



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 3.1.3

Seite: 1 von 7

Stand: August 2017

Überwachung der Radioaktivität der Aerosole
(Alpha- und Beta-Aktivitätskonzentration)

Bearbeiter: R. Winkler, ehem. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg
Chr. Wilhelm, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
S. Frenzel, Radiochem-Consult Stefan Frenzel, Neu-Isenburg

Vorbemerkung

Im Zusammenhang mit der Prüfung der Blätter LB 3.1.3.1 und LB 3.1.3.2, die die Überwachung der Alpha- und Beta-Aktivitätskonzentration getrennt beschrieben hatten, wurde im AKU beschlossen, aufgrund der Vielzahl inhaltlicher Übereinstimmungen, beide Themen in einem Blatt zusammen zu fassen, ohne die inhaltliche Struktur zu ändern.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Zweck der Überwachungsmaßnahme.....	1
2 Messgröße, Maßeinheit, zu fordernde Nachweisgrenze.....	1
3 Messverfahren	2
3.1 Probenentnahme.....	2
3.2 Probenvorbereitung.....	2
3.3 Messung und Auswertung.....	2
3.4 Größen und Formelzeichen.....	3
3.5 Berechnung der Gesamt-Alpha- und der Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration.....	3
3.6 Berechnung der Messunsicherheit	3
3.7 Berechnung der charakteristischen Grenzen.....	4
3.8 Berechnungsbeispiele	4
4 Beurteilung des Verfahrens	6
5 Dokumentation	6
6 Besonderheiten, Bemerkungen.....	6
7 Literatur	6

1 Zweck der Überwachungsmaßnahme

Ziel ist die Überwachung der langlebigen Gesamt-Alpha- und Beta-Aktivitätskonzentration der Luftschwebstoffe (früher umgangssprachlich als „Aerosole“ bezeichnet). Zwar schreibt die REI [1] diese Überwachungsmaßnahme nicht für kerntechnische Anlagen vor, jedoch ist sie teilweise durch Überwachungsprogramme vorgeschrieben oder wird aus Zweckmäßigkeitsgründen praktiziert. Außerdem kann die Überwachung auf Alpha-Aktivität gemäß den Anhängen B und C.2 der REI für Brennelementfabriken und Endlager für radioaktive Abfälle mit den Messprogrammen vorgeschrieben werden, soweit alphastrahlende Radionuklide in einem relevanten Maß freigesetzt werden könnten.

2 Messgröße, Maßeinheit, zu fordernde Nachweisgrenze

Messgröße ist der zeitliche Mittelwert der langlebigen Alpha- und Beta-Aktivitätskonzentration der Luftschwebstoffe, bezogen auf U-nat (Alpha) und auf Sr-90/Y-90 (Beta) nach einer Sammelzeit von 14 Tagen und einer Abklingzeit von 5 Tagen.

Maßeinheit: Bq·m⁻³

Als Nachweisgrenzen für die Bestimmung der Aktivitätskonzentration ergeben sich nach REI [1]:

- Alpha: 1,0·10⁻⁴ Bq m⁻³, bezogen auf U-nat oder Am-241
- Beta: 1,0·10⁻³ Bq·m⁻³, bezogen auf Sr-90/Y-90.



3 Messverfahren

3.1 Probenentnahme

Die Probenentnahme

- für die Bestimmung der Alpha-Aktivitätskonzentration erfolgt mit einem Membranfilter (Porengröße 0,8 μm bis 5 μm) mit einem Durchmesser zwischen 150 mm und 200 mm.
- für die Bestimmung der Beta-Aktivitätskonzentration mit einem Schwebstofffilter der Klasse S mit einem Durchmesser zwischen 50 mm und 200 mm.

Der Luftdurchsatz beträgt in der Regel $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ und $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, abhängig von der Beladung des Filters, bezogen auf einen Filter mit einem Durchmesser von 20 cm. Die Sammeldauer gemäß REI [1] beträgt 14 Tage. Bei erhöhten Luftstaubkonzentrationen muss das Filter evtl. öfter gewechselt werden. Die Bedingungen für repräsentative Probenentnahme sind zu erfüllen [2, 3], siehe auch Loseblatt-Nr. 3.4.6.

3.2 Probenvorbereitung

Soweit nicht das Messziel darin besteht, die Zerfallsprodukte aus den natürlichen Zerfallsreihen quantitativ zu erfassen, sind die Aerosolfilter frühestens 5 Tage nach Entnahme zu messen. Eine längere Abklingzeit als 10 Tage ist im Allgemeinen nicht sinnvoll. Um eine weitere Exposition bis zur Messung zu vermeiden, z. B. durch kurzlebige Rn-Folgeprodukte der Raumluft, sollte jedes Filter abgedeckt, beispielsweise in Messschalen mit Deckel, aufbewahrt werden. Weiterhin ist anzustreben, dass die Aerosolfilter stets zur gleichen Zeit nach ihrer Entnahme gemessen werden, um vergleichbare Bedingungen zu erreichen.

3.3 Messung und Auswertung

Die Messung erfolgt mit einem geeigneten, abgeschirmten Messzähler, z. B. einem 200-mm-Großflächendurchflusszähler mit Fensterfolie ($0,4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ bis $0,9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) im Alpha- und im Beta-Plateau. Zur Unterscheidung der Alpha- und Betastrahlung kann ein Messplatz mit umschaltbarer Hochspannung eingesetzt werden oder es wird ein Messgerät mit elektronischer Pulstrennung und simultaner Alpha-Beta-Messung verwendet. Die Messdauer ist abhängig vom Erreichen der Nachweisgrenze und beträgt typischer Weise zwischen 20 min und 300 min.

Der Nulleffekt ist vor und nach der Messung mit einem Leerfilter des gleichen Typs zu bestimmen. Da sich auf Leer- und Messfilter durch elektrostatische Aufladung kurzlebige Rn-Folgeprodukte aus der Raumluft abgeschieden haben können, sollte mit der eigentlichen Messung erst begonnen werden, wenn sich im Rahmen der üblichen zählstatistisch bedingten Schwankungen konstante Zählraten eingestellt haben.

Die Kalibrierung der Messanordnung erfolgt mit großflächigen, dem Filterdurchmesser angepassten Standardpräparaten:

- **Sr-90/Y-90** zur Bestimmung der mittleren Beta-Aktivitätskonzentration und
- **U-nat** zur Bestimmung der Alpha-Aktivitätskonzentration

Bei Flächenbelegungen ab etwa $1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ sind Korrekturen für die Selbstabsorption der Alpha-Aktivität durchzuführen, siehe z. B. [4, 5]. Da bei einem mittleren Staubgehalt der Luft von $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ selbst nach 14-tägiger Bestäubung bei einem Luftdurchsatz von $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ eine Staubebelegung von nur etwa $0,5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ zu erwarten ist, kann bei der Beta-Aktivität im Allgemeinen auf eine Selbstabsorptionskorrektur verzichtet werden.

Die mittlere Alpha- und Beta-Aktivitätskonzentration wird anhand des abgelesenen und ggf. auf Normalbedingungen ($1013,25 \text{ hPa}$, $0 \text{ }^\circ\text{C}$ gem. DIN 1343) korrigierten Luftvolumens (300 m^3 bis 2000 m^3) ermittelt und in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ angegeben.



3.4 Größen und Formelzeichen

In den nachfolgenden Gleichungen werden folgende Formelzeichen für die Größen verwendet:

c_A	Gesamt-Alpha- oder Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration der Probe in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
r_b	Gesamtzählrate der Probe in s^{-1}
r_0	Zählrate einer Nullprobe in s^{-1}
w	erweiterter Kalibrierfaktor in m^{-3}
ε	Nachweiswahrscheinlichkeit der Messeinrichtung
S	mittlerer Selbstabsorptionsfaktor der Alpha- oder Beta-Strahlung
f	optionaler Abklingkorrektionsfaktor
\dot{v}	Luftvolumenstrom in $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
t_S	Probenahmedauer in s
t_m	Messdauer der Probe in s
t_0	Messdauer der Nullprobe in s
c_A^*	Erkennungsgrenze in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
$c_A^\#$	Nachweisgrenze in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
$k_{1-\alpha}$	Quantil der Standardnormalverteilung für den Fehler 1. Art
$k_{1-\beta}$	Quantil der Standardnormalverteilung für den Fehler 2. Art
$u(c_A)$	Messunsicherheit der Aktivitätskonzentration der Probe in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
$u_{\text{rel}}(w)$	relative Messunsicherheit des erweiterten Kalibrierfaktors

3.5 Berechnung der Gesamt-Alpha- und der Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration

Zur Berechnung der Gesamt-Alpha- und der Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration der Probe wird zuerst die jeweilige Nettozählrate R_n ermittelt. Diese wird anschließend durch das gesammelte Luftvolumen, die Nachweiswahrscheinlichkeit sowie den jeweiligen Selbstabsorptionsfaktor und ggf. den Abklingfaktor dividiert. Für die Gesamt-Alpha- und für die Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration gilt:

$$c_A = (r_b - r_0) \cdot w \quad (1)$$

mit dem erweiterten Kalibrierfaktor w :

$$w = \frac{1}{\varepsilon \cdot \dot{v} \cdot t_S \cdot f \cdot S} \quad (2)$$

3.6 Berechnung der Messunsicherheit

Die Angaben über das Ergebnis der Aktivitätsmessung müssen auch die vollständige Messunsicherheit enthalten, die sich aus den zählstatistischen Messunsicherheiten und jenen der übrigen Eingangsgrößen zusammensetzt. Letztere lauten:

- Messunsicherheit der Nachweiswahrscheinlichkeit (max. 5 %),
- Messunsicherheit der Messung der durchgesetzten Luftmenge (max. 10 %),
- Messunsicherheit des Abklingkorrektionsfaktors (abhängig vom Nuklidgemisch),
- Messunsicherheit bezüglich der Abweichung der mittleren Beta-Energie des Nuklidgemisches gegenüber der Beta-Energie des zur Kalibrierung verwendeten Sr-90/ Y-90 (Selbstabsorptionsfaktor, abhängig vom Nuklidgemisch),
- Messunsicherheit bezüglich der Lage der mittleren Flächenbelegung des Aerosolfilters oberhalb eines Wertes von $1 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Selbstabsorptionsfaktor, Alphastrahlung),
- Unsicherheitsbeiträge aus der Probenentnahme/Probenvorbereitung (Zeit, Temperatur,...).

Damit ergibt sich die Messunsicherheit jeweils für die Gesamt-Alpha- oder Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration zu:



$$u(c_A) = \sqrt{(r_b - r_0)^2 \cdot u^2(w) + w^2 \cdot \left(\frac{r_b}{t_m} + \frac{r_0}{t_0} \right)} \quad (3)$$

mit

$$u^2(w) = \left(\frac{u^2(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{u^2(\dot{v} \cdot t_S)}{(\dot{v} \cdot t_S)^2} + \frac{u^2(f)}{f^2} + \frac{u^2(S)}{S^2} \right) \cdot w^2 \quad (4)$$

Nach Einführung der relativen Standardmessunsicherheit des erweiterten Kalibrierfaktors gilt:

$$u^*(c_A) = \sqrt{c_A^2 \cdot u_{rel}^2(w) + w^2 \cdot \left(\frac{r_b}{t_m} + \frac{r_0}{t_0} \right)} \quad (5)$$

mit

$$u_{rel}^2(w) = u_{rel}^2(\varepsilon) + u_{rel}^2(\dot{v} \cdot t_S) + u_{rel}^2(f) + u_{rel}^2(S) \quad (6)$$

3.7 Berechnung der charakteristischen Grenzen

Nach DIN ISO 11929 [6] ergibt sich als Erkennungsgrenze:

$$c_A^* = k_{1-\alpha} \cdot u(c_A = 0) = k_{1-\alpha} \cdot w \cdot \sqrt{r_0 \cdot \left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{t_0} \right)} \quad (7)$$

und die Nachweisgrenze zu:

$$c_A^\# = c_A^* + k_{1-\beta} \cdot \sqrt{\left(c_A^\# \right)^2 \cdot u_{rel}^2(w) + w^2 \cdot \left(\frac{c_A^\#}{t_m \cdot w} + r_0 \cdot \left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{t_0} \right) \right)} \quad (8)$$

Die Lösung dieser impliziten Gleichung erhält man entweder durch Iteration mit dem Startwert $c_A^\# = 2 \cdot c_A^*$ oder nach Umformung in Form jenes Lösungswertes der erhaltenen quadratischen Gleichung, der größer Null ist.

3.8 Berechnungsbeispiele

Die für die Gesamt-Alpha- und Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration erreichbaren Erkennungsgrenzen und Nachweisgrenzen errechnen sich unter Verwendung eines handelsüblichen 200-mm-Low-Level-Durchflusszählers bei einem Luftdurchsatz bei der Filterbeaufschlagung von $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ wie folgt, wobei für beide Berechnungen die in den Messanleitungen [7] empfohlenen Werte für die statistischen Faktoren $k_{1-\alpha} = 3,0$ und $k_{1-\beta} = 1,645$, entsprechend einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,14 % und 5 %, verwendet werden:

Berechnung der Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration

Messdauer t_m, t_0 = 6000 s (jeweils für Probe und Nulleffekt)

Nulleffektzählrate r_0 = $0,017 \text{ s}^{-1}$

Nachweiswahrscheinlichkeit ε = 0,20

\dot{v} = $1,7 \text{ E-03 m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

t_S = 1209600 s (14 Tage)

f = 1

S = 1

$u_{rel}(\varepsilon)$ = 0,05

$u_{rel}(\dot{v} \cdot t_S)$ = 0,1

$u_{rel}(f)$ = 0,05

$u_{rel}(S)$ = 0,1



Erkennungsgrenze:

$$c_A^* = 3,0 \cdot \frac{1}{0,2 \cdot 1,7 \text{ E-}03 \cdot 1209600} \cdot \sqrt{0,017 \cdot \left(\frac{1}{6000} + \frac{1}{6000} \right)} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \approx 1,8 \text{ E-}05 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \quad (9)$$

Nachweisgrenze (nach 6 Iterationen):

$$c_A^\# = c_A^* + 1,645 \cdot \sqrt{\frac{\left(c_A^\# \right)^2 \cdot u_{rel}^2(w) + \left(0,2 \cdot 1,7 \text{ E-}03 \cdot 1209600 \right)^2}{\left(\frac{c_A^\#}{6000 \cdot 0,2 \cdot 1,7 \text{ E-}03 \cdot 1209600} + 0,017 \cdot \left(\frac{1}{6000} + \frac{1}{6000} \right) \right)}} \quad (10)$$

$$\approx 3,2 \text{ E-}05 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

mit

$$u_{rel}^2(w) = 0,05^2 + 0,1^2 + 0,05^2 + 0,1^2 = 0,025 \quad (11)$$

Berechnung der Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration

Messdauer t_m, t_0 = 3000 s (jeweils für Probe und Nulleffekt)

Nulleffektzählrate r_0 = 1,0 s⁻¹ (mit 200 mm-Glasfaserfilter)

Nachweiswahrscheinlichkeit ε = 0,35

= 1,7 E-03 m³·s⁻¹ (6 m³·h⁻¹)

t_S = 1209600 s (14 Tage)

f = 1

S = 1

$u_{rel}(\varepsilon)$ = 0,05

$u_{rel}(\dot{v}t_S)$ = 0,1

$u_{rel}(f)$ = 0,1

$u_{rel}(S)$ = 0,2

Erkennungsgrenze:

$$c_A^* = 3,0 \cdot \frac{1}{0,35 \cdot 1,7 \text{ E-}03 \cdot 1209600} \sqrt{1 \cdot \left(\frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} \right)} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \quad (12)$$

$$\approx 1,1 \text{ E-}04 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Nachweisgrenze (nach 7 Iterationen):

$$c_A^\# = c_A^* + 1,645 \cdot \sqrt{\frac{\left(c_A^\# \right)^2 \cdot u_{rel}^2(w) + \left(0,35 \cdot 1,7 \text{ E-}03 \cdot 1209600 \right)^2}{\left(\frac{c_A^\#}{3000 \cdot 0,35 \cdot 1,7 \text{ E-}03 \cdot 1209600} + 1 \cdot \left(\frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} \right) \right)}} \quad (13)$$

$$\approx 2,2 \text{ E-}04 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

mit

$$u_{rel}^2(w) = 0,05^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,2^2 = 0,0625 \quad (14)$$



4 Beurteilung des Verfahrens

Das vorgeschlagene Verfahren gestattet eine messtechnisch einfache und empfindliche Kontrolle der an Luftschwebstoffe gebundenen Aktivität in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen. Der Zeitbedarf ergibt sich im Wesentlichen aus der Messdauer für die Messung von Probe und Nulleffekt. Filterwechsel und Auswertung sind demgegenüber vernachlässigbar und von geschultem oder speziell eingewiesenem Personal auszuführen. Die Filter können für weitere Untersuchungen, z. B. zur gamma-spektrometrischen Einzelnuklidanalyse verwendet werden. Bei der Anschaffung des Detektorsystems und des Luftprobensammlers sollte daher unbedingt das Loseblatt-Nr. 3.1.4 herangezogen werden.

5 Dokumentation

Wie üblich sollten Probenentnahmeort, Datum und Uhrzeit von Sammelbeginn und –ende, Zeitpunkt des Filterwechsels, durchgesetzte Luftmenge, Abklingzeit, Messzeitbeginn und –dauer, Zählrate und Nulleffekt, verwendetes Messsystem sowie besondere Beobachtungen dokumentiert werden. Zur Berichterstattung müssen Ort, Beginn und Ende der Probenentnahme, Abklingzeit und das vollständige Messergebnis angegeben werden.

Die Filter sollten gegebenenfalls zur Einzelnuklidanalyse und bis zur Freigabe der Berichte durch den Berichtsempfänger aufbewahrt werden.

6 Besonderheiten, Bemerkungen

Das Verfahren wird seit 1970, damals zur Bestimmung der Fallout-Beta-Aktivität der bodennahen Luft, am Institut für Strahlenschutz der GSF in abgewandelter Form angewendet [7]. Dabei erfolgt die Luftprobensammlung auf 200 mm-Glasfaserfiltern mit einem Gebläse mit ca. $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Filterwechsel ist zwei- bis dreimal wöchentlich. Am Ende der Sammelzeit (nach ca. 2000 m^3) geht der anfänglich eingestellte Luftdurchsatz von ca. $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ wegen der zunehmenden Staubbelegung des Filters um etwa 10 % zurück. Das verwendete Gebläse muss für Dauerbetrieb ausgelegt sein.

Das Verfahren gestattet die Bestimmung der langlebigen Gesamt-Alpha-Aktivität der Luftschwebstoffe. Diese repräsentiert im Wesentlichen, wenn keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen wurden, den natürlichen Gehalt der bodennahen Luft an Po-210. Die für dieses Radionuklid an verschiedenen Orten in Mitteleuropa gemessenen Aktivitätskonzentrationen liegen zwischen $4 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ und $140 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ [9, 10]. Vom Bundesamt für Strahlenschutz werden für drei Standorte (München, Berlin, Braunschweig) Werte zwischen $26 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ und $48 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ genannt [11]. Daher sollte eine Nachweisgrenze von $25 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ bis $50 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ für die Überwachung der Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration genügen.

Zur Überwachung der langlebigen künstlichen Alpha-Aktivität der Luftschwebstoffe setzt das Verfahren die Kenntnis der Po-210-Aktivitätskonzentration am Messort voraus. Diese Konzentration kann z. B. durch direkte Alphaspektrometrie des Filters in einer Großflächen-Gitterionisationskammer ermittelt werden [9].

Die in der REI [1] vorgeschlagene vierteljährliche Auswertung einer Mischprobe ist zur Bestimmung der Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration nicht geeignet, da zu hohe Aktivitätskonzentrationen vorgetäuscht würden. Dies hat seinen Grund im radioaktiven Aufbau von Po-210 auf den Filtern als Folge des Zerfalls des mitgesammelten natürlichen Pb-210.

7 Literatur

- [1] Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen, Gemeinsames Ministerialblatt vom 23. März 2006 Nr. 14 - 17, S. 254ff
- [2] Probenentnahme von luftgetragenen radioaktiven Stoffen aus Kanälen und Kaminen kerntechnischer Anlagen (ISO 2889:2010), DIN ISO 2889, 2012; Beuth-Verlag Berlin



- [3] VDI-Richtlinien, „Messen von Partikeln - Erfassung von Schwebstaub und gasförmigen chemischen Verbindungen in Außenluft und Innenraumluft - Aktive Probenahme mittels Low-Volume-Sampler (LVS)“, VDI 2463, Blatt 7:2014-05 (und weitere)
- [4] J.H. Harley (Edit.), HASL Procedures Manual, HASL-300, p. E-Ra-02-04, August 1977.
- [5] M. Raghavayya, Giridhar Jha, P.M. Markose, Correction for Self Absorption in Alpha Sources, Health Physics 29 (1975) 782 - 785.
- [6] Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung - Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010, DIN ISO 11929, 2011, Beuth-Verlag Berlin.
- [7] Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung, von der Internetseite des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit abrufbar: <http://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/strahlenschutz/radioaktivitaet-in-der-umwelt/messanleitungen>
- [8] Hötzl, H., Rosner, G., Winkler, R., Künstliche Radioaktivität der bodennahen Luft und des Niederschlags, München-Neuherberg 1970-1975, GSF-Bericht S-413, Neuherberg, Juli 1976
- [9] R. Winkler, H. Hötzl and B. Chatterjee, Analysis of ^{210}Pb and ^{210}Po concentrations in surface air by an alpha spectrometric method, Health Physics 41 (1981) 495 – 503.
- [10] Y.D. Parfenov, Polonium-210 in the environment and in the human organism. At. Energy Rev. 12 (1974) 75 - 143.
- [11] BfS-Jahresbericht, Teil 1 Umweltradioaktivität. (2002) 37.

Bitte beachten Sie den Hinweis im Losen Blatt 1.3 „Erläuterungen zur Loseblattsammlung“.