Zeitschrift: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz = Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse = Radioattività dell'ambiente e dosi d'irradiazione in Svizzera

Herausgeber: Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz

Band: - (2020)

Rubrik: Environnement = Umwelt

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

2020

Chapitre
Kapitel
4

Environnement

Umwelt

Aérosols et précipitations
URAnet Aero
Surveillance de l'air avec des avions militaires
Radioactivité dans les systèmes aquatiques
URAnet Aqua
Tritium dans l'Aar
Sols et herbes

Aerosol und Niederschlag
URAnet Aero
Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen
Aquatische System
URAnet Aqua
Tritium in der Aare
Boden und Gras

4.1
Radioaktivität in der Luft (Aerosol) und im Niederschlag

P. Steinmann, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, S. Estier
Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag zeigte 2020 keine erhöhten Werte, welche die Gesundheit der Bevölkerung gefährdet hätten. In der Atmosphäre überwiegt die natürliche Radioaktivität deutlich. Dank der grossen Empfindlichkeit der verwendeten Messmethoden konnten trotzdem kleinste Spuren von künstlichen Radionukliden auf den Aerosolpartikeln nachgewiesen werden. Im Niederschlag wurden 2020 mit Ausnahme von Tritium und sporadischen Spuren von ^{137}Cs keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. Die ausgeprägte Trockenperiode im April hat zu etwas höheren ^{7}Be in der Luft und ^{137}Cs im Regenwasser geführt. Letzteres vermutlich in Zusammenhang mit den Waldbränden in der Region um Tschernobyl. In der unmittelbaren Umgebung von Tritium-verarbeitenden Industriebetrieben erreichten die ^{3}H-Konzentrationen im Regenwasser maximal 7.3% des Immissionsgrenzwertes der StSV für öffentlich zugängliche Gewässer.

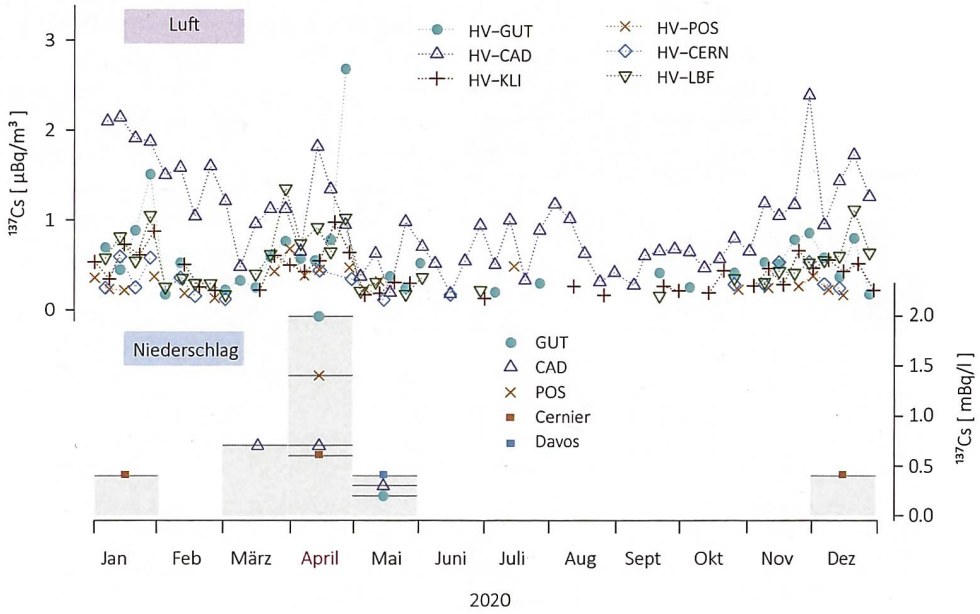
Luft

Probenahme und Messung

Das BAG sammelt Aerosolpartikel mit sogenannten High-Volume-Samplern (HVS) an 6 Stationen in der Schweiz (siehe Tabelle 1). Bei den HVS Stationen werden fortlaufend grosse Volumen von Luft gefiltert; je nach Station sind es 80'000 m^3 bis 150'000 m^3 pro Woche. Die Filter werden im Routinebetrieb wöchentlich gewechselt und zur Analyse ans BAG gesandt. Die anschliessende Messung auf einem HPGe-Gammaspektrometer dauert 2 Tage. Die lange Messzeit ist nötig, weil die Konzentration der radioaktiven Stoffe sehr tief ist. Die Messresultate werden auf www.radenviro.ch und www.bag.admin.ch/ura-hvs-de zeitnah veröffentlicht. Ziel der HVS Messungen ist nicht die schnelle Alarmierung (dafür gibt es URAnet, MADUK und NADAM) sondern der Nachweis von kleinsten Spuren, die von den anderen Messsystemen nicht detektiert werden können. Die Erfahrung, etwa im Jahr 2011 nach dem Reaktorunfall in Fukushima oder beim Ereignis mit ^{106}Ru im Herbst 2017, hat gezeigt, dass für eine glaubwürdige Information der Bevölkerung und als Grundlage für die Behörden eine präzise Messung der tatsächlich vorhandenen Radioaktivität unverzichtbar ist. Neben den HVS-Filtern betreibt das BAG Mittelvolumen-Filter (MV), welche ein 10- bis 20-mal geringeres Luftvolumen filtrieren und damit entsprechend höhere Nachweisgrenzen haben. Die MV-Sammler sind zur Überwachung der Kernkraftwerke bei Gösgen, Leibstadt, Mühleberg und PSI/Beznau stationiert, wobei der letztgenannte vom PSI betrieben und gemessen wird. Ein weiterer MV-Sammler steht für die Überwachung der freien Atmosphäre in der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch. Die Filter der MV-Sammler werden wöchentlich gewechselt und als Monatsprobe (4 - 5 Filter) gammaspektrometrisch gemessen.

Künstliche Radioisotope in der Luft

Das einzige regelmässig nachgewiesene künstliche Radioisotop in der Luft war wie in den Vorjahren Cäsium-137 (^{137}Cs). ^{137}Cs hat eine Halbwertszeit von 30 Jahren und stammt zur Hauptsache immer noch vom Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahr 1986. Die gemessenen Konzentrationen sind insgesamt sehr gering. Etwas höhere Werte (bis 2.4 µBq/m^3) wurden 2020 wurden wie jedes Jahr in den Wintermonaten gemessen (siehe Figur 1). Zu den erhöhten ^{137}Cs Konzentrationen im Winterhalbjahr tra-



Figur 1 :
^{137}Cs Konzentrationen in der Luft (oben) und im Niederschlag (unten) für das Jahr 2020. Ein Einfluss der Waldbrände in der Region Tschernobyl im April 2020, insbesondere für die Station Güttingen, darf vermutet werden.

gen das Aufwirbeln von Bodenpartikel in der vegetationsarmen Zeit sowie das Verbrennen von leicht mit ^{137}Cs kontaminiertem Holz zum Heizen bei. Die stärkere Kontamination der Böden im Kanton Tessin als Folge von Niederschlägen nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl erklärt die meist etwas höheren Werte der Station Cadenazzo. Ebenfalls leicht höhere Werte und der insgesamt höchste Wert (2.7 µBq/m³) konnten im April festgestellt werden. Möglicherweise stehen diese höheren Messwerte im Zusammenhang mit den ausgedehnten Waldbränden in der Region um Tschernobyl, welche im April 2020 Schlagzeilen machten (siehe auch www.radenviro.ch). Gemäss Ausbreitungsrechnungen sind Anfang und Ende April Luftmassen aus den betroffenen Gebieten bis in die Schweiz verfrachtet worden. Da gleichzeitig in den Niederschlagsproben Spuren von ^{137}Cs gefunden wurden (Fig.1) lässt sich eine Spur der Waldbrände bis in die Schweiz durchaus vermuten. Es ist aber ebenso gut möglich, dass die auch in der Schweiz vorherrschende grosse Trockenheit im April zu einer verstärkten lokalen Aufwirbelung von Staub aus Böden in der Umgebung geführt hat. Auch die höchsten gemessenen Werte sind mehr als eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert für ^{137}Cs von 8.5 Bq/m³.

Das radioaktive Natriumisotop ^{24}Na mit einer Halbwertszeit von 15 Stunden kann sowohl natürliche als auch künstliche Quellen haben. Natürliches ^{24}Na wird wie das ^{7}Be und ^{22}Na in der oberen Atmosphäre durch die kosmische Strahlung erzeugt. Künstliches ^{24}Na kann in Beschleunigern erzeugt werden, wie sie z. B. am Cern in Genf oder am PSI in Villigen im Einsatz stehen. Beim HVS Klingnau konnten im Berichtsjahr zweimal Spuren von ^{24}Na nachgewiesen werden (37 und 111 µBq/m³, Ende Oktober/Anfang November). Die HVS Station Klingnau liegt in rund 6 km Entfernung vom PSI, welches daher als mögliche Quelle in Betracht gezogen werden muss. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{24}Na kann die Nachweisgrenze variieren und lag 2020 bei rund 8 % der Messungen bei > 1'000 µBq/m³. Die gemessenen ^{24}Na Werte und die Nachweisgrenzen insgesamt liegen aller-

Tabelle 1:
HVS-Stationen des BAG

Station	H.ü.M.	Gemeinde	Umgebung	Bemerkung
CAD	203 m	Cadenazzo TI	Landwirtschaft	Referenzstation für die Alpensüdseite (Agroscope Forschungsstation)
CERN	428 m	Meyrin GE	Landwirtschaft, Stadtnähe, CERN	zur Erfassung eventueller Abgaben aus den CERN Beschleunigern
GUT	440 m	Güttingen TG	Landwirtschaft, Bodensee	Referenzstation für das östliche Mittelland
KLI	315 m	Klingnau AG	ländlich, Stausee	im Einflussbereich der KKW Beznau und Leibstadt
LBF	560 m	Köniz BE (Liebefeld)	städtisch, Agglomeration	am Standort des Bundesamt für Gesundheit
POS	640 m	Hauterive FR (Posieux)	Landwirtschaft	Referenzstation für das westliche Mittelland (Agroscope Forschungsstation)

Tabelle 2:
Verteilung der 2013-2018 (Referenz) sowie 2020 in der Schweiz gemessenen ^{210}Pb und ^{7}Be Aktivitäten in bodennaher Luft. Aktivitätsangaben in mBq/m^3

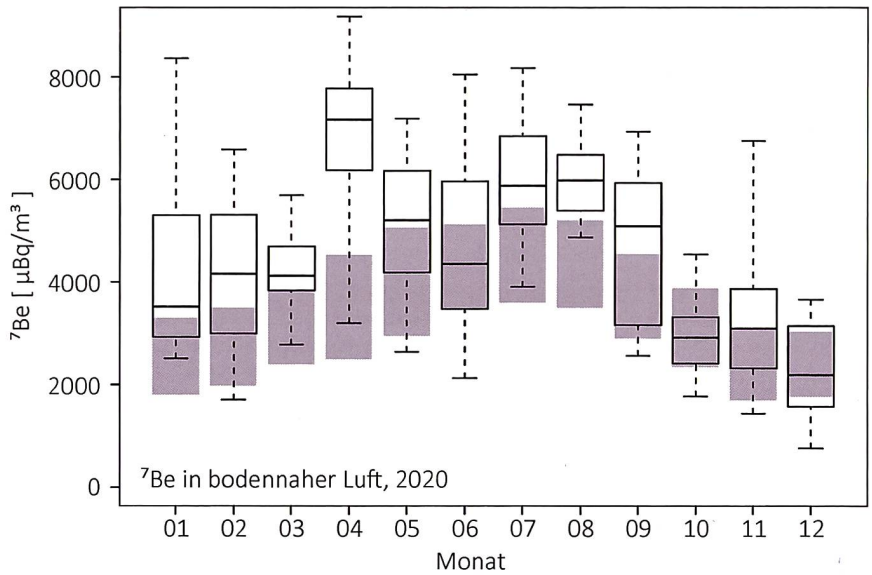
Kenngrösse	^{210}Pb (Referenz)	^{7}Be (2020)	^{7}Be (Referenz)	^{7}Be (2020)
5% - 95%-Perzentil	0.18 - 1.18	0.21 - 1.29	1.48 - 6.40	1.96 - 7.51
Min - Max	0.07 - 2.76	0.14 - 2.24	0.15 - 8.74	0.76 - 9.18
Mittelwert / Median	0.57 / 0.49	0.61 / 0.53	3.66 / 3.50	4.53 / 4.36
Anzahl Messwerte	*1'864*	*308*	*1'864*	*308*

dings stets deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 100 Bq/m^3. Geringste Spuren von Jod-131 (^{131}I) tauchten 2020 nur in 2 HVS Filtern auf (Maximum 0.9 µBq/m^3). Die Ursache ist in den medizinischen Anwendungen zu suchen, etwa wenn ^{131}I durch die Verbrennung von Abfällen aus Spitälern in die Luft gelangt. Gesundheitlich sind diese Konzentrationen – eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert – irrelevant. Plutonium-Isotope wurden 2020 an zwei Sammelproben von HVS-Filtern der Station Liebefeld bestimmt - eine Probe mit Filtern vom Winter (Nov-April) und eine Probe mit Filtern vom Sommer (Mai-Sept). Die Summe der Plutoniumisotope ^{238}Pu, ^{239}Pu und ^{240}Pu ergab 0.7 ± 10% nano-Becquerel pro m^3 Luft (nBq/m^3) in beiden Proben. Zusätzliche Proben von den Stationen Klingnau und Posieux ergaben als Summe der Alphastrahler zwischen 0.6 und 0.1 nBq/m^3. Diese Konzentrationen der künstlichen Alphastrahler sind sehr tief und liegen wie beim ^{137}Cs eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert. Die Resultate der MV-Filter in der Umgebung der Kernkraftwerke werden im Kapitel 8.5 näher besprochen.

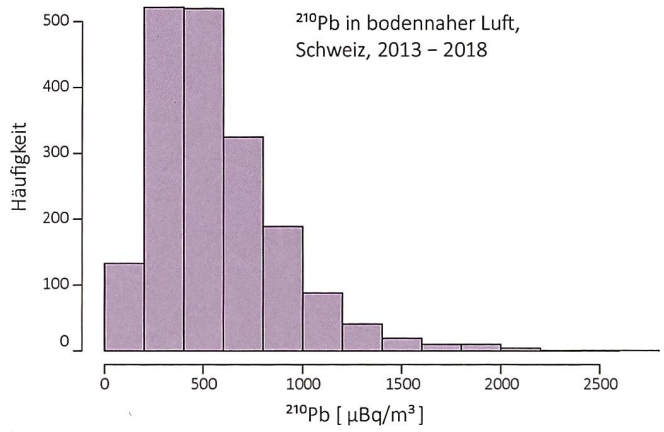
Natürliche Radioisotope in der Luft

Die 2020 auf den HVS Filtern gemessenen Radioisotope waren fast ausschliesslich natürlicher Herkunft. Vorherrschend waren das Radonfolgeprodukt Blei-210 (^{210}Pb; Halbwertszeit 21 Jahre) und Beryllium-7 (^{7}Be; Halbwertszeit 50 Tage), welches durch die kosmische Strahlung in hohen Schichten der Atmosphäre gebildete und deshalb auch kosmogen genannt wird. Neunzig Prozent der ^{7}Be-Werte lagen 2020 zwischen 2.0 und 7.5 mBq/m^3 (Mittelwert = 4.5 mBq/m^3; Median = 4.4 mBq/m^3). Dies entspricht den erwarteten Werten (siehe Tabelle 2), wobei der Höchstwert 2020 mit 9.08 mBq/m^3 leicht aus dem Rahmen fiel. Neben ^{7}Be war in kleinsten Spuren von meist weniger als einem µBq/m^3 das ebenfalls kosmogene Natrium-22 (^{22}Na) nachweisbar. Neunzig Prozent der 2020 gemessenen ^{210}Pb-Konzentrationen lagen zwischen 0.21 und 1.29 mBq/m^3 (Mittelwert = 0.61 mBq/m^3, Median = 0.53 mBq/m^3). Diese Werte sind höher als die über die vorherigen 6 Jahre gemittelten ^{210}Pb Aktivitäten (Tabelle 2 und Figur 3).

Die Figur 2 zeigt für jeden Monat die Verteilung der ^{7}Be Konzentrationen aller Stationen im Vergleich mit dem langjährigen Jahresverlauf. Der Jahresverlauf der ^{7}Be Konzentrationen widerspiegelt das Wettergeschehen, insbesondere die konvektive vertikale Durchmischung der Troposphäre an warmen Sommertagen, wobei ^{7}Be reiche Luft aus der obersten Troposphäre an den Boden gelangt. Weitere Einflüsse für die ^{7}Be Konzentration in der Luft sind Niederschlag (Auswaschen von ^{7}Be) und die kosmische Strahlung. Die kosmische Strahlung war 2020 noch einmal minim höher (+0.6%) als 2019 (IGY Neutron Monitor Jungfraujoch, cosray.unibe.ch). Das passt zum Beginn des Sonnenzyklus 25 der praktisch sonnenfleckenfrei startete. Aufgrund der negativen Korrelation der kosmischen Strahlung mit der Sonnenaktivität war die ^{7}Be-Produktion also hoch. Die geringe Erhöhung der kosmischen Strahlung kann aber nicht die 7.5% Erhöhung des Jahresmittelwert von ^{7}Be erklären (4.5 mBq/ m^3 gegenüber 4.2 mBq/m^3 im Vorjahr). Die erwähnten Klimaparameter sind also dominierend. 2020 war das wärmste Jahr seit Messbeginn (zusammen mit 2018) und eher trocken und entsprechend hoch war der Jahresmittelwert für ^{7}Be. Der auffälligste Monat war der April mit fast doppelt so hohen ^{7}Be Konzentrationen als



Figur 2 :
Boxplot der monatlichen ^{7}Be Konzentrationen bei allen HVS Stationen im Jahr 2020. Die Box umfasst 50% aller Messwerte, die horizontale Linie in der Box entspricht dem Mittelwert und die «whiskers» gehen zu Minimum und Maximum. Die ausgefüllten Boxen gelten für die langjährigen Monatsmittel (1994-2011) (Referenz 1).



Figur 3 :
Histogramm der ^{210}Pb Aktivitäten in bodennaher Luft in der Schweiz, 2013-2018. 1864 Messwerte. Siehe auch Tabelle 2

im langjährigen Mittel. Dies lässt sich mit der langandauernden und warmen Trockenperiode von Ende März bis im April gut erklären. Einzig im kalten und niederschlagsreichen Oktober waren die ^{7}Be-Konzentrationen leicht unter dem langjährigen Durchschnitt. Als weiteres natürliches Radioisotop findet sich in den HVS Filtern oft auch ^{40}K. Die Konzentrationen lagen 2020 meist im typischen Bereich von 5- 20 µBq/m³. Auch die ^{40}K Konzentrationen zeigen im April etwas höhere Werte (15-25 µBq/m³)- wohl aufgrund erhöhter Staubaufwirbelung während der Trockenperiode.

Niederschlag

Messungen von Gammastrahlern

Im Berichtsjahr 2020 wurde an folgenden Sammelstationen kontinuierlich Niederschlag gesammelt und monatlich gammaspektrometrisch gemessen: Umgebung der Kernkraftwerke Mühleberg, Leibstadt, Gösgen und Benznau, Umgebung PSI/ZWILAG sowie Posieux FR, Güttingen TG, Cadenazzo TI, Cernier NE und Davos GR. Für die natürlichen Radioisotope ^{7}Be und ^{210}Pb waren die Messresultate sehr ähnlich wie im Vorjahr (^{7}Be: 0.2- 3.0 Bq/l, Mittelwert 0.9 Bq/l; ^{210}Pb: 0.02- 0.41 Bq/l, Mittelwert 0.07 Bq/l). In 10 von rund 100 Regen- und Schneeproben lag ^{137}Cs knapp über der Erkennungsgrenze. Interessanterweise traten höchsten Werte im Monat April auf (Maximum 2 mBq/l in Güttingen). Ein Zusammenhang mit den Waldbränden in der Region um Tschernobyl im selben Monat kann daher vermutet werden (siehe Figur 1 und für weitere Informationen radenviro.ch). Diese Konzentrationen knapp über der Nachweisgrenze sind aber sehr tief und könnten, wie die Spuren von ^{137}Cs in der Luft, auch lokale Quellen haben. Ein gesundheitliches Risiko ist sicher nicht gegeben; als Referenzpunkt kann hier der Immissionsgrenzwert aus der Strahlenschutzverordnung von 36 Bq/l ^{137}Cs in öffentlich zugänglichen Gewässern herangezogen werden, da bei starken Niederschlägen ein öffentlich zugängliches Gewässer im Wesentlichen durch Regenwasser gespeist sein könnte. Andere künstliche Gammaemitter konnten nicht nachgewiesen werden. Für eine weitere Diskussion dieser Resultate siehe auch Kapitel 8.5.

Tritium-Messungen

Für die monatlichen Sammelprobe von Niederschlag der Referenzstationen Posieux, Güttingen, Cadenazzo sowie bei den Stationen Basel-Binningen und La Chaux-de-Fonds lagen die Tritiumkonzentrationen nur einmal knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l: Im März bei Güttingen (2.7 ± 0.7 Bq/l). Tritium-Messungen an Regenproben aus der Umgebung der Kernkraftwerke KKG, KKL und KKM ergaben ebenfalls Messwerte unterhalb oder knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l. Bei diesen Stationen war der höchtse gemessene Wert 2.3 ± 0.6 Bq/l. Bei den Sammelstationen PSI, KKB und Zwilag ergaben sich 2020 mit Mittelwerten von 3, 11 und 8 Bq/l leicht höhere Werte - wie in früheren Jahren. Das höchste Monatsmittel trat bei der Station KKB auf (25 Bq/l). Alle gemessenen Konzentrationen liegen sehr deutlich unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte (siehe Kapitel 8.5). Höhere Tritiumwerte - aber auch hier unterhalb der Grenzwerte - zeigten sich bei der Überwachung von Tritium-verarbeitenden Industrien. Nahe bei den betroffenen Standorten in Teufen AR und Niederwangen BE enthielt das Regenwasser zwischen 7 und 1'451 Bq/l Tritium mit einem Mittelwert von 112 Bq/l. Die Höchstkonzentration entspricht rund 7.3 %, der Mittelwert 0.6 % des Immissionsgrenzwertes für öffentlich zugängliche Gewässer, der in der StSV festgehalten ist. Ausführlicher werden diese Tritium-Resultate in Kapitel 9.3 besprochen.

Referenzen

[1] Steinmann P., Zeller M., Beuret P., Ferreri G., Estier S., 2013. Cosmogenic ^{7}Be and ^{22}Na in ground level air in Switzerland (1994-2011). Journal of Environmental Radioactivity 124, 68-73.

4.2
URAnet aero

D. Lienhard, P. Beuret, S. Estier, M. Müller, P. Steinmann
Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die fünfzehn Aerosolmonitore und fünf ^{131}I Monitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2020 keine erhöhte künstliche Radioaktivität in der Umgebungsluft festgestellt. Mit Ausnahme einer kurzzeitigen Detektion von ^{24}Na der Station PSI mit einer Aktivitätskonzentration weit unter dem Immissionsgrenzwert konnten keine künstlichen Radionuklide in den Spektren nachgewiesen werden. Auch die Konzentration von gasförmigem ^{131}I blieb unterhalb der Nachweisgrenze von ca. 90 mBq/m^3. Somit blieben alle Aktivitätskonzentrationen unter den in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerten. Auf allen Stationen wurden die natürlich vorkommenden Radontöchter aus der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallskette täglich nachgewiesen, was die Funktionsfähigkeit der Aerosolmonitore bestätigt. Durch Weiterentwicklung der Datenanalyse konnte die zeitliche Auflösung der Aktivitätskonzentrationen der Radontöchter verbessert werden. Die Aerosolsammler detektieren sporadisch kosmogenes ^{7}Be, die Nachweisgrenze liegt aber noch nicht genügend tief, um mit diesen Werten aussagekräftige Zeitreihen zu erstellen.

Einführung

Das im Jahr 2018 offiziell in Betrieb genommene Messnetz URAnet aero überwacht die Radioaktivität in der Umgebungsluft. Das Messnetz besteht aus 15 über die ganze Schweiz verteilten Messstationen, auf denen Aerosolmonitore die Aktivitätskonzentrationen der auf Luftpartikeln gebundenen Radionuklide kontinuierlich messen, und die Messwerte per Mobilfunknetz übertragen werden. Fünf Messstandorte verfügen zusätzlich über Iod-Monitore, die aus dem Vorgängermessnetz RADAIR in URAnet aero integriert wurden. Diese messen die ^{131}I Konzentrationen in der Luft (gasförmig und partikelgebunden).

Das Ziel von URAnet aero ist einerseits die Überwachung der Immissionen in der Luft zur Abschätzung der Dosis für die gesamte Bevölkerung, andererseits eine rasche und zuverlässige Alarmübertragung und Alarmvalidierung im Falle einer erhöhten Aktivitätskonzentration eines künstlichen Radionuklids. Zu diesem Zweck wird für dieses Messnetz eine moderne Messtechnik eingesetzt, die die Identifizierung und Quantifizierung von Radionukliden mit den von internationalen Empfehlungen geforderten Nachweisgrenzen erlaubt. Da der Luftdurchsatz von URAnet aero Monitoren mit 16 bis 18 m^3/h um einiges tiefer liegt als derjenige von Hochvolumensammlern (ca. 500 m^3/h bei 1 Woche Sammelzeit, siehe Kapitel 4.1), liegen auch die Nachweisgrenzen höher, aber immer noch weit unter dem Immissionsgrenzwert.

Von den 15 Messstationen befinden sich eine Station nördlich des Juras (Basel), eine Station südlich der Alpen (Bellinzona) und die restlichen Stationen im Mittelland zwischen Genf und dem Bodensee, mit einer besonderen Verdichtung des Messnetzes in der Umgebung der Kernkraftwerke. In Folge der Stilllegung des Kernkraftwerks Mühleberg wurde das Messgerät der Station Fribourg in die nähere Umgebung des Kernkraftwerks verschoben. Die Verschiebung des Standorts Bözberg nach Aarau ist für die zweite Jahreshälfte 2021 geplant.

Die Messgeräte sind eingebunden in das SwissMetNet der MeteoSchweiz. Innerhalb des SwissMetNet werden die Messwerte verarbeitet und auf die Server der Sektion Umweltradioaktivität transferiert, von wo aus sie für die Analyse, Visualisierung und gegebenenfalls eine Alarmvalidierung verfügbar gemacht werden. Zusätzlich speichert die MeteoSchweiz alle Messwerte in ihrer eigenen zentralen Datenbank (DataWareHouse).

Die 12-Stunden-Mittelwerte der Radionuklide ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{7}Be, ^{60}Co, ^{131}I, ^{214}Bi und ^{214}Pb sind auf der Internet-Plattform Radenviro für die Öffentlichkeit einsehbar (www.radenviro.ch).

Messtechnik

Aerosolsammler:

Die Bandfilter-Messgeräte des Herstellers Thermo Fisher sind ausgestattet mit einem Reinstgermanium-Detektor mit 15% relativer Effizienz gegenüber einem 3x3'' NaI-Detektor, über welchem sich in ca. 1cm Abstand die Bestaubungsstelle mit 5cm Durchmesser befindet. Zur Abschirmung vor Umgebungsstrahlung ist dieser Detektor in einem zweiteiligen Bleigehäuse eingebaut. Die beiden Teile werden durch einen metallenen Messstellenring getrennt, über welchen das Filterband bewegt werden kann. Der Messstellenring wird im Messbetrieb von vier Schraubenfedern luftdicht an das obere und einen O-Ring luftdicht an das untere Bleigehäuse gedrückt. Via einen Ansaugkopf mit einem grobmaschigen 1mm-Gitter – um dem Ansaugen von Insekten oder Schneeflocken vorzubeugen – passiert die Umgebungsluft während einer Bestaubungszeit von 12 Stunden das Glasfaser-Filterband mit einer Durchflussrate von 16 bis 18 m^3/h. Nach Ablauf der Bestaubungszeit wird der Messstellenring durch die Druckluft eines Kompressors gegen den O-Ring nach unten gepresst, wodurch das Filterband frei bewegt und soweit vorgeschoben werden kann, dass sich die bereits bestaubte Stelle ausserhalb des Bleigehäuses befindet und eine frische Filterfläche bestaubt werden kann. Das obere Bleigehäuse verfügt über einen Einlass für die Luftansauglinie und das untere Bleigehäuse über einen Ausgang für den Luftabzug.

Die Gamma-Spektrometrie mit Germanium-Kristallen erlaubt die Aufnahme von hochaufgelösten Spektren im Energie-Bereich zwischen 30 und 2'000 keV mit Peak-Halbwertsbreiten zwischen 0.8 keV im niedrigen Energiebereich und 2.5 keV im hohen Energiebereich. Durch die hohe Auflösung gibt es wenige Überlappungen der einzelnen Peaks, was die eindeutige Zuordnung zu den verschiedenen Radionukliden vereinfacht. Anhand der Peak-Fläche und des gefilterten Luftvolumens kann dann die Aktivitätskonzentration der Radionuklide in der Umgebungsluft berechnet werden.

Nach einem Filterbandvorschub beginnt die Pumpe sofort mit dem Ansaugen von Aussenluft und der Detektor mit der kontinuierlichen Akquisition des Spektrums. Alle 5 Minuten wird das Spektrum neu ausgewertet und auf Grenzwertüberschreitungen geprüft, womit die Information der zeitlichen Entwicklung der Peak Fläche in der Auswertung abgespeichert ist.

Die Temperaturschwankungen der angesogenen Umgebungsluft während einer 12h-Bestaubungszeit

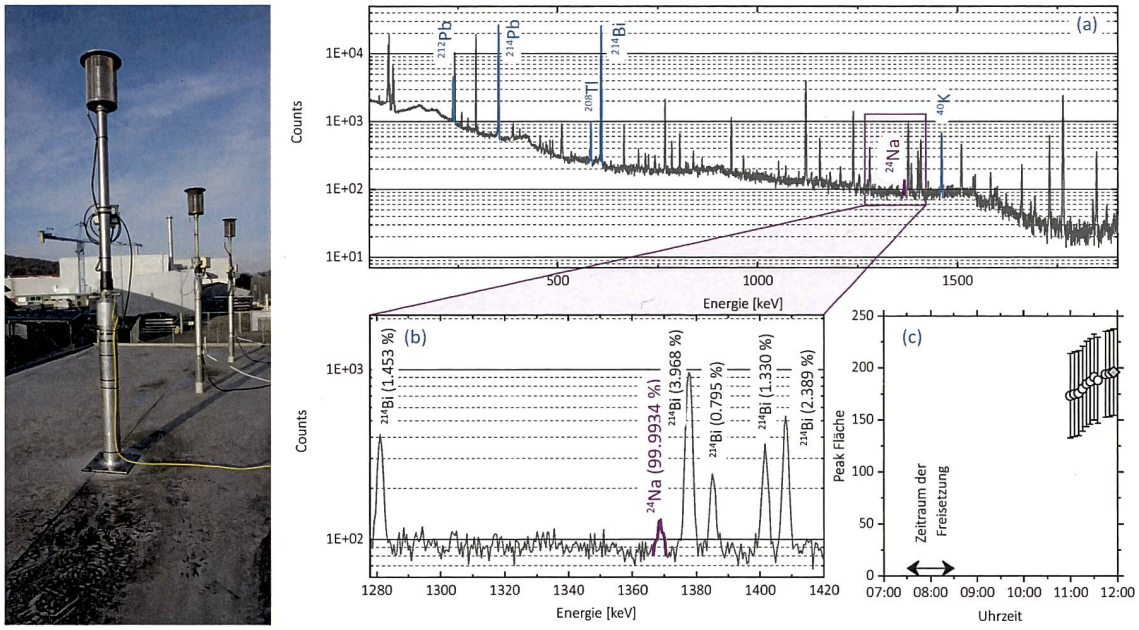


Abbildung 1 a,b,c :
(a) Spektrum der Messstation PSI vom 28. September um 12:00 Uhr. Die Hauptlinien der natürlich vorkommenden Radontöchter sind blau eingezeichnet, der Peak von ^{24}Na rot hervorgehoben.
(b) Vergrösserter Ausschnitt des Bereichs um den ^{24}Na Peak bei 1'368.63 keV, umgeben von den markierten ^{214}Bi Nebenlinien (Emissionswahrscheinlichkeiten sind angegeben).
(c) Peak Fläche der 1'368.63 keV-Linie, die erst ca. 3h nach der Abgabe die Nachweisgrenze erreicht.

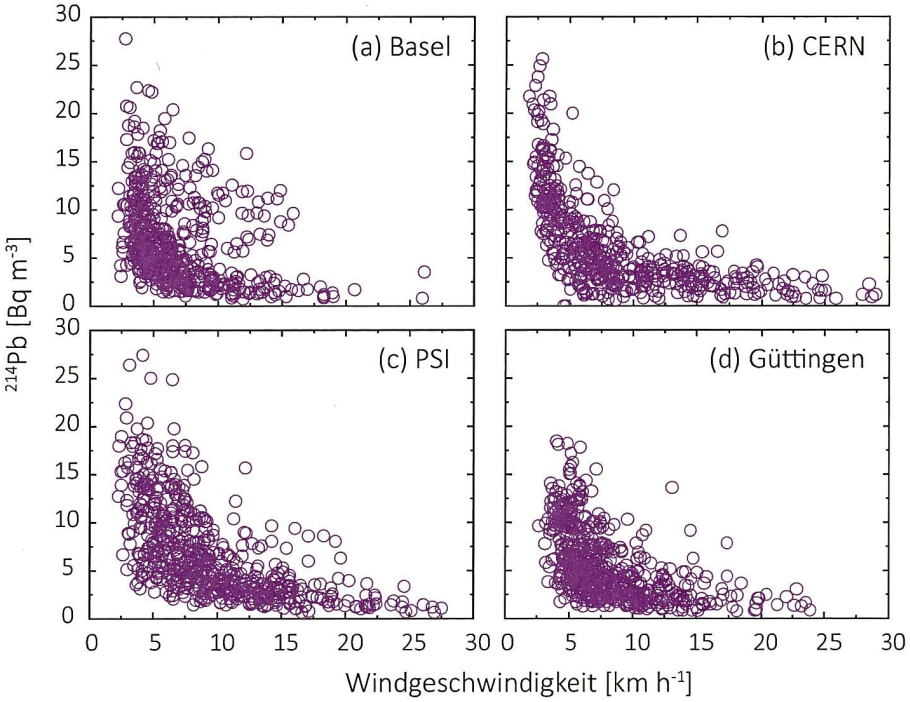


Abbildung 2 :
12-Stunden Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ^{214}Pb als Funktion der 12-Stunden Mittelwerte der Windgeschwindigkeit der Stationen Basel, CERN, PSI und Güttingen.

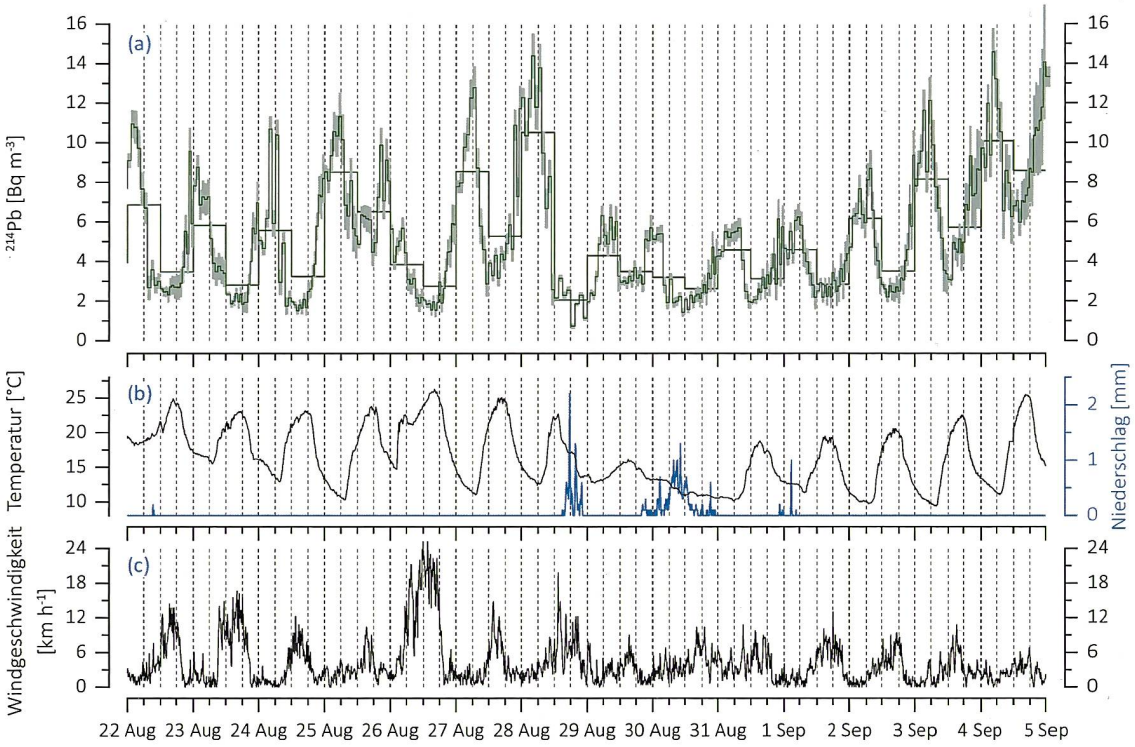


Abbildung 3 a,b,c :
Messwerte der Station Mühleberg vom 22. August bis 5. September:
(a) ^{214}Pb Aktivitätskonzentration (1h- und 12h-Mittelwerte),
(b) Temperatur und 10-Minuten Niederschlagsmenge,
(c) Windgeschwindigkeit.

führen auch beim Vorverstärker des Germaniumdetektors zu geringen Temperaturschwankungen. Dadurch kann sich die Energiekalibration während der Bestaubungszeit geringfügig verändern. Das Messsystem regelt die Energiekalibration anhand der Peaks der Radontöchter ^{214}Bi und ^{214}Pb und einer eingebauten schwachen ^{40}K Quelle automatisch nach. Auf die Halbwertsbreiten haben diese Modulationen keinen signifikanten Einfluss.

^{131}I-Monitor:

Eine Pumpe saugt Umgebungsluft mit einer Durchflussrate von ca. 10 m^3 an. Diese Luft passiert dabei eine zylindrische Kartusche mit $AgNO_3$-Granulaten, auf welchen grasförmiges ^{131}I adsorbiert, falls dieses in der Umgebungsluft (gasförmig oder partikelgebunden) vorhanden sein sollte. In der Mitte der zylindrischen Kartusche ist ein NaI-Detektor installiert, der die Gammaquanten von ^{131}I bei 364.49 keV registriert. Aus der Zählrate und dem gefilterten Luftvolumen kann dann die Aktivitätskonzentration des ^{131}I in der Umgebungsluft berechnet werden.

Messresultate

Abbildung 1a zeigt das aufgenommene Spektrum der Messstation PSI am Ende der 12h-Bestaubungszeit am Mittag des 28. Septembers 2020. Die Hauptlinien der Radontöchter ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe sind wie üblich die höchsten Peaks, die Hauptlinien von ^{212}Pb und ^{208}Tl aus der Thorium-Zerfallsreihe und der ^{40}K Peak bei 1'460.81 keV sind auch im Spektrum zu finden. In diesem Spektrum wurde ebenfalls ^{24}Na bei 1368.63 keV nachgewiesen, rot hervorgehoben. In Abbildung 1b ist der nähere Energiebereich um den ^{24}Na Peak mit den benachbarten Linien der Radontochter ^{214}Bi ersichtlich. Aufgrund der Aktivitätskonzentration von ^{214}Bi – üblicherweise im Bereich von einigen Bq/m^3 – sind selbst Linien mit vergleichsweise geringen Emissionswahrscheinlichkeiten im Spektrum zu finden und beeinflussen den Untergrund.

Das PSI bestätigte die Abgabe von ^{24}Na, welches beim Betrieb von Teilchenbeschleunigern entsteht. Andere Radionuklide, die dabei ebenfalls entstehen können, wie ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{18}F und ^{41}Ar sind gasförmig und werden vom Aerosolmonitor nicht erfasst. Die Abgabe fand morgens um ca. 8 Uhr statt und dauerte etwa 10 Minuten. Aufgrund der meteorologischen Bedingungen zur Zeit der Abgabe (Nebel, kein Wind) kann davon ausgegangen werden, dass das ^{24}Na während rund einer Stunde auf dem Filter der URAnet Station gesammelt wurde. Der Peak bei 1'368.63 keV überschritt schliesslich gegen 11 Uhr die Nachweisgrenze (siehe Abbildung 1c).

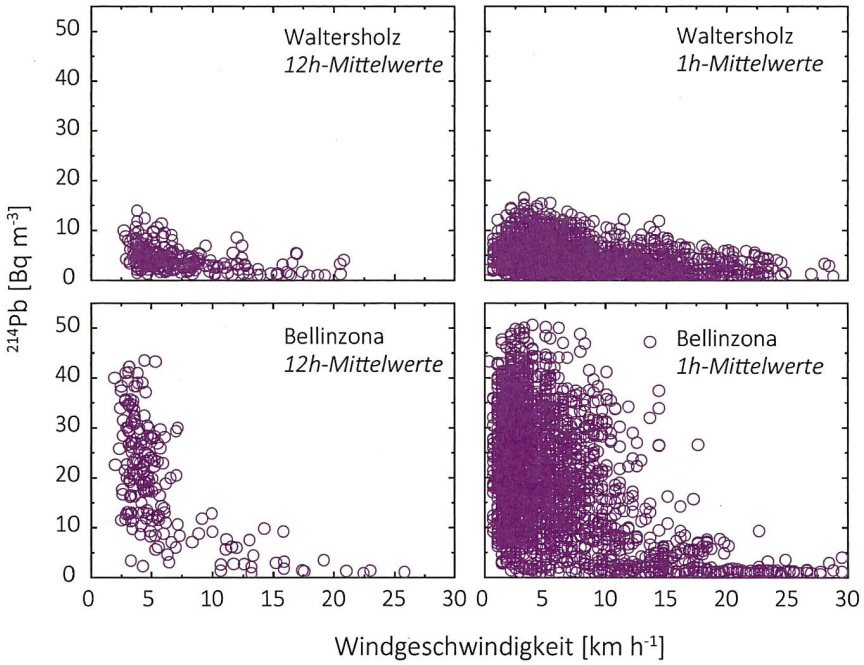


Abbildung 4 :
Vergleich der 12h-Mittelwerte (linke Panels) und 1h-Mittelwerte (rechte Panels) der Aktivitätskonzentrationen von ^{214}Pb als Funktion der Windgeschwindigkeit von Juli bis Dezember für die Stationen Waltersholz (oben) und Bellinzona (unten). Aufgrund eines Ausfalls des Windmessers der Station Bellinzona fehlen die Werte für den Monat November dieser Station.

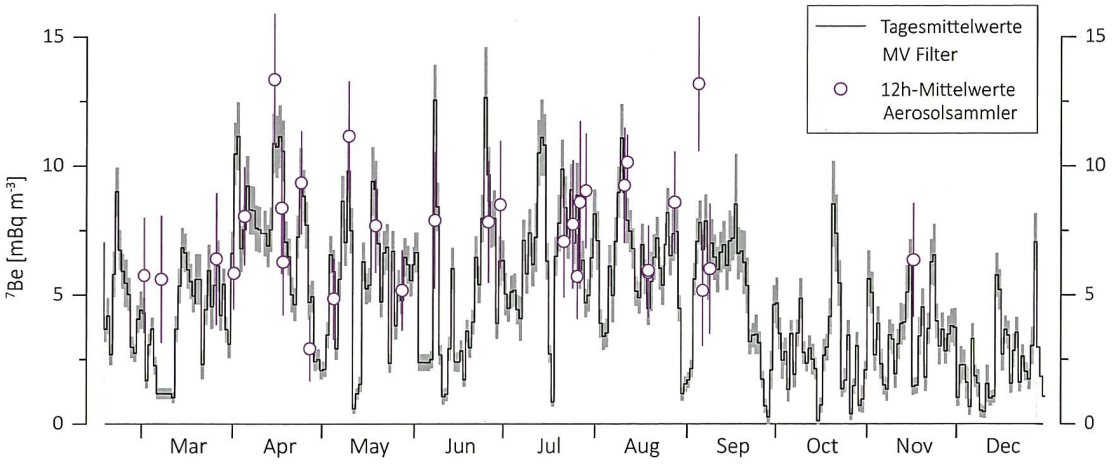


Abbildung 5 :
Aktivitätskonzentration von ^{7}Be auf der Messstation Liebefeld von Mitte Februar bis Ende Dezember. Gezeigt sind die mit einem MV Filter gemessenen Tagesmittelwerte (grau) und die 12h-Mittelwerte des Aerosolsammlers (rot). Da die Erkennungsgrenze vielfach nicht überschritten wird, gibt der Aerosolsammler nur sporadisch ^{7}Be Aktivitätskonzentration an.

Aus der Peak Fläche, der Emissionswahrscheinlichkeit und der Halbwertszeit von ^{24}Na (14.96h) ergibt sich für den fraglichen Zeitraum eine ^{24}Na-Aktivitätskonzentration in der Luft von ca. 110 ± 30 mBq/m^3. Dieser Wert ist 500 Mal kleiner als der Immissionsgrenzwert für ^{24}Na gemäss Strahlenschutzverordnung.

Abgesehen von diesem Ereignis konnten keine künstlichen Radionuklide in den Spektren festgestellt werden. Hingegen können die Radontöchter ^{214}Pb und ^{214}Bi meist bereits nach kurzen Bestaubungszeiten von weniger als einer halben Stunde mit hoher Sicherheit nachgewiesen werden. Ihre Aktivitätskonzentrationen sind bestimmt durch die Eigenschaften des Bodens und die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen. Abbildung 2 zeigt die 12-Stunden Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ^{214}Pb als Funktion der Windgeschwindigkeit für die Stationen Basel, CERN, PSI und Güttingen. Auch ohne Berücksichtigung des Einflusses von Niederschlag, Temperatur oder Inversionsdauer zeigt diese Darstellung, dass hohe Windgeschwindigkeiten im Allgemeinen keine hohen ^{214}Pb Aktivitätskonzentrationen zulassen und vice versa, d.h. hohe ^{214}Pb Aktivitätskonzentrationen werden meistens nur bei geringen Windgeschwindigkeiten gemessen. In Basel ist die Beziehung etwas weniger deutlich als beispielsweise am CERN. In Güttingen sind die Aktivitätskonzentrationen im Allgemeinen etwas tiefer als bei den anderen drei gezeigten Stationen.

Mit dem Ziel, die zeitliche Auflösung der ^{214}Pb Aktivitätskonzentration zu verbessern, wurde die 12h-Bestaubungszeit in Intervalle von je ca. 1h aufgeteilt. Anhand der Bateman-Gleichungen kann jedem dieser Intervalle eine durchschnittliche ^{214}Pb Aktivitätskonzentration zugewiesen werden, unter Berücksichtigung der bereits während der vorangegangenen Intervallen abgelagerten Radionuklide. Da der 351.92-keV Peak von ^{214}Pb auch in 1h-Intervallen mit geringer statistischer Unsicherheit behaftet ist und die Halbwertszeit von ^{214}Pb weniger als die Hälfte der Intervall-Dauer beträgt, bleibt die Unsicherheit der ^{214}Pb Aktivitätskonzentration auch bei den 1h-Intervallen gegen Ende der Bestaubungszeit von 12h relativ gering. In Abbildung 3 sind die Zeitverläufe der 12h-Mittelwerte und die zugehörigen Mittelwerte der 1h-Intervalle der Station Mühleberg im Zeitraum zwischen dem 22. August und 5. September dargestellt. Es zeigt sich, dass der Unterschied zwischen den beiden Verläufen mehrere Bq/m^3 betragen kann. Die höhere zeitliche Auflösung zeigt, dass ^{214}Pb in der Regel abends ansteigt und in den frühen Morgenstunden einen Höchstwert erreicht, bevor der Temperaturanstieg bei Tagesanbruch und die damit verbundene Durchmischung der Atmosphäre die Konzentrationen einbrechen lässt. Die Höchstwerte von ^{214}Pb stimmen zeitlich meistens gut mit den Temperaturminima und dem Beginn von etwas windigeren Bedingungen überein.

Zwischen dem 29. August und 2. September kam es zu Niederschlägen. Damit wurden die Luftpartikel ausgewaschen und der Boden aufgrund der Feuchte weniger durchlässig. Die Bodenfeuchte verlangsamte in der Folge den ^{214}Pb Anstieg zwischen dem 2. und 5. September.

Analog zu Abbildung 2 ist in Abbildung 4 die 12h-Mittelwerte und 1h-Mittelwerte der ^{214}Pb Aktivitätskonzentration gegen die Windgeschwindigkeit für die Monate Juli bis Dezember der Stationen Waltersholz und Bellinzona dargestellt. Die bessere zeitliche Auflösung der 1h-Intervalle bestätigt die oben beschriebene generelle Tendenz aus den 12h-Mittelwerten, zeigt aber auch einige Ausnahmen. In Bellinzona werden ^{214}Pb Aktivitätskonzentration von über 50 Bq/m^3 erreicht, während bei Waltersholz als Folge der Bodeneigenschaften und der sehr guten Durchmischung mit der freien Troposphäre kaum mehr als 15 Bq/m^3 gemessen werden.

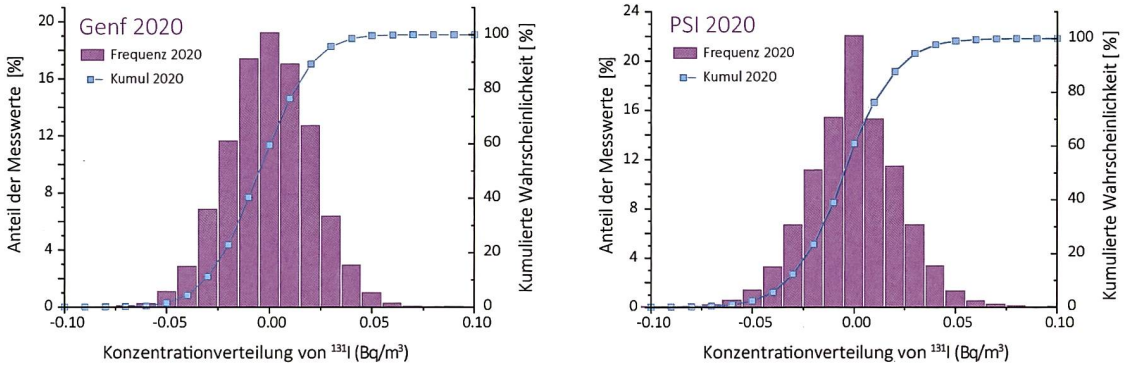


Abbildung 6 :
Histogramm der Durchschnittskonzentration von ^{131}I auf den Stationen in Genf und PSI im Jahr 2020.

Wie bereits im Vorjahr haben die Aerosolsammler auch im Jahr 2020 sporadisch ^{7}Be detektiert. Eine visuelle Überprüfung von einigen Spektren bestätigte die Anwesenheit der Linie bei 477.60 keV. Die Erkennungsgrenze am Ende der 12h-Bestaubungszeit lag für ^{7}Be jeweils zwischen 5 und 15 mBq/m^3, abhängig vom Untergrund des Spektrums, der aufgrund des Einflusses der Radontöchter stark schwanken kann. Die mit Hochvolumensammlern oder Mittelvolumensammlern (MV) gemessenen ^{7}Be Aktivitätskonzentrationen betragen ebenfalls meistens zwischen 5 und 15 mBq/m^3, was die Quantifizierung von ^{7}Be mit dem Aerosolsammler deutlich erschwert. In Abbildung 5 sind ^{7}Be Aktivitätskonzentrationen des Aerosolsammlers in Liebefeld eingezeichnet. Ein Vergleich mit den von einem MV gemessenen Tagesmittelwerten zeigt, dass in den meisten Fällen, bei denen der Aerosolsammler ^{7}Be detektiert hat, die angegebenen Aktivitätskonzentration in etwa mit Werten des MV Filters übereinstimmen. Bei jeweils einem Wert Anfangs März und Anfangs September gibt es grosse Abweichungen, was die Schwierigkeit von Messungen im Bereich der Erkennungsgrenze verdeutlicht. Möglicherweise könnte ein abgeänderter Aerosolsammler mit anderen Filtereigenschaften und höherem Durchfluss eine genügend tiefe Nachweisgrenze von ^{7}Be erreichen, um interessante Konzentrationsverläufe zu messen.

Auch bei den fünf ^{131}I Monitoren der Stationen in Bellinzona, Genf, Fribourg, Liebefeld und PSI wurde bei keiner Messung im Jahr 2020 die Nachweisgrenze überschritten. Die Absenz von ^{131}I in der Luft bestätigen auch die Histogramme der durchschnittlichen ^{131}I Konzentration der Stationen in Genf und am PSI in Abbildung 6. Sie zeigen die eine Gausssche Glockenkurve mit einem Mittelwert von Null.

Schlussfolgerung

Die 15 nuklidspezifischen Aerosolmonitore des Messsnetzes URAnet aero haben im Jahr 2020 zuverlässig Gamma-Spektren mit guter Auflösung erzeugt. Mit Ausnahme der Messung von ^{24}Na auf der Station am PSI konnten weder die Aerosolsammler noch die ^{131}I Monitore künstliche Radionuklide feststellen. Die weiterentwickelte Datenverarbeitung hat die zeitliche Auflösung der Aktivitätskonzentration der Radontöchter verbessert und die Analyse vereinfacht. Die Aerosolsammler detektieren sporadisch kosmogenes ^{7}Be. Die Nachweisgrenze liegt aber noch nicht genügend tief, um sinnvoll Zeitverläufe zu messen.

4.3
Überwachung der Radioaktivität der Luft mit Militärflugzeugen

M. Müller, S. Estier, G. Ferreri
Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Mittels zwei an Militärflugzeugen montierten Sammelgeräten werden in 8'000 bis 12'000 m Höhe Luftproben gesammelt. Im Falle einer Radioaktivitätsfreisetzung kann somit im Idealfall die Nuklidzusammensetzung bereits bestimmt werden, bevor sich die Radioaktivität auf Boden und Pflanzen absetzt. Das Einsatzkonzept sieht im Normalfall 6 Flüge pro Jahr vor, im Ereignisfall können nach Absprache zusätzliche Sammelflüge durchgeführt werden.

Vorgeschichte

In den 1960er-Jahren wurden von den Grossmächten (USA, Grossbritannien, der damaligen UdSSR, später auch von Frankreich und China) zahlreiche Kernwaffenversuche (zuerst A-Bomben später auch H-Bomben) in der Atmosphäre durchgeführt. Diese führten zu einem deutlichen Anstieg der künstlichen Radioaktivität in Luft und Niederschlägen und als Folge davon auch in Boden, Pflanzen und Nahrungsmitteln. Die damalige KUER (Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität) wurde bereits in den 1950er-Jahren vom Bundesrat beauftragt, ein Überwachungsnetz für die Radioaktivität von Luft und Niederschlägen aufzubauen, um Behörden und Bevölkerung laufend über die Umweltradioaktivität und die daraus resultierenden Strahlendosen informieren zu können.

Bei überirdischen Kernwaffenexplosionen sowie auch bei Unfällen in Kernanlagen erfolgt die Freisetzung der Radioaktivität zum grössten Teil in die Atmosphäre, und die radioaktive Wolke wird je nach Art der Freisetzung in einer gewissen Höhe mit dem Wind verfrachtet.

Im Ernstfall (d.h. bei einem Kernwaffeneinsatz oder einem schweren Kernkraftwerk-Unfall) müssen die Einsatzorgane rasch über allfällige Schutzmassnahmen für die Bevölkerung entscheiden können. Es ist deshalb notwendig, Zusammensetzung (Nuklidvektor), Ausmass und Lage einer solchen radioaktiven Wolke möglichst frühzeitig zu erfassen, bevor sich deren Radioaktivität auf Boden und Pflanzen ablagert. In der Folge wurden in Zusammenarbeit der KUER mit den damaligen Flugzeugwerken Emmen in den 1960er-Jahren Sammelgeräte entwickelt und im Windkanal kalibriert. Diese ermöglichen es, mittels Militärflugzeugen Aerosolpartikel in bis zu 12'000 m Höhe zu sammeln. Die Proben können anschliessend im Labor mittels Gamma-Spektrometrie analysiert werden. Ebenfalls ab Mitte der 1960er-Jahre wurden am Physikinstitut der Universität Freiburg die ersten Ge(Li)-Detektoren in Betrieb genommen, die für solche Messungen vom Labor der KUER für die Analyse von Luftfiltern benutzt werden konnten.

Ab dem Jahr 2000 war ein Einsatz mit den Sammelgeräten der ersten Generation nicht mehr möglich, da die nun für diesen Zweck eingesetzten Tiger-Flugzeuge über eine andere Aufhängevorrichtung verfügen. Zudem zeigte sich, dass die seit rund 30 Jahren eingesetzten Geräte einer Überholung bedurften. Mit dieser Erneuerung und Anpassung sowie der erneuten Flugzulassung wurde RUAG Aerospace (die Nachfolgerin der Flugzeugwerke Emmen) beauftragt. Seit 2004 sind die Geräte wieder einsatzbereit und flugerprobt.

Sammlung der Proben

Die Probenahme der Aerosolpartikel erfolgt mit Hilfe von Filtern, welche in einem Sammelaggregat unter dem Flügel eines Tigers F-5F/E befestigt werden. Die Geräte können vom Piloten ferngesteuert geöffnet und geschlossen werden, was eine Probenahme unter vorgewählten Bedingungen (bzgl. Flughöhe, Flugroute, Dauer, Geschwindigkeit) ermöglicht. Die Geräte wurden im Windkanal kalibriert, sodass bei bekannter Flughöhe, Geschwindigkeit und Flugdauer die Anzahl gesammelter Kilogramm Luft ermittelt werden kann.

Die Flughöhe kann vom Auftraggeber gewählt werden. Beispielsweise ist die Probenahme in der Stratosphäre erforderlich, wenn ob bei einem Ereignis die radioaktive Wolke bis in diese Höhe aufsteigt. Im Normalfall sind 6 Sammelflüge pro Jahr vorgesehen. Die Hin- und Rückflüge erfolgen jeweils je über resp. unter der Tropopause. Die Höhe der Tropopause wird täglich mit einem Ballonflug durch Meteo-Schweiz in Payerne ermittelt.

Die Fluggeschwindigkeit beträgt normalerweise etwa Mach 0.8. Bei einer durchschnittlichen Probenahmedauer von 20 bis 30 Minuten liegt die gesammelte Luftmenge zwischen 2'000 und 4'000 kg.

Als Filtermaterial wird ein Zellulosefilter (KG Typ FFL 2689) von Freudenberg Filtration Technologies mit den Dimensionen 555 x 526 mm verwendet. Der Filter wird mit einer hydraulischen Presse mit 25 Tonnen zu einer Tablette von 63 mm Durchmesser und ca. 24 mm Dicke gepresst.

Der Vorteil dieses Überwachungsverfahrens ist der erhebliche Zeitgewinn im Falle eines Ereignisses mit freigesetzter Radioaktivität, da der Nuklidvektor bereits bestimmt werden kann, bevor sich die Radioaktivität aus der Luft auf Boden und Pflanzen abgesetzt hat.

Figur 1 :
Höhenluftfilter-Aggregate montiert an den beiden Flügeln eines Tiger.

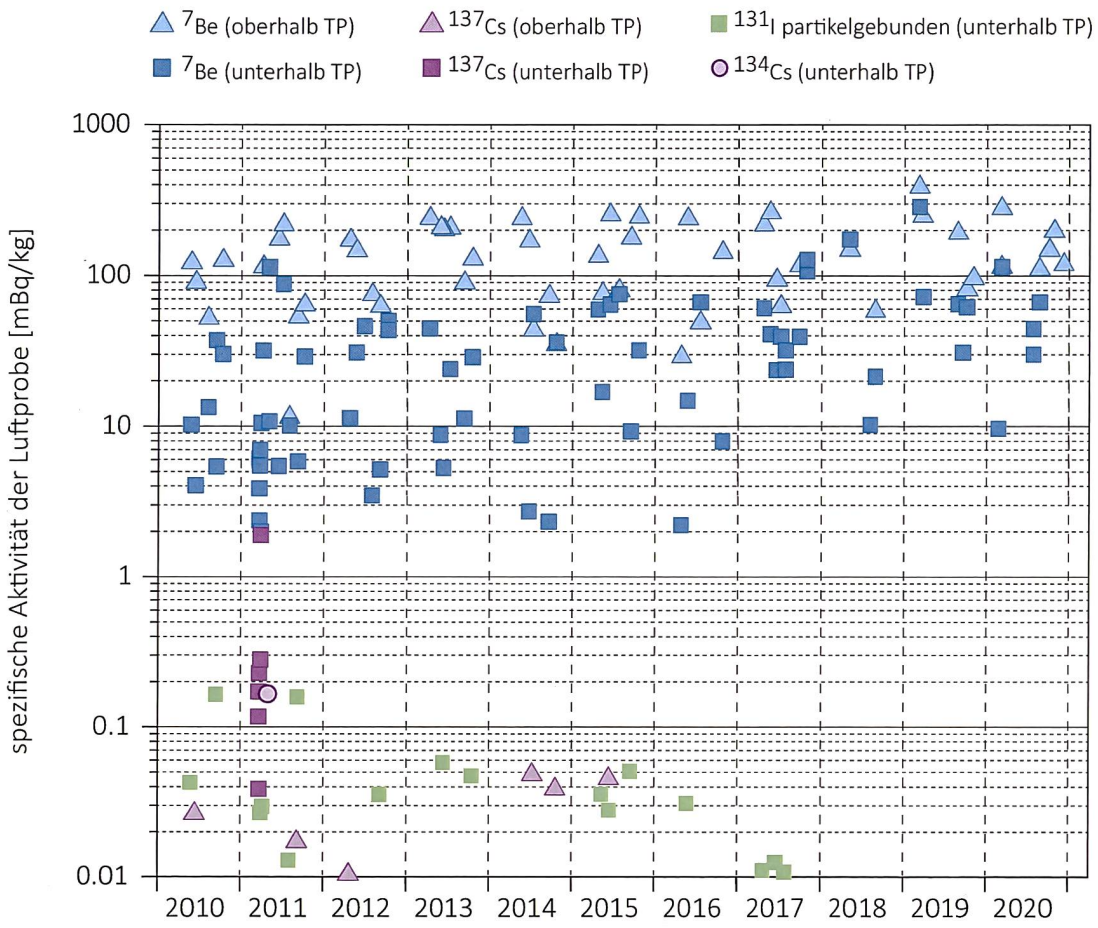
Messung der Proben

Die Messung erfolgt im Labor mittels hochauflösender Gammaspektrometrie, wobei nach 1-2 Tagen Messzeit für ^{137}Cs eine Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg Luft erreicht wird. Anschliessend können an den Filtern weitere Untersuchungen durchgeführt werden, z.B. mit radiochemischen oder massenspektrometrischen Verfahren.

Über die letzten elf Jahre liegt die durchschnittliche Konzentration des kosmogenen Radionuklids ^{7}Be oberhalb der Tropopause bei 129 mBq/kg. Bei den Messungen 1 km unterhalb der Tropopause liegt der Durchschnittswert bei 24 mBq/kg. Als Vergleich seien hier die Werte von P. Winiger [1] bis [4] erwähnt, die für ^{7}Be im Mittel bei 100 mBq/kg bzw. 20 mBq/kg liegen, jeweils 1'000 m über bzw. unter der Tropopause ermittelt.

Figur 2:
Höhenluftfilter-Aggregate: Detail-Aufnahme eines Sammelgerätes.

Die ^{137}Cs-Werte lagen im Jahr 2020 alle unter der Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg. In Figur 3 deutlich sichtbar sind die nach dem Reaktorunfall Fukushima (Japan) gemessenen ^{131}I-Konzentrationen, welche jedoch infolge der Halbwertszeit von 8 Tagen schon kurze Zeit später nicht mehr messbar waren. Auch das Radionuklid ^{134}Cs konnte in den Jahren nach 2011 nicht mehr nachgewiesen werden.



Figur 3:
^{7}Be-, ^{134}Cs-, ^{137}Cs- und partikelgebundene ^{131}I- Messwerte in mBq/kg Luft in den Jahren 2010-2020.

Quellen:

[1] P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Halbleitermessungen von Fallout. Helv. Phys. Acta, Vol. 41/5, pp. 645-649 (1968).

[2] P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Rechenmethoden zur Analyse von Halbleiterspektren. Helv. Phys. Acta Vol. 42/7-8, pp. 901-902, (1969).

[3] P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Rechenmethoden zur Analyse hochaufgelöster g-Spektren und ihre Anwendung auf Spaltfragmentgemische. Helv. Phys. Acta, Vol. 43/6, pp. 693-712 (1970).

[4] P. Winiger, O. Huber, J. Halter und B. Michaud: Konzentrationsmessungen von ^{7}Be, ^{137}Cs und jungen Spaltfragmenten an der Tropopause. Tellus Vol. 28/5, 434-441.

4.4 Radioaktivität in aquatischen Systemen

M.S. Brennwald
Eawag, Gruppe Umweltisotope, Abteilung W+T, Dübendorf
P. Rünzi
Eawag, Gruppe Sedimentologie, Abteilung SURF, Dübendorf
A. Pregler
Kantonales Labor Basel-Stadt, Gruppe Radioaktivität, Basel

Zusammenfassung

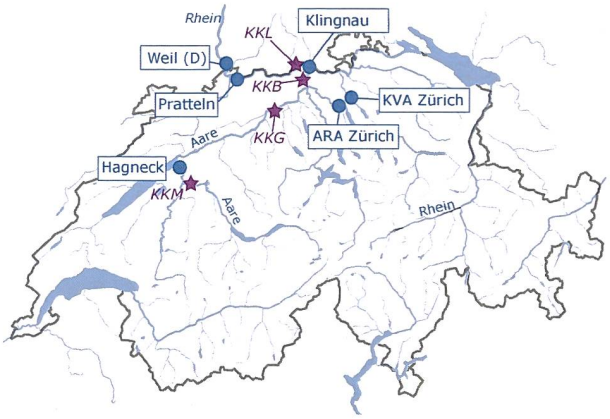
In den Wasserproben von Aare und Rhein wurden 2020 weder ^{54}Mn, ^{58}Co oder ^{60}Co aus Abgaben der Kernkraftwerke Mühleberg, Gösgen, Beznau oder Leibstadt nachgewiesen; diese Radionuklide wurden nur in den Schwebestoffproben von Aare und Rhein gefunden. Vereinzelt wurde ^{137}Cs beobachtet, welches zum grössten Teil vom Unfall im KKW Tschernobyl stammt. In Stichproben von Schwebstoffen im Rhein bei Weil (D) wurden im Weiteren die kurzlebigen Radionuklide ^{131}I, ^{177}Lu und ^{223}Ra gefunden, welche in der Nuklearmedizin eingesetzt werden. In einzelnen Wasserpflanzenproben wurden geringe Mengen von ^{131}I und ^{137}Cs knapp oberhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen beobachtet. In Fischen wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. Auch in Grundwasserproben wurden keine künstlichen Radionuklide gefunden.

Übersicht

Die meisten künstlichen Radionuklide gelangen direkt über Einleitung von Abwässern oder indirekt über den Niederschlag in den Wasserkreislauf. Entsprechend wird die Radioaktivität in aquatischen Systemen kontinuierlich analysiert mit dem Ziel, die Radionuklid-Immissionen der entsprechenden Betriebe zu überwachen.

Die kumulierten Radionuklidabgaben der Kernkraftwerke werden von der Eawag mittels Wasserproben an verschiedenen Standorten entlang von Aare und Rhein monatlich überwacht (Figur 1). Die Station Hagneck liegt stromabwärts des Kernkraftwerks Mühleberg an der Mündung der Aare in den Bielersee. An der Station Klingnau weiter stromabwärts werden zusätzlich die Abgaben der Kernkraftwerke Gösgen und Beznau überwacht. An der Station Pratteln werden schliesslich auch die Abgaben des Kernkraftwerks Leibstadt überwacht.

Komplementär zu den Wasserproben aus Rhein und Aare werden bei Hagneck, Klingnau und Pratteln auch die spezifischen Aktivitäten von Radionukliden



Figur 1 :
Standorte der Stationen zur Überwachung der Radionuklidabgaben aus den Kernkraftwerken Mühleberg (KKM), Gösgen (KKG), Beznau (KKB) und Leibstadt (KKL) und weiteren Betrieben.

überwacht, welche auf Schwebestoffen angelagert sind. Zusätzlich werden einmal jährlich auch Grundwasser-, Fisch- und Wasserpflanzenproben untersucht.

Die Aktivitäten der Radionuklide in allen Proben werden an der Eawag mittels Gammaspektrometrie bestimmt.

Zusätzlich zu diesen monatlichen Sammelproben entnimmt das Amt für Umweltschutz und Energie Basel Stadt (AUE BS) bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D) Stichproben von Rheinwasser und Schwebestoffen. Diese werden vom kantonalen Labor Basel-Stadt (KLBS) analysiert.

Ergebnisse

Wasserproben aus Aare und Rhein

Die Wasserproben aus Aare und Rhein bei Hagneck, Klingnau und Pratteln werden als grossvolumige, monatliche Sammelproben entnommen. Entsprechend dem jeweiligen Abfluss werden pro Tag automatisch zwischen 20 und 80 Proben genommen, was monatliche Sammelproben zwischen 50 L und 200 L ergibt. Zur Bestimmung der monatlichen Fracht der Radionuklide in Aare und Rhein werden die Radionuklide aus den Sammelproben durch eine Eisenhydroxidfällung extrahiert. Danach wird das Fällungsprodukt getrocknet und darin die Aktivitäten der betreffenden Radionuklide bestimmt. Die Radionuklid-Fracht ergibt sich aus dem Produkt der bestimmten Aktivitätskonzentration und der während der Sammelperiode abgeflossenen Wassermenge.

Figur 2 zeigt die monatlichen Frachten der im Wasser gelösten Radionuklide ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs bei den Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln.

Die Summe der Radionuklid-Abgaben aus den Kernkraftwerken in die Aare bzw. in den Rhein waren für ^{54}Mn vorwiegend durch das Kernkraftwerk Mühleberg dominiert. Die Abgaben von ^{58}Co und ^{60}Co sind im Juni ebenfalls vom Kernkraftwerk Mühleberg bestimmt, wobei ansonsten auch das Kernkraftwerk Beznau beiträgt. Im Fall von ^{137}Cs sind die Abgaben durch das Kernkraftwerk Beznau dominiert.

Bei allen drei Stationen (Hagneck, Klingnau und Pratteln) wurde in den Wasserproben aus der Aare und dem Rhein über das ganze Jahr kein ^{54}Mn, ^{58}Co oder ^{60}Co nachgewiesen. In früheren Jahren wurden vereinzelt Spuren dieser Nuklide nahe der Nachweisgrenze gefunden, als die Abgaben aus den KKW noch systematisch höher waren. Über die letzten zwei Jahrzehnte sind die Abgaben dieser Radionuklide aus den KKW jedoch um mehrere Grössenordnungen zurück gegangen (siehe unten).

Bei allen drei Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln wurde sporadisch ^{137}Cs in Konzentrationen nahe der Bestimmungsgrenze gefunden. Diese ^{137}Cs-Nachweise sind in der Regel grösser als die Abgaben der Betriebe, was wie in bisherigen Jahren auf die Remobilisierung von ^{137}Cs vom Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt wird.

Ausser den oben diskutierten Radionukliden wurden keine weiteren künstlichen Radionuklide nachgewiesen, wohl aber natürliche wie ^{7}Be, ^{40}K und ^{210}Pb.

Konzentrationsmaxima im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten

Figur 3 zeigt die jährlichen Maxima der Konzentrationen von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{131}I, ^{134}Cs und ^{137}Cs im Wasser. Die Konzentrationen wurden normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer (StSV). Die Konzentrationen liegen in allen Fällen um mindestens zwei Grössenordnungen unterhalb der Immissionsgrenzewerte.

Langfristige Entwicklung der Radionuklidabgaben und Frachten in Aare und Rhein

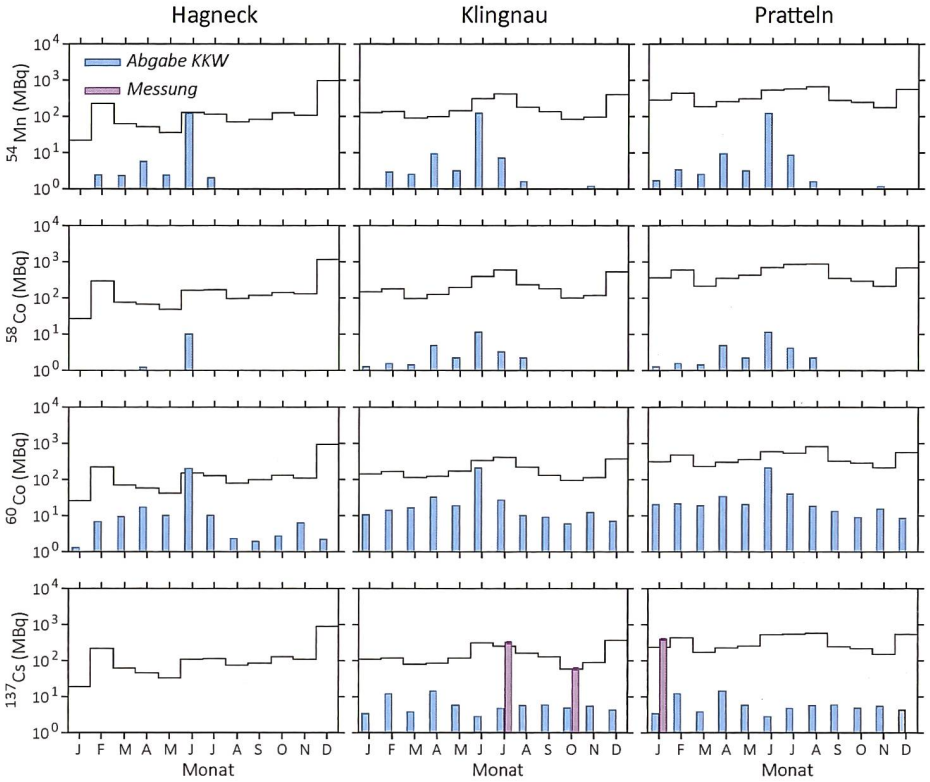
Figur 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abgaben von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs aller Kernkraftwerke während den Jahren 2000 - 2020. Als Folge der Revisionen der Kernkraftwerke sind die Abgaben in der Regel im Sommer/Herbst am grössten. Über die Jahre betrachtet haben die Abgaben von ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs bis ca. 2008 tendenziell abgenommen. Danach ist bis 2013 zunächst keine systematische Veränderung erkennbar. Von 2014 bis 2018 zeigt sich nochmals ein Trend zu tieferen Abgaben von ^{54}Mn, ^{58}Co und ^{60}Co. Im Jahr 2020 waren die Abgaben (vorallem ^{54}Mn) wieder etwas höher, aber dennoch so gering, dass in den Wasserproben keines dieser Radionuklide nachgewiesen wurde.

^{3}H-Überwachung bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D)

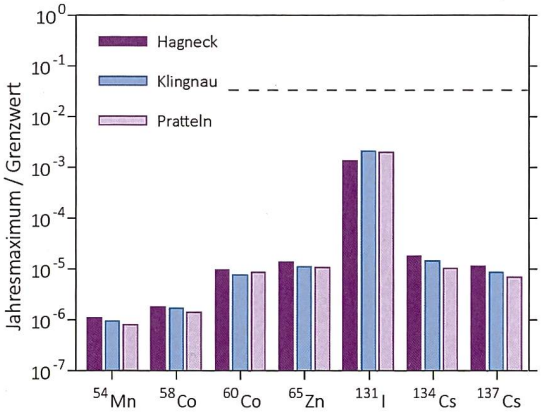
Bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D) werden durch das Amt für Umweltschutz und Energie Basel Stadt (AUE BS) täglich Wasserproben gesammelt. Das kantonale Labor Basel-Stadt (KLBS) mischt die Tagespoben zu Wochenmischproben und bestimmt deren ^{3}H-Aktivität (Bestimmungsgrenze 2 Bq/L). Die ^{3}H-Aktivität des Rheinwassers ist in Figur 5 dargestellt. Die ^{3}H-Konzentrationen betragen über das ganze Jahr <15 Bq/L. Bei 75% aller Proben liegen die ^{3}H-Konzentrationen unterhalb der Messgrenze von 2 Bq/L.

Schwebestoffe in Aare und Rhein

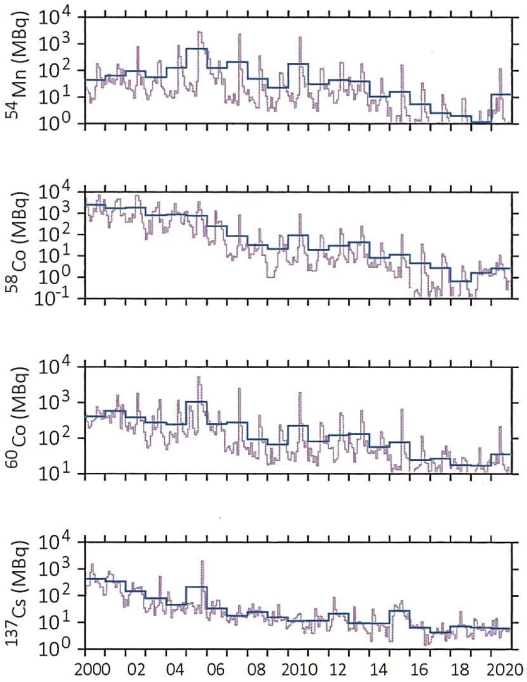
Die meisten der von den Kernkraftwerken abgegebenen Radionuklidspezies lagern sich an suspendierte Partikel im Wasser an. Der Partikeltransport trägt somit wesentlich zur Verfrachtung der Radionuklide bei. Insbesondere werden Radionuklide durch sedimentierende Partikel aus



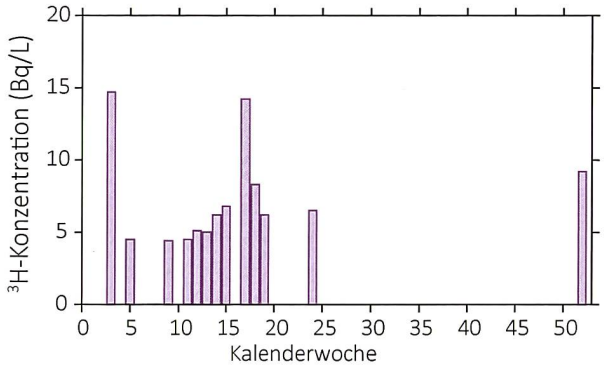
Figur 2 :
Vergleich der berechneten und gemessenen Frachten von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs an den drei Stationen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln. Die berechneten Frachten entsprechen den kumulierten Abgaben der flussaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte lagen mit Ausnahmen bei ^{137}Cs immer unter der Nachweisgrenze (schwarze Stufenlinie, engl. «limit of quantification» / LOQ). Die Fehlerbalken zeigen den Standardmessfehler der Fracht.



Figur 3 :
Maxima der Konzentrationen von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{131}I, ^{134}Cs und ^{137}Cs im Wasser bei Hagneck, Klingnau und Pratteln (Jahresmaximum der Messwerte bzw. Nachweisgrenzen), normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer gemäss StSV. Die gestrichelte Linie markiert die Untersuchungsschwelle (1/30 der Immissionsgrenzwerte).



Figur 4 :
Jahres- und Monatsmittel der Abgaben von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs aus den Kernkraftwerken während 2000 - 2020 (Summe der Abgaben aller Kernkraftwerke).

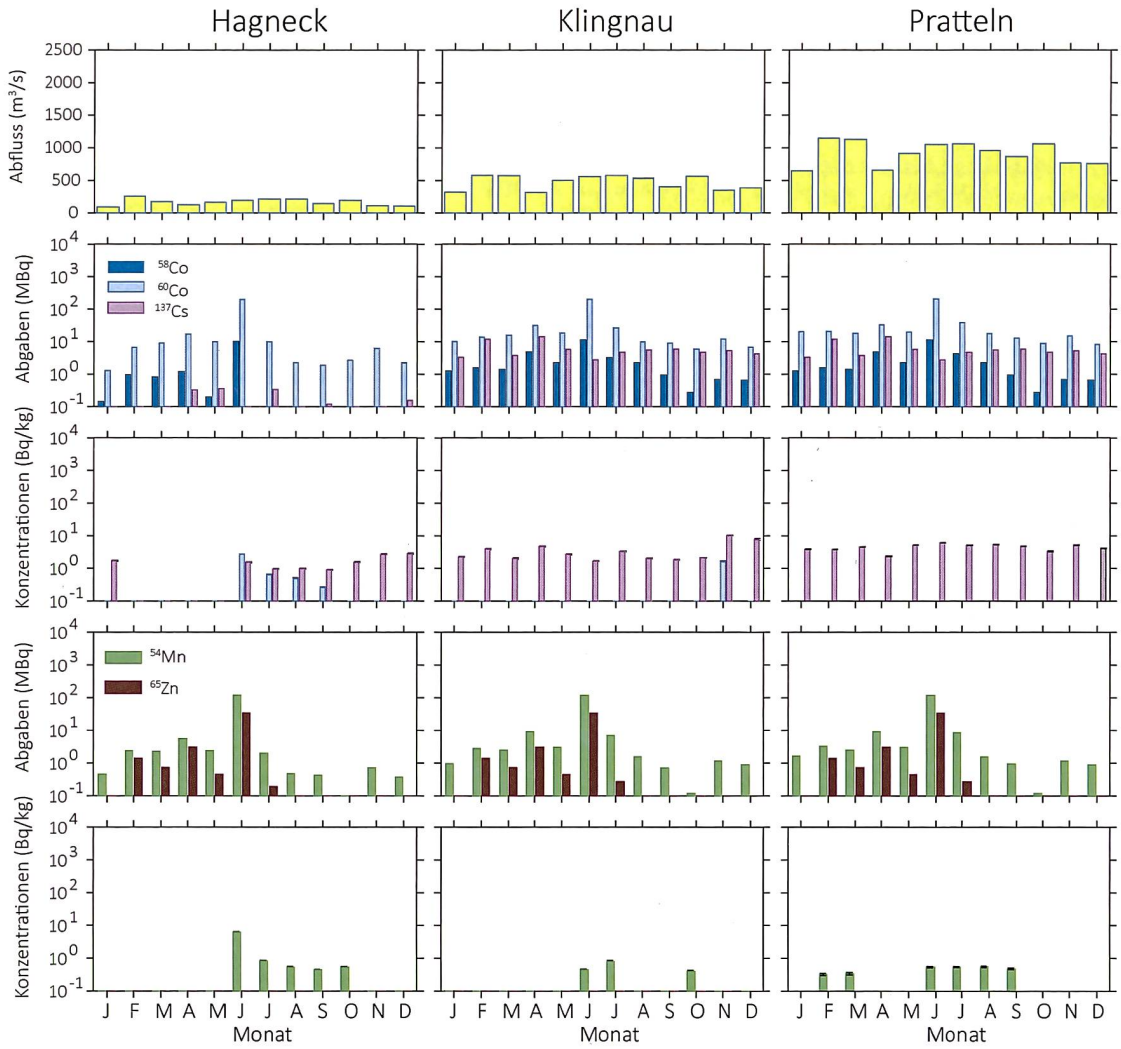


Figur 5 :
^{3}H-Aktivitätskonzentration im Rhein bei Weil am Rhein (D).

dem offenen Wasser entfernt. Umgekehrt können Radionuklide durch Resuspension des Sediments auch wieder zurück in die Wasserphase gelangen.

Mit Hilfe von Sedimentfallen gewinnt die Eawag monatliche Sammelproben der Schwebestoffe bei den Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln. Zudem sammelt das AUE BS bei Weil am Rhein monatlich Schwebstoff-Stichproben. Dabei wird über Zeiträume von einigen Tagen Rheinwasser aus der Querprofilmischung entnommen und davon die Schwebestoffe abzentrifugiert. Diese Schwebstoffproben werden gefriergetrocknet, gemahlen und danach gammaspektrometrisch analysiert.

Die Radionuklidaktivitäten der Stichproben des AUE BS werden in monatliche Radionuklidfrachten in Form

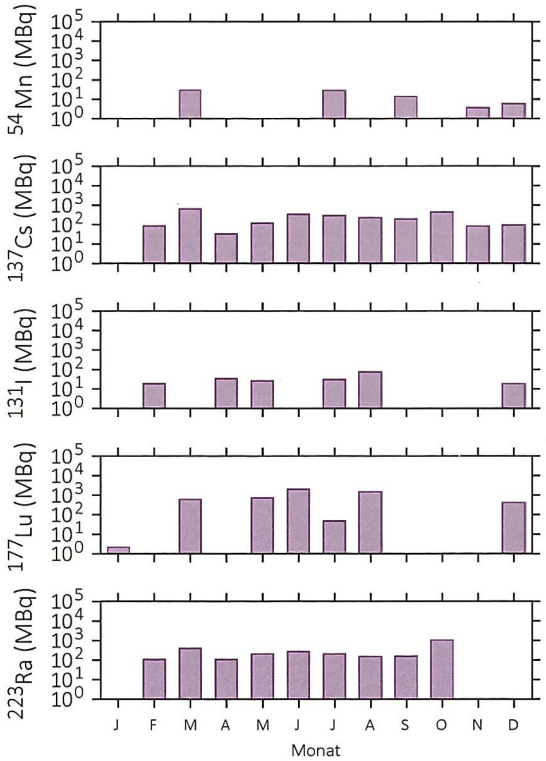


Figur 6 :
Spezifische Aktivitäten von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn und ^{137}Cs in den monatlichen Partikelproben aus den Sedimentfallen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln im Vergleich mit dem Abfluss und den kumulierten Abgaben der stromaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte wurden nur dann eingezeichnet, wenn die Nachweisgrenze der jeweiligen Messung erreicht wurde (typische Nachweisgrenze für alle Nuklide in der Figur: 0.2 - 10 Bq/kg). Die Fehlerbalken zeigen den Standardmessfehler der spezifischen Aktivitäten.

suspendierter Partikel bei Weil am Rhein hochgerechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Hochrechnung auf der Annahme beruht, dass die über 1 - 4 Tage gesammelten Stichproben repräsentativ für den ganzen Monat sind, was aufgrund der diskontinuierlichen Abgaben der Kernkraftwerke nicht immer zutrifft.

Die spezifischen ^{137}Cs-Aktivitäten der Partikelproben liegen bei allen drei Stationen bei maximal 10 Bq/kg, und zeigen keine generelle Korrelation mit den Abgaben aus den Kernkraftwerken (Figur 6). Die ^{137}Cs-Nachweise werden wie auch bei den Wasserproben auf die Remobilisierung von ^{137}Cs vom Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt. Sporadisch wurden ^{54}Mn und ^{60}Co gefunden; ^{58}Co, und ^{65}Zn wurden nicht nachgewiesen.

Figur 7 zeigt die aus den Stichproben bei Weil am Rhein (D) abgeschätzten Frachten von ^{54}Mn und ^{137}Cs auf Schwebestoffen. ^{54}Mn wurde sporadisch nachgewiesen. In fast allen Stichproben wurde ^{137}Cs gefunden, was wiederum primär auf die Remobilisierung von ^{137}Cs aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt wird. ^{58}Co wurde nicht und ^{60}Co nur in 2 Proben nachgewiesen (in Figur 7 nicht gezeigt).



Figur 7:
Monatliche Frachten von ^{54}Mn, ^{137}Cs, ^{131}I, ^{177}Lu und ^{223}Ra auf Schwebestoffen bei Weil am Rhein (D). Die Frachten wurden aus den Messergebnissen der Stichproben abgeschätzt, welche über kurze Zeiträume (1 - 4 Tage pro Monat) gesammelt wurden.

Zusätzlich zu den relativ langlebigen Radionukliden konnten in den Stichproben von Weil am Rhein (D) auch die kurzlebigen Radionuklide ^{131}I (Halbwertszeit: 8 Tage), ^{177}Lu (Halbwertszeit: 6.7 Tage) und ^{223}Ra (Halbwertszeit: 11.4 Tage) nachgewiesen werden (ebenfalls Figur 7), welche in der Nuklearmedizin eingesetzt werden.

Fische und Wasserpflanzen in Aare und Rhein

Die Fisch- und Wasserpflanzenproben (ohne Wurzeln) werden unmittelbar stromabwärts der Kernkraftwerke entnommen. Die Fische werden filetiert und homogenisiert. Die Wasserpflanzenproben werden gereinigt, um eine Partikelkontamination mit Radionukliden zu vermeiden und homogenisiert. Die Fisch- und Wasserpflanzenproben werden vor der Analyse gefriergetrocknet. Die spezifische Aktivität dieser Proben wird in Bezug auf das Trockengewicht angegeben.

Fische: Im Jahr 2020 wurden Fische aus der Aare bei Aarberg (gefangen am 18.12.2020), bei Wöschnau (26.6.2020), dem Klingnauer Stausee (28.6.2020) und dem Rhein bei Augst (26.6.2020) analysiert. Bei allen Fischproben wurde natürliches ^{40}K gefunden (618 - 816 Bq/kg). Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

Wasserpflanzen: Am 2.11.2020 wurden Wasserpflanzen oberhalb der Station in Hagneck, bei Wöschnau, im Klingnauer Stausee, und im Rhein bei Muttenz entnommen. In zwei Proben wurde ^{137}Cs gefunden (Wöschnau: 1.8 Bq/kg, Muttenz: 4.2 Bq/kg). In der Probe vom Klingnauer Stausee wurde ^{131}I festgestellt (18.3 Bq/kg). Neben diesen künstlichen Radionukliden wurde natürliches ^{40}K beobachtet (477 - 870 Bq/kg).

Grundwasser bei Aarberg, Döttingen und Pratteln

Am 8.7.2020 wurden die Grundwasserströme bei Aarberg (Pumpwerk Römerstrasse II, in der Nähe der Überwachungsstation Hagneck), bei Schönenwerd (Pumpwerk Aarefeld in Gretzenbach), bei Böttstein (Pumpwerk Schulhaus, unterhalb des KKW Beznau) und im Hardwald bei Muttenz (Grundwasserbrunnen 16 der Hardwasser AG) beprobt. Dabei werden die Radionuklide aus 150 L Grundwasser analog zu den Flusswasserproben vor der Analyse angereichert und analysiert. Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen (Nachweisgrenzen 0.1 - 1 mBq/L).

4.5
URAnet aqua:
Automatisches Messnetz Flusswassers

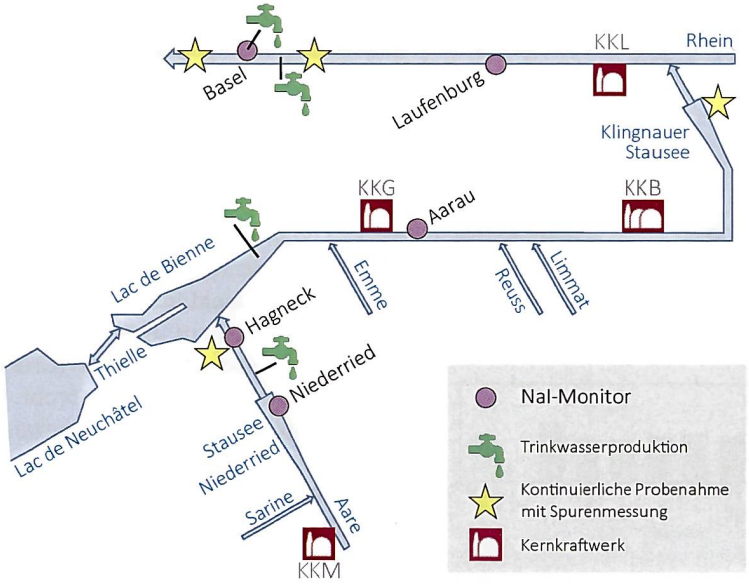
P. Steinmann, M. Müller, D. Lienhard, S. Estier
Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die fünf automatische Natrium-Iodid-Sonden des Messnetzes URAnet aqua messen fortlaufend die Konzentration von Gammastrahlern in Aare und Rhein und übermitteln alle 10 Minuten einen Messwert. Künstliche Radionuklide konnten im Berichtsjahr im Flusswasser nicht nachgewiesen werden. Die Verfügbarkeit der Messsonden war mit praktisch 100% bei allen Sonden sehr hoch.

Das Messnetz und seine Aufgaben

Das Messnetz URAnet aqua überwacht kontinuierlich und automatisch das Flusswassers von Aare und Rhein stromabwärts der Kernkraftwerke (Figur 1). Die beiden Sonden bei Niederried und Hagneck messen zwischen dem KKW Mühleberg und dem Bielersee, welcher ein wichtiges Trinkwasserreservoir für die Stadt Biel ist. Um eine möglichst lückenlose Messung zu gewährleisten bestehen in diesem Abschnitt zwei Messstandorte. Flussabwärts des Kernkraftwerks Gösgen sowie der beiden relativ nahe beieinander liegenden Standorte Beznau und Leibstadt sind



Figur 1 :
Standorte der NaI-Monitore, EAWAG-Stationen für Spurenmessungen (Hagneck, Klingnau und Pratteln), Rheinüberwachungsstation RüS Weil a.Rh., Entnahmestellen von Trinkwasser aus Bielersee und Rhein (Pratteln und Basel) sowie aus Uferfiltrat (Aare vor Bielersee).

zwei weitere Sonden installiert (Aarau und Laufenburg). Eine fünfte Sonde überwacht das von IWB für die Trinkwasserversorgung der Stadt Basel aus dem Rhein entnommene Wasser. Auch hier befinden sich also zwei Messsonden zwischen dem letzten Kernkraftwerk und der Trinkwasserentnahme. Die Aufgabe der neuen automatischen Messsonden ist es starke Erhöhungen von Radioaktivität im Flusswasser rasch zu erkennen. Die tiefe Nachweisgrenze erlaubt es eine untere Meldeschwelle in Grössenordnung der Immissionsgrenzwerte für Gewässer aus der revidierten Strahlenschutzverordnung zu setzen. Für ^{137}Cs, ^{60}Co und ^{131}I ist die untere Meldeschwelle auf 10 Bq/l gesetzt. Eine zweite Schwelle mit Alarmauslösung basiert auf dem Dosisgrenzwert für Personen aus der Bevölkerung von 1 mSv/Jahr. Die Überlegung dabei ist, dass bei der Nutzung des Flusswassers als Trinkwasser der Dosisgrenzwert eingehalten ist, wenn getroffene Massnahmen spätestens nach einem Monat greifen. Für ^{137}Cs und ^{60}Co liegt die obere Radioaktivitätsschwelle bei 500 Bq/l; für ^{131}I etwas tiefer bei 250 Bq/l. Bei Überschreitung der unteren Meldeschwelle wird die zuständige Stelle am BAG sowie die NAZ benachrichtigt. Das BAG verifiziert die Messwerte, eruiert die Ursache einer allfälligen Kontamination. Die Nationale Alarmzentrale (NAZ) informiert die betroffenen Kantone. Bei Überschreitung der zweiten Schwelle ordnet die NAZ nach Rücksprache mit dem BAG die nötigen Massnahmen an. Die automatischen Messsonden sind komplementär zu den monatlichen Messungen der EAWAG (siehe Figur 1), welche mit einer mehr als tausendmal tieferen Nachweisgrenze auch geringste Abgaben der Kernkraftwerke erfassen können

Messtechnik

Die eingesetzten Sonden enthalten 3'' NaI-Detektoren, welche im Wasser eine «Sichtweite» von rund einem Meter haben. Die NaI-Kristalle registrieren die Gammastrahlung und die Sonde zeichnet ein Energiespektrum auf. Alle 10 Minuten werden die Messwerte an die Messzentrale weitergeleitet. Am Ende einer vollen Stunde werden die sechs 10-Minuten-Spektren addiert und neu ausgewertet, was eine tiefere Nachweisgrenze ermöglicht (1 Bq/l für ^{137}Cs, siehe auch Lit. [1]). Bei tiefen Konzentrationen von ^{131}I (< 10 Bq/l) ist eine genauere Analyse nötig, da die stärkste Gammalinie von ^{131}I (Energie 364 keV) nahe bei der stärksten Linie des natürlichen ^{214}Pb (352 keV) liegt. Da die Energiekalibrierung bei NaI Kristallen abhängig von der Temperatur schwanken kann, ist es möglich, dass die Linie der Radontochter ^{214}Pb bei 352 keV fälschlicherweise dem künstliche ^{131}I zugerechnet wird (vergleiche Spektrum in Figur 2).

Verfügbarkeit der Messsonden und Messergebnisse 2020

Die Verfügbarkeit der Sonden, d.h. das Vorhandensein von 10-Minuten-Spektren, ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Generell sind diese Werte sehr hoch. Die «Uptime» entspricht der Zeit, in der die Alarmfunktion des Messnetzes gewährleistet war. Die Werte in Tabelle 1 bedeuten, dass die Sonden nur wenige Stunden im Jahr nicht einsatzbereit waren und zwar während den jährlichen Messungen zur Konstanzprüfung oder bei der Reinigung. Die Sonde bei Laufenburg hatte zwischen dem 20. und dem 30. April durch ein defektes Modem einen längeren Ausfall der Datenübertragung zu verzeichnen.

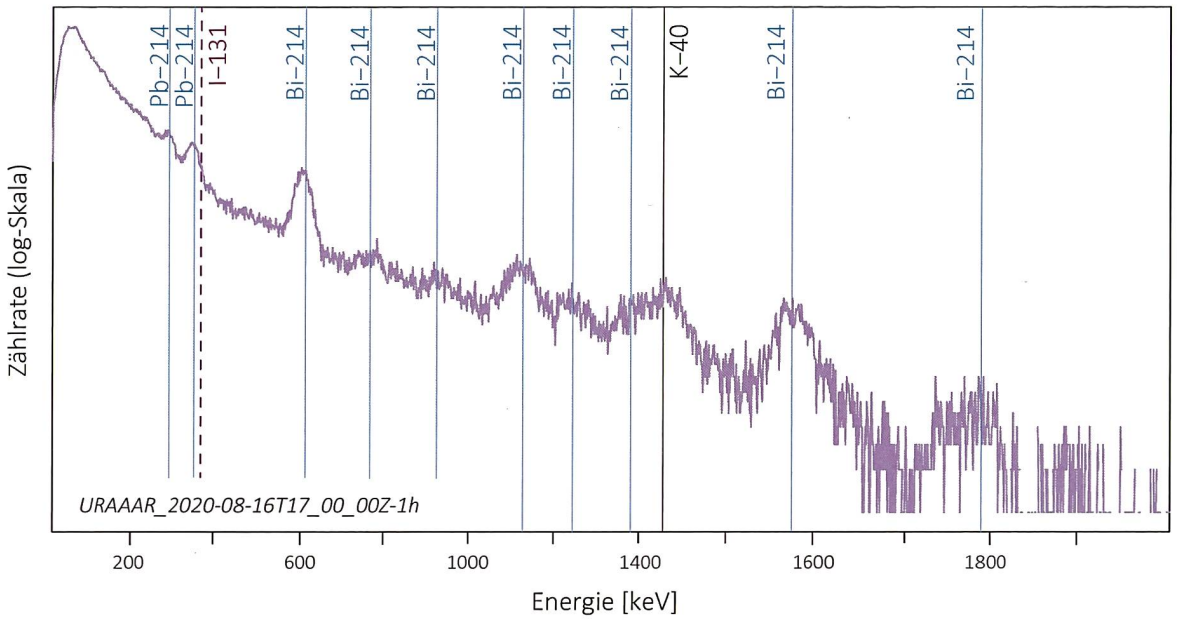
Tabelle 1:
Verfügbarkeit (Uptime) der NaI-Wassersonden 2020

Station	Uptime	Inbetriebnahme
Niederried	99.9%	Juni 2014
Hagneck	99.9%	Juni 2015
Aarau	99.9%	Juni 2014
Laufenburg	97.3%	Januar 2015
Basel	99.9%	Juli 2013

Bei den auf Radenviro.ch publizierten Tagesmittelwerten ist der Anteil fehlender Werte etwas höher, als die in der Tabelle genannten Uptime-Angaben. Der Grund dafür ist, dass beim Fehlen eines einzigen 10-Minuten Wertes kein Tagesmittelwert gerechnet wird. Die NaI-Detektoren des URAnet aqua Messnetzes konnten 2020 keine künstlichen Radioisotope im Flusswasser nachweisen. Bei den Messwerten fallen vor allem Spitzen in der Dosisleistung auf, wenn nach starken Niederschlägen viele Radonfolgeprodukte ins Flusswasser gelangen. Einen Alarm (Alarmierung der Sektion URA durch die NAZ) hat die Sonde von Hagneck am 11.7.2020 gegen Mitternacht ausgelöst. Als Ursache konnte rasch die im Abschnitt «Messtechnik» erwähnte falsche Zuordnung des Peakes bei 352 keV festgemacht werden.

Literatur

[1] Steinmann P. und Estier S., 2015. Radioaktivität in Flusswasser unterhalb KKW: Das neue Messnetz zur kontinuierlichen Überwachung von Aare und Rhein. Aqua & Gas, 10, 66-72.



Figur 2 :
Gammaspektrum der NaI-Sonde bei Aarau bei starkem Einschwemmen von Radonzerfallsprodukten nach einem Gewitterregen (16.8.2020). Der Peak bei 352 keV ist aufgrund des «Fingerabdruckes» der Linien der Radonzerfallsprodukte ^{214}Pb und ^{214}Bi eindeutig dem ^{214}Pb zuordnenbar und nicht mit ^{131}I zu verwechseln.

4.6
Tritium-Monitoring in der Aare

Th. Stocker, R. Purtschert, T. Wagner
Abt. Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut Universität Bern, Sidlerstrasse 5, BERN

Zusammenfassung

Im Jahr 2020 setzte die Abteilung für Klima- und Umweltphysik (KUP) der Universität Bern das Monitoring von Tritium (^3H) in Fliessgewässern und im Niederschlag an ausgewählten Standorten im Kanton Bern fort. Das Monitoring wurde 2017 im Auftrag der BKW Energie AG (BKW) und des Kantons Bern sowie mit Unterstützung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) begonnen und in dieser Partnerschaft bis zum 31.12.2019 durchgeführt. Seit dem 1.1.2020 wird das Tritium-Monitoring vom BAG und der KUP in reduzierter Form durchgeführt. Im Jahr 2020 wurden die höchsten Tritiumwerte im Niederschlag aus dem Raum Niederwangen gemessen.

Hintergrund

Tritium (^3H) ist eines der Radionuklide, die in der Schweiz durch das BAG überwacht werden. Im Hinblick auf die Stilllegung des Kernkraftwerks Mühleberg (KKM), welche am 20.12.2019 erfolgte, besteht u.a. aufgrund der Richtlinien des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) zur Stilllegung von Kernanlagen (ENSI, 2014, Art. 4.5 und 5.4.4) der Bedarf, Tritium im Wasser der Aare in hoher zeitlicher Auflösung zu messen. Um den Zustand vor der Stilllegung des KKM bezüglich Tritium in den Fliessgewässern zu charakterisieren, führte die KUP von Anfang 2017 bis Ende 2019 Tritium-Messungen durch, die eine Detektion von allfälligen späteren Veränderungen ermöglichen. Tritium wurde dabei jährlich in mehr als 900 Wasserproben gemessen.

Tabelle 1:
Tritium-Messungen Januar bis Dezember 2020 nach Art oder Entnahmeort der Probe

Art oder Entnahmeort der Probe	Anzahl
Aare Mühleberg Rewag	365
Niederschlag Niederwangen	28
Stadtbach Niederwangen	8
Gäbelbach Eymatt	3
Niederschlag Physikalisches Institut	12
Rhein im Unterlauf des KKL	39
Standards/Nulleffekt/Vergleichsmessungen	104
	Total: 559

Probenahmen

Im Jahr 2020 wurden im Rahmen dieses Monitorings die folgenden Standorte beprobt:

- Aare flussabwärts vom KKM (Standort Mühleberg-Rewag, ganzjährig)
- Niederschlag Niederwangen (ganzjährig), Standort 240 m östlich der Firma mb-microtec
- Stadtbach Niederwangen (3 Einzelproben während des Corona-Shutdowns im Frühjahr 2020, alle zwei Wochen ab Herbst 2020)
- Gäbelbach Eymatt (3 Einzelproben während des Corona-Shutdowns im Frühjahr 2020)
- Niederschlag vom Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern (ganzjährig)

Während der Jahresrevision des Kernkraftwerks Leibstadt (KKL) wurden ausserdem Wasserproben aus dem Rhein entnommen und auf ihren Tritiumgehalt hin untersucht.

Die in den Vorjahren beprobten Aare-Standorte Eymatt, Wynau und Thun werden seit 2020 nicht mehr beprobt.

Tabelle 1 (links) zeigt die im Jahr 2020 gemessenen Proben im Einzelnen.

Die täglichen Probenahmen aus der Aare am Standort Mühleberg sowie aus dem Rhein flussabwärts vom KKL erfolgten mit Hilfe von automatischen

Probenehmern vom Typ ISCO 6712, welche in regelmässigen Abständen einige Milliliter Flusswasser in Probeflaschen abfüllen, sodass jede Probeflasche eine Mischprobe eines 24-Stunden-Intervalls enthält.

Im Raum Niederwangen wurden einzelne Stichproben aus dem Stadtbach entnommen und gemessen. Seit Herbst 2020 erfolgen diese Probenahmen wieder regelmässig alle zwei Wochen. Der Niederschlag (Regen bzw. Schnee), der unweit der Firma MB Microtec in Niederwangen in einem Regensammler erfasst wird, wird weiterhin alle zwei Wochen gemessen, sofern eine ausreichende Menge Niederschlag vorliegt.

Nachweis und Messung des Tritiumgehalts

Der Tritiumgehalt der Wasserproben wurde indirekt über den radioaktiven Zerfall des in den Proben enthaltenen Tritiums bestimmt. Tritiumkerne sind instabil und zerfallen mit einer Halbwertszeit von 4'500 ± 8 Tagen (12.32 Jahren) unter Emission eines Elektrons und eines Antineutrinos in das Heliumisotop ^{3}He (Beta-Minus-Zerfall):

$$^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He^{+} + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Zum Nachweis und zur Ladungsmessung der in den Wasserproben emittierten Elektronen kam wie in den Vorjahren ein Liquid-Szintillationsmessgerät vom Typ Aloka LSC-LBIII zum Einsatz, welches im Tieflabor des Physikalischen Instituts der Universität Bern installiert ist. Die Nachweisgrenze liegt bei 4 Tritium Units (TU, entsprechend 0.5 Bq/L), womit auch die natürliche Hintergrundaktivität von ^{3}H im Niederschlag bestimmt werden kann.

Messergebnisse Januar bis Dezember 2020

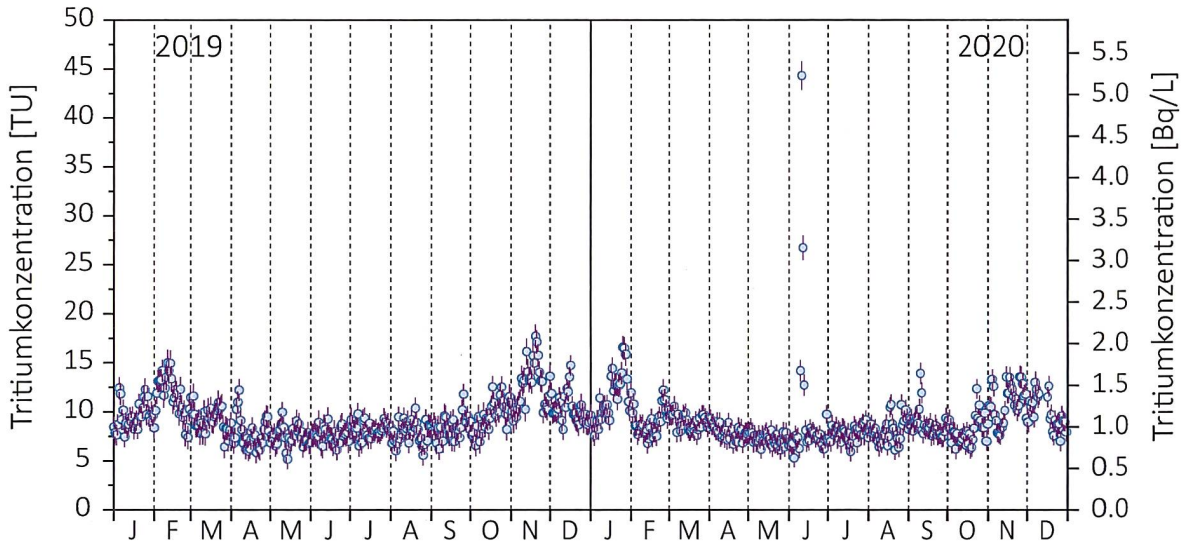
Standort Mühleberg (Aare)

Die Tritium-Messwerte des Wassers vom Mühleberg bewegten sich grösstenteils relativ stabil in einem Band zwischen 5 und 15 TU (entsprechend 0.6 - 2 Bq/L). Deutlich sichtbar sind jedoch hohe Messwerte in der Zeit vom 10. bis 12. Juni 2020. Laut Auskunft von der BKW wurde in diesem Zeitraum der Torus des KKM entleert, da die darin enthaltene Wasservorlage nach der endgültigen Abschaltung nicht mehr benötigt wird. Die abgegebene Wassermenge im Zuge dieser Entleerung betrug 1970 m^3 mit einer mittleren ^{3}H-Konzentration von 0.13 GBq/m^3. Bei einer Aareschüttung von 200 m^3/s und einer gleichmässigen Abgabe der Wassermenge über drei Tage hinweg würde dies einer mittleren Tritiumkonzentration von ca. 40 TU entsprechen, was genau im Bereich der gemessenen Werte liegt.

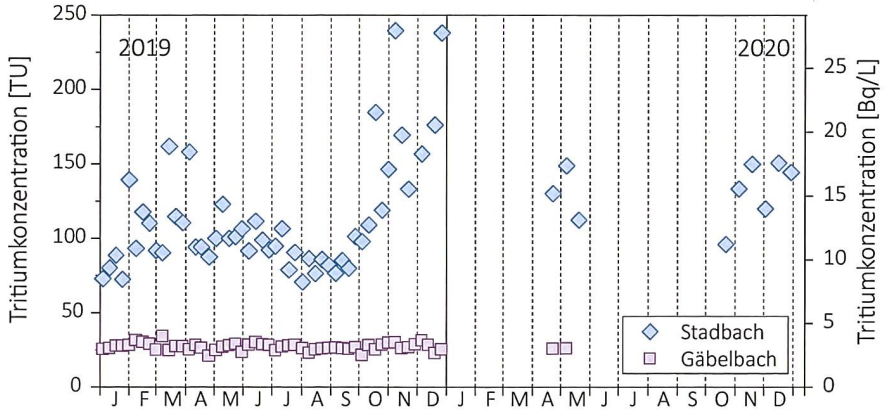
Standorte Niederwangen (Stadtbach, Gäbelbach, Niederschlag)

Im Raum Niederwangen wurden 28 Messungen am lokalen Niederschlag durchgeführt; siehe Figuren 3 und 4. Der absolute Höchstwert von über 4'000 TU wurde an einer Schneeprobe gemessen, die am 03.12.2020 unweit der Firma MB Microtec gesammelt wurde. Ansonsten betrugen die Messwerte bei Schnee- oder Regenwasserproben maximal ca. 2'000 TU.

Im Frühjahr 2020 stellte sich die Frage, ob die Tritiumwerte im Raum Niederwangen aufgrund des Shutdowns und der damit verbundenen eingeschränkten industriellen Aktivität der Firma MB Microtec zurückgehen würden. Von



Figur 1 :
Tritium-Messwerte Mühleberg (2019 - 2020). Die erhöhten Werte im Juni 2020 sind auf die Entleerung des Torus beim Rückbau zurückzuführen..

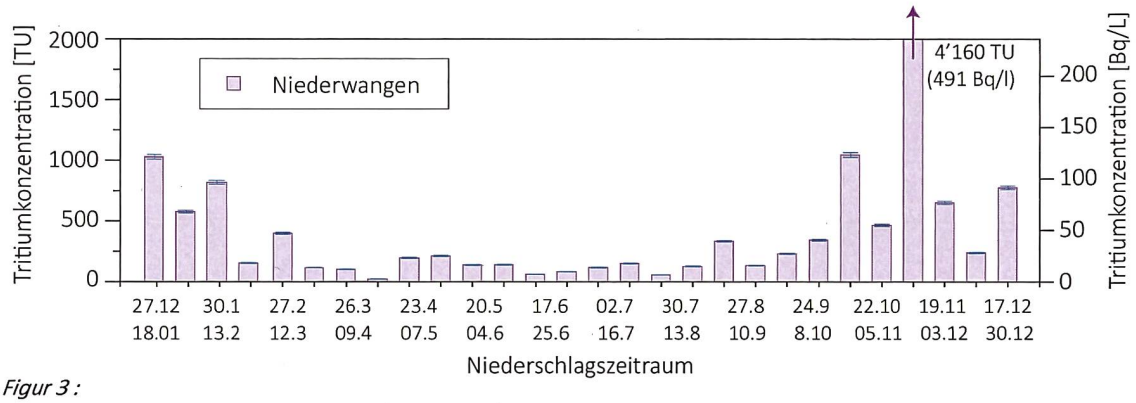


Figur 2 :
Tritium-Messwerte am Stadtbach Niederwangen sowie am Gäbelbach Eymatt (Einzelproben).

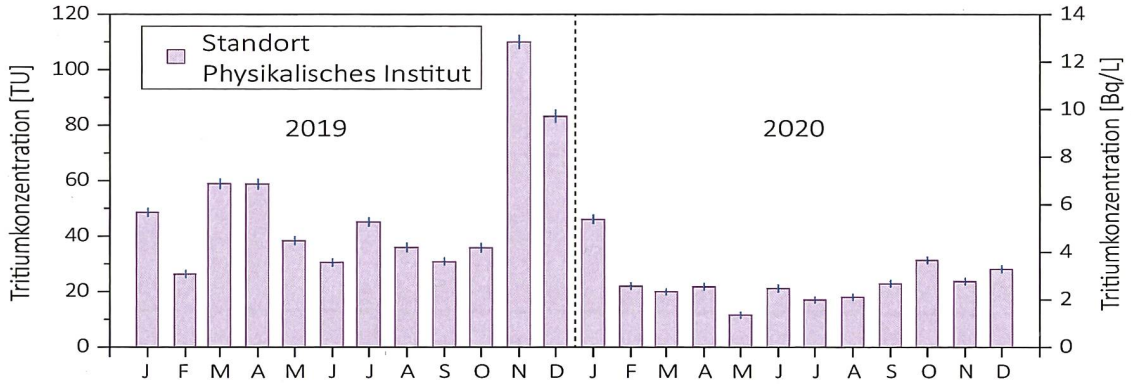
Mitte April bis Mitte Mai 2020 wurden daher einige Stichproben aus dem Stadtbach und dem Gäbelbach entnommen. Entgegen den Erwartungen verharrten die Messwerte aber relativ stabil bei ca. 100 bis 150 TU (Stadtbach) bzw. bei 25 bis 30 TU (Gäbelbach). Die Erklärung für die stabilen Werte fand sich schliesslich auf der Website der Firma MB Microtec (besucht am 28.05.2020):

«Die Firma mb-microtec ag setzt alles daran, dass der eigene Betrieb nicht beeinträchtigt wird. Bis auf weiteres ist nicht absehbar, dass die interne Produktion in der Kapazität reduziert oder eingestellt werden müsste.»

Die Messwerte blieben also stabil, weil auch die industrielle Aktivität der Firma MB Microtec unvermindert fortgesetzt wurde.



Figur 3 :
Tritium-Messwerte im Regenwasser Niederwangen (Probenahmen alle 2 Wochen).



Figur 4 :
Tritium-Messwerte des Regenwassers vom Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern (Monatsproben).

Seit Herbst 2020 wird der Stadtbach wieder regelmässig alle zwei Wochen beprobt. Die Messwerte lagen im langjährigen Mittel.

Standort Physikalisches Institut, Stadt Bern (Regenwasser)

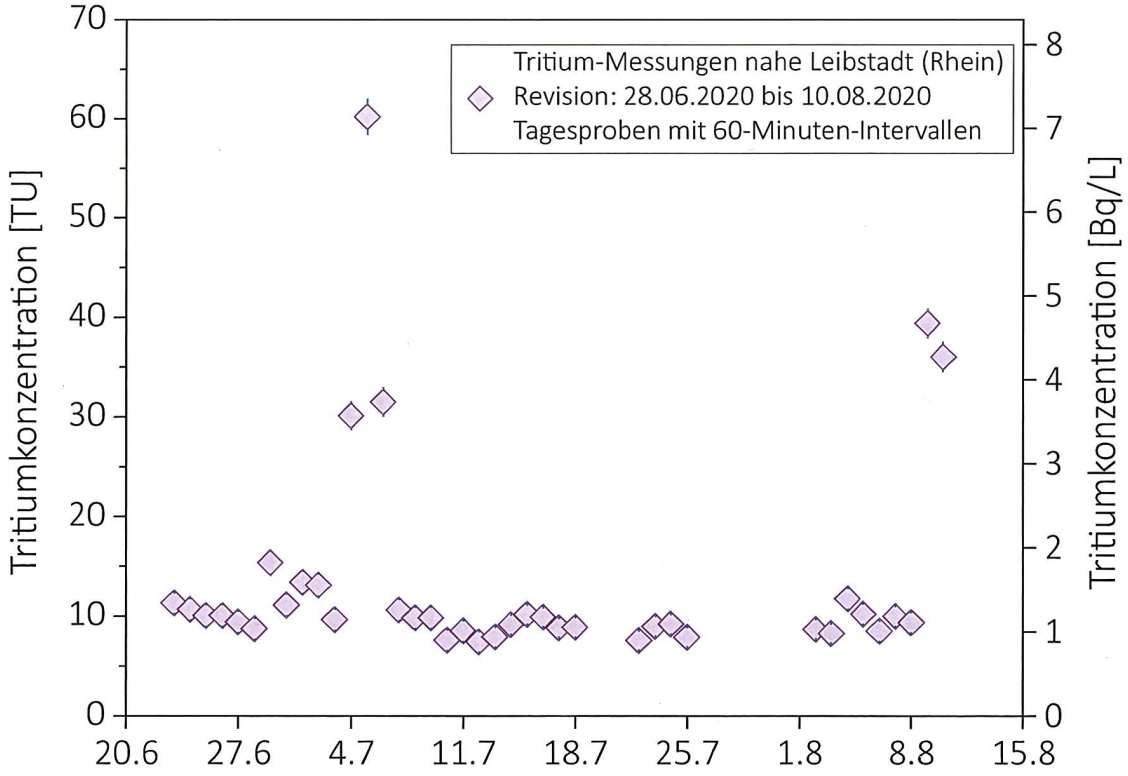
Die Tritiumkonzentration im Niederschlag im Raum Bern ist generell höher als in der Aare und auch höher als in Niederschlägen anderenorts in der Schweiz. Dies ist auf lokale gasförmige Emissionen zurückzuführen. Die im Jahr 2020 gemessenen Proben liegen im Bereich 11 - 46 TU.

Standort Leibstadt (Rhein)

Von Mitte Juni bis Mitte August 2020 wurde stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) vorübergehend ein automatischer Probenehmer betrieben, um den Tritiumgehalt des Rheins vor, während und nach dem Revisionsstillstand zu ermitteln, welcher für den Zeitraum 24.06.2020 bis 10.08.2020 terminiert war. Es wurden Tagesproben mit einem Sampling-Intervall von je 60 Minuten entnommen.

Kurz nach Revisionsbeginn zeichnete sich ein deutlicher Anstieg von ca. 10 TU auf ca. 60 TU ab. Ab dem 07. Juli 2020 hatte sich der Tritiumgehalt des Rheins wieder bei Werten nahe dem Anfangswert stabilisiert (Figur 5). Die fehlenden Messwerte in der zweiten Julihälfte sind auf den hochsommerlich bedingten extrem niedrigen Wasserstand des Rheins zurückzuführen: an einigen Tagen befand sich das Ansaugrohr des Probenehmers oberhalb der Wasseroberfläche, sodass keine Wasserprobe entnommen werden konnte.

Deutlich ist am 10. und 11. August 2020 ein zweiter Peak erkennbar. Dieser ist auf die Revision des Kernkraftwerks Beznau 2 zurückzuführen, welche am 08.08.2020 begonnen hatte.



Figur 5 :
Tritium-Messwerte im Rhein stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt vor, während und nach dem Revisionsstillstand (30.6.-11.8.). Die erhöhten Werte im August fallen in die Zeit der Revision von KKB-Block 2 (ab 5.8.).

4.7
Radioactivité du sol et de l'herbe

P-A. Pittet, F. Barraud, L. Pfefferlé, C. Pilloud, P. Froidevaux et M. Straub
Institut de radiophysique, CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

S. Estier, P. Steinmann, A. Gurtner
Section de surveillance de la radioactivité, URA / OFSP, Berne

A. Pregler
Laboratoire Cantonal de Bâle, Kannenfeldstr. 2, Basel

R. Gosteli, J. Corcho, S. Röllin, F. Hauenstein, M. Astner, H. Sahli
Labor Spiez, Office fédéral de la protection de la population, Spiez

Résumé

Nous avons prélevé des échantillons de sol (0-5 cm) et d'herbe sur différents sites en Suisse, notamment aux abords des centrales nucléaires, et mesuré leurs niveaux d'activité. Dans certains cas, des mesures de spectrométrie gamma in-situ ont également été réalisées. Les résultats montrent que l'activité artificielle dans le sol et l'herbe est restée faible et est principalement due aux retombées des essais d'armes atomiques réalisés en atmosphère dans les années soixante ainsi qu'aux retombées de l'accident de Tchernobyl. L'activité en ^{90}Sr est proche de 0.5 Bq/kg sur le plateau suisse, mais elle est plus élevée dans les régions au relief plus marqué et lorsque l'altitude augmente. Pour les échantillons de sol, les activités sont inférieures à 1 Bq/kg pour le plutonium et l'américium. Le niveau d'activité en ^{137}Cs est plus variable et dépend de la contribution de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl et peut atteindre 193 Bq/kg au Tessin et 20 Bq/kg à l'extrême nord-est de la Suisse, des régions qui ont été plus impactées par les retombées de l'accident, tandis que sur le plateau les valeurs mesurées sont autour de 5 à 10 Bq/kg. Au cours des années, on observe une diminution constante de ces activités.

Les variations observées dans les sols se reflètent au niveau des herbes, avec des activités en ^{90}Sr supérieures dans les herbes de montagne (jusqu'à 12.7 Bq/kg), ainsi qu'au Tessin (valeurs supérieures ^{90}Sr: env. 6 Bq/kg; ^{137}Cs: env. 4 Bq/kg). On observe également que la période de coupe (coupe de printemps, coupe d'automne) est responsable des différences observées dans les activités en ^{90}Sr pour un même site de prélèvement.

Introduction

Le ^{90}Sr et le ^{137}Cs ont été largement dispersés dans l'environnement suite aux essais nucléaires des années cinquante et soixante ainsi que lors de l'accident de Tchernobyl en 1986. Ces radioéléments sont les deux principaux produits de fission à durée de vie moyenne (environ 30 ans) et ont un comportement chimique proche de deux éléments impliqués dans les cycles vivants, le calcium (pour le strontium) et le potassium (pour le césium). Par exemple, le ^{90}Sr est facilement transféré du sol aux plantes, puis tout au long de la chaine alimentaire, et pourra finalement se trouver dans les tissus osseux et les dents (voir chapitre 6.2). Le ^{137}Cs va aussi passer du sol aux végétaux et rejoindre la chaine alimentaire. Au contraire du ^{90}Sr, il et se retrouvera principalement dans les tissus musculaires des vertébrés, mais sera éliminé des organismes beaucoup plus rapidement que le strontium.

Le transfert d'un radioélément entre deux compartiments de l'environnement, par exemple du sol à l'herbe, peut être caractérisé par le facteur de transfert. Ce paramètre est cependant dépendant de plusieurs facteurs, tels que la nature des compartiments (type de sol et espèce de la plante), la concentration des autres éléments compétiteurs (Ca et K) ainsi que la progression de la croissance de la plante, cette dernière étant notablement affectées par les conditions météorologiques (température, pluviosité) [1,2,3]. S'il est difficile de tirer des conclusions de données isolées d'activité, le suivi de son évolution dans le temps et sur plusieurs sites est plus simple à interpréter. Une augmentation du niveau de radioactivité peut être décelée dans un endroit déterminé par comparaison avec les résultats obtenus pour des sites de référence. Ces informations sont particulièrement utiles lors de la surveillance des opérations de démantèlement des installations nucléaires.

Résultats et discussion

Les résultats des mesures pour les sols sont présentés dans le Tableau 1. Les mesures de ^{137}Cs dans le sol montrent que ce radioélément est encore présent particulièrement dans les zones impactées de manière significative par l'accident de Tchernobyl. Ainsi la zone de la Suisse orientale (Arenenberg) présente encore une activité résiduelle de 22 Bq/kg de masse sèche, alors que les sols du reste du plateau suisse dépassent rarement les 10 Bq/kg. Au Tessin, le site de Stabio est particulièrement impacté par le ^{137}Cs de Tchernobyl et présente une activité de 194 Bq/kg. Le niveau d'activité mesuré à proximité des installations nucléaires est très proche de celui déterminé en Suisse romande (CERN et Posieux) et plus faible que celui des sites du nord-est et du Tessin.

Pour le ^{90}Sr, les variations annuelles sont plus importantes que pour le ^{137}Cs mais aucune différence n'est constatée entre les prélèvements effectués à proximités des installations nucléaires et ceux opérés sur les autres sites du plateau, avec une activité inférieure à 1 Bq/kg. Les sols alpins et un sol du Jura, hors Tessin, montrent une activité résiduelle en ^{90}Sr et ^{137}Cs dont l'origine peut être tracée aux essais nucléaires (voir Mürren, Gimmelwald, Fahrni et Diesse). On y mesure des activités qui peuvent atteindre 27 Bq/kg pour le ^{137}Cs et 3.3 Bq/kg pour le ^{90}Sr. Une étude réalisée en 2016 [4] a également mis en évidence la diminution d'activité de ces radioéléments sur ces sites de prélèvement, avec une période apparente de 19 à 26 ans pour le ^{137}Cs et 10 à 14 ans pour le ^{90}Sr. On remarque que la période effective du ^{137}Cs dépend du site de prélèvement. Cette observation a été également décrite pour des sols agricoles en France [5], avec des périodes effectives allant de 3.9 à 27.2 ans et une valeur moyenne de 10.5 ans.

Les activités en Pu et Am sont faibles et du même ordre de grandeur pour tous les sites sur le plateau suisse (valeur maximale en $^{239+240}$Pu de 0.206 Bq/kg et en ^{241}Am de 0.088 Bq/kg). A altitude similaire, elles sont plus élevées au Tessin ($^{239+240}$Pu: 0.609 Bq/kg, ^{241}Am: 0.261 Bq/kg à Stabio); les valeurs augmentent avec l'altitude en montrant des activités légèrement plus importantes sur les sites BE (Mürren, Gimmelwald, Fahrni, Diesse; $^{239+240}$Pu env. 0.5 - 1.0 Bq/kg, ^{241}Am env. 0.2 - 0.5 Bq/kg). Pour tous ces points de mesure, le rapport isotopique ^{241}Am/$^{239+240}$Pu est proche de 0.45, valeur attribuée aux retombées des essais nucléaires des années soixante.

Les mesures de radioactivité dans l'herbe sont rapportées dans le Tableau 2. On constate que la radioactivité de l'herbe est dominée par le ^{40}K, présent naturellement dans les sols, suivi du ^{7}Be, qui est formé par l'action du rayonnement solaire sur les couches supérieures de l'atmosphère. Les activités en ^{137}Cs sont présentées dans un intervalle de valeurs minimales et maximales alors que les activités en ^{90}Sr sont présentées de manière individuelle pour la coupe du printemps et celle d'automne. Toutes les activités mesurées pour le ^{137}Cs sont faibles et ne dépassent pas 2.5 Bq/kg, sauf pour le site de Prato Leventina, pour lequel le sol montre également l'activité en ^{137}Cs la plus élevée parmi nos mesures (4.1 Bq/kg).

L'activité en ^{90}Sr varie fortement selon la période de coupe pour un même site de prélèvement. Sur le plateau, le plus grand changement étant observé à Posieux (de 0.66 Bq/kg en été à 2.33 Bq/kg MS en automne), les valeurs observées pour les autres sites de plaine, y compris à proximité des centrales, étant comprises dans cette gamme. Ces différences observées dans l'activité en ^{90}Sr de l'herbe lors des coupes de printemps et d'automne a été déjà discutées précédemment et leur origine attribuée au métabolisme des végétaux qui influence de manière importante l'incorporation de certains éléments (Ca, K) et radioéléments (^{137}Cs et ^{90}Sr) en fonction des périodes de croissance végétale [3]. Pour le ^{90}Sr, l'activité moyenne annuelle sur le plateau est autour de 1 Bq/kg, alors que ces valeurs augmentent avec l'altitude en montrant des activités légèrement plus importantes sur les sites BE (Mürren, Gimmelwald, Fahrni et Diesse). L'activité en ^{90}Sr des herbes prélevées au Tessin se situe entre 3 et 6 Bq/kg.

Tableau 1:
Activités en ^{40}K, ^{60}Co, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{90}Sr, Pu et Am dans des sols (0-5 cm) prélevés en Suisse en 2020 (Bq/kg matière sèche, fraction < 2 mm).

Canton / Lieu	n	^{40}K	^{60}Co	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}Pu$	^{241}Am
AG (Voisinage KKB)	2	427 ± 32	< 0.6	< 0.5	13.3 ± 1.0	0.36 ± 0.09	0.152 ± 0.010	0.070 ± 0.007
AG (KKB in-situ)	2	337 ± 24			8.2 ± 0.7			
AG (PSI)	1	391 ± 41	< 0.4	< 0.4	13.0 ± 1.4	0.27 ± 0.09	0.172 ± 0.013	0.078 ± 0.007
AG (PSI in-situ)	1	303 ± 31			7.4 ± 0.8			
AG (ZWILAG)	1	405 ± 44	< 0.8	< 0.7	10.5 ± 1.3	0.31 ± 0.11	0.163 ± 0.012	0.074 ± 0.007
AG (ZWILAG in-situ)	1	342 ± 35			7.4 ± 0.8			
AG (Vois. KKL)	4	398 ± 22	< 0.8	< 0.7	12.6 ± 0.8	0.62 ± 0.15	0.201 ± 0.021 m=2[4]	0.084 ± 0.010 m=2[4]
AG (KKL in-situ)	4	350 ± 18			9.0 ± 0.5			
AG/SO (Vois. KKG)	4	396 ± 22	< 0.8	< 0.7	9.8 ± 0.6	0.54 ± 0.13	0.206 ± 0.016	0.088 ± 0.007
AG/SO (KKG in-situ)	4	335 ± 17			7.1 ± 0.4			
BE (Voisinage KKM)[1]	7	678 ± 27	< 0.7	< 0.6	8.0 ± 0.4	0.52 ± 0.12	0.164 ± 0.011	0.086 ± 0.007
BE (KKM in-situ) [1]	7	514 ± 20			6.0 ± 0.3.0			
BE (Mürren) [2]	1	502 ± 42	< 0.2	< 0.3	27.2 ± 3.3	3.30 ± 0.40	1.070 ± 0.030	0.540 ± 0.030
BE (Gimmelwald)	1	296 ± 25	< 0.2	< 0.3	13.9 ± 1.7	2.50 ± 0.50	0.590 ± 0.020	0.290 ± 0.070
BE (Fahrni) [3]	1	440 ± 37	< 0.2	< 0.3	13.2 ± 1.6	2.60 ± 0.70	0.510 ± 0.020	0.290 ± 0.020
BE (Diesse/Jura)	1	275 ± 23	< 0.2	< 0.2	16.0 ± 1.9	1.30 ± 0.30	0.460 ± 0.010	0.220 ± 0.020
BL (Sissach)	1	569 ± 26		< 0.1	18.0 ± 0.9	4.44 ± 0.89		
FR (Posieux)	1	404 ± 43	< 0.7	< 0.7	5.4 ± 0.7	0.41 ± 0.12	0.194 ± 0.013	0.087 ± 0.008
FR (Posieux, in-situ)	1	342 ± 35			3.8 ± 0.6			
GE (Vois. CERN)	5	419 ± 20	< 0.7	< 0.6	7.5 ± 0.4	0.21 ± 0.08 m=2[4]	0.145 ± 0.017	0.046 ± 0.005
GE (CERN in-situ)	5	409 ± 19			5.0 ± 0.3			
TG (Arenenberg)	1	404 ± 44	< 0.8	< 0.7	22.0 ± 2.4	0.38 ± 0.09	0.156 ± 0.017 m=3[4]	0.070 ± 0.008 m=3[4]
TG (Arenenberg in-situ)	1	332 ± 34			18.2 ± 1.9			
TG (Güttingen)	1	334 ± 36	< 0.6	< 0.5	16.4 ± 1.7	0.44 ± 0.10		
TG (Güttingen in-situ)	1	288 ± 29			12.1 ± 1.3			
TI (Centovalli)[5]	1	165 ± 13		< 0.3	157.5 ± 7.7	38.30 ± 7.70		
TI (Prato Leventina)	1	377 ± 20		< 0.2	11.9 ± 0.8	6.50 ± 1.40		
TI (Sessa)	1	644 ± 34		< 0.2	21.1 ± 1.1	12.0 ± 2.40		
TI (Cadenazzo)	1	613 ± 65	< 0.9	< 0.8	63.9 ± 6.5	0.88 ± 0.20	0.112 ± 0.014 m=3[4]	0.049 ± 0.006 m=4[4]
TI (Cadenazzo – In-situ)	1	606 ± 62			54.6 ± 5.6			
Ti (Caslano)	1	582 ± 61	< 0.6	< 0.5	80.3 ± 8.1	0.45 ± 0.11	0.096 ± 0.012 m=4[4]	0.044 ± 0.006 m=4[4]
Ti (Caslano – in-situ)	1	573 ± 58			49.9 ± 5.1			
TI (Stabio)	1	638 ± 67	< 0.7	< 0.7	193.9 ± 19.5	1.00 ± 0.21	0.609 ± 0.039 m=3[4]	0.261 ± 0.019 m=3[4]
TI (Stabio – In situ)	1	583 ± 60			136.1 ± 13.7			

n = nombre d'échantillons;
[1] avec 3 nouveaux sites de collecte d'échantillons depuis 2017 pour la surveillance du démantèlement;
[2] alpage (Allmendhubel, 1'900 m);
[3] bord des alpes (850 m);
[4] m = moyenne pour m analyses, détails dans chapitre 7.2 plutonium et américium dans l'environnement;
[5] Echantillon n'était pas pris à l'endroit habituel mais dans une tourbière à proximité de la prairie.

Remarque: Les résultats des mesures in situ sont représentatifs de l'activité moyenne du sol sur une surface d'environ 300 m², alors que les mesures en laboratoire permettent la détermination précise de l'activité du sol au point de prélèvement.

Tableau 2 :
Activité en ^{7}Be, ^{40}K, ^{60}Co, ^{134}Cs, ^{137}Cs et ^{90}Sr dans des échantillons d'herbe prélevés en Suisse en 2020 lors de deux saisons de coupe (Bq/kg de matière sèche).

Canton/Lieu	n	^{7}Be	^{40}K	^{60}Co	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr
AG (Voisinage KKB)	4	192 ± 12	618 ± 35	< 0.9	< 0.8	1.3 ± 0.2	0.31 ± 0.08 [4)] 1.21 ± 0.27 [5)]
AG (PSI)	2	304 ± 26	469 ± 37	< 1.1	< 0.9	0.6 ± 0.2	0.62 ± 0.13 [4)] 1.65 ± 0.34 [5)]
AG (ZWILAG)	2	210 ± 19	692 ± 55	< 1.5	< 1.1	1.3 ± 0.2	0.48 ± 0.11 [4)] 0.91 ± 0.20 [5)]
AG (Voisinage KKL)	8	215 ± 9	630 ± 26	< 1.3	< 1.2	1.3 ± 0.1	0.45 ± 0.10 [4)] 1.72 ± 0.34 [5)]
AG/SO (Voisinage KKG)	8	191 ± 8	763 ± 31	< 1.4	< 1.1	0.8 ± 0.1	0.62 ± 0.14 [4)] 1.04 ± 0.21 [5)]
BE (Voisinage KKM) [1)]	14	333 ± 11	802 ± 24	< 1.4	< 1.2	0.8 ± 0.1	0.63 ± 0.13 [4)] 1.09 ± 0.23 [5)]
BE (Lauterbrunnen)	1	10 ± 2.13	480 ± 42	< 0.4	< 0.3	1 ± 0.2	2.3 ± 0.3
BE (Mürren) [2)]	1	258 ± 41	590 ± 50	< 0.4	< 0.2	< 0.2	9.0 ± 0.9
BE (Gimmelwald)	1	242 ± 38	550 ± 49	< 0.4	< 0.2	0.3 ± 0.1	2.0 ± 0.2
BE (Fahrni) [3)]	2	152 ± 20	1040 ± 63	< 0.5	< 0.3	0.3 ± 0.1	1.4 ± 0.2 1.8 ± 0.2
BE (Diesse/Jura)	2	124 ± 14	1470 ± 71	< 0.5	< 0.3	0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.1 1.1 ± 0.1
BL (Sissach)	1	105 ± 6	857 ± 43	-	< 0.1	< 0.1	1.12 ± 0.22
FR (Posieux)	2	115 ± 12	1097 ± 85	< 1.6	< 1.2	< 1.4	0.66 ± 0.14 [4)] 2.33 ± 0.46 [5)]
GE (Voisinage CERN)	4	109 ± 8	653 ± 38	< 1.4	< 1.1	< 1.2	1.21 ± 0.24 [5)]
TG (Güttingen)	2	242 ± 20	847 ± 64	< 1	< 0.8	< 0.8	0.42 ± 0.09 [4)] 0.73 ± 0.16 [5)]
Ti (Centovalli)	1	44 ± 6	836 ± 45	-	< 0.3	1.0 ± 0.4	2.89 ± 0.58
TI (Prato Leventina)	1	234 ± 16	851 ± 46		< 0.4	4.1 ± 0.7	3.73 ± 0.75
TI (Sessa)	1	213 ± 12	876 ± 44	-	< 0.2	0.7 ± 0.2	5.93 ± 1.19
TI (Cadenazzo)	2	350 ± 27	833 ± 64	< 1.1	< 0.9	1.8 ± 0.4	2.78 ± 0.56 [4)] 5.23 ± 1.02 [5)] 4.28 ± 0.84 [5)]
Ti (Stabio)	1	235 ± 25	530 ± 57	< 0.5	< 0.7	2.2 ± 0.5	3.14 ± 0.62 [5)]

n = nombre d'échantillons;
[1)] avec 3 nouveaux sites de collecte d'échantillons depuis 2017, programme renforcé pour la surveillance du démantèlement;
[2)] alpage (Allmendhubel);
[3)] bord des alpes, 850 m ;
[4)] coupe de printemps;
[5)] coupe d'automne.

Conclusions

Les résultats des mesures de ^{90}Sr et de ^{137}Cs dans les sols et les herbes en Suisse en 2020 indiquent des activités similaires aux années précédentes. Aucune augmentation significative d'activité n'a été constatée, ni aux abords des centrales nucléaires, ni dans les sites de référence. Les sites de montagne et certains sites du Tessin présentent des activités en ^{90}Sr et en ^{137}Cs supérieures à celles mesurées sur les sites de plaine, centrales nucléaires inclues. L'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl est par contre encore responsable d'un marquage assez important en ^{137}Cs dans des échantillons de sol et d'herbe de certains sites de prélèvement du Tessin et de Suisse orientale.

Les différences observées dans l'activité en ^{90}Sr de l'herbe lors des coupes de printemps et d'automne peuvent atteindre un ordre de grandeur, ce qui montre qu'il ne faut pas nécessairement interpréter une augmentation d'activité de ce radionucléide dans ce compartiment spécifique comme une élévation parallèle de la radioactivité dans l'environnement.

Références

[1] Ehlken, S., Kirchner, G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. J Environ Radioact. 2002, 58, 97–112.

[2] Guillaume, T. et al., Disparity in ^{90}Sr and ^{137}Cs uptake in Alpine plants: phylogenetic effect and Ca and K availability. Plant Soil 2012, 355, 29–39.

[3] Froidevaux, P. et al., chap. 4.6 de «Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse», 2005, OFSP.

[4] Corcho-Alvarado, J. A. et al., Long-term behavior of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the environment: Case studies in Switzerland. J. Environ. Radioact. 2016, 160, 54-63.

[5] Roussel-Debel, S. et al., ^{137}Cs in French soils: Deposition patterns and 15-year evolution. Sci. Total Environ. 2007, 388–398.