

SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT

**PROGRAMME COMPLÉMENTAIRE
« POINT ZÉRO DÉMANTÈLEMENT CENTRALE
NUCLÉAIRE DE MÜHLEBERG (CNM) 2017-2019 »**

ÜBERWACHUNG DER RADIOAKTIVITÄT IN DER UMWELT

**ERGÄNZUNGSPROGRAMM
« NULLPEGELMESSUNG RÜCKBAU KERNKRAFTWERK
MÜHLEBERG (KKM) 2017-2019 »**

Themen

Ausgangslage und Zusammenfassung der Messergebnisse

Spezialnuklide in Bodenproben

Boden, Gras, Sedimente und Milch

In-Situ-Gammaspektrometrie

Thèmes

Situation initiale et résumé des résultats de mesure

Nucléides spéciaux dans les sols

Sol, herbe, sédiments et lait

Spectrométrie gamma in situ



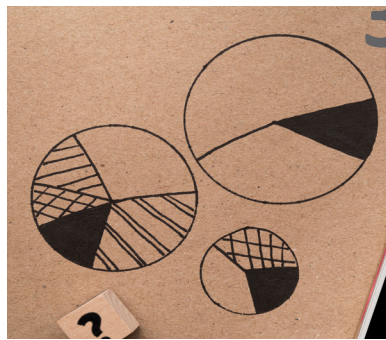
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de la santé publique OFSP
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN

Bundesamt für Gesundheit BAG
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Aperçu

Kurzübersicht



3

Ausgangslage und
Zusammenfassung der
Messergebnisse

Situation initiale
et résumé des
résultats de mesure



6

Spezialnuklide
in
Bodenproben

Nucléides
spéciaux
dans les sols



16

Boden, Gras
Sedimente,
Milch

Sol, Herbe
Sédiments
Lait



29

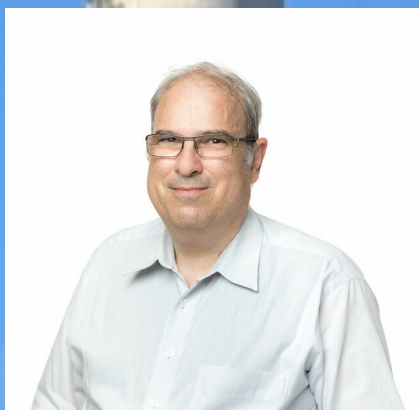
In-situ
Gamma-
spektrometrie

Spectrométrie
gamma
in-situ

Préambule

En octobre 2013, le groupe BKW Energie SA (FMB) a pris la décision de principe de cesser l'exploitation de la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM) fin 2019 et de la mettre ensuite définitivement hors service. Après la mise hors service définitive (EABN), la centrale nucléaire de Mühleberg doit être désaffectée et démantelée. A cette fin, FMB a élaboré un projet de désaffectation conformément à l'article 27 de la loi sur l'énergie nucléaire (LEnu, 732.1) et selon l'article 45 de l'ordonnance sur l'énergie nucléaire (OENU, 732.11). L'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), en sa qualité d'autorité de surveillance compétente, a rédigé une expertise sur ce projet. Ce rapport a servi de base à la décision de désaffectation délivrée le 20 juin 2018 par le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Dans son expertise sur le projet de désaffectation de la centrale nucléaire de Mühleberg, l'IFSN, en concertation avec l'OFSP, a envisagé une adaptation et un élargissement du programme existant de surveillance de la radioactivité dans l'environnement au voisinage de la centrale pour la période 2017-2019. Ce programme spécifique (programme complémentaire de surveillance radiologique de l'environnement) avait pour objectif de permettre une évaluation approfondie de la situation radiologique de l'environnement à proximité de l'installation nucléaire avant le début des travaux de désaffectation, notamment en ce qui concerne les nucléides spéciaux tels que le ^{55}Fe , le ^{63}Ni , le ^{90}Sr et les actinides. La réalisation de ces mesures complémentaires a été confiée par l'IFSN au PSI. En outre, des analyses complémentaires de la concentration des radionucléides dans le sol, l'herbe et le lait ont été réalisées sur mandat de l'OFSP en différents points de mesure, couvrant à la fois des sites analysés en routine lors du programme de surveillance annuel et certains points du programme complémentaire de surveillance, afin d'assurer la cohérence et la comparaison des résultats obtenus dans le cadre de ces différents programmes. Par exemple, en surveillance de routine, le ^{90}Sr et les actinides sont mesurés par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP. Même si le PSI et l'IRA sont tous les deux accrédités pour la mesure de ces radionucléides dans des échantillons de l'environnement, des résultats de mesures comparatives sont utiles pour pouvoir évaluer correctement la situation. Finalement, des mesures de la concentration des émetteurs gamma dans le sol par spectrométrie gamma in situ ont également été réalisées par l'OFSP et l'IFSN. Le présent rapport publie les résultats obtenus dans le cadre de ces trois volets du programme de surveillance renforcé de la radioactivité dans l'environnement au voisinage de CNM pour la période 2017 à 2019.



En résumé, les résultats des mesures n'ont mis en évidence aucune indication d'immissions¹ récentes d'actinides ou de produits de fission pouvant être attribuées au fonctionnement de la centrale nucléaire de Mühleberg. En effet, les évaluations des rapports isotopiques et la comparaison avec les valeurs de référence usuellement enregistrées sur le plateau suisse permettent de conclure que les radionucléides détectés dans l'environnement proviennent (hormis le tritium) d'anciennes contaminations. Ainsi les actinides et le ⁹⁰Sr peuvent être attribués aux retombées des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère du milieu du siècle dernier, tandis que les petites quantités de ¹³⁷Cs encore présentes proviennent également des retombées de l'accident de Tchernobyl en 1986 ainsi que du rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère par la CNM qui a également eu lieu en 1986. Les concentrations des radionucléides spéciaux tels que le ⁵⁵Fe et le ⁶³Ni dans les sols et les sédiments sont restées inférieures aux limites de détection. L'origine des traces de ³H mesurées sporadiquement dans les échantillons de lait n'a pu être déterminée de manière certaine, mais les résultats de mesure montrent qu'il provient très probablement d'autres sources que du fonctionnement de la CNM.

En plus du programme de surveillance de l'environnement de routine de l'OFSP, les résultats du programme complémentaire de surveillance de l'environnement donnent un très bon aperçu de l'état radiologique de l'environnement au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg avant le début des travaux de démantèlement. Ils peuvent ainsi être utilisés comme valeurs de référence en cas de suspicion de rejets de substances radioactives dans l'environnement, pendant les travaux, pour évaluer si ceux-ci sont conformes aux limites réglementaires.

Dr. Sybille Estier
Office fédéral de la santé publique (OFSP)

Dr. Andreas Leupin
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN)

¹ Les émissions de substances radioactives correspondent aux concentrations de radionucléides émises dans l'environnement. Les immissions quant à elles correspondent aux concentrations de radionucléides effectivement mesurées dans l'environnement, après dilution, resp. transfert.

Vorwort

Im Oktober 2013 hat die BKW Energie AG (BKW) den Grundsatzentscheid getroffen, den Leistungsbetrieb des Kernkraftwerks Mühleberg (KKM) Ende 2019 einzustellen und im Anschluss das KKM endgültig ausser Betrieb zu nehmen. Nach der endgültigen Ausserbetriebnahme (EABN) soll das KKM stillgelegt und rückgebaut werden. Dazu hat die BKW gemäss Art. 27 des Kernenergiegesetzes (KEG, 732.1) i. V. m. Art. 45 der Kernenergieverordnung (KEV, 732.11) ein Stilllegungsprojekt erarbeitet. Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) hat als zuständige Aufsichtsbehörde des Bundes ein Gutachten dazu erstellt. Das Gutachten bildete eine Grundlage für die Stilllegungsverfügung des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) vom 20. Juni 2018.

Im Rahmen der Begutachtung des Stilllegungsprojekts für das Kernkraftwerk Mühleberg hat das ENSI in Absprache mit dem BAG eine Anpassung und Erweiterung des bestehenden Programms zur Überwachung der Umweltradioaktivität in der Umgebung der Anlage für den Zeitraum 2017-2019 vorgesehen. Ziel dieses ergänzend zum normalen Umgebungsüberwachungsprogramm durchgeführten Messprogramms war es, vor Beginn der Stilllegungsarbeiten eine eingehende Beurteilung der radiologischen Situation der Umwelt in der Umgebung der kerntechnischen Anlage zu ermöglichen, insbesondere auch im Hinblick auf spezielle Nuklide wie ⁵⁵Fe, ⁶³Ni, ⁹⁰Sr und Aktiniden. Das ENSI beauftragte das Paul Scherrer Institut (PSI) mit der Durchführung dieser zusätzlichen Spezialmessungen. Zusätzlich wurden im Auftrag des BAG an verschiedenen Messstellen ergänzende Analysen der Radionuklidkonzentration im Boden, im Gras und in der Milch durchgeführt, die sowohl die im Rahmen des jährlichen Überwachungsprogramms routinemässig analysierten Standorte als auch bestimmte Punkte des ergänzenden Überwachungsprogramms umfassten, um die Konsistenz und den Vergleich der in diesen verschiedenen Programmen ermittelten Ergebnisse zu gewährleisten. In der Rou-

tineüberwachung werden z.B. ^{90}Sr und Aktiniden vom Institut für Radiophysik (IRA) im Auftrag des BAG gemessen. Obwohl sowohl das PSI als auch die IRA für die Messung dieser Radionuklide in Umweltproben akkreditiert sind, sind vergleichende Messergebnisse für eine korrekte Beurteilung der Situation nützlich. Schliesslich wurden auch Messungen der Konzentration von Gammastrahlern im Boden mittels In-Situ-Gammaspektrometrie durch das BAG und das ENSI durchgeführt. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse, welche in diesen drei Teilen des ergänzenden Programms zur Überwachung der Umweltradioaktivität in der Umgebung des KKM für den Zeitraum 2017 bis 2019 ermittelt wurden, zusammengestellt und veröffentlicht.

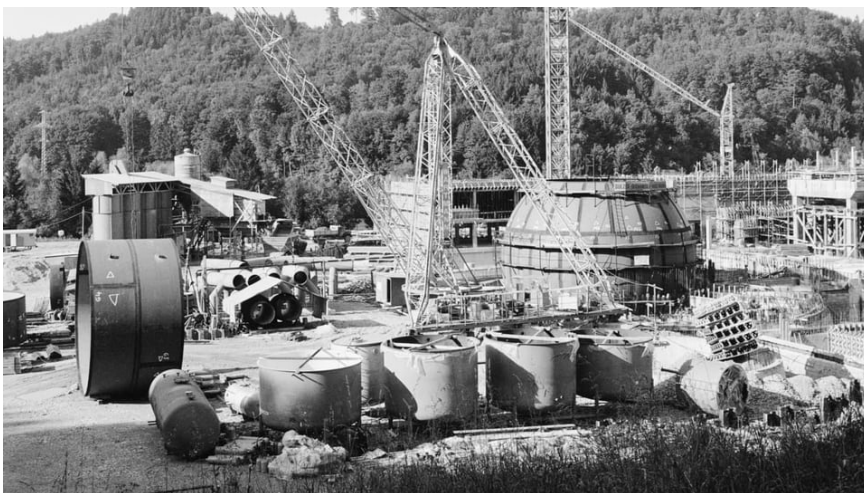
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei sämtlichen Untersuchungen keine Hinweise auf jüngere Immissionen² von Aktiniden oder Spaltprodukten gefunden wurden, welche auf den Betrieb des KKM zurückzuführen sind. Bei den gefundenen künstlichen Nukliden kann aufgrund der Auswertungen von Isotopenverhältnissen und den Erfahrungswerten im schweizerischen Mittelland davon ausgegangen werden, dass die gefundenen Aktiniden und das ^{90}Sr auf die atmosphärischen Kernwaffentests

Mitte des letzten Jahrhunderts und die geringen gefundenen Mengen von ^{137}Cs zusätzlich auch auf den Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 zurückzuführen sind sowie auf eine unkontrollierte Abgabe von radioaktiven Aerosolen in die Atmosphäre durch das KKM ebenfalls im Jahr 1986. Von Spezialnukliden wie ^{55}Fe und ^{63}Ni waren in Böden und Sedimenten keine Konzentrationen über der Nachweisgrenze feststellbar. Der Ursprung von Spuren von ^3H , welche sporadisch in Milchproben feststellbar waren, konnte nicht abschliessend geklärt werden, aber die Resultate lassen es als sehr wahrscheinlich erscheinen, dass sie aus anderen Quellen als dem Betrieb des KKM stammen.

Die Resultate des erweiterten Umgebungsüberwachungsprogramms geben zusätzlich zum routinemässigen Umgebungsüberwachungsprogramm des BAG einen sehr guten Überblick über den radiologischen Zustand der Umgebung des KKM vor der Aufnahme der Stilllegungsarbeiten. Sie können im Sinne der Beweissicherung bei Verdacht auf Abgaben radioaktiver Stoffe durch das KKM während der Arbeiten als Referenz herangezogen werden, um beispielsweise zu überprüfen, ob die Abgabelimiten für die Durchführung der Arbeiten eingehalten wurden.

Dr. Sybille Estier
Bundesamt für Gesundheit (BAG)

Dr. Andreas Leupin
Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)



Centrale nucléaire de Mühleberg juin 1968 / Kernkraftwerk Mühleberg Juni 1968 @Keystone.

² Als Emissionen werden die Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus einer Anlage in die Umgebung bezeichnet. Immissionen sind die Radioaktivitätskonzentrationen, welche direkt in der Umgebung gemessen werden.

1. Überwachungsprogramm für Spezialnuklide in der Umgebung des KKM 2017-2019

Martin Heule, Patricia Kramer, Alexandra Ulli, Anja Pregler,
Max Ruethi, Maya Jäggi, Christina Bindnagel
Radioanalytik, Paul Scherrer Institut (PSI)

Einleitung

Das ENSI erteilte der Radioanalytik des PSI im Jahr 2017 den Auftrag zu einer zusätzlichen Untersuchung von Bodenproben in der nahen Umgebung des Kernkraftwerks Mühleberg. Die Untersuchung erfolgte in den Jahren 2017 bis 2019, also in den letzten Jahren des Leistungsbetriebs des Kernkraftwerks. Der Leistungsbetrieb wurde am 20.12.2019 wie geplant eingestellt.

Das Ziel der Untersuchung war es, die Radioaktivität in den Böden zu charakterisieren, um deren Zustand am Ende des Leistungsbetriebs genau zu kennen. Die Resultate liefern eine zusätzliche Vergleichsbasis für spätere Messungen und die Überwachungstätigkeit des ab 2020 beginnenden Rückbaus in der Kernanlage. Der Fokus der ausgewählten Nuklide zur Untersuchung lag darum auch bei den künstlichen Nukliden. Die Umgebung der Schweizer Kernkraftwerke wird laufend überwacht, sowohl mittels kontinuierlich laufenden direkten Messungen, als auch durch Probennahmen und Laboranalysen. Das BAG koordiniert zwischen den beitragenden kantonalen und bundeseigenen Laboratorien und stellt auch die Resultate der Öffentlichkeit in dem jährlich erscheinenden Bericht «Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz» zur Verfügung, siehe z.B. (BAG, 2019).

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	6
Inhaltsverzeichnis	6
Testgebiet und Auswahl der zu analysierenden Nuklide	7
Überwachte Standorte	7
Auswahl der zu analysierenden Nuklide	7
Künstliche Nuklide	8
Historische Freisetzungen von künstlichen Nukliden auf globaler Ebene	8
Freisetzung von künstlichen Nukliden durch Kernkraftwerke in der Schweiz	8
Experimentelles Vorgehen	9
Probennahmen vor Ort	9
Probenvorbereitung im Labor	9
Gamma-Spektrometrie	10
Chemische Trennungen im Labor zur Bestimmung der Alpha- und Betastrahler	10
Resultate	10
Übersicht der Resultate	10
Diskussion und Herkunftsabgleich	12
Messergebnisse für ⁹⁰ Sr und ¹³⁷ Cs	12
Herkunft der Actinoide wie Pu-Isotope, ²⁴¹ Am und ²⁴⁴ Cm	12
Schlussfolgerungen	14
Referenzen und Literatur	15

Testgebiet und Auswahl der zu analysierenden Nuklide

Überwachte Standorte

Das untersuchte Gebiet von sechs Standorten rund um das Kernkraftwerk Mühleberg umfasste ca. 2 km in Ost-West-Richtung und ca. 0.9 km in Nord-Süd-Richtung. Mitten durch das Gebiet liegt der Flusslauf der Aare. Einer der Standorte befand sich in direkter Umgebung des Kraftwerks, etwas oberhalb auf offener Wiese zwischen Waldrand und der Kraftwerksumzäunung. Die Übersicht ist auf dem Kartenausschnitt in Abb. 1 gezeigt (GIS, 2020). An allen Standorten wurde auf eine offene Lage geachtet. Ebenso wurde lokal berücksichtigt, möglichst landwirtschaftlich nicht bearbeitete Flächen an den Standorten zu identifizieren, an denen der Boden möglichst wenig verändert wurde über die letzten Jahre. Typischerweise waren dies Wiesenstücke, Weideland oder Eckstücke zwischen Wegrand und Feldern, oder auch Wiesen mit Obstbaumkulturen. Die beprobten Flächen wurden nicht als Feld für Nutzpflanzen wie Weizen, Mais o.ä. verwendet. Die Probestandorte waren alle mit Gras bewachsen und es war anzunehmen, dass die Böden an den Probestandorten in den letzten Jahren nicht gepflügt wurden.

Auswahl der zu analysierenden Nuklide

Die Priorität bei der Auswahl der zu bestimmen Nuklide lag bei den künstlichen Nukliden. Dazu wurden einige Vertreter der natürlichen Nuklide bestimmt. In der Erdkruste sind natürliche Radionuklide enthalten. Darunter sind extrem langlebige Nuklide wie das ^{238}U , dessen Ursprung auf die Bildung des Sonnensystems zurückgeht. Nuklide wie das Uran sind in jeder Bodenprobe zu erwarten.

Für beide Zerfallsreihen der natürlichen Radionuklide gilt, dass nicht alle Zerfälle einfach ohne eine nuklidspezifische Trennung zu messen sind. Deshalb wurden für die vorliegende Studie die ^{238}U und ^{232}Th Aktivitätskonzentrationen anhand der $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$ respektive anhand der ^{212}Pb Aktivitätskonzentrationen bestimmt. Diese senden bei ihrem Zerfall starke γ -Strahlung aus, die direkt anhand der Bodenprobe zu messen ist.

Das Isotop von Kalium, ^{40}K , kommt ebenfalls natürlich in der Erdkruste vor. Es ist extrem langlebig mit einer Halbwertszeit von 1.2 Milliarden Jahren und bereits seit der Bildung der Erde vorhanden.



Abb. 1 :
Karte des Probenahmegebiets mit den Gebäuden des Kernkraftwerks Mühleberg dunkel hervorgehoben. Ein weiterer Standort bei der Siedlung Salvisberg ca. 500 m nord-östlich von «3. Niederruntigen» wurde zusätzlich in demselben Zeitraum durch das BAG beprobt.

^7Be und ^{22}Na sind wichtige Vertreter der kosmisch entstehenden Nuklide. Dies sind natürliche Spaltungsprodukte, die im Beispiel von ^7Be aus Stickstoff und Sauerstoff in der oberen Erdatmosphäre durch Einwirkung von kosmischen Strahlen und hochenergetischen Sontenteilchen entstehen. ^{22}Na entsteht aus der Spaltung von ^{40}Ar . Selbst in Bodenproben sind ^7Be und ^{22}Na in Spuren direkt mittels Gamma-spektrometrie nachzuweisen.

Der Mensch hat seit der Entdeckung der Radioaktivität und deren Nutzung für militärische und industrielle Zwecke eine Reihe weiterer Nuklide erzeugt, die natürlicherweise nicht auf der Erde vorkommen. Diese werden unter dem Begriff «künstliche» Nuklide zusammengefasst. Teilweise sind diese auch in die Umwelt gelangt und sind analytisch ebenso nachweisbar wie die natürlich vorkommenden Radionuklide. Im Folgenden werden die untersuchten Nuklide und ihre allgemeine Herkunft präsentiert.

Künstliche Nuklide

Künstliche Nuklide werden durch zwei grundlegende Prozesse erzeugt. Zum einen durch Aktivierung, zum anderen durch Fission oder Spaltung.

Die Aktivierung geschieht beim Aussetzen eines Targetmaterials an einen Beschuss durch Elementarteilchen, meistens Neutronen. Die Atomkerne des Targetmaterials reagieren mit den Elementarteilchen und bilden schwerere radioaktive Kerne, die oft weiter zerfallen und damit weitere radioaktive Nuklide erzeugen. Actinoide zeigen eine sehr diverse Bandbreite von chemischen Eigenschaften, die zur chemischen Trennung ausgenutzt werden können.

Die Spaltprodukte entstehen, wenn instabile Kerne in «Bruchstücke» zerfallen, die nicht nur einzelne Neutronen oder Alpha-Teilchen umfassen. Die «Bruchstücke» sind wiederum Atome mit tieferen Ordnungszahlen. Viele Spaltprodukte sind bekannt: ^{137}Cs und ^{90}Sr sind die wichtigsten Vertreter von Spaltprodukten, die auch in Bodenproben nachweisbar sind.

Weitere Aktivierungsprodukte können in den Materialien von Kernanlagen entstehen, vor allem in Stahl und in Beton. In Stahl entstehen durch Neutroneneinwirkung ^{60}Co , ^{63}Ni und ^{55}Fe . In Beton entstehen aus natürlichen Spurenelementen wie Eu durch Neutronenaktivierung die radioaktiven Isotope ^{152}Eu und ^{154}Eu .

Weiter können radioaktive Edelgase wie ^{133}Xe entstehen, die jedoch meist sehr schnell zerfallen. Die Halbwertszeit von ^{133}Xe beträgt lediglich 5.3 Tage. Die Edelgase können als Emissionen eine Kernanlage mit der Abluft verlassen und werden ständig gemessen.

Historische Freisetzungen von künstlichen Nukliden auf globaler Ebene

Seit der Entdeckung der Radioaktivität wurden natürliche Nuklide aufkonzentriert, künstliche Nuklide erzeugt und schliesslich auch teilweise freigesetzt. An dieser Stelle werden kurz die zwei wichtigsten Quellen besprochen, die auch auf überregionaler oder gar globaler Ebene einen signifikanten Einfluss haben und mit denen auch die Messresultate der Umgebungsüberwachung abgeglichen wurden. Weitere Details und nähere Informationen sind in (Cooper, 2003) zu finden. Grosse Freisetzungen von künst-

lichen Nukliden in unmittelbarer Nähe zur Schweiz haben bisher nicht stattgefunden. Die Spuren der überregionalen Freisetzungen sind jedoch durchaus auch in der Schweiz messbar.

Im Zuge der Entwicklung von Kernwaffen haben in den 1950er und anfangs der 1960er Jahren viele oberirdisch durchgeführte Bombentests stattgefunden. Diese werden oft auch als atmosphärische Kernwaffentests bezeichnet. Dabei wurde ^{14}C in sehr grossen Mengen durch Aktivierung erzeugt, Nuklide wie ^{238}Pu , ^{239}Pu und andere Pu-Nuklide, sowie die diversen Spaltprodukte freigesetzt. Einige von diesen Nukliden wurden mit der Zeit hauptsächlich über die Luft als Bestandteil von Aerosolen global verteilt. Auch in der Schweiz sind deren Spuren heute noch zu messen. Die Zerfälle sorgen für bestimmte Nuklidverhältnisse anhand derer die gemessenen Spuren zugeordnet werden können. Die Phase der atmosphärischen Kernwaffentests wurde 1963 durch das Moskauer Atomteststoppabkommen international beendet (Atomteststoppabkommen, 1963).

Der Reaktorunfall von Chernobyl im April 1986 setzte grosse Mengen an ^{134}Cs , ^{137}Cs , etwas weniger ^{90}Sr und auch langlebige Actinoide frei. Da der Brand länger als 1 Woche wütete, wurde der Rauch bei verschiedenen Wetterlagen überregional in Russland, Europa und auch in Richtung Osten verteilt. Kurzfristig nach dem Unfall bereiteten die Cs-Nuklide, Iod-Nuklide und $^{89/90}\text{Sr}$ die grössten Sorgen. Das grösste Risiko von allfällig erhöhten Dosisbelastungen für die Bevölkerung ging damals von den Lebensmitteln aus. Es wurden umfangreiche Tests von Böden, Agrarprodukten und Milchprodukten durchgeführt und auch kurzfristig Ernten und Milchproduktion gestoppt. Die Nuklide mit Halbwertszeiten von über 10 Jahren sind je nach Betroffenheit einer Region auch heute noch analytisch nachweisbar.

Freisetzung von künstlichen Nukliden durch Kernkraftwerke in der Schweiz

Die freigesetzten Aktivitäten von künstlichen Nukliden während des normalen Betriebs eines Kernkraftwerkes sind sehr klein. Die Emissionen durch Abluft und Abwasser sind durch die Aufsichtsbehörden und die Betreiber streng kontrolliert und liegen weit unter den relevanten Abgabelimiten. Das BAG veröffentlicht jedes Jahr einen ausführlichen Bericht mit

dem Titel «Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz». In diesem sind diverse Beiträge und ausführliche Messresultate von Behörden, Instituten, Universitäten und verschiedenen kantonalen Laboratorien zusammengestellt, siehe Kapitel 8 in (BAG, 2019).

In der unmittelbaren Umgebung von Kernkraftwerken in der Schweiz konnten in Bodenproben in den letzten Jahren keine Spuren von künstlichen Nukliden nachgewiesen werden, die über das Niveau der überregionalen Spuren aus Kernwaffentests und Chernobyl-Fallout hinausgehen würden. Am KKM selbst fand ebenfalls im Jahr 1986 eine unkontrollierte Abgabe von ^{137}Cs statt (siehe Kapitel 2).

Experimentelles Vorgehen

Probennahmen vor Ort

Bodenproben wurden aus der oberflächennahen 5-10 cm dicken Bodenschicht gemäss der Prozedur entnommen, wie sie mit dem BAG vereinbart wurde (Estier, 2019).

Am Standort wurde mit Hilfe einer Schnur ein Quadrat mit 1 m Seitenlänge abgesteckt. Gras wurde mit einer Handschere bis auf wenige Zentimeter zurückgeschnitten. Entlang des Umfangs der abgesteckten Fläche wurden daraufhin 9 Bohrungen mit einem Stechisen mit Durchmesser 12 cm bis ca. 5 cm Tiefe durchgeführt und das ganze entnommene Material gesammelt. Dabei kamen pro Probennahmestandort ca. 5-10 kg Bodenmaterial zusammen, welches zurück in das Labor am PSI gebracht wurde.

Probenvorbereitung im Labor

Innerhalb weniger Tagen nach der Probennahme wurden die Bodenproben von Hand gemischt und grobe Bestandteile wie Steine und Graswurzeln aussortiert und durch ein Sieb mit 2 mm Maschenweite zu Granulat verarbeitet. Das zerkleinerte Erdmaterial wurde daraufhin im Trockenschrank bei 80°C mindestens über Nacht getrocknet, bis Gewichtskonstanz erreicht wurde. Das Granulat wurde in 1l-Flaschen abgefüllt, das Restmaterial wurde entsorgt. Aus dem Granulat wurden für die Analysenschritte Aliquote entnommen, welche gemäss den entsprechenden Arbeitsvorschriften für die chemische Trennung der verschiedenen Nuklide weiter behandelt wurden.

Tab. 1: Übersicht über die analysierten Nuklide, deren Halbwertszeiten, Herkunft und die in dieser Studie verwendete Messtechnik.

Nuklid	Halbwertszeit	Herkunft	Messtechnik in dieser Studie
^{55}Fe	2.7 Jahre	Aktivierungsprodukt	Chemische Trennung, Nachweis LSC
^{60}Co	5.3 Jahre	Aktivierungsprodukt	Gamma-Spektrometrie
^{63}Ni	101.2 Jahre	Aktivierungsprodukt	Chemische Trennung, Nachweis LSC
^{90}Sr	28.8 Jahre	Spaltprodukt	Chemische Trennung, Nachweis LSC via ^{90}Y -Wiederaufbau nach chemischer Trennung
^{134}Cs	2.1 Jahre	Spaltprodukt	Gamma-Spektrometrie
^{137}Cs	30.2 Jahre	Spaltprodukt	Gamma-Spektrometrie
^{152}Eu	13.5 Jahre	Aktivierungsprodukt	Gamma-Spektrometrie
^{154}Eu	8.6 Jahre	Aktivierungsprodukt	Gamma-Spektrometrie
^{238}Pu	87.7 Jahre	Aktivierungsprodukt	Chemische Trennung, Nachweis Alpha-Spektrometrie
^{239}Pu , ^{240}Pu	24'110 Jahre, 6'563 Jahre	Aktivierungsprodukt	Chemische Trennung, Nachweis Alpha-Spektrometrie
^{241}Am	432 Jahre	Aktivierungsprodukt	Chemische Trennung, Nachweis Alpha-Spektrometrie
^{244}Cm	18.1 Jahre	Aktivierungsprodukt	Chemische Trennung, Nachweis Alpha-Spektrometrie
^7Be	53 Tage	Spaltung in Atmosphäre, natürlich	Gamma-Spektrometrie
^{22}Na	2.6 Jahre	Spaltung in Atmosphäre, natürlich	Gamma-Spektrometrie
^{40}K	$1.2 \cdot 10^9$ Jahre	Natürlich	Gamma-Spektrometrie
^{232}Th	$1.4 \cdot 10^{10}$ Jahre	Natürlich	Gamma-Spektrometrie (via ^{212}Pb)
^{238}U	$4.5 \cdot 10^9$ Jahre	Natürlich	Gamma-Spektrometrie (via ^{214}Pb)

Gamma-Spektrometrie

Das in 1l-Flaschen gefüllte, getrocknete Boden-Granulat wurde auf einem HP-Ge Detektor (Canberra Eurisys EGNC 15-190 / PGT IGC 30) gemessen. Die Kalibration der 1l-Geometrie erfolgte über einen Multi-nuklidstandard auf Basis einer wässrigen Lösung. Die Nuklide ^7Be , ^{22}Na , ^{40}K , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{152}Eu und ^{154}Eu wurden aus den erhaltenen Spektren mit der Analysensoftware Interwinner bestimmt. Als Bezugsdaten wurden die Zeitpunkte der jeweiligen Probennahmetage verwendet, sodass die Probenverarbeitungszeiten bis zur Messung keinen Einfluss haben.

Chemische Trennungen im Labor zur Bestimmung der Alpha- und Betastrahler

Reale Bodenproben enthalten eine Vielzahl von Elementen. Daher sind zur Isolation der zu bestimmen Alpha- und Beta-Nuklide eine Reihe von chemischen Trennschritten notwendig. Als Tracernuklide zur Quantifizierung und Bestimmung der Ausbeute über alle Trennschritte wurden ^{85}Sr für die Bestimmung von ^{90}Sr , ^{242}Pu für die Bestimmung der Pu-Nuklide, und ^{243}Am für die Bestimmung von ^{241}Am und ^{244}Cm verwendet. Diese wurden dem getrockneten Bodengranulat zugesetzt. Das angewendete Trennschema ist in Abbildung 2 dargestellt.

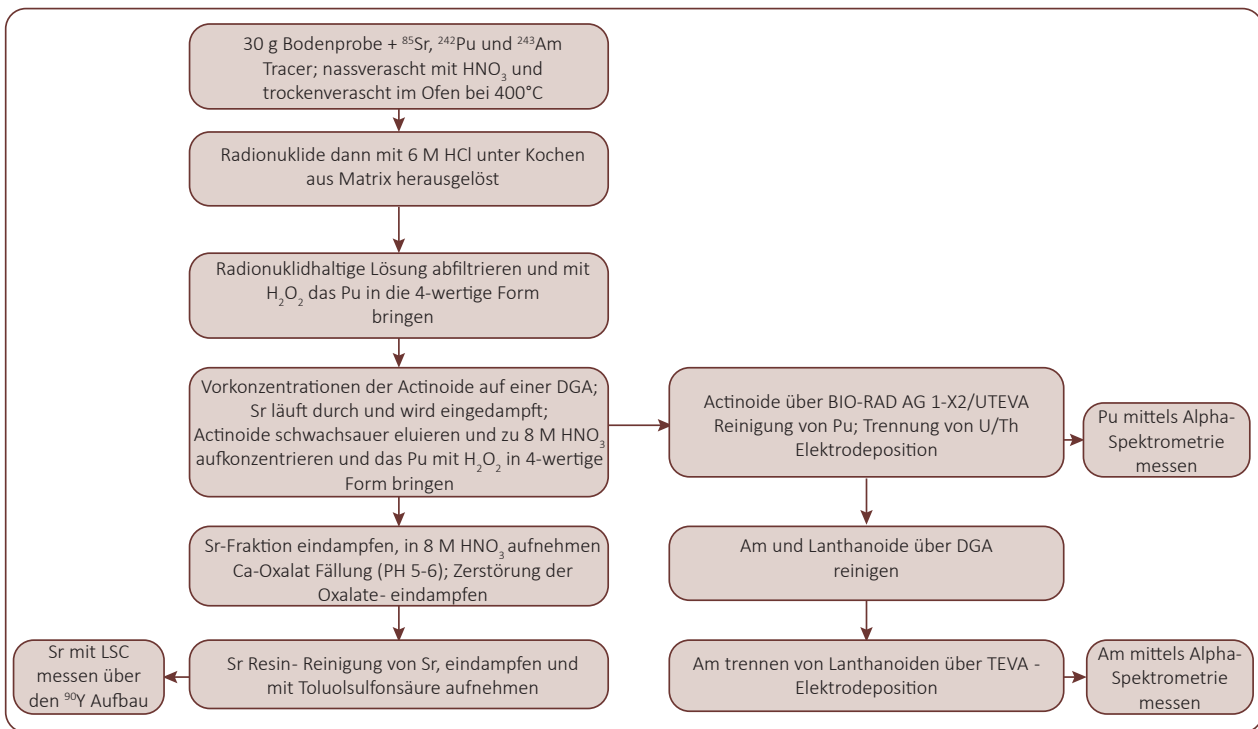


Abb. 2 :
 Kombiniertes Trennschema mit verschiedenen Chromatographie-Säulen, welches in der Radioanalytik in den letzten Jahren entwickelt wurde. Siehe dazu auch die Anwendung bei Barytbetonproben (Jäggi, 2019). Die verschiedenen Actinoide Plutonium, Americium, Curium, sowie Strontium können von einem Probenaufschluss ausgehend in einem Arbeitsgang mit verschiedenen Abzweigungen getrennt werden.

Resultate

Übersicht der Resultate

Über die Laufzeit der Messkampagne wurden in den drei Jahren 2017, 2018 und 2019 pro Standort 6 Proben gesammelt. Insgesamt ergaben sich dadurch 36 Proben, die alle auf die

beschriebenen Nuklide analysiert wurden. Die Abbildung 3 zeigt die Mittelwerte pro Nuklid über alle Standorte und die mittleren Messunsicherheiten als Fehlerbalken. Für verschiedene Nuklide konnten keine Messwerte oberhalb der Nachweisgrenze (NWG) bestimmt werden. Für diese wurden die Mittelwerte der NWG und deren Standardabweichungen an

gegeben. Insbesondere wurden bei keiner der 36 untersuchten Proben ^{63}Ni Aktivitäten oberhalb der Nachweisgrenze von ca. 1 Bq/kg festgestellt. Bei den sechs auf ^{55}Fe untersuchten Proben war das Ergebnis ebenfalls kleiner als die Nachweisgrenze, die für dieses Isotop ca. 0.5 Bq/kg betrug.

Die Abbildung 4 zeigt die Übersicht über die natürlich vorkommenden Nuklide.

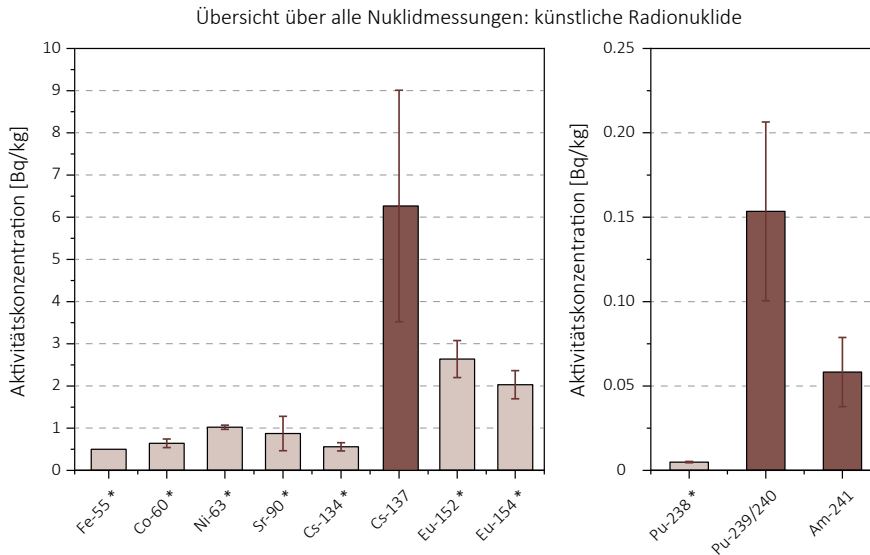


Abb. 3 :
 Übersicht pro Nuklid. Gezeigt werden die Mittelwerte der gemessenen Aktivitätskonzentrationen. Die hell schattierten und mit (*) markierten Werte sind Nachweisgrenzen mit der Standardabweichung als Fehlerbalken, die dunkel schattierten Mittelwerte sind Messwerte mit der mittleren 2σ -Messunsicherheit als Fehlerbalken.

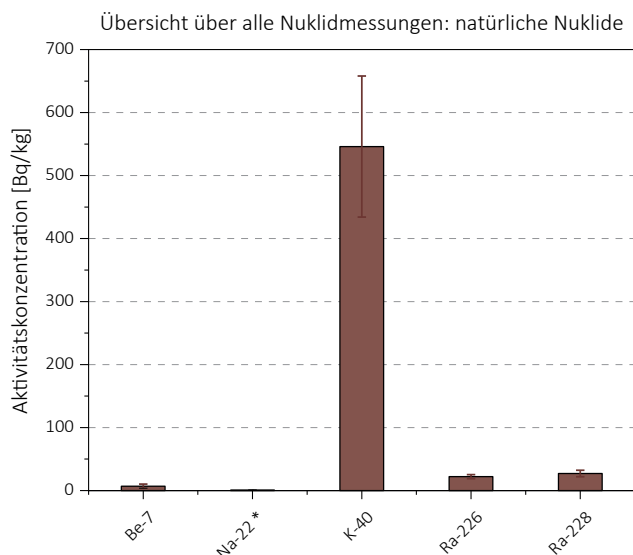


Abb. 4 :
 Übersicht pro Nuklid, gezeigt werden die Mittelwerte der gemessenen Aktivitätskonzentrationen. Die dunkel schattierten Mittelwerte sind Messwerte mit der mittleren 2σ -Messunsicherheit als Fehlerbalken. $^{22}\text{Na}^*$ konnte mit einer mittleren Nachweisgrenze von 0.7 Bq/kg in keiner Messung nachgewiesen werden.

In Abb. 5 sind beispielhaft für die durchgeführte Messkampagne die Verläufe der Resultate für die $^{239,240}\text{Pu}$ -Messungen über die drei Jahre Beobachtungszeitraum gezeigt. Die Messwerte bewegen sich nahe an den Nachweisgrenzen. Es konnten jedoch in allen Fällen gültige Messwerte festgestellt werden. Die gestrichelten Linien zeigen das Niveau der aus den Messungen bestimmten Nachweisgrenzen, welche vor allem von den Massen der Bodenproben und von der Messzeit abhängen.

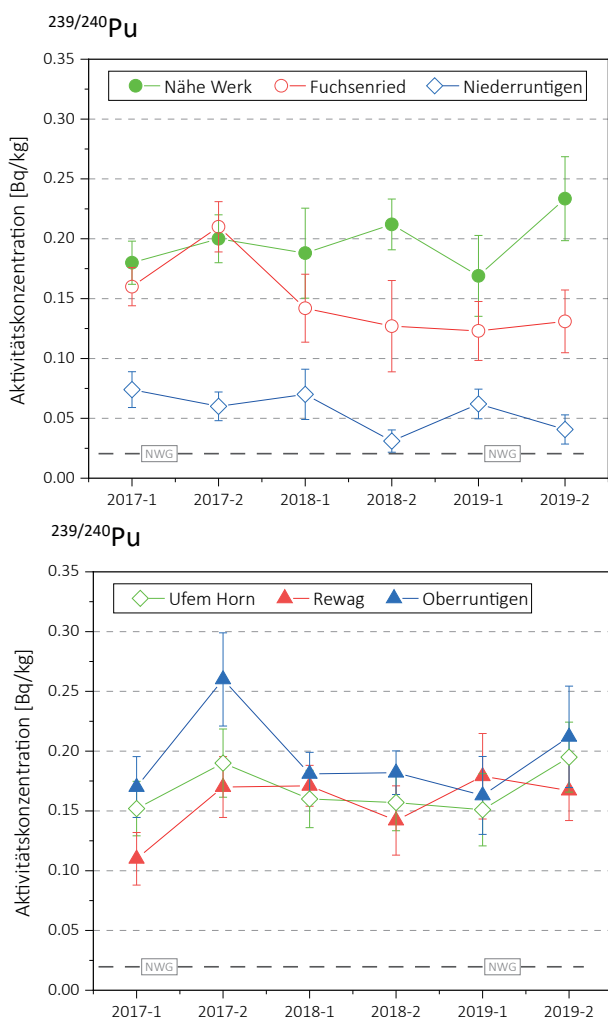


Abb. 5 : Verlauf der $^{239,240}\text{Pu}$ Messwerte pro Standort. Die zwei Nuklide haben praktisch dieselbe Alpha-Energie und werden in der Alpha-Spektrometrie gemeinsam erfasst.

Diskussion und Herkunftsabgleich

In diesem Kapitel werden die Resultate in einem grösseren Kontext miteinander verglichen. Es wurden diverse Analysen aufgrund charakteristischer Verhältnisse zwischen verschiedenen Nukliden erstellt. Die in der Einleitung vorgestellten Freisetzungen künstlich hergestellter Nuklide in die Umwelt umfassten jeweils ein Gemisch von Nukliden, die in einem bestimmten Verhältnis standen. Umgekehrt können die Verhältnisse anhand der gemessenen Aktivitäten wieder berechnet werden. Dies erlaubt dann in vielen Fällen die Zuordnung zu einem bestimmten Herkunftseignis. Eine vergleichbare Auswertung wurde bereits für das Gelände der Zwiilag in der Nähe des PSI 2002 durchgeführt.

Messergebnisse für ^{90}Sr und ^{137}Cs

In den analysierten Bodenproben zeigen mehr als die Hälfte aller Messungen für ^{90}Sr lediglich eine Nachweisgrenze von ca. 1.1 Bq/kg. Weitere Messungen zeigten Messwerte im selben Bereich um 1 Bq/kg. Die Resultate stimmen damit innerhalb der Messunsicherheit gut mit den Ergebnissen weiterer Bodenuntersuchungen des IRA überein (siehe Kapitel 2).

Für ^{137}Cs liegen die Mittelwerte pro Messstandort zwischen 3 und 10 Bq/kg (siehe Abbildung 6) und stimmen damit gut mit den für das Schweizer Mittelland erwarteten Werten überein (siehe z.B. BAG (2019) und Kapitel 2). Die im Vergleich zu ^{90}Sr höheren ^{137}Cs Werte liegen unter anderem darin begründet, dass nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl in der Schweiz praktisch kein ^{90}Sr deponiert wurde und dass Strontium im Boden mobiler ist als Cäsium (Corcho-Alvarado et al., 2016; Brimo et al., 2019).

Herkunft der Actinoide wie Pu-Isotope, ^{241}Am und ^{244}Cm

Mittels Alpha-Spektrometrie lassen sich sehr tiefe Aktivitätsspuren nachweisen. Es ist die empfindlichste Messmethode über die die Radioanalytik verfügt. Auch in der Schweiz und im Rahmen dieser Messkampagne konnten daher Spuren im einstelligen mBq/kg-Bereich gemessen werden. In dieser Grössenordnung liegen jedoch auch die Nachweisgrenzen der verwendeten Methoden und Probemengen.

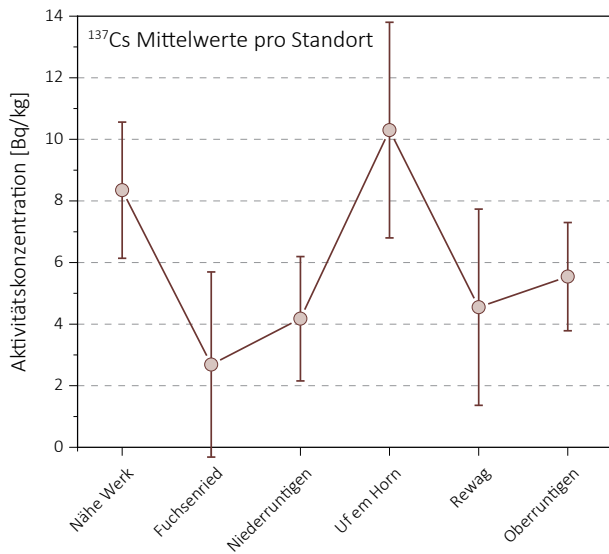


Abb. 6 : Mittelwerte für ^{137}Cs aufgelöst pro Standort. Der Gesamtmittelwert liegt bei 6 Bq/kg.

Deshalb muss bei der Interpretation sehr umsichtig vorgegangen werden. Die Aktivitätskonzentrationen in diesem Spurenbereich stellen keine Gefährdung für den Menschen dar. Die Interpretation fokussiert deshalb auf die Frage der Herkunft der nachgewiesenen Actinoide.

Es konnten Spuren von $^{239,240}\text{Pu}$ und ^{241}Am deutlich oberhalb der Nachweisgrenzen gemessen werden. Schwieriger präsentierte sich die Situation bei ^{238}Pu . Dessen Impulse bewegten sich gerade unterhalb der Nachweisgrenzen und es konnten nach Ausschluss von möglichen Interferenzen nur einzelne Proben mit einem gültigen Messwert rund um 3-5 mBq/kg gefunden werden. Bei ^{244}Cm war die Lage wieder eindeutig. Es war nicht zu detektieren, da sämtliche Impulse extrem tief lagen und nur Nachweisgrenzen resultierten.

Die im Rahmen dieser Messkampagne bestimmten Aktivitätskonzentrationen stimmen mit den Resultaten der jährlich beprobten Standorten rund um das Kernkraftwerk Mühleberg, die von der IRA Lausanne analysiert werden, recht gut überein (BAG, 2019). Damit stellt sich die Frage, woher diese geringen Spuren von Actinoiden stammen.

Ein einzelnes Nuklid alleine kann unter Umständen kaum zugeordnet werden. Jedoch wurden in Abhängigkeit verschiedener Ereignisse wie beispielsweise den Atombombentests in der

Atmosphäre von 1951 bis 1962 eine bestimmte Mischung von verschiedenen Nukliden freigesetzt, deren Verhältnisse heute unter Berücksichtigung des inzwischen stattgefundenen radioaktiven Zerfalls noch stets charakteristisch sind.

Trotz den Unterschieden in der Anzahl gültiger Messwerte wurde das gefundene mittlere Verhältnis $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ mit den Angaben aus der Literatur verglichen. Ein weiteres charakteristisches Verhältnis kann zwischen ^{241}Am und $^{239,240}\text{Pu}$ bestimmt werden. Die Abbildung 7 zeigt die Kombination der beiden Verhältnisse in einer Punktdarstellung.

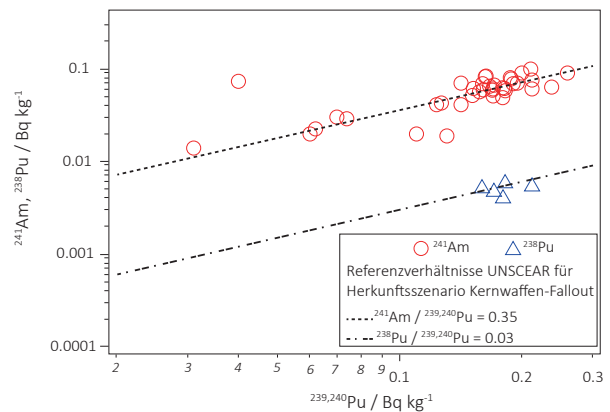


Abb. 7 : Im Gesamtbild fügen sich die Verhältnis-Werte mit experimentellen Abweichungen gut in die zu erwartenden Verhältnisse unter der Annahme, dass die gefundenen Actinoide aus den vergangenen Kernwaffentests stammen.

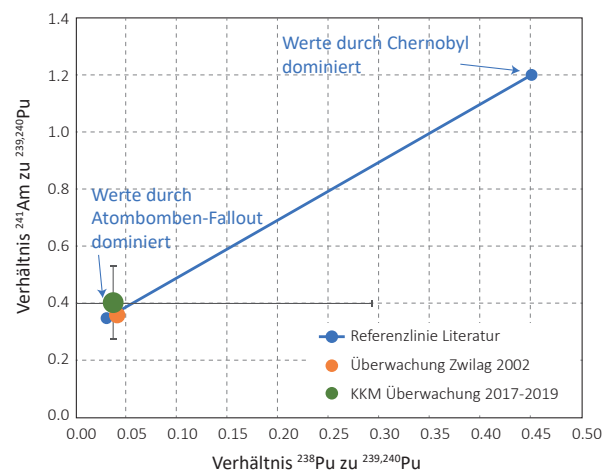


Abb. 8 : Charakteristische Punkte der Verhältnisse $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ und $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$.

Aus den Referenzdaten in Abbildung 8 (blau markierte Punkte) ist bekannt, siehe (Eikenberg, 2002) und (UNSCEAR, 2000), dass sich Actinoidverhältnisse von Böden, die durch die Immissionen des Reaktorunfalls in Chernobyl 1986 dominiert werden, stark von den charakteristischen Verhältnissen von nicht durch den Unfall betroffenen Böden unterscheiden. Würde der Actinoidengehalt eines Bodens durch beide Einflüsse in Kombination bestimmt, wäre eine Mischkombination ungefähr entlang der blauen Verbindungslinie zu erwarten. Der orange dargestellte Punkt wurde 2002 aus den Umgebungüberwachungsresultaten des Zwiilag-Geländes bestimmt. Die Daten aus Würtenlingen passten sehr gut zu der Annahme, dass die gefundenen Actinoiden hauptsächlich aus den Atombomben-Fallouts stammten.

Auch diese Auswertung bestätigt, dass aufgrund der Isotopenverhältnisse keine besonderen Aktivitäten von Actinoiden zusätzlich zu dem global seit den 50er Jahren aufgetretenen Bombentestfallout zu identifizieren sind.

Schlussfolgerungen

Es zeigt sich, dass die Böden rund um das Kernkraftwerk Mühleberg radiologisch sehr sauber sind. Kürzerlebige Nuklide wie das ^{134}Cs sind praktisch komplett abgeklungen, das Niveau der Actinoide wie Pu-Isotope ist allgemein tief und die ^{90}Sr Messwerte nähern sich ebenfalls den Nachweisgrenzen. Sogar ^{137}Cs ist nur noch im Mittel mit 6 Bq/kg präsent.

Aus den Auswertungen der Isotopenverhältnisse wird plausibel, dass die gefundenen Actinoide auf die atmosphärischen Kernwaffentests zurückzuführen sind. Die geringen Mengen von ^{137}Cs könnten zusätzlich auch aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl und aus der lokalen Freisetzung von Aerosolen aus dem KKM im Jahr 1986 stammen.

Derart tiefe Spuren von künstlichen Nukliden bilden ein sehr tiefes Hintergrundniveau, vor dem bereits geringfügige zusätzliche radiologische Immissionen zu messen sein würden.

Es konnten bei den untersuchten Nukliden keine Hinweise auf jüngere Immissionen von Actinoiden oder Spaltprodukten gefunden werden und auch keine Hinweise auf einen lokalen Einfluss durch den Betrieb des Kernkraftwerks Mühleberg. Dies stimmt mit der laufenden Überwachung anderer Kernkraftwerke in der Schweiz überein.

Referenzen und Literatur

- Atomteststoppabkommen, 1963. Vertrag über das Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Weltraum und unter Wasser, 2020. https://de.wikipedia.org/wiki/Vertrag_%C3%BCber_das_Verbot_von_Kernwaffenversuchen_in_der_Atmosph%C3%A4re,_im_Weltraum_und_unter_Wasser
- BAG, 2019. Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2018. Bundesamt für Gesundheit, Bern (Schweiz) www.bag.admin.ch/ura-jb.
- Brimo, K., Gonze, M.A., Pourcelot, L., 2019. Long term decrease of ¹³⁷Cs bioavailability in French pastures: Results from 25 years of monitoring. J. Environ. Radioact. 208.
- Cooper, J.R.R., K.; Sokhi, R. S., 2003. Radioactive releases in the environment : impact and assessment. John Wiley & Sons, Chichester.
- Corcho-Alvarado, J.A., Balsiger, B., Sahli, H., Astner, M., Byrde, F., Röllin, S., Holzer, R., Mosimann, N., Wüthrich, S., Jakob, A., Burger, M., 2016. Long-term behavior of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in the environment: Case studies in Switzerland. J. Environ. Radioact. 160, 54-63.
- Eikenberg, J.B., S.; Hitz, J.; Beer, H.; Gann, C.; Ruethi, M.; Wyer, L.; Ziegler, J., 2002. Spezialnuklid-Analysen für die Beweissicherung Zwiilag 1997-2001: Abschlussbericht der Immissionsmessungen, ASI Bericht Nr. 02-15.
- Eikenberg, J.B., S.; J.; Beer, H.; Gamm, C.; Ruethi, M.; Wyer, L.; Ziegler, J., 2002. Spezialnuklid-Analysen für die Beweissicherung Zwiilag 1997-2001: Abschlussbericht der Immissionsmessungen, ASI Bericht Nr. 02-15.
- Estier, S., 2019. Probenahmeplan Umwelt-Überwachung 2020. Bundesamt für Gesundheit, Sektion Umweltradioaktivität.
- GIS, 2020. Kartenmaterial GIS Kanton Bern. https://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub_basis&userprofile=geo&client=core&language=de
- Jäggi, M.E., Rüthi, M., Eikenberg, J., 2019. Fusion and chemical separation of Am, Pu and Sr from barite-concrete. J. Radioanal. Nucl. Chem. 322, 1279-1285.
- UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionising radiation. Report to the General Assembly. United Nations, Volume 1, Sources, Annex C.

2. Sol, herbe, sédiments et lait

A. Gurtner, P. Steinmann, S. Estier
Office fédéral de la santé publique, OFSP
Surveillance de la radioactivité de l'environnement URA

Mandat

En vue de pouvoir déterminer à postériori l'impact radiologique éventuel des travaux de démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg sur l'environnement, un programme de mesures complémentaires visant à établir un point zéro de la situation radiologique, en particulier pour certains radionucléides spéciaux, a été mis en place par l'IFSN et l'OFSP. Ce programme « point zéro démantèlement CNM » devant se dérouler avant le début des travaux de démantèlement, a été initié en 2017 pour une durée de 3 ans (2017-2019).

Le PSI a été mandaté par l'IFSN pour effectuer un programme de mesures complémentaires, comprenant en particulier l'analyse de radionucléides spéciaux (actinides, ^{55}Fe , ^{63}Ni , etc.) dans des échantillons de sols (voir chapitre 1).

Toutefois, il est important que les résultats de ce programme complémentaire puissent être comparés aux résultats de la surveillance de routine ayant été effectuée pendant toute la période d'exploitation de la centrale nucléaire de Mühleberg par la section URA (émetteurs gamma et tritium) et par l'IRA (actinides et ^{90}Sr). Au cours de ces trois années, le programme habituel de surveillance de la radioactivité dans l'environnement coordonné par l'OFSP a donc été adapté pour permettre cette comparaison. Ainsi, les prélèvements de sols et d'herbes ont eu lieu non seulement sur 3 des 4 sites usuels, mais également aux 4 sites supplémentaires définis pour le programme spécifique « Point zéro démantèlement CNM ». Par ailleurs, les actinides et le ^{90}Sr , mesurés dans le mélange des échantillons prélevés aux

différentes stations de prélèvement de sol, resp. d'herbe en surveillance de routine, ont été mesurés dans chaque échantillon individuel.

Par ailleurs, les sédiments prélevés à Hagneck/BE par l'EAWAG et analysés en routine par l'EAWAG (mesures mensuelles des émetteurs gamma) et l'IRA (mesure annuelle des actinides et du ^{90}Sr), ont également été transmis au PSI pour mesure annuelle du ^{63}Ni .

Outre les mesures complémentaires des échantillons de sol, d'herbe et de sédiments, le programme complémentaire prévoyait également un renforcement de la surveillance du lait; l'OFSP a ainsi mandaté le laboratoire cantonal de Berne pour effectuer des prélèvements trimestriels de lait, au lieu des prélèvements semestriels habituels. Par ailleurs, des mesures du tritium ont été effectués dans ces échantillons, en plus des mesures habituelles des émetteurs gamma et du ^{90}Sr .

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats des mesures complémentaires réalisées dans le cadre du programme de surveillance de la radioactivité de l'environnement coordonné par l'OFSP au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg entre 2017 et 2019. Les résultats complets du programme usuel de surveillance de la radioactivité de l'environnement, comprenant par exemple également la mesure des échantillons d'eaux de l'Aar, de plantes aquatiques ou encore du ^{14}C dans les feuillages sont disponibles dans les rapports annuels de l'OFSP "Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse" des années 2017, 2018 et 2019.

Sites de prélèvements

Sols et herbes

Les sites de prélèvements (fig 1) ont été définis en commun par l'IFSN, le PSI et l'OFSP. Parmi ceux-ci, 3 sites de mesure sont inclus dans le programme régulier «Programme de surveillance de l'environnement» de la section URA.

Dénomination	Coordonnées	Alt. [m]
Niederruntigen, ZLS *	587.839 / 202.420	484
REWAG *	585.802 / 202.550	467
Mühleberg, CNM	587.167 / 201.920	478
Mühleberg, Fuchsenried	587.718 / 201.587	570
Mühleberg, Ufem Horn *	586.400 / 202.036	562
Oberruntigen, Feld **	587.235 / 202.880	556

* dans le programme régulier de surveillance de l'environnement CNM.
 ** en 2019 le point de mesure Oberruntigen pour les échantillons de sols a dû être déplacé d'environ 140 m vers l'est par rapport aux campagnes de mesure de 2017/18, car le point initial n'était pas accessible pour des raisons agricoles.

Remarques sur les prélèvements et le traitement des échantillons.

Echantillons de sols

sols : périodicité annuelle, 6 carottes 0-5 cm de profondeur sur 2m² de surface, lyophilisation, tamisage 1mm

Echantillons d'herbes

herbes : périodicité bisannuelle, surface de prélèvement 1 m², séchage au four, broyage

Echantillons de laits

Les prélèvements ont été effectués par le laboratoire cantonal de Berne qui a également défini les sites de prélèvement (fig 2).

Lait : lyophilisation, spectrométrie gamma sur le résidu sec et détermination de l'activité du tritium (³H) sur le liquide récupéré.

Echantillons de sédiments

Les prélèvements ont été effectués par l'EAWAG qui a également défini le site de prélèvement (fig 3).

sédiments: (matières en suspension), séchage.

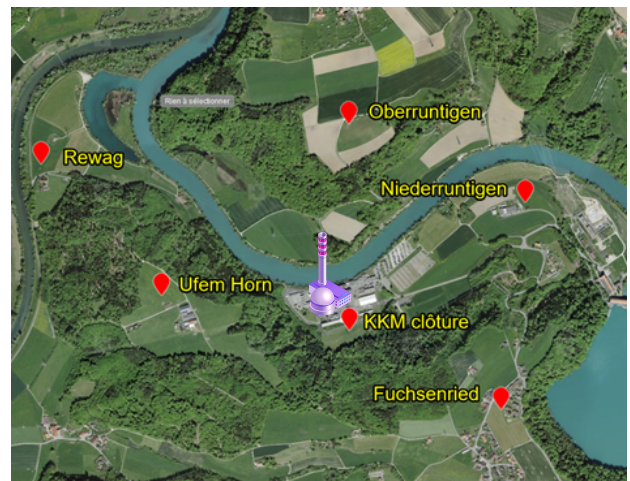


Figure 1 :
Emplacement des prélèvements de sols et d'herbes 2017/19.

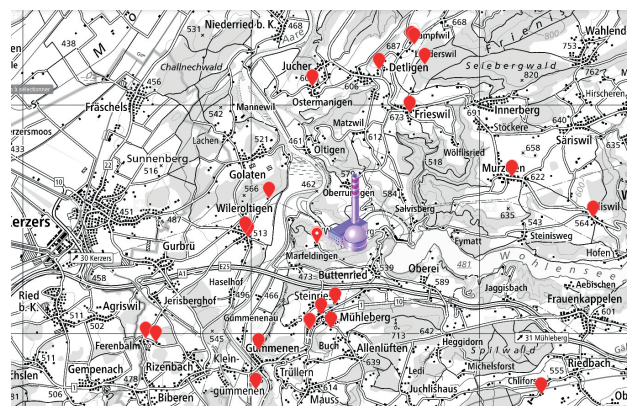


Figure 2 :
Emplacement des prélèvements de lait (KLBE) 2017/19.

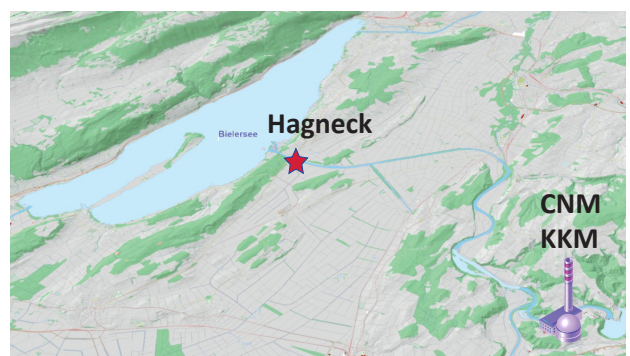


Figure 3 :
Emplacement des prélèvements de sédiments (EAWAG) 2017/19.

Résultats des mesures des échantillons de sols

Tableau 1. ⁷Be : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

⁷ Be (sol)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	4.4 ± 2.2	5.1 ± 2.9	10.0 ± 4.7	6.5
Rewag	< 8.6	8.6 ± 3.4	8.6 ± 4.0	8.6
Ufem Horn	< 6.8	7.0 ± 2.4	4.5 ± 2.6	6.1
Fuchsenried	< 4.8	4.1 ± 3.1	6.7 ± 3.1	5.2
Oberruntigen	12.0 ± 3.6	5.1 ± 2.5	8.0 ± 3.0	8.4
CNM (clôture)	12.0 ± 4.0	10.0 ± 3.8	6.0 ± 3.3	9.3
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				7.4

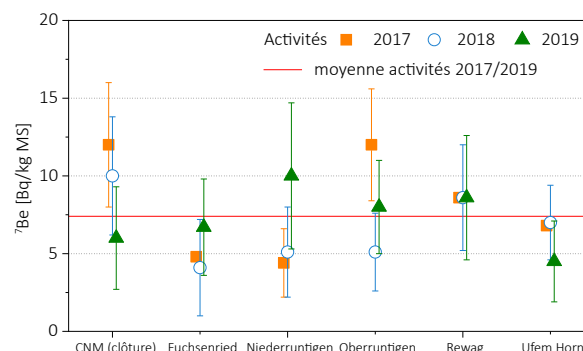
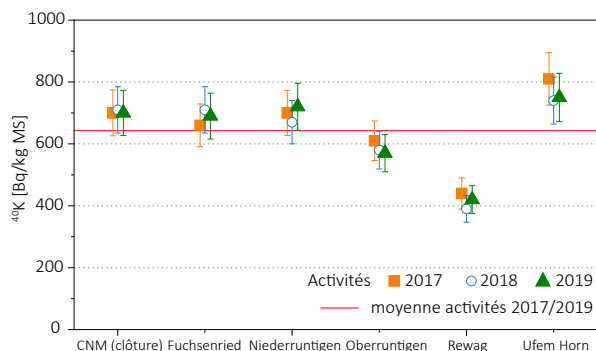


Tableau 2. ⁴⁰K : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

⁴⁰ K (sol)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	700 ± 73	670 ± 70	720 ± 76	697
Rewag	440 ± 50	390 ± 43	420 ± 45	417
Ufem Horn	810 ± 85	740 ± 76	750 ± 78	767
Fuchsenried	660 ± 69	710 ± 75	690 ± 74	687
Oberruntigen	610 ± 64	580 ± 61	570 ± 60	587
CNM (clôture)	700 ± 74	710 ± 75	700 ± 73	703
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				643



Remarque : les activités en ⁴⁰K sensiblement plus basses à la station Rewag (env. 400 Bq/kg MS) s'expliquent par une composition du sol très sablonneuse.

Tableau 3. ¹³⁷Cs : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

¹³⁷ Cs (sol)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	4.5 ± 0.6	3.5 ± 0.5	5.5 ± 0.8	4.5
Rewag	7.6 ± 1.1	5.9 ± 0.8	7.7 ± 1.0	7.1
Ufem Horn	14.0 ± 1.6	13.0 ± 1.4	13.0 ± 1.4	13.3
Fuchsenried	8.9 ± 1.1	4.2 ± 0.7	5.1 ± 0.6	6.1
Oberruntigen	12.0 ± 1.4	10.0 ± 1.1	9.2 ± 1.1	10.4
CNM (clôture)	12.0 ± 1.4	8.7 ± 1.1	12.0 ± 1.3	10.9
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				8.7

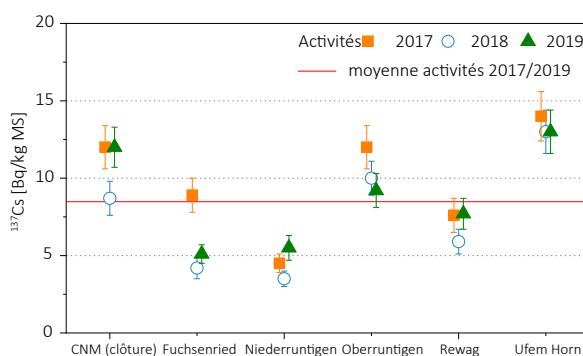


Tableau 4. ¹³⁴Cs, ¹³¹I et ⁶⁰Co : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

¹³⁴ Cs, ¹³¹ I, ⁶⁰ Co (sol)	2017			2018			2019		
	[Bq/kg] MS			[Bq/kg] MS			[Bq/kg] MS		
	¹³⁴ Cs	¹³¹ I	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³¹ I	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³¹ I	⁶⁰ Co
Niederruntigen	< 0.5	< 1.9	< 0.5	< 0.6	< 2.4	< 0.7	< 0.8	< 4.9	< 1.0
Rewag	< 0.9	< 2.7	< 1.1	< 0.7	< 1.2	< 0.9	< 0.7	< 5.9	< 0.8
Ufem Horn	< 0.7	< 2.2	< 0.8	< 0.5	< 0.9	< 0.6	< 0.5	< 4.7	< 0.6
Fuchsenried	< 0.6	< 1.2	< 0.6	< 0.7	< 2.9	< 1.0	< 0.5	< 4.5	< 0.5
Oberruntigen	< 0.6	< 1.8	< 0.8	< 0.6	< 2.2	< 0.7	< 0.6	< 4.4	< 0.6
CNM (clôture)	< 0.8	< 2.2	< 1.0	< 0.7	< 2.1	< 0.9	< 0.6	< 5.7	< 0.7
Moyenne	< 0.7	< 2.0	< 0.8	< 0.6	< 2.1	< 0.8	< 0.6	< 5.0	< 0.7

Résultats des mesures des échantillons de sols

Tableau 5. $^{239,240}\text{Pu}$: Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

$^{239,240}\text{Pu}$ (sol)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	0.046 ± 0.005	0.027 ± 0.007	0.062 ± 0.008	0.045
Rewag	0.194 ± 0.012	0.165 ± 0.013	0.164 ± 0.015	0.174
Ufem Horn	0.176 ± 0.012	0.179 ± 0.020	0.154 ± 0.014	0.170
Fuchsenried	0.178 ± 0.016	0.129 ± 0.011	0.116 ± 0.014	0.141
Oberruntigen	0.305 ± 0.017	0.262 ± 0.017	0.118 ± 0.019	0.228
CNM (clôture)	0.152 ± 0.009	0.145 ± 0.012	0.170 ± 0.018	0.156
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				0.152

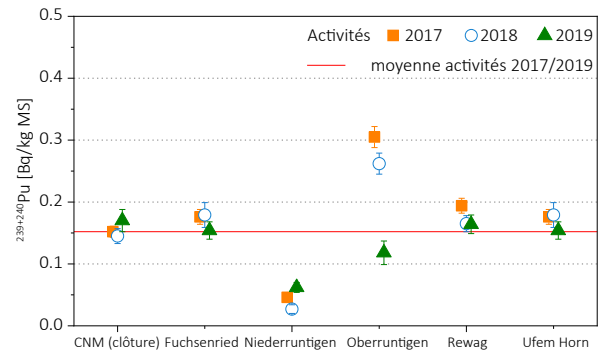


Tableau 6. Rapport isotopique $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$ dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

$^{241}\text{Am} / ^{239,240}\text{Pu}$	2017	2018	2019	Moy.
	Niederruntigen	0.34 ± 0.07	0.52 ± 0.14	0.59 ± 0.14
Rewag	0.41 ± 0.05	0.36 ± 0.04	0.50 ± 0.08	0.42
Ufem Horn	0.40 ± 0.05	0.44 ± 0.08	0.46 ± 0.07	0.43
Fuchsenried	0.39 ± 0.06	0.33 ± 0.08	0.44 ± 0.07	0.39
Oberruntigen	0.30 ± 0.04	0.39 ± 0.04	0.46 ± 0.05	0.38
CNM (clôture)	0.42 ± 0.05	0.28 ± 0.07	0.48 ± 0.07	0.39
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				0.42

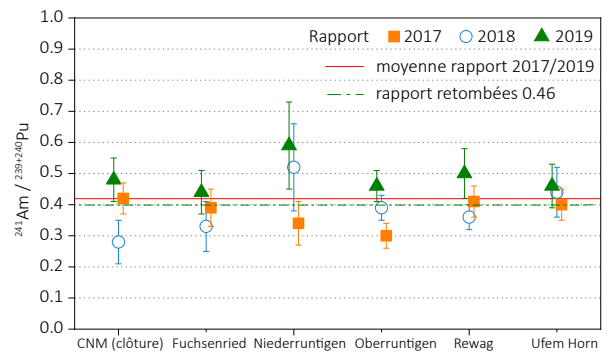


Tableau 7. Rapport isotopique $^{238}\text{Pu} / ^{239,240}\text{Pu}$ dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

$^{238}\text{Pu} / ^{239,240}\text{Pu}$	2017	2018	2019
	Niederruntigen	NS	NS
Rewag	0.023 ± 0.008	0.024 ± 0.008	0.031 ± 0.011
Ufem Horn	0.019 ± 0.008	NS	0.020 ± 0.009
Fuchsenried	0.029 ± 0.002	NS	0.028 ± 0.017
Oberruntigen	0.023 ± 0.006	0.019 ± 0.002	0.027 ± 0.007
CNM (clôture)	0.028 ± 0.002	NS	0.025 ± 0.002
Moyenne (tous les sites) 2017/2019 : 0.028			

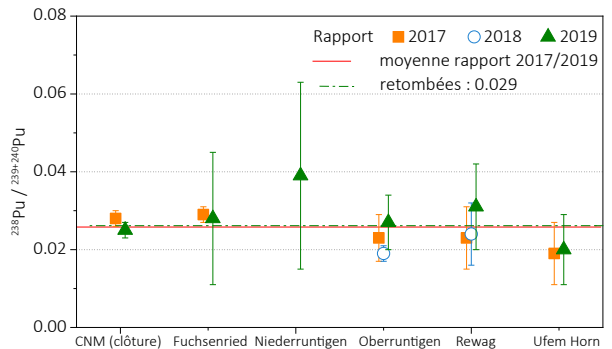
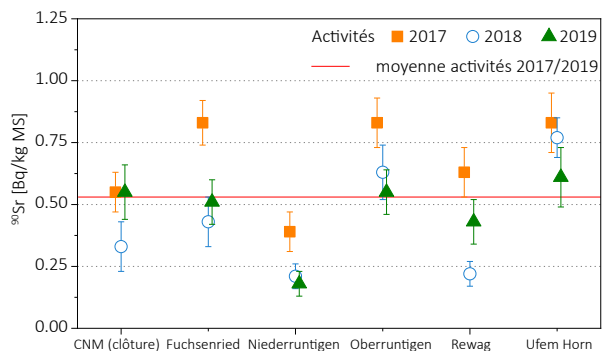


Tableau 8. ^{90}Sr : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sol (0-5 cm).

^{90}Sr (sol)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	0.39 ± 0.08	0.21 ± 0.05	0.18 ± 0.05	0.26
Rewag	0.63 ± 0.10	0.22 ± 0.05	0.43 ± 0.09	0.43
Ufem Horn	0.83 ± 0.12	0.77 ± 0.08	0.61 ± 0.12	0.74
Fuchsenried	0.83 ± 0.09	0.43 ± 0.10	0.51 ± 0.09	0.59
Oberruntigen	0.83 ± 0.10	0.63 ± 0.11	0.55 ± 0.09	0.67
CNM (clôture)	0.55 ± 0.08	0.33 ± 0.10	0.55 ± 0.11	0.48
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				0.53



Evaluation des résultats pour les échantillons de sols

Dans les sols suisses, la radioactivité d'origine naturelle (isotopes naturels issus des séries de désintégration de l'uranium et du thorium ainsi que le potassium-40 (^{40}K)) prédomine nettement. La présence du ^{90}Sr et des actinides Pu et Am est principalement due aux retombées des essais nucléaires atmosphériques des années soixante. Cette déposition ayant été amenée au sol par les précipitations, les régions connaissant une pluviosité plus importante montrent les activités les plus élevées. Ainsi, les activités en ^{90}Sr sont dans une gamme de 0.1 à 0.6 Bq/kg sur le plateau suisse tandis que des valeurs supérieures à 1 Bq/kg peuvent être observées au Tessin ou sur les sites alpins [1]. La même tendance est observée pour les actinides, avec des activités inférieures à 0.3 Bq/kg pour le plutonium et à 0.15 Bq/kg pour l'américium sur le plateau suisse, alors que ces valeurs augmentent avec l'altitude. Les rapports $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$ proches de 0.46 confirment que cette contamination est due aux essais nucléaires des années soixante [2].

La situation est plus complexe dans le cas du ^{137}Cs , car le passage du nuage radioactif émis lors de l'accident de Tchernobyl en 1986 a provoqué une déposition supplémentaire dont la répartition géographique n'est pas uniforme. De fortes précipitations s'étant produites au Tessin lors du passage du nuage, c'est dans cette région que les dépôts les plus importants ont eu lieu et que les plus fortes activités sont toujours mesurées. Le plateau suisse, quant à lui, a été moins touché par les retombées de l'accident de Tchernobyl. Toutefois, au voisinage proche de la centrale nucléaire de Mühleberg une part du ^{137}Cs provient d'une troisième origine: un rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère par la CNM en septembre 1986. L'activité rejetée avait été estimée à 11 GBq (50% de ^{134}Cs , 40% de ^{137}Cs , 7% de ^{60}Co et quelques 3% de ^{65}Zn) et était donc restée inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. Les mesures réalisées à l'époque avaient montré que l'impact de ce rejet sur l'environnement était très localisé [3]. Les dépôts de ^{137}Cs les plus élevés provenant de la CNM étaient situés dans les deux directions principales des vents: jusqu'à 1 km de distance en direction ouest-sud-ouest (Ufer Horn) et jusqu'à 2 km de distance en direction est-nord-est. Dans ce périmètre, les retombées de césium provenant de la CNM ont pu être 2 à 5 fois supérieures à celles de Tchernobyl. Au-delà les dépôts de césium sur le sol dus à Tchernobyl prédominent.

De manière générale, les résultats 2017, 2018 et 2019 (voir tableaux et figures 1 à 8) sont conformes à ceux

obtenus par le passé. Ainsi, c'est pour le ^{40}K , un des trois isotopes constituant le potassium naturel, que l'activité observée est la plus élevée, avec des valeurs plus basses au site de Rewag en raison de la nature particulière du sol. Les activités en ^{137}Cs , ^{90}Sr , Pu et Am étaient dans la gamme des valeurs observées pour les sols prélevés sur le plateau, avec des activités plus faibles à Niderurtingen; les différences observées d'un site à l'autre illustrant la disparité du dépôt consécutif aux essais nucléaires et potentiellement certaines activités agricoles, comme le labourage en profondeur.

En ce qui concerne les actinides (voir tableaux et figures 5 à 7), la mesure du rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ et du rapport isotopique $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$ permet de déterminer l'origine de la contamination par comparaison avec les mêmes rapports des retombées des essais nucléaires des années soixante. Ces rapports doivent être proches de 0.029 pour $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ et de 0.46 pour $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$ si on attribue la contamination aux retombées radioactives des essais nucléaires. Le rapport $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$ évolue avec le temps car ^{241}Am est issue de la désintégration de ^{241}Pu (émetteur bêta non mesuré dans cette étude, de période 14.4 ans) et, selon les équations de Bateman, atteindra son maximum pour les retombées des essais nucléaires des années soixante, vers 2035. Le combustible irradié d'une centrale nucléaire montre en général des rapports $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ et $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$ supérieurs à 1. En 2019, l'IRA a fait un effort particulier pour quantifier le ^{238}Pu dans chaque échantillon de sol, et répété les analyses un certain nombre de fois afin d'évaluer la reproductibilité des mesures pour ce type d'échantillon. Les résultats montrent que, dans la limite des incertitudes de mesures, les valeurs indiquées sont très reproductibles entre les aliquotes de mesures de 50 g chacun. On constate toutefois que les activités de ^{238}Pu , dont les valeurs sont très basses et proches de 5 mBq/kg MS de sol, sont entachées d'une incertitude voisine de 50%. Celle-ci se reporte sur le rapport $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$, qui devient très incertain. Néanmoins, la moyenne des rapports $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ 2019 pour 6 mesures avec ^{238}Pu quantifiable au-dessus de la limite de détection est de 0.028, soit très proche de ce qui est attendu pour une contamination provenant uniquement des essais nucléaires des années soixante. Malgré une forte incertitude, ce rapport reste donc un excellent indicateur et nous maintiendrons la mesure de ^{238}Pu dans les sols comme objectif, nonobstant la difficulté de la mesure.

Résultats des mesures des échantillons d'herbes

Tableau 9. ⁷Be : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de végétation.

⁷ Be (herbe)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	164 ± 23	236 ± 26	328 ± 36	243
Rewag	152 ± 20	234 ± 27	267 ± 29	218
Ufem Horn	127 ± 18	230 ± 26	175 ± 20	177
Fuchsenried	170 ± 20	81 ± 13	307 ± 35	186
Oberruntigen	170 ± 22	190 ± 21	270 ± 31	210
CNM (clôture)	230 ± 28	275 ± 31	331 ± 37	279
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				219

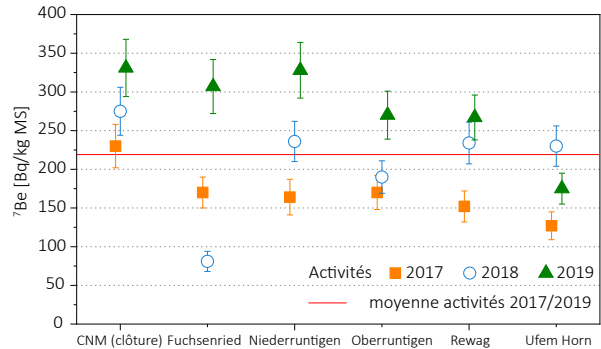


Tableau 10. ⁴⁰K : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de végétation.

⁴⁰ K (herbe)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	715 ± 79	1'110 ± 119	950 ± 103	925
Rewag	935 ± 97	780 ± 87	875 ± 91	863
Ufem Horn	1'305 ± 134	1'150 ± 120	880 ± 96	1'112
Fuchsenried	1'400 ± 150	1'200 ± 130	1'045 ± 113	1'215
Oberruntigen	1'100 ± 120	840 ± 90	810 ± 88	917
CNM (clôture)	810 ± 89	925 ± 99	825 ± 90	853
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				981

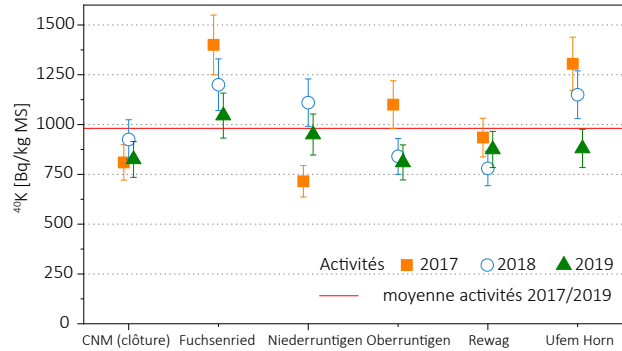


Tableau 11. ¹³⁷Cs : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de végétation.

¹³⁷ Cs (herbe)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	< 1.0	< 0.9	< 0.9	< 0.9
Rewag	< 0.8	0.9 ± 0.8	< 0.9	0.9
Ufem Horn	1.0 ± 0.5	< 0.9	< 0.9	0.9
Fuchsenried	< 1.1	< 1.3	< 1.2	< 1.2
Oberruntigen	0.9 ± 0.6	< 0.9	< 1.2	1.0
CNM (clôture)	0.7 ± 0.6	< 1.1	0.9 ± 0.3	0.9
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				1.0

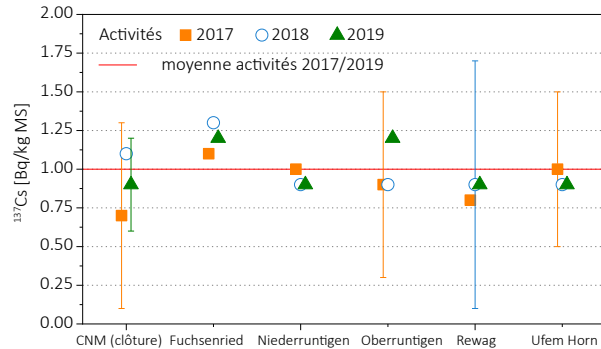
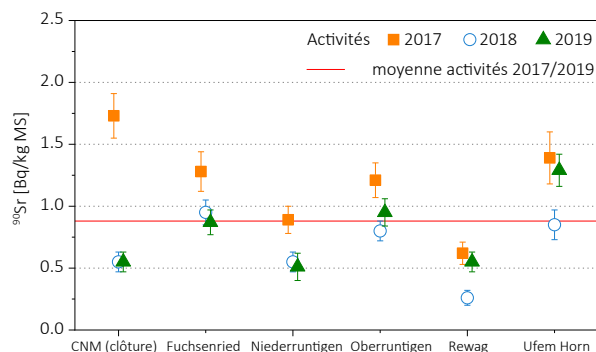


Tableau 12. ¹³⁴Cs, ⁶⁰Co : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de végétation.

¹³⁴ Cs, ⁶⁰ Co (herbe)	2017		2018		2019	
	[Bq/kg] MS		[Bq/kg] MS		[Bq/kg] MS	
	¹³⁴ Cs	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	⁶⁰ Co
Niederruntigen	< 1.0	< 1.2	< 0.9	< 1.1	< 0.9	< 1.1
Rewag	< 0.8	< 0.9	< 1.3	< 1.7	< 0.8	< 1.0
Ufem Horn	< 1.0	< 1.2	< 0.8	< 1.0	< 0.8	< 0.9
Fuchsenried	< 1.1	< 1.4	< 1.2	< 1.8	< 1.1	< 1.3
Oberruntigen	< 1.3	< 1.8	< 0.8	< 1.0	< 1.1	< 1.2
CNM (clôture)	< 1.2	< 1.5	< 1.0	< 1.2	< 1.0	< 1.1
Moyenne	< 1.1	< 1.3	< 1.0	< 1.3	< 1.0	< 1.1

Tableau 13. ^{90}Sr : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de végétation.

^{90}Sr (herbe)	2017	2018	2019	Moy.
	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
Niederruntigen	0.89 ± 0.11	0.55 ± 0.08	0.51 ± 0.11	0.65
Rewag	0.62 ± 0.09	0.26 ± 0.06	0.55 ± 0.08	0.48
Ufem Horn	1.39 ± 0.21	0.85 ± 0.12	1.29 ± 0.13	1.18
Fuchsenried	1.28 ± 0.16	0.95 ± 0.10	0.87 ± 0.10	1.03
Oberruntigen	1.21 ± 0.14	0.80 ± 0.08	0.95 ± 0.11	0.99
CNM (clôture)	1.73 ± 0.18	0.55 ± 0.08	0.55 ± 0.08	0.94
Moyenne (tous les sites) 2017/2019				0.88



Evaluation des résultats pour les échantillons d'herbe

Les résultats des mesures de la radioactivité dans l'herbe sont représentés dans les tableaux et figures 9 à 13.

On constate que la radioactivité de l'herbe est dominée par le ^{40}K , suivi du ^7Be , qui est formé par l'interaction du rayonnement cosmique (protons) avec les couches supérieures de l'atmosphère et déposé sur le sol par la pluie. Les activités en ^{60}Co et ^{134}Cs sont restées inférieures à la limite de détection. L'activité en ^{90}Sr de l'herbe peut varier fortement selon la période de coupe pour un même site de prélè-

vement, l'incorporation de certains éléments (Ca, K) et radioéléments (^{137}Cs et ^{90}Sr) étant dépendante de la croissance végétale. Toutefois, l'activité de l'herbe est principalement fonction de celle du sol.

De manière générale, les résultats des mesures réalisées dans les échantillons d'herbe collectés entre 2017 et 2019 sur les 7 sites du voisinage de Mühleberg ne se distinguent pas de ceux observés dans les échantillons d'herbe collectés ailleurs sur le plateau suisse.

Résultats des mesures des prélèvements de sédiments

Tableau 14. Activité ⁷Be, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ¹³¹I, ⁶⁰Co et ⁵⁴Mn en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sédiments à Hagneck (mesures EAWAG).

	Prélèvement		⁷ Be	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	¹³¹ I	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn
			[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
2017	03.01.2017	01.02.2017	262 ± 16.5	468 ± 25.3	5.6 ± 0.06	< 3.9	< 440	3.2 ± 0.9	< 3.6
	01.02.2017	28.02.2017	225 ± 11.9	449 ± 18.4	4.0 ± 0.07	< 3.0	< 239	< 3.1	< 2.6
	28.02.2017	04.04.2017	82 ± 4.8	415 ± 58.1	1.9 ± 0.01	< 0.7	< 164	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.1
	04.04.2017	03.05.2017	263 ± 11.0	502 ± 15.6	4.6 ± 0.03	< 1.9	< 487	< 2.2	< 1.7
	03.05.2017	30.05.2017	114 ± 4.7	588 ± 15.3	2.8 ± 0.01	< 0.9	< 243	< 0.7	< 0.8
	30.05.2017	06.07.2017	66 ± 3.8	447 ± 3.8	1.6 ± 0.01	< 0.5	< 75	0.3 ± 0.1	< 0.3
	06.07.2017	10.08.2017	85 ± 3.9	382 ± 14.1	1.1 ± 0.01	< 0.7	< 41	< 0.4	< 0.5
	10.08.2017	06.09.2017	200 ± 11.4	602 ± 24.1	2.4 ± 0.01	< 1.1	< 370	1.4 ± 0.2	< 0.4
	06.09.2017	12.10.2017	407 ± 25.6	477 ± 20.1	2.6 ± 0.04	< 2.1	< 538	3.1 ± 0.5	2.4 ± 0.3
	12.10.2017	14.11.2017	167 ± 6.5	424 ± 11.9	2.6 ± 0.02	< 1.3	< 292	< 1.0	< 0.7
	14.11.2017	20.12.2017	171 ± 7.3	496 ± 13.4	2.8 ± 0.03	< 1.5	< 430	< 1.3	< 1.1
20.12.2017	11.01.2018	14 ± 2.5	426 ± 10.7	0.5 ± 0.20	< 0.8	< 1760	< 0.8	< 0.7	
2018	11.01.2018	05.02.2018	19 ± 3.2	359 ± 9.0	0.6 ± 0.10	< 0.5	< 79	< 0.5	< 0.5
	05.02.2018	09.03.2018	38 ± 3.4	383 ± 11.9	1.0 ± 0.10	< 0.9	< 57	< 0.8	< 0.7
	09.03.2018	12.04.2018	54 ± 4.0	572 ± 14.3	2.0 ± 0.20	< 1.5	< 62	< 1.2	< 1.1
	12.04.2018	02.05.2018	17 ± 2.0	495 ± 13.0	1.0 ± 0.08	< 0.4	< 87	< 0.4	< 0.3
	02.05.2018	04.06.2018	41 ± 3.1	424 ± 9.9	< 0.2	< 0.2	< 8	< 0.2	< 0.2
	04.06.2018	02.07.2018	57 ± 4.1	393 ± 10.1	< 0.2	< 0.3	< 14	< 0.3	< 0.2
	02.07.2018	25.07.2018	223 ± 7.4	405 ± 10.9	2.2 ± 0.10	< 0.5	< 18	< 0.3	< 0.3
	24.08.2018	02.10.2018	367 ± 11.6	406 ± 13.9	3.3 ± 0.20	< 0.5	< 12	2.8 ± 0.3	1.7 ± 0.1
	02.10.2018	02.11.2018	400 ± 12.8	420 ± 12.5	3.1 ± 0.30	< 0.6	< 4	3.0 ± 0.3	1.8 ± 0.3
	02.11.2018	05.12.2018	244 ± 8.8	396 ± 11.8	3.7 ± 0.30	< 0.5	< 28	1.1 ± 0.3	1.0 ± 0.2
05.12.2018	08.01.2019	76 ± 2.9	413 ± 15.1	1.7 ± 0.09	< 0.6	< 14	< 0.5	< 0.9	
2019	09.01.2019	06.02.2019	22 ± 1.2	408 ± 10.4	0.6 ± 0.06	< 0.2	< 3	< 0.6	0.2 ± 0.1
	05.03.2019	29.03.2019	124 ± 6.0	401 ± 13.6	1.5 ± 0.30	< 0.6	< 30	< 0.5	0.6 ± 0.2
	24.04.2019	27.05.2019	23 ± 1.3	312 ± 7.6	0.8 ± 0.07	< 0.3	< 6	< 0.1	< 0.3
	27.05.2019	28.06.2019	38 ± 1.5	387 ± 11.2	0.9 ± 0.10	< 0.2	< 1	< 0.2	< 0.2
	28.06.2019	31.07.2019	63 ± 3.4	368 ± 15.5	0.9 ± 0.07	< 0.3	< 9	< 0.3	< 0.3
	31.07.2019	06.09.2019	32 ± 2.5	403 ± 9.8	0.7 ± 0.05	< 0.2	< 3	< 0.2	< 0.2
	06.09.2019	03.10.2019	30 ± 1.1	425 ± 13.3	0.4 ± 0.03	< 0.1	< 1	< 0.1	< 0.1
	03.10.2019	01.11.2019	77 ± 2.7	370 ± 10.1	0.7 ± 0.07	< 0.3	< 2	< 0.3	0.4 ± 0.1
	01.11.2019	27.11.2019	92 ± 6.8	368 ± 20.9	1.4 ± 0.20	< 0.8	< 17	< 0.9	< 0.8
27.11.2019	08.01.2020	91 ± 3.8	406 ± 13.8	1.4 ± 0.10	< 0.4	< 8	< 0.4	< 0.4	

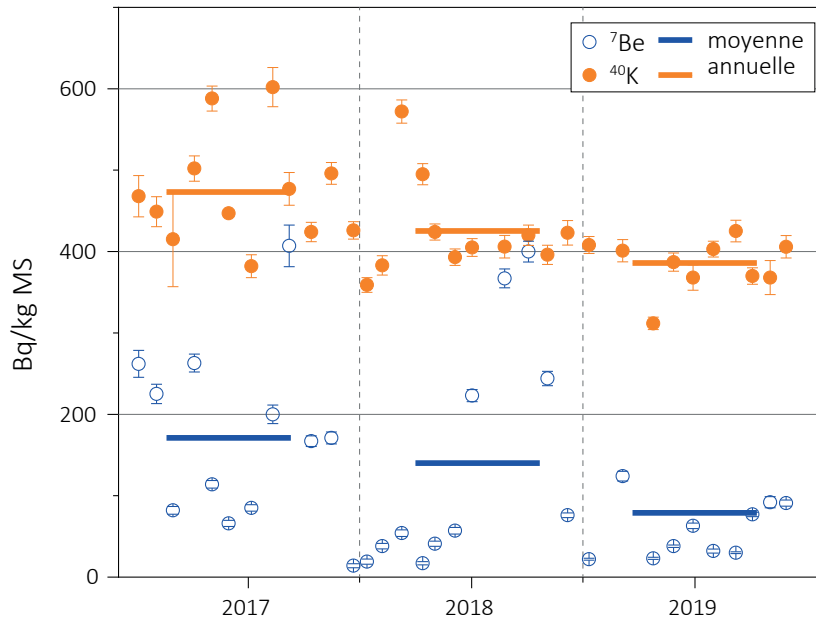


Figure 14a. Activité ${}^7\text{Be}$, ${}^{40}\text{K}$ en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sédiments à Hagneck.

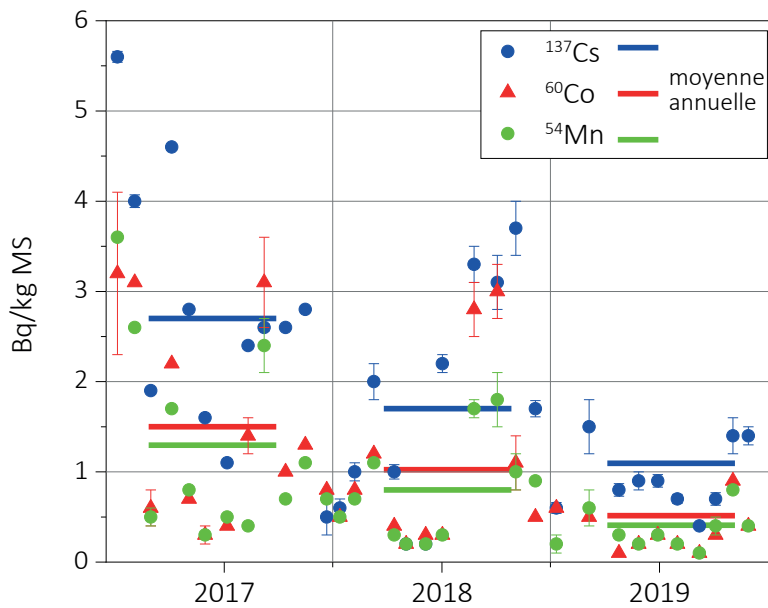


Figure 14b. Activité ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{60}\text{Co}$ et ${}^{54}\text{Mn}$ en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sédiments à Hagneck.

Evaluation des résultats pour les échantillons de sédiments

Dans le cadre du programme national de surveillance de la radioactivité dans l'environnement, l'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons de sédiments (particules en suspension) prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval des centrales nucléaires. Ces échantillons sont ensuite envoyés à l'IRA qui mesure le ${}^{90}\text{Sr}$ et des actinides dans le mélange des échan-

tillons, pour obtenir une valeur moyenne annuelle. Dans le cadre du programme de surveillance renforcé, les échantillons de sédiments prélevés à Hagneck/BE par l'EAWAG ont également été envoyés au PSI pour la mesure du ${}^{63}\text{Ni}$. Les résultats de ces mesures pour les années 2017 à 2019 sont présentés dans les tableaux 14 et 15 et figures 14a, 14b et 15.

Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1 il y a une dizaine d'années, la majeure partie des produits d'activation tels que le

Tableau 15. Activité ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{90}Sr en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sédiments à Hagneck.

Prélèvement		^{238}Pu	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$	^{90}Sr	^{63}Ni
		[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS		[Bq/kg] MS	[Bq/kg] MS
mesures IRA							mesures PSI
10.08.2017	06.09.2017	< 0.004	0.041 ± 0.005	0.020 ± 0.004	0.477 ± 0.105	0.200 ± 0.074	< 2
11.01.2018	05.02.2018	< 0.003	0.032 ± 0.004	0.012 ± 0.003	0.388 ± 0.106	0.151 ± 0.151	< 2
09.01.2019	06.02.2019	< 0.004	0.020 ± 0.003	0.009 ± 0.003	0.472 ± 0.163	0.244 ± 0.094	< 2

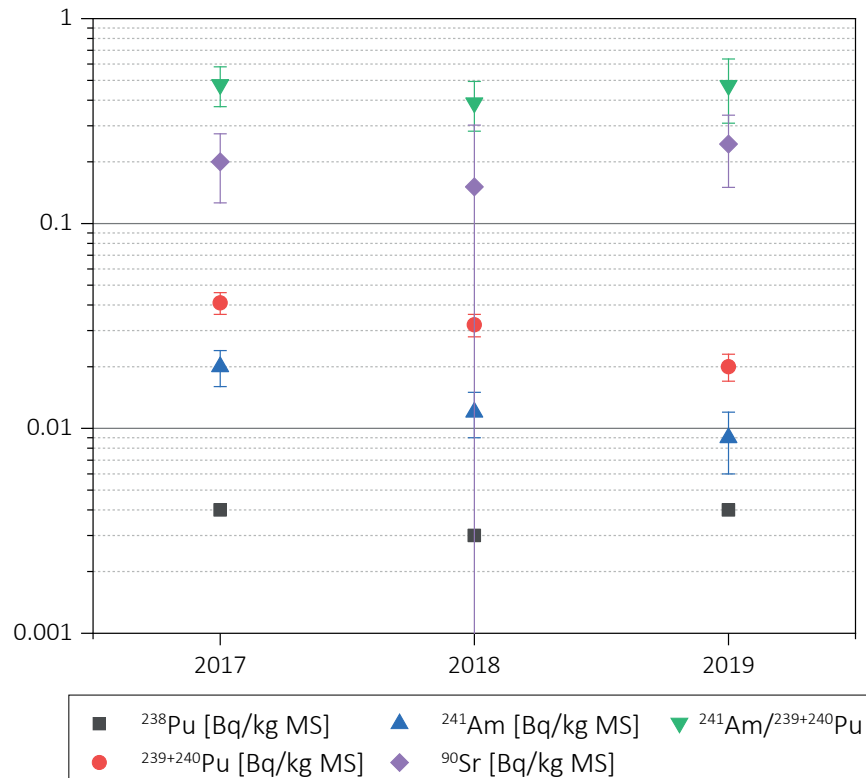


Figure 15. Activité ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{90}Sr en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de sédiments à Hagneck.

^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co était rejetée dans les eaux fluviales par la centrale de Mühleberg. Le ^{137}Cs , quant à lui, est essentiellement dû à la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes atomiques des années 60; il n'existe ainsi pas de corrélation, pour cet isotope, entre les activités rejetées par les centrales et les valeurs mesurées dans les eaux par exemple [4]. Depuis 2016 les activités rejetées (hors tritium) par la CN de Mühleberg ont à leur tour significativement baissé. Cette diminution se reflète dans les résultats des mesures des émetteurs gamma effectuées par l'EAWAG entre 2017 et 2019 dans les échantillons de sédiments (voir figure 14b). En 2019, les rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de KKM ont été encore plus faibles.

Ainsi, hormis le ^{137}Cs , présent dans tous les échantillons et qui provient essentiellement de l'érosion des sols, seules des traces sporadiques de ^{54}Mn ont pu être mises en évidence dans les sédiments prélevés à Hagneck, en 2019.

Les résultats des mesures de $^{239+240}\text{Pu}$ et de ^{241}Am effectuées par l'IRA ont montré que les rapports isotopiques $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ observés sont proches de 0.4, (voir tableau et figure 15) indiquant, comme pour les échantillons de sols une contribution très majoritaire des retombées des essais nucléaires des années 60. Le ^{90}Sr , tout comme les actinides et le ^{137}Cs , provient majoritairement de l'érosion des sols et non des effluents liquides de la centrale.

Résultats des mesures des prélèvements de lait

Tableau 16. ⁷Be, ⁴⁰K, ¹³¹I, ¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs: Activité en Bq/l dans les prélèvements de lait.

2017									
			Bq/l						
Date	Site	frais/sec	⁷ Be	⁴⁰ K	±	⁶⁰ Co	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
16.03.17	Wileroltigen	7.73	< 1.1	47	5.5	< 0.2	< 0.3	< 0.1	< 0.1
16.03.17	Deltigen	7.93	< 0.9	41	4.8	< 0.1	< 0.2	< 0.1	< 0.1
30.05.17	Deltigen	8.53	< 0.9	44	4.9	< 0.1	< 0.3	< 0.1	< 0.1
30.05.17	Deltigen	8.49	< 1.2	38	4.7	< 0.1	< 0.3	< 0.1	< 0.1
21.08.17	Wileroltigen	8.16	< 1.4	43	5.3	< 0.2	< 0.4	< 0.2	< 0.2
21.08.17	Wileroltigen	8.20	< 0.9	45	5.1	< 0.1	< 0.3	< 0.1	< 0.1
13.11.17	Mühleberg	8.73	< 1.3	39	4.7	< 0.1	< 0.5	< 0.1	< 0.2
13.11.17	Mühleberg	8.33	< 0.8	41	4.7	< 0.1	< 0.3	< 0.1	< 0.1

2018									
			Bq/l						
Date	Site	frais/sec	⁷ Be	⁴⁰ K	±	⁶⁰ Co	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
06.03.18	Frieswil	8.62	< 0.8	41	4.7	< 0.1	< 0.2	< 0.1	< 0.1
06.03.18	Mühleberg	7.81	< 1.4	40	5.3	< 0.2	< 0.4	< 0.2	< 0.2
22.05.18	Ferenbalm	8.46	< 1.3	45	5.1	< 0.1	< 1.7	< 0.1	< 0.1
22.05.18	Gümmenen	7.72	< 1.0	40	4.8	< 0.1	< 0.6	< 0.1	< 0.1
22.08.18	Mühleberg	8.49	< 0.9	40	4.5	< 0.1	< 0.4	< 0.1	< 0.1
22.08.18	Mühleberg	8.14	< 1.0	42	4.9	< 0.1	< 0.5	< 0.1	< 0.1
19.11.18	Gümmenen	8.07	< 1.2	36	4.7	< 0.2	< 0.3	< 0.1	< 0.2
19.11.18	Frieswil	8.31	< 1.1	43	5.0	< 0.2	< 0.3	< 0.1	< 0.1

2019									
			Bq/l						
Date	Site	frais/sec	⁷ Be	⁴⁰ K	±	⁶⁰ Co	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
04.03.19	Gümmenen	7.98	< 1.3	39	5.0	< 0.2	< 0.3	< 0.2	< 0.2
04.03.19	Murzelen	7.93	< 1.2	41	4.9	< 0.1	< 0.5	< 0.1	< 0.1
20.05.19	Mühleberg	7.74	< 1.3	42	5.5	< 0.2	< 0.3	< 0.2	< 0.2
20.05.19	Deltigen	7.71	< 1.2	45	5.4	< 0.1	< 0.4	< 0.1	< 0.1
19.08.19	Bern	7.70	< 1.4	36	4.8	< 0.2	< 0.5	< 0.1	< 0.2
19.08.19	Wohlen	8.02	< 1.0	39	4.6	< 0.1	< 0.3	< 0.1	< 0.1
18.11.19	Ferenbalm	8.15	< 1.0	43	5.0	< 0.1	< 0.2	< 0.1	< 0.1
18.11.19	Detligen	7.60	< 1.0	46	6.0	< 0.2	< 0.4	< 0.2	< 0.4

Tableau 17. ⁹⁰Sr : Activité en Bq/kg MS (matière sèche) dans les prélèvements de lait.

2017			2018			2019		
Site	Date	[Bq/kg] MS	Site	Date	[Bq/kg] MS	Site	Date	[Bq/kg] MS
Wileroltigen	16.03	0.05 ± 0.01	Frieswil	06.03	0.03 ± 0.01	Gümmenen	06.03	0.04 ± 0.01
Deltigen	16.03	0.05 ± 0.01	Mühleberg	06.03	0.03 ± 0.01	Murzelen	06.03	0.05 ± 0.01
Deltigen A	30.05	0.04 ± 0.01	Ferenbalm	22.05	0.03 ± 0.01	Mühleberg	20.05	0.04 ± 0.01
Deltigen B	30.05	0.05 ± 0.01	Gümmenen	22.05	0.03 ± 0.01	Deltigen	20.05	0.03 ± 0.01
Wileroltigen A	21.08	0.04 ± 0.01	Mühleberg A	20.08	0.03 ± 0.01	Bern	19.08	0.04 ± 0.01
Wileroltigen B	21.08	0.04 ± 0.01	Mühleberg B	20.08	0.03 ± 0.01	Wohlen	19.08	0.03 ± 0.01
Mühleberg A	13.11	0.13 ± 0.03	Gümmenen	19.11	0.05 ± 0.01	Ferenbalm	18.11	0.05 ± 0.01
Mühleberg B	13.11	0.09 ± 0.02	Frieswil	19.11	0.05 ± 0.01	Deltigen	18.11	0.04 ± 0.01

A, B : échantillons de fermes différentes

Tableau 18. ³H : Activité en Bq/l dans les prélèvements de lait.

2017			2018			2019		
Site	Date	[Bq/l]	Site	Date	[Bq/l]	Site	Date	[Bq/l]
Wileroltigen	16.03	< 5.0	Frieswil	06.03	< 5.0	Gümmenen	06.03	< 5.0
Deltigen	16.03	< 5.0	Mühleberg	06.03	< 5.0	Murzelen	06.03	< 5.0
Deltigen A	30.05	< 5.0	Ferenbalm	22.05	< 5.0	Mühleberg	20.05	< 5.0
Deltigen B	30.05	< 5.0	Gümmenen	22.05	< 5.0	Deltigen	20.05	< 5.0
Wileroltigen A	21.08	< 5.0	Mühleberg A	20.08	< 5.0	Bern	19.08	< 5.0
Wileroltigen B	21.08	< 5.0	Mühleberg B	20.08	< 5.0	Wohlen	19.08	< 5.0
Mühleberg A	13.11	< 5.0	Gümmenen	19.11	< 5.0	Ferenbalm	18.11	9.9 ± 1.0
Mühleberg B	13.11	< 5.0	Frieswil	19.11	< 5.0	Deltigen	18.11	5.4 ± 1.2

A, B : échantillons de fermes différentes

Evaluation des résultats pour les échantillons de lait

Dans les échantillons de lait, c'est aussi le ⁴⁰K naturel qui domine. En Suisse, les radionucléides artificiels comme le ¹³⁷Cs ou le ⁹⁰Sr ne sont généralement plus présents que sous forme de trace dans les échantillons de lait, à l'exception de quelques valeurs plus élevées de ¹³⁷Cs encore enregistrées dans les laits prélevés au Tessin ou dans les vallées Sud des Grisons. En 2019, les teneurs en ⁹⁰Sr mesurées dans 66 échantillons de lait analysés dans le cadre de la surveillance de la radioactivité en Suisse étaient toutes inférieures à 1 Bq/l (ancienne valeur de tolérance selon l'OSEC pour ce radionucléide), avec une valeur maximale enregistrée de 0.69 Bq/l et une valeur médiane de 0.04 Bq/l [5]. Les résultats des mesures des émetteurs gamma et du ⁹⁰Sr dans les échantillons de

lait mesurés entre 2017 et 2019 dans le cadre de ce programme spécifique (voir tableaux 16 et 17) ne se distinguent pas de ceux enregistrés ailleurs sur le plateau suisse pendant la même période. Les valeurs très légèrement plus élevées de ⁹⁰Sr enregistrées dans les 2 échantillons de lait prélevés à Mühleberg en novembre 2017 sont peut-être dues au fourrage utilisé, si celui-ci provenait par exemple d'une région de montagne; ces valeurs se situent dans la gamme habituelle de valeurs mesurées en Suisse et l'on peut conclure que les traces de ⁹⁰Sr mesurées dans tous les échantillons proviennent des retombées des essais nucléaires des années 60.

Les concentrations de tritium (tableau 18) dans les échantillons de lait étaient toutes inférieures à la limite de détection de 5 Bq/l, à l'exception de 2 valeurs, s'élevant resp. à 5.4 et 9.9 Bq/l dans des échantillons prélevés en novembre 2019 à Deltigen et Ferenbalm.

Le ^3H n'est pas mesuré en routine dans les échantillons de lait au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg, il est donc plus difficile de comparer les résultats. En novembre, l'herbe se fait rare et le tritium mesuré dans le lait provient certainement du fourrage utilisé. Les mesures effectuées chaque année dans les échantillons de lait prélevés dans la région de Niederwangen, au voisinage de l'entreprise MB Microtec, montrent ainsi que les concentrations de ^3H dans le lait des vaches vivant dans cette région sont de l'ordre de 10 à 30 Bq/l. L'entreprise MB Microtec utilise du ^3H pour la fabrication de sources lumineuses au gaz de tritium. Elle dispose d'une autorisation de rejet (réglementé) de ^3H dans l'air sous forme gazeuse et HTO. MB Microtec est ainsi le principal émetteur de tritium dans l'air en Suisse, et compte tenu de la situation géographique, il est possible que le fourrage utilisé pour nourrir les vaches des fermes de Deltigen et Ferenbalm provienne d'une région située dans le rayon d'influence de cette entreprise (Niederwangen et Mühleberg sont distants d'une dizaine de km). En effet, les résultats des autres mesures du ^3H ne montrent pas de marquage du lait lorsque les vaches mangent l'herbe des champs voisins de CNM, il est donc peu probable que les émissions de ^3H de la centrale soient à l'origine du faible marquage mesuré. On notera finalement que quelle que soit leur origine les valeurs enregistrées sont très nettement inférieures à l'ancienne valeur de tolérance de 1'000 Bq/l et ne présentent donc aucun risque pour la santé des consommateurs.

Références

- [1] Rapport annuel OFSP « Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse 2019 », chapitre 4.7 <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/dokumente/str/ura/jahresberichte/Jahresbericht%202019.pdf.download.pdf/Jahresbericht%202019.pdf>
- [2] Rapport annuel OFSP « Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse 2019 », chapitre 7.2
- [3] 29^{ème} rapport de la Commission fédérale de surveillance de la radioactivité pour les années 1985 et 1986 à l'intention du Conseil Fédéral - Version abrégée.
- [4] Rapport annuel OFSP « Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse 2019 », chapitre 4.4
- [5] Rapport annuel OFSP « Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse 2019 », chapitre 5

3. In-Situ-Gammaspektrometrie

R. Lüscher, B. Bucher
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
A. Gurtner, S. Estier
Bundesamt für Gesundheit, BAG

Veranlassung

Im Zusammenhang mit dem Rückbau des KKM wurde dem PSI der Auftrag erteilt, während der letzten 3 Betriebsjahren an 6 Messorten in der näheren Umgebung des KKM Nullpegelmessungen durchzuführen. Zusätzlich zu diesem Messprogramm wurden durch das BAG (Sektion Umweltradioaktivität URA), und das ENSI (Sektion Strahlenmesstechnik MERU) in-situ-gammaspektrometrische Messkampagnen in den Jahren 2017, 2018 und 2019 durchgeführt.

Die Messungen des ENSI und des BAG wurden parallel durchgeführt. Sie dienen somit zugleich als Qualitätssicherungsmessungen, da die Messketten unter Feldbedingungen vergleichbar überprüft werden können.

Messorte

Die Messorte wurden durch das ENSI und das PSI festgelegt. Davon sind 3 Messorte im regulären «Umweltüberwachungsprogramm – Abgabereglement KKM» enthalten. Die 6 Messorte entsprechen den Gras- und Boden-Probennahmeorte aus Kap. 2.

Tab. 1: Übersicht über die Messorte.

Ort	Koordinaten	Höhe ü.M. [m]
Niederruntigen, ZLS *	587.839 / 202.420	484
Rewag *	585.802 / 202.550	467
Mühleberg, KKM	587.167 / 201.920	478
Mühleberg, Fuchsenried	587.718 / 201.587	570
Mühleberg, Ufem Horn *	586.400 / 202.036	562
Oberruntigen, Feld	587.235 / 202.880	556

* Im regulären Umweltüberwachungsprogramm KKM enthalten.

Messtechnik

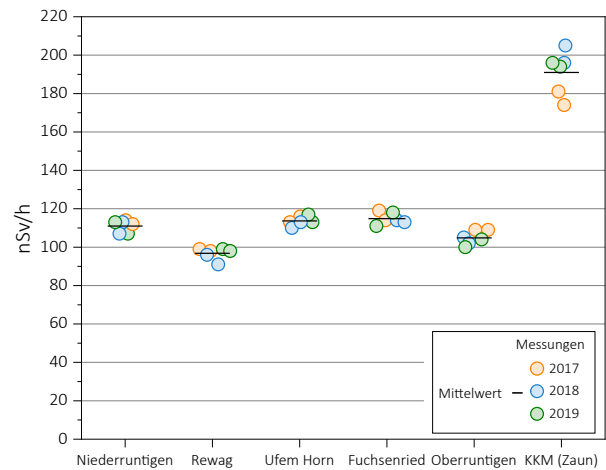
Mittels in-situ-gammaspektrometrischer Messtechnik ist es möglich, nuklidspezifische Messungen der Radioaktivität des Bodens an beliebigen Standorten durchzuführen. Der Spektrometer (ein HPGe-Detektor) wird dabei auf einem Dreibein ca. 1 m über dem Boden positioniert. Die genaue Bestimmung der Konzentration oder Gesamtaktivität der jeweiligen potentiell vorhandenen Radionuklide im Boden ist um einiges komplexer und weniger genau, als dies bei Labormessungen der Fall ist. Mit einem In-Situ-Gammaspektrometer kann hingegen mit einer einzigen Messung eine viel grössere Fläche (etwa 300 m²) abgedeckt werden.

Durch Umrechnung der spektrometrischen Messungen können die Dosisleistungsbeiträge aus den identifizierten künstlichen und natürlichen Strahlenkomponenten abgeleitet werden, wodurch ein Vergleich mit anderen Dosisleistungsmessgeräten ermöglicht wird. Während der Messkampagnen rund um das KKM wurden die gammaspektrometrischen Messungen durch Dosisleistungsmessungen mittels einer Reuter-Stokes Hochdruckionisationskammer (RSS131) begleitet, die eine genaue Messung im Untergrundbereich erlaubt.



Tab. 2.: Graphische Darstellung der Ortsdosisleistungsmessungen in den drei Messkampagnen: die Messwerte am Standort «KKM», am Zaun unmittelbar gegenüber dem Maschinenhaus, sind unverwechselbar erkennbar und zeugen von der im Leistungsbetrieb vorhandenen ¹⁶N-Strahlung.

Ortsdosisleistung		2017	2018	2019	Mittelw.
		[nSv/h]	[nSv/h]	[nSv/h]	[nSv/h]
Niederruntigen	BAG	114 ± 11	113 ± 11	113 ± 11	113
	ENSI	112 ± 11	107 ± 11	107 ± 11	109
Rewag	BAG	99 ± 10	96 ± 10	99 ± 10	98
	ENSI	98 ± 10	91 ± 9	98 ± 10	96
Ufem Horn	BAG	116 ± 12	113 ± 11	117 ± 12	115
	ENSI	113 ± 11	110 ± 11	113 ± 11	112
Fuchsenried	BAG	119 ± 12	114 ± 11	118 ± 12	117
	ENSI	114 ± 11	111 ± 11	113 ± 11	113
Oberruntigen	BAG	109 ± 11	105 ± 11	104 ± 10	106
	ENSI	109 ± 11	102 ± 10	100 ± 10	104
KKM (Zaun) *	BAG	181 ± 18	205 ± 21	194 ± 19	193
	ENSI	174 ± 17	196 ± 20	196 ± 20	189
Mittelwert (ohne KKM Zaun*) 2017/2019					108



Dreijähriges In-Situ Programm

Ortsdosisleistung

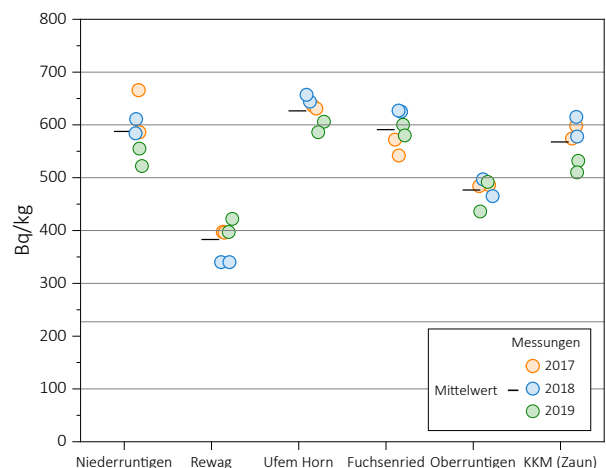
Über die drei Jahre des Programms wurden an allen 6 Messorten stabile Ortsdosisleistungen registriert: mit ≤ 10 % sind die standortspezifischen Abweichungen in der gleichen Größenordnung wie die Messunsicherheiten.

Beim Messort KKM (unmittelbar neben dem Arealzaun des Werkes, Tab. 2) gibt es einen grossen Unterschied zwischen der (aus dem In-Situ-Gammaspek-

trum) berechneten und der (mit der RSS131 Sonde gemessenen) Dosisleistung. Der Grund dafür liegt im unterschiedlichen Energiemessbereich der zwei Messgeräte. Das In-Situ-Gammaspektrometer ist so eingestellt, dass Gamma-Energien bis ca. 2'650 keV gemessen werden. Die Hochdruckionisationskammer hingegen erfasst auch die hochenergetische ¹⁶N-Strahlung (Gammalinien bei 6'129 keV und 7'115 keV). Die Differenz ergibt den Dosisleistungsbeitrag der KKM-Direktstrahlung (¹⁶N): für das Jahr 2019, z. B., lag dieser Beitrag bei 87 nSv/h bei der Messung des BAG und 88 nSv/h bei der Messung des ENSI.

Tab. 3: Zusammenstellung der Messresultate für das Nuklid ⁴⁰K aus dem dreijährigen Programm.

⁴⁰ K (insitu)		2017	2018	2019	Mittelw.
		[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
Niederruntigen	BAG	666 ± 69	584 ± 60	555 ± 57	602
	ENSI	588 ± 95	611 ± 94	522 ± 81	574
Rewag	BAG	403 ± 42	340 ± 36	396 ± 41	380
	ENSI	397 ± 65	340 ± 54	422 ± 66	386
Ufem Horn	BAG	636 ± 65	644 ± 66	606 ± 61	629
	ENSI	631 ± 102	657 ± 101	586 ± 91	625
Fuchsenried	BAG	572 ± 59	625 ± 64	600 ± 61	599
	ENSI	542 ± 88	627 ± 97	580 ± 90	583
Oberruntigen	BAG	492 ± 51	484 ± 50	465 ± 48	480
	ENSI	486 ± 79	497 ± 77	436 ± 68	473
KKM (Zaun)	BAG	574 ± 59	578 ± 59	532 ± 54	561
	ENSI	598 ± 97	615 ± 99	510 ± 79	574
Mittelwert (alle Standorte) 2017/2019					539



Natürliche Nuklide

Die standortspezifischen Messwerte der natürlich vorkommenden Nuklide liegen im Rahmen der zu erwartenden Fluktuationen. Die standortspezifischen Messwerte für ^{40}K (Tab. 3) zeigen Abweichungen von bis zu 20%, diese Unterschiede liegen jedoch im Rahmen der statistischen Unsicherheiten ($k = 2$).

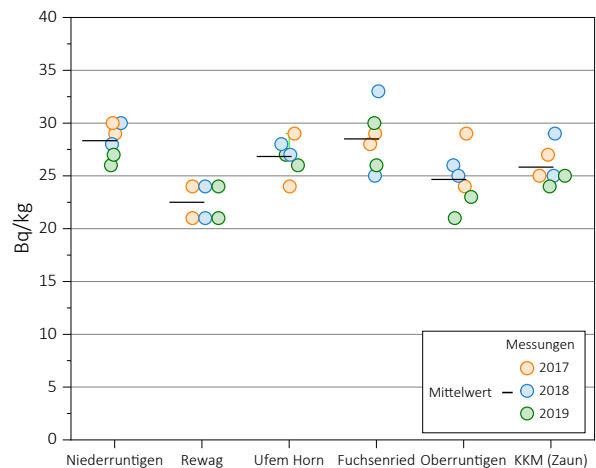
Bei den ^{232}Th und ^{238}U -Zerfallsreihen wurden die Messwerte für die Nuklide ^{228}Ac bzw. ^{214}Bi verglichen

(Tab. 4 und 5). Die standortspezifischen Abweichungen liegen mit wenigen Ausnahmen im Rahmen der statistischen Unsicherheiten (ca. 12 bis 20%).

Für das kosmogene ^7Be sind die Messwerte (Tab. 6) um oder sogar unter der Nachweisgrenze, was zu grösseren Fluktuationen der Messwerte führt. Die Abweichungen entsprechen den allgemeinen Erfahrungswerten bei der Überprüfung des Nuklides in der Umgebungsüberwachung.

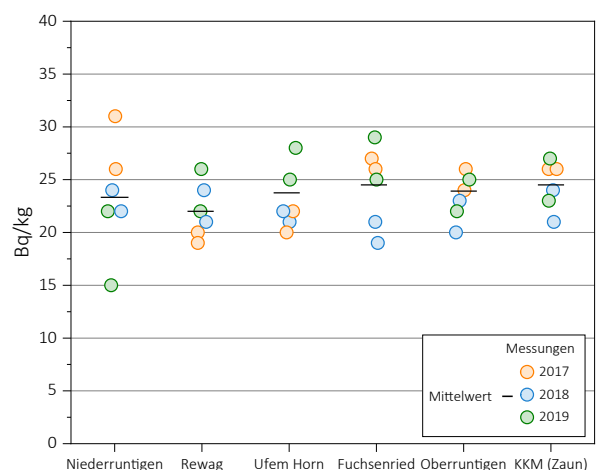
Tab. 4: Zusammenstellung der Messresultate für das Nuklid ^{228}Ac (Zerfallsreihe von ^{232}Th) aus dem dreijährigen Programm.

^{228}Ac (insitu)		2017	2018	2019	Mittelw.
		[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
Niederruntigen	BAG	29 ± 3.9	28 ± 3.5	26 ± 3.1	27.7
	ENSI	30 ± 5.2	30 ± 5.4	27 ± 4.9	29.0
Rewag	BAG	21 ± 2.8	21 ± 2.7	21 ± 2.7	21.0
	ENSI	24 ± 4.2	24 ± 4.4	24 ± 4.3	24.0
Ufem Horn	BAG	24 ± 3.1	27 ± 3.1	26 ± 3.3	25.7
	ENSI	29 ± 5.2	28 ± 5.0	27 ± 4.9	28.0
Fuchsenried	BAG	28 ± 3.7	33 ± 3.5	30 ± 3.5	30.3
	ENSI	29 ± 5.2	25 ± 5.8	26 ± 4.8	26.7
Oberruntigen	BAG	24 ± 3.3	26 ± 3.2	23 ± 2.9	24.3
	ENSI	29 ± 5.2	25 ± 4.9	21 ± 4.0	25.0
KKM (Zaun)	BAG	27 ± 3.3	29 ± 3.1	24 ± 3.0	26.7
	ENSI	25 ± 4.8	25 ± 5.3	25 ± 4.7	25.0
Mittelwert (alle Standorte) 2017/2019					26.1



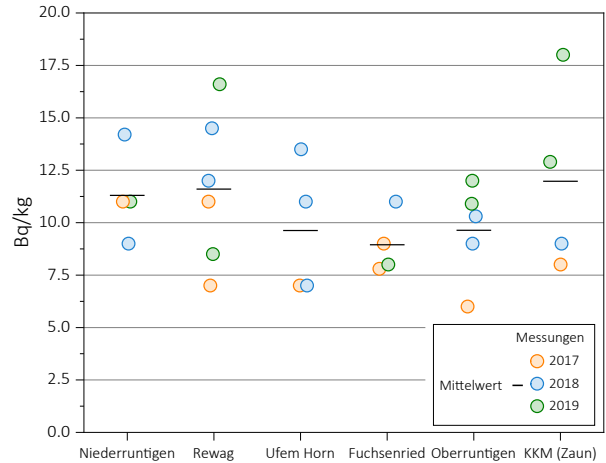
Tab. 5: Zusammenstellung der Messresultate für das Nuklid ^{214}Bi (Zerfallsreihe von ^{238}U) aus dem dreijährigen Programm.

^{214}Bi (insitu)		2017	2018	2019	Mittelw.
		[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
Niederruntigen	BAG	31 ± 3.6	24 ± 2.7	15 ± 2.9	23.3
	ENSI	26 ± 4.3	22 ± 3.8	22 ± 3.8	23.3
Rewag	BAG	20 ± 2.3	19 ± 2.2	26 ± 2.9	21.7
	ENSI	22 ± 3.7	21 ± 3.6	24 ± 4.0	22.3
Ufem Horn	BAG	21 ± 2.4	20 ± 2.3	28 ± 3.1	23.0
	ENSI	22 ± 3.7	22 ± 3.9	25 ± 4.3	23.0
Fuchsenried	BAG	27 ± 3.2	19 ± 2.3	29 ± 3.2	25.0
	ENSI	26 ± 4.4	21 ± 3.7	25 ± 4.2	24.0
Oberruntigen	BAG	24 ± 2.9	20 ± 2.3	25 ± 1.8	23.0
	ENSI	26 ± 4.3	23 ± 3.9	22 ± 3.8	23.7
KKM (Zaun)	BAG	26 ± 3.1	21 ± 2.5	27 ± 3.1	24.7
	ENSI	26 ± 4.4	24 ± 4.2	23 ± 4.0	24.3
Mittelwert (alle Standorte) 2017/2019					23.4



Tab. 6: Zusammenstellung der Messresultate für das Nuklid ⁷Be aus dem dreijährigen Programm.

⁷ Be (insitu)		2017	2018	2019	Mittelw.
		[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
Niederruntigen	BAG	11.0 ± 5.6	9.0 ± 3.8	11.0 ± 3.7	10.3
	ENSI	NWG	14.2 ± 7.0	<NWG	14.2
Rewag	BAG	7.0 ± 3.4	12.0 ± 3.7	11.0 ± 3.6	10.0
	ENSI	8.5 ± 4.2	14.5 ± 8.9	16.6 ± 6.8	13.2
Ufem Horn	BAG	7.0 ± 3.5	7.0 ± 4.1	11.0 ± 3.9	8.3
	ENSI	<NWG	13.5 ± 9.3	<NWG	13.5
Fuchsenried	BAG	9.0 ± 4.5	11.0 ± 4.2	8.0 ± 3.7	9.3
	ENSI	7.8 ± 4.8	<NWG	<NWG	7.8
Oberruntigen	BAG	6.0 ± 4.0	9.0 ± 3.5	12.0 ± 3.8	9.0
	ENSI	<NWG	10.3 ± 6.2	10.9 ± 6.0	10.6
KKM (Zaun)	BAG	8.0 ± 5.3	9.0 ± 5.4	18.0 ± 3.6	11.7
	ENSI	<NWG	<NWG	12.9 ± 7.0	12.9
Mittelwert (alle Standorte) 2017/2019					10.9



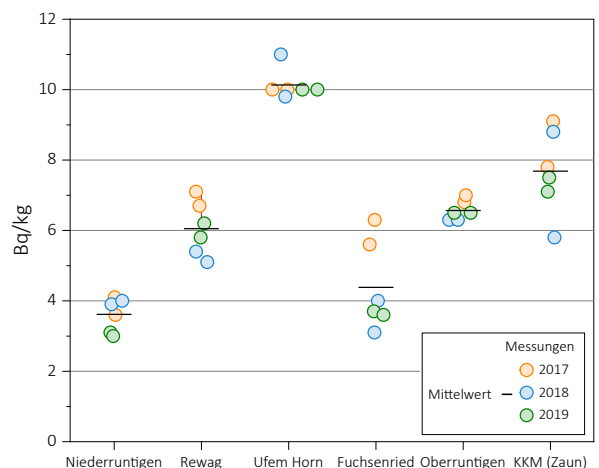
Künstliche Nuklide

Das Nuklid ¹³⁷Cs (Tab. 7) wird in der Umwelt insbesondere als Folge der Bombentests und der Chernobyl Nuklearkatastrophe vorgefunden. Erfahrungswerte aus den vom ENSI erhobenen In-Situ-Messwerten an den MADUK-Standorten (von 1993 bis 2017) zeigen, dass sich die ermittelten Aktivitätskonzentrationen im Boden mit einer für den Standort typischen effektiven Halbwertszeit (aufgrund des Zerfalls des Nuklides, des Transfers in tiefere Bodenschichten und/oder der Erosion aus höheren Lagen) verändern.

Im zeitlichen Verlauf der Messwerte des dreijährigen Programms ist diese Entwicklung nicht abschliessend beurteilbar, da dafür der Überwachungszeitraum zu kurz war. Die Messwerte liegen jedoch in der erwarteten Grössenordnung. Ausser ¹³⁷Cs wurden keine weiteren künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

Tab. 7: Zusammenstellung der Messresultate für das Nuklid ¹³⁷Cs aus dem dreijährigen Programm.

¹³⁷ Cs (insitu)		2017	2018	2019	Mittelw.
		[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
Niederruntigen	BAG	4.1 ± 0.8	3.9 ± 0.7	3.1 ± 0.6	3.7
	ENSI	3.6 ± 0.9	4.0 ± 1.1	3.0 ± 0.9	3.5
Rewag	BAG	7.1 ± 0.9	5.4 ± 0.8	5.8 ± 0.8	6.1
	ENSI	6.7 ± 1.3	5.1 ± 1.3	6.2 ± 1.3	6.0
Ufem Horn	BAG	10.0 ± 1.2	9.8 ± 1.2	10.0 ± 1.2	9.9
	ENSI	10.0 ± 1.9	11.0 ± 2.2	10.0 ± 1.9	10.3
Fuchsenried	BAG	5.6 ± 1.4	4.0 ± 0.7	3.7 ± 0.6	4.4
	ENSI	6.3 ± 1.0	3.1 ± 1.0	3.6 ± 1.0	4.3
Oberruntigen	BAG	6.8 ± 0.9	6.3 ± 0.9	6.5 ± 0.9	6.5
	ENSI	7.0 ± 1.4	6.3 ± 1.4	6.5 ± 1.4	6.6
KKM (Zaun)	BAG	7.8 ± 1.1	5.8 ± 0.9	7.5 ± 1.0	7.0
	ENSI	9.1 ± 1.8	8.8 ± 1.8	7.1 ± 1.6	8.3
Mittelwert (alle Standorte) 2017/2019					6.4



Die Ergebnisse der Gammaskpektrometrie-Messungen in der Umgebung des Kernkraftwerks können auf der Internetseite des BAG eingesehen werden: www.radenviro.ch.

Abbildung 1 zeigt die Überwachung der ¹³⁷Cs-Kontamination von 1985 bis 2020 an der Station Ufem Horn.

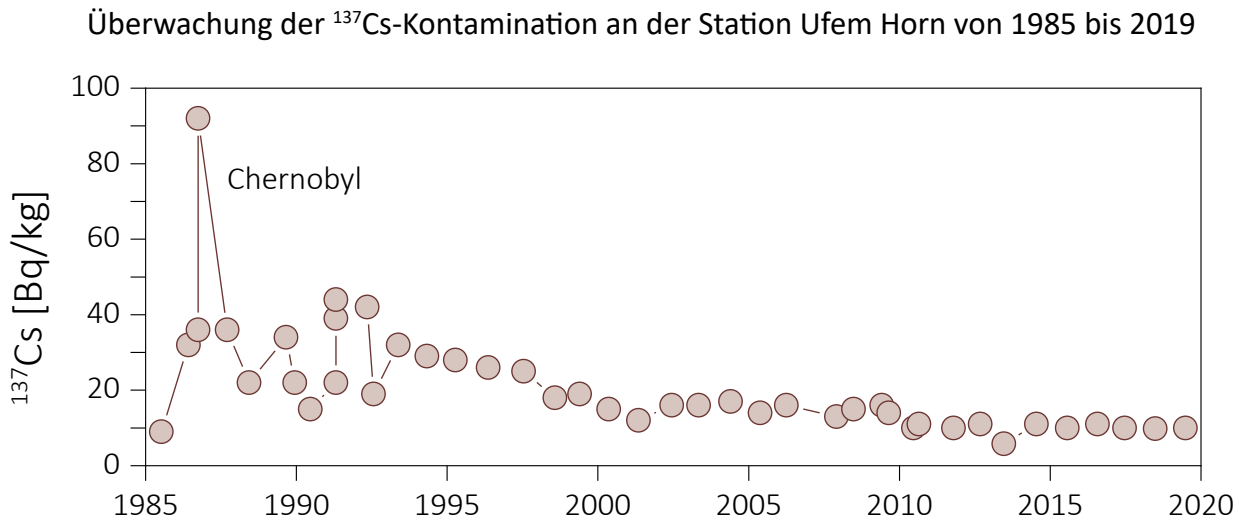


Abb 1 :
 Überwachung der ¹³⁷Cs-Kontamination von 1985 bis 2020 an der Station Ufem Horn.

4. Annexes / Anhänge

Beteiligte Stellen und Laboratorien / Organismes et laboratoires participants

Die in diesem Bericht zusammen gestellten Messwerte stammen von Probenahmen und Analysen folgender Laboratorien und Stellen, denen ihre Mitarbeit bestens verdankt sei.

Les résultats présentés dans ce rapport se basent sur les prélèvements et les analyses des laboratoires et organismes ci-après. Qu'ils soient remerciés de leur collaboration.

BAG URA	Umweltradioaktivität, Bundesamt für Gesundheit	Bern	S. Estier, P. Steinmann, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat	Brugg / AG	R. Sardella, A. Leupin, B. Bucher, J. Löhle, R. Lüscher, M. Schibli, R. Habegger,
IRA	Institut de Radiophysique, CHUV	Lausanne	F. Bochud, M. Straub, P. Froidevaux, P.A. Pittet, F. Barraud
PSI	Radioanalytik, Paul Scherrer Institut	Villigen / AG	Martin Heule, Patricia Kramer, Alexandra Ulli, Anja Pregler, Max Ruethi, Maya Jäggi, Christina Bindnagel
KLBE	Kantonales Laboratorium BE	Bern	S. Nussbaumer, O. Deflorin,
EAWAG	Wasserressourcen & Trinkwasser	Dübendorf	M. Brennwald, P. Rünzi

A close-up, vertical view of a microscope objective lens. The lens is metallic and has several technical markings: 'M1' at the top, '90' in the middle, and '1.25' at the bottom. The lens is illuminated from the side, creating a bright, circular glow at its tip. The background is a soft, out-of-focus blue.

Impressum

*@ Bundesamt für Gesundheit (BAG)
@ Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)
Herausgeber: BAG & ENSI
Layout: André Gurtner (BAG)
Publikationzeitpunkt : April 2021*

*@ Office fédéral de la santé publique (OFSP)
@ Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN)
Editeur: OFSP & IFSN
Layout: André Gurtner (OFSP)
Date de publication : Avril 2021*