routinefall zu überwachen sind.

Die Methode ist anwendbar für alle Arten biologischen Materials wie Einzellebensmittel pflanzlicher oder tierischer Herkunft, Gesamt- und Babynahrung. Die Methode ist nicht anwendbar für die Bestimmung von Radionukliden des Iods und von anderen leichtflüchtigen Radionukliden, sofern die Proben trocken verascht werden (siehe E-I-131-LEBMP-01).

2 Probeentnahme

2.1 Allgemeines

Art der Proben, Umfang der Probeentnahme und Auswahl der Probeentnahmeorte richten sich im Routinefall nach der Richtlinie für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz, Teil I: Meßprogramm für den Normalbetrieb (Routinemeßprogramm) (3). Entsprechende Vorgaben zur Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen sind in der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (2) enthalten.

Zur Vermeidung von Kreuzkontaminationen und zur Vermeidung von Feuchtigkeitsverlusten bei Lagerung sollte das Probenmaterial bereits bei der Probeentnahme in gut verschließbare Behälter eingebracht werden (z. B. Polyethylengefäße mit Schraubverschluß oder Polyethylenbeutel).

Üblicherweise ist die Probenmasse jeweils für eine Doppelanalyse einzuplanen. Die Probeentnahme sollte deshalb so erfolgen, daß etwa die vier- bis fünffache Masse des für eine Doppelanalyse benötigten analysenfertigen Materials zur Verfügung steht. Bei fehlerhafter Analyse ist dann noch Probenmaterial für eine weitere Doppelanalyse vorhanden.

Können die Proben nicht im Anschluß an die Probeentnahme analysiert werden, sind sie einzeln in verschlossenen Gefäßen bei einer Temperatur von mindestens -18°C in analysenfertigem Zustand aufzubewahren (siehe Kap. 3.2).

2.2 Grundsätze der Probenauswahl

Es ist nicht möglich, alle landwirtschaftlich produzierten und im Handel befindlichen Lebensmittel kontinuierlich und lückenlos zu untersuchen. Daher muß eine geeignete Probenauswahl die benötigten Hinweise über das Ausmaß einer möglichen Belastung von Lebensmitteln durch Radionuklide geben (4). Es werden bevorzugt solche pflanzliche und tierische Produkte untersucht, die nach der Erfahrung stärker als andere Produkte

Radionuklide über den Luft-, Wasser- und Bodenpfad aufnehmen oder akkumulieren (Indikatoren). Außer bei Gesamtnahrungsproben sind nur Produkte der Erzeugerstufe zu untersuchen.

Die Probenauswahl erfolgt nach Probeentnahmeplänen, die von jedem Bundesland in Zusammenarbeit mit der Zentralstelle des Bundes für die Überwachung der Umweltradioaktivität (ZdB) aufgestellt wurden.

2.2.1 Lebensmittel pflanzlicher Herkunft

Vorrangig kommen landwirtschaftliche Erzeugnisse in Betracht, deren oberirdische Teile zum Verzehr bestimmt sind. Die höchsten Radionuklidgehalte haben bei den Gemüsesorten im allgemeinen die auf dem Freiland wachsenden Blattgemüse und von diesen wiederum diejenigen mit einer langen Wachstumsperiode und einer großen freien Blattoberfläche (z. B. Grünkohl). Pilze zeigen ein spezielles Verhalten, da sie Radiocaesium anreichern können. Bei Obstsorten sind diejenigen von Interesse, die große Oberflächen im Verhältnis zum Gesamtgewicht aufweisen. Hierzu gehört vor allem Beerenobst.

Die zu überwachenden Lebensmittel pflanzlicher Herkunft sind so auszuwählen, daß über das Jahr verteilt die verschiedenen erntereifen Produkte aus den für die Versorgung der Bevölkerung relevanten Anbaugebieten erfaßt werden. Für die Überwachung von Freilandgemüse und Obst wird empfohlen, sich auf solche Gemüse- und Obstarten zu beschränken, die von den Anbauflächen bzw. von den Produktionsmengen her dominieren. Dadurch soll sichergestellt werden, daß in allen Ländern in Abhängigkeit von der Jahreszeit und vom Stand der Vegetation in etwa von gleichen Produkten Proben entnommen werden.

In den Monaten März bis Mai sollten bevorzugt Kopfsalat, Spinat, Kohlrabi, Porree und Rettich untersucht werden. Für den Zeitraum Juni bis September wird die Untersuchung von Bohnen, Erbsen, Blumenkohl, Weißkohl, Rotkohl, Wirsing, Gurken, Möhren und Zwiebeln empfohlen. Im Oktober bis November sollten zur Untersuchung die Spätgemüsearten Chinakohl, Endiviensalat, Sellerie und Rote Rüben, neben den Spätsorten von Weißkohl, Rotkohl und Möhren, herangezogen werden. Für die Wintermonate Dezember bis Februar verbleiben zur Untersuchung die winterfesten Gemüsearten Grünkohl, Rosenkohl, Porree und der Feldsalat.

Von den Obstarten haben im Juni/Juli die Erdbeeren, die Strauchbeeren, davon insbesondere die Johannisbeeren, und die Kirschen Vorrang bei der Untersuchung. Ab August sollten die Kernobstarten Äpfel und Birnen, sowie die zum Steinobst zählenden Pflaumen, Zwetschgen, Aprikosen und Pfirsiche untersucht werden. Bei einheimischem Schalenobst sind Hasel- und Walnüsse von Interesse bei der Überwachung.

Getreide ist nur zur Zeit der Reife zu überwachen. Es sind die reifen Getreidekörner von Roggen, Weizen, Gerste und Hafer zu untersuchen. Die Untersuchung von ganzen Ähren oder von Mahlprodukten wie Mehl und Kleie ist zu unterlassen, damit die Vergleichbarkeit der Meßwerte gewahrt bleibt.

Aufgrund der Verzehrsgewohnheiten in Deutschland wurden Kartoffeln ebenfalls in den Probeentnahmeplan aufgenommen, obwohl sie nicht zu den Pflanzen zählen, die Radionuklide akkumulieren.

Generell ist zur Probeentnahme von pflanzlichem Material zu sagen, daß nur botanisch einheitliches Material verwendet werden sollte. Die Untersuchung von Mischproben, z. B. von Mischungen aus Äpfeln und Birnen oder aus Kopfsalat und Eisbergsalat ist nicht zulässig. Ebenso sollte auf eine Sortenvermischung verzichtet werden.

2.2.2 Lebensmittel tierischer Herkunft

Nach dem Routinemeßprogramm (3) sind für die Überwachung der Lebensmittel tierischer Herkunft die Proben gleichmäßig über das Jahr verteilt zu nehmen. Die Proben sollten bevorzugt aus Rohprodukten einheimischer Nutztiere bestehen, wie sie in Schlachthöfen anfallen. Vorrangig zu untersuchen sind Rindfleisch, Schweinefleisch, Kalbfleisch und Geflügel, wobei ausschließlich Muskelfleisch auszuwählen ist.

Für Untersuchungen von Wildbret (Reh, Hirsch, Damwild und Wildschwein) und Lammfleisch, das Radiocäsium anreichern kann, können bis zu 10% der im Routinemeßprogramm für Fleisch festgelegten Probenanzahl genutzt werden.

Zur Erfüllung des Überwachungsauftrags ist es wichtig, daß der Ursprungsort des Schlachttieres, d. h. der Ort, an dem das Tier aufgezogen und zur Schlachtreife gebracht wurde, genau ermittelt werden kann.

2.2.3 Gesamtnahrung

Die Messung der Gesamtnahrung (5) ist für die Abschätzung der Strahlenexposition, die durch die Ingestion von Radionukliden verursacht wird (Ingestionsdosis), unerlässlich. Sie gibt – im Gegensatz zur Messung der Einzellebensmittel, die meist an Rohware durchgeführt wird – den Radionuklidgehalt der verzehrfertigen Nahrung an und berücksichtigt den Beitrag der einzelnen Lebensmittel im Verhältnis der tatsächlich von bestimmten Personengruppen verzehrten Mengen. Gesamtnahrungsproben sind primär aus der Gemeinschaftsverpflegung zu beziehen. Hierfür kommen Einrichtungen wie Wohnheime, Kasernen oder Gemeinschaftsküchen in Frage, die eine Vollverköstigung anbieten.

Die Tagesprobe soll die gesamte Verzehrsmenge umfassen, die ein gesunder Erwachsener an einem Tag beim Frühstück, Mittagessen, Abendessen und den Zwischenmahlzeiten *einschließlich der Getränke* zu sich nimmt. Die Gesamtnahrungsproben sind wöchentlich als Stichproben zu entnehmen.

Die Wochenstichprobe wird in Folienbeuteln oder in verschließbaren Gefäßen aus Glas oder Kunststoff gesammelt. Die Probe wird umgehend homogenisiert (siehe Kap. 3.2) und in dieser Form bei Kühlschranktemperatur aufbewahrt (andernfalls wird sie un bearbeitet unter den o. a. Bedingungen zwischengelagert bis die Wochenstichprobe hergestellt wird). Ist abzusehen, daß nach Ablauf von 7 Tagen die Wochenstichprobe nicht aufbereitet werden kann, ist sie bei -18°C zu lagern. Aus vier Wochenstichproben wird eine Monatsmischprobe für die Analyse auf Sr-90 hergestellt.

Die Masse der Gesamtnahrung ist vor der Verarbeitung festzuhalten. Können die analysenfertigen Proben nicht anschließend gemessen werden, sind sie als Einzelproben tiefgekühlt bei -18°C zu lagern. Bei der Kühl Lagerung stark wasserhaltiger Lebensmittel besteht die Gefahr, daß sich Kondenswasser an den Wänden der zur Lagerung verwendeten Gefäße niederschlägt. Dieses muß nur dann quantitativ erfaßt werden, wenn die Proben noch nicht analysenfertig vorbereitet und ausgewogen worden sind. Ein Wasserverlust kann über die Wägung der entleerten Gefäße vor und nach ihrer Trocknung ermittelt werden. Bei der Berechnung eines Radionuklidgehaltes pro kg Feuchtmasse (FM) ist dieser Masseverlust der Probe gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Die tägliche Verzehrsmenge eines Erwachsenen beträgt etwa 1,8 bis 2,3 kg (5). Diese Masse ist sowohl für eine gammaspektrometrische Direktmessung als auch für eine gammaspektrometrische Messung nach Veraschung ausreichend. Von den Wochenstichproben sind der Probeentnahmeort, das Probeentnahmedatum, die Probenmasse und deren Hauptbestandteile festzuhalten.

2.2.4 Säuglings- und Kleinkindernahrung

Säuglings- und Kleinkindernahrung (Menüs und Getränke) – einschließlich Milchersatznahrung – sind monatlich zu entnehmen. Hier sind grundsätzlich Produktionsstätten für Säuglings- und Kleinkindernahrung zu beproben. Ist in einem Land keine Produktionsstätte eines Herstellers angesiedelt, können Großanwender, z. B. Kinderkrankenhäuser, Säuglings- und Kinderkrippen, beprobt werden.

Wegen wechselnder Verzehrsmengen im 1. Lebensjahr sind die Aktivitätsangaben auf kg Feuchtmasse zu beziehen. Art und Menge bei der Probenentnahme kann sich an den Angaben der AVV zu § 45 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), Anhang 5, Tabelle II 1 orientieren.

2.2.5 Probeentnahme von Importprodukten

Die Probenanzahl zu überwachender importierter Produkte entspricht etwa 15% der Probenanzahl der zu untersuchenden inländischen Produkte. Zu untersuchen sind sowohl Lebensmittel pflanzlicher als auch tierischer Herkunft. Priorität sollte wiederum Freilandgemüse haben, ansonsten sind bevorzugt jene Produkte zu überwachen, die von den Importmengen her relevant sind. Die Proben sind stichprobenartig entweder bei den Importeuren oder direkt an den Grenzübergängen zu entnehmen. Proben von Importprodukten sind nur dann zu entnehmen, wenn das Ursprungsland bekannt ist.

3 Analytik

3.1 Prinzip der Methode

Die aufbereiteten Proben werden in einer geeigneten Meßgeometrie direkt mit einem Ge-Gamma-Spektrometer gemessen. Bei Detektoren mit geringer Ansprechwahrscheinlichkeit ($< 15\%$ relative Ansprechwahrscheinlichkeit verglichen mit einem $3'' \times 3''$ NaI (Tl)-Detektor für die 1,33 MeV Linie des Co-60) und bei Proben mit niedrigem Gehalt an Radionukliden kann es erforderlich sein, die Radionuklide durch Veraschung der Proben anzureichern (siehe Kap. 3.2.4), um die geforderten Nachweisgrenzen (3) zu erreichen.

3.2 Probenvorbereitung

3.2.1 Allgemeines

Es ist bekannt, daß neben der Art der Probeentnahme auch die Art der Probenvorbereitung erheblichen Einfluß auf das Analysenergebnis haben kann. Daher ist es zweckmäßig, standardisierte Probenvorbereitungsverfahren anzuwenden, um vergleichbare Analysendaten zu erhalten. Für die Bestimmung von Schwermetallgehalten in und auf Lebensmitteln sind vom Bundesgesundheitsamt Verfahren vorgeschlagen worden, die auch zur Bestimmung von Radionukliden geeignet sind (6).

Es werden nur die zum Verzehr bestimmten Teile der landwirtschaftlichen Produkte und Lebensmittel in der Angebotsform untersucht und die Ergebnisse auf diese bezogen.

Für die verschiedenen Lebensmittel sind folgende Vorbehandlungsmaßnahmen vorzusehen (7):

3.2.2 Einzellebensmittel

Frischgemüse: Nicht zum Verzehr bestimmte Teile, wie verdorbene Blätter, Strünke, Hüll- und Deckblätter, Schalen, starke Verunreinigungen usw., sind zu entfernen.

Blattgemüse: Nach der Probeneinwaage normiert waschen (siehe unten).

Sproßgemüse: Wurzel- und Sproßansätze entfernen (z. B. Zwiebel) und schälen (z. B. Zwiebel, Spargel).

Fruchtgemüse: Stiele, Kelchblätter und Blütenansätze entfernen. Bei grünen Bohnen Enden abschneiden und gegebenenfalls Fäden entfernen.

Wurzelgemüse: Kraut- und Krautansatz, Wurzeln entfernen; schaben, wenn Schale nicht verzehrt wird; nach der Probeneinwaage normiert waschen (siehe unten).

Pilze: Wurzelansatz (Myzel), schadhafte Stellen entfernen und nach der Probeneinwaage normiert waschen (siehe unten).

Kartoffeln: Keime und eventuell anhaftende Erdkrusten entfernen, dann normiert waschen (siehe unten), schälen und nach der Probeneinwaage nochmals kurz nachspülen. Das Schälen entfällt, wenn z. B. bei Frühkartoffeln zu erwarten ist, daß die Schale mitverzehrt wird.

Frischobst: Beerenobst: Stengel, Blütenreste und verdorbene Beeren sind zu entfernen. Verschmutzte oder nahe dem Erdboden wachsende Beeren (z. B. Erdbeeren) sind nach der Probeneinwaage normiert zu waschen (siehe unten).

Kernobst: Blütenansätze, Stiele und Kerne (soweit nicht mitverzehrt) sind zu entfernen.

Steinobst: Stiele und Steine sind zu entfernen.

Zitrusfrüchte, Melonen, Bananen:

Schalen und vorhandene Kerne sind zu entfernen.

Faulige Stellen sind bei Obst auszuschneiden.

Schalenobst: Die Schalen sind zu entfernen.
(Nüsse)

Getreide: Die reifen Getreidekörner sind aus den Ähren zu entnehmen. Das Getreide muß besatzfrei sein. Unter Besatz bei Getreide versteht man sämtliche Bestandteile einer Getreideprobe, die nicht einwandfreies Grundgetreide sind.

Fleisch: Bei Muskelfleisch sind Knochen, grobe Sehnen, Bänder, straffe und elastische Bindegewebszüge sowie Fettgewebe weitgehend zu entfernen.

Eier: Die Schalen sind zu entfernen.

Konserven: Bei Konserven wird der gesamte Inhalt der Analyse zugeführt, wenn Füllgut und Aufgußflüssigkeit zum Verzehr bestimmt sind. Wird die Aufgußflüssigkeit nicht mitverzehrt (z. B. bei Salzgurken), dann ist nur das Füllgut zu untersuchen.

Das küchenfertig vorbereitete Produkt wird ca. 3 Minuten in stehendem Wasser gewaschen. Das Mengenverhältnis zwischen Produkt und Wasser sollte 1:10 betragen. An-

schließlich läßt man auf einem Kunststoffsieb ca. 2 Minuten abtropfen. Bei stark verschmutzten Produkten ist der Waschvorgang in der gleichen Weise zu wiederholen. Bei Blatt- und Kohlgemüse wie Grünkohl, Petersilie, Salat usw. wird das gewaschene Produkt in einem trockenen Tuch leicht ausgeschlagen. Die zur Analyse verwendeten verzehrfähigen Teile werden grundsätzlich vor dem Waschen eingewogen. Bei Kartoffeln ist die Einwaage vor dem Nachspülen vorzunehmen.

3.2.3 Gesamtnahrung

An wechselnden Wochentagen wird die Wochenstichprobe hergestellt. Wochenstichproben können nach folgendem Schema homogenisiert werden: Feste Lebensmittel wie Fleisch, Wurst, Käse, Brot, Brötchen, Rohkost (Gemüse, Obst), Nüsse usw. sind mit einem Sägezahnmesser vorzuzerkleinern, bevor sie mit einem Haushaltsgerät (Zerkleinerer) vorhomogenisiert werden können. Für diesen Schritt der Probenvorbereitung kann auch ein Schneidcutter verwendet werden. Diese vorhomogenisierten Tagesprobenbestandteile werden anschließend in ein leistungsfähiges Mixgerät mit einem Fassungsvermögen von 2,5–3 Liter überführt und zusammen mit den weichen und gekochten Speisenbestandteilen unter portionsweiser Zugabe der Getränke zu einem homogenen Brei verarbeitet. Zur Verhinderung von Phasentrennungen, bewirkt durch feste Fette (Butter, Margarine, Schmalz) und Pflanzenöle, ist während der Homogenisierung 1 ml Emulgator zuzusetzen. Es wird die Verwendung von Polyoxyethylen-Sorbitanmono-oleat (TWEEN 80) vorgeschlagen. Der Emulgator verhindert gleichzeitig ein Aufschäumen des Probengutes, das bei der Zugabe von Getränken, insbesondere von solchen mit Kohlensäuregehalt, während des Homogenisierens auftreten kann. Die Getränke können auch zur vollständigen Überführung der Speisen aus den Sammelbehältern (Ausspülen) dienen. Zur Konservierung (Vermeidung mikrobieller Zersetzung) des Probengutes sollten 4 ml 5%ige Natriumazid-Lösung zugefügt werden. Sollte der Tagesprobenumfang die Kapazität des Mixgerätes überschreiten, kann die Homogenisierung auch mit Probenhälften durchgeführt werden. Für eine ausreichende Vermischung bzw. zur Verhinderung einer Entmischung bei der Weiterbehandlung der zusammengeführten Probenhälften ist eine entsprechend große Schüssel mit Rühraufsatz notwendig.

Von den homogenisierten Wochenstichproben sind aliquote und gegebenenfalls gewichtete Teile für die Monatsmischprobe zu entnehmen. Die Masse der Wochenstichprobe richtet sich danach, ob die gammaspektrometrische Analyse durch Direktmessung oder nach Trockenveraschung erfolgen soll. Es ist zu berücksichtigen, ob auch eine Sr-89/Sr-90-Bestimmung (siehe E-Sr-89/Sr-90-LEBM-01) vorgesehen ist. Für die gammaspektrometrische Direktmessung der Wochenstichprobe ist 1 kg FM (ca. 1 l) ausreichend.

3.2.4 Veraschung

Die Überwachung von Lebensmitteln auf Radionuklide erfordert häufig als weiteren Schritt der Probenvorbereitung die Veraschung der Proben, um die zu bestimmenden Radionuklide von der um Zehnerpotenzen größeren Masse an organischer und wäßriger Matrix zu befreien. Bei einem geringen Kontaminationsgrad ist der Einsatz von Lebensmittelmengen im kg-Bereich für eine Analyse notwendig, um Meßwerte größer als die Nachweisgrenze zu erhalten.

Sowohl bei der Verarbeitung größerer Lebensmittelmengen pro Einzelanalyse als auch bei einer großen Anzahl von Proben ist die Trockenveraschung anderen Veraschungsmethoden vorzuziehen, weil sie fast «wartungsfrei» erfolgen kann. Die in der Literatur

oftmals zitierten Nachteile der Trockenveraschung, wie lange Vorbereitungs- und Veraschungszeiten, Verluste an flüchtigen Radionukliden durch unkontrollierbare Reaktionsabläufe, Kohlenstoffgehalte der Aschen, Reaktionen von Radionukliden mit dem Gefäßmaterial und Geruchsbelästigungen durch Schwelgase können durch geeignete Maßnahmen ganz oder weitgehend vermieden werden.

Für die Bestimmung von Radionukliden werden ausreichende Aschemassen benötigt. Die nachfolgende Tabelle enthält mittlere Aschegehalte zahlreicher Lebensmittel (8). Mit folgender Faustformel läßt sich diejenige Masse an verzehrsfertig vorbereitetem Produkt abschätzen, die etwa 10 g kohlenstofffreie Asche ergibt:

$$\frac{1}{\text{Aschegehalt in \%}} = \text{Masse des Produkts in kg FM.}$$

Da mittlere Aschegehalte angegeben sind, sollten größere Probenmassen eingesetzt werden, um die benötigten Aschemassen zu erhalten.

Die Tabelle enthält zusätzlich die für die Sr-89/Sr-90-Analytik benötigten Angaben der mittleren Ca-Gehalte. Da bei der Bestimmung von Sr-89/Sr-90 für eine Analyse üblicherweise entweder von 10 g Asche oder von einer Aschemasse ausgegangen wird, die nicht mehr als 1 g Calcium enthält, wurden die entsprechenden Zusammenhänge zwischen Calciumgehalt, Masse der Asche und Feuchtmasse von Lebensmitteln, mit denen die erforderliche Probengröße ermittelt werden kann, in den nachfolgenden Tabellen ebenfalls aufgeführt (siehe E-Sr-89/Sr-90-LEBM-01).

Wassergehalt, Aschemasse und Calciumgehalt ausgewählter Lebensmittelproben [nach (8)]

Produkt	Mittlere Zusammensetzung			1 g Ca ist enthalten in	
	Wasser %	Asche %	Calcium mg pro 100 g FM	Feuchtmasse kg	Aschemasse g
<i>Lebensmittel tierischer Herkunft:</i>					
<i>Fleisch:</i>					
Hammel (Muskelfleisch)	75,0	1,13	12	8,3	94,2
Kalb (Muskelfleisch)	76,4	1,19	13	7,7	91,5
Rind (Muskelfleisch)	75,1	1,23	3,5	28,6	351,4
Schwein (Muskelfleisch)	74,7	1,05	3,2	31,3	328,1
Suppenhuhn (Durchschnitt)	60,0	0,93	11	9,1	84,5
Ente (Durchschnitt)	63,7	1,00	11	9,1	91,0
Truthahn (Durchschnitt)	63,5	0,95	25	4,0	38,0
<i>Wildfleisch:</i>					
Hase (Durchschnitt)	73,3	1,18	9	11,1	131,1
Hirsch (Durchschnitt)	74,7	1,02	7	14,3	145,7
Reh (Rücken)	72,2	1,19	25	4,0	47,6

Produkt	Mittlere Zusammensetzung			1 g Ca ist enthalten in	
	Wasser %	Asche %	Calcium mg pro 100 g FM	Feucht- masse kg	Asche- masse g
<i>Sonstiges:</i>					
Kalbsleber	71,2	1,37	8,7	11,5	157,5
Kalbsniere	75,0	1,10	10	10,0	110,0
Rinderleber	69,9	1,40	7	14,3	200,0
Rinderniere	76,1	1,17	11	9,1	106,4
Schweineleber	71,8	1,25	10	10,0	125,0
Schweineniere	76,3	1,20	7	14,3	171,4
<i>Lebensmittel pflanzlicher Herkunft:</i>					
<i>Getreide und Getreideprodukte:</i>					
Hafer	13,0	2,85	80	1,3	35,6
Mais	12,5	1,30	15	6,7	86,7
Roggen	13,7	1,90	115	0,87	16,5
Gerste	11,7	2,25	38	2,6	59,2
Weizen	13,2	1,80	44	2,3	40,9
Reis (unpoliert)	13,1	1,20	23	4,4	52,2
Roggenmehl, Type 1800	14,3	1,80	23	4,4	78,3
Weizenmehl, Type 2000	15,0	2,00	32	3,1	62,5
Weizenmischbrot	37,6	1,54	17	5,9	90,6
<i>Gemüse:</i>					
<i>Wurzel- und Knollengemüse:</i>					
Kartoffel	77,8	1,02	9,5	10,5	107,4
Kohlrabi	91,6	0,95	68	1,5	14,0
Möhre	88,2	0,86	41	2,4	21,0
Rettich	93,5	0,75	33	3,0	22,7
Rote Rübe	88,8	1,00	29	3,5	34,5
Schwarzwurzel	78,6	0,99	53	1,9	18,7
Knollensellerie	88,6	0,94	68	1,5	13,8
<i>Blatt-, Stengel- und Blütengemüse:</i>					
Blumenkohl	91,6	0,82	20	5,0	41,0
Brunnenkresse	93,5	1,10	180	0,56	6,1
Chinakohl	95,4	0,65	40	2,5	16,3
Endivie	94,3	0,90	54	1,9	16,7
Feldsalat	93,4	0,80	35	2,9	22,9
Grünkohl	86,3	1,70	212	0,47	8,0
Kopfsalat	95,0	0,72	37	2,7	19,5
Lauch	89,0	0,86	87	1,2	9,9
Rhabarber	94,5	0,64	52	1,9	12,3

Produkt	Mittlere Zusammensetzung			1 g Ca ist enthalten in	
	Wasser %	Asche %	Calcium mg pro 100 g FM	Feucht- masse kg	Asche- masse g
Rosenkohl	85,0	1,40	31	3,2	45,2
Rotkohl	91,8	0,67	35	2,9	19,1
Spargel	93,6	0,62	21	4,8	29,5
Spinat	91,6	1,51	126	0,79	12,0
Weißkohl	92,1	0,59	46	2,2	12,8
Wirsingkohl	90,0	1,10	47	2,1	23,4
Zwiebel	87,6	0,59	31	3,2	19,0
<i>Fruchtgemüse:</i>					
grüne Bohne	90,3	0,72	57	1,8	12,6
Gurke	96,8	0,60	15	6,7	40,0
Kürbis	91,3	0,77	22	4,6	35,0
Paprikafrüchte	91,0	0,57	11	9,1	51,8
Tomate	94,2	0,61	14	7,1	43,6
<i>Hülsenfrüchte:</i>					
weiße Bohne	11,6	3,90	106	0,94	36,8
Erbse	77,3	0,92	24	4,2	38,3
Linse, getr.	11,8	3,20	74	1,4	43,2
<i>Pilze:</i>					
Butterpilz	91,1	0,62	25	4,0	24,8
Champignon (Zucht)	90,7	1,02	8	12,5	127,5
Pfifferling	91,5	0,77	8	12,5	96,3
Rotkappe	92,3	0,75	30	3,3	25,0
Steinpilz	88,6	0,81	9	11,1	90,0
<i>Früchte:</i>					
<i>Kernobst:</i>					
Apfel	85,3	0,32	7,1	14,1	45,1
Birne	84,3	0,33	10	10,0	33,0
<i>Steinobst:</i>					
Aprikose	85,3	0,66	16	6,3	41,3
Kirsche, süß	82,8	0,49	17	5,9	28,8
Mirabelle	82,4	0,46	12	8,3	38,3
Pfirsich	87,5	0,45	7,8	12,8	57,7
Pflaume	83,7	0,49	14	7,1	35,0

Produkt	Mittlere Zusammensetzung			1 g Ca ist enthalten in	
	Wasser %	Asche %	Calcium mg pro 100 g FM	Feucht- masse kg	Asche- masse g
<i>Beerenobst:</i>					
Brombeere	84,7	0,51	29	3,5	17,6
Erdbeere	89,5	0,50	26	3,9	19,2
Heidelbeere	84,9	0,30	10	10,0	30,0
Himbeere	84,5	0,51	40	2,5	12,8
Johannisbeere, rot	84,7	0,63	29	3,5	21,7
Stachelbeere	87,3	0,45	29	3,5	15,5
Weintraube	81,1	0,48	18	5,6	26,7
<i>Südfrüchte:</i>					
Apfelsine	85,7	0,48	42	2,4	11,4
Banane	73,9	0,83	8,7	11,5	95,4
Mandarine	86,7	0,70	33	3,0	21,1
Zitrone	90,2	0,50	11	9,1	45,5
<i>Schalenobst:</i>					
Haselnuß	5,2	2,44	226	0,42	10,8
Walnuß	4,38	1,98	87	1,2	22,8
<i>Sonstige Lebensmittel:</i>					
Honig (Blütenhonig)	18,6	0,22	4,5	22,2	48,9
Weißwein (mittl. Qualität)	89,0	0,24	9	11,1	26,7
Rotwein (leichte Qualität)	89,8	0,27	7	14,3	38,6
Vollbier, hell	90,6	0,20	4	25,0	50,0
Kaffee, geröstet	2,75	4,13	146	0,69	28,3
Tee (schwarzer Tee)	7,9	5,60	302	0,33	18,5
Hühnerei (Inhalt)	74,1	1,10	56	1,8	19,6
Margarine	18,3	0,25	10	10,0	25,0

Die Bedingungen, unter denen eine optimale Veraschung zu erwarten ist, sind in der nachfolgend beschriebenen Methode enthalten. Die Grundlagen dafür sind in der Literatur (9–11) eingehend beschrieben worden. Die Methode ist für flüssige und feste Lebensmittel, landwirtschaftliche Produkte und anderes biologisches Material anwendbar. Hinweise sind bei den einzelnen Verfahren zur Bestimmung von Radionukliden in Lebensmitteln zu finden, wenn Abweichungen von dieser Veraschungsmethode einzuplanen sind.

Feste Lebensmittelproben müssen in geeigneter Form zur Trockenveraschung zerkleinert werden. Für eine maschinelle Zerkleinerung von kompakten Lebensmitteln (Obst, Gemüse, Fleisch, Kartoffeln, usw.) sind Mixgeräte oder Schneidcutter verwendbar.

Feinkörnige, trockene Proben (Mehl, Milchpulver usw.) werden mit destilliertem Wasser angefeuchtet, um ein Zerstäuben während des Veraschungsprozesses zu unterbinden.

Breiige und flüssige Proben (Fruchtmus, Milch, Säfte usw.) werden nicht vorbehandelt, sondern direkt verascht. Ein Vortrocknen oder Eindampfen von wasserhaltigen Produkten ist also nicht erforderlich.

Zur Veraschung des Probenmaterials werden Edelstahlschalen verwendet und bis zum oberen Rand mit Transparentpapier (z. B. Schöllers-Hammer, hochtransparent, Nr. 205, 90 bis 95 g · m⁻²) ausgelegt. Für feste Proben wird eine Lage, für breiige Proben zwei und für flüssige Proben drei Lagen Papier verwendet. Festes Probenmaterial (z. B. Blattgemüse) ist mit einem ungefähren Schüttgewicht von 40 bis 50 g · dm⁻² locker in die Schalen zu füllen. Bei Gesamtnahrungsproben, die meistens als Brei zur Veraschung vorliegen, sollte die Füllhöhe von 1 cm in den Veraschungsschalen nicht überschritten werden. Die Einwaage entspricht etwa 100 g · dm⁻². Bei Flüssigkeiten gilt eine Füllhöhe von 1 bis 1,5 cm. Für Zucker, Honig und vergleichbare Produkte sind Schichtdicken von nur 0,3 cm vorzusehen, da sonst die Probe überschäumen kann.

Anmerkung

Mit zunehmender Schichtdicke erhöhen sich die Veraschungstemperatur innerhalb der Probe, die Verweilzeit bei dieser erhöhten Veraschungstemperatur, die Gesamtveraschungszeit und die Flüchtigkeitsrate einiger Radionuklide.

Vorgehensweise

1. Der Veraschungsofen wird auf die erforderliche Temperatur hochgeheizt. Die optimale Ofentemperatur beträgt 400°C (Temperatur am Ort der Veraschungsschale).

Anmerkung

Bei Temperaturen > 400°C ist mit Verlusten an Caesium-Isotopen und anderen leichtflüchtigen Radionukliden zu rechnen. Allerdings verläuft dann die Veraschung schneller und vollständiger und der Kohlenstoffgehalt der Asche wird geringer.

2. Ist die vorgewählte Ofentemperatur erreicht, werden die das Veraschungsgut enthaltenden Edelstahlschalen mit Hilfe eines Hebwerkzeugs in den Ofen eingebracht.

3. Die zur Messung der Temperatur im Veraschungsgut dienenden Thermoelemente werden bis zum Boden der Edelstahlschalen eingetaucht.

Anmerkung

Die Oxidationstemperatur während der Veraschung kann kurzzeitig bis zu 150°C höher liegen als die eingestellte Ofentemperatur.

4. Die Frischluftzufuhr zum Ofen ist so einzustellen, daß die Temperatur im Veraschungsgut während des Oxidationsprozesses möglichst wenig ansteigen kann und auch kaum Schwelgase und Kohlenstoffrückstände gebildet werden.

Anmerkung

Die optimale Frischluftzufuhr muß für jeden Ofentyp durch Temperaturmessungen mit Thermoelementen in einer Vergleichsprobe empirisch ermittelt werden.

5. Für die Veraschung werden Zeiten zwischen 2 Stunden (stark wasserhaltige Produkte z. B. Getränke) und 4 Stunden (trockene Produkte) benötigt. Die Veraschung ist beendet, wenn die Temperatur der bei Punkt 3. genannten Thermoelemente wieder auf Ofentemperatur abgesunken ist.

6. Die Edelstahlschalen werden mit Hilfe des Hebwerkzeugs dem heißen Ofen entnommen. Während des Herausziehens aus dem Hordengestell werden die Edelstahlschalen mit einem Edelstahlblech abgedeckt, damit die leichten Aschebestandteile nicht durch Luftturbulenzen hochgewirbelt werden.

7. Zur Vermeidung von Wasseraufnahme durch Absorption aus der Umgebungsluft wird die Asche unmittelbar nach dem Abkühlen auf Zimmertemperatur vorsichtig in eine gewogene Plastikflasche überführt. Lose an der Edelstahlschale noch anhaftende Aschereste werden mit Hilfe eines feinen Haarpinsels hinzugefügt.

Anmerkung

Die Ascheentnahme ist quantitativ, da das verwendete Transparentpapier ein «Anbacken» an der Edelstahlschale verhindert. Der Aschegehalt des Transparentpapiers selbst ist zu vernachlässigen.

8. Die Asche wird in der Plastikflasche verschlossen bis zur Analyse aufbewahrt.

3.3 Radiochemische Trennung

Eine radiochemische Trennung ist für die hier beschriebene gammaspektrometrische Messung nicht erforderlich.

4 Messung der Aktivität

Grundlegende Ausführungen und Hilfen zur Gamma-Spektrometrie finden sich in den Kapiteln IV.1.1 bis IV.1.3 dieser Meßanleitungen.

Die Messung der Gamma-Spektren erfolgt mit einem Ge-Spektrometer (> 15% relative Ansprechwahrscheinlichkeit verglichen mit einem 3" \times 3" NaI(Tl)-Detektor für die 1,33 MeV Linie des Co-60). Die Proben werden üblicherweise in Schraubdosen mit ebenem Boden (z. B. PE-Weithals, 11) mit definierter Geometrie gemessen. Aschen werden auf ein definiertes Volumen gepreßt. Für flüssige und pulverförmige Proben eignen sich Ringschalen («Marinelli»-Becher).

Zur Vermeidung einer raschen mikrobiologischen Zersetzung bei erhöhter Umgebungstemperatur können homogenisierte Proben auch halbgefroren mit einer dünnen Schicht Ethanol übergossen gemessen werden, so daß während der Meßzeit keine Volumenvergrößerung eintritt.

Die Messung der Aktivität erfolgt zentriert direkt auf dem Detektor. Bei wechselnden Probenmassen muß der Einfluß der Füllhöhe auf die Zählausbeute bekannt sein. Für den Routinebetrieb sollte in festgelegter Geometrie gemessen werden.

Um Kontaminationen der Detektorkappen zu vermeiden, empfiehlt es sich, die Kappe mit einer Polyethylenfolie (Dicke: ca. 0,1 mm) zu umhüllen und diese mit Klebstreifen zu befestigen. Im Falle einer äußeren Kontamination der Folie durch Flüssigkeiten oder Stäube wegen Undichtigkeit eines Meßgefäßes, kann diese durch einen Wechsel der Folie problemlos beseitigt werden. Selbst säurehaltige Radionuklidlösungen diffundieren nicht sehr schnell durch diese Folien. Sollte trotz aller Vorsichtsmaßnahmen eine Kontamination der Detektorkappe (Aluminium) erfolgt sein, wird folgendes Verfahren zur Dekontamination vorgeschlagen: Nachdem die Schutzhülle vom Detektor entfernt ist, wird der Detektor (Oberfläche oder Hals) mit wassergetränktem Zellstoff und in gleicher Wei-

se mit einer Lösung von 1 molarer Salzsäure und anschließend mit einer 0,1%igen wäßrigen Lösung des Tetranatriumsalzes von Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) abgewischt. Die Verwendung von wäßriger EDTA-Lösung empfiehlt sich immer dann, wenn sog. Korrosionsnuklide wie z. B. Zink, Mangan, Eisen, Kobalt usw. die Oberfläche des Detektors kontaminiert haben. Eine anschließende Reinigung des Detektors mit Wasser und Aceton beendet die Prozedur. Nach der Reinigung ist der Erfolg der Dekontamination unbedingt durch Messung eines Nulleffektspektrums zu überprüfen.

Die quantitative Kalibrierung des Gamma-Spektrometers kann energie- oder nuklidspezifisch erfolgen. Entsprechende wäßrige Lösungen von Einzelstandards oder von Nuklidgemischen sind im Handel erhältlich. Bei der energiespezifischen Kalibrierung mit Mehrlinien-Nukliden ist auf die entsprechende Korrektur der Summationseffekte zu achten. Hierzu wird auf die einschlägige Literatur (12, 13, 14) sowie auf das Kapitel IV.1.1 dieser Meßanleitungen verwiesen. Darüber hinaus sind bei der Messung der Ascheproben wegen der geringeren Dichte gegenüber den Kalibrierlösungen Selbstabsorptionskorrekturen zu berücksichtigen (siehe Kapitel IV.1.1 dieser Meßanleitungen).

5 Berechnung der Analysenergebnisse

Für Personal-Computer stehen zur Auswertung von Gamma-Spektren leistungsfähige Programme verschiedener Software-Anbieter zur Verfügung, die die spezifische Aktivität der Radionuklide berechnen. Es sollten solche Programme bevorzugt werden, die für alle wichtigen Radionuklide die Berechnung der Erkennungs- und Nachweisgrenzen entsprechend Kapitel IV.5 dieser Meßanleitungen vorsehen (siehe auch Abschnitt 6) und die Erkennungsgrenze in den Suchalgorithmen als Kriterium für die Entscheidung benutzen, ob eine Linie vom Untergrund verschieden ist oder nicht.

Meßergebnisse oberhalb der Nachweisgrenze oder die Nachweisgrenzen sind stets, auch in Fall von Aschemessungen, in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Feuchtmasse (FM) anzugeben.

Für Gesamtnahrungsproben ist neben der Aktivitätsangabe in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ auch die von einer Person (p) pro Tag (d) mit der Nahrung aufgenommene Radioaktivität in $\text{Bq} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{p}^{-1}$ anzugeben. Diese wird berechnet durch Multiplikation der spezifischen Aktivität ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$) mit dem Wochendurchschnitt der täglichen Verzehrsmenge ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{p}^{-1}$).

Als Bezugszeitpunkt ist das Datum der Probeentnahme zu verwenden.

Die Überprüfung der automatischen Auswertung erfolgt bei energiespezifischer Kalibrierung durch Bestimmung der spezifischen Aktivität a_r eines Radionuklids r aus der Nettopeakfläche nach folgender Gleichung:

$$a_r = \frac{N_n}{\varepsilon_r \cdot m \cdot p_\gamma \cdot t_m}$$

(Es bedeuten: ε_r = Nachweiswahrscheinlichkeit für das Nuklid r, $N_n = N_b - N_0$ = Nettoimpulszahl (Nettopeakfläche), m = Probenfeuchtmasse, p_γ = absolute Emissionswahrscheinlichkeit der Gamma-Strahlung, t_m = Meßzeit der Probe)

Als Beispiel für die Messung eines Speisepilzes (Ziegenlippe) errechnet sich die spezifische Cs-137-Aktivität der Probe mit der angeführten Formel (Meßbedingungen: m = 0,52 kg FM; $t_m = 27570$ s, $p_\gamma = 0,85$, $N_b = 753$ Impulse, $N_0 = 445$ Impulse, $\varepsilon_r = 0,005906$) zu $a_{\text{Cs-137}} = 4,3 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM.

5.1 Fehlbetrachtung

Der Gesamtfehler der Radionuklidbestimmung setzt sich aus mehreren Teilfehlern zusammen:

- Probeentnahmefehler
- Fehler bei der Prob Zubereitung
- Fehler der Kalibrierung (ca. 5%)
- Statistischer Zählfehler (1 bis 5%)
- Fehler bei Dichtekorrekturen
- Korrektur der Summationseffekte (z. B. Bei Cs-134)

Ohne Berücksichtigung der Fehler bei Probeentnahme und Prob Zubereitung kann mit einem Gesamtmeßfehler von 10 bis 20% gerechnet werden.

Bezüglich der Berechnung der Standardabweichung siehe Kap. IV.5 dieser Meßanleitungen.

6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

Die Nachweisgrenzen der gammaspektrometrischen Bestimmung von Radionukliden in Lebensmittelproben werden von den Eigenschaften des Detektors, den kernphysikalischen Daten der zu messenden Radionuklide und nicht zuletzt vom K-40-Gehalt der zu messenden Probe und dem K-40-Untergrund der Meßanordnung bestimmt (siehe Kap. IV.1.2 dieser Meßanleitungen).

Für Gesamtnahrungsproben liegt der Gehalt an K-40 im Mittel bei 35 Bq · kg⁻¹ FM.

Die Nachweisgrenzen werden nach Kapitel IV.5 dieser Meßanleitungen (Unterkapitel 4.5, Gleichung 4.32a) berechnet. Für den Fall, daß die Algorithmen des benutzten Auswerteprogramms für die Berechnung der Nachweisgrenzen nicht der Gleichung in Kapitel IV.5 entsprechen, sind Korrekturen erforderlich, die gegebenenfalls nachträglich vorzunehmen sind. Beispiele für die Berechnung der Nachweisgrenzen bei der Gamma-Spektrometrie finden sich in Kapitel IV.5, Unterkapitel 6.4 und 6.5. Im vorliegenden Fall kann diesen Beispielen analog verfahren werden.

Nachweisgrenzen bei einer Rindfleischprobe (Bq · kg⁻¹ FM)

Radionuklid	Masse:		Feuchtmasse		Asche
	Geometrie:	E (keV)	0,5 kg	11	50 g
	/	PE-Fla.	11	Marinelli	0,11
					PE-Fla.
Co-60	1332,5	0,77	0,47	0,18	
I-131	364,5	0,95	0,56	–	
Te-132	228,2	0,95	0,55	0,16	
I-132	667,7	0,82	0,45	–	
I-133	529,9	0,95	0,55	–	
Cs-134	604,7	0,85	0,46	0,15	
Cs-137	661,7	0,98	0,54	0,25	
Ba-140	537,4	3,42	1,88	0,57	
La-140	1596,5	0,94	0,57	0,19	

Als Anhaltswerte für Nachweisgrenzen können die Werte der vorigen Tabelle gelten, die an einer Rindfleischprobe gewonnen wurden.

Meßbedingungen: direkte Messung der Rindfleischproben [0,5 kg FM in 1-l-PE-Schraubflaschen (PE-Fla.) bzw. 1-l-Marinelli-Becher]; veraschte Probe [50 g Asche aus 1,4 kg FM ($d = 0,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) in 100-ml-Schraubflasche]; Detektor: Ge(Li) mit 20% relativer Ansprechwahrscheinlichkeit; Abschirmung: von außen nach innen je 3 cm Blei, Stahl, Aluminium, Plexiglas; Meßzeit: 12 h.

7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

7.1 Chemikalien

- Homogenisierungsmittel (z. B. TWEEN 80)
- Na-Azidlösung (5%)
- Aceton, techn.
- Ethanol, techn.
- EDTA, Tetranatriumsalz der Ethylendiamintetraessigsäure
- Zellstoff
- Transparentpapier (z. B. Schöllers-Hammer, hochtransparent, Nr. 205, 90 bis 95 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)

7.2 Geräte

- haushaltsüblicher Zerkleinerer
- haushaltsüblicher Mixer
- Veraschungsöfen mit katalytischer Nachverbrennung
- Veraschungsschalen aus nicht zunderndem Edelstahl (Remanit 1880 SST. Werkstoff-Nr. 4571) Bodenfläche $200 \times 400 \text{ mm}$, Randhöhe 90 mm
- Ringschalen und Schraubdosen für die gamma-spektrometrische Messung
- Ge- bzw. Ge(Li)-Halbleiterdetektoren ($> 15\%$ relative Ansprechwahrscheinlichkeit. Halbwertsbreite $< 2,1 \text{ keV}$ bei 1,33 MeV) mit Vorverstärker und Hochspannungsversorgung
- Hauptverstärker
- Analog-Digital-Konverter
- Vielkanalanalysator konventioneller Art oder entsprechender externer Speicher mit mindestens 4096 Kanälen
- Personal-Computer mit entsprechender Software für die Auswertung der Gamma-Spektren

Literatur

- (1) Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz – StrVG) vom 19.12.1986. Bundesgesetzblatt Nr. 69, vom 30.12.1986
- (2) Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen, GMBI 32 (1979) S. 665
- (3) Richtlinie für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz, Teil I: Meßprogramm für den Normalbetrieb (Routinemeßprogramm), GMBI 32 (1994) S. 930
- (4) Müller, H.: Spezielle Fragen der Probeentnahme bei der Überwachung der Radioaktivität in Lebensmitteln nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz. 1. Fachliches Kolloquium zum Integrierten Meß- und Informationssystem (IMIS) zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt. Neuherberg. 18.–20.4.1989

- (5) Schelenz, R. (Redaktion): Essentielle und toxische Inhaltsstoffe in der täglichen Gesamtnahrung. Berichte der Bundesforschungsanstalt für Ernährung. BFE-R-83-02 (1983)
- (6) Probenvorbereitungsverfahren für die Bestimmung von Schwermetallgehalten in und auf Lebensmitteln. Bundesgesundheitsblatt 22 Nr. 15 vom 20. Juli 1979, 277–279
- (7) Heilgeist, M.: Anmerkungen zur Probenaufbereitung von Lebensmitteln. Nahrungsmittel pflanzlicher und tierischer Herkunft und Gesamtnahrung. 1. Fachliches Kolloquium zum Integrierten Meß- und Informationssystem (IMIS) zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt. Neuherberg. 18.–20. 4. 1989
- (8) Souci, S. W., Fachmann, W., Kraut, H.: Die Zusammensetzung der Lebensmittel. Nährwert-Tabellen 1981/82 (1981) und 1989/90 (1989). Wissenschaftliche Verlagsges. Stuttgart
- (9) Boppel, B.: Schnelle Trockenveraschung von Lebensmitteln. Z. Anal. Chem. 266 (1973) 257–263
- (10) Ritter, R., Doerfel, Ch.: Zur Sr-90- und Cs-137-Bestimmung erforderliche Lebensmittelmengen und deren Veraschung. Atompraxis 11 (1965) 397–400
- (11) Boppel, B., Fischer, E., Frindik, O., Kalus, W., Müller, H., Schelenz, R.: Verfahren zur Bestimmung von Radionukliden aus der Umweltradioaktivität in Lebensmitteln. Bericht BFE-R-84-02 (1984). Bundesforschungsanstalt für Ernährung. Karlsruhe
- (12) Debertin, K.: Meßanleitung für die Bestimmung von Gammastrahlen-Emissionsraten mit Germanium-Detektoren. Bericht PTB-Ra-12. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig. September 1980
- (13) Debertin, K., Schötzig, U.: Bedeutung von Summationskorrekturen bei der Gammastrahlen-Spektrometrie mit Germaniumdetektoren. Bericht PTB-Ra-24. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig. Mai 1990
- (14) Debertin, K., Helmer, R. G.: Gamma- und X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors. Verlag North-Holland, 1988