

*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*

2024



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération Suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun Svizra

Bundesamt für Gesundheit BAG
Office fédéral de la santé publique OFSP
Ufficio federale della sanità pubblica UFSP

Abteilung Strahlenschutz
Division Radioprotection
Divisione Radioprotezione

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

2024

Avant-propos

La radioactivité de l'environnement est constamment surveillée en Suisse depuis 1956. A l'époque, son augmentation, liée aux essais nucléaires atmosphériques, avait incité les autorités à développer un réseau de contrôle spécifique. Depuis 1986, et l'accident de Tchernobyl, la surveillance des rayonnements ionisants et de la radioactivité dans l'environnement est devenue une tâche permanente de l'Office fédéral de la santé publique. Ce dernier élabore chaque année un programme de prélèvements et de mesures.

Pour effectuer cette tâche, l'OFSP s'appuie sur la collaboration de partenaires d'autres instances fédérales, cantonales et universitaires. Cette organisation décentralisée permet à l'OFSP de profiter des compétences spécifiques de chaque laboratoire ou office.

- Les spécialistes de l'EAWAG et du Département F.-A. Forel de l'Université de Genève mettent en œuvre la surveillance des milieux aquatiques.
- Les analyses radiochimiques complexes ou mettant en œuvre des appareils de mesure sophistiqués sont effectuées par des instituts spécialisés (Institut de Radiophysique IRA, Laboratoire de Spiez, PSI, Université de Berne).
- L'IFSN (centrales nucléaires) et la SUVA (entreprises) contribuent par des analyses effectuées dans leurs domaines de surveillance respectifs.
- La CENAL exploite un réseau de mesure du débit de dose et organise les mesures d'aéroradiométrie.
- Le CERN met à disposition les résultats de ses propres analyses qui sont comparés aux analyses indépendantes.
- Les denrées alimentaires sont analysées en grande partie par les laboratoires cantonaux qui sont équipés pour ces analyses.

Finalement, l'OFSP est responsable de la coordination générale, de ses propres réseaux de surveillance et du laboratoire d'essais (surveillance du milieu atmosphérique, tritium et spectrométrie gamma *in situ*). Les discussions et les échanges réguliers d'expérience assurent la qualité et aident à améliorer le système.

Conformément à l'Ordonnance sur la radioprotection, l'OFSP est également chargé de publier les résultats de la surveillance dans un rapport annuel. Si la plupart des résultats des mesures de la radioactivité dans l'environnement sont consultables en ligne sur plateforme radenviro (www.radenviro.ch) de l'OFSP, ce site n'a pas pour vocation de remplacer le présent rapport annuel. En effet, le lecteur trouvera ici des explications, commentaires et interprétations qui font défaut sur la plateforme Internet. Cette dernière permet, quant à elle, une meilleure transparence et réactivité. Les deux outils sont donc complémentaires.

La plupart des laboratoires participants à la surveillance rédigent leur propre contribution pour le rapport annuel. L'OFSP collecte et met en forme l'ensemble de ces contributions. Chaque auteur participe à la relecture et à la correction détaillée d'un ou plusieurs chapitres (phase du review). La séance de rédaction offre la possibilité aux auteurs de discuter les points importants et d'apporter les dernières corrections aux contributions.

Avec le présent rapport vous prenez connaissance du résultat de ce processus pour l'année 2024.

Nous remercions chaleureusement tous les offices et laboratoires participants pour leur précieuse collaboration.

*Dr. Sybille Estier
Dr. Philipp Steinmann
Office fédéral de la santé publique
Unité de direction Protection de la santé
Division de Radioprotection*

Vorwort

Die Umweltradioaktivität wird in der Schweiz seit 1956 kontinuierlich überwacht. Damals veranlasste die Erhöhung der Radioaktivität durch die oberirdischen Atomwaffenversuche die Behörden, ein Netzwerk für Kontrollmessungen aufzubauen. Seit 1986 ist die Überwachung der ionisierenden Strahlung sowie der Radioaktivität in der Umwelt ein gesetzlich verankerter Auftrag des BAG. Auf dieser Grundlage erstellt das BAG jährlich ein Probenahme- und Messprogramm.

Bei dieser Aufgabe stützt sich das BAG auf die Zusammenarbeit mit Partnern aus Bundesverwaltung, Kantonen und Universitäten. Diese dezentrale Organisation bietet den Vorteil, dass gezielt verschiedenste Fachkompetenzen eingebunden werden können.

- So liegt die Überwachung der aquatischen Systeme bei den Fachleuten der EAWAG und des Departement F.-A. Forel der Universität Genf.
- Radiochemische Analysen sowie gerätetechnisch komplexe Messungen finden an spezialisierten Instituten statt (Institut de Radiophysique IRA, Labor Spiez, PSI, Universität Bern).
- Das ENSI (Kernkraftwerke) und die SUVA (Betriebe) steuern Beiträge aus ihren Aufsichtsbereichen bei.
- Die NAZ betreut ein ODL-Messnetz und ist für die Durchführung Aeroradiometriemessungen zuständig.
- Das CERN stellt seine eignen Resultate dar, welche dann mit den unabhängigen Messungen verglichen werden können.
- Lebensmittel werden zum grossen Teil in den entsprechend ausgerüsteten Kantonalen Laboratorien analysiert.

Das BAG schliesslich ist verantwortlich für die Koordination, die eigenen Messnetze und das Prüflabor (Schwerpunkt Luftüberwachung, Tritium und in-situ Gammaspektrometrie). Regelmässige Diskussionen zwischen den Laboratorien und ein ständiger Erfahrungsaustausch tragen zur Qualitätssicherung bei und geben immer wieder neue Impulse für Verbesserungen.

Die Strahlenschutzverordnung verpflichtet das BAG auch zur Veröffentlichung der Resultate der Radioaktivitätsmessungen in einem Jahresbericht. Ein Grossteil der Messresultate wird zudem auf der Internet Plattform radenviro (www.radenviro.ch) präsentiert, welche den hier vorliegenden gedruckten Jahresbericht ideal ergänzt: Während die Leserin des Jahresberichtes nach Themen geordnete, vertiefte Erklärungen, Diskussionen und Interpretationen vorfindet, ist der Betrachter der Radenviro-Inhalte bei Vorkommnissen oder auffälligen Befunden rasch informiert.

Für den Jahresbericht verfassen fast alle beteiligten Laboratorien ihre eigenen Beiträge. Das BAG sammelt diese und übernimmt das Layout. Eine erste Version des Jahresberichtes wird anschliessend in einer review-Runde kritisch gegengelesen. Danach bietet die jährliche Redaktionssitzung die Gelegenheit wichtige Fragen und letzte Korrekturen im Plenum zu besprechen.

Das Ergebnis dieses Prozesses für das Jahr 2024 finden Sie im vorliegenden Heft.

Den am Bericht beteiligten Ämtern und Laboratorien danken wir für die wertvolle Mitarbeit bestens.

*Dr. Sybille Estier
Dr. Philipp Steinmann
Bundesamt für Gesundheit
Direktionsbereich Gesundheitsschutz
Abteilung Strahlenschutz*

Sommaire

- 1** Surveillance de l'environnement: Résumé - 10
- 2** Exposition de la population aux rayonnements ionisants - 43
 - Rayonnement externe- 48**
 - 3** Mesures in situ & exposition externe - 50
 - Réseau NADAM - 56
 - Mesures d'aéroradiométrie - 67
 - Environnement - 74**
 - Aérosols et précipitations - 76
 - URAnet Aero - 82
 - 4** Surveillance de l'air avec des avions militaires - 88
 - Radioactivité dans les systèmes aquatiques - 91
 - URAnet Aqua - 97
 - Tritium-Monitoring - 100
 - Sols et herbes - 104
 - 5** Denrées alimentaires - 110
 - 6** Radioactivité dans le corps humain - 116
 - Strontium, polonium et radium dans les vertèbres - 118
 - Mesures d'incorporation au corps entier- 121
 - 7** Mesures de nucléides spéciaux - 124
 - Carbone-14, Krypton-85, Argon-37 - 126
 - Plutonium et americium - 136
 - 8** Surveillance des installations nucléaires - 142
 - Emissions et Immissions - 144
 - Dose ambiante et débit de dose ambiante - 155
 - MADUK - 156
 - ZWILAG - 160
 - Installations nucléaires et environnement - 164
 - CERN - rejets et environnement - 173 & 181
 - 9** Industries et hôpitaux - 190
 - Emissions des industries - 190
 - Emissions des hôpitaux - 193
 - Surveillance au voisinage des industries - 197
 - Radionucléides médicaux - 204
 - Surveillance des décharges - 208
 - Plan d'action Radium - 210
 - 10** Plan d'action Radon - 216
 - Annexes - 222

Inhaltsverzeichnis

1 Umweltüberwachung: Zusammenfassung - 23

2 Strahlenexposition der Bevölkerung - 38

Externe Strahlung - 48

3 In situ Messungen - 50

NADAM-Netz - 56

Aeroradiometrische Messungen - 67

Umwelt - 74

Aerosol und Niederschlag - 76

URAnet Aero - 82

4 Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen - 88

Aquatische Systeme - 91

URAnet Aqua - 97

Tritium-Monitoring - 100

Boden und Gras - 104

5 Lebensmittel - 110

Radioaktivität im Menschen - 116

6 Strontium, Polonium und Radium in Wirbelknochen - 118

Inkorporationsmessungen mittels Ganzkörperzählern - 121

7 Messung von Spezialnukliden - 124

Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37 - 126

Plutonium und Americium - 136

8 Überwachung der Kernanlagen - 142

Emissionen und Immissionen - 144

Ortsdosis und Ortsdosisleistung - 155

MADUK - 156

ZWILAG - 160

Nukleare Anlagen und Umwelt - 164

CERN - Emissionen und Umwelt - 173 & 181

9 Industrien und Spitäler - 190

Emissionen der Betriebe - 190

Emissionen der Spitäler - 193

Überwachung in der Umgebung von Industrien - 197

Radionuklide aus der Medizin - 204

Überwachung von Deponien - 208

Aktionsplan Radium - 210

10 Aktionsplan Radon - 216

Anhänge - 222

Surveillance Environnement Résumé

1

Umwelt
Überwachung
Zusammenfassung

- Tâches et programme de mesure
- Résultats de la surveillance 2024
 - Evaluation

- Auftrag und Messprogramm
- Ergebnisse der Umweltüberwachung 2024
 - Beurteilung

2024

1.1

Surveillance de l'environnement : Résumé

S. Estier, P. Steinmann

Section Radioactivité de l'environnement, OFSP/URA, Berne

Tâches et programme de mesures

Surveillance des rayonnements ionisants et de la radioactivité dans l'environnement

Conformément à l'art. 191 de l'Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), l'OFSP est responsable de la surveillance des rayonnements ionisants et de la radioactivité dans l'environnement.

Le programme de surveillance mis en œuvre comporte plusieurs volets. Il a d'une part pour objectif la détection rapide de tout apport supplémentaire de radioactivité d'origine artificielle pouvant avoir des conséquences graves sur la santé de la population (événement radioologique) et, d'autre part, il vise à déterminer les niveaux de référence de la radioactivité dans l'environnement en Suisse ainsi que leurs fluctuations, afin de pouvoir évaluer les doses de rayonnement reçues par la population. Fait partie de cette surveillance générale le suivi des anciennes contaminations dues aux essais nucléaires atmosphériques américains et soviétiques des années 50 et 60, ainsi qu'à l'accident de Tchernobyl.

Par ailleurs, la surveillance mise en place doit permettre de déterminer l'impact effectif des centrales nucléaires, ainsi que des centres de recherche ou des entreprises utilisant des substances radioactives, sur l'environnement et la population avoisinante. Cette surveillance spécifique, focalisée autour des installations disposant d'une autorisation stricte de rejet de substances radioactives dans l'environnement, s'effectue en collaboration avec les autorités de surveillance respectives, soit l'Inspection Fédérale de la Sécurité Nucléaire (IFSN) pour les centrales nucléaires et la SUVA pour les industries. Elle commence par le contrôle des émissions (rejets de substances radioactives) de ces entreprises, afin de s'assurer que les limites sont respectées, puis se poursuit par la surveillance de leurs immissions, c'est-à-dire des concentrations effectivement mesurées dans l'environnement.

Afin de répondre à l'ensemble de ces objectifs, l'OFSP élabore chaque année un programme de prélèvements d'échantillons et de mesures en collaboration avec l'IFSN, la SUVA et les cantons (art. 193 ORaP). Il coordonne ce programme de surveillance, auquel participent également d'autres laboratoires de la Confédération et divers instituts universitaires. La liste complète des laboratoires participant au programme de surveillance figure dans les annexes 1 et 2. L'OFSP collecte et interprète l'ensemble des données, et publie annuellement les résultats de la surveillance de la radioactivité ainsi que les doses de rayonnement qui en résultent pour la population suisse (art. 194 ORaP).

Programme de mesures (voir annexes 3 et 4)

Le programme de surveillance couvre de nombreux compartiments environnementaux, qui vont de l'air aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et souterraines, les eaux potables et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma *in situ*) complètent ces analyses en permettant de mesurer directement la radioactivité déposée au sol. Le contrôle en fin de chaîne de contamination est réalisé par des analyses de la radioactivité assimilée dans le corps humain. À ce programme général s'ajoute l'analyse d'échantillons en phase de rejet provenant des centrales nucléaires, des eaux de stations d'épuration (STEP) et de percolation des décharges, ou encore des eaux de lavage des fumées d'usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM). L'OFSP et sa division radioprotection ayant été fortement touchés par les mesures d'économie de la confédération, ces programmes spécifiques de surveillances des STEP et des UIOM ont toutefois été réduits en 2024 et seront progressivement supprimés d'ici 2026.

Des réseaux automatiques de mesure enregistrent le débit de dose ambiant gamma dans tout le pays (réseau automatique NADAM de mesure et d'alarme pour l'irradiation ambiante) et en particulier au voisinage des

centrales nucléaires (réseau automatique de surveillance du débit de dose au voisinage des centrales nucléaires, MADUK). La radioactivité des aérosols et des eaux de rivière (figure 1) est mesurée en continu grâce au réseau automatique URAnet de l'OFSP (volet «aero» pour la surveillance de l'air et volet «aqua» pour la surveillance de l'eau, voir plus bas). En plus des mesures automatiques, des prélevements d'échantillons d'aérosols, de précipitations et d'eaux de rivière sont effectués en continu afin de procéder à des analyses très sensibles en laboratoire; la surveillance des sédiments, du sol, de l'herbe, du lait et des denrées alimentaires (y compris les importations) s'effectue dans le cadre de contrôles par sondage. Les données sont enregistrées dans une banque de données nationale administrée par l'OFSP. Les résultats des mesures des réseaux automatiques, ainsi que la majorité des résultats des mesures de la radioactivité effectuées en laboratoire, sont consultables en ligne sur le site www.radenviro.ch. Cependant les résultats de mesures spécifiques (par ex. mesure du ^{90}Sr et du ^{226}Ra dans les vertèbres ou du ^{14}C dans les feuillages) ne sont, pour l'heure, disponibles que dans le rapport publié annuellement. Les programmes de surveillance sont comparables à ceux mis en oeuvre dans les pays voisins. Les techniques d'échantillonnage et les programmes de mesure correspondent à l'état actuel des connaissances et de la technique. Le contrôle de la qualité s'effectue par la participation régulière des laboratoires à des intercomparaisons nationales et internationales.

Réseau automatique de surveillance URAnet

Le réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air, URAnet aero, est opérationnel depuis septembre 2018. Il permet d'identifier et de quantifier les radionucléides présents dans l'air et génère une alarme en cas de dépassement des seuils fixés. Il est constitué de 15 sondes de mesure, réparties sur l'ensemble du territoire (voir figure 1). Les différentes régions géographiques de la Suisse sont couvertes, le réseau étant toutefois plus dense dans les régions à la fois fortement peuplées et également concernées par d'éventuels rejets de radioactivité dans l'air en provenance d'une centrale nucléaire. Conformément à son objectif de surveillance, le réseau URAnet aero est capable de détecter des niveaux de radioactivité largement inférieurs aux limites d'immissions dans l'air définies dans l'ORaP: la limite de détection pour le cézium-137 (^{137}Cs) des stations URAnet aero est par exemple de l'ordre de 3 à 7 milli-becquerels par mètre cube (mBq/m^3) pour une mesure de 12 heures, alors que la limite d'immissions dans l'air pour ce radionucléide dans l'air est fixée à $8.5 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Ceci signifie qu'une présence inhabituelle de ^{137}Cs dans l'air serait automatiquement détectée à des niveaux déjà 1'000 fois inférieurs aux limites légales fixées pour la contamination de l'air dans l'environnement. Une telle sensibilité rend donc possible la détection de très faibles concentrations de radioactivité dans l'air, même si celles-ci ne présentent pas de danger pour la santé, et permet ainsi une meilleure évaluation des doses reçues par la population.

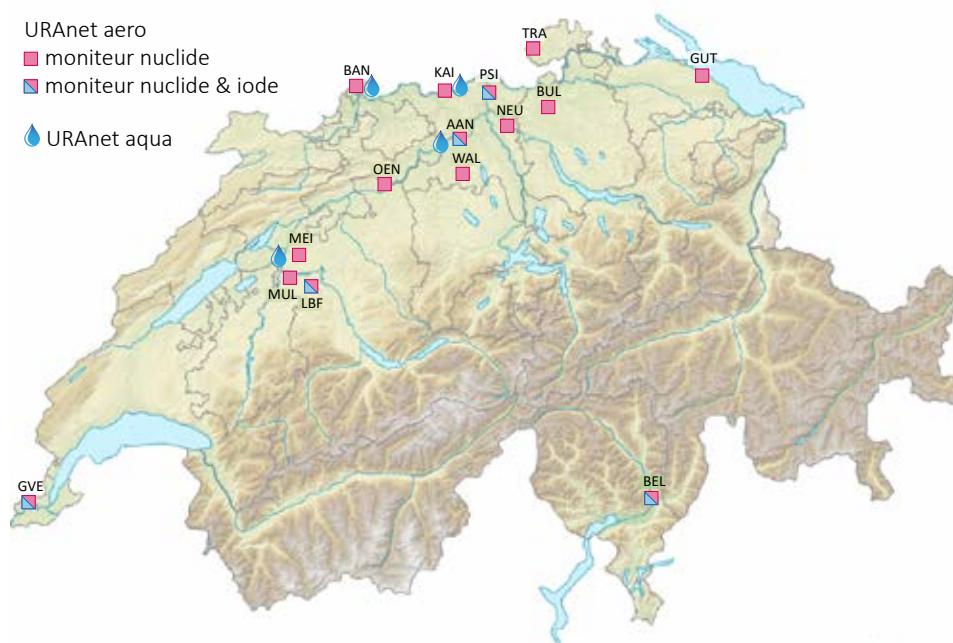


Figure 1:

Réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air (URAnet aero) et dans les cours d'eau (URAnet aqua).

Le volet du réseau URAnet dédié à la surveillance des eaux de l'Aar et du Rhin (URAnet aqua) comprend quant à lui 4 sondes aquatiques, situées en aval des centrales nucléaires suisses, et est opérationnel depuis 2015. Précédemment, le réseau comprenait 5 sondes, mais la sonde de mesure de Hagneck a été démontée en 2023 puisque la centrale nucléaire de Mühleberg (KKM) n'est plus en service. Les mesures en aval de la CNM sont assurées par la sonde de Niederried.

Modernisation du dispositif de mesure à haute altitude

Lors de sa séance du 13 avril 2022, le Conseil fédéral a décidé de moderniser le dispositif de mesure de la radioactivité dans l'air situé à la station de recherche du Jungfraujoch, car celui-ci ne répond plus aux exigences actuelles. La nouvelle station permettra de filtrer de grands volumes d'air et de mesurer par spectrométrie gamma en continu, sur site, la radioactivité déposée sur ces filtres, puis d'effectuer une mesure ultérieure très sensible des filtres à air en laboratoire. Sa mise en service était prévue pour fin 2024, mais de nouvelles contraintes de sécurité ainsi que des problèmes techniques concernant la tête d'aspiration ont retardé les travaux.

La partie mécanique a été installée sur le site fin 2023, incluant les lignes d'aspiration, l'unité de filtration, la pompe et les isolations acoustiques et thermiques. En 2024, les efforts se sont concentrés sur la commande et l'automatisation du moniteur, avec la réalisation de l'ingénierie électrique. Cela comprenait le choix des capteurs et actionneurs, le dimensionnement et la pose des câbles, l'élaboration du schéma électrique et la fabrication du tableau de commande. En parallèle, deux développements majeurs ont été menés à bien : l'adaptation du logiciel de surveillance de la machine et de transmission des données au réseau, ainsi que la programmation de l'automate de logique opérationnelle permettant, par exemple, de réguler la puissance de la pompe et la température dans la tête d'aspiration. La mise en service a été reportée à 2025, après l'achèvement de la programmation et des travaux d'installation électrique.

La nouvelle station de mesure du Jungfraujoch doit également pallier l'arrêt des vols de collecte effectués avec des avions de chasse Tiger, de l'armée suisse, dont l'exploitation prendra fin en 2027. Lors de ces vols à haute altitude, des particules d'air sont collectées puis analysées en laboratoire pour y mesurer la radioactivité.

Résultats de la surveillance 2024

Surveillance générale : air, précipitations, eaux, sols, herbes, lait et autres denrées alimentaires

Les résultats de la surveillance de la radioactivité dans l'air, les précipitations, l'herbe et le sol enregistrés en 2024 sont généralement restés comparables à ceux des années précédentes et montrent que la radioactivité naturelle est prédominante dans ces compartiments environnementaux. Selon les résultats des mesures des filtres aérosols à haut débit, disponibles sur Internet (www.radenviro.ch), la radioactivité de l'air provient pour l'essentiel des radionucléides naturels, tels que le ⁷Be cosmogénique (produit par le rayonnement cosmique dans les hautes couches de l'atmosphère) ainsi que le ²¹⁰Pb et les autres produits de filiation du radon. L'évolution de la concentration de ⁷Be dans l'air reflète les conditions météorologiques. Lors des chaudes journées d'été, le mélange vertical convectif transporte l'air riche en ⁷Be depuis la troposphère supérieure vers le sol, ce qui explique pourquoi les concentrations de ⁷Be mesurées par nos stations sont plus élevées en été. Les précipitations (lessivage du ⁷Be) influencent également les concentrations mesurées. Les mêmes radionucléides naturels se retrouvent par ailleurs dans les eaux de pluie.

Hormis les radionucléides d'origine naturelle, d'infimes concentrations de radioactivité artificielle, en particulier de ¹³⁷Cs (demi-vie de 30 ans), sont également régulièrement détectées sur les filtres aérosols, grâce à la très grande sensibilité des méthodes de mesure mises en œuvre. Ces traces, de l'ordre de quelques microbecquerel par mètre cube d'air, sont plus fréquemment décelées par temps sec, lorsque le ¹³⁷Cs déposé au sol suite aux essais d'armes nucléaires des années 60 et surtout après l'accident de Tchernobyl en 1986 (voir paragraphe consacré à la surveillance des sols), est remis en suspension dans l'air. Ainsi, comme chaque année, des valeurs un peu plus élevées de ¹³⁷Cs ont été mesurées en 2024 pendant les mois d'hiver à la station de Cadenazzo, au Tessin, région de Suisse la plus touchée par les retombées de l'accident de Tchernobyl. Ces concentrations plus élevées de ¹³⁷Cs observées pendant l'hiver s'expliquent par la remise en suspension de particules de sol, favorisée par la végétation clairsemée à cette période, ainsi que par la combustion de bois légèrement contaminé en ¹³⁷Cs utilisé pour le chauffage. Durant la semaine du 25 mars au 2 avril, une concentration de 7.2 µBq/m³ a été mesurée à Cadenazzo, une valeur relativement élevée par rapport aux niveaux habituels. Cette période a été marquée par un flux de sud-ouest, la présence ponctuelle de poussière saharienne et un fort épisode de foehn en provenance du sud. Cette valeur plus élevée de ¹³⁷Cs est donc probablement due à des tourbillons de poussière locale ou régionale provenant du sol.

Hormis quelques traces sporadiques de ^{137}Cs , aucun autre émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans les échantillons de précipitations en 2024. Il en va de même dans les rivières, mais le ^{137}Cs est observé plus régulièrement dans ce milieu et provient de l'érosion des sols.

La teneur en tritium (^3H) d'origine naturelle est généralement inférieure à 2 Bq/l dans les précipitations et les eaux fluviales. Un apport artificiel de tritium dans ces compartiments environnementaux par les rejets des centrales nucléaires et de certaines industries est parfois décelé au voisinage ou en aval de ces entreprises (voir chapitres consacrés à la surveillance de ces entreprises).

Dans le sol, on retrouve essentiellement les isotopes naturels issus des séries de désintégration de l'uranium et du thorium ainsi que le ^{40}K . Les isotopes artificiels proviennent des retombées des essais nucléaires atmosphériques des années 60 (en particulier le ^{90}Sr , le ^{239}Pu , le ^{240}Pu , l' ^{241}Am et le ^{137}Cs), ainsi que de l'accident de Tchernobyl en 1986 (essentiellement le ^{137}Cs), et montrent des différences régionales, liées aux particularités de ces retombées. Dans les Alpes et le sud des Alpes, les valeurs relevées pour le ^{137}Cs (voir figure 2) et le ^{90}Sr sont toujours légèrement supérieures à celles du Plateau. Quant aux émetteurs alpha artificiels, comme le ^{239}Pu , le ^{240}Pu et l' ^{241}Am , il n'en subsiste que d'infimes traces dans le sol.

Dans l'herbe et les denrées alimentaires d'origine végétale, c'est le ^{40}K naturel qui domine. Les radionu-

cléides artificiels comme le ^{137}Cs ou le ^{90}Sr (figure 3), qui sont absorbés par les plantes à travers leurs racines, ne sont décelables dans l'herbe que sous forme de traces. Leur répartition régionale est similaire à celle enregistrée pour le sol.

En ce qui concerne les denrées alimentaires, environ 290 échantillons de denrées indigènes (hors campagne spéciale pour les sangliers) et 200 échantillons importés ont été analysés en 2024 par les laboratoires cantonaux afin d'y mesurer la radioactivité. Ces analyses ont été réalisées dans le cadre du plan d'échantillonnage de l'OFSP et des campagnes de mesure cantonales.

Dans le lait de vache indigène, la teneur en ^{137}Cs est généralement restée inférieure à la limite de détection, voisine ou inférieure à 1 Bq/l. Seul un échantillon de lait sur les 153 mesurés en 2024 a présenté une activité en ^{137}Cs supérieure à 1 Bq/l; la teneur en ^{137}Cs s'élevait à 17 Bq/l dans cet échantillon provenant des Centovalli et était ainsi nettement inférieure à la valeur maximale de 600 Bq/kg admise pour le ^{137}Cs selon l'Ordonnance Tchernobyl. Comme mentionné précédemment, les régions situées au sud des Alpes, et en particulier au Tessin, ont été les plus touchées par les retombées radioactives consécutives à cet accident, en raison des fortes précipitations qui s'y sont produites lors du passage du nuage radioactif en 1986. Ceci explique pourquoi le ^{137}Cs y reste encore mesurable, y compris dans certaines denrées alimentaires, près de 40 ans après l'accident. Les teneurs en ^{90}Sr mesurées dans 55 échantillons de lait par le canton de Bâle-Ville, l'Institut de radiophysique (IRA) et

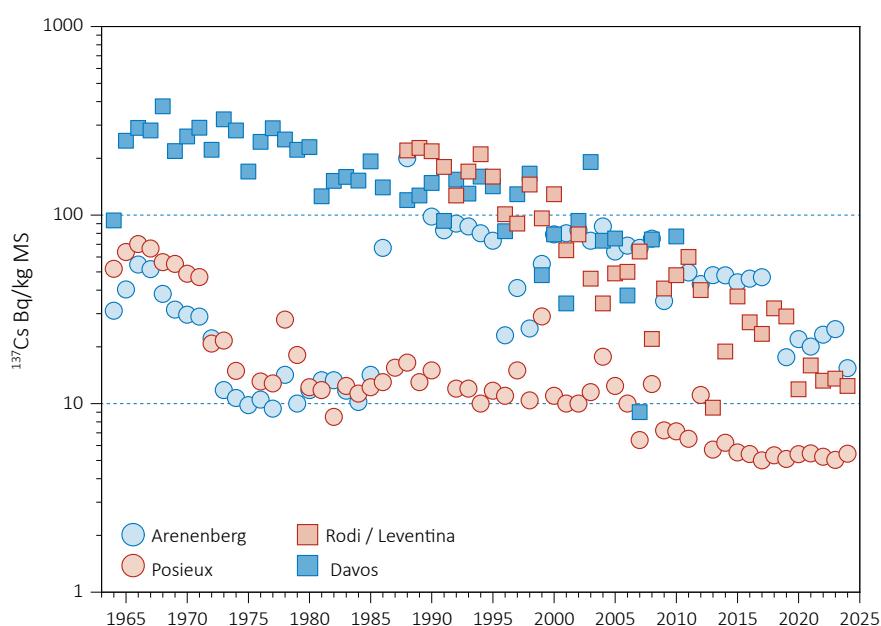


Figure 2:

^{137}Cs (en Bq/kg de matière sèche) dans les échantillons de sol de différentes stations de Suisse (1964 - 2024).

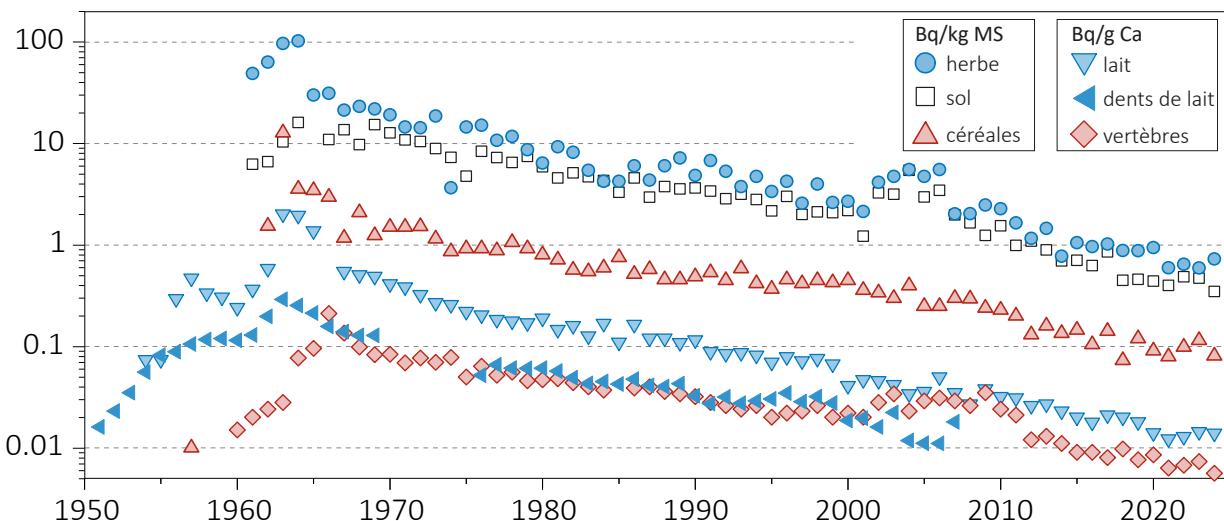


Figure 3:
 ^{90}Sr (strontium-90) dans divers échantillons prélevés entre 1950 et 2024.

le Laboratoire de Spiez étaient très basses en 2024, avec une valeur maximale de 0.2 Bq/l et une valeur médiane <0.05 Bq/l. Le ^{90}Sr détecté en Suisse provient des retombées des essais nucléaires des années 60. Les régions d'altitude, recevant davantage de précipitations, ont ainsi été plus touchées que les régions de plaine.

Dans les 18 échantillons de céréales et les 23 échantillons de fruits et légumes indigènes analysés en 2024, l'activité du ^{137}Cs est restée inférieure à la limite de détection, de l'ordre de 0.4 Bq/kg. Les valeurs de ^{90}Sr mesurées dans les céréales, situées entre 0.02 et 0.14 Bq/kg avec une moyenne de 0.08 Bq/kg, étaient très basses.

Cette année encore, le canton du Tessin a poursuivi le contrôle systématique des sangliers chassés sur son territoire, mis en place en 2013 en collaboration avec l'OFSP. En 2024, 785 sangliers ont ainsi fait l'objet d'une mesure de tri, réalisée sur place à l'aide d'un instrument dosimétrique. Trente-huit animaux, soit env. 5% des cas, dépassaient la valeur maximale pour le ^{137}Cs , fixée à 600 Bq/kg dans l'Ordonnance Tchernobyl. Des mesures de contrôle en laboratoire ont révélé une valeur maximale de ^{137}Cs de 4'620 Bq/kg. Le vétérinaire cantonal a confisqué les sangliers concernés. La contamination des sangliers s'explique par leur consommation de truffes de cerf, des champignons non comestibles pour l'homme qui accumulent le ^{137}Cs . Après l'accident de Tchernobyl, le ^{137}Cs déposé au sol a progressivement migré dans les couches plus profondes, où poussent ces champignons. Dans les régions de Suisse où la déposition au sol fut très importante, comme au Tessin, la concentration de ^{137}Cs dans les truffes de cerf peut dépasser 10'000 Bq/kg. Les sangliers, qui en sont friands, les déterrent et les consomment, avec pour conséquence un transfert du ^{137}Cs dans leur viande.

Certains champignons sauvages indigènes, notamment les bolets bais et les pholiotes ridées, présentent toujours des valeurs accrues de ^{137}Cs . Toutefois, la valeur maximale de 600 Bq/kg fixée pour le ^{137}Cs dans l'Ordonnance Tchernobyl n'a été dépassée dans aucun des 49 échantillons de champignons indigènes analysés en 2024 par les cantons du Tessin (n=42), des Grisons (n=5) et de Bâle-Ville (n=2). La valeur maximale enregistrée s'est élevée à 478 Bq/kg dans un échantillon d'amanite rougissante du Tessin, et la valeur moyenne à 49 Bq/kg.

En ce qui concerne les baies et les confitures analysées par le laboratoire cantonal de Bâle-Ville (KL-BS), seuls deux échantillons ont présenté des valeurs mesurables de ^{137}Cs (46 et 35 Bq/kg); du ^{90}Sr a été détecté dans une confiture (1.25 Bq/kg).

Comme chaque année, les laboratoires cantonaux ont également analysé la radioactivité dans certaines denrées alimentaires importées, considérées comme sensibles (champignons, baies, gibier en particulier en provenance d'Europe de l'Est), mais également dans d'autres types de denrées importées: 195 échantillons ont ainsi été mesurés par spectrométrie gamma en 2024. Le KL-BS a par exemple mesuré 24 échantillons de champignons importés, une douzaine d'échantillons de baies et de confitures ainsi que 30 autres échantillons d'aliments divers en provenance d'Europe de l'Est (fruits, haricots, poivrons et autres). Parmi les champignons importés, la concentration la plus élevée de ^{137}Cs a été mesurée dans un échantillon de cèpes, avec 126 Bq/kg (moyenne pour les champignons de 26 Bq/kg). Dans les confitures et baies, le ^{137}Cs a été détecté dans la moitié des échantillons, avec une valeur maximale de 100 Bq/kg. Du ^{90}Sr a aussi été mesuré, avec un maximum de 1.75 Bq/kg dans des myrtilles sauvages de Pologne. Dans les autres échantillons d'aliments, seules

des traces de ^{137}Cs ont parfois été relevées et, dans deux cas, de faibles concentrations de ^{90}Sr (0.6 Bq/kg). Le laboratoire cantonal du Tessin a, quant à lui, analysé 25 échantillons de gibier importé, principalement d'Allemagne, d'Autriche, de Slovénie et de Nouvelle-Zélande. Comme on pouvait s'y attendre, du ^{137}Cs a pu être détecté dans les échantillons provenant d'Europe, avec une valeur maximale de 178 Bq/kg.

Le KL-BS a par ailleurs analysé 20 échantillons d'épices et 5 échantillons de thé provenant de Turquie. Le ^{137}Cs n'a pu être mesuré que dans les échantillons de thé avec une concentration maximale de 23 Bq/kg. Dans deux de ces échantillons de thé, des valeurs de ^{90}Sr supérieures à la limite de détection (7 et 10 Bq/kg) ont également été enregistrées. Enfin, l'analyse de 20 échantillons de cacao a révélé la présence sporadique de traces de ^{137}Cs , mais pas de ^{90}Sr .

Aucun radionucléide artificiel n'a par ailleurs pu être mis en évidence dans les 54 échantillons de denrées importées (calmars, noix du Brésil, eaux minérales et d'autres produits) analysés par spectrométrie gamma par le laboratoire cantonal de ZH.

En résumé, aucun dépassement de la valeur maximale pour le ^{137}Cs n'a donc été enregistré en Suisse dans les denrées alimentaires importées en 2024.

Les résultats de l'ensemble de ces mesures montrent que la dose accumulée par une personne consommant de grandes quantités des denrées alimentaires indigènes ou importées les plus contaminées par des radionucléides artificiels – telles que gibier, champignons sauvages et baies sauvages – ne dépasserait pas quelques centièmes de mSv. A titre de comparaison, la dose annuelle moyenne due à l'ingestion de radionucléides naturels présents dans l'alimentation (hors potassium) s'élève à environ 0.22 mSv.

Pour les informations détaillées, se référer aux chapitres 4, 5 et 7.2.

Surveillance du voisinage des centrales nucléaires

Les valeurs limites pour les émissions des centrales nucléaires sont fixées par l'autorité compétente de telle sorte qu'aucune personne résidant à proximité ne puisse recevoir une dose efficace supérieure à 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris). L'exploitant a l'obligation de mesurer ses émissions et d'en communiquer le bilan à l'IFSN. Des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, l'IFSN et l'OFSP sur des filtres à aérosols et à iode, ainsi que sur des échantillons d'eaux de rejet, permettent de vérifier régulièrement les valeurs déclarées aux autorités.

Les divers contrôles ont confirmé le respect des limites réglementaires par les exploitants en 2024. Rappelons que la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM), dont l'exploitation électrique a été arrêtée le 20 décembre 2019, a été mise définitivement hors service par le groupe BKW Energie SA le 15 septembre 2020. Cette étape marque le passage du régime de l'autorisation d'exploiter à la décision de désaffectation. En septembre 2023, un nouveau jalon important du processus de désaffectation de la centrale a été franchi avec l'acheminement des derniers éléments combustibles usagés vers le centre de stockage provisoire de Würenlingen. Il ne reste donc plus de combustible nucléaire à la CNM. La surveillance de la radioactivité dans l'environnement se poursuit toutefois toujours comme en régime d'exploitation.

Les résultats 2024 de la surveillance menée à proximité des centrales nucléaires sont conformes à ceux des années précédentes. Ainsi, comme par le passé, le rayonnement direct a pu être clairement détecté en certains points de la clôture de la centrale de Leibstadt, pouvant conduire à une dose supplémentaire d'au maximum 0.017 mSv par semaine. Ce rayonnement résulte de la désintégration radioactive de l'azote-16 (^{16}N), un radionucléide de courte période produit dans le réacteur. En outre, les installations de stockage des déchets peuvent contribuer à une augmentation de la dose locale à la clôture. Avec l'arrêt de la production d'électricité à Mühleberg, la contribution de l' ^{16}N disparaît. Toutefois, les travaux de démantèlement actuellement en cours peuvent entraîner des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture, en raison de la présence de grandes quantités de matériaux activés (contenant en particulier du ^{60}Co), stockés provisoirement sur le site. Ainsi, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la CNM a montré une élévation maximale de la dose ambiante de 0.008 mSv par semaine, après soustraction du bruit de fond naturel.

Ces valeurs respectent l'art. 79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés, puisqu'aucune personne ne séjourne de manière durable dans ces endroits. En effet, il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an, car aucun membre du public ne réside pour de longues périodes en ces endroits.

Les résultats de la surveillance des immissions ont montré un faible marquage de l'environnement au voisinage des centrales nucléaires, même si les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité,

ont permis de mettre en évidence les traces de radionucléides produits par ces installations. Ainsi des valeurs accrues de ^{14}C , rejeté dans l'atmosphère par les centrales nucléaires lors de leur exploitation, ont été mises en évidence dans les feuillages (augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 163 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt). A titre indicatif, notons qu'une activité supplémentaire de 100 pour mille de ^{14}C dans les denrées alimentaires induit une dose annuelle supplémentaire de l'ordre de 1 micro-Sv. Le seul autre radionucléide issu des rejets atmosphériques des centrales nucléaires occasionnellement détecté est le tritium, mesuré dans les précipitations avec des activités très faibles.

L'empreinte des rejets liquides (hors tritium) des centrales nucléaires sur le milieu aquatique est essentiellement mesurable dans les sédiments. En 2024, des traces de ^{54}Mn ont ainsi été sporadiquement détectées dans les échantillons de sédiments prélevés dans l'Aar (Hagneck et Klingnau) et le Rhin (Pratteln). Les activités mesurées sont très faibles et ne présentent pas de risque sanitaire; elles témoignent de l'efficacité des programmes de surveillance mis en œuvre. Le ^{137}Cs présent dans les échantillons d'eau et de sédiments de l'Aar et du Rhin provient quant à lui essentiellement de la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes atomiques des années 60.

Les résultats des mesures de $^{239+240}\text{Pu}$ et d' ^{241}Am effectuées par l'IRA sur différents échantillons de l'environnement aquatique collectés en aval des centrales nucléaires (eaux de l'Aar et du Rhin, plantes aquatiques, sédiments) n'ont pas mis en évidence de marquage propre aux rejets des centrales, les rapports isotopiques $^{241}\text{Am} / ^{239+240}\text{Pu}$ indiquant une contribution très majoritaire des retombées des essais nucléaires des années 60.

Contrairement aux rejets d'émetteurs gamma ou alpha, les rejets liquides de tritium par les centrales nucléaires entraînent parfois des augmentations mesurables de ce radionucléide dans les eaux de l'Aar et du Rhin. Ainsi, au premier semestre, et en particulier en avril et mai, les concentrations de tritium dans l'Aar (et, dans une moindre mesure, le Rhin) étaient légèrement plus élevées, en raison de rejets plus importants de tritium par les centrales nucléaires de Beznau et, surtout, de Gösgen avant sa révision. La concentration maximale de tritium a ainsi atteint env. 10 Bq/l dans l'Aar, à Brugg, en avril, et 3.2 Bq/l dans le Rhin, à Weil am Rhein, également en avril. Le reste de l'année, les concentrations mensuelles de tritium dans l'Aar et le Rhin sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval des centrales nucléaires suisses en 2024 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle.

Si des traces d' ^{241}Am ont pu être décelées dans un poisson prélevé dans le Rhin, c'est que la masse disponible pour la mesure était beaucoup plus grande que celle des autres échantillons (plus la masse de l'échantillon mesuré est importante, plus la sensibilité de la mesure est élevée). Aucun radionucléide d'origine artificielle n'a été détecté dans les échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Schönenwerd, Böttstein et Hardwald (Muttenz).

Aucune valeur anormale n'a été enregistrée en 2024 dans le cadre de la surveillance de l'ancienne centrale nucléaire de Lucens. Les concentrations de tritium mesurées actuellement dans son système de drainage ne dépassent plus que très légèrement les limites de détection.

Hormis les quelques exemples précités et comme le montre la figure 4, les résultats des mesures environnementales effectuées au voisinage des installations nucléaires ne se distinguent pas de ceux enregistrés dans les endroits situés hors de leur influence. Ils montrent que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que les contaminations détectables proviennent principalement des essais nucléaires des années 60 et de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs).

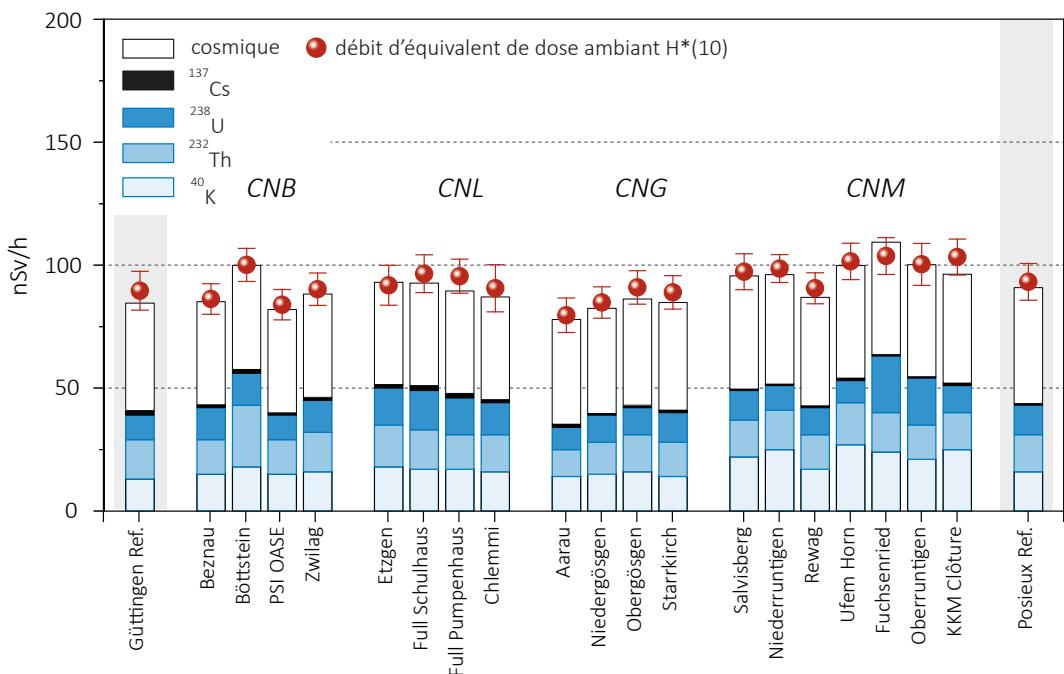
En 2024, les doses supplémentaires reçues par les adultes les plus exposés attribuables aux émissions des centrales nucléaires sont restées très faibles (< 0.001 mSv pour Beznau et Gösgen, et environ 0.002 mSv pour Mühlberg et Leibstadt) par rapport aux doses d'origine naturelles ou médicales. Toutefois, outre les doses effectives, il convient également de prendre en compte le risque inhérent à ces installations. C'est pourquoi les autorités se doivent de poursuivre avec rigueur les contrôles et les études afin de répondre aux différents objectifs scientifiques et réglementaires de la surveillance et de pouvoir informer le public de manière détaillée.

Pour les informations détaillées, se référer aux chapitres 3.1, 4.4, 7.1, 7.2 et 8.1 à 8.5.

Surveillance des centres de recherche

Toutes les installations du CERN étaient en fonctionnement en 2024. Après un arrêt pour maintenance à partir de la mi-novembre 2023, le CERN a progressivement redémarré l'exploitation de toutes ses installations dès février 2024, qui sont restées en service jusqu'au début décembre 2024.

Le bilan et le contrôle des émissions de ses propres installations effectués par le CERN en 2024, combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence, ont démontré que l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/an fixée dans sa réglementation. La dose

**Figure 4:**

Contributions individuelles à l'exposition ambiante ($H^*(10)$) attribuables aux différents radionucléides présents sur les sites examinés par l'OFSP en 2024 au voisinage des centrales nucléaires suisses ainsi qu'aux sites de référence de Güttingen et Posieux (grisé). Ces contributions ont été calculées à partir des mesures de spectrométrie gamma in situ; le résultat de la mesure directe de l'exposition globale à l'aide d'une chambre d'ionisation est également représenté afin d'apprecier la fiabilité de la méthode.

efficace maximale délivrée aux membres du public suisse est demeurée inférieure à 0.007 mSv. Le programme indépendant de surveillance des immissions mis en œuvre par l'OFSP, en collaboration avec le département F.-A. Forel, au voisinage du centre de recherche, a confirmé que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement était resté très faible.

Si des traces de radionucléides à courte demi-vie produits par les installations du CERN, tels que l'¹³¹I ou l'⁴¹Ar (demi-vie de 8j et 15h respectivement), ont sporadiquement pu être décelées dans l'air au voisinage du centre de recherche en 2024, leurs concentrations ne représentaient que d'infimes fractions des limites d'immissions dans l'air définies dans l'ORaP (moins de 0.015% de la limite d'immissions dans l'air pour l'¹³¹I par exemple).

Les résultats des mesures dans le milieu terrestre ou encore les eaux et sédiments du Nant d'Avril ne se sont pas distingués de ceux enregistrés dans les stations de mesures de référence, situées hors influence du CERN.

La dose de rayonnement supplémentaire reçue par la population vivant au voisinage du PSI/ZWILAG ne doit pas excéder 0.15 mSv/an au total pour les deux installations, avec une part fixée à 0.05 mSv pour le ZWILAG. Selon l'évaluation de l'IFSN, les rejets effectifs du PSI ont entraîné en 2024 une dose supplémentaire inférieure à 0.004 mSv pour la population avoisinante. La quasi-totalité de cette dose provient des rejets de gaz rares de courte période produits dans les accélérateurs de particules de la zone ouest de l'institut. L'évaluation des TLD disposés à la clôture du PSI a ainsi mis en évidence des élévations de la dose ambiante pouvant atteindre au maximum 0.006 mSv (après soustraction du bruit de fond).

La surveillance de l'environnement est assurée par le PSI, ainsi que par l'OFSP qui effectue des mesures supplémentaires de manière indépendante. Hormis des valeurs ponctuellement plus élevées de tritium dans les précipitations ou de ¹⁴C dans les feuillages, les résultats de la surveillance au voisinage du PSI n'ont pas mis en évidence de marquage de l'environnement attribuable au fonctionnement des installations du centre de recherche.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 8.

Tritium dans l'industrie

Certaines entreprises industrielles utilisent également des substances radioactives. Le tritium est le radionucléide le plus utilisé dans ce domaine en Suisse, par exemple pour la fabrication de sources lumineuses au gaz de tritium ou pour la production de marqueurs radioactifs au tritium pour la recherche. Ces entreprises sont tenues de communiquer à l'autorité de surveillance le bilan de leurs émissions. En 2024, toutes les entreprises concernées ont respecté les valeurs limites pour les rejets fixées dans leur autorisation, à une exception près. En effet, le 5 février 2024, une entreprise suisse spécialisée dans le développement et la fabrication de produits à base de tritium située dans le canton de Lucerne a rejeté 2 TBq de tritium (HTO) dans l'air évacué, en raison d'une erreur de production. Cette quantité d'activité dépasse la valeur limite hebdomadaire et correspond à la moitié de la valeur limite annuelle de rejet dans l'environnement selon l'autorisation de l'OFSP [1].

L'OFSP met en œuvre un programme de surveillance spécifique pour contrôler les immissions autour de ces entreprises. Le tritium est ainsi analysé dans les précipitations, l'humidité de l'air, les eaux superficielles et, dans certains cas, les denrées alimentaires.

Cette surveillance en continu du tritium dans l'environnement a ainsi permis de montrer, qu'après l'incident du 5 février à Root/LU, l'impact sanitaire pour la population avoisinante est resté négligeable. Après une augmentation significative des concentrations de tritium dans les échantillons de pluie et d'humidité de l'air début février, celles-ci ont en effet rapidement diminué et sont restées très faibles tout au long de l'année 2024. Les stations de mesure situées à proximité de l'entreprise ont enregistré jusqu'à 39 Bq/m³ de tritium dans l'humidité de l'air pendant la semaine du 2 au 8 février, alors que les valeurs habituelles sont inférieures à 1 Bq/m³. Les doses de rayonnement dues à cet incident, calculées sur la base de ces résultats de mesure, n'ont toutefois pas dépassé quelques microsievert (μ Sv) au maximum pour les personnes du public les plus exposées.

Les résultats de la surveillance du ³H menée en 2024 au voisinage des entreprises utilisatrices ont montré que les concentrations de ce radionucléide dans l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) étaient généralement nettement plus élevées à proximité immédiate de ces sites, notamment à Niederwangen.

Ainsi, dans les échantillons de précipitations prélevés toutes les deux semaines à proximité immédiate de l'entreprise mb Microtec à Niederwangen/BE, les valeurs enregistrées allaient de 5 à 790 Bq/l, avec une moyenne annuelle de 270 Bq/l. Il s'agit d'un marquage nettement mesurable, puisque les concentrations de tritium dans les précipitations des stations de référence ne dépassent

pas 2 Bq/l. Toutefois, ces valeurs représentent au maximum 4% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP) pour le tritium dans les eaux accessibles au public, et les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont très faibles. Les concentrations de tritium mesurées dans des distillats d'échantillons de lait ainsi que de fruits et légumes (pommes, poires, prunes, rhubarbe) prélevés fin août 2024 par le canton de Berne à proximité de l'entreprise se sont échelonnées entre 5 et 80 Bq/l. Ces valeurs sont parmi les plus basses enregistrées au cours des dix dernières années.

Les concentrations de tritium mesurées dans les échantillons de précipitations et d'humidité de l'air collectés à Teufen/AR, au voisinage de l'entreprise RC Tritec sont généralement restées basses en 2024 (valeurs moyennes de 34 Bq/l et 1.2 Bq/m³ respectivement dans les précipitations et l'humidité de l'air).

Pour les informations détaillées, se référer aux chapitres 5, 9.1 et 9.3.

Héritages radiologiques

Suite à l'achèvement des travaux du plan d'action radium 2015-2023, l'OFSP a élaboré un rapport final à l'intention du Conseil fédéral, dressant le bilan des actions menées ainsi que les principaux enseignements à en tirer, tout en formulant des perspectives sur les futures nécessités d'action. Ce rapport présenté au Conseil fédéral lors de sa séance du 27 novembre 2024 se base notamment sur l'évaluation externe du plan d'action réalisée par l'entreprise EBP Schweiz AG et sur l'avis d'expert du Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN) en France. Tous ces documents sont publiés sur le site internet de l'OFSP ([Rapport final du Plan d'action radium 2015-2023](#)).

Le Plan d'action radium 2015-2023 a permis d'assainir avec succès plus de 160 anciens ateliers horlogers contaminés au radium. Par ailleurs, quelque 250 anciennes décharges pouvant contenir des déchets de radium ont été identifiées et requièrent des mesures de radioprotection en cas d'ouverture. Il a atteint ses objectifs en matière de protection de la population, des travailleurs et de l'environnement. Les vastes recherches historiques, ainsi que la grande acceptation des diagnostics et des assainissements par les propriétaires, ont permis de réduire significativement ces expositions et de garantir l'habitabilité à long terme des biens-fonds. Le recours à des entreprises d'assainissement spécialisées a contribué à minimiser les risques pour les travailleurs et à éviter une dispersion des déchets contaminés dans l'environnement. Les mesures de radioprotection à mettre en œuvre en cas d'ouverture d'une ancienne décharge susceptible de contenir des déchets au radium poursuivent le même objectif.

Ces constats ont été confirmés par les évaluations externes du plan d'action, qui ont aussi souligné les progrès accomplis en matière de communication avec le public et les parties prenantes.

Certains points restent toutefois encore ouverts au terme du plan d'action. En raison de l'ampleur de l'utilisation historique du radium en Suisse, la découverte de nouvelles adresses à examiner et éventuellement à assainir est probable. Il est donc nécessaire de maintenir les compétences pour de futures interventions. Suite à la révision actuelle de la loi fédérale sur la radioprotection, il est prévu de réglementer la prise en charge des coûts d'assainissement dans l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP). La traçabilité des contaminations résiduelles dans les biens-fonds devra aussi être garantie. Les mesures de radioprotection à mettre en œuvre lors de l'ouverture d'une ancienne décharge susceptible de contenir des déchets au radium s'inscrivent sur le long terme; lors de la prochaine révision de l'ORaP, il conviendra de préciser les responsabilités et les procédures associées. Enfin, l'OFSP se chargera de la mise en place d'une vigilance pour les décharges susceptibles de contenir des déchets au radium d'origine non horlogère et de la définition de mesures appropriées pour les objets contenant du radium encore en circulation sur le marché.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 9.6.

Utilisation de substances radioactives dans les hôpitaux

Les hôpitaux utilisent depuis de nombreuses années de l'¹³¹I (demi-vie d'env. 8 jours) pour le diagnostic et le traitement de maladies de la thyroïde. Les patients suivant une thérapie à l'iode et ayant reçu moins de 200 MBq (1 mégabq = 10^6 bq) en ambulatoire peuvent quitter l'hôpital après la thérapie. Les patients ayant reçu plus de 200 MBq doivent être isolés dans des chambres spéciales pendant au moins 48 heures après le traitement. Ces chambres, blindées, et dont les eaux usées (WC, douches) sont collectées dans des cuves de décroissance, permettent de limiter l'exposition de tiers et le rejet de radioactivité dans l'environnement, puisque les eaux usées ne sont rejetées dans l'environnement qu'après diminution de leur activité en dessous des valeurs limites d'immissions.

Si l'¹³¹I a très longtemps été le radionucléide le plus employé en médecine nucléaire en Suisse, il se place aujourd'hui, en termes d'activité appliquée, derrière le ¹⁷⁷Lu (demi-vie d'env. 7 jours) utilisé pour le traitement des tumeurs neuroendocrines et du cancer de

la prostate. La très forte augmentation de l'activité totale de ¹⁷⁷Lu appliquée en Suisse observée depuis 2021 s'est poursuivie en 2024 (14.85 TBq en 2024, en augmentation de 25% par rapport à 2023). Pour tenir compte de la radiotoxicité, on calcule l'activité du ¹⁷⁷Lu en équivalent ¹³¹I, ce qui donne 0.33 TBq d'équivalent ¹³¹I (à comparer aux 2.35 TBq d'¹³¹I appliqués en Suisse en 2024). Du point de vue de la radiotoxicité, l'¹³¹I reste donc le radionucléide dominant. Comme pour l'¹³¹I, les patients traités avec le ¹⁷⁷Lu doivent être hospitalisés pendant au moins 48h après leur traitement et leurs excréments sont collectés dans des cuves de décroissance. Suite à la demande de nombreux hôpitaux d'abaisser le temps de séjour des patients traités au ¹⁷⁷Lu de 48h à 20h, l'OFSP a évalué l'impact sur l'environnement et le public d'une telle diminution sur la base d'études pilotes menées dans plusieurs hôpitaux. Les résultats de cette étude seront disponibles dans le courant de l'année 2025.

L'⁹⁰Y, le ¹⁶⁶Ho ou le ²²³Ra sont également utilisés en médecine nucléaire pour le traitement de cancers. L'utilisation de ¹⁶⁶Ho est relativement récente (premières applications en 2020). Les applications d'⁹⁰Y et de ²²³Ra ont nettement diminué au cours des 5 à 10 dernières années. D'autres nucléides comme le ¹⁶⁹Er ou le ¹⁸⁶Re sont appliqués dans les articulations pour traiter les maladies rhumatismales afin de réduire l'inflammation et la douleur. L'application pour ces radionucléides se fait généralement en ambulatoire, de sorte que les patients peuvent quitter l'hôpital après le traitement. Pour la première fois en 2024, le ¹⁶¹Tb a fait son apparition dans les statistiques d'application. Il a été utilisé dans le cadre d'essais cliniques pour le traitement du cancer de la prostate et des tumeurs neuroendocrines.

Dans le cadre de la surveillance de l'environnement, des échantillons d'eaux usées sont prélevés chaque semaine dans les stations d'épuration des grandes agglomérations et analysés afin de déterminer les concentrations des émetteurs gamma (¹³¹I, ¹⁷⁷Lu). Des mesures en continu à l'aide d'une sonde automatique ont également été effectuées en 2024 à la station d'épuration de Bellinzona (voir sous «surveillance des eaux des stations d'épuration»). On notera que si ces radionucléides sont rarement détectés dans les eaux de rivière, on peut en retrouver des traces dans les sédiments. Ainsi, des traces d'¹³¹I, de ¹⁷⁷Lu ainsi que de ²²³Ra ont régulièrement été mises en évidence dans les particules en suspension prélevées dans le Rhin à Weil am Rhein en 2024.

Pour davantage d'informations, consulter le chapitre 9.2 et 9.4

Stations d'épuration (STEP), eaux de lavage des fumées des usines d'incinération et eaux de percolation des décharges

L'OFSP coordonne également un programme spécifique de prélèvements et de mesures de la radioactivité (émetteurs gamma et ^3H) des eaux des STEP ainsi que des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération des déchets. Toutefois, comme mentionné dans l'introduction, ces programmes devront être redimensionnés et en grande partie supprimés d'ici 2026 en raison des mesures d'économie de la Confédération. En ce qui concerne la surveillance des eaux des STEP, la réduction du programme a concerné, en 2024, l'agglomération de Zürich. Celles de Lausanne, de Berne et Biel/Bienne suivront d'ici à 2026.

La surveillance des STEP permet d'évaluer les rejets de certaines substances radioactives dans l'environnement par les industries et les hôpitaux via les eaux usées. Les radionucléides utilisés en médecine nucléaire étant de courte (quelques jours) à très courte (1 à 2 heures) demi-vie, ils sont difficilement décelables par des mesures en laboratoire, étant donné les délais entre le prélèvement et l'analyse (envoi par poste). Pour cette raison, des mesures en continu ont également été réalisées à l'aide d'une sonde automatique à la STEP de Bellinzona (Giubiasco) en 2024.

Comme expliqué plus haut, les radionucléides ^{131}I , ^{177}Lu utilisés en thérapie et dont les demi-vies sont d'environ une semaine, sont retenus dans des réservoirs de décroissance dans les hôpitaux jusqu'à ce que la majeure partie se soit désintégrée, avant d'être déversés dans les égouts; ils n'apparaissent donc que sporadiquement dans l'environnement. Les nucléides à vie très courte ^{99m}Tc et $^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ ne nécessitent pas de rétention dans les hôpitaux en raison de la limite d'immission élevée; ils ont par conséquent été régulièrement détectés lors des mesures en continu dans la STEP. Les radionucléides ^{111}In et ^{123}I , qui ont une demi-vie « moyenne », sont utilisés en ambulatoire à des fins diagnostiques et peuvent parvenir dans les STEP via les égouts depuis le domicile des patients.

Si tous ces radionucléides ont pu être mesurés dans les eaux de la STEP de Giubiasco en 2024, les concentrations moyennes hebdomadaires maximales enregistrées sont toutefois restées bien inférieures aux valeurs limites d'immission dans les eaux accessibles au public. Seule une des concentrations hebdomadaires moyennes de ^{131}I , avec environ 5 Bq/l, était proche de la valeur limite d'immission de 7 Bq/l pour ce radionucléide. Comme le point de mesure se trouve à l'entrée de la STEP et qu'une grande partie du ^{131}I est éliminée lors du processus d'épuration, la valeur limite d'immission dans l'environnement (fleuve Ticino) a également été clairement respectée ici.

Dans le cadre de l'étude pilote visant à évaluer l'impact sur l'environnement de la réduction du temps de séjour des patients en chambre spéciale, de 48h à 20h, une sonde automatique de mesure a également été installée à la STEP de Lausanne en 2024. Comme à Bellinzona, le ^{177}Lu a été régulièrement mesuré dans les eaux de la STEP de Lausanne. Les concentrations qui y ont été enregistrées, mesurées après deux étapes d'épuration, sont nettement plus faibles qu'à Bellinzona, où la sonde est installée à l'entrée de la STEP. Les résultats complets de l'étude pilote seront publiés en 2025.

Les résultats des mesures du tritium dans les eaux des STEP de grandes agglomérations suisses (Bâle, Berne, Lausanne) n'ont pas présenté de valeurs inhabituelles. Si des concentrations plus élevées de ^3H ont parfois été mesurées dans les eaux de la STEP de Bâle, ces augmentations sont dues à des rejets, dans la STEP, d'eaux de lavage des fumées de l'usine de traitement des déchets spéciaux (RSMVA) Veolia. Cette dernière dispose en effet d'un accord de l'autorité délivrant les autorisations (FANM/ OFSP) pour incinérer jusqu'à 100 GBq de ^3H par semaine, conformément à l'Art. 116 de l'ORaP.

La surveillance des eaux de lavage des usines d'incinération vise à s'assurer qu'aucun déchet radioactif ne soit accidentellement ou intentionnellement éliminé par le circuit des ordures conventionnelles. Depuis l'entrée en vigueur de l'ORaP révisée en 2018, les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) sont tenues de contrôler, selon une procédure adéquate, l'éventuelle présence d'émetteurs gamma dans les déchets avant leur incinération, afin de prévenir les risques pour le personnel et l'environnement. Si l'installation de portiques de détection à l'entrée de ces usines permet de couvrir ces exigences, elle n'empêche pas l'incinération accidentelle de tritium, un émetteur bêta pur indétectable par ces portiques. Pour cette raison, des mesures du tritium sont réalisées dans les eaux de lavage des fumées des UIOM de grandes agglomérations. Cette surveillance a mis en évidence plusieurs incidents au cours des dernières années, en particulier à Bâle et à Zürich, mais l'origine des déchets contenant du tritium, incinérés de manière non conforme, n'a toujours pas pu être élucidée. Aucune incinération accidentelle ou illégale de tritium dans les UIOM n'a toutefois été annoncée à l'OFSP en 2024.

L'art. 114 de l'ORaP permet, sous certaines conditions, la mise en décharge au cas par cas de déchets radioactifs de faibles activités avec l'accord de l'autorité délivrant les autorisations. Cette possibilité s'applique en particulier aux déchets contenant du ^{226}Ra produits avant l'entrée en vigueur de l'ORaP de 1994.

Toujours selon l'art.114, l'OFSP doit mettre en œuvre une surveillance des décharges dans lesquelles de tels

déchets ont été stockés définitivement, pour assurer le respect des limites de doses efficaces autorisées. Cette surveillance est réalisée en mesurant le ^{226}Ra dans les eaux de percolation et/ou les eaux souterraines. Pour garantir le respect des limites de dose prescrites par la législation, il est nécessaire que la limite d'immission dans les eaux soit respectée dans les eaux de percolation de la décharge (voir « Directives art. 114 »). La limite d'immission pour le ^{226}Ra dans les eaux est fixée à 580 mBq/l. Les résultats des mesures effectuées en 2024 ont confirmé que les concentrations de ^{226}Ra dans les eaux de percolation des décharges dans lesquelles des déchets contenant du ^{226}Ra ont été éliminés ces dernières années sont faibles et bien inférieures à la valeur limite d'immission.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 9.5.

Radioactivité assimilée par le corps humain

L'assimilation de radionucléides par la nourriture peut être évaluée par des mesures au corps entier (pour les émetteurs gamma) ainsi que par des analyses de la teneur en ^{90}Sr dans les vertèbres humaines et les dents de lait. Le suivi du ^{90}Sr dans les dents de lait, réalisé par l'IRA sur mandat de l'OFSP depuis 40 ans, a toutefois malheureusement dû être arrêté en 2023 faute d'échantillons. Malgré les rappels annuels, le nombre de cabinets dentaires participant à la collecte de dents n'a cessé de diminuer depuis le milieu des années 2010 et est devenu insuffisant pour poursuivre le programme. Les activités étant aujourd'hui très basses ($< 10 \text{ mBq g}^{-1} \text{ Ca}$), le ^{90}Sr ne peut plus être quantifié si la taille de l'échantillon n'est pas suffisante.

Sur la base des résultats des mesures au corps entier réalisées aux hôpitaux universitaires genevois pendant près de 40 ans, il est possible de déterminer les activités du ^{40}K présent naturellement dans le corps humain: celles-ci s'élèvent en moyenne à environ 56 Bq/kg chez les femmes et à 71 Bq/kg chez les hommes. La teneur en ^{90}Sr dans les vertèbres et les dents de lait n'est plus aujourd'hui que de l'ordre de la dizaine de mBq/g de calcium (figure 3). Le strontium est assimilé par le corps humain comme le calcium dans les os et les dents. Les vertèbres sont choisies comme indicateur de la contamination du squelette car ce sont des os particulièrement spongieux, échangeant rapidement le calcium avec le plasma sanguin. Le prélèvement de vertèbres sur des personnes décédées dans l'année en cours permet de déterminer le niveau de contamination de la chaîne alimentaire en ^{90}Sr . Quant à la formation des

dents de lait, elle débute dans les mois précédant la naissance et se poursuit durant la période d'allaitement. La mesure du strontium s'effectue lorsque la dent de lait tombe d'elle-même. Elle donne une indication rétroactive de la contamination de la chaîne alimentaire de la mère à l'époque de la naissance de l'enfant. Les valeurs de strontium mesurées dans les dents de lait (figure 3) sont donc répertoriées en fonction de l'année de naissance de l'enfant. Ceci explique que les courbes relatives aux dents de lait et au lait montrent une évolution pratiquement parallèle.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 6.1 et 6.2.

Evaluation

Comme les années précédentes, les concentrations de radionucléides dans l'environnement et les doses d'irradiation de la population attribuables aux sources de rayonnement artificielles sont restées nettement inférieures aux limites légales durant l'année 2024 en Suisse; le risque sanitaire correspondant peut donc être considéré comme très faible.

Il existe des différences régionales de répartition de la radioactivité naturelle et artificielle dans l'environnement. Si la radioactivité naturelle est essentiellement influencée par la géologie, la part de radioactivité artificielle, comme conséquence des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, est, elle aussi, distribuée de manière hétérogène sur le territoire suisse. Le ^{137}Cs radioactif de Tchernobyl a par exemple principalement été déposé au Tessin et dans certaines vallées du sud des Grisons, où il est encore mesurable dans de nombreux échantillons près de 40 ans après l'accident. Cependant, les concentrations ont régulièrement diminué depuis 1986 et seuls quelques rares dépassements de la valeur maximale pour le ^{137}Cs dans les denrées alimentaires, fixée dans l'Ordonnance Tchernobyl, ont encore été observés en 2024 dans certaines denrées particulièrement sensibles comme les sangliers.

Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de la surveillance des centrales nucléaires et des centres de recherche sont semblables à ceux enregistrés au cours des années précédentes. Même si des traces de radionucléides émis par ces installations sont décelables dans l'environnement (par exemple le ^{14}C dans les feuilages ou le ^{54}Mn dans les sédiments en aval des centrales nucléaires), les rejets qui en sont à l'origine sont nettement inférieurs aux limites autorisées et n'ont conduit à aucun dépassement.

sement des valeurs limites d'immissions. La surveillance mise en œuvre au voisinage des entreprises utilisatrices de tritium a montré un marquage nettement mesurable de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) par ce radionucléide à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier à Niederwangen. Les concentrations de ${}^3\text{H}$ mesurées dans l'environnement en 2024 au voisinage de l'entreprise concernée se sont toutefois situées dans la fourchette basse de celles enregistrées au cours des 15 dernières années et les doses qui en résultent pour la population avoisinante peuvent être considérées comme négligeables. Le rejet non contrôlé de 2 TBq de tritium dans l'environnement par une entreprise située à Root/LU en février 2024, dépassant la valeur limite hebdomadaire de rejet autorisé par l'OFSP, n'a par ailleurs pas entraîné de doses significatives pour la population vivant dans son voisinage. Quant aux rejets d'effluents radioactifs liquides par les hôpitaux, la surveillance a montré que les limites d'immission sont très généralement respectées déjà à l'entrée des stations d'épuration des grandes villes.

La surveillance de la radioactivité dans les eaux des stations d'épuration, les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération ainsi que les eaux de percolation des décharges n'a pas révélé de valeur susceptible de représenter un risque pour la santé des professionnels qui y travaillent ou pour l'environnement. Ce programme de surveillance, déjà redimensionné en 2024, sera progressivement mis à l'arrêt d'ici 2026 pour satisfaire aux mesures d'économie décidées par le Parlement et le Conseil fédéral.

En conclusion, l'impact radiologique lié au fonctionnement des centrales nucléaires, centres de recherche, industries et hôpitaux est resté très faible pour les populations avoisinantes. Les traces de radioactivité artificielle décelées dans l'environnement témoignent de l'efficacité des mesures prises pour réduire les rejets de ces installations et confirment l'efficacité des programmes de surveillance mis en œuvre.

Référence

[1] [Événements de radioprotection \(admin.ch\)](#)



1.2

Umweltüberwachung: Zusammenfassung

S. Estier, P. Steinmann

Sektion Umweltradioaktivität (URA), BAG, 3003 Bern

Auftrag und Messprogramm

Überwachung der ionisierenden Strahlung und der Radioaktivität in der Umwelt

Die Strahlenschutzverordnung (StSV) überträgt in Artikel 191 dem BAG die Verantwortung für die Überwachung der ionisierenden Strahlung und der Radioaktivität in der Umwelt.

Das Überwachungsprogramm besteht aus mehreren Teilen. Ziel ist einerseits der schnelle Nachweis jeder zusätzlichen radioaktiven Belastung künstlichen Ursprungs, die schwerwiegende Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung haben könnte (Strahlenereignis). Mit dem Überwachungsprogramm sollen andererseits auch die Referenzwerte für die Umweltradioaktivität in der Schweiz und deren Schwankungen bestimmt werden, damit die Strahlendosen für die Bevölkerung ermittelt werden können. Diese allgemeine Überwachung umfasst zudem die Messung der Kontaminationen als Folge der oberirdischen Kernwaffenversuche der USA und der Sowjetunion in den 50er und 60er Jahren sowie des Reaktorunfalls von Tschernobyl.

Mit der Überwachung müssen sich ausserdem die effektiven Auswirkungen von Kernanlagen, Forschungszentren und Unternehmen, die radioaktive Substanzen einsetzen, auf die Umwelt und die Bevölkerung in der Umgebung feststellen lassen. Diese spezifische Überwachung der Betriebe, welche über eine streng beschränkte Bewilligung zur Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt verfügen, erfolgt in Zusammenarbeit mit den betreffenden Aufsichtsbehörden, das heisst mit dem eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat

(ENSI) für die Kernkraftwerke und der Suva für die Industriebetriebe. Sie beginnt mit der Überprüfung der Einhaltung der Abgabelimiten bei den Emissionen (Freisetzung von radioaktiven Stoffen) und setzt sich mit der Überwachung der Immissionen, d.h. der effektiv in der Umwelt gemessenen Konzentrationen, fort.

Um allen diesen Zielen nachzukommen, erstellt das BAG jährlich ein Probenahme- und Messprogramm in Zusammenarbeit mit dem ENSI, der Suva und den Kantonen (Art. 193 StSV). Es koordiniert dieses Überwachungsprogramm, an dem auch andere Laboratorien des Bundes und verschiedene Hochschulinstitute beteiligt sind. Die Liste der am Überwachungsprogramm beteiligten Laboratorien findet sich in den Anhängen 1 und 2. Das BAG sammelt die Daten und wertet sie aus und veröffentlicht jährlich die Ergebnisse der Radioaktivitätsüberwachung zusammen mit den für die Bevölkerung daraus resultierenden Strahlendosen (Art. 194 StSV).

Messprogramm (siehe auch Anhänge 3 und 4)

Das Überwachungsprogramm umfasst zahlreiche Umweltbereiche von der Luft über Niederschläge, Boden, Gras, Grundwasser und Oberflächengewässer, Trinkwasser und Sedimente bis zu Nahrungsmitteln. Seit 2010 werden auch Milchzentralen und Grossverteiler von Milch in der ganzen Schweiz beprobt. Messungen vor Ort (In-situ-Gammaspektrometrie), welche die auf dem Boden abgelagerte Radioaktivität direkt erfassen, vervollständigen diese Analysen. Mit Untersuchungen der Radioaktivität im menschlichen Körper werden auch Kontrollen am Ende der Kontaminationskette durchgeführt. Ergänzt wird dieses allgemeine Programm durch

Analysen von Stichproben in den Kernanlagen während kontrollierten Abgaben. Weiter werden auch Abwässer aus Kläranlagen (ARA) und Deponien sowie Rauchgaswaschwasser aus Kehrichtverbrennungsanlagen überprüft. Da aber das BAG und seine Abteilung Strahlenschutz stark von den Sparmassnahmen des Bundes betroffen sind, wurden diese spezifischen Überwachungsprogramme für ARAs und KVAs bereits 2024 reduziert und werden bis 2026 schrittweise abgeschafft.

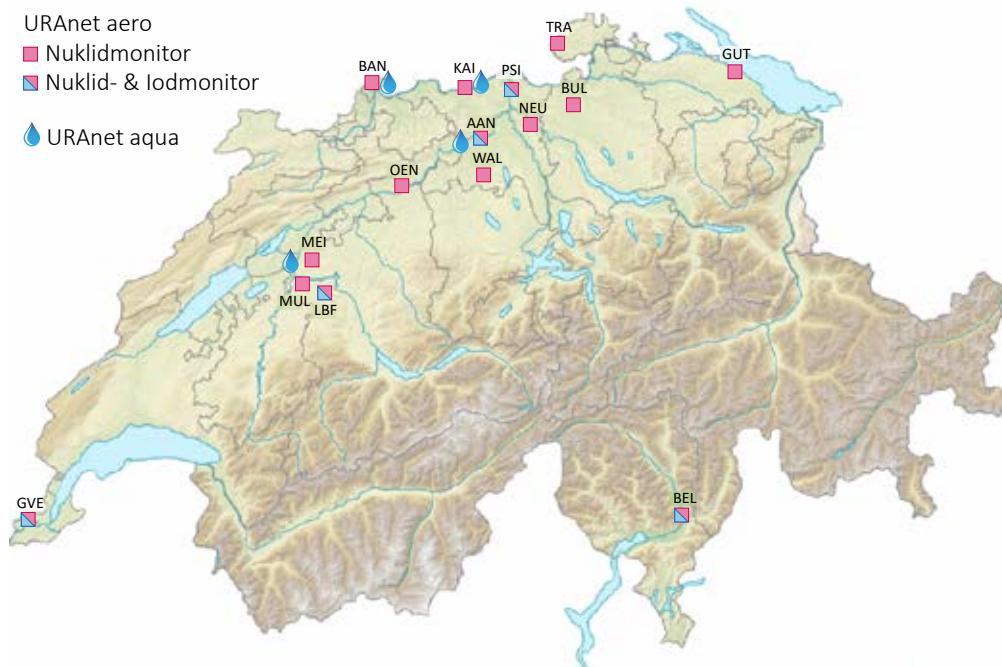
Automatische Messnetze (Figur 1) erfassen die Gamma-Dosisleistung über das ganze Land (NADAM = Alarm- und Messnetz zur Bestimmung der Dosisleistung) sowie speziell in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK = Messnetz in der Umgebung der Kernanlagen zur Bestimmung der Dosisleistung). Die kontinuierliche Überwachung der Radioaktivität der Aerosole und des Flusswassers wird durch die automatischen Messnetze URAnet des BAG sichergestellt: URAnet «aero» für die Überwachung der Luft und URAnet «aqua» für die Überwachung des Flusswassers. Zusätzlich zu den automatischen Messungen werden von Aerosolen, Niederschlägen und Flusswasser kontinuierlich Proben für empfindliche Messungen im Labor entnommen. Die Überwachung von Sedimenten, Erdproben, Gras, Milch und Lebensmitteln (inklusive Importe) erfolgt stichprobenweise. Die Daten werden in einer nationalen Datenbank beim BAG erfasst. Die Messresultate der automatischen Messnetze sowie ein Grossteil der Ergebnisse der Labormessungen sind auf www.radenviro.ch abrufbar. Die Ergebnisse von speziellen Messprogrammen wie die Messungen von Wirbelknochen oder Milchzähnen oder ¹⁴C-Messungen in Baumblät-

tern sind zurzeit noch ausschliesslich im hier vorliegenden Jahresbericht publiziert. Die Messprogramme sind vergleichbar mit denjenigen unserer Nachbarländer. Die Methoden für die Probenentnahme und die Messprogramme entsprechen dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Die Qualitätskontrolle erfolgt durch eine regelmässige Teilnahme der Laboratorien an nationalen und internationalen Vergleichsmessungen.

Das automatischen Messnetz URAnet

Das automatische Netzwerk zur Überwachung der Radioaktivität in der Luft, URAnet aero, ist seit September 2018 in Betrieb. Es ermöglicht die Identifizierung und Quantifizierung von Radionukliden in der Luft und alarmiert, wenn vordefinierte Warnschwellen überschritten sind. Es besteht aus 15 Messsonden, die über das ganze Land verteilt sind (siehe Figur 1). Das Messnetz deckt alle geographischen Regionen ab, ist aber im Einflussbereich der Kernkraftwerke und dort insbesondere in stark besiedeltem Gebiet verdichtet.

Entsprechend seinem Überwachungsziel ist das Messnetz URAnet aero in der Lage, Radioaktivitätswerte weit unterhalb der in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerte für Luft nachzuweisen: Die Nachweisgrenze für Cäsium-137 (¹³⁷Cs) liegt beispielsweise bei einer 12-Stunden-Messung im Bereich von 3 bis 7 Millibecquerel pro Kubikmeter (mBq/m³), während der Immissionsgrenzwert für Luft für dieses Radionuklid in der Luft bei 8.5 Bq/m³ liegt. Das bedeutet, dass ein unübliches Vorkommen von ¹³⁷Cs in der Luft automatisch detektiert würde, und das bereits bei Konzentrationen die 1'000 Mal unter Grenzwerten



Figur 1:
Automatische Messnetze zur Überwachung der Radioaktivität in der Luft (URAnet aero) und im Flusswasser (URAnet aqua).

liegen. Eine solche Empfindlichkeit macht es also möglich, sehr geringe Konzentrationen von Radioaktivität in der Luft zu erkennen, die noch keine Gefahr für die Gesundheit darstellen, und ermöglicht so eine genauere Einschätzung der von der Bevölkerung erhaltenen Strahlendosen.

Die automatische Überwachung der Gewässer der Aare und des Rheins, URAnet aqua, umfasst 4 Wassersonden, die sich unterhalb der Schweizer Kernkraftwerke befinden, und ist seit 2015 in Betrieb. Eine fünfte Sonde in Hagneck wurde 2023 demonstriert, da das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) nicht mehr in Betrieb ist. Die Messungen unterhalb des KKM werden durch die Sonde in Niederried sicher gestellt.

Modernisierung der Probenahme und Messung von Höhenluft

Der Bundesrat hat an seiner Sitzung vom 13. April 2022 beschlossen, die Messung der Radioaktivität in der Luft in der Forschungsstation Jungfraujoch zu modernisieren, da diese nicht mehr den aktuellen Anforderungen genügt. Die neuen Messgeräte erlauben das Filtern von grossen Luftvolumen mit kontinuierlicher Messung der Radioaktivität vor Ort sowie eine spätere, sehr empfindliche Messung der Luftfilter im Labor. Die Inbetriebnahme war für Ende 2024 vorgesehen, doch neue Sicherheitsauflagen und technische Probleme mit dem Ansaugkopf haben die Arbeiten verzögert.

Ansaugleitungen, Filtereinheit, Pumpe sowie die Schall- und Wärmeisolierung wurde Ende 2023 installiert. Im Jahr 2024 konzentrierten sich die Arbeiten auf die Steuerung und Automatisierung des Monitors sowie auf die Elektrotechnik. Dazu gehörten die Auswahl der Sensoren und Aktoren, die Dimensionierung und Verlegung der Kabel, die Erstellung des Schaltplans und die Fertigung der Schalttafel. Parallel dazu wurden zwei wichtige Entwicklungen vorangetrieben: die Anpassung der Software zur Überwachung der Maschine und zur Datenübertragung an das Netzwerk sowie die Programmierung der Steuerungslogik, mit der beispielsweise die Pumpenleistung und Temperatur im Ansaugkopf geregelt werden können. Die Inbetriebnahme wurde auf 2025, nach Fertigstellung der Programmierung und der Elektroinstallationsarbeiten, verschoben. Die neue Messstation auf dem Jungfraujoch muss auch das Einstellen der Sammelflüge mit Tiger-Kampfflugzeugen kompensieren. Bei diesen Flügen in grosser Höhe, werden Luftpartikel gesammelt und anschliessend im Labor auf Radioaktivität untersucht.

Ergebnisse der Umweltüberwachung 2024

Allgemeine Überwachung : Luft, Niederschlag, Gewässer, Boden, Gras, Milch und andere Lebensmittel

Die Resultate 2024 der Überwachung der Radioaktivität in Luft, Niederschlag, Gras und Boden sind vergleichbar mit jenen aus den Vorjahren und bestätigen, dass in diesen Umweltkompartimenten der überwiegende Teil der Radioaktivität natürlichen Ursprungs ist.

Die Messergebnisse der Hochvolumen-Aerosolfilter, die im Internet verfügbar sind (www.radenviro.ch), zeigen, dass die Radioaktivität in der Luft hauptsächlich von natürlichen Radionukliden stammt. Es sind dies das kosmogene ⁷Be, das durch kosmische Strahlung in den oberen Schichten der Atmosphäre entsteht, sowie ²¹⁰Pb und anderen Radonfolgeprodukte. Die Entwicklung der ⁷Be-Konzentration in der Luft spiegelt die Wetterbedingungen wider. An heissen Sommertagen wird durch die konvektive vertikale Durchmischung ⁷Be-reiche Luft aus der oberen Troposphäre zum Boden transportiert, weshalb die dort gemessenen ⁷Be-Konzentrationen im Sommer höher sind. Auch Niederschläge (Auswaschung von ⁷Be) beeinflussen die gemessenen Konzentrationen. Die gleichen natürlichen Radionuklide finden sich im Übrigen auch im Regenwasser.

Abgesehen von den natürlich vorkommenden Radionukliden werden dank der eingesetzten sehr empfindlichen Messmethoden regelmässig auch winzige Konzentrationen künstlicher Radioaktivität, insbesondere ¹³⁷Cs (Halbwertszeit 30 Jahre), auf den Aerosolfiltern nachgewiesen. Diese Spuren in der Grössenordnung von wenigen Mikro-Becquerel pro Kubikmeter Luft werden häufiger bei trockenem Wetter festgestellt, wenn das nach den Kernwaffentests der 60er Jahre und vor allem nach dem Unfall von Tschernobyl 1986 am Boden abgelagerte ¹³⁷Cs wieder in die Luft aufgewirbelt wird. So wurden wie jedes Jahr auch 2024 in den Wintermonaten an der Messstation Cadenazzo im Tessin, der am stärksten vom Fallout des Unfalls von Tschernobyl betroffenen Region der Schweiz, etwas höhere Werte von ¹³⁷Cs gemessen. Dafür sind neben der Aufwirbelung von Bodenpartikeln während der Vegetationspause auch die Verbrennung von leicht mit ¹³⁷Cs kontaminiertem Holz zum Heizen verantwortlich. In der Woche vom 25. März bis 2. April wurde in Cadenazzo zudem ein Wert von 7.2 mBq/m³ gemessen, der im Vergleich zu den üblichen Werten recht hoch ist. In dieser Woche herrschte eine kräftige Südwestströmung, teilweise

mit Saharastaub, und starker Südföhn. Der etwas höhere Wert von ^{137}Cs ist daher wahrscheinlich auf lokale oder regionale Staubwirbel aus dem Boden zurückzuführen.

Abgesehen von vereinzelten Spuren von ^{137}Cs konnten in den Niederschlagsproben im Jahr 2024 keine weiteren künstlichen Gammaquellen nachgewiesen werden. Das einzige künstliche Radionuklid, das in Flussgewässern gemessen wurde, ist ebenfalls ^{137}Cs , das jedoch in diesem Milieu regelmässig vorkommt und aus der Bodenerosion stammt.

Der Gehalt an natürlich vorkommendem Tritium (^3H) liegt im Niederschlag und in Flusswasser in der Regel unter 2 Bq/l. Ein künstlicher Eintrag von Tritium in diese Umweltkompartimente durch die Abgaben von Kernkraftwerken und bestimmten Industriebetrieben wird manchmal in der Nähe oder flussabwärts der Betriebe nachgewiesen (siehe Kapitel über die Überwachung dieser Betriebe).

Im Erdboden dominieren die natürlichen Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen sowie das ^{40}K . Künstliche Radioisotope im Boden stammen aus Ablagerungen aus der Luft und zeigen regionale Unterschiede, die mit dem unterschiedlichen «Fallout» von Radioaktivität aus den oberirdischen Kernwaffenversuchen in den frühen 60er Jahren (besonders ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am und ^{137}Cs) und dem Tschernobyl-Reaktorunfall (vorwiegend ^{137}Cs) zusammenhängen. In den Alpen und Südalpen sind die Werte von ^{137}Cs (siehe Figur 2) und ^{90}Sr immer noch etwas höher als im Mittelland. Künstliche Alphastrahler wie ^{239}Pu und ^{240}Pu sowie ^{241}Am treten im Boden nur in sehr geringen Spuren auf.

In Gras- und pflanzlichen Lebensmitteln dominiert das natürliche ^{40}K . Künstliche Radionuklide wie ^{137}Cs oder ^{90}Sr (siehe Figur 3), die von den Pflanzen über die Wurzeln aufgenommen werden, sind im Gras nur noch in Spuren vorhanden. Die regionale Verteilung ist dabei ähnlich wie für den Boden.

Zur Überwachung der Radioaktivität in Lebensmitteln wurden im Jahr 2024 rund 290 Proben aus der Schweiz (ohne die Spezialkampagnen für Wildschweine) und rund 200 importierte Lebensmittelproben auf Radioaktivität untersucht. Die Analysen wurden im Rahmen des Probenahmeplans des BAG und kantonaler Messkampagnen durchgeführt. In der Milch von einheimischen Kühen blieb der Gehalt an ^{137}Cs in der Regel unter der Nachweisgrenze, also unter 1 Bq/l. Nur eine von 153 im Jahr 2024 gemessenen Milchproben wies eine etwas höhere ^{137}Cs -Aktivität auf: Der ^{137}Cs -Gehalt einer Probe aus dem Centovalli lag bei 17 Bq/l. Dieser Wert ist deutlich unter dem in der Tschernobyl-Verordnung festgelegten Höchstwert von 600 Bq/kg. Wie bereits erwähnt, waren die Regionen südlich der Alpen, insbesondere das Tessin, aufgrund der starken Niederschläge während des Durchzugs der radioakti-

ven Wolke im Jahr 1986 am stärksten vom radioaktiven Niederschlag nach dem Reaktorunfall betroffen. Dies erklärt, warum ^{137}Cs dort auch fast 40 Jahre nach dem Unfall noch messbar ist, auch in bestimmten Lebensmitteln. Die vom Kanton Basel-Stadt, dem Institut für Radiophysik (IRA) und dem Labor Spiez in 55 Milchproben gemessenen ^{90}Sr -Gehalte waren 2024 mit einem Höchstwert von 0.2 Bq/l und einem Medianwert von < 0.05 Bq/l sehr niedrig. Das in der Schweiz gemessene ^{90}Sr stammt aus den Niederschlägen der Atomtests der 1960er Jahre. Höhenlagen, die mehr Niederschläge erhielten, waren stärker betroffen als Tieflandgebiete.

In den 18 Getreideproben und 23 Proben einheimischer Obst- und Gemüsesorten, die 2024 analysiert wurden, lag die Aktivität von ^{137}Cs unterhalb der Nachweisgrenze von 0.4 Bq/kg. Die in Getreide gemessenen Werte für ^{90}Sr waren mit 0.02 bis 0.14 Bq/kg und einem Durchschnitt von 0.08 Bq/kg sehr niedrig.

Der Kanton Tessin setzte die systematische Überwachung der auf seinem Territorium bejagten Wildschweine fort, die 2013 in Zusammenarbeit mit dem BAG eingeführt wurde. Im 2024 wurden 785 Wildschweine vor Ort mit einem dosimetrischen Instrument ausgemessen. Zweiundzwanzig Tiere, also ca. 5% der Fälle, überschritten den Höchstwert der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs . Nachmessungen im Labor zeigten einen ^{137}Cs -Höchstwert von 4'620 Bq/kg. Die betroffenen Wildschweine wurden vom Kantonstierarzt beschlagnahmt. Die Ursache der Kontamination der Wildschweine ist der Verzehr von Hirschtrüffel, ein für Menschen ungenießbarer, in tieferen Bodenschichten wachsender Pilz, der ^{137}Cs aufnimmt. Das ^{137}Cs , das nach dem Unfall in Tschernobyl auf dem Boden abgelagert wurde, wanderte seither allmählich in diese tieferen Schichten, wo es sich jetzt in Hirschtrüffeln anreichert. In Regionen mit einer hohen Deposition von ^{137}Cs nach dem Unfall, wie im Tessin, kann die Konzentration von ^{137}Cs in Hirschtrüffeln 10'000 Bq/kg übersteigen. Wildschweine lieben diese Trüffel, graben sie aus und verzehren sie, wodurch das ^{137}Cs in ihr Fleisch übergeht.

Gewisse einheimische Wildpilze, insbesondere Steinpilze und Reipilze weisen immer noch erhöhte Werte von ^{137}Cs auf. Der in der Tschernobyl-Verordnung festgelegte Höchstwert von 600 Bq/kg für ^{137}Cs wurde jedoch in keiner der 49 Proben einheimischer Pilze überschritten, die 2024 von den Kantonen Tessin (42), Graubünden (5) und Basel-Stadt (2) analysiert wurden. Der höchste verzeichnete Wert betrug 478 Bq/kg Frischmasse in einem Perlpilz. Der Durchschnittswert lag bei 49 Bq/kg.

Schliesslich wiesen bei den vom kantonalen Labor BS (KL-BS) analysierten Beeren und Konfitüren nur zwei Proben messbare Werte von ^{137}Cs (46 und 35 Bq/kg) auf; in einer Konfitüre wurde ^{90}Sr nachgewiesen (1.25 Bq/kg). Wie jedes Jahr haben die kantonalen Laboratorien auch die

Radioaktivität in bestimmten importierten Lebensmitteln analysiert, die bekannt sind für die Anreicherung von Radioaktivität (Pilze, Beeren, Wildfleisch insbesondere aus Osteuropa). Zusätzlich wurden auch andere Arten importierter Lebensmittel untersucht. Insgesamt waren es im Jahr 2024 195 Proben, die mittels Gammaspektrometrie gemessen wurden. Das kantonale Labor von BS hat beispielsweise 24 Proben importierter Pilze, ein Dutzend Proben von Beeren und Konfitüren sowie 30 weitere Proben verschiedener Lebensmittel aus Osteuropa (Obst, Bohnen, Paprika und andere) gemessen. Bei den importierten Pilzen wurde die höchste gemessene ^{137}Cs -Konzentration in einer Probe Steinpilze mit 126 Bq/kg gefunden (Durchschnitt für Pilze: 26 Bq/kg). In Konfitüren und Beeren wurde ^{137}Cs in der Hälfte der Proben nachgewiesen (Höchstwert: 100 Bq/kg). Auch ^{90}Sr wurde gemessen, mit einem Höchstwert von 1.75 Bq/kg in wilden Heidelbeeren aus Polen. In den übrigen Lebensmittelproben wurden nur vereinzelt Spuren von ^{137}Cs und in zwei Proben geringe Konzentrationen von ^{90}Sr (0.6 Bq/kg) festgestellt. Das kantonale Labor des Tessins hat 25 Proben von importiertem Wildfleisch analysiert, das hauptsächlich aus Deutschland, Österreich, Slowenien und Neuseeland stammte. Wie zu erwarten war, konnte in den Proben aus Europa ^{137}Cs gemessen werden, mit einem Höchstwert von 178 Bq/kg. Das KL-BS hat zudem 20 Gewürzproben und 5 Teeproben aus der Türkei analysiert. ^{137}Cs konnte nur in den Teeproben gemessen werden (max. 23 Bq/kg). In zwei Teeproben wurden zudem ^{90}Sr -Werte über der Nachweisgrenze (7 und 10 Bq/kg) gemessen. Schliesslich hat das KL-BS 20 Kakaoproben analysiert und in einigen Proben Spuren von ^{137}Cs , jedoch kein ^{90}Sr nachgewiesen. In den 54 importierten Lebensmitteln (Tintenfisch, Paranüsse, Mineralwasser und andere Produkte),

die vom kantonalen Labor in ZH analysiert wurden, konnten mittels Gammaspektrometrie keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen werden.

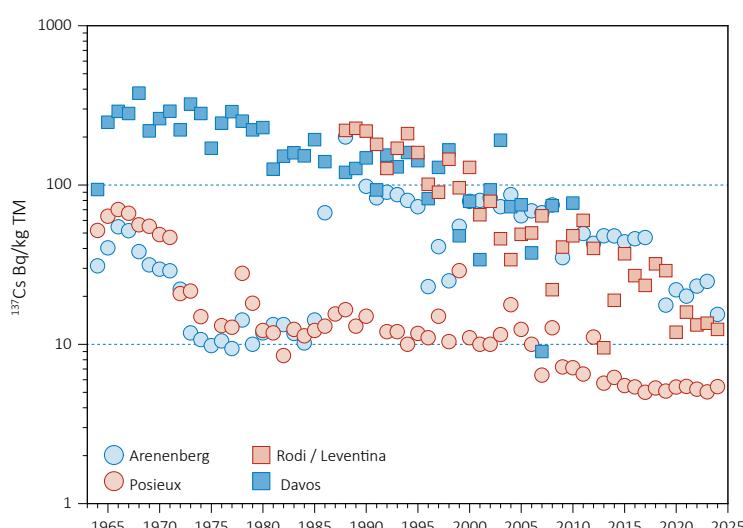
Die Ergebnisse all dieser Messungen zeigen, dass die kumulierte Dosis einer Person, die grosse Mengen der am stärksten mit künstlichen Radionukliden belasteten einheimischen oder importierten Lebensmittel – Wild, Wildpilze und Wildfrüchte – konsumierte, einige Hundertstel mSv nicht überschreiten würde. Im Vergleich dazu liegen die jährlichen Dosen durch die Aufnahme natürlicher Radionuklide über die Nahrung (ohne Kalium) im Durchschnitt bei etwa 0.22 mSv.

Somit wurden in der Schweiz keine Überschreitung des Höchstwertes für ^{137}Cs in Lebensmitteln registriert, die 2023 importiert wurden.

*Für weiterführende Informationen siehe
Kapitel 4, 5 und 7.2.*

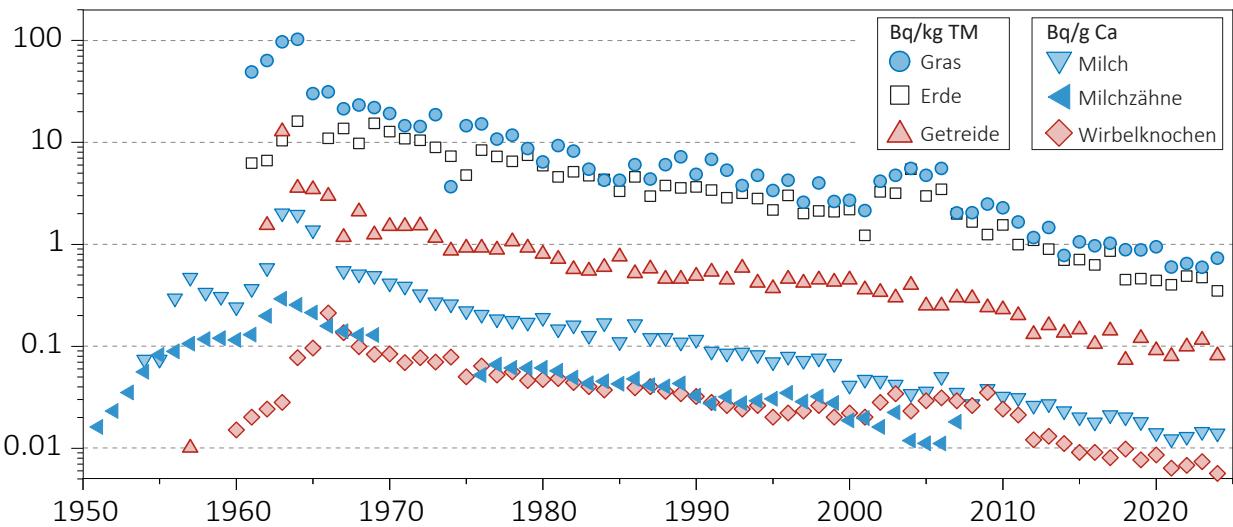
Überwachung der Umgebung von Kernanlagen

Die Grenzwerte für Emissionen aus Kernkraftwerken werden von der zuständigen Behörde so festgelegt, dass keine in der Nähe wohnende Person eine effektive Dosis von mehr als 0.3 mSv/Jahr (inklusive Direktstrahlung) erhält. Die Betreiber müssen ihre Emissionen messen und die Bilanz dem ENSI mitteilen. Parallel durchgeführte Vergleichsmessungen durch den Betreiber, das ENSI und das BAG an Aerosol- und Jodfiltern sowie an Wasserproben während der Betriebsphase ermöglichen eine regelmässige Überprüfung der den Behörden gemeldeten Werte. Die verschiedenen Kontrollen 2024 haben bestätigt, dass die Betreiber die gesetzlichen Grenzwerte einhalten.



Figur 2:

^{137}Cs (in Bq/kg Trockenmasse) in Bodenproben von verschiedenen Messstationen in der Schweiz (1964 - 2024).



Figur 3:

^{90}Sr (Strontium-90) in verschiedenen, zwischen 1950 und 2024 entnommenen Proben (logarithmische Skala).

Das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) wurde am 20. Dezember 2019 für die Stromproduktion abgeschaltet und am 15. September 2020 von der BKW definitiv stillgelegt. Dies markierte den Übergang vom Regime mit einer Betriebsbewilligung zu jenem der Stilllegungsverfügung. Im September 2023 wurde ein weiterer wichtiger Meilenstein im Stilllegungsprozess des Kraftwerks erreicht: Die letzten abgebrannten Brennelemente wurden in das Zwischenlager Würenlingen transportiert. Somit ist das KKM kernbrennstofffrei. Die Überwachung der Radioaktivität in der Umgebung wird dennoch wie im Betriebsregime fortgesetzt.

Die Ergebnisse der Überwachung der Kernanlagen 2024 zeigten die erwarteten Ergebnisse. Wie schon in der Vergangenheit konnten an gewissen Stellen am Zaun des KKW Leibstadt die Direktstrahlung deutlich gemessen werden, was zu einer zusätzlichen Dosis von bis zu 0.017 mSv pro Woche führen kann. Diese Strahlung entsteht durch den radioaktiven Zerfall des im Reaktor erzeugten kurzlebigen Stickstoff-16 (^{16}N). Darüber hinaus können die Abfalllager zu einer Erhöhung der Ortsdosis am Zaun beitragen. Mit der Stilllegung des KKW Mühleberg ist die Strahlung durch ^{16}N verschwunden, jedoch können die Stilllegungsarbeiten selber zu einer kurzzeitig erhöhten Dosis am Zaun führen, wenn grosse Mengen an aktivierten Materialien, die insbesondere ^{60}Co enthalten und die, vorübergehend am Standort gelagert werden. Die Auswertung der am Zaun des KKM angebrachten TLD-Dosimeter ergab eine maximale Erhöhung der Umgebungs dosis von 0.008 mSv pro Woche, nach Abzug des natürlichen Hintergrundes.

Diese Werte erfüllen die Anforderungen von Art. 79 der StSV zur Begrenzung der Ortsdosis ausserhalb von Kontroll- und Überwachungsbereichen. Hier ist zu beach-

ten, dass die Direktstrahlungs-Immissionsgrenzwerte für die Ortsdosis gelten und sich nicht auf Personendosen beziehen. Diese Werte können daher nicht mit dem quellenbezogenen Dosisrichtwert für die Bevölkerung von 0.3 mSv/Jahr verglichen werden, da sich keine Person aus der Bevölkerung für lange Zeit am Zaun aufhält.

Die Ergebnisse des Immissionsüberwachungsprogramms rund um die Kernkraftwerke zeigten, dass die Auswirkungen der Kernkraftwerke auf die Umwelt gering blieben. Mit hochempfindlichen Messmethoden konnten dennoch Spuren der Abgaben an die Atmosphäre festgestellt werden, etwa erhöhte Werte für ^{14}C in Baumblätter (maximale Erhöhung gegenüber der Referenzstation von 163 Promille in der Umgebung des Kernkraftwerks Leibstadt). Zur Orientierung: Eine zusätzliche ^{14}C -Aktivität von 100 Promille in den Lebensmitteln würde zu einer zusätzlichen jährlichen Dosis von einem Mikrosievert führen. Das einzige andere gelegentlich nachgewiesene Radionuklid aus Abgaben an die Atmosphäre ist Tritium, das im Niederschlag gemessen wird, mit sehr geringen Aktivitäten.

Die Auswirkungen der flüssigen Abgaben aus Kernkraftwerken auf die aquatische Umwelt sind hauptsächlich in den Sedimenten messbar. So wurden 2024 in Sedimentproben aus der Aare (Hagneck und Klingnau) und dem Rhein (Pratteln) sporadisch Spuren von ^{54}Mn festgestellt. Die gemessenen Aktivitäten sind sehr niedrig und stellen kein Gesundheitsrisiko dar; sie spiegeln die Wirksamkeit der durchgeföhrten Überwachungsprogramme wider. Das ^{137}Cs , welches in Wasser- und Sedimentproben aus Aare und Rhein vorhanden ist, stammt im Wesentlichen aus der Remobilisierung von alten Ablagerungen (Tschernobyl und Atombombentests der 60er Jahre).

Die vom IRA durchgeführten $^{239+240}\text{Pu}$ und ^{241}Am Messungen an verschiedenen, stromabwärts der Kernkraftwerke entnommenen Proben der aquatischen Umwelt (Wasser aus Aare und Rhein, Wasserpflanzen, Sedimente) ergaben keinen Hinweis auf einen möglichen Einfluss durch Abgaben der Kernkraftwerke, vielmehr deuten die $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ Isotopenverhältnisse auf einen überwiegenden Beitrag des Fallouts aus den Atombombentests der 1960er Jahre hin.

Im ersten Halbjahr, insbesondere im April und Mai, waren die Tritiumkonzentrationen in der Aare (und in geringerem Ausmass auch im Rhein) jedoch aufgrund höherer Tritiumabgaben aus den Kernkraftwerken Beznau und vor allem Gösgen vor den Revisionen leicht erhöht. Die maximale Tritiumkonzentration erreichte im April in der Aare bei Brugg ca. 10 Bq/l und im Rhein bei Weil am Rhein ebenfalls im April 3.2 Bq/l.

Analysen von Fischen aus der Aare und dem Rhein flussabwärts der Schweizer Kernkraftwerke ergaben 2023 keine Hinweise auf künstliche Gammastrahler. In einem Fisch aus dem Rhein konnten Spuren von ^{241}Am nachgewiesen werden, dies vor allem, weil die für die Messung zur Verfügung stehende Masse viel grösser war, als die der anderen Proben (je grösser die Masse der gemessenen Probe ist, desto höher ist die Empfindlichkeit der Messung). In den Proben des Grundwassers in Aarberg, Schönenwerd, Böttstein und Hardwald (Muttenz) wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

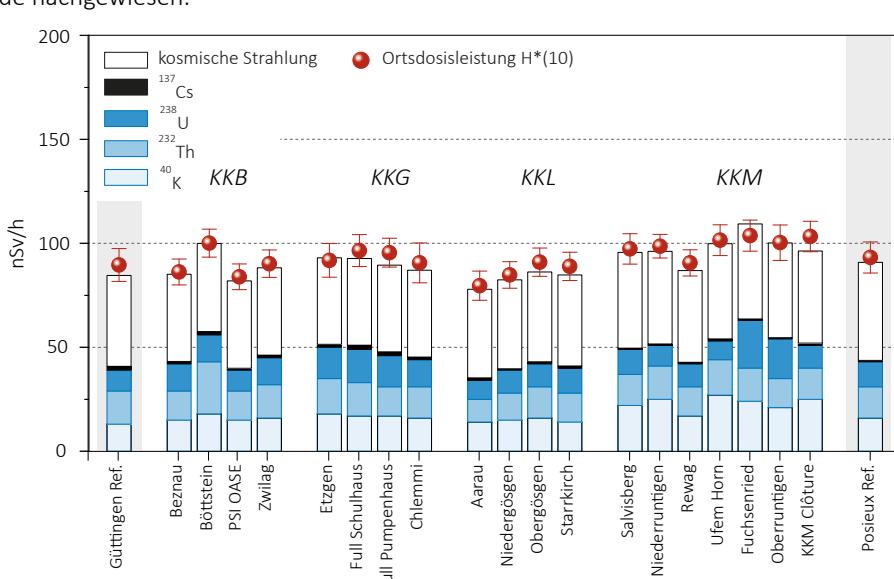
Wie die Figur 4 zeigt, ergaben die Umweltmessungen in der Umgebung der Kernkraftwerke, mit Ausnahme der erwähnten Beispiele, keine Unterschiede gegenüber Orten ausserhalb deren Einflussbereichs. Die natürliche Radioaktivität dominiert demnach, und die messbaren Kontaminationen sind vorwiegend eine Folge der Kernwaffenversuche in den 60er-Jahren und des Reaktorunfalls in Tschernobyl (^{137}Cs).

Die jährliche zusätzliche Dosis durch die Emissionen der Kernkraftwerke blieb im Jahr 2024 für meist betroffene Erwachsene im Vergleich zu natürlichen oder medizinischen Quellen sehr niedrigen (<0.001 mSv für KKB und KKG bzw. 0.002 mSv für KKL und KKM). Da neben den tatsächlichen Dosen auch das inherente Risiko solcher Anlagen zu berücksichtigen ist, ist das sorgfältige Weiterführen von Kontrollen und Studien durch die Behörden unabdingbar, um den verschiedenen wissenschaftlichen und gesetzlichen Zielsetzungen Rechnung zu tragen und die Öffentlichkeit detailliert informieren zu können.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 3.1, 4.4, 7.1, 7.2 und 8.1 bis 8.5.

Überwachung der Forschungszentren

Alle Anlagen des CERN waren im Jahr 2024 in Betrieb. Nach dem Wartungsstillstand im Winter nahm das CERN ab Februar 2024 schrittweise den Betrieb aller Anlagen wieder auf und sie blieben bis Anfang Dezember in Betrieb.



Figur 4:

Beiträge zur Ortsdosis $\text{H}^*(10)$ durch die verschiedenen Radionuklide, die vom BAG 2024 an verschiedenen Stellen in der Umgebung der Schweizer Kernkraftwerke sowie an den Referenzstandorten Güttingen und Posieux (grau unterlegt) gemessen wurden. Diese Beiträge wurden ausgehend von Messungen durch In-situ-Gammaspektrometrie berechnet. Außerdem ist das Ergebnis der direkten Messung der Gesamtortsdosis mit Hilfe einer Ionisationskammer dargestellt. Damit lässt sich die Zuverlässigkeit der Methode verifizieren.

Das CERN überwacht und bilanziert die Emissionen aus seinen eigenen Anlagen und führt Dosisberechnungen für die Bevölkerung (Referenzgruppen) durch. Diese Überwachung hat für 2024 gezeigt, dass der festgelegte Grenzwert von 0.3 mSv/Jahr eingehalten waren. Die maximale effektive Dosis für die Schweizer Öffentlichkeit blieb unter 0.007 mSv. Das vom BAG in Zusammenarbeit mit dem Departement F-A. Forel durchgeführte unabhängige Immissionsüberwachungsprogramm in der Nachbarschaft des Forschungszentrums bestätigte, dass die radiologischen Auswirkungen der Aktivitäten des CERN auf die Umwelt sehr gering sind.

In der Luft in der Umgebung des Forschungszentrums konnten auch im Jahr 2024 sporadisch Spuren der von den CERN-Anlagen produzierten Radionuklide mit kurzer Halbwertszeit, wie ^{131}I oder Argon-41 nachgewiesen werden (Halbwertszeit 8 Tage, bzw. 15 Stunden). Die gemessenen Konzentrationen waren jedoch sehr gering, für ^{131}I beispielsweise weniger als 0.015% des in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Immissionsgrenzwertes für die Luft. Die Ergebnisse der Messungen von Bodenproben und auch die Wasser- und Sedimentmessungen im Nant d'Avril unterschieden sich nicht von den Ergebnissen der Referenzmessstationen, die sich außerhalb des Einflussbereichs des Forschungszentrums befinden.

Die zusätzliche Dosis für die Bevölkerung in der Umgebung von PSI/ZWILAG darf für beide Anlagen zusammen maximal 0.15 mSv pro Jahr betragen, wobei der Beitrag des ZWILAG höchstens 0.05 mSv im Jahr ausmachen darf. Die Auswertungen des ENSI zeigen, dass die tatsächlichen Abgaben des PSI/ZWILAG 2024 zu einer zusätzlichen Dosis für Anwohner von weniger als 0.004 mSv führten. Die Abgabe von kurzlebigen Edelgasen aus dem Teilchenbeschleuniger am PSI-West ist für praktisch die ganze Dosis verantwortlich. Die Auswertung der am Zaun des PSI aufgestellten TLDs ergab eine Erhöhung der UmgebungsdoSis am Zaun um maximal 0.006 mSv (nach Abzug der Hintergrundstrahlung).

Die Umweltüberwachung wird vom PSI selber sowie mit unabhängigen Messungen durch das BAG durchgeführt. Abgesehen von sporadisch erhöhten Tritiumwerten im Niederschlag und ^{14}C in Baumblättern zeigten die Ergebnisse der Überwachung in der Umgebung des PSI keine Umweltbelastungen durch das Forschungszentrum.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 8.

Tritium aus der Industrie

Gewisse Industriebetriebe setzen ebenfalls radioaktive Stoffe ein. Tritium ist das in der Schweiz am häufigsten industriell verwendete Radionuklid und wird zum Beispiel zur Herstellung von Tritiumgas-Leuchtquellen oder von radioaktiven Markern für die Forschung verwendet. Die Betriebe führen Buch über ihre Emissionen von radioaktiven Stoffen und melden diese der Aufsichtsbehörde. Im Jahr 2024 haben alle betroffenen Betriebe, die in ihren jeweiligen Bewilligungen festgehaltenen Abgabelimiten respektiert – bis auf eine Ausnahme: Am 5. Februar 2024 hat ein auf die Entwicklung und Herstellung von Tritiumprodukten spezialisiertes Unternehmen im Kanton Luzern aufgrund eines Produktionsfehlers 2 TBq Tritium (HTO) in die Abluft abgegeben. Diese Aktivitätsmenge überschreitet den wöchentlichen Grenzwert und entspricht der Hälfte der der Bewilligung des BAG festgehaltenen maximalen Abgabe an die Umwelt in einem Jahr [1].

Zur Kontrolle der Immissionen in der Umgebung dieser Betriebe führt das BAG ein spezifisches Überwachungsprogramm durch. Auf Tritium untersucht werden Niederschläge, Luftfeuchtigkeit, Gewässer und in einigen Fällen auch Lebensmittel.

Diese kontinuierliche Überwachung des Tritiums in der Umwelt zeigte, dass nach dem Zwischenfall vom 5. Februar in Root/LU die Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung in der Umgebung vernachlässigbar blieben. Nach einem deutlichen Anstieg der Tritiumkonzentrationen in den Regen- und Luftfeuchtigkeitsproben Anfang Februar gingen diese rasch zurückgingen und blieben im Laufe des Jahres 2024 meist sehr niedrig. Die Messstationen in der Umgebung des Werkes zeigten für die Luftfeuchtigkeit bis zu 39 Bq/m³ Tritium in der Woche vom 2. bis 8. Februar, während die üblichen Werte unter 1 Bq/m³ liegen. Auf der Grundlage dieser Messergebnisse ergeben sich Strahlendosen für die am stärksten exponierten Personen der Bevölkerung von höchstens einigen Mikrosievert (μSv).

Die Ergebnisse der ^3H -Überwachung zeigten, dass die Konzentrationen dieses Radionuklids in der Umwelt (Niederschläge, Lebensmittel) in der unmittelbaren Umgebung der Verwendungsbetriebe, insbesondere in Niederwangen, generell deutlich höher waren als in anderen Teilen der Schweiz.

Mit Werten zwischen 5 und 790 Bq/l in den 14-tägigen Niederschlagsproben in unmittelbarer Nähe des Unternehmens mb Microtec in Niederwangen/BE (Jahresdurchschnitt 270 Bq/l), ist die Erhöhung gegenüber den Referenzstationen, die 2 Bq/l nicht überschreiten, deutlich. Trotzdem erreichen diese Konzentrationen höchstens 4% des in der Strahlenschutzverordnung (StSV) festgelegten Immissionsgrenzwerts für Tritium in öffentlich zugänglichen Gewässern, und die daraus resultierenden Dosen für

die Bevölkerung in der Umgebung sind sehr gering. Die Tritiumkonzentrationen in Destillaten von Milchproben sowie von Obst und Gemüse (Äpfel, Birnen, Pflaumen, Rhabarber), die Ende August 2024 vom Kanton Bern in der Nähe des Unternehmens entnommen wurden, lagen zwischen 5 und 80 Bq/l. Diese Werte gehören zu den niedrigsten, die in den letzten zehn Jahren gemessen wurden.

Die Tritiumkonzentrationen in den Niederschlags- und Luftfeuchtigkeitsproben, die in Teufen/AR in der Nähe des Unternehmens RC Tritec entnommen wurden, blieben im Jahr 2024 generell niedrig (Durchschnittswerte von 34 Bq/l im Niederschlag und 1.2 Bq/m³ in der Luftfeuchtigkeit).

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 5, 9.1 und 9.3.

Radium-Altlasten

Nach Abschluss der Arbeiten zum Aktionsplan Radium 2015-2023 hat das BAG einen Schlussbericht zuhanden des Bundesrats erstellt. Darin werden die durchgeführten Massnahmen und die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und Perspektiven für den künftigen Handlungsbedarf aufgezeigt. Dieser dem Bundesrat an seiner Sitzung vom 27. November 2024 vorgelegte Bericht stützt sich insbesondere auf die externe Evaluation des Aktionsplans durch die Firma EBP Schweiz AG und auf das Gutachten des «Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN)» aus Frankreich. Die entsprechenden Dokumente sind auf der Website des BAG veröffentlicht ([Schlussbericht zum Aktionsplan Radium 2015–2023](#)).

Mit dem Aktionsplan Radium 2015-2023 konnten über 160 ehemalige, mit Radium kontaminierte Uhrenwerkstätten erfolgreich saniert werden. Außerdem wurden rund 250 ehemalige Deponien identifiziert, die Radiumabfälle enthalten könnten und deshalb bei einer Öffnung Strahlenschutzmassnahmen erfordern. Der Aktionsplan hat seine Ziele zum Schutz der Bevölkerung, der Arbeitnehmer und der Umwelt erreicht. Dank den umfangreichen historischen Recherchen und der hohen Akzeptanz der Diagnosen und Sanierungen durch die Eigentümer konnten die Expositionen deutlich reduziert und die langfristige Bewohnbarkeit der Grundstücke gewährleistet werden.

Der Bezug spezialisierter Sanierungsfirmen trug dazu bei, die Risiken für die Arbeitnehmenden zu minimieren und eine Kontamination der Umwelt zu verhindern. Auch die vorgesehenen Strahlenschutzmassnahmen bei der Öffnung von betroffenen ehe-

maligen Deponien dienen diesen Zielen. Diese Feststellungen wurden in den externen Evaluationen bestätigt, die auch die in der Kommunikation mit der Öffentlichkeit und den Stakeholdern erzielten Fortschritte betonten.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.5.

Verwendung von radioaktiven Stoffen in Spitälern

In Spitälern wird bei der Diagnostik und Behandlung von Schilddrüsenerkrankungen ¹³¹I verwendet (Halbwertszeit 8 Tage). Jodtherapie-Patienten, die mit weniger als 200 MBq (1 MBq = 10⁶ Bq) behandelt wurden, dürfen das Spital nach der Therapie verlassen. Bei über 200 MBq müssen die Patienten während mindestens 48 Stunden nach der Behandlung in speziellen Zimmern isoliert werden. Die Ausscheidungen dieser Patienten werden in speziellen Abwassertanks gesammelt und erst nach Abklingen unter die bewilligten Immissionsgrenzwerte an die Umwelt abgegeben.

Während ¹³¹I in der Schweiz sehr lange das häufigste eingesetzte Radionuklid in der Nuklearmedizin war, steht es heute bezüglich der eingesetzten Aktivität hinter ¹⁷⁷Lu (Halbwertszeit ca. 7 Tage), das zur Behandlung von neuroendokrinen Tumoren und Prostatakrebs eingesetzt wird. Der seit 2021 beobachtete starke Anstieg der in der Schweiz applizierten Gesamtaktivität von ¹⁷⁷Lu hat sich 2024 fortgesetzt (14.85 TBq im Jahr 2024; eine Erhöhung um 25% verglichen mit 2023). Für einen Vergleich der Radiotoxizität, wird die Aktivität von ¹⁷⁷Lu in ¹³¹I-Äquivalent umgerechnet. Für 2024 entspricht die ¹⁷⁷Lu Aktivität 0.33 TBq ¹³¹I-Äquivalent, gegenüber von 2.35 TBq für das eigentliche ¹³¹I. Von der Radiotoxizität her bleibt also ¹³¹I das dominierende Radionuklid. Wie bei ¹³¹I müssen Patienten, die mit ¹⁷⁷Lu behandelt werden, nach der Behandlung mindestens 48 Stunden im Krankenhaus bleiben und ihre Exkremeante werden in Abklingbehältern gesammelt. Auf Antrag zahlreicher Spitäler, die Aufenthaltsdauer von ¹⁷⁷Lu-Patienten auf 20 Stunden zu verkürzen, hat das BAG mit Pilotstudien in mehreren Spitälern die Auswirkungen einer solchen Verkürzung auf die Umwelt und die Bevölkerung untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie werden im Laufe des Jahres 2025 vorliegen.

Auch ⁹⁰Y, ¹⁶⁶Ho oder ²²³Ra werden in der Nuklearmedizin zur Behandlung von Krebserkrankungen eingesetzt. Die Verwendung von ¹⁶⁶Ho ist relativ neu (erste Anwendungen im Jahr 2020). Die Anwendung von ⁹⁰Y und ²²³Ra ist in den letzten 5 bis 10 Jahren deutlich zurückgegangen. Andere Nuklide wie ¹⁶⁹Er oder ¹⁸⁶Re werden zur Behandlung von rheu-

matischen Erkrankungen in Gelenken angewendet, um Entzündungen und Schmerzen zu reduzieren. Die Anwendung für diese Radionuklide erfolgt in der Regel ambulant, so dass die Patienten nach der Behandlung das Krankenhaus verlassen können.

Im Jahr 2024 tauchte ^{161}Tb erstmals in den Anwendungsstatistiken auf. Es wurde im Rahmen klinischer Studien zur Behandlung von Prostatakrebs und neuroendokrinen Tumoren eingesetzt.

Im Rahmen der Umweltüberwachung werden wöchentlich Abwasserproben aus den Kläranlagen der grossen Ballungsgebiete entnommen und auf die Konzentrationen von Gammastrahlern (^{131}I , ^{177}Lu) analysiert. Kontinuierliche Messungen mit einer automatischen Sonde in der Abwasserreinigungsanlage bei Bellinzona wurden 2023 ebenfalls durchgeführt. Es ist anzumerken, dass diese Radionuklide zwar selten in Flusswasser nachgewiesen werden, Spuren davon jedoch in Sedimenten gefunden werden können. So wurden 2024 wie in den Vorjahren Spuren von ^{131}I , ^{177}Lu und ^{223}Ra regelmässig in Schwebstoffen aus dem Rhein bei Weil am Rhein nachgewiesen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.2. 9.4.

Kläranlagen, Waschwasser aus der Rauchgasreinigung in Verbrennungsanlagen und Deponiesickerwasser

Das BAG koordiniert auch ein Programm zur Probenahme und Messung der Radioaktivität (Gammastrahler und Tritium) von Wasser aus Kläranlagen (ARA) und Waschwasser aus der Rauchgasreinigung von Kehrichtverwertungsanlagen (KVA). Wie jedoch in der Einleitung erwähnt, müssen diese Programme aufgrund der Sparmassnahmen des Bundes bis 2026 redimensioniert und grösstenteils aufgehoben werden. Bei der Überwachung des Wassers aus Kläranlagen betraf die Kürzung des Programms im Jahr 2024 den Grossraum Zürich. Die Agglomerationen Lausanne, Bern und Biel werden bis 2026 folgen.

Die Überwachung der Kläranlagen erfasst die Abgaben bestimmter radioaktiver Stoffe durch Industrie und Spitäler ins Abwasser und damit an die Umwelt. Da die in der Nuklearmedizin verwendeten Radionuklide eine kurze (wenige Tage) bis sehr kurze (1 bis 2 h) Halbwertszeit haben, sind sie aufgrund Verzögerung zwischen Probenahme und Messung in der Regel nicht mit Labormessungen nachweisbar. Aus diesem Grund wurden 2024 auch kontinuierliche Messungen mit einer automatischen Messsonde im Zulauf der Kläranlage von Bellinzona (Giubiasco) durchgeführt.

Wie oben erläutert, werden die in der Therapie verwendeten Radionuklide ^{131}I und ^{177}Lu in Abklingtanks in den Krankenhäusern aufbewahrt, bis der grösste Teil zerfal-

len ist. Erst dann werden sie in die Kanalisation abgegeben und treten daher nur sporadisch in der Umwelt auf. Die sehr kurzlebigen Nuklide $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und $^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ müssen aufgrund der hohen Immissionsgrenze in den Krankenhäusern nicht zurückgehalten werden und können daher bei den kontinuierlichen Messungen in der ARA regelmässig nachgewiesen. Die Radionuklide ^{111}In und ^{123}I werden ambulant zu diagnostischen Zwecken verwendet und können aus den Haushalten der Patienten über die Kanalisation in die ARA gelangen. Obwohl alle diese Radionuklide im Jahr 2024 in den Gewässern der ARA Giubiasco gemessen werden konnten, lagen die höchsten wöchentlichen Durchschnittskonzentrationen im Jahr 2024 deutlich unter den Immissionsgrenzwerten für öffentlich zugängliche Gewässer. Nur eine der wöchentlichen Durchschnittskonzentrationen für ^{131}I lag mit rund 5 Bq/l nahe beim Immissionsgrenzwert von 7 Bq/l für dieses Radionuklid. Da Messstelle im Zulauf der ARA ist und ein Grossteil des ^{131}I beim Reinigungsprozess in der ARA entfernt wird, war auch hier der Immissionsgrenzwert in der Umwelt (Fluss Ticino) klar eingehalten. Im Rahmen der Pilotstudie zur Verkürzung der Aufenthaltsdauer für ^{177}Lu -Patienten in Spezialzimmern von 48 auf 20 Stunden wurde auch in der ARA Lausanne eine automatische Messsonde installiert. Wie in Bellinzona konnte auch in Lausanne ^{177}Lu regelmässig im Abwasser der ARA nachgewiesen werden. Die dort nach zwei Reinigungsstufen gemessenen Konzentrationen sind deutlich niedriger als im Zulauf der ARA Bellinzona. Die vollständigen Ergebnisse der Pilotstudie werden 2025 veröffentlicht.

Die Ergebnisse der Tritiummessungen im Wasser der Kläranlagen in Ballungszentren (Basel, Bern, Lausanne) zeigten keine ungewöhnlichen Werte. Wenn gelegentlich höhere ^3H -Konzentrationen im Wasser der ARA Basel gemessen wurden, sind diese Erhöhungen auf die Einleitung von Rauchgaswaschwasser aus der Sondermüllverwertungsanlage (RSMVA) Veolia in die ARA zurückzuführen. Die RSMVA verfügt über eine Bewilligung der Bewilligungsbehörde (FANM/BAG) bis zu 100 GBq ^3H pro Woche gemäss Art. 116 der StSV zu verbrennen.

Die Überwachung des Rauchgaswaschwassers von Kehrichtverbrennungsanlagen soll sicherstellen, dass kein radioaktiver Abfall versehentlich oder absichtlich mit dem konventionellen Kehricht entsorgt wird. Seit Inkrafttreten der revidierten StSV im Jahr 2018 sind die Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) verpflichtet, den Abfall vor der Verbrennung auf das Vorhandensein von Gammastrahlern zu überprüfen, um Risiken für Personal und Umwelt zu vermeiden. Die Installation von Messportalen am Eingang der KVAs deckt zwar diese Anforderungen ab, verhindert aber nicht die versehentliche Verbrennung von Tritium, einem reinen Betastrahler, der von den Portalen nicht nachgewiesen werden kann. Aus diesem Grund werden in den Rauchgaswaschwässern von Kehrichtverbrennungsanlagen in grossen Agglomerationen Tritiummessungen

weitergeführt. Im Jahr 2024 wurden dem BAG jedoch keine unbeabsichtigten oder illegalen Verbrennungen von Tritium in KVA gemeldet.

Art. 114 StSV erlaubt unter bestimmten Voraussetzungen die Deponierung von schwach radioaktiven Abfällen mit Zustimmung der Genehmigungsbehörde. Diese Möglichkeit gilt insbesondere für ^{226}Ra -haltige Abfälle, die vor dem Inkrafttreten der StSV von 1994 angefallen sind. Nach Art. 114 muss das BAG Deponien, in denen solche Abfälle abgelagert wurden, überwachen, um sicherzustellen, dass die Grenzwerte für die effektive Dosis eingehalten werden. Diese Überwachung erfolgt durch die Messung von ^{226}Ra im Sickerwasser und/oder im Grundwasser. Um die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Dosisgrenzwerte zu gewährleisten, ist es notwendig, dass der Immissionsgrenzwert für Wasser im Sickerwasser der Deponie eingehalten wird (siehe Wegleitung «Ablagerung von radioaktiven Abfällen mit geringer Aktivität auf einer Deponie»). Der Immissionsgrenzwert für ^{226}Ra in Gewässern ist auf 580 mBq/l festgelegt. Die Ergebnisse der Messungen im Jahr 2023 bestätigten, dass die ^{226}Ra -Konzentrationen im Sickerwasser von Deponien, in denen in den letzten Jahren ^{226}Ra -haltige Abfälle abgelagert wurden, niedrig sind und weit unter dem Immissionsgrenzwert liegen.

*Für weiterführende Informationen
siehe Kapitel 9.3. und 9.4*

Vom menschlichen Körper aufgenommene Radioaktivität

Die Aufnahme von Radionukliden über die Nahrung lässt sich durch Ganzkörpermessungen (für Gamma-Emitter) und die Analyse des ^{90}Sr -Gehalts in Milchzähnen und menschlichen Wirbelknochen bestimmen. Die Überwachung von ^{90}Sr in Milchzähnen, die seit 40 Jahren vom IRA im Auftrag des BAG durchgeführt wird, musste 2023 leider aufgrund fehlender Proben eingestellt werden. Trotz jährlicher Aufrufe ist die Zahl der Zahnarztpraxen, die sich am Sammelprogramm für Milchzähne beteiligen, seit Mitte der 2010er Jahre kontinuierlich zurückgegangen und reicht nun nicht mehr aus, um das Programm fortzusetzen. Da die ^{90}Sr -Aktivitäten in den Milchzähnen heute sehr gering sind ($< 10 \text{ mBq g}^{-1} \text{ Ca}$), kann dieses Isotop ohne eine ausreichende Probenmenge nicht mehr quantitativ bestimmt werden.

Anhand der Resultate der seit rund 40 Jahren durchgeföhrten Ganzkörpermessungen am Universitätsspital in Genf ist es möglich das natürlich im menschlichen Körper vorkommende ^{40}K zu quanti-

fizieren: Es findet sich im Mittel in Konzentrationen von rund 56 Bq/kg bei den Frauen und 71 Bq/kg bei den Männern. Die ^{90}Sr -Konzentration in den Wirbelknochen und Milchzähnen liegt heutzutage nur noch bei rund einem Zehntel mBq/g Kalzium (Figur 3). Strontium wird vom menschlichen Körper ebenso wie Kalzium in Knochen und Zähnen eingelagert. Die Wirbelknochen werden als Indikator für die Kontamination des Skeletts herangezogen, weil diese Knochen eine besonders ausgeprägte Schwammstruktur aufweisen und rasch Kalzium über das Blutplasma austauschen. An Wirbelknochen von im laufenden Jahr verstorbenen Personen lässt sich das Ausmass der Kontamination der Nahrungskette mit ^{90}Sr eruieren. Die Milchzähne wiederum bilden sich in den Monaten vor der Geburt und während der Stillphase. Der Strontiumgehalt wird gemessen, wenn der Milchzahn von selbst ausfällt. Er gibt im Nachhinein einen Anhaltspunkt darüber, wie stark die Nahrungskette der Mutter zum Zeitpunkt der Geburt des Kindes kontaminiert war. Die in den Milchzähnen gemessenen Strontiumwerte (Figur 3) sind deshalb nach Geburtsjahr der Kinder aufgeführt. Dies erklärt, weshalb die Kurven zu den Milchzähnen und jene zur Milch beinahe parallel verlaufen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 6.1.

Beurteilung

In der Schweiz blieben 2024 die Konzentrationen von Radionukliden in der Umwelt sowie die Strahlendosen der Bevölkerung aufgrund künstlicher Strahlenquellen, wie in den Vorjahren, deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten. Das entsprechende Strahlenrisiko kann daher als sehr klein eingestuft werden.

Bei der natürlichen und der künstlichen Umwelt-radioaktivität bestehen regionale Unterschiede. Die natürliche Radioaktivität wird im Wesentlichen durch die Geologie beeinflusst. Auch der Anteil der künstlichen Radioaktivität als Folge der Atomwaffenversuche und des Reaktorunfalls von Tschernobyl ist inhomogen über das Land verteilt. Radioaktives ^{137}Cs aus Tschernobyl wurde beispielsweise vornehmlich im Tessin und in den Bündner Südtälern abgelagert und ist dort, fast 40 Jahre nach dem Unfall, noch immer in vielen Proben messbar. Die gemessenen Konzentrationen nehmen seit 1986 kontinuierlich ab und Überschreitungen des ^{137}Cs Grenzwertes aus der Tschernobyl-Verordnung in Lebensmittel treten nur noch selten auf. Dies betrifft bestimmte sensible Lebensmittel, vorab Wildschweinfleisch, wie auch im Berichtsjahr 2024 nachgewiesen wurde.

Die Ergebnisse der Umgebungsüberwachung von Kernkraftwerken und Forschungsanstalten sind vergleichbar mit jenen aus früheren Jahren. Auch wenn Spuren der durch diese Betriebe emittierten Radionuklide in der Umwelt nachgewiesen werden können, zum Beispiel ^{14}C in Baumblättern oder ^{54}Mn in Sedimenten flussabwärts von Kernkraftwerken, liegen die dafür verantwortlichen Abgaben deutlich unterhalb der bewilligten Mengen und haben zu keinen Immissionsgrenzwertüberschreitungen geführt. Die Überwachung der Tritium-verarbeitenden Industrien zeigt in derer unmittelbaren Nähe einen deutlich messbaren Einfluss auf die Umwelt (Regen und Lebensmittel), insbesondere in Niederwangen. Die 2024 in der Umgebung des betroffenen Unternehmens gemessenen ^3H -Konzentrationen in Umweltpolen lagen jedoch im unteren Bereich der in den letzten 15 Jahren gemessenen Konzentrationen, und die daraus resultierenden Dosen für die umliegende Bevölkerung können als vernachlässigbar angesehen werden. Die unkontrollierte Abgabe von 2 TBq Tritium in die Umwelt durch ein Unternehmen in Root/LU im Februar 2024 überschritt den vom BAG festgelegten wöchentlichen Grenzwert, hatte aber keine signifikanten Dosen für die Bevölkerung in der Umgebung zur Folge. Bei den Abgaben von Radionukliden mit dem Abwasser aus Spitäler zeigt die Überwachung, dass die Immissionsgrenzwerte fast immer bereits im Zulauf der Kläranlagen grösserer Städte eingehalten ist.

Die Überwachung der Radioaktivität im Wasser von Kläranlagen, im Rauchgaswaschwasser von Verbrennungsanlagen sowie im Sickerwasser von Deponien ergab keine Werte, die ein Gesundheitsrisiko für Arbeitnehmende oder für die Umwelt darstellten. Dieses Überwachungsprogramm, das bereits 2024 redimensioniert wurde, wird bis 2026 schrittweise eingestellt, um den vom Parlament und vom Bundesrat beschlossenen Sparmassnahmen nachzukommen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die zusätzliche Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Nachbarschaft von Kernkraftwerken, Forschungseinrichtungen, Industrien und Spitäler sehr gering geblieben ist. Die tiefen Messwerte für künstliche Radionuklide in Umweltpolen zeigen die Wirksamkeit der Massnahmen zur Reduktion der Abgaben der Betriebe und können als Bestätigung für die Wirksamkeit der Überwachungsprogramme gedeutet werden.

Referenz:

[1] [Radiologische Ereignisse](#))

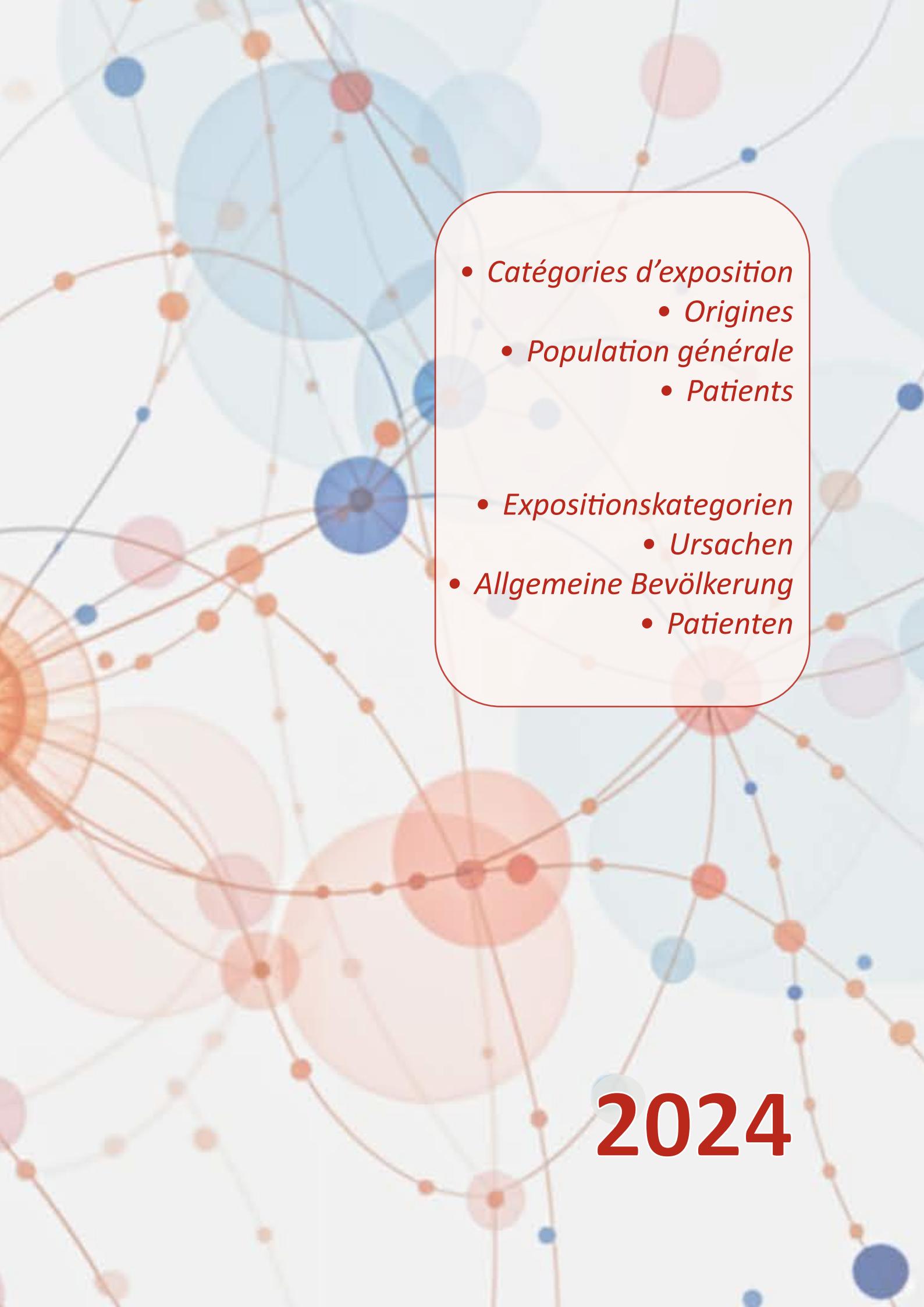




Exposition de la
population aux
rayonnements
ionisants

2

Strahlen-
exposition
der Bevölkerung

- 
- *Catégories d'exposition*
 - *Origines*
 - *Population générale*
 - *Patients*
 - *Expositionskategorien*
 - *Ursachen*
 - *Allgemeine Bevölkerung*
 - *Patienten*

2024

2.1

Strahlenexposition der Bevölkerung

S. Estier, P. Steinmann

Sektion Umweltradioaktivität URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Der grösste Anteil an der Strahlenexposition der Bevölkerung stammt vom Radon in Wohnräumen sowie von medizinischen Untersuchungen. Die Bevölkerung ist von diesen Strahlungsquellen unterschiedlich stark betroffen.

Expositionskategorien

Im Strahlenschutz unterscheiden wir drei Kategorien von Strahlenexpositionen:

Die erste Kategorie umfasst die beruflich strahlenexponierten Personen. In der Schweiz wird bei über 100'000 Personen die Strahlenexposition bei der Berufsausübung überwacht; die einen tragen dazu ein Dosimeter, bei den anderen erfolgt eine Berechnung (z.B. beim Flugpersonal). Diese Exposition wird von den Arbeitgebern und den Behörden genau erfasst und kontrolliert und in einem separaten Bericht «Dosimetrie der beruflich strahlenexponierten Personen in der Schweiz» publiziert www.bag.admin.ch/dosimetrie-jb.

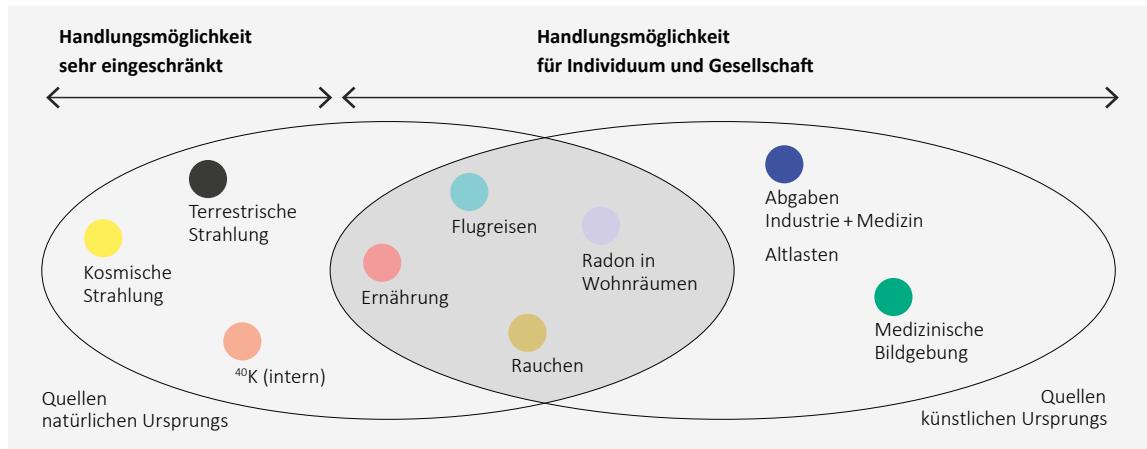
Die zweite Kategorie ist die Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung. Sie umfasst also alle Personen. Anders als bei der beruflichen Exposition werden die Dosen, die die Bevölkerung erhält, nicht individuell erfasst, sondern für die Gesamtbevölkerung ausgewertet. Dies erfolgt auf der Grundlage von Messungen der Radioaktivität in der Umwelt und in Wohnräumen, Umfragen und mathematischen Modellen. Das vorliegende Kapitel erläutert die Ergebnisse dieser Beurteilung der Strahlendosis für die Schweizer Bevölkerung.

Zur dritten Kategorie gehören die Patientinnen und Patienten, die sich einer medizinischen Diagnostik oder Behandlung mit ionisierender Strahlung unterzogen haben. Sie zählen natürlich ebenfalls zur Bevölkerung, aber die

zusätzlichen Dosen aufgrund der medizinischen Exposition sind separat zu betrachten, denn die medizinische Exposition ist gewollt und die Patientin oder der Patient hat einen direkten Nutzen für Gesundheit und Wohlbefinden. Es handelt sich hier um einen Spezialfall: Die Person, die einer Strahlenexposition ausgesetzt ist, profitiert gleichzeitig direkt davon, beispielsweise von einer genaueren Diagnose.

Ursachen der Strahlenexposition

Die ganze Schweizer Bevölkerung ist permanent ionisierender Strahlung natürlichen und künstlichen Ursprungs ausgesetzt. Die häufige Unterscheidung zwischen natürlichen und künstlichen Quellen erklärt sich nicht mit der geringeren Schädlichkeit natürlicher Quellen. Der Grund ist vielmehr, dass man diese in den meisten Fällen wohl feststellen, aber kaum beeinflussen kann. Es gibt jedoch Ausnahmen, namentlich im Fall von Radon-222. Radongas und seine radioaktiven Folgeprodukte sind zwar natürlichen Ursprungs – verantwortlich für die hohen Strahlendosen der Hausbewohner/innen ist aber ihre Akkumulation in Innenräumen, die aufgrund einer ungünstigen Bauweise diese Akkumulation fördern können. Ähnlich verhält es sich etwa mit dem Rauchen oder dem Fliegen, wo die Strahlung natürlichen Ursprungs ist, die von einer bestimmten Person erhaltene Dosis aber direkt mit ihrem Verhalten zusammenhängt.

**Abbildung 1 :**

Die wichtigen Beiträge zur Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung, aufgeteilt nach Möglichkeiten der Einflussnahme durch die einzelne Person oder die Gesellschaft. Unterschieden wird zudem zwischen Quellen natürlichen Ursprungs und künstlichen Ursprungs, wobei die Exposition durch einige natürliche Quellen teilweise auch durch menschliches Verhalten beeinflusst wird (dunkler Hintergrund).

Aus Sicht der öffentlichen Gesundheit ist es daher sinnvoller, die Expositionssquellen nicht nach ihrer natürlichen oder künstlichen Ursache, sondern danach zu unterscheiden, welche Möglichkeiten es für den Einzelnen und die Gesellschaft gibt, die verursachten Strahlendosen zu beeinflussen.

Abbildung 1 illustriert die hauptsächlichen Quellen der Strahlenexposition, der die Schweizer Bevölkerung ausgesetzt ist (ohne Berücksichtigung der beruflich strahlenexponierten Personen). Die Untersuchungen und Berechnungen zur Abschätzung der durchschnittlichen jährlichen Dosis der Schweizer Bevölkerung, aufgeteilt nach Quelle, und ihre Schwankungsbreiten sind im Jahresbericht «Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz» ausführlich beschrieben, vgl. www.bag.admin.ch/ura-jb.

Höhenmodells im Raster von 200 × 200 m. Die neue Abschätzung des Mittelwerts ist etwas niedriger als der frühere Wert von 0.38 mSv pro Jahr. Ausführlich wird die neue Abschätzung in Kapitel 2.3 des Jahresberichtes 2022 besprochen. Die kosmische Strahlung nimmt mit der Höhe zu. Deshalb beträgt sie beispielsweise auf 1'500 m über Meer 0.6 mSv pro Jahr. Die Dosen bei Flugreisen in grosser Höhe werden separat behandelt, da sie direkt durch das individuelle Verhalten beeinflusst werden.

Strahlenbelastung durch Nahrungsmittel

Bei der durch Nahrungsmittel verursachten Exposition ist zu unterscheiden zwischen Kalium-40 (^{40}K) und den anderen Radionukliden. Kalium-40 ist ein natürliches Radionuklid, das sich im homöostatischen Gleichgewicht befindet: Die Selbstregulierung des Körpers führt zu einer konstanten Konzentration von ^{40}K . Eine Person ist somit unabhängig von ihren Ernährungsgewohnheiten immer gleich stark exponiert. Da ^{40}K sich vor allem im Muskelgewebe festsetzt, hängt die Dosis durch dieses Nuklid (rund 0.2 mSv pro Jahr) in erster Linie von der Muskelmasse einer Person ab. Weitere Radionuklide in der Nahrung können natürlichen Ursprungs sein (z.B. Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Uran und Thorium, wie Polonium-210 und Blei-210) oder künstlichen Ursprungs (z. B. Caesium-137 und Strontium-90). Anders als bei ^{40}K hängt hier die Exposition direkt von den Ernährungsgewohnheiten ab.

In gewissen Fischen und Meeresfrüchten kann beispielsweise Polonium-210 (^{210}Po) und Blei-210 (^{210}Pb) angereichert sein, was zu signifikanten zusätzlichen Dosen führen kann. Laut dem französischen Institut für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit (IRSN) beträgt die durchschnitt-

Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung

Exposition gegenüber terrestrischer und kosmischer Strahlung

Die Dosis aufgrund der terrestrischen Strahlung (d.h. Strahlung aus Boden und Fels) macht im Mittel 0.35 mSv pro Jahr aus und hängt von der Zusammensetzung des Untergrundes ab. Die Dosis durch kosmische Strahlung beträgt im Mittel ebenfalls etwa 0.35 mSv pro Jahr. Die kosmische Strahlung nimmt mit der Höhe zu. Das BAG schätzte 2022 die mittlere Dosis durch kosmische Strahlung neu ab, basierend auf einem modernen Modell (EXPACS), unter Berücksichtigung der Bevölkerungsstatistik und des

liche effektive Dosis der französischen Bevölkerung aufgrund des Konsums von Fisch und Meeresfrüchten 0.13 mSv/Jahr, kann aber bei speziellen Ernährungsgewohnheiten bis zu 2 mSv /Jahr gehen. Es ist anzumerken, dass aus gesundheitlicher Sicht, trotz der zusätzlichen Dosen, eine Empfehlung zur Einschränkung des Verzehrs dieser Art von Nahrungsmitteln schwer zu rechtfertigen ist, angesichts ihrer unbestrittenen Ernährungsqualitäten. Auf die Strahlenbelastung durch natürliche Radionuklide wie ^{210}Po , ^{210}Pb , und Radium-Isotope in der Nahrung wird im Kapitel 5 dieses Berichtes genauer eingegangen.

Die Dosen durch die Aufnahme von Strontium-90 und/oder Cäsium-137 aus dem Fallout der atmosphärischen Atomtests der 1960er Jahre und im Falle von Cäsium-137 auch aus dem Unfall von Tschernobyl sind heute sehr gering. Die regelmässigen Ganzkörpermessungen an Schulklassen ergeben Dosen durch Inkorporation von Caesium-137 von weniger als einem Tausendstel mSv pro Jahr. Die Dosis aufgrund des Konsums von Trinkwasser ist auf natürliche Radionuklide zurückzuführen (hauptsächlich Radiumisotope) und liegt deutlich unter 0.1 mSv.

Im Durchschnitt beträgt die Dosis der Schweizer Bevölkerung durch die Aufnahme von Radionukliden über die Nahrung (ohne den Beitrag von Kalium-40) rund 0.2 mSv pro Jahr.

Strahlenbelastung durch Radon in Wohnräumen

Radon-222 und seine Folgeprodukte in Wohnräume liefern den grössten Dosisbeitrag für die Bevölkerung. Diese Nuklide gelangen über die Atemluft in den Körper.

Die internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) hat in ihrer Publikation 115 (2010) das Lungenkrebsrisiko aufgrund von Radon neu eingeschätzt und deutlich nach oben korrigiert. In ihrer Publikation 137 (2017) schlägt die ICRP einen neuen Dosiskoeffizienten für Personen am Arbeitsplatz vor, der auch für die Radonexposition der Bevölkerung in Wohnräumen anwendbar ist und mit der Einschätzung aus ICRP 115 (2010) übereinstimmt. Der neue Dosiskoeffizient wurde auf der Basis eines dosimetrischen Modells bestimmt und dient in der Schweiz als Referenz für die Bevölkerung sowie für die Personen am Arbeitsplatz. Folglich beträgt die durchschnittliche «Radondosis» für die Schweizer Bevölkerung mit dem neuen Dosiskoeffizienten etwa 3.3 mSv pro Jahr. Der angegebene Mittelwert leitet sich aus der durchschnittlichen Radonkonzentration in Gebäuden von 75 Bq/m³ ab (diese wird zukünftig neu berechnet). Jedoch ist die Radonbelastung der Bevölkerung nicht einheitlich bzw. der Bereich der gemessenen Werte sehr gross. Es sind z. B. Spitzenwerte von mehreren Tausend Bq/m³ gemessen worden.

Der wissenschaftliche Ausschuss der Vereinten Nationen für die Auswirkungen radioaktiver Strahlung (UNSCEAR) empfiehlt allerdings nach seiner jüngsten Bewertung die

Beibehaltung eines Dosiskoeffizienten, der deutlich niedriger ist als derjenige der ICRP. Diese Koeffizienten werden im Rahmen des UNSCEAR-Mandats zu Vergleichszwecken bei der Bewertung der weltweiten Bevölkerungsexposition verwendet. Die durchschnittliche «Radondosis» der Schweizer Bevölkerung mit dem UNSCEAR Dosiskoeffizient würde bei etwa 1.9 mSv pro Jahr liegen.

Strahlenbelastung durch Rauchen

Während die gesundheitsschädigende Wirkung des Tabakkonsums allgemein bekannt ist, ist vielen Menschen nicht bewusst, dass Rauchen auch eine zusätzliche Exposition gegenüber ionisierender Strahlung darstellt. Bei Raucherinnen und Rauchern führt das Inhalieren von natürlichen Radionukliden, wie Polonium-210 und Blei-210, die in den Tabakblättern enthalten sind, zu einer zusätzlichen Strahlendosis, verglichen mit Nichtraucherinnen und Nichtrauchern. Gemäss neueren Studien liegt der Mittelwert für die effektive Dosis beim Rauchen von 20 Zigaretten täglich bei 0.3 mSv pro Jahr. Im Jahr 2017 rauchten 27 % der Schweizer Bevölkerung über 15 Jahre im Durchschnitt 10 Zigaretten/Tag (Schweizerische Gesundheitsbefragung 2017, BFS). Auf die ganze Bevölkerung gerechnet entspricht dies im Durchschnitt 2.7 Zigaretten pro Tag und Einwohner/in und somit einer durchschnittlichen effektiven Dosis von 0.04 mSv/Jahr pro Einwohner/in über 15 Jahre wegen Rauchens. Ein ausführlicher Bericht zur Strahlenbelastung durch Rauchen ist in Kapitel 2.3 zu finden.

Strahlenbelastung durch Flugreisen

Da die kosmische Strahlung mit der Höhe zunimmt – in 10'000 m Höhe ist sie rund 100-mal stärker als auf 500 m über Meer – sind Personen, die mit dem Flugzeug reisen, einer zusätzlichen Strahlenexposition ausgesetzt. Im Gegensatz zur permanenten Exposition im Lebensraum am Boden hängt diese zusätzliche Exposition direkt mit dem Verhalten einer Person zusammen und wird hier deshalb separat behandelt. Im Jahr 2015 (neueste verfügbare Daten) legten die Schweizerinnen und Schweizer im Schnitt 9'000 km im Flugzeug zurück. Die daraus resultierende Dosis pro Einwohner/ in liegt zwischen 0.03 und 0.07 mSv/Jahr, je nach absolvierten Strecken. Die Dosen sind bei Routen, die in der Nähe der Pole verlaufen, höher als bei Routen in Äquatornähe. Für das Flugpersonal kann die zusätzliche Dosis durch kosmische Strahlung mehrere mSv pro Jahr erreichen.

Exposition gegenüber Abgaben aus Industrie, Forschung und Medizin und gegenüber radiologischen Altlasten (Kernwaffentests und Reaktorunfälle, Radium aus der Uhrenindustrie)

Zu den bisher erwähnten Strahlendosen kommt ein geringer Beitrag von ≤ 0.1 mSv pro Jahr aus den Expositionen gegenüber Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umwelt durch Kernkraftwerke, Industriebetriebe, Fors-

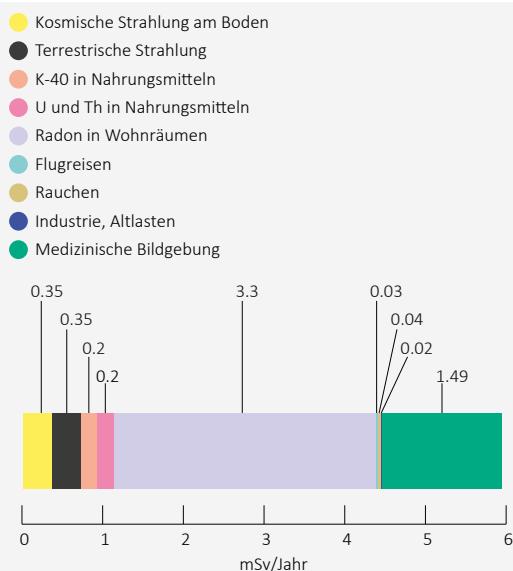


Abbildung 2:
Durchschnittliche Beiträge zur effektiven Dosis pro Jahr und Einwohner/in der Schweiz in mSv.

chungszentren und Spitäler sowie gegenüber von künstlichen Radionukliden in der Umwelt. Die Emissionen radioaktiver Stoffe über Abluft und Abwasser aus Kernkraftwerken, Industriebetrieben und Forschungszentren ergeben bei Personen, die in unmittelbarer Nähe wohnen, Dosen von höchstens einem Hundertstel mSv pro Jahr. Der Dosisgrenzwert für die Bevölkerung in geplanten Expositionssituationen liegt bei 1 mSv pro Jahr und gilt hauptsächlich für diese Komponente der Exposition.

Zu den radiologischen Altlasten gehört der radioaktive Fallout als Folge des Reaktorunfalls von Tschernobyl im April 1986 und der oberirdischen Kernwaffenversuche in den frühen 1960er Jahren; diese Beiträge verursachen heute nur noch eine Dosis von wenigen Hundertstel mSv pro Jahr. Die Dosis durch die Ausbreitung von radioaktiven Stoffen nach dem Reaktorunfall in Fukushima 2011 ist in der Schweiz vernachlässigbar. Derzeit läuft ein Aktionsplan zur Sanierung von Liegenschaften, die mit Radium kontaminiert sind, das bis in die 1960er Jahre in der Uhrenindustrie verwendet wurde. Über 100 Liegenschaften sind bereits saniert worden, wodurch im Schnitt eine zusätzliche Dosis von 3 mSv pro Jahr für die Bewohnerinnen und Bewohner vermieden wird.

Exposition von Patientinnen und Patienten

Strahlenbelastung durch medizinische Diagnostik

Die Dosis aufgrund medizinischer Anwendungen (medizinische Bildgebung) beträgt gemäss Auswertung der Erhebung von 2018 auf die gesamte Bevölkerung umgerechnet 1.49 mSv/Jahr pro Per-

son (einschliesslich des Beitrags der nuklearmedizinischen Diagnostik von 0.11 mSv). Im Vergleich zur Zwischenerhebung von 2013 hat sich die Dosis stabilisiert. Mehr als zwei Drittel der Strahlendosis in der Röntgendiagnostik sind durch computertomografische (CT) Untersuchungen verursacht. Wie beim Radon ist die Belastung durch die medizinische Diagnostik ungleichmässig verteilt: So wird geschätzt, dass 1.7 Patienten pro 1'000 Einwohnerinnen und Einwohner über einen Zeitraum von fünf Jahren eine kumulierte effektive Dosis von mehr als 100 mSv¹ durch CT-Untersuchungen erhalten. Dabei ist allerdings zu erwähnen, dass die Mehrheit der Patientinnen und Patienten diese hohen Dosen in fortgeschrittenem Alter erhalten.

Bilanz der Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung

Durchschnittliche Exposition

Die durchschnittlichen Beiträge der oben aufgeführten Expositionsquellen sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Die durchschnittliche effektive Dosis, die die Schweizer Bevölkerung aus allen Expositionsquellen zusammen erhält, beläuft sich auf rund 6 mSv/Jahr.

Variabilität der Exposition

Die Mittelwerte der Exposition geben alleine kein repräsentatives Bild der realen Exposition der Einwohnerinnen und Einwohner der Schweiz, da bestimmte Beiträge zur Strahlenbelastung von Person zu Person sehr stark variieren können. Am ausgeprägtesten ist dies bei medizinischen Exposition von Patientinnen und Patienten der Fall. Beispielsweise beträgt die durchschnittliche effektive Dosis der häufigsten CT-Untersuchungen an Abdomen und Oberbauch ungefähr 12 mSv. Die durchschnittliche Dosis der Patientenexposition von 1.49 mSv ist folglich wenig repräsentativ für die individuell erhaltenen Dosen der betroffenen Patienten.

Um ein Gesamtbild der Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung zu erhalten, ist es folglich wichtig, die individuellen Voraussetzungen, beispielsweise Wohnort, Lebens- und Ernährungsgewohnheiten und erhaltene medizinische Untersuchungen, zu berücksichtigen. Dies ermöglicht es bei den Strahlenschutzmassnahmen für die Bevölkerung gezielt Prioritäten zu setzen. Auch ist so für jede und jeden besser nachvollziehbar, inwiefern

¹ Berechnungsmethode nach: Rehani MM, Hauptmann M, Estimates of the number of patients with high cumulative doses through recurrent CT exams in 35 OECD countries; Physica Medica 76 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.07.014>

ein Verhalten oder eine besondere Situation die eigene Strahlenbelastung beeinflussen kann.

Um diese Unterschiede in der Strahlenbelastung darzustellen, wurden einige fiktive, aber realistische Expositionsszenarien definiert und dafür die Beiträge der verschiedenen Expositionquellen zur effektiven Dosis beurteilt. Die resultierenden Gesamtdosen für die jeweilige fiktive Person sind in Abbildung 3 dargestellt.

Die Fälle 1 bis 5 entsprechen der Mehrheit der Bevölkerung, die sich während eines Jahres keiner Untersuchung mit medizinischem Bildgebungsverfahren unterziehen muss:

Fall 1: jährliche Dosis einer Person, die nicht raucht, nicht im Flugzeug reist, in einer Wohnung mit schwacher Radonkonzentration und schwacher terrestrischer und kosmischer Strahlung lebt und wenig Lebensmittel konsumiert, die reich sind an natürlichen Radionukliden,

Fall 2: jährliche Dosis einer Person wie im Fall 1, ausser dass die Radonkonzentration in der Wohnung dem schweizerischen Durchschnitt entspricht (75 Bq/m^3),

Fall 3: jährliche Dosis einer Person, die in einer Gemeinde mit mittlerer Radonkonzentration und mittlerer terrestrischer und kosmischer Strahlung wohnt, die durchschnittlich oft Lebensmittel konsumiert, die reich sind an natürlichen Radionukliden, täglich 2.5 Zigaretten raucht und jedes Jahr einmal Zürich-Doha retour ($9'000 \text{ km}$) fliegt; die Person im Fall 3 erhält damit eine jährliche effektive

Dosis, die der durchschnittlichen Dosis der Schweizer Bevölkerung (ohne Beitrag der Medizin) entspricht,

Fall 4: jährliche Dosis einer Person wie im Fall 3, in deren Wohnung die Radonkonzentration jedoch hoch ist,

Fall 5: jährliche Dosis einer Person, die in einer Wohnung mit hoher Radonkonzentration und hoher terrestrischer und kosmischer Strahlung lebt, täglich 1 Paket Zigaretten raucht, sehr viele Lebensmittel, die reich an natürlichen Radionukliden sind, konsumiert und zudem häufig im Flugzeug reist,

Die Fälle 6 und 7 entsprechen den Dosen von Personen, die zusätzlich als Patientin oder Patient durch medizinische Röntgendiagnostik exponiert sind:

Fall 6: jährliche Dosis einer Person wie im Fall 3, die pro Jahr eine radiografische Untersuchung mit einer Dosis von $1,49 \text{ mSv}$ erhält (was der durchschnittlichen Dosis der Bevölkerung infolge medizinischer Anwendungen entspricht),

Fall 7: jährliche Dosis einer Person wie im Fall 5, bei der zusätzlich ein Bauch- und Beckenscan durchgeführt wurde (2 Durchgänge).

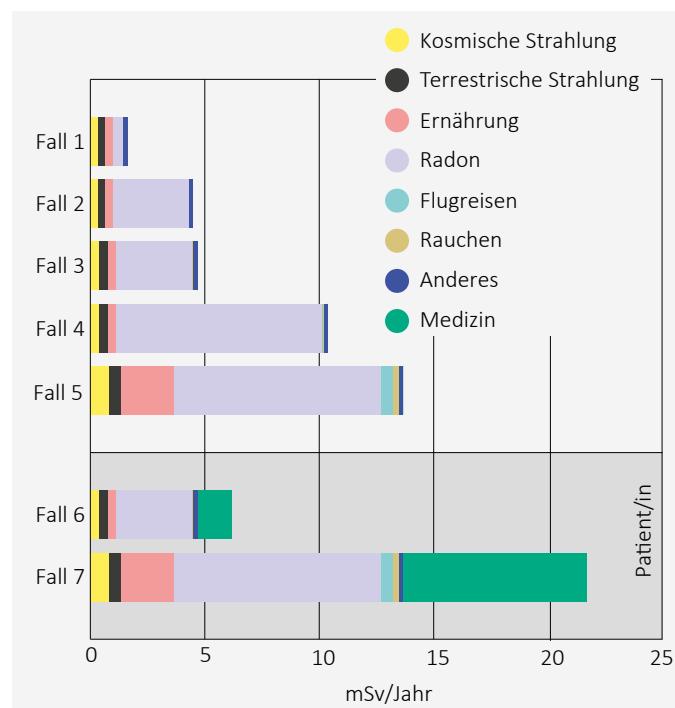


Abbildung 3:
Standardisierte Expositionsszenarien der Bevölkerung mit Angabe der Jahresdosis in mSv.

2.2

Exposition de la population suisse aux rayonnements ionisants

S. Estier, P. Steinmann

Section Radioactivité de l'environnement URA / OFSP, Berne

Résumé

La plus grande partie de l'exposition de la population aux rayonnements est due au radon dans les habitations ainsi qu'aux examens médicaux. L'exposition à ces sources varie largement d'un individu à l'autre.

Catégories d'exposition

En radioprotection, on distingue trois catégories d'exposition aux rayonnements.

La première inclue les personnes exposées aux radiations dans le cadre professionnel. En Suisse, plus de 100'000 personnes sont soumises à une surveillance de leur exposition aux rayonnements dans l'exercice de leur profession, soit par le port d'un dosimètre, soit par calcul, à l'exemple du personnel naviguant. Cette exposition est enregistrée et contrôlée précisément par les employeurs et les autorités et fait l'objet d'un rapport séparé. Vous trouverez d'autres informations au sujet de l'exposition professionnelle dans le rapport annuel sur la dosimétrie publié sous www.bag.admin.ch/dosimetrie-rapports.

La seconde catégorie d'exposition aux rayonnements touche la population générale. Tout un chacun est ici concerné. Contrairement à l'exposition professionnelle, les doses reçues par la population ne sont pas enregistrées individuellement, mais évaluées pour l'ensemble de la population sur la base de mesures de la radioactivité dans l'environnement ou dans les habitations, ou encore sur la base d'enquêtes ou de modèles mathématiques. Le présent chapitre rend compte des résultats de cette évaluation de la dose de rayonnement pour la population suisse.

La troisième catégorie concerne les patient(e)s ayant bénéficié d'un diagnostic ou d'un traitement médical mettant en jeu des rayonnements ionisants. Ils font bien entendu partie de la population générale, mais les doses supplémentaires qu'ils reçoivent en raison d'une exposition médicale sont traitées séparément. Cette exposition est en effet intentionnelle et apporte un bénéfice direct aux patient(e)s en terme de santé et de bien-être. Il s'agit là d'un cas spécial : la personne qui subit l'exposition aux rayonnements en profite aussi directement, p.ex. par le biais d'un diagnostic plus précis.

Origines de l'exposition aux rayonnements

L'ensemble de la population suisse est exposée en permanence à des rayonnements ionisants d'origines naturelle et artificielle. Si l'on différencie souvent entre sources naturelles et artificielles, ce n'est en aucun cas parce que les premières sont moins nocives que les secondes, mais généralement parce qu'elles sont présentes partout sans que nous puissions les influencer. Il existe toutefois des exceptions, notamment dans le cas du radon-222. En effet, si le gaz radon et ses descendants radioactifs sont bien d'origine naturelle, c'est leur accumulation dans les

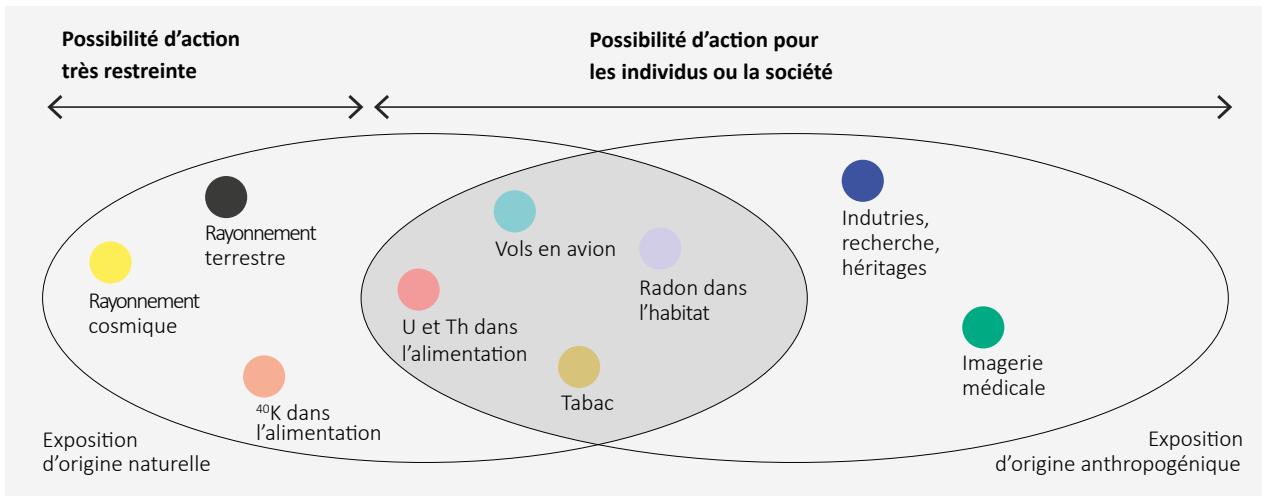


Figure 1 :

Les contributions importantes à l'exposition aux rayonnements de la population générale. Ovale gauche: exposition d'origine naturelle. Ovale droit: exposition d'origine anthropogénique. Zone de chevauchement (fond sombre): la source de rayonnement est d'origine naturelle, mais l'exposition dépend de l'intervention humaine. Elle peut donc être influencée par l'action de l'individu ou de la société. Zone sans chevauchement à gauche: les possibilités d'action pour réduire ces expositions sont très restreintes. Zone sans chevauchement à droite: sources artificielles de rayonnement; sans intervention humaine, ces sources n'existeraient pas.

bâtiments, en raison d'une construction mal adaptée, qui est responsable des doses de rayonnement élevées pour les occupant(e)s. La situation est semblable pour le tabac et les vols en avion, dont l'origine des rayonnements est naturelle, mais pour lesquels la dose reçue par un individu particulier est directement liée à son comportement.

D'un point de vue de santé publique, il est donc plus judicieux de distinguer les sources d'exposition en fonction des possibilités d'action pour les individus et la société sur l'exposition qu'elles occasionnent plutôt que sur leur origine.

La figure 1 illustre les principales sources d'exposition aux rayonnements de la population suisse (sans compter les personnes professionnellement exposées). Les études et calculs appliqués pour l'évaluation des doses moyennes reçues chaque année par la population suisse pour chacune des sources, ainsi que leur domaine de variation, sont détaillés dans les rapports « Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse », voir Rapports annuels sur la radioactivité de l'environnement: www.bag.admin.ch/ura-jb.

Exposition aux rayonnements de la population générale

Exposition au rayonnement terrestre et cosmique

Le rayonnement terrestre, c'est-à-dire le rayonnement provenant du sol et des roches, induit une dose moyenne de 0.35 mSv/an et dépend de la composition du sol. La dose associée au rayonnement cosmique reçue, au sol,

par la population suisse s'élève en moyenne également à 0.35 mSv/an. L'OFSP a procédé à une nouvelle estimation de la dose moyenne due aux rayons cosmiques en 2022, sur la base d'un modèle moderne (EXPACS), en tenant compte des statistiques démographiques et du modèle numérique du terrain sur une maille de 200 × 200 mètres. La nouvelle estimation de la valeur moyenne est légèrement inférieure à la valeur précédente de 0.38 mSv par an. La nouvelle estimation est discutée en détail au chapitre 2.3 du rapport annuel 2022. Ce rayonnement augmentant avec l'altitude, la dose associée est p.ex. de 0.6 mSv/an à 1'500 m d'altitude. Les doses inhérentes aux voyages en avion à haute altitude sont traitées séparément, car elles sont directement influencées par le comportement individuel.

Doses de rayonnement dues aux aliments

L'exposition imputable à l'alimentation mérite d'être dissociée entre le K⁴⁰ et les autres radionucléides. En effet, le K⁴⁰ est un radionucléide naturel en équilibre homéostatique: l'autorégulation par l'organisme conduit à une concentration stable de K⁴⁰. Un individu est ainsi toujours exposé de la même manière, quel que soit son régime alimentaire. Le K⁴⁰ se fixant essentiellement dans les tissus musculaires, la dose induite par ce nucléide (environ 0.2 mSv/an) dépend essentiellement de la masse musculaire de l'individu.

Les autres radionucléides issus de l'alimentation peuvent être d'origine naturelle (p.ex. les radionucléides des séries naturelles de l'uranium et du thorium comme le Po²¹⁰ et le Pb²¹⁰) ou artificielle (p.ex. le Cs¹³⁷ et le Sr⁹⁰). Contrairement au K⁴⁰, l'exposition dépend ici directement des habitudes alimentaires.

Certains poissons et fruits de mer sont p.ex. plus riches en ^{210}Po et en ^{210}Pb et peuvent conduire à des doses supplémentaires significatives. Selon l’Institut de radioprotection et de sûreté nucléaires (IRSN), la population française reçoit en moyenne une dose efficace liée à la consommation de poissons et de fruits de mer de 0.13 mSv/an, celle-ci pouvant atteindre 2 mSv/an pour des régimes alimentaires particuliers. A noter que malgré les doses supplémentaires engagées, il n'est pas justifié d'un point de vue sanitaire de recommander une restriction de leur consommation compte tenu des qualités nutritives indéniables de ce type d'aliments. L'exposition aux radiations des radionucléides naturels tels que ^{210}Po , ^{210}Pb , et les isotopes du radium dans les aliments est abordée plus en détail au chapitre 5 du présent rapport.

Les doses dues à l'ingestion de ^{90}Sr et/ou de ^{137}Cs provenant des retombées des essais nucléaires atmosphériques des années 1960 et, dans le cas du ^{137}Cs , de l'accident de Tchernobyl, sont aujourd'hui très faibles. Les mesures au corps entier régulièrement réalisées sur des collégiens montrent que les doses annuelles liées à l'incorporation de ^{137}Cs sont inférieures à un millième de mSv. La dose induite par la consommation d'eau potable provient de la radioactivité naturelle (principalement les isotopes du radium) et est nettement inférieure à 0.1 mSv.

En moyenne, la dose reçue par la population suisse par l'ingestion de radionucléides (sans la contribution du ^{40}K) est d'environ 0.2 mSv par an.

Doses de rayonnement dues au radon dans les habitations

Le radon-222 et ses produits de filiation dans les habitations constituent la plus importante contribution aux doses reçues par la population. Ces nucléides pénètrent dans le corps par l'air que nous respirons.

Dans sa publication 115 (2010), la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a réévalué le risque de cancer du poumon lié au radon et l'a nettement corrigé vers le haut. Dans sa publication 137 (2017), la CIPR propose un nouveau coefficient de dose pour les travailleurs, aussi applicable à l'exposition domestique de la population et qui concorde avec l'estimation de la publication 115 (2010). Le nouveau coefficient de dose a été déterminé sur la base d'un modèle dosimétrique et sert de référence pour la population et les travailleurs en Suisse. La «dose radon» moyenne pour la population suisse, établie avec le nouveau coefficient, s'élève ainsi à 3.3 mSv/an. La valeur moyenne indiquée se base sur une concentration moyenne de radon dans les bâtiments de 75 Bq/m³ (celle-ci sera prochainement recalculée). L'exposition de la

population au radon n'est cependant pas uniforme, le domaine des valeurs mesurées étant très étendu. On a p.ex. mesuré des valeurs extrêmes de plusieurs milliers de Bq/m³.

Dans sa plus récente évaluation, le Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) recommande toutefois le maintien d'un coefficient de dose nettement plus faible que celui de la CIPR. Ces coefficients sont utilisés dans le cadre du mandat de l'UNSCEAR à des fins de comparaison lors de l'évaluation de l'exposition de la population mondiale. La «dose radon» moyenne de la population suisse évaluée avec le coefficient de dose de l'UNSCEAR

Doses de rayonnement dues au tabagisme

Si l'effet nocif du tabagisme sur la santé est connu de tous, beaucoup ignorent que cette pratique constitue aussi une voie d'exposition additionnelle aux rayonnements ionisants. En effet, l'inhalation par les fumeurs de radionucléides naturels, tels que le ^{210}Po et le ^{210}Pb contenus dans les feuilles de tabac, induit une dose supplémentaire par rapport aux non-fumeurs. D'après de récentes études, fumer 20 cigarettes par jour occasionne une dose efficace moyenne de 0.3 mSv/an. En 2017, 27 % de la population suisse de plus de 15 ans fumait en moyenne 10 cigarettes / jour (Enquête suisse sur la santé 2017, OFS). Ceci, ce qui représente une moyenne de 2.7 cigarettes par jour et par habitant, et donc une dose efficace moyenne de 0.04 mSv/an par habitant de plus de 15 ans due au tabagisme. Un rapport détaillé sur l'exposition aux radiations due au tabagisme est disponible au chapitre 2.3.

Doses de rayonnement dues aux vols en avion

Le rayonnement cosmique augmentant avec l'altitude (il est environ 100 fois plus élevé à 10'000 mètres qu'à 500 mètres d'altitude), les personnes voyageant par avion sont soumises à une exposition supplémentaire.

Contrairement à l'exposition permanente dans le milieu terrestre, cette exposition supplémentaire est directement liée au comportement de l'individu, raison pour laquelle elle est traitée séparément. Durant l'année 2015 (dernières données disponibles), les Suisses ont parcouru en moyenne 9'000 km en avion. La dose par habitant résultant de ces voyages en avion s'élève ainsi entre 0.03 et 0.07 mSv/an en fonction des parcours effectués. En effet, les doses sont plus élevées pour les trajectoires à proximité des pôles que pour celles proches de l'équateur. Pour le personnel navigant, la dose supplémentaire liée au rayonnement cosmique peut atteindre plusieurs mSv par an.

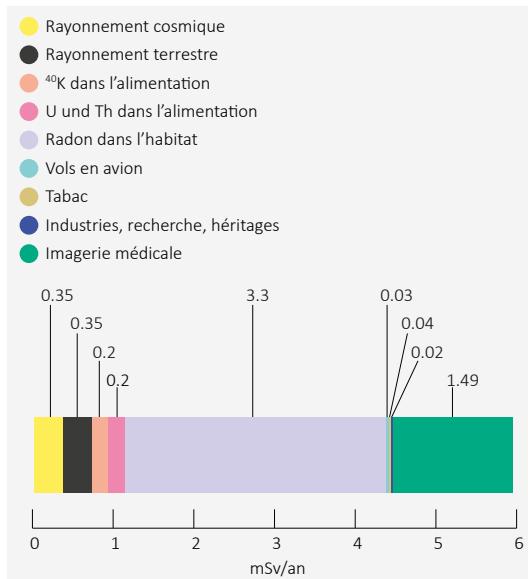


Figure 2 :
Contributions moyennes à la dose efficace (en mSv) par année et par habitant en Suisse.

Exposition liée aux rejets de l'industrie, de la recherche et de la médecine ainsi qu'aux héritages radiologiques (essais et accidents nucléaires, radium horloger)

Aux doses de rayonnement mentionnées précédemment vient s'ajouter une faible contribution (≤ 0.1 mSv/an) provenant de l'exposition aux rejets de substances radioactives dans l'environnement par les centrales nucléaires, les industries, les centres de recherche et les hôpitaux, ainsi qu'aux radionucléides artificiels présents dans l'environnement. Les doses reçues par les personnes habitant à proximité immédiate d'une centrale nucléaire, d'une industrie ou d'un centre de recherche et qui sont attribuables aux substances radioactives émises par ces installations dans l'air et dans les eaux usées, atteignent en effet au maximum un centième de mSv par an. La valeur limite de dose en situation d'exposition planifiée est fixée à 1 mSv/an pour la population et s'applique essentiellement à cette composante de l'exposition.

En ce qui concerne les héritages radiologiques, les retombées de l'accident de Tchernobyl en avril 1986 et des essais nucléaires atmosphériques au début des années 1960 n'occasionnent aujourd'hui plus qu'une dose de quelques centièmes de mSv par an. Les doses provenant de la dispersion de substances radioactives après l'accident du réacteur nucléaire de Fukushima en 2011 sont négligeables en Suisse. Un plan d'action est actuellement en cours afin d'assainir les biens-fonds contaminés avec du radium horloger jusque dans les années 1960 (page 45). Plus de 100 biens-fonds ont déjà été assainis à ce jour permettant d'éviter une dose supplémentaire de plusieurs mSv/an pour les occupant(e)s.

Exposition des patient(e)s

Doses de rayonnement dues au diagnostic médical

Selon l'évaluation de l'enquête de 2018, la dose moyenne reçue par la population par le biais d'applications médicales (imagerie médicale) est de 1.49 mSv/an et par personne (en tenant compte de la contribution de la médecine nucléaire diagnostique de 0.11 mSv). On constate une stabilisation de la dose par rapport à l'enquête intermédiaire effectuée en 2013. Plus des deux tiers de la dose en radiodiagnostic sont dus aux examens de tomodensitométrie (CT). Comme dans le cas du radon, l'exposition par le diagnostic médical est inégalement répartie: on estime en effet que 1.7 patient(e) pour 1'000 habitant(e)s reçoit une dose efficace cumulée de plus de 100 mSv¹ issue d'examens de tomodensitométrie sur une période de cinq ans. Toutefois, la plupart des patient(e)s reçoivent ces doses élevées à un âge avancé.

Bilan de l'exposition de la population Suisse

Exposition moyenne

Les contributions moyennes des sources d'exposition susmentionnées sont illustrées en figure 2. La dose efficace moyenne reçue par la population suisse du fait de l'ensemble de ces sources d'exposition s'élève ainsi à environ 6 mSv/an.

Variabilité de l'exposition

Les valeurs moyennes de l'exposition ne sont, à elles seules, pas suffisantes pour donner une image représentative de l'exposition réelle de la population suisse, car certaines de ces composantes peuvent varier de manière très significative d'un individu à l'autre. L'exemple le plus significatif est celui de l'exposition médicale des patient(e)s. La dose efficace moyenne pour les examens CT les plus courants sur l'abdomen et le haut de l'abdomen est p.ex. d'environ 12 mSv. La dose moyenne de 1.49 mSv pour l'exposition des patient(e)s n'est donc pas très représentative de la distribution des doses reçues individuellement.

Afin d'obtenir une image globale de l'exposition aux rayonnements de la population suisse, il est donc important de tenir compte des conditions individuelles, p.ex. le lieu d'habitation, le mode de vie et les habitudes alimentaires, ainsi que les examens médicaux réalisés, afin de prioriser de façon ciblée les mesures de radioprotection pour la population. Cela permettra à tout un chacun de comprendre plus facilement dans quelle mesure son comportement ou une situation particulière peut influencer sa propre exposition aux rayonnements.

¹ Méthode de calcul selon Rehani MM, Hauptmann M, Estimates of the number of patients with high cumulative doses through recurrent CT exams in 35 OECD countries; *Physica Medica* 76 (2020); <https://doi.org/10.1016/ejmp.2020.07.014>

Afin d'illustrer ces différences d'exposition aux rayonnements, quelques scénarios d'exposition fictifs, mais réalisistes, ont été définis et les contributions à la dose effective des différentes sources d'exposition évaluées. Les doses globales résultantes pour l'individu fictif en question sont présentées en figure 3.

Les cas 1 à 5 correspondent à la majorité de la population qui ne subit aucun examen d'imagerie médicale au cours d'une année:

Cas 1: dose annuelle reçue par un individu ne fumant pas, ne voyageant pas en avion, vivant dans une habitation à faible concentration en radon et à faible niveau de rayonnements terrestres et cosmiques, et consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.

Cas 2: dose annuelle reçue par l'individu du cas 1, à la différence que la concentration en radon dans son habitation équivaut à la valeur moyenne suisse (75 Bq/m^3).

Cas 3: dose annuelle reçue par un individu vivant dans une commune à concentration moyenne en radon et à niveau moyen de rayonnements terrestres et cosmiques, ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels, fumant 2.5 cigarettes par jour et effectuant un voyage Zurich – Doha aller-retour (9'000 km) par an. Ce cas correspond ainsi à celui d'une personne recevant une dose efficace annuelle égale à la valeur moyenne de la dose reçue par la population suisse (sans la contribution médicale).

Cas 4: dose annuelle reçue par l'individu du cas 3, à la différence que celui-ci habite dans une habitation à concentration élevée de radon.

Cas 5: dose annuelle reçue par un individu vivant dans une habitation à concentration élevée de radon et à niveau élevé de rayonnements terrestres et cosmiques, fumant 1 paquet de cigarettes par jour, ayant une consommation très importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant de plus fréquemment en avion.

Les cas 6 et 7 correspondent aux doses reçues par des individus exposés en plus en tant que patient(e)s au radiodiagnostic médical:

Cas 6: dose annuelle reçue par l'individu du cas 3, mais avec un examen radiographique annuel, délivrant une dose de 1.49 mSv (correspondant à la dose moyenne reçue par la population par le biais des applications médicales).

Cas 7: dose annuelle reçue par l'individu du cas 5 ayant par ailleurs reçu un scanner abdomino-pelvien (deux passages).

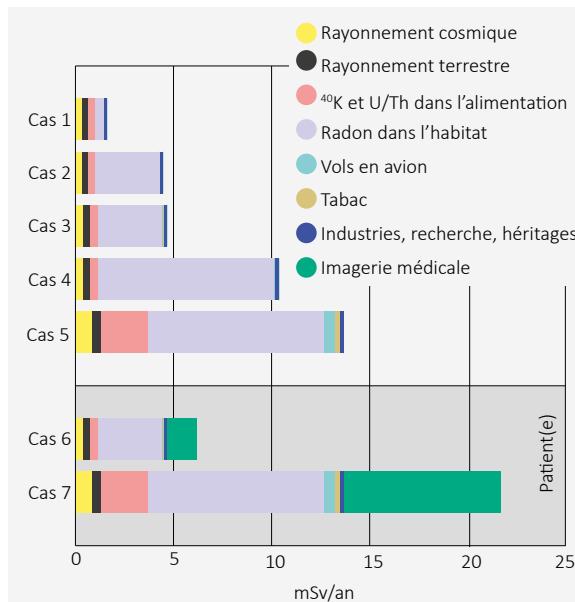


Figure 3 :
Variabilité de l'exposition de la population suisse: dose efficace d'un individu en mSv/an pour 7 scénarios standardisés.

**Rayonnement
externe**

3

**Externe
Strahlung**

- Mesures *in situ*
- Réseau NADAM
- Mesures d'aéroradiométrie

- *In situ* Messungen
- NADAM-Netz
- Aeroradiometrische Messungen

2024

3.1

Mesures in situ & exposition externe

A. Gurtner, S. Estier

Section Radioactivité de l'environnement, URA, Office fédéral de la santé publique OFSP, Berne

Résumé

En 2024, les campagnes de mesures de spectrométrie gamma in situ se sont concentrées sur les environs des centrales nucléaires et des principaux centres de recherche tels que le PSI et le CERN. Elles visaient également à surveiller la contamination résiduelle en ^{137}Cs , issue des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. Bien que cette contamination reste plus marquée au Tessin et dans le nord-est de la Suisse par rapport au Plateau suisse, les résultats de 2024 n'ont révélé aucune valeur constituant un risque pour la santé des populations concernées. Enfin, un exercice d'intercomparaison nationale mené au Tessin est venu compléter ces mesures.

Introduction

En Suisse, la surveillance continue de l'exposition ambiante repose sur les réseaux NADAM, à l'échelle nationale, et MADUK, déployé au voisinage des installations nucléaires. Ces réseaux automatiques fonctionnent 24 heures sur 24 afin de détecter toute augmentation anormale de l'exposition ambiante. Toutefois, à l'instar des dosimètres à thermoluminescence, ils enregistrent l'exposition ambiante globale sans pouvoir en distinguer ses composantes individuelles.

Les analyses d'échantillons en laboratoire par spectrométrie gamma visent principalement à détecter la détection de traces de radionucléides. Toutefois, ces mesures ponctuelles ne permettent pas d'évaluer l'exposition ambiante.

Pour combler cette lacune, les laboratoires mobiles de l'OFSP (Section URA, Berne), de l'IFSN (Brugg), du Laboratoire de Spiez et de l'IRA (Lausanne) ont recours à la spectrométrie gamma directe sur site (in situ). Cette méthode présente l'avantage de permettre l'identification des radionucléides émetteurs gamma présents sur le site, d'estimer leurs activités et de calculer leur contribution individuelle à l'exposition du public. La spectrométrie gamma in situ fournit ainsi des informations sensibles et réalistes sur les concentrations moyennes des radionucléides gamma ainsi que sur l'exposition ambiante qui en résulte.

Méthodologie in situ

L'exploitation de la spectrométrie gamma in situ en Suisse se base largement sur les recommandations ICRU¹, notamment pour la détermination de l'activité des radionucléides présents sur le site.

Lors d'une mesure sur le terrain, un spectre gamma est enregistré et le débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) global est mesuré simultanément sur le site à l'aide d'une chambre d'ionisation. L'analyse du spectre gamma in situ permet tout d'abord d'identifier les différents radio-nucléides naturels et artificiels présents sur le site puis, en se référant à la publication ICRU 53, de calculer leur concentration radioactive respective dans le sol en [Bq/kg] ou [Bq/m²], si leur distribution dans le sol est connue (déposition en surface, distribution homogène des radionucléides dans le sol, décroissance exponentielle, etc.).

L'étape suivante consiste à évaluer les contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant des divers radionucléides identifiés sur le spectre in situ à partir de leur concentration radioactive calculée précédemment. Les facteurs de conversion de l'activité spécifique au débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) utilisés par notre laboratoire pour les séries naturelles de l' ^{238}U et

¹ ICRU-Report 53 «Gamma-Ray Spectrometry in the Environment» 1994, ISBN 0-913394-52-1.

du ^{232}Th ainsi que pour le ^{40}K et le ^{137}Cs , dans le cas d'une distribution homogène de ces radionucléides dans le sol, sont résumés dans le tableau 1².

Tableau 1:

Facteurs de conversion de l'activité spécifique en débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^(10)$ utilisés par l'OFSP pour les séries naturelles de ^{238}U et du ^{232}Th ainsi que pour le ^{40}K et le ^{137}Cs , dans le cas d'une distribution homogène de ces radionucléides dans le sol^{2,3}.*

Nucléide	[nSv·h ⁻¹ /Bq·kg ⁻¹]
Série ^{238}U (total)	0.564
Série ^{232}Th (total)	0.749
^{40}K	0.0512
^{137}Cs	0.192

La contribution d'origine naturelle au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$ s'obtient par sommation des composantes locales du rayonnement terrestre (^{40}K , séries ^{238}U et ^{232}Th), évaluées pour une distribution homogène de ces radionucléides dans le sol, avec la contribution du rayonnement cosmique calculée à l'altitude du site. La formule suivante permet de calculer la contribution du rayonnement cosmique au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$:

$$\text{H}^*(10)_{\text{cosm}} [\text{nSv/h}] = 37 \cdot \exp(0.38 \cdot Z)$$

où Z est l'altitude en km.

Pour connaître la contribution des radionucléides artificiels au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$, deux approches sont possibles. La première consiste à soustraire la contribution d'origine naturelle, calculée précédemment, à la valeur globale de $\text{H}^*(10)$ mesurée avec une chambre d'ionisation. Cette démarche ne fournira que la contribution artificielle globale au débit d'équivalent de dose ambiant, mais possède l'avantage de ne nécessiter ni échantillonnage, ni hypothèse sur la distribution des radionucléides artificiels dans le sol.

Si par contre, la distribution dans le sol de chacun des radionucléides artificiels présents sur le site est connue, on choisira plutôt de calculer leur contribution respective à l'exposition à partir de leur concentration dans le sol. La somme des contributions naturelles et artificielles calculées à partir des spectres in situ est alors comparée à la valeur globale mesurée avec la chambre d'ionisation, afin d'évaluer la fiabilité de la méthode de reconstitution.

Sites examinés en 2024

Conformément au programme de surveillance habituel, en 2024, les campagnes de mesures de spectrométrie gamma in situ ont été menées aux abords des centrales nucléaires de Beznau (CNB), Gösgen (CNG), Leibstadt (CNL), et Mühlberg (CNM), ainsi que des centres de recherche (PSI, CERN) et du site d'entreposage temporaire de déchets radioactifs (ZWILAG) ainsi qu'au Tessin, région de Suisse la plus affectée par les retombées de l'accident de Tchernobyl.

Par ailleurs, les trois sites de référence (Posieux/FR, Güttingen/TG et Cadenazzo/TI) pour la surveillance de la radioactivité environnementale en Suisse ont été examinés en 2024. Le site d'Arenenberg/TG complète la liste des emplacements visités au cours de cette année.

En septembre 2024, un exercice national de spectrométrie gamma in situ, nommé INSITUTI 24, a été organisé au Tessin. Les emplacements examinés se situaient notamment dans les vals Maggia et Verzasca, la plaine de Magadino, au Monte Ceneri, dans les Centovalli et la région de Brissago, ainsi qu'à Alpe di Neggia, un point en altitude.

Résultats 2024

Les contributions respectives au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$ des différents radionucléides identifiés par spectrométrie gamma in situ (descendants compris pour les séries naturelles) sont représentées sur les figures 1 à 4 pour les sites suisses examinés en 2024. Ces contributions ont été calculées à partir des spectres gamma in situ, en supposant une distribution homogène de tous les radionucléides dans le sol, y compris pour le ^{137}Cs artificiel. Afin d'apprecier la fiabilité de la reconstitution, la valeur ainsi que l'incertitude de la mesure globale avec chambre d'ionisation sont également représentées.

En 2024, le ^{137}Cs a été le seul émetteur gamma d'origine artificielle mis en évidence sur l'ensemble des sites. Par ailleurs de l' ^{41}Ar dans l'air au site BAT 588 dans l'enceinte du CERN a été détecté.

² Lemercier et al., «Specific Activity to $\text{H}^*(10)$ conversion coefficients for in situ gamma spectrometry», Radiation Protection Dosimetry (2008), Vol 128, No. 1, pp.83-89. Advance Access publication 17 October 2007.

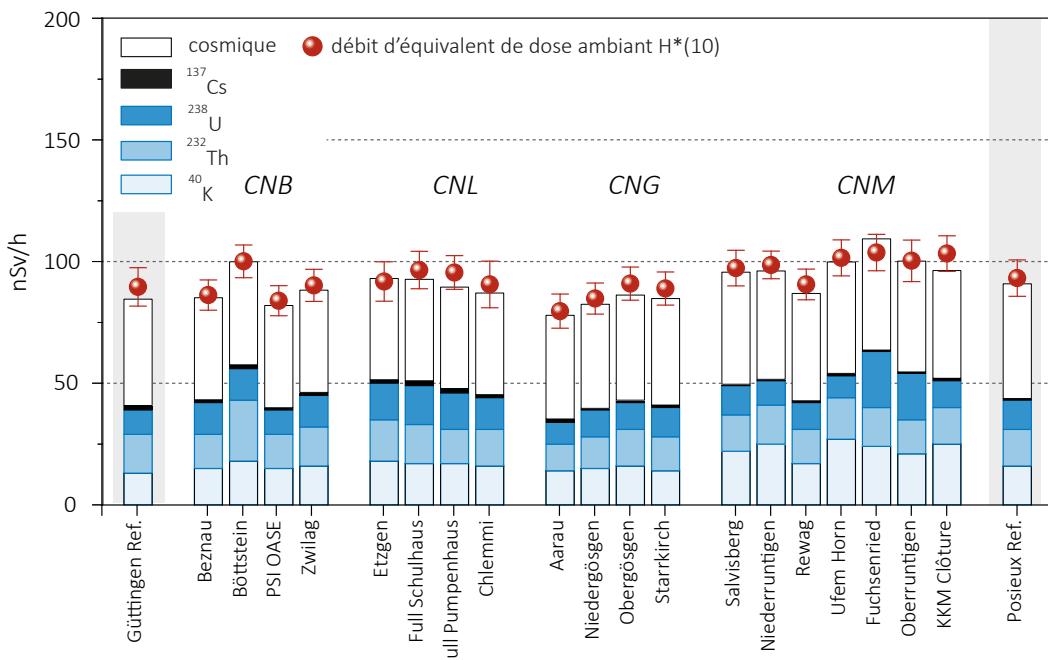


Figure 1:

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres *in situ* (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage des centrales nucléaires suisses en 2024 ainsi qu'aux points de référence de Güttingen/TG et Posieux/FR (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

Les résultats des mesures réalisées à proximité des centrales nucléaires, du PSI et du ZWILAG (voir figure. 1) sont comparables à ceux enregistrés sur les sites de référence, tels que Güttingen ou Posieux, situés hors de l'influence de ces installations.

Pour la centrale nucléaire de Mühleberg (suivi 2017-2024, figure 2), mise hors service en septembre 2020, les mesures *in situ* ont été réalisées en 2024 sur les sept sites examinés dans le cadre du programme complémentaires «Point zéro Démantèlement KKM 2017-2019» dont le rapport Démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg: Mesures Point Zéro 2017-2019³ de l'IFSN et l'OFSP, est consultable sur le site internet de l'IFSN.

En sus des quatre sites examinés au cours de la période d'exploitation, ce programme comprend l'analyse de trois points supplémentaires (Fuchsried, Oberruntigen et Clôture), situés à proximité immédiate de la centrale. En effet, contrairement à un rejet éventuel par voie atmosphérique tel qu'il pourrait se produire en période d'exploitation, l'éventuel impact des travaux de désaffection devrait être localisé dans un périmètre plus restreint.

Les valeurs de débit de dose enregistrées lors des mesures *in situ* au voisinage de la CNM en 2024 sont conformes à la normale, contrairement à 2021, où la présence de matériaux issus des

travaux de démantèlement stockés temporairement sur le site avait conduit à une valeur plus élevée à la clôture (voir figure 2). Il n'est toutefois pas exclu que la légère différence entre la valeur de débit d'équivalent de dose ambiant, mesurée directement sur le site avec la chambre d'ionisation, et celle obtenue par reconstruction *in situ*, observée à la clôture de KKM en 2024 (voir figure 1) soit également due à la présence sur le site de plus faibles quantités de matériaux issus des travaux de démantèlement.

Pour l'année 2024, on constate sur la figure 2 que les valeurs de ^{40}K sont à nouveau dans la norme contrairement à celles mesurées en 2022 généralement plus élevées que celles enregistrées au cours des années précédentes. La grande sécheresse de l'été 2022 était à l'origine des valeurs plus élevées. En effet, en l'absence d'humidité dans le sol, sa densité est plus faible que la valeur standard utilisée pour calculer la réponse du détecteur (étalonnage en efficacité). Aucune correction de l'auto-absorption pour tenir compte de la variation de la densité n'étant appliquée, les valeurs d'activité sont surestimées si la densité du sol est plus faible que la valeur de référence, ou sous-estimée si la densité est plus élevée (voir chapitre 3.1. du rapport annuel 2022).

La figure 3 montre les résultats des mesures *in situ* réalisées au voisinage du CERN en 2024. Ces résultats ne se distinguent généralement pas de ceux enregistrés sur le site de référence de Posieux, mis à part les traces d' ^{41}Ar dans l'air décelées au point de mesure BAT 588.

³ <https://ensi.admin.ch/de/dokumente/ergaenzungsprogramm-nullpegelmessung-rueckbau-kernkraftwerk-muehleberg-kkm-2017-2019/>



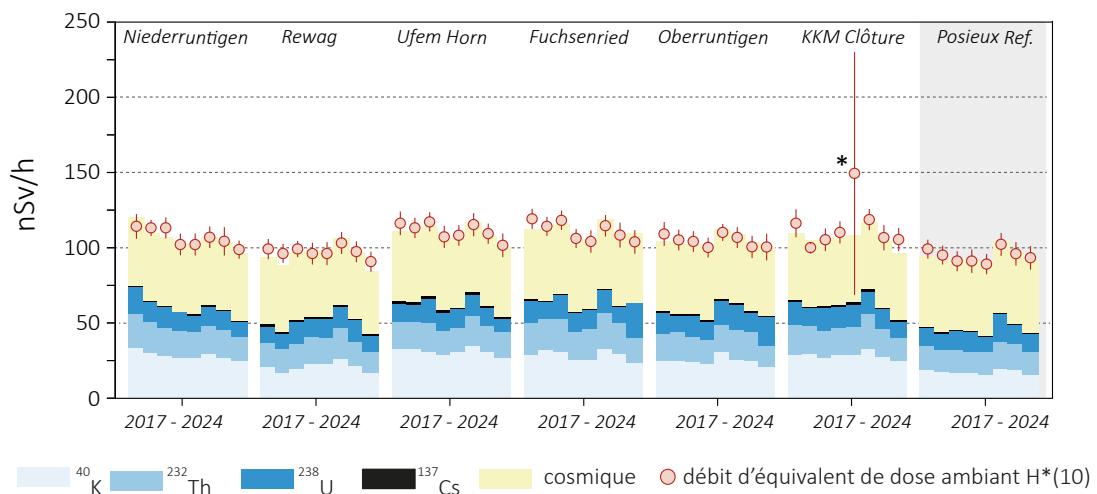


Figure 2:

Suivi 2017-2024 des contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg ainsi qu'au point de référence de Posieux/FR (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée. * La valeur plus élevée de débit de dose mesurée à la clôture de KKM en 2021 est due à la présence de matériaux issus des travaux de démantèlement, stockés temporairement sur le site.

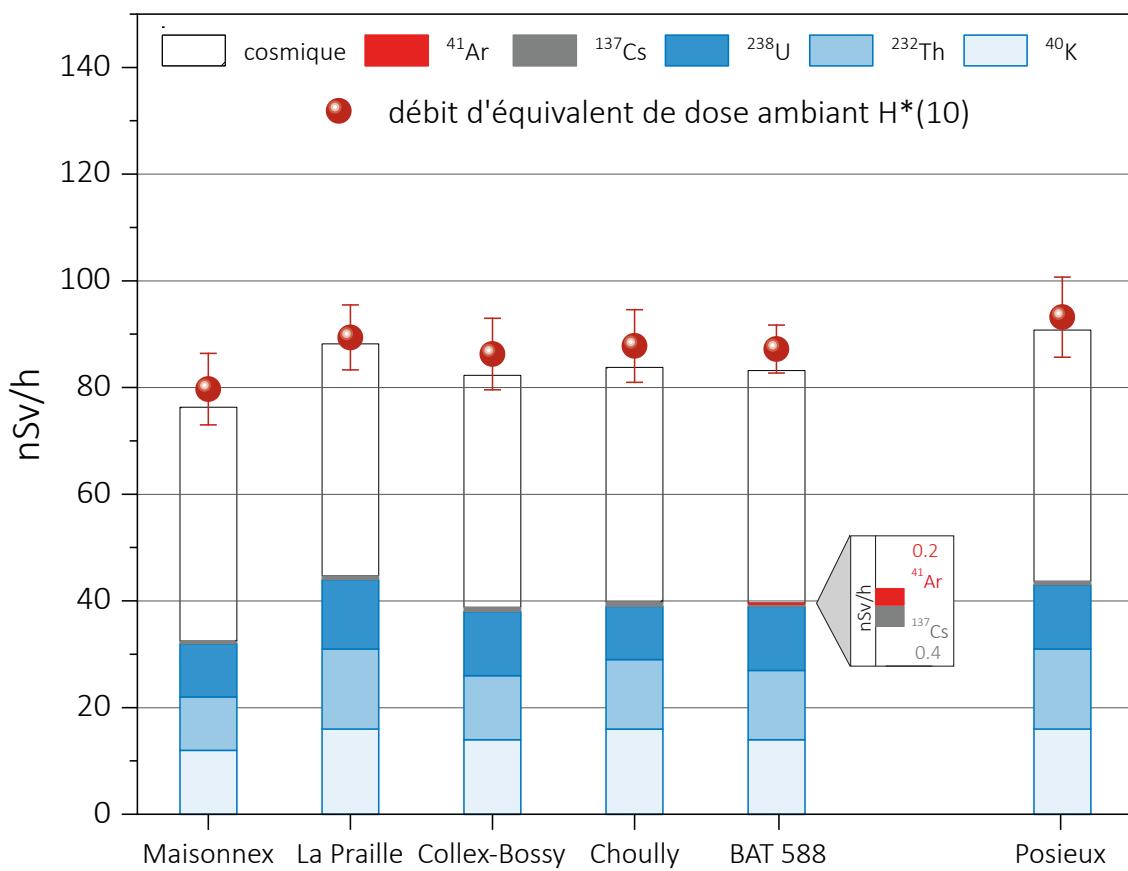


Figure 3 :

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2024 au voisinage du CERN. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

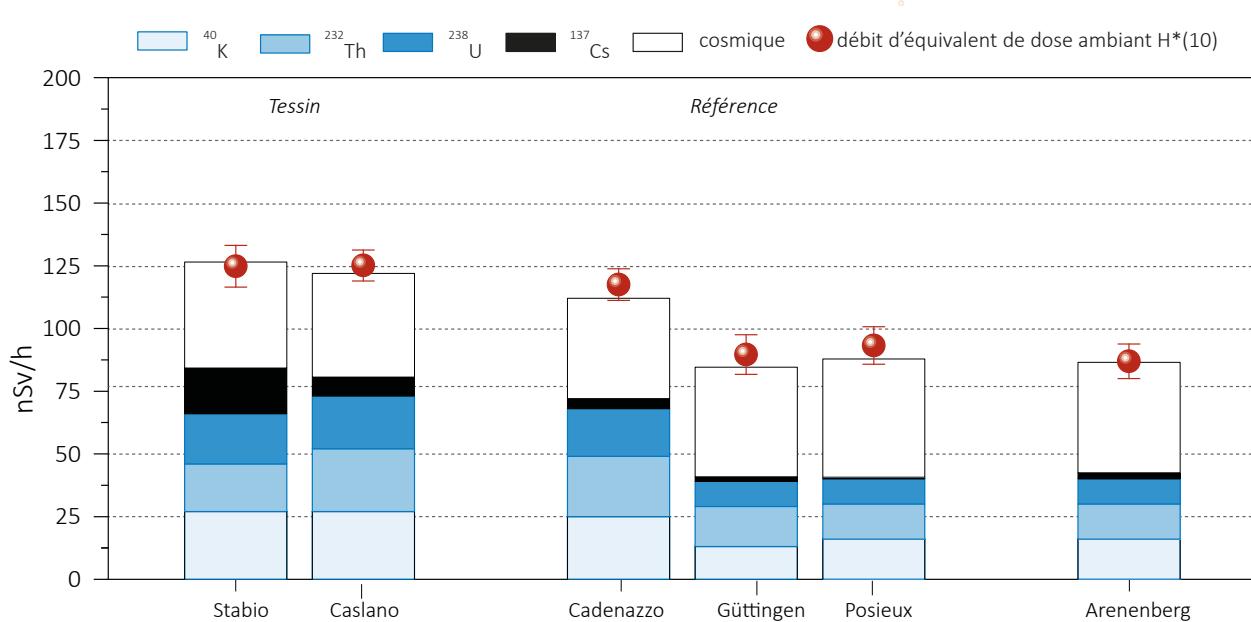


Figure 4:

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$ calculées à partir des spectres *in situ* (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2024 au sud des Alpes, à Arenenberg / TG ainsi que sur les 3 sites de référence. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

Au Tessin, comme le montre la figure 4, la contamination rémanente en ^{137}Cs , issue des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 et surtout de celles de l'accident de Tchernobyl (1986), est toujours clairement visible.

Les concentrations de ce radionucléide dans le sol présentent des variations significatives d'un emplacement à un autre à travers le canton, rendant difficile l'établissement d'une valeur de référence pour la contamination du sol en ^{137}Cs comme l'ont confirmé les résultats de l'exercice d'intercomparaison 2024 (voir chapitre INSITUTI24). Ces disparités s'expliquent d'une part par les écarts dans les dépôts initiaux, directement liés aux quantités de précipitations au moment du passage du nuage radioactif post-Tchernobyl, et en fonction de l'altitude pour les retombées des essais atomiques des années 50 et 60. D'autre part, ces variations sont également influencées par les différences de nature et de traitement des sols depuis 1986, tels que les travaux effectués, le retournement des sols ou non, etc.

Dans la région du Nord-Est de la Suisse, notamment à Güttingen et Arenenberg, les retombées de ^{137}Cs résultant de l'accident de Tchernobyl ont été plus prononcées que sur le reste du plateau suisse, bien que demeurant nettement moins élevées que dans la zone située au sud des Alpes.

Il convient de souligner que, pour tous les sites examinés, les écarts entre la reconstruction *in situ* et les mesures par chambre d'ionisation sont demeurés en dessous de 10%, corroborant ainsi la fiabilité de la méthode.

INSITUTI 24

En 2024, un exercice national de mesures par spectrométrie gamma *in situ*, nommé INSITUTI 24, a été organisé conjointement par l'Office fédéral de la santé publique (OFSP/URA) et l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) avec pour objectifs de:

- vérifier l'état des connaissances en spectrométrie gamma *in situ* pour son application standard dans la surveillance de la radioactivité dans l'environnement (détermination des activités des radionucléides naturels et du ^{137}Cs).
- renforcer la coopération entre les différentes institutions suisses.

Il s'est déroulé du 11 au 13 septembre 2024 dans différents emplacements au Tessin. Quatre institutions y ont participé : l'IFSN (Brugg), l'IRA (Lausanne), le Laboratoire AC (Spiez) et l'URA (Berne), réunissant au total 14 participants.

Les sites se répartissaient entre les vallées Maggia et Verzasca, dans la plaine de Magadino, au Monte Ceneri, dans les Centovalli et la région de Brissago. Les sites de Cadenazzo, Alpe di Neggia (en altitude) et Coglio ont été utilisés comme emplacement d'intercomparaisons. La carte schématique des emplacements ci-après illustrent les zones examinées.

Les résultats de cette intercomparaison ont fait l'objet d'un rapport de résultats séparé envoyé à tous les participants.

La figure 5 présente, par exemple, la contamination en ^{137}Cs calculée en supposant une distribution homogène de ce radionucléide dans le sol pour l'ensemble des sites examinés (et donc évaluée en Bq/kg).

Les valeurs d'activité pour le ^{137}Cs couvrent une plage de 6.8 à 104 Bq/kg illustrant bien la disparité de la contamination des sites examinés.

Conclusions

Les mesures de spectrométrie gamma in situ réalisées par l'OFSP en 2024 ont permis de caractériser les sites d'intérêt du point de vue de leur composition en radionucléides émetteurs gamma et des contributions individuelles au débit d'exposition qui

en résultent pour le public. Le champ d'application de ces mesures a visé à répondre à des objectifs d'ordre réglementaire (voisinage des installations nucléaires suisses) et d'ordre radioécologique (suivi des contaminations ^{137}Cs des retombées des essais nucléaires et de Tchernobyl).

De manière générale, cette méthode a permis de distinguer les composantes naturelles et artificielles de la radioactivité gamma et de s'assurer de la pertinence de l'information acquise par comparaison du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculé à partir de l'analyse spectrométrique à celui mesuré avec une chambre d'ionisation.

Au niveau national, même si les concentrations plus élevées de ^{137}Cs dues aux retombées de Tchernobyl sont toujours plus importantes au Tessin et localement dans les régions montagneuses par rapport au plateau Suisse, les résultats, en termes d'exposition du public, n'ont mis en évidence aucune valeur susceptible de représenter un risque pour la santé de la population.

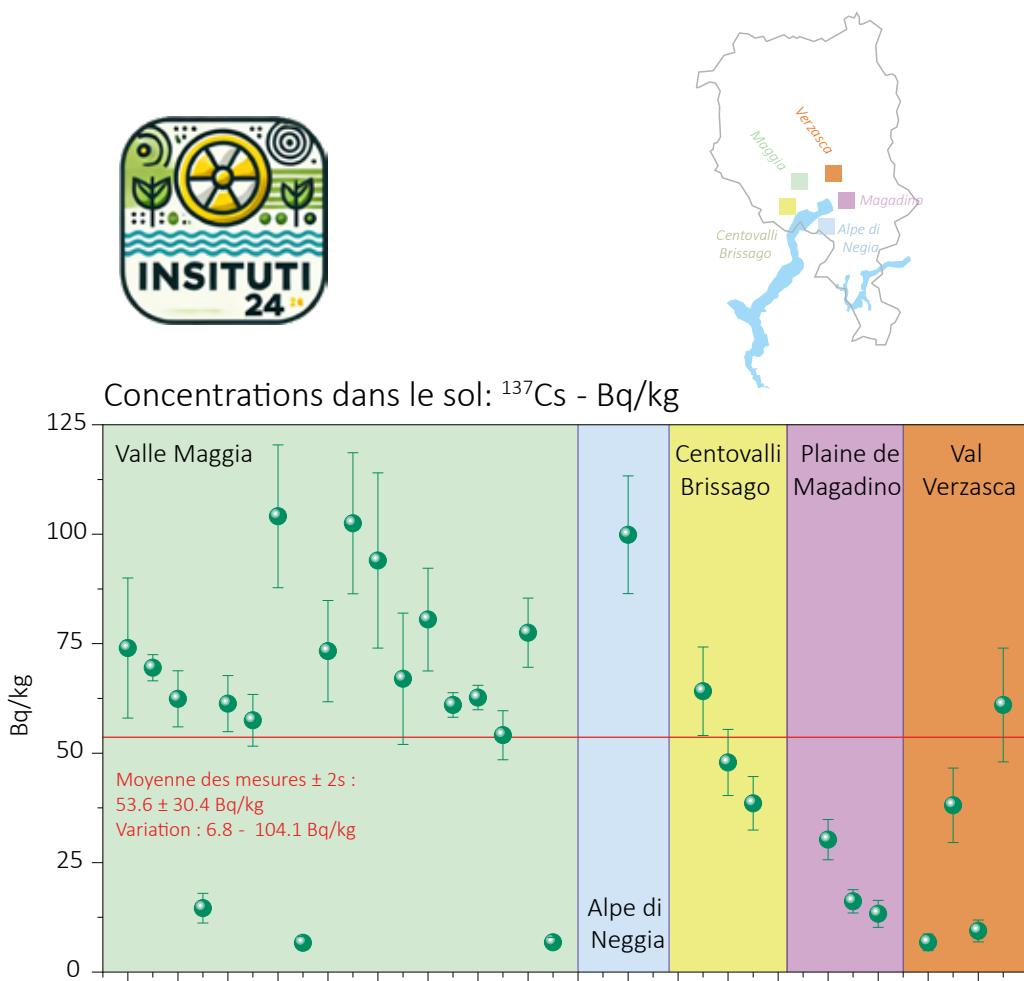


Fig 5: Concentration d'activité de ^{137}Cs dans le sol en Bq/kg, calculé en supposant une répartition homogène de ce radionucléide dans le sol.

3.2

Die automatische Überwachung der Ortsdosisleistung mit NADAM

Adrian Hess

Nationale Alarmzentrale und Ereignisbewältigung NEOC
Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS

Zusammenfassung

Um die externe radioaktive Strahlung in der Schweiz permanent grossräumig überwachen zu können, betreibt der Geschäftsbereich Nationale Alarmzentrale und Ereignisbewältigung NEOC (englisch: National Emergency Operations Centre) des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz BABS das Netz für die automatische Dosisleistungs-Alarmierung und Messung NADAM.

Das NADAM-Netz ermöglicht eine detaillierte Erhebung der Gamma-Ortsdosisleistung an Standorten in der ganzen Schweiz, es dient als Frühwarnsystem bei Überschreitung eines Alarmwerts und unterstützt die Einsatzorganisation Nationale Alarmzentrale EO NAZ im Falle eines nuklearen/radiologischen Ereignisses bei der Bestimmung des gefährdeten Gebietes und bei der Definition allfällig anzuordnender Schutzmassnahmen.

Im aktuellen Bericht wird der Verlauf der Ortsdosisleistung an verschiedenen NADAM-Standorten in der Schweiz betrachtet, im Zeitraum von Mitte November bis Anfang Dezember 2024, in welchem in weiten Teilen der Schweiz Schnee fiel. Anhand der Messdaten am Standort Genf (Genève / Cointrin) wird zudem die Charakteristik der erhobenen Daten und deren Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen illustriert.

Im Jahr 2024 wurden mit dem NADAM-Netz keine Werte gemessen, die auf eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung schliessen lassen.

Einleitung

Als Fachstelle des Bundes für ausserordentliche Ereignisse ist der Geschäftsbereich Nationale Alarmzentrale und Ereignisbewältigung NEOC (englisch: National Emergency Operations Centre) 365 Tage pro Jahr rund um die Uhr erreichbar und bereit, im Bedarfsfall als Einsatzorganisation Nationale Alarmzentrale EO NAZ die Arbeit aufzunehmen. Ihre Hauptaufgabe ist es dann, die Übersicht über die bevölkerungsschutzrelevante Lage sicherzustellen. Dies ist die Grundlage, um Behörden im In- und Ausland, internationale Organisationen und andere Partner warnen und orientieren, die Bevölkerung im Inland alarmieren und informieren zu können.

Die Aufgaben der EO NAZ im Bereich «Erhöhte Radioaktivität» sind besonders umfangreich. Die EO NAZ koordiniert die Probenahme- und Messorganisation des Bundes als zentrales Element für die Bewältigung eines radiologischen oder nuklearen Ereignisses. Damit kann die EO NAZ auf ein umfangreiches Netzwerk von eigenen und fremden Messressourcen zugreifen, zu dem sowohl fest installierte Systeme zählen als auch mobile Komponenten, die flexibel eingesetzt werden können.

Gemäss der Verordnung über den Bevölkerungsschutz (BevSV, SR 520.12) ist die EO NAZ zuständig für den Betrieb des **Netzes für die automatische Dosisleistungs-Alarmierung und -Messung (NADAM)**. Es dient ebenso der ständigen Überwachung der Radioaktivität, wie auch

als Frühwarnsystem. Überschreitet der Messwert auf einer NADAM-Station einen Alarmwert, wird automatisch das Pikett (Bereitschaftsdienst) der EO NAZ alarmiert, und der Messwert muss durch Fachpersonen der EO NAZ validiert werden (Ausschluss technischer Probleme, Überprüfung der Wetterdaten, Vergleich mit Nachbarstationen).

Bei Bedarf werden weitere Messmittel aufgeboten, zum Beispiel kann die kantonale Messunterstützung zugunsten der EO NAZ (KAMU NAZ) mit einer Kontrollmessung vor Ort beauftragt werden. Dies ermöglicht der EO NAZ bei einem radiologischen Ereignis, rasch das gefährdete Gebiet zu bestimmen, Behörden des betroffenen Kantons zu orientieren und bei unmittelbarer Gefährdung eine Alarmierung auszulösen und Sofortmassnahmen zum Schutz der Bevölkerung anzuordnen.

Die mit dem NADAM-Netz ermittelte Ortsdosisleistung (ODL) wird als 10 Minuten-Mittelwerte abgelegt. In erster Linie dienen diese Daten der EO NAZ zur Beurteilung der radiologischen Situation im Normalzustand und im Ereignisfall. Zudem werden sie mit den Behörden mehrerer Nachbarstaaten geteilt. Es werden auch ODL-Stunden- und Tagesmittelwerte berechnet und zweimal täglich auf der Internetseite des NEOC (www.naz.ch/de/aktuell/messwerte.html) publiziert. Damit stehen der Öffentlichkeit die

ODL-Stundenmittelwerte der jeweils letzten drei Tage und die Tagesmittelwerte vom Vortag zur Verfügung. Im Ereignisfall oder nach Bedarf kann der Publikationsrhythmus erhöht werden.



Die Stundenmittelwerte werden auch der «European Radiological Data Exchange Platform» ([EURDEP](#)) und dem «International Radiation Monitoring Information System» (IRMIS) der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO bzw. englisch: IAEA) zur Verfügung gestellt. Damit erhalten die Teilnehmerstaaten beider Plattformen Zugang zu den Schweizer Messdaten. Im Gegenzug erhält die Schweiz Zugriff auf die entsprechenden Daten der anderen Teilnehmerstaaten.



EURDEP

die ganze Schweiz auf Wetterstationen von MeteoSchweiz befinden. Damit stehen für jeden Standort Wetterdaten zur Verfügung, die wichtige Zusatzinformationen für die Interpretation der Messwerte liefern.

Diese Zusammenarbeit ermöglicht auch weitere Synergien, so kann die vorhandene Infrastruktur für Stromversorgung, Messdatenübermittlung und -speicherung genutzt werden, und die Wartung der Sonden erfolgt durch Techniker von MeteoSchweiz, welche auch andere Systeme auf ihren Stationen betreuen. In diesem Rahmen wird jede Sonde jährlich einer Funktionsprüfung unterzogen.

An vier Wartungsstandorten von MeteoSchweiz (Zürich, Payerne, Locarno, Davos) stehen einsatzbereite NADAM-Sonden bereit, damit defekte Einheiten schnell ersetzt werden können. Da jederzeit damit gerechnet werden muss, dass einige Sonden infolge Reparatur- oder Kalibrierungsarbeiten nicht zur Verfügung stehen, beträgt der Bestand an für den ortsfesten Betrieb vorgesehenen NADAM-Sonden insgesamt 100 Stück.

Hinzu kommen 30 mobile NADAM-Sonden mit derselben Sensorik wie die ortsfesten Sonden. Die mobilen Sonden sind mit Stativ, Regensor, Solarpanel und Mobilfunkmodul ausgerüstet, können dauerhaft autark betrieben werden und Messdaten direkt in die Datenbank des NEOC übermitteln. Diese Sonden sind im Labor Spiez stationiert. Die EO NAZ kann entsprechende Equipoisen aufbieten und veranlassen, dass mit diesen Sonden bei Bedarf innert weniger Stunden das NADAM-Netz erweitert bzw. verdichtet wird. Derartige lokale Erweiterungen wurden im Jahr 2024 tage- oder wochenweise vorgenommen, um bei internationalen Veranstaltungen mit politischer Bedeutung präventiv die radiologische Situation punktuell genauer überwachen zu können. Bei diesen Einsätzen wurden keine auffälligen Strahlungswerte festgestellt, darum werden in diesem Bericht keine Messdaten diskutiert, die mit den mobilen Sonden ermittelt wurden.

Alle NADAM-Sonden sind mit Geiger-Müller-Zählrohren für den Nieder- und den Hochdosisbereich bestückt. Sie messen die γ -Ortsdosisleistung (ODL, $H^*(10)$) und speichern diese als 10 min-Mittelwerte. Der Abgleich der Daten von beiden Zählrohren ermöglicht eine erste automatische Plausibilisierung allfälliger erhöhter Messwerte. Der Messbereich einer Sonde geht von 10 nSv/h (Nanosievert pro Stunde) bis 10 Sv/h und deckt somit gut den Bereich ab von der natürlicherweise vorhandenen Radioaktivität bis hin zu Dosisleistungen, wie sie z.B. nach einer Nuklearwaffenexplosion auftreten könnten.

Das NADAM-Netz und die Messdaten

Die permanente Überwachung der externen Strahlung in der Schweiz wird mit 76 ortsfesten NADAM-Messsonden sichergestellt, die sich verteilt über

Die Messdaten werden terrestrisch über Mobilfunk- oder Kabelverbindungen übertragen. Seit 2017 sind 15 Stationen mit der zusätzlichen Möglichkeit ausgerüstet, Messdaten via Satellitenverbindung zu übermitteln. Mit dieser Redundanz ist die Ausfallsicherheit der Datenübertragung erhöht, insbesondere da für den Fall einer Katastrophe mit Beeinträchtigungen der terrestrischen Kommunikationsnetze gerechnet werden muss.

Im MADUK-Netz in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen setzt das ENSI baugleiche Sonden ein (siehe Kapitel 8.3). In den Jahren 2020-2022 wurde bei allen NADAM- und MADUK-Sonden der Typ Gamma Tracer XL2-2 des Herstellers Bertin GmbH eingeführt.

Die Sonden sind vom Hersteller typengeprüft. Vor der Inbetriebnahme und nach Reparaturen erfolgt eine zertifizierte Eichung durch eine anerkannte Eichstelle in der Schweiz, entweder am Institut de Radiophysique (IRA) des CHUV in Lausanne oder am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen AG. Die Gültigkeitsdauer der Eichung wurde mit dem METAS auf max. 12 Jahre festgelegt, mit der Auflage, dass alle 12 Monate eine Funktionskontrolle die ausreichende Messgenauigkeit jeder Sonde bestätigt.

Diese periodische Funktionskontrolle erfolgt am Sondenstandort mit einer zertifizierten radioaktiven Quelle durch Techniker von MeteoSchweiz oder vom Labor Spiez. Damit wird sichergestellt, dass der durch eine Sonde gemessene Wert im definierten Messbereich nicht mehr als 20% vom Sollwert abweicht. Bei grösseren Abweichungen oder technischen Defekten werden die Sonden ausgetauscht. Bei jedem Sondentest werden zudem die Meldewege überprüft, insbesondere die korrekte Auslösung und Übermittlung eines Alarms.

Die an einem Standort gemessene ODL setzt sich natürlicherweise aus einem terrestrischen und einem kosmischen Beitrag zusammen. Sollte im Falle eines radiologisch/nuklearen Ereignisses Radioaktivität in die Umwelt gelangen, könnte dies einen zusätzlichen, künstlichen Beitrag zur Folge haben.

Der terrestrische Beitrag an die ODL ist in erster Linie abhängig vom geologischen Untergrund. Uran- und thoriumhaltiges Gestein im Boden führt zu einem höheren terrestrischen Strahlungsbeitrag. Eine solche Bodenbeschaffenheit tritt in alpinen Gebieten häufiger auf als z.B. im Mittelland. Ein Beispiel für eine Station mit vergleichsweise hohem terrestrischem ODL-Beitrag ist Vicosoprano auf 1'089 m.ü.M. am Talgrund im Bergell, wo mit 193 nSv/h wie in den Jahren zuvor auch 2024 der höchste ODL-Mittelwert aller NADAM-Stationen gemessen wurde.

Die Höhe des Sondenstandortes über Meer bestimmt den kosmischen Anteil an der ODL. Je höher der Standort, desto weniger wird die kosmische Strahlung durch

die Atmosphäre abgeschwächt, entsprechend grösser wird ihre Intensität. Die Messstation Jungfraujoch liegt auf 3'580 m.ü.M. Die kosmische Strahlung in dieser Höhe führte im Jahr 2024 mit 174 nSv/h zum zweithöchsten Jahresmittelwert der NADAM-Stationen.

Der Messwertebereich, der die Minima und Maxima der letzten Jahre sicher einschliesst, wird im NEOC als Erfahrungsbereich für einen bestimmten Standort bezeichnet. Dieser wird jährlich überprüft und wo nötig angepasst. Er hilft bei der automatischen Plausibilisierung der Messwerte und erleichtert somit das rasche Erkennen erhöhter Messwerte, auch wenn diese noch deutlich unter der Alarmschwelle von 1 μ Sv/h (1 Mikrosievert pro Stunde) liegen.

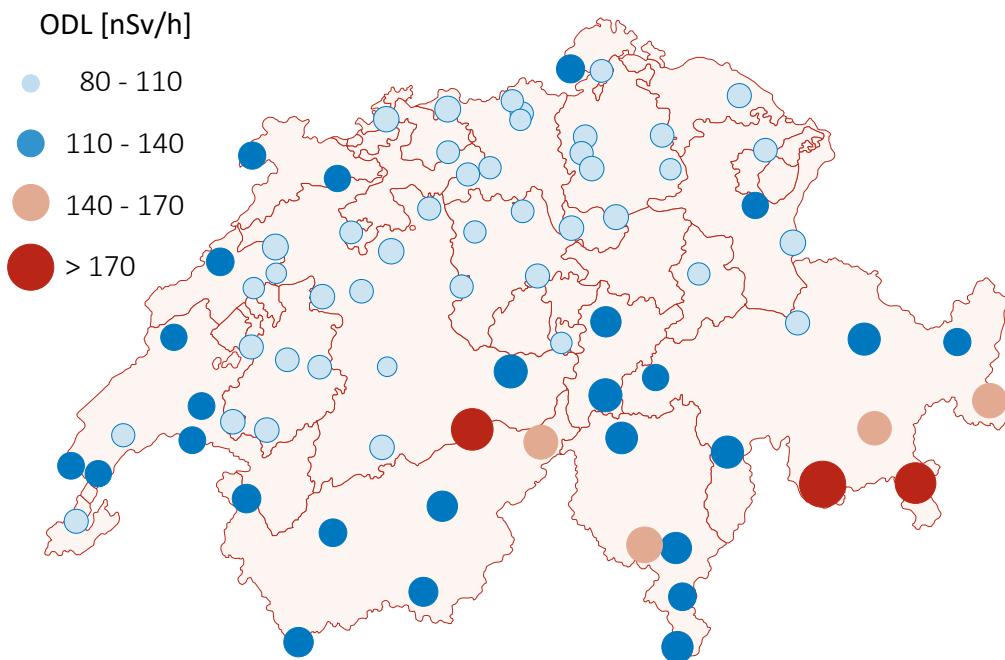
Aus der gemessenen ODL werden auch Mittelwerte für jede volle Stunde und für jeden Kalendertag berechnet. Diese werden ausländischen Partnern zur Verfügung gestellt und online publiziert. Für die Stundenmittelwerte sind ebenfalls Erfahrungsbereiche definiert, welche enger ausfallen als diejenigen für die 10 min-Mittelwerte, da die Mittelung über längere Zeitabschnitte kleinere Schwankungen zur Folge hat.

Für langfristige Statistiken werden einige Kennzahlen für jedes Kalenderjahr berechnet. Aus allen an einem Standort registrierten ODL-Werten wird der Jahresmittelwert bestimmt und zusätzlich derjenige Wert, der am häufigsten gemessen wurde. Wenn über längere Zeiträume höhere oder tiefere Werte gemessen werden, beeinflusst dies den Jahresmittelwert, jedoch bleibt der häufigste Messwert ähnlich, sofern die Perioden mit abweichenden Werten einen kleinen Anteil an der gesamten Messdauer ausmachen. Wenn beispielsweise eine Schneedecke während einiger Wochen den terrestrischen Anteil der Strahlung teilweise abschirmt, führt dies zu einem tieferen Jahresmittelwert, während der häufigste Messwert zunächst nicht beeinflusst wird. Hält die Schneedecke besonders lange an, kann dies hingegen zur Folge haben, dass der häufigste Wert unter dem Jahresmittelwert zu liegen kommt.

In Genf gab es am 9. Januar 2024 15 cm Neuschnee und in der Folge eine Schneedecke, deren letzte Reste am 15. Januar wegschmolzen. Im restlichen Jahresverlauf gab es keine anhaltende Schneedecke mehr. Der auf dieser Station ermittelte ODL-Jahresverlauf wird im aktuellen Bericht dargestellt.

Gemessene Daten

Alle NADAM-Fix-Stationen der Schweiz sind mit ihrem jeweiligen numerischen Jahresmittelwert in der Übersichtskarte in Figur 1 eingetragen. Die wichtigsten Einflussfaktoren, welche sich auf die ODL und damit auf deren Jahresmittelwerte auswirken, liegen in den

**Figur 1:**

Karte mit den Jahresmittelwerten 2024 aller NADAM-Sonden in Nanosievert pro Stunde, basierend auf den 10 min-Werten. Der Jahresmittelwert der Ortsdosisleistung variiert je nach Standort zwischen 83 nSv/h in Thun (BE) und 193 nSv/h in Vicosoprano (GR).

Beiträgen der terrestrischen und der kosmischen Strahlung, sowie den meteorologischen Verhältnissen (Niederschlag, Schneedecke).

Im Mittelland mit kaum anhaltenden Schneedecken wurden mehrheitlich Werte um 100 nSv/h gemessen. In den Alpen und auf der Alpensüdseite führt die Beschaffenheit des Gesteins im Boden regional zu einem höheren terrestrischen Beitrag, in grosser Höhe ist hingegen der kosmische Beitrag grösser. Die beiden Effekte haben zur Folge, dass die Standorte Vicosoprano (GR) und Jungfraujoch (VS) jedes Jahr die zwei höchsten ODL-Jahresmittelwerte aller NADAM-Stationen aufweisen.

Die ODL-Jahresmittelwerte und die Messwertebereiche aller Stationen, die sich aus den Maxima und Minima der 10 min-Werte ergeben, sind in Figur 2 dargestellt. Die Werte entsprechen den langjährigen Erfahrungen, mit Mittelwerten im gewohnten Bereich und natürlichen Abweichungen, die sich gut mit den jeweiligen Wettersituationen erklären lassen.

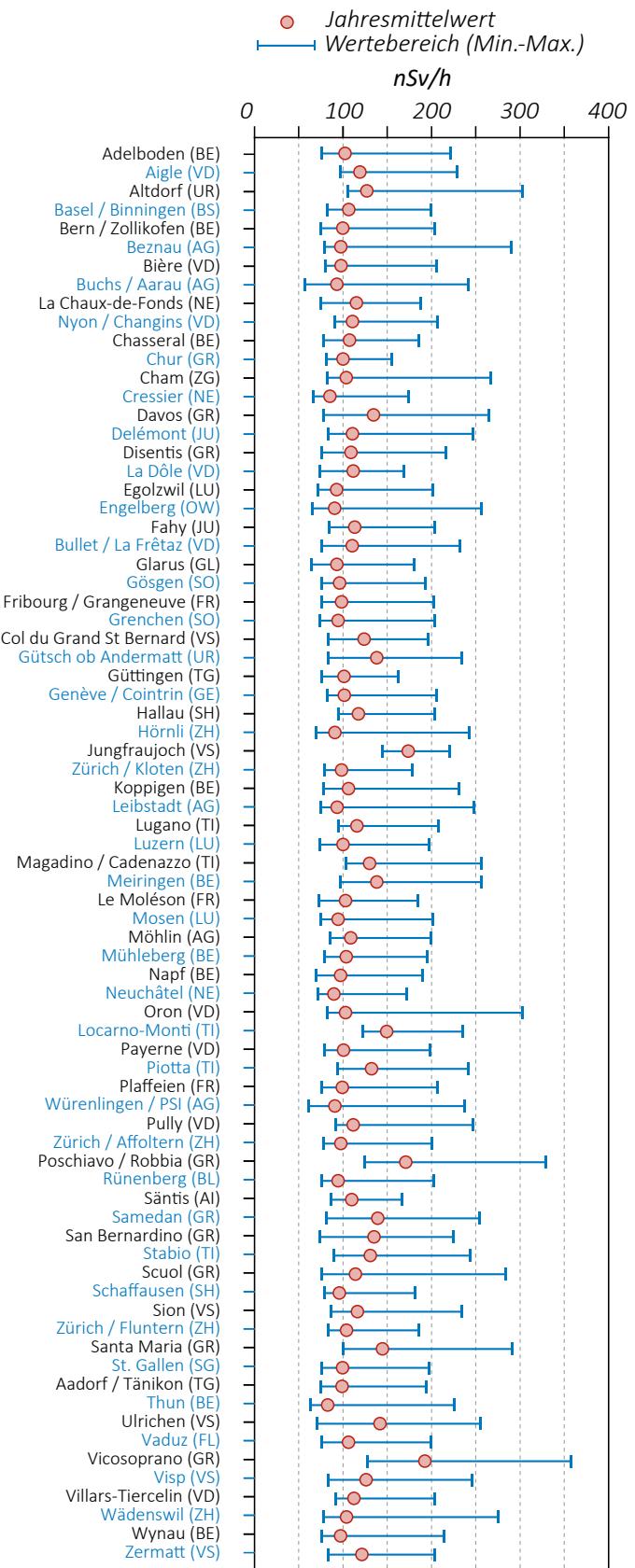
Auch im Jahr 2024 war es so, dass deutlich über dem Jahresmittelwert liegende Maxima während oder unmittelbar nach einsetzendem Niederschlag gemessen wurden, wenn natürlicherweise in der

Luft befindliche radioaktive Partikel ausgewaschen und am Boden, d.h. in Sondennähe, deponiert wurden. Dieser Effekt erklärt, warum die in Figur 2 aufgetragenen Maxima deutlich weiter von den Mittelwerten entfernt sind als die jeweiligen Minima.

Tiefere ODL-Werte ergeben sich, wenn nur reduzierte Strahlung die Sonde erreicht. Dies kann der Fall sein, wenn nach starken Niederschlägen in der Luft befindliche Partikel ausgewaschen und im Boden versickert oder abgeflossen sind und anschliessend die mit Wasser gesättigten obersten Bodenschichten oder eine Schneedecke allfällige Strahlung aus tieferliegenden Gesteinsschichten abschirmen sowie das Aufsteigen gasförmiger Radionuklide verhindern. Daher liegen die Minimalwerte besonders weit unter den Mittelwerten an Standorten mit zeitweise dicker Schneedecke.

Vergleich der ODL-Messdaten bei Schnee

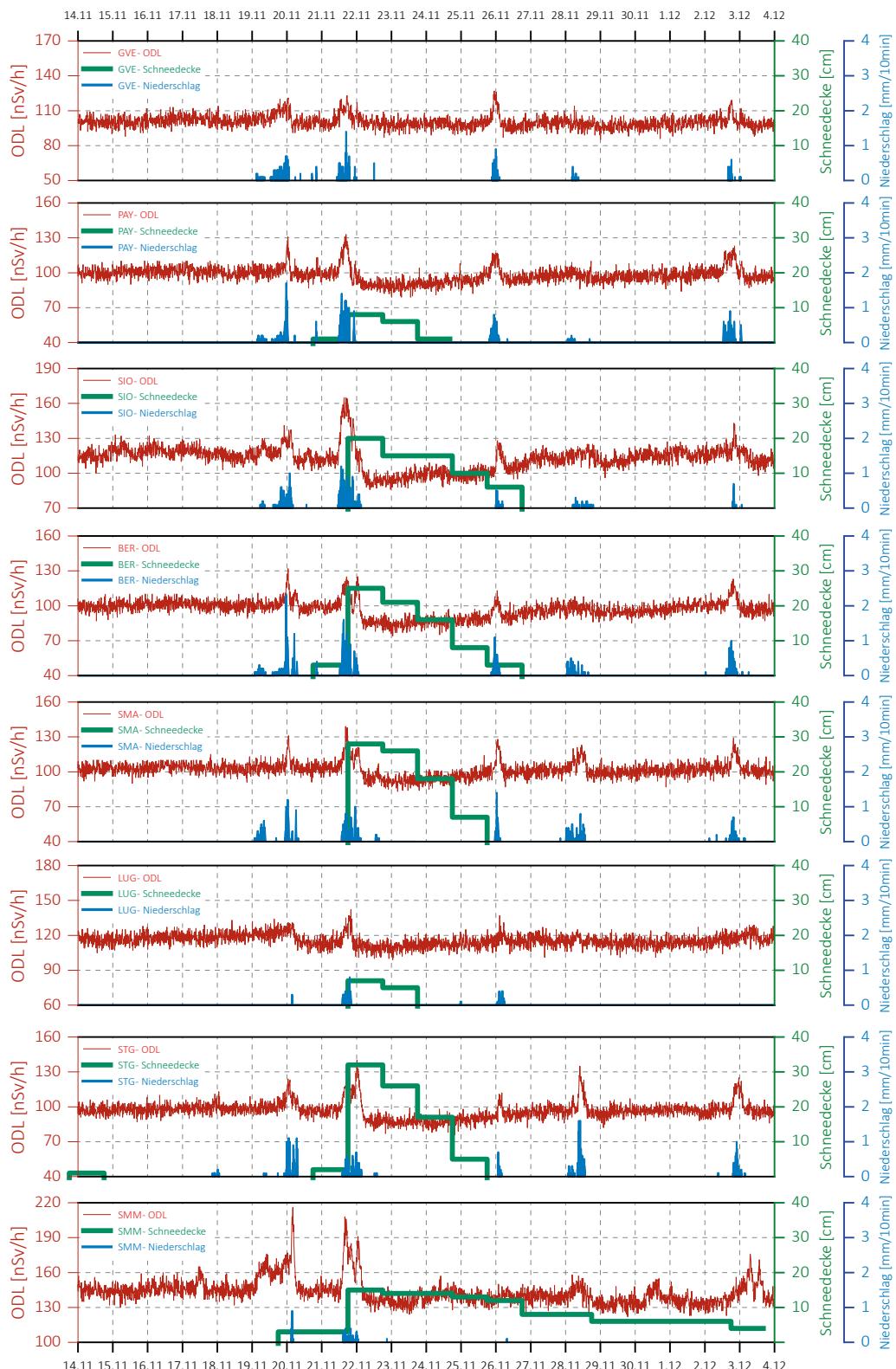
In Figur 3 sind die ODL-Werte, die Niederschlagsdaten und die Schneedecke im Zeitraum vom 14.11. bis 03.12.2024 an acht über die Schweiz verteilten



Figur 2:

Jahresmittelwerte und Messwertebereiche der NADAM-Sonden. Der dargestellte Messwertebereich jeder Station entspricht dem Bereich zwischen dem minimalen und dem maximalen 10 min-Wert der Sonden im Jahr 2024.

3.2 Die automatische Überwachung der Ortsdosiseleistung mit NADAM



Figur 3:

Verlauf der 10 min-ODL-Werte (skaliert an der linken y Achse), der Niederslagsmenge (skaliert an der rechten y Achse aussen) und der Schneedecke (skaliert an der rechten y Achse innen) an den Standorten Genève / Cointrin (GVE), Payerne (PAY), Sion (SIO), Bern / Zollikofen (BER), Zürich / Fluntern (SMA), Lugano (LUG), St. Gallen (STG) und Santa Maria (SMM) vom 11.11. bis zum 03.12.2024. Am 21.11.2024 fiel in weiten Teilen der Schweiz Schnee, jedoch nicht in Genf. Der ODL-Peak bei Niederschlag und die tieferen ODL-Werte bei anhaltender Schneedecke sind deutlich zu erkennen. Am Standort PAY wird die Schneedecke nicht gemessen, darum ist der Verlauf der Schneedecke am nahen Standort Payerne-Village (PAV) dargestellt.

Standorten dargestellt, namentlich Genève / Cointrin (GVE), Payerne (PAY), Sion (SIO), Bern / Zollikofen (BER), Zürich / Fluntern (SMA), Lugano (LUG), St. Gallen (STG) und Santa Maria (SMM). Die ODL ist auf der linken y Achse, der Niederschlag auf der rechten y Achse aussen, die Schneedecke auf der rechten y Achse innen skaliert. Weil vom Standort Payerne keine validierten Schneedaten vorliegen, ist stattdessen der Verlauf der Schneedecke am nahen Standort Payerne-Village (PAV) dargestellt.

Aus den Datenreihen ist gut der Effekt zu erkennen, dass bei Niederschlag oft kurzfristig erhöhte ODL- Werte gemessen werden. Am 21.11.2024 liegen aber in Genf die ODL-Werte kurze Zeit nach einem solchen Niederschlagspeak wieder in im gewohnten Bereich, während sie an allen anderen betrachteten Standorten kurze Zeit später unter das ursprüngliche Niveau fallen. Dies, weil der Niederschlag in Form von Schnee fiel und im Anschluss eine Schneedecke einen Teil der terrestrischen Strahlung abschirmte. Das Wegschmelzen der Schneedecke erfolgte im Anschluss unterschiedlich schnell, und die Rückkehr auf das gewohnte ODL-Niveau erfolgte unterschiedlich steil.

Detaillierte Betrachtung der NADAM-Station Genève / Cointrin

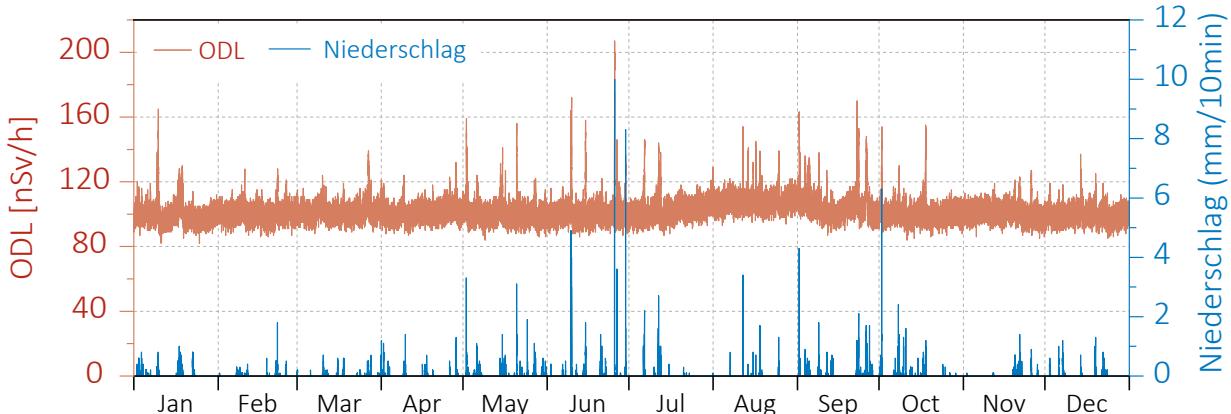
Figur 4 zeigt den Verlauf der ODL-10 min-Mittelwerte in Nanosievert pro Stunde (nSv/h) am Standort Genève / Cointrin GE über das ganze Jahr 2024. Ebenfalls aufgetragen und auf der rechten y Achse skaliert ist die Niederschlagsmenge in Millimetern pro 10 Minuten (mm/10 min). Der am häufigsten gemessene ODL-Wert liegt mit 100 nSv/h sehr nah beim Jahresmittelwert von 102 nSv/h. Dazu sind Spikes bis zu einem Maximalwert von 207 nSv/h zu erkennen.

Die in Genf gemessenen ODL Werte waren das Jahr über sehr gleichförmig. Am 9. Januar fiel etwas Schnee (im Diagramm nicht dargestellt). Der Niederschlag an diesem Tag hat einen ODL Peak von 165 nSv/h zur Folge. Danach fielen die Werte etwas tiefer aus, weil die Schneedecke einen Teil der terrestrischen Strahlung abschirmte. Nach einigen Tagen war die Schneedecke geschmolzen, aufgrund von Regen gab es noch einmal einen weniger ausgeprägten Peak als zuvor, danach lagen die Werte wieder im gleichen Bereich wie das ganze Jahr über.

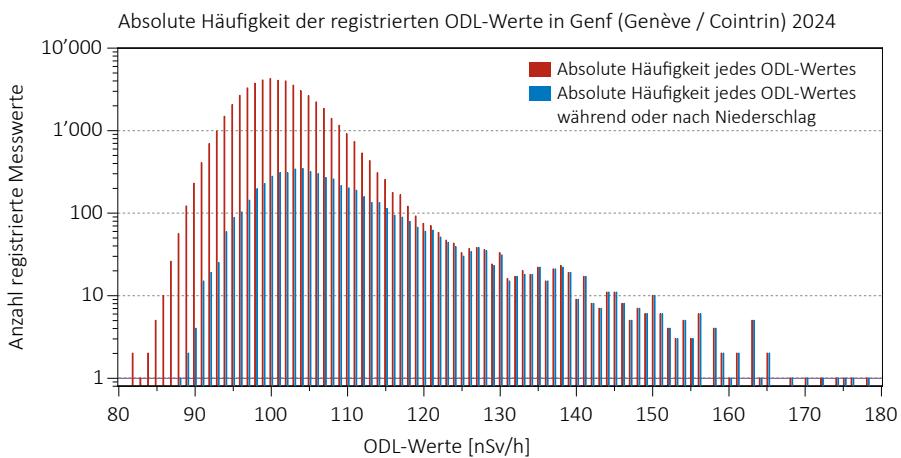
Im Juli und August ist ein sehr leichter Anstieg der ODL zu erkennen, wie es auch an anderen Standorten oft bei anhaltender Trockenheit beobachtet werden kann. Die ODL-Spikes über 130 nSv/h korrelieren eindeutig mit Niederschlag. Die Höhe der ODL-Spikes ist aber unabhängig von der Niederschlagsmenge, da der kurzfristige ODL-Anstieg primär davon abhängt, wie viele partikelgetragene Radionuklide (v.a. Zerfallsprodukte von Radon ²²²Rn) sich gerade in der Atmosphäre befinden, wenn der Niederschlag einsetzt und eine Deposition dieser Partikel am Boden in Sondennähe bewirkt.

Der in der Datenbank des NEOC dokumentierte Erfahrungsbereich für die Station Genève / Cointrin reicht von 80 bis 190 nSv/h. Am 25.06.2024 wurden an diesem Standort während heftiger Regenfälle mit bis zu 10 mm Niederschlag in 10 Minuten fünf ODL Werte ausserhalb dieses Erfahrungsbereiches gemessen.

Die Häufigkeit aller in Genf im Jahr 2024 erhobenen ODL-Messwerte ist logarithmisch skaliert in Figur 5 als rote Balken aufgetragen. Der oben erwähnte häufigste ODL-Wert von 100 nSv/h wurde 4'273 mal gemessen. Eine Schulter aufgrund einer längeren Periode mit dau-



Figur 4:
Verlauf der 10 min-ODL-Werte (rot, auf der linken y-Achse skaliert) und 10 min-Niederschlagswerte (blau, rechte y Achse) am Standort Genève / Cointrin GE über das Jahr 2024. Die ODL-Spikes jeweils bei einsetzendem Niederschlag sind gut zu erkennen. Die höchste 10 min-ODL von 207 nSv/h wurde am 25.06.2024 zwischen 18:20 und 18:30 UTC bei Niederschlag gemessen. 30 min vorher war mit 10 mm/10 min der stärkste 10 min-Niederschlagswert des Jahres an diesem Standort registriert worden.



Figur 5:

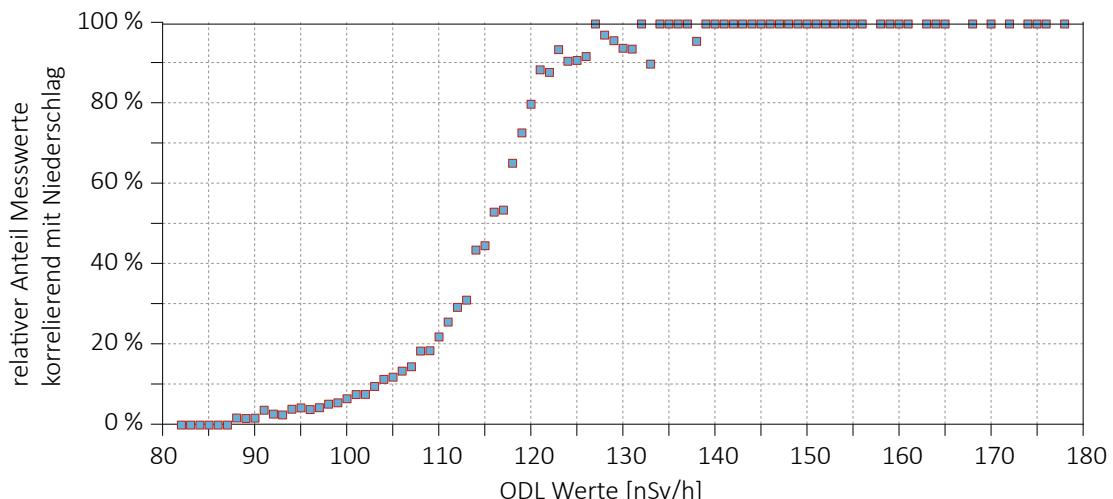
Verteilung der 10 min-ODL-Werte am Standort Genf (Genève / Cointrin) im Jahr 2024, logarithmisch skaliert.
Rot: Alle Messwerte, blau: Messwerte, die zeitnah mit erfolgtem Niederschlag registriert wurden.

erhaft höheren oder tieferen Werten lässt sich nicht erkennen, was gut zu der gleichförmigen Verteilung der Messwerte über den gesamten Jahresverlauf passt.

Die zweite, als blaue Balken dargestellte Datenreihe zeigt die ODL-Werte, welche aufgezeichnet wurden, wenn Niederschlag innerhalb der vorangehenden 50 Minuten oder der nachfolgenden 10 Minuten gefallen war. Der Anteil der oberhalb von 123 nSv/h gemessenen ODL-Werte ohne Bezug zu Niederschlag ist sehr gering und mit der logarithmischen Skalierung nicht visuell zu erkennen.

In Figur 6 ist die Korrelation der im Jahr 2024 in Genf gemessenen ODL-Werte mit Niederschlag dargestellt. In dieser linearen Darstellung lässt sich erkennen, dass ODL-Werte oberhalb von 123 nSv/h zu mindestens 90% während oder kurz nach Niederschlag gemessen wurden, ab 138 nSv/h zu 100%. ODL-Werte von 109 nSv/h oder tiefer wurden nur in weniger als 20% während oder kurz nach Niederschlag gemessen.

Relative Häufigkeit der mit Niederschlag korrelierenden ODL-Werte in Genf (Genève / Cointrin) 2024



Figur 6:

Anteil der 10 min-ODL-Werte für die Station Genf (Genève / Cointrin) im Jahr 2024, welche innerhalb von 10 min vor oder 50 min nach Niederschlag gemessen wurden. Für Werte oberhalb von 138 nSv/h liegt dieser Anteil bei 1.

Kennzahlen und Eckwerte zu den Messungen im NADAM-Netz im Jahr 2024

Für alle NADAM-Stationen sind für das Jahr 2024 die ODL-Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte in Tabelle 1 zusammengestellt. Verglichen mit anderen Jahren gibt es keine Auffälligkeiten. Die höchsten ODL-Jahresmittelwerte wurden, den langjährigen Erfahrungen entsprechend, auf den Stationen Vicosoprano (GR) und Jungfraujoch (VS) festgestellt.

Der Niederschlagseffekt, also der Umstand, dass bei einsetzendem Niederschlag eine höhere ODL auftritt, war im Jahr 2024 am stärksten ausgeprägt an den Standorten Beznau (AG; niederschlagsbedingter Maximalwert liegt 198% über dem Jahresmittelwert), Oron (VD; 195%) und Engelberg (OW; 183%). Die entsprechenden Höchstwerte sind auch in Figur 2 dargestellt, als Obergrenze der einge tragenen Messwertbereiche.

Die Verhältnisse dieser Maxima zu den Jahresmittelwerten an den jeweiligen Stationen waren 2024 ähnlich wie im Jahr 2022, in dem der Sommer ausserordentlich trocken ausgefallen war. Die Maxima waren damit tendenziell höher als 2023.

Am Standort Genf (Genève / Cointrin) lagen 2024 der Jahresmittelwert mit 102 nSv/h und der häufigste Messwert mit 100 nSv/h sehr nahe beisammen, was daran liegt, dass es keine Perioden mit anhaltend höheren oder tie-

feren ODL-Werten gab. Mittelwerte, die am Deutlichsten unter den häufigsten Messwerten lagen, wurden 2024 an den schneereichen Standorten Ulrichen (VS; Jahresmittelwert 14.7% unter dem häufigsten Wert), Col du Grand-St-Bernard (VS; 10.6% tiefer) und in San Bernardino (GR; 9.7% tiefer) gemessen. Wiederum sind das Standorte, die auch tiefe ODL-Minima relativ zum Jahresmittelwert aufweisen. In Gütsch ob Andermatt (UR) lag der häufigste gemessene Wert mit 26.4% am deutlichsten unter dem Jahresmittelwert, wahrscheinlich dadurch bedingt, dass an mehr als der Hälfte der Zeit eine Schneedecke vorhanden war.

Erkenntnisse

Im Jahr 2024 wurden keine Werte gemessen, die auf eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung schliessen lassen. Die NADAM-Sonden sind stabil und zuverlässig, und es wurden nur sehr wenige technische Störungen bei der Messung oder der Datenübertragung registriert.

Im Vergleich mit anderen Jahren gab es bezüglich Ortsdosisleistung in der Schweiz im Jahr 2024 keine grossen Auffälligkeiten.

Tabelle 1: Teil 1

Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte aller NADAM-Stationen im Jahr 2024

Station	Kanton	Inbetriebnahme	Sondenwechsel NADAM 2020	Höhe [m.ü.M]	Jahres- mittelwert	Häufigster Wert	Min- imum	Maxi- mum
						[nSv/h]		
Adelboden (ABO)	BE	04.11.09	25.07.22	1'322	102.7	101	75	223
Aigle (AIG)	VD	09.09.09	07.10.21	382	119.5	117	97	231
Altdorf (ALT)	UR	28.10.09	11.10.21	439	127.5	125	105	305
Basel-Binningen (BAS)	BS	19.11.09	14.10.21	317	106.9	105	82	201
Bern-Zollikofen (BER)	BE	30.09.09	08.06.21	554	100.4	100	74	206
Beznau (BEZ)	AG	19.11.09	25.08.21	327	98.0	97	79	292
Bière (BIE)	VD	12.01.17	15.04.21	684	98.4	97	80	207
Buchs/Aarau (BUS)	AG	20.11.09	14.06.21	388	93.4	92	56	243
La Chaux-de-Fonds (CDF)	NE	17.09.09	13.09.21	1'018	115.7	116	74	189
Nyon-Changins (CGI)	VD	23.09.09	29.09.21	459	111.2	109	90	208
Chasseral (CHA)	BE	17.09.09	05.07.22	1'594	108.0	108	78	188
Chur (CHU)	GR	09.10.09	12.10.21	557	100.6	99	81	157
Cham (CHZ)	ZG	29.01.18	10.06.21	442	104.2	102	82	269
Cressier (CRM)	NE	03.11.16	01.10.20	431	85.8	85	66	176
Davos (DAV)	GR	08.10.09	02.06.21	1'589	134.9	145	78	266
Delémont (DEM)	JU	03.11.16	27.10.21	439	111.1	109	83	249
Disentis/Sedrun (DIS)	GR	28.10.09	21.09.21	1'197	109.7	109	75	218
La Dôle (DOL)	VD	23.09.09	16.08.22	1'670	111.9	113	73	171
Egolzwil (EGO)	LU	22.09.10	16.08.21	523	93.2	92	71	203
Engelberg (ENG)	OW	30.10.09	01.09.21	1'035	91.1	89	65	258
Fahy/Boncourt (FAH)	JU	14.10.09	31.05.21	597	113.6	112	84	206
Bullet/La Frêtaz (FRE)	VD	24.09.09	29.09.20	1'206	110.9	110	75	234
Glarus (GLA)	GL	02.12.09	28.06.21	518	93.6	92	64	182
Gösgen (GOE)	SO	20.11.09	22.06.21	381	96.7	95	75	195
Fribourg / Grangeneuve (GRA)	FR	13.01.17	18.05.21	646	99	98	76	204
Grenchen (GRE)	SO	06.12.10	30.03.21	431	95	94	73	205
Col du Gd-St-Bernard (GSB)	VS	09.09.09	30.09.20	2'491	124.3	139	83	198
Gütsch ob Andermatt (GUE)	UR	01.09.05	10.08.21	2'296	138.6	102	83	236
Güttingen (GUT)	TG	03.12.09	28.10.21	441	101.6	100	76	164
Genève (GVE)	GE	24.09.09	27.10.20	412	101.8	100	82	207
Hallau (HLL)	SH	29.01.18	02.06.21	419	117.9	116	95	206
Hörnli (HOE)	ZH	12.11.09	08.09.21	1'133	91.4	89	69	244
Jungfraujoch (JUN)	VS	29.09.09	07.09.21	3'581	174.3	172	144	222
Kloten/Zürich (KLO)	ZH	24.11.09	11.11.21	427	98.9	97	79	180
Koppigen (KOP)	BE	13.01.17	27.10.21	484	106.6	106	78	233
Leibstadt (LEI)	AG	19.11.09	22.09.21	342	93.9	93	74	250
Lugano (LUG)	TI	21.10.09	15.12.21	273	116.2	115	94	210
Luzern (LUZ)	LU	05.11.09	29.06.21	455	100.7	99	73	199
Magadino-Cadenazzo (MAG)	TI	22.10.09	27.10.21	204	130.6	127	103	258
Meiringen (MER)	BE	06.10.11	12.10.21	590	138.6	138	96	258
Le Moléson (MLS)	FR	19.08.09	12.05.21	1'975	103.4	105	72	186

Tabelle 1: Teil 2

Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte aller NADAM-Stationen im Jahr 2024

Station	Kanton	Inbetriebnahme	Sondenwechsel NADAM 2020	Höhe [m.ü.M]	Jahresmittelwert	Häufigster Wert [nSv/h]	Minimum	Maximum
Mosen (MOA)	LU	19.01.18	13.08.21	452	95.1	93	74	203
Möhlin (MOE)	AG	09.09.10	09.06.21	341	109.2	108	85	201
Mühleberg (MUB)	BE	15.10.09	08.06.21	481	104.1	103	79	197
Napf (NAP)	BE	05.11.09	10.06.21	1'405	97.9	99	69	192
Neuchâtel (NEU)	NE	10.12.09	21.09.21	485	90.2	89	71	174
Oron (ORO)	VD	29.02.12	04.06.21	828	103.3	101	82	305
Locarno-Monti (OTL)	TI	22.10.09	22.11.21	368	149.8	146	122	237
Payerne (PAY)	VD	13.08.09	28.09.20	490	101.2	100	79	200
Piotta (PIO)	TI	29.10.09	16.06.22	990	132.8	132	93	243
Plaffeien (PLF)	FR	14.08.09	13.07.22	1'043	99.8	99	76	208
Paul Scherrer Institut (PSI)	AG	27.07.11	23.06.21	335	91.2	90	61	239
Pully (PUY)	VD	23.09.09	22.10.21	456	112.1	110	91	249
Zürich-Affoltern (REH)	ZH	13.11.09	26.04.21	444	97.9	96	78	202
Poschiavo-Robbia (ROB)	GR	07.10.09	11.11.21	1'079	171.4	157	124	331
Rünenberg (RUE)	BL	20.11.09	07.10.21	612	95	94	75	204
Säntis (SAE)	AI	11.11.09	20.10.21	2'503	110.5	111	86	169
Samedan (SAM)	GR	25.08.09	24.06.21	1'710	139.8	150	81	256
San Bernardino (SBE)	GR	29.10.09	06.07.21	1'640	135.4	150	73	227
Stabio (SBO)	TI	21.10.09	25.08.22	352	131.3	127	89	245
Scuol (SCU)	GR	27.08.09	10.06.21	1'305	114.7	116	76	286
Schaffhausen (SHA)	SH	04.12.09	26.08.21	439	96.2	95	79	183
Sion (SIO)	VS	10.09.09	10.11.21	482	116.8	115	86	236
Zürich-Fluntern (SMA)	ZH	24.11.09	04.11.21	557	104.4	102	83	188
Santa Maria (SMM)	GR	15.12.11	01.07.21	1'385	145.1	144	100	293
St. Gallen (STG)	SG	12.11.09	07.09.21	777	100.1	99	76	199
Aadorf/Tänikon (TAE)	TG	03.12.09	08.03.22	539	99.3	96	74	196
Thun (THU)	BE	29.01.18	15.10.21	570	83.3	82	63	228
Ulrichen (ULR)	VS	04.11.09	18.08.21	1'347	142.4	167	70	257
Vaduz (VAD)	FL	03.12.09	30.09.21	458	106.7	105	76	201
Vicosoprano (VIO)	GR	06.02.13	23.09.21	1'089	193.0	194	127	360
Visp (VIS)	VS	11.09.09	20.09.21	640	126.5	126	83	248
Villars-Tiercelin (VIT)	VD	29.01.18	26.08.22	859	112.9	111	91	206
Wädenswil (WAE)	ZH	02.12.09	11.05.22	487	104.6	103	78	277
Wynau (WYN)	BE	15.10.09	02.06.21	423	97.6	96	76	216
Zermatt (ZER)	VS	11.09.09	11.07.22	1'640	121.8	126	83	206

3.3

Aeroradiometrische Messungen

B. Bucher

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg

A. Stabilini

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI

L. Rybach

Institut für Geophysik, ETH Zürich, Zürich

C. Poretti

Nationale Alarmzentrale und Ereignisbewältigung NEOC, Guisanplatz 1B, Bern

S. Maillard

Kompetenzzentrum ABC-KAMIR, Spiez

Zusammenfassung

Bei den Messflügen im Mai/Juni und September 2024 wurde turnusgemäß die Umgebung der Kernkraftwerke Beznau (KKB) und Leibstadt (KKL) sowie des Paul Scherrer Instituts (PSI) und dem zentralen Zwischenlager (ZZL) der Zwischenlager Würenlingen AG (ZWILAG) abgedeckt. Die Ergebnisse lagen im Bereich der Messungen aus früheren Jahren. Ausserhalb der Werksareale konnten keine Messwerte detektiert werden, die auf den Betrieb der Anlagen zurückgeführt werden konnten. Neben den Standardmessprogrammen wurden die Messungen in der Westschweiz (Fleurier, Sainte-Croix, Ecuvillens, Concise, Gibloux) weitergeführt. In diesen Gebieten wurden Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse registriert. Im Juni nahm die Schweiz an einer internationalen Messübung in Tschechien teil.

Einleitung

Aeroradiometrische Messungen wurden in der Schweiz im Jahr 1986 mit einem geophysikalischen Projekt am Institut für Geophysik der ETH Zürich aufgenommen. Die grundlegende Methodik für Datenerfassung, Datenverarbeitung, Kalibrierung und Kartendarstellung wurden innerhalb dieses Projektes entwickelt (Schwarz 1991). Seit 1989 wird die Umgebung der schweizerischen Kernanlagen mindestens im Zweijahresrhythmus vermessen.

Im Jahre 1994 wurde die Aeroradiometrie in die Einsatzorganisation Radioaktivität des Bundes integriert. Als mögliche Einsatzfälle stehen KKW-Störfälle,

Transport- und Industrieunfälle mit radioaktivem Material, Abstürze von Satelliten mit Nuklearreaktoren und «Dirty Bombs» im Vordergrund. Die jährlichen Messprogramme werden durch die Fachgruppe Aeroradiometrie zusammengestellt, die sich aus Mitgliedern der beteiligten Stellen zusammensetzt. Der Einsatz erfolgt zivil unter der Regie der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) und militärisch unter der Regie des Kompetenzzentrums ABC-KAMIR der Armee. Zum Training der Teams, bestehend aus Operatoren (Messspezialisten an Bord), Piloten und Bodenpersonal, werden jährlich von der NAZ und dem Kompetenzzentrum ABC-KAMIR der Armee Übungsmessflüge durchgeführt.

Im Jahre 2010 (Bucher & Rybach, 2010) wurde mithilfe der Auswertung der Langzeitdaten die Nachweisgrenze der Messmethode ermittelt: Erhöhungen von $0.02 \mu\text{Sv}/\text{h}$ werden in 95 von 100 Fällen erkannt (Vertrauensbereich 95%).

Seit 2018 werden die Messungen mit einem Messsystem der Firma Mirion durchgeführt, welches durch die Rüstungsunternehmen-Aktiengesellschaft (RUAG) in den Super-Puma-Helikopter der Schweizer Luftwaffe integriert wurde. Insgesamt stehen vier Messsysteme für die Aufgaben der NAZ sowie des Kompetenzzentrums ABC-KAMIR der Armee zur Verfügung. Wartung und Unterhalt erfolgen durch die Lieferanten.

Im Rahmen einer 2024 am PSI abgeschlossenen Doktorarbeit (Breitenmoser, 2024) wurden die Grundlagen für die rechnerische Monte Carlo Kalibrierung der Aeroradiometriesysteme in der Schweiz geschaffen. Zudem wurde eine auf dieser Kalibrierung basierende Methodik für die Auswertung der gemessenen Spektren entwickelt. Damit sollen in der Zukunft quantitative Aussagen zu allen möglichen Radionukliden und Quellgeometrien ermöglicht werden. Die entsprechenden Arbeiten werden am PSI weitergeführt.

Messungen und Messresultate 2024

Während der Messübung unter der Leitung der NAZ im Zeitraum vom 29. Mai bis 7. Juni 2024 wurde turnusgemäß die Umgebung des KKB, des KKL, des ZZL und des PSI aeroradiometrisch gemessen. Aufgrund der Wetterbedingungen und des engen Zeitfensters konnte in diesem Jahr das Gebiet auf deutscher Seite nicht überflogen werden. Im Juni nahm ein Messteam auch an einer internationalen Messübung in Tschechien teil. Unter der Leitung des Kompetenzzentrums ABC-KAMIR wurden im September die Messungen in der Westschweiz mit Gebieten bei Fleurier, Sainte-Croix, Ecuvillens, Concise und Gibloux weitergeführt. Die detaillierten Ergebnisse sämtlicher Messungen sind in einem PSI-Bericht publiziert (Stabilini et al., 2025). Dieser ist auch auf der Webseite der Fachgruppe Aeroradiometrie unter <https://far.ensi.ch> verfügbar.

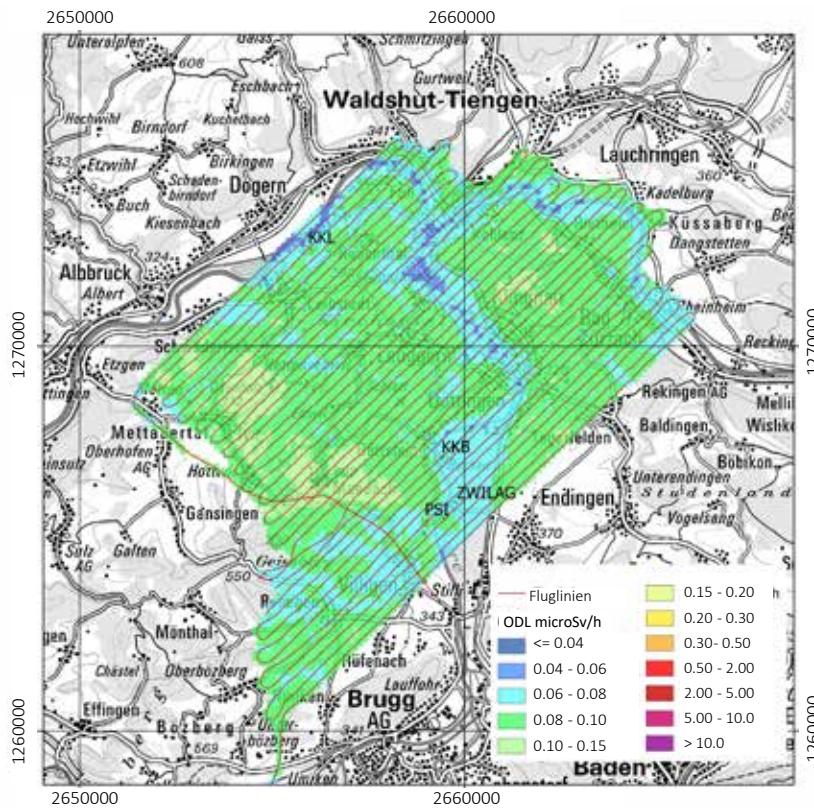
Die Messresultate im Messgebiet KKB, KKL, ZZL und PSI zeigten ein ähnliches Bild wie in vorangegangenen Messkampagnen. Im Bereich des KKB sind keine besonderen Werte der Ortsdosisleistung (Figur 1) zu erkennen. Das KKB mit seinem Druckwasserreaktor konnte aeroradiometrisch weder aufgrund der Ortsdosisleistung (Figur 1) noch aufgrund des Man Made Gross Count (MMGC) Verhältnisses (Figur 2) erkannt werden. Das MMGC-Verhältnis steht für den Quotienten der Zählraten im Energiebereich von $400 - 1'400$ Kilo-elektronenvolt (keV) und $1'400 - 3'000$ keV. Da die meisten Spaltprodukte Gammalinen im Energiebereich unterhalb von $1'400$ keV aufweisen, stellt das MMGC-Verhältnis ein empfindliches Instrument zur Lokalisierung künstlicher Radionuklide dar. Im Bereich des KKL sind ebenfalls keine besonderen Werte bei der Ortsdosisleistung wie auch beim MMGC-Verhältnis festzustellen. KKL befand sich zum Zeitpunkt der Messungen im Stillstand (29. Mai) bzw. am 30. Mai beim Hochfahren, wobei die Reaktorleistung beim Zeitpunkt der Messungen am 30. Mai unter 10% lag. Deshalb war bei den diesjährigen Messungen die ^{16}N -Strahlung nur schwach zu erkennen.

Das ZZL war weder bei der Ortsdosisleistung noch beim MMGC-Verhältnis zu erkennen. Hingegen wurde beim PSI-West im Bereich der Fortluftanlage im MMGC-Verhältnis ein deutliches Signal sichtbar. Dieses ist hauptsächlich auf Annihilationsstrahlung durch kurzlebige Positronenstrahler in der Fortluft zurückzuführen (Figur 3). Dabei handelt es sich um durch die Aufsichtsbehörde genehmigte und laufend überwachte Abgaben.

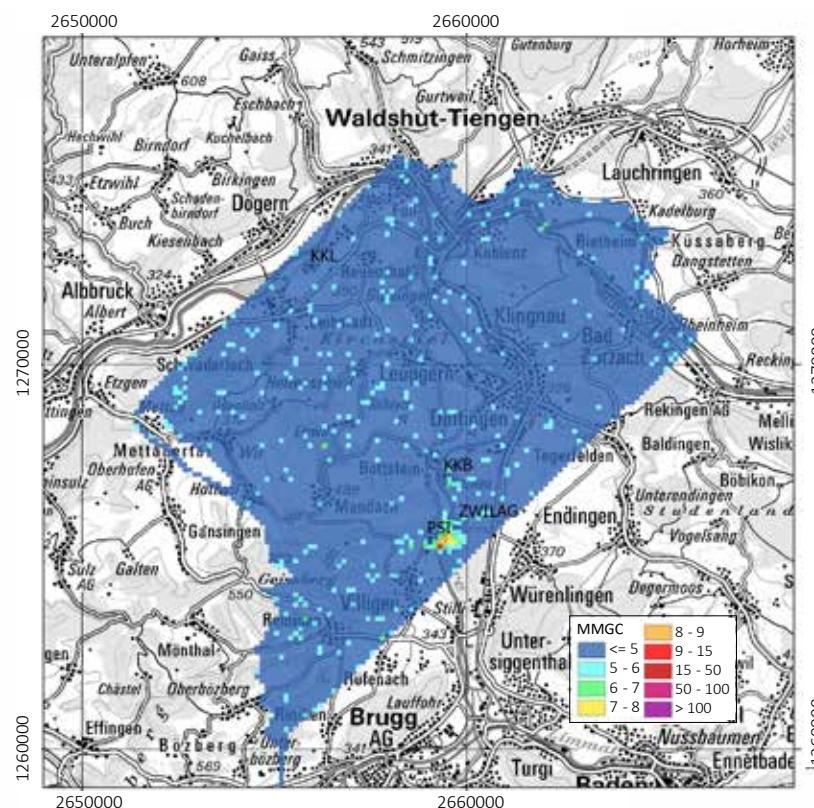
Andere erhöhte Werte waren nicht erkennbar. Weitere Unterschiede in der Ortsdosisleistung sind auf Einflüsse der Topographie, wie Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen.

Die Ergebnisse der übrigen Messgebiete zeigten vor allem Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse auf und entsprechen den erwarteten Werten. In den Figuren 4 und 5 sind die Ortsdosisleistungskarten der Messungen in der Westschweiz dargestellt.

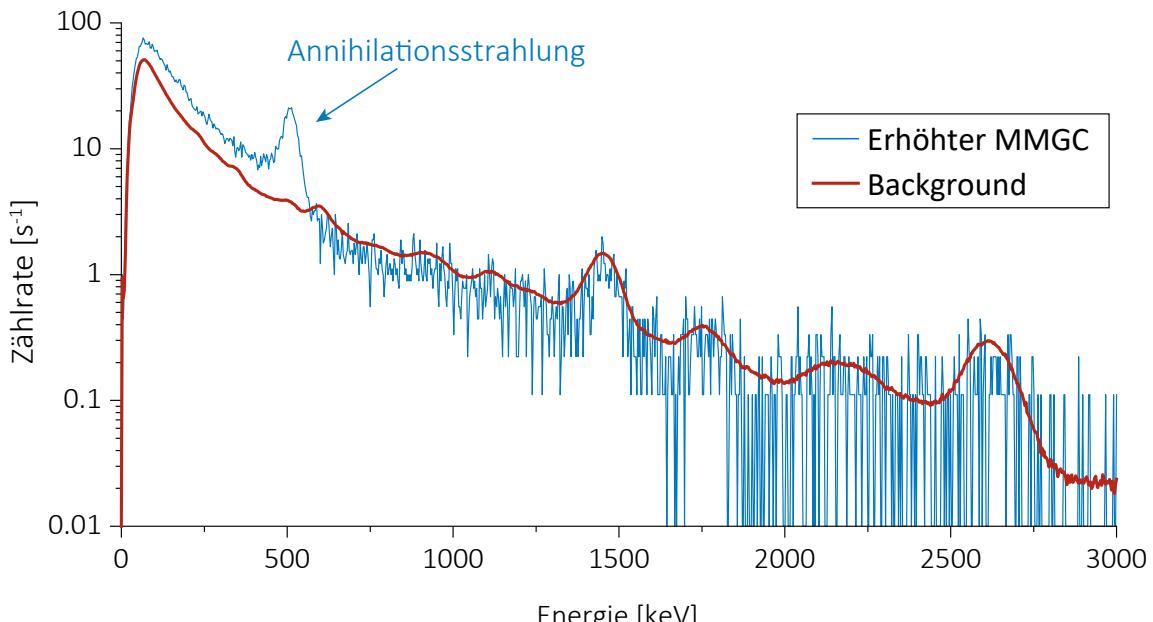




Figur 1:
Ortsdosisleistung $H^*(10)$ im Jahr 2024 im Messgebiet KKB/KKL/ZZL/PSI. Kartendaten PK200 © swisstopo.



Figur 2:
MMGC-Verhältnis im Jahr 2024 im Messgebiet KKB/KKL/ZZL/PSI. Kartendaten PK200 © swisstopo.



Figur 3:

Gemittelte Spektren im Bereich der erhöhten MMGC-Werte beim PSI-West und in der weiteren Umgebung (Background).

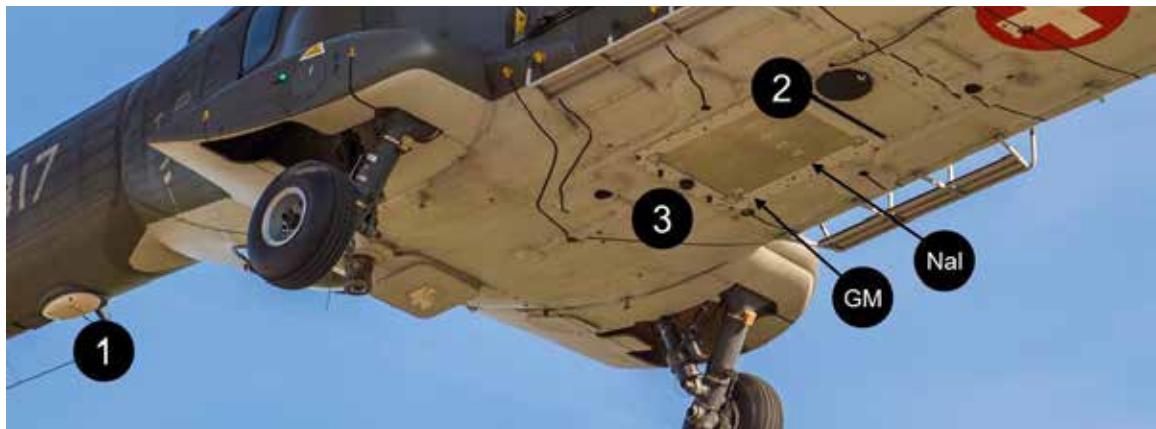


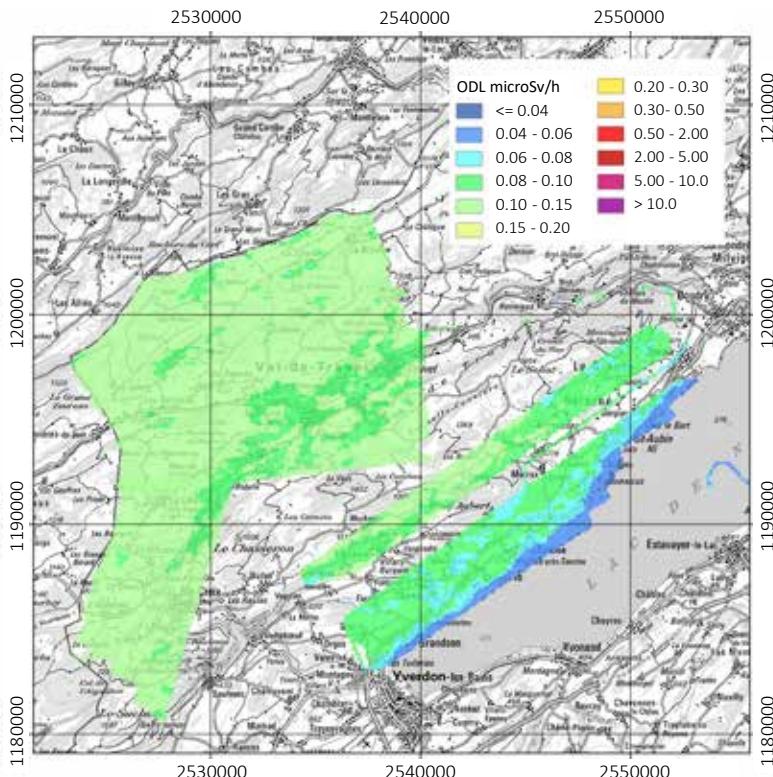
Abbildung 1:

Der für die Aeroradiometrie verwendete Detektor wird in der Bodenluke des Super Puma Helikopters montiert. 1: Radar-Höhenmeter; 2: Detektorbox mit Referenzmarkierungen; 3: Mobilfunkantenne; GM: Geiger-Müller Zählrohr; Nal: Anorganischer Szintillationsdetektor.

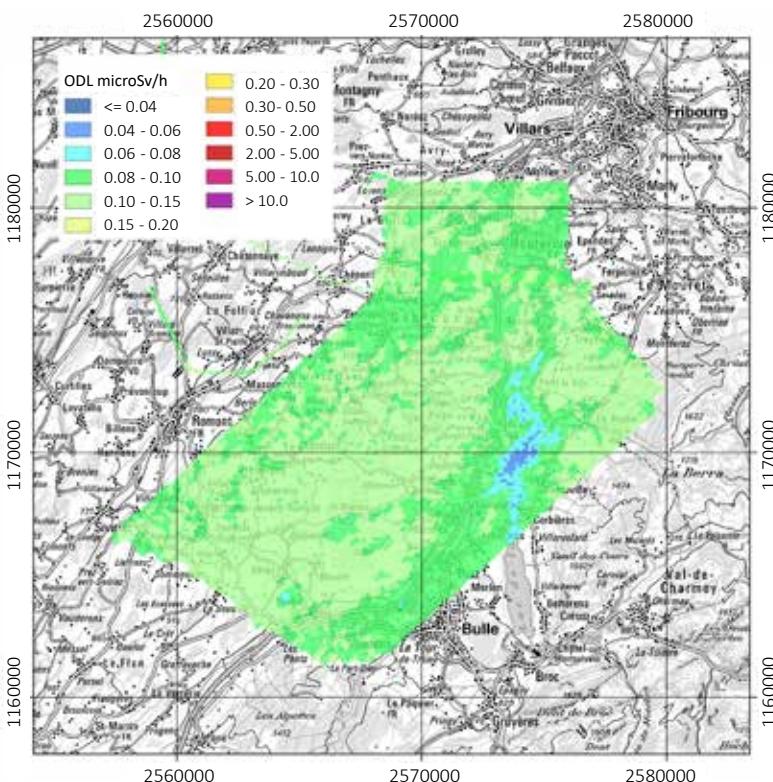


Abbildung 2: Operateur-Konsole des Aeroradiometriesystems.

1: Bildschirme der Bedienkonsole; 2: Bildschirm (gespiegelt auf Bildschirm im Cockpit); 3: Bedienfeld mit Schaltern für Stromversorgung, Beleuchtung und Kommunikation sowie Schnittstellen für den Datentransfer.



Figur 4:
Ortsdosisleistung 2024 $H^*(10)$ in den Messgebieten Fleurier, Sainte-Croix und Concise. Kartendaten PK200 © swisstopo.



Figur 5:
Ortsdosisleistung $H^*(10)$ im Jahr 2024 in den Messgebieten Ecuvillens und Gibloux. Kartendaten PK200 © swisstopo.

Literatur

- Schwarz, G. F., 1991: Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 23, Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Breitenmoser, D., 2024: Towards Monte Carlo Based Full Spectrum Modelling of Airborne Gamma-Ray Spectrometry Systems. Doctoral Thesis. ETH Zurich.
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000694094>.



- Bucher, B., Rybach, L., 2010: Flächendeckende Langzeitanalyse der Strahlung in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen mit Hilfe der Aeroradiometrie, in: Natürliche und künstliche Radionuklide in unserer Umwelt, 42. Jahrestagung des Fachverbands für Strahlenschutz e.V., FS-2010-153-T, ISSN 1013-4506, TÜV Media GmbH, Köln.
- Stabilini, A., Breitenmoser, D., Geser, F., Bucher, B., Rybach, L., Poretti, C., Maillard, S., Hess, A., Kasperek, M., Scharding G., Mayer, S., 2025: Aeroradiometric Measurements in the Framework of the Swiss ARM24 and International AGC24 Exercises. PSI Bericht Nr. 25-01. DOI:
<https://doi.org/10.55402/psi:68900>.





Environnement

4

Umwelt

- Aérosols et précipitations
 - Uranet Aero
- Surveillance de l'air avec des avions militaires
 - Systèmes aquatiques
 - Uranet Aqua
 - Tritium dans l'Aar et le Rhin
 - Sols et herbes
- Aerosol und Niederschlag
 - Uranet Aero
- Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen
 - Aquatische Systeme
 - Uranet Aqua
 - Tritium in Aare und Rhein
 - Boden und Gras

2024

4.1

Radioaktivität in der Atmosphäre (Aerosol und Niederschlag)

P. Steinmann, J. Beuret, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, S. Estier

Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag wies 2024 keine erhöhten Werte auf, welche die Gesundheit der Bevölkerung gefährdet hätten. In der Atmosphäre dominiert die natürliche Radioaktivität. Dank der hohen Empfindlichkeit der verwendeten Messmethoden konnten aber auch kleinste Spuren künstlicher Radionuklide auf den Aerosolpartikeln nachgewiesen werden. Im Niederschlag wurden 2024 keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen, mit Ausnahme von Tritium und sporadischen Spuren von ^{137}Cs . Im Tessin wurde - wie üblich - in den Wintermonaten etwas mehr ^{137}Cs in der Luft gemessen. In der unmittelbaren Umgebung von Industriebetrieben, die Tritium verarbeiten, erreichten die ^3H Konzentrationen im Regenwasser maximal 4% des Immissionsgrenzwertes der StSV für öffentlich zugängliche Gewässer.

Luft

Probenahme und Messung

Für die Spurenmessung von Radioaktivität in der Luft sammelt das BAG-Aerosolpartikel mit Hochvolumen-Luftfilter (High-Volume-Sampler, HVS) an 6 Stationen in der Schweiz (siehe Tabelle 1). Die dort installierten Geräte filtrieren fortlaufend, je nach Station, 80'000 m³ bis 150'000 m³ Außenluft pro Woche. Die Stationsbetreuer und -betreuerinnen vor Ort wechseln die Filter im Routinebetrieb wöchentlich und senden sie zur Analyse ans BAG. Die 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 zeitnah veröffentlicht, auf www.radenviro.ch, <http://www.bag.admin.ch/ura-hvs-de> und auch auf map.geo.admin.ch (Karte «Radioaktivität in der Atmosphäre» suchen). 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 stand für die Überwachung der freien Atmosphäre in der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch. Dieses Gerät wurde im September 2023 abgebaut und wird im Verlauf dieses Jahres durch einen HVS ersetzt. Die Filter der MV-Sammler wer-



Radenviro



Ura HVS



Map Geo Admin

Tabelle 1:*HVS-Stationen des BAG*

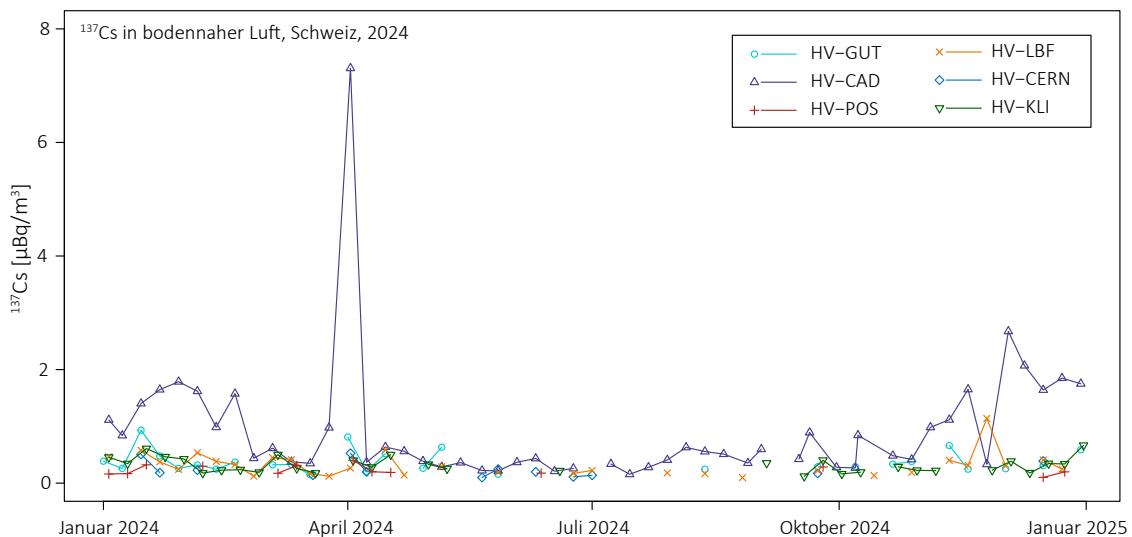
Station	H.ü.M.	Gemeinde	Umgebung	Bemerkung
CAD	203 m	Cadenazzo TI	Landwirtschaft	Referenzstation für die Alpensüdseite (Agroscope Forschungsstation)
CERN	428 m	Meyrin GE	Landwirtschaft, Stadtnähe, CERN	zur Erfassung eventueller Abgaben aus den CERN Beschleunigern
GUT	440 m	Güttingen TG	Landwirtschaft, 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)

den wöchentlich gewechselt und als Monatsprobe (4 - 5 Filter) gammaspektrometrisch gemessen. Im Jahr 2024 hat das BAG zudem tägliche PM-10 Filter ausgemessen, die vom Stadtlabor in Bern zur Verfügung gestellt wurden.

Künstliche Radioisotope in der Luft

Das einzige regelmässig in den Spurenmessungen nachgewiesene künstliche Radioisotop in der Luft war wie in den Vorjahren Cäsium-137 (^{137}Cs). Von den 311 gemessenen Hochvolumenfiltern zeigten 167 einen kleinen ^{137}Cs -Peak. ^{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 (fast immer kleiner als

1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Etwas höhere Werte wurden 2024 wie jedes Jahr in den Wintermonaten bei der Station Cadenazzo gemessen (siehe Figur 1). Zu den erhöhten ^{137}Cs Konzentrationen im Winterhalbjahr tragen 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 und des Holzes im Kanton Tessin nach dem Unfall von Tschernobyl erklärt die höheren Werte der Station Cadenazzo. In der Woche vom 25. März bis am 2. April wurde dort ein vergleichsweise hoher Wert von 7.2 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ gemessen. In dieser Woche herrschte eine kräftige Südwestströmung, teilweise mit Saharastaub, und starker Südföhn (MeteoSchweiz Klimabulletin März). Als Ursache für den etwas höheren ^{137}Cs -Wert in Cadenazzo sind daher wahr-

**Figur 1 :** ^{137}Cs Konzentrationen in der Luft für das Jahr 2024.

scheinlich Aufwirbelungen von lokalem oder regionalem Staub aus den Böden. Ein Zusammenhang mit dem Saharastaub ist nicht ersichtlich, da bei den Stationen CERN und Göttingen das ^{137}Cs nur minim erhöht war, obwohl dort, zu erkennen an den erhöhten ^{40}K -Werten, ebenfalls viel Staub in der Luft war (siehe auch <https://www.radenviro.ch/sahara>). Selbst der höchste gemessenen Wert für ^{137}Cs ist mehr als eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert von $8.5 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

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 ^7Be und ^{22}Na in der oberen Atmosphäre durch die kosmische Strahlung erzeugt. Künstliches ^{24}Na kann in Beschleunigern erzeugt werden, wie sie am CERN in Genf oder am PSI in Villigen im Einsatz stehen. Bei den Stationen HVS Klingnau (in rund 6 km Entfernung vom PSI) und HVS CERN konnten im Berichtsjahr 9 Mal, bzw. 5 Mal Spuren von ^{24}Na nachgewiesen werden (zwischen 20 und $77 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{24}Na kann die Nachweissgrenze variieren und betrug 2024 bei knapp 7% der Messungen mehr als $1'000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Die gemessenen ^{24}Na Werte und die Nachweissgrenzen insgesamt liegen aber stets um Größenordnungen unterhalb des Immissionsgrenzwertes von $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Geringste Spuren von Jod-131 (^{131}I) tauchten 2024 in 9 HVS Filtern der Station beim CERN auf (Maximum $1.4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Ursache ist das Auswechseln von bestrahlten Targets bei der Installation ISOLDE am CERN. Bei diesen Arbeiten können kleinste Mengen von Radioisotopen (wie z.B. ^{131}I) in die Umwelt gelangen. Gesundheitlich sind diese Konzentrationen, eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert, nicht relevant.

Plutonium-Isotope wurden 2024 an zwei Sammelproben von HVS-Filtern der Station Liebefeld bestimmt, eine Probe mit Filtern vom Winter (Okt. 2023 - März 2024) und eine Probe mit Filtern vom Sommer (April - Sept. 2024). Die Summe der Plutoniumisotope ^{239}Pu und ^{240}Pu ergab $1.2 \pm 10\%$ nano-Becquerel pro m^3 Luft (nBq/m^3) im Winter und $1.7 \pm 10\%$ nBq/m^3 im Sommer. Zusätzliche Proben von den Stationen CERN, Klingnau und Posieux ergaben

für Oktober 2023 bis September 2024 zwischen 1.1 und $1.7 \text{ nBq}/\text{m}^3$. Die gemessenen Konzentrationen der künstlichen Alphastrahler sind sehr tief und liegen wie beim ^{137}Cs eine Million Mal unter dem Immissionsgrenzwert.

In den MV-Filtern (Bern-Morgartenstrasse, Kernkraftwerk Beznau und PSI) konnten keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen werden. Resultate der MV-Filter in der Umgebung der Kernkraftwerke werden im Kapitel 8.5 näher besprochen.

Natürliche Radioisotope in der Luft

Die 2024 auf den HVS Filtern gemessenen Radioisotope waren fast ausschliesslich natürlicher Herkunft. Vorherrschend waren das Radonfolgeprodukt Blei-210 (^{210}Pb ; Halbwertszeit 21 Jahre) und das durch die kosmische Strahlung in hohen Schichten der Atmosphäre gebildete Beryllium-7 (^7Be ; Halbwertszeit 53 Tage).

Neunzig Prozent der 2024 gemessenen ^{210}Pb -Konzentrationen lagen zwischen 0.20 und $1.28 \text{ mBq}/\text{m}^3$. Dies ist ein ähnlicher Bereich, wie bei der hier als Referenz verwendeten Periode 2013 - 2018 (Tabelle 2). Auffallend ist (wie in den Vorjahren) dass die Werte der Station Cadenazzo deutlich höher sind als die Werte der Stationen nördlich der Alpen: im Durchschnitt $0.79 \text{ mBq}/\text{m}^3$ für Cadenazzo gegenüber $0.49 \text{ mBq}/\text{m}^3$ für die anderen 5 Stationen.

Der 5% - Perzentil und der 95% - Perzentil betrugen für die ^7Be Aktivitätskonzentrationen in der Luft 1.3 und $5.0 \text{ mBq}/\text{m}^3$, das heisst, 90% aller gemessenen Konzentrationen liegen zwischen diesen beiden Werten. Der Mittelwert ($2.9 \text{ mBq}/\text{m}^3$) und der Median ($2.8 \text{ mBq}/\text{m}^3$) waren deutlich tiefer als im letzten Jahr ($3.7 \text{ mBq}/\text{m}^3$ bzw. $3.5 \text{ mBq}/\text{m}^3$). Dies entspricht den Werten für ein Jahr mit schwacher kosmischer Strahlung (siehe <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.03.012>) und ist etwas unter dem langjährigen Mittelwert (Tabelle 2). Ursache für die schwache kosmische Strahlung ist die Abschirmung durch das aufgrund einer erhöhten Sonnenaktivität verstärkte Magnetfeld der Sonne. Die Figur 2 zeigt für jeden Monat die Verteilung der ^7Be Konzentrationen aller Stationen

Tabelle 2:

Statistik der 2024 in der Schweiz gemessenen ^{210}Pb und ^7Be Aktivitäten in bodennaher Luft sowie der Referenz von 2013-2018. Aktivitätsangaben in mBq/m^3 .

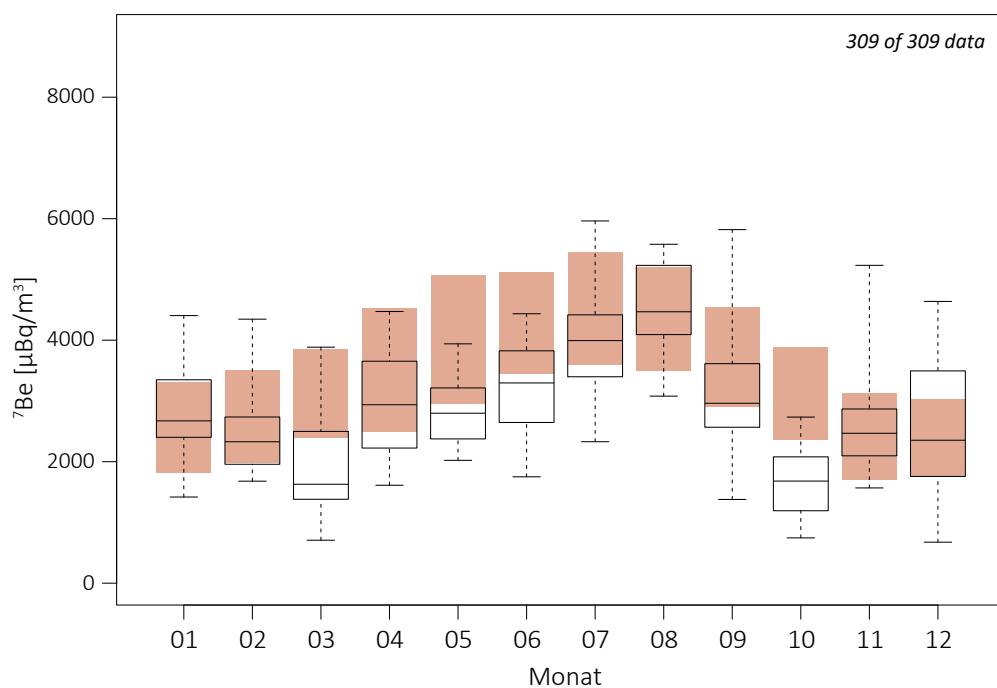
	^{210}Pb		^7Be	
	Referenz	2024	Referenz	2024
5% - 95%-Perzentil	0.18 - 1.18	0.20 - 1.28	1.48 - 6.40	1.32 - 4.99
Min - Max	0.07 - 2.76	0.12 - 1.97	0.15 - 8.74	0.67 - 5.96
Mittelwert / Median	0.57 / 0.49	0.54 / 0.44	3.66 / 3.50	2.92 / 2.76
Anzahl Messwerte	1'864	309	1'864	309

im Vergleich mit dem langjährigen Jahresverlauf als Boxplot. Der Jahresverlauf der ${}^7\text{Be}$ Konzentrationen in der Luft widerspiegelt das Wettergeschehen, insbesondere die konvektive vertikale Durchmischung der Troposphäre an warmen Sommertagen, wobei ${}^7\text{Be}$ reiche Luft aus der obersten Troposphäre an den Boden gelangt. Weitere Einflüsse auf die ${}^7\text{Be}$ Konzentration sind Niederschlag (Auswaschen von ${}^7\text{Be}$) und die kosmische Strahlung (Produktion von ${}^7\text{Be}$). Die kosmische Strahlung (IGY Neutron Monitor Jungfraujoch, cosray.unibe.ch) war 2024 insgesamt 11% tiefer als 2020, dem Beginn des Sonnenzyklus 25. Besonders tief (minus 14% gegenüber 2020) war die kosmische Strahlung im letzten Jahresdrittel, einer Phase mit starken Sonneneruptionen. Figur 2 zeigt den Verlauf der ${}^7\text{Be}$ -Monatsmittelwerte mit den langjährigen Monatsmitteln. Die Werte sind wie erwähnt aufgrund der starken Sonnenaktivität insgesamt tiefer. Besonders stark nach unten weichen sie in den Monaten März, Mai und Oktober ab. Dies waren Monate mit starken Sonneneruptionen und überdurchschnittlich viel Niederschlag (Klimabulletin, MeteoSchweiz), beides Faktoren, die als Erklärung in Frage kommen. Die Ursache für die ebenfalls tiefen Werte im Juni sind weniger klar ersichtlich. Die eher moderaten Temperaturen (schwächere Konvektion) und die Sonnenstürme im Vormonat mögen dazu beigetragen haben.

Die höchsten ${}^7\text{Be}$ Konzentrationen sind erwartungsgemäss im Juli und August aufgetreten. Das überdurchschnittlich trockene und warme Wetter in diesen Monaten (Klimabulletin, MeteoSchweiz) führte zu stärkerer Konvektion bei fehlendem Auswaschen des Aerosols durch den Regen und damit zu hohen ${}^7\text{Be}$ -Konzentrationen.

Neben ${}^7\text{Be}$ war in kleinsten Spuren von meist weniger als einem Mikrobecquerel pro Kubikmeter das ebenfalls kosmogene Natrium-22 (${}^{22}\text{Na}$) nachweisbar.

Als weiteres natürliches Radioisotop findet sich in den HVS Filtern auch ${}^{40}\text{K}$. Die Konzentrationen lagen 2024 meist im typischen Bereich von knapp 5 bis 15 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Bei der stadtnahen Station Liebefeld tauchten die höchsten ${}^{40}\text{K}$ Wert (53 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) in den Wochen mit Sylvester/Neujahr beziehungsweise mit dem Ersten August auf. Ursache dafür: die Feuerwerke; siehe dazu auch <https://www.radenviro.ch/feuerwerk>. Hohe Werte zeigten mehrere Stationen auch für die letzte Märzwoche, der bereits erwähnten Phase mit kräftiger Südwestströmung inklusive Saharastaub.



Figur 2:

Boxplot der monatlichen ${}^7\text{Be}$ Konzentrationen bei allen HVS Stationen im Jahr 2024. 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 (siehe <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.03.012>)

Niederschlag

Messungen von Gammastrahlern

Im Berichtsjahr 2024 wurde an folgenden Sammelstationen kontinuierlich Niederschlag gesammelt: Umgebung der Kernkraftwerke Mühleberg, Leibstadt, Gösgen und Beznau, Umgebung PSI/ZWILAG sowie Posieux FR, Güttingen TG, Cadenazzo TI, Cernier NE und Davos GR. Von diesen Stationen wird die jeweils in einem Monat gesammelte Probe gammaspektrometrisch untersucht. Für die natürlichen Radioisotope ^7Be und ^{210}Pb waren die Messresultate in der Größenordnung ähnlich wie im Vorjahr (^7Be : 0.1 - 1.8 Bq/l, Mittelwert 0.6 Bq/l; ^{210}Pb : 0.01 - 0.23 Bq/l, Mittelwert 0.05 Bq/l). Rechnen wir die Radionuklid-Aktivität als Depositionsfluss pro Quadratmeter und Tag (mBq/m²/d) so sind die Werte im üblichen Bereich, d.h. für ^{210}Pb zwischen 3 und 83 mBq/m²/d (5% bis 95% Perzentil) mit einem Mittelwert von 24 mBq/m²/d und für ^7Be 40 - 842 mBq/m²/d mit einem Mittelwert von 248 mBq/m²/d.

In knapp 5% der Niederschlagsproben war ^{137}Cs messbar, mit Aktivitätskonzentrationen zwischen 0.0001 und 0.0004 Bq/l. Ein gesundheitliches Risiko ist bei diesen sehr tiefen Werten 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 Sammelproben von Niederschlag der Referenzstationen Posieux, Güttingen, Cadenazzo sowie bei den Stationen Basel-Binningen und La Chaux-de-Fonds lagen die Tritiumkonzentrationen nie über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l.

Das gleiche Bild zeichnen die Ergebnisse der Tritium-Messungen an Regenproben aus der Umgebung der Kernkraftwerke KKG, KKL und KKM: Kein Wert lag über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l. Bei den Niederschlagssammelstationen PSI, KKB und Zwilag ergaben sich 2024 wie gewohnt etwas häufiger Werte über der Nachweisgrenze. Bei rund der Hälfte der Proben war dies der Fall. Drei Monatsmittel über 20 Bq/l traten bei den Station KKB und PSI (Maximum: 36.1 ± 3.6 Bq/l). Die Jahresdurchschnitte der drei Stationen PSI, ZWILAG und KKB betrugen 5, 3 und 11 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 Niederwangen BE, Root LU und Teufen AR enthielt das Regenwasser zwischen 5 und 786 Bq/l Tritium mit einem Mittelwert von 74 Bq/l. Die Höchstkonzentration entspricht rund 4%, der Mittelwert 0.4% des Immissionsgrenzwertes für öffentlich zugängliche Gewässer, der in der StSV festgehalten ist (20'000 Bq/l). Der Mittelwert ist der gleiche wie im Vorjahr. Die Tritium-Messungen im Regenwasser und zusätzlich in der Luftfeuchtigkeit in der Umgebung der Tritium-verarbeitenden Industrien werden ausführlich im Kapitel 9.3 besprochen.



Sahara



Cosmogenic ^7Be and ^{22}Na in ground level air in Switzerland (1994–2011)



IGY Neutron Monitor
Jungfraujoch



Feuerwerk



Cadenazzo / TI



Göttingen / TG



CERN / GE



Klingnau / AG



Liebefeld / BE



Posieux / FR

Figur 3 :
Standorte der HVS-Stationen

4.2

URAnet aero

D. Lienhard, P. Beuret, J. Beuret, S. Estier, M. Müller, P. Steinmann

Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die 15 Aerosolmonitore und fünf ^{131}I Monitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2024 keine erhöhte künstliche Radioaktivität in der Umgebungsluft festgestellt. In den Spektren konnten keine Peaks nachgewiesen werden, die eindeutig einem künstlichen Radionuklid zugeordnet werden können. Auch die Konzentration von gasförmigem ^{131}I blieb unterhalb der Nachweisgrenze von ca. 90 mBq/m³. 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. Ein Vergleich der 12h-Mittelwerte von ^{214}Pb aus der Uran-Radium-Zerfallskette und ^{212}Pb aus der Thorium-Zerfallskette zeigt, dass in den Wintermonaten vergleichsweise wenig ^{212}Pb in der Luft vorhanden ist, übereinstimmend mit der Beobachtung im vorangegangenen Jahr. Weiter zeigt sich, dass diese Radionuklide während Perioden mit geringer feuchter Deposition und atmosphärischer Durchmischung mit den Modulationen der Ortsdosisleistung korrelieren.

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 kontinuierlich die Aktivitätskonzentrationen der auf Luftpartikeln gebundenen Radionuklide messen und die Messwerte per Mobilfunknetz übertragen. Fünf Messstandorte verfügen zusätzlich über einen ^{131}I Monitor, welche die ^{131}I Konzentrationen in der Gasphase der Umgebungsluft vermessen.

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. Die eingesetzte Messtechnik erlaubt die Identifizierung und Quantifizierung von Radionukliden mit den von internationalen Empfehlungen geforderten Nachweisgrenzen. Da der Luftdurchsatz der Aerosolmonitore von URAnet aero mit 16 bis 18 m³/h viel niedriger ist als derjenige von Hochvolumensammlern (ca. 500 m³/h bei 1 Woche Sammelzeit, siehe Kapitel 4.1), liegen die Nachweisgrenzen der Aerosolmonitore zwar höher, bewegen sich aber immer noch weit unter den gesetzlichen Immissionsgrenzwerten.

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. Abbildung 1 zeigt die Standorte der URAnet aero Stationen (Aerosolmonitore und ^{131}I Monitore) und URAnet aqua Stationen (siehe Kapitel 4.5) auf der Schweizer Karte.

Die Messgeräte sind eingebunden in das SwissMetNet der MeteoSchweiz. Innerhalb des SwissMetNet werden die Messwerte verarbeitet, im Data Warehouse von MeteoSchweiz gespeichert und gleichzeitig auf die Server der Sektion Umweltradioaktivität transferiert, von wo aus sie für die Analyse, Visualisierung und gegebenenfalls eine Alarmvalidierung verfügbar gemacht werden.

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



Messtechnik

Aerosolmonitore:

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 der 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 Bleigehäuse gedrückt, während ein O-Ring die Lücke zum unteren Bleigehäuse luftdicht verschließt. Ein Seitenkanalverdichter pumpt Umgebungsluft mit einer Durchflussrate von 16 bis 18 m³/h via einen Ansaugkopf mit einem grobmaschigen 1mm-Gitter – um das Ansaugen von Insekten oder Schneeflocken zu verhindern – durch das Glasfaser-Filterband. Nach Ablauf der Bestaubungszeit von 12h wird der Messstellenring durch die von einem Kompressor generierte Druckluft gegen den O-Ring nach unten gepresst, wodurch das Filterband frei bewegt und dadurch genügend weit vorgeschoben werden kann, so dass sich die bereits bestaubte Stelle ausserhalb des Bleigehäuses befindet und eine frische Filterfläche für die nächsten 12h bestaubt werden kann. Der Teil des Bleigehäuses oberhalb des Messstellenrings verfügt über einen Einlass für die Luftansauglinie, während der untere Teil einen Ausgang für den Luftabzug hat.

Nach jedem Filterbandvorschub beginnt die kontinuierliche Akquisition des Gamma-Spektrums zwischen ca. 30 und 2'000 keV. Die Auswertung des Spektrums wird 20 Minuten nach Filterbandvorschub und danach alle 5 Minuten durchgeführt. Die eingesetzten Reinstgermanium-Kristalle erlauben die Aufnahme von hochauflösten Spektren mit Peak-Halbwertsbreiten zwischen 0.8 keV im niedrigen Energiebereich und 2.5 keV im hohen Energiebereich. Diese Peak-Halbwertsbreiten liegen somit nur unwesentlich höher als jene, die in einem Labor unter kontrollierten Bedingungen aufgenommen werden könnten, obwohl die Temperaturschwankungen der angesogenen Umgebungsluft und der Messkabine, während einer 12h-Bestaubungszeit den sensiblen Vorverstärker beeinflussen und damit die Energiekalibrierung verschieben können. Das Messsystem regelt die Energiekalibration anhand der Peaks der Radontöchter ²¹⁴Bi und ²¹⁴Pb und einer eingebauten schwachen ⁴⁰K Quelle automatisch nach.

Durch die hohe Auflösung gibt es wenige Überlappungen der einzelnen Peaks, was die eindeutige Zuordnung zu den verschiedenen Radionukliden vereinfacht. Die Peak-Fläche ist proportional zu der auf dem Filter abgelagerten Aktivität, womit unter Berücksichtigung des gefilterten Luftvolumens die Aktivitätskonzentration der Radionuklide in der Umgebungsluft berechnet werden kann. Bei jeder Auswertung werden die Spektren auf Grenzwertüberschreitungen geprüft.

Die Aerosolmonitore des Herstellers Thermo Fisher wurden mit Germaniumdetektoren und elektrischen

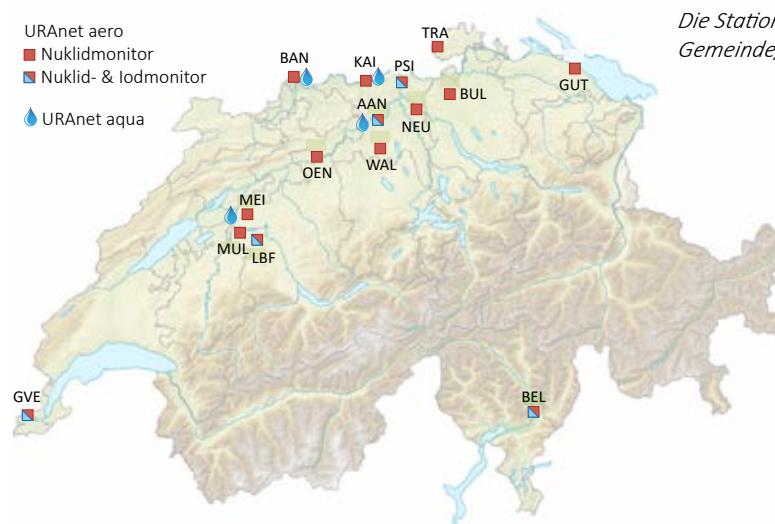


Abbildung 1 :
Standorte der 15 Aerosol- und fünf Iod-Monitore von URAnet aero.

Die Stationen sind jeweils mit einem Kürzel für die Gemeinde/Region bezeichnet und bedeuten:

- AAN: Aarau/AG,
- BAN: Basel/BS,
- BEL: Bellinzona/TI,
- BUL: Bülach/ZH,
- GUT: Güttingen/TG,
- GVE: Genf/GE,
- KAI: Kaisten/AG,
- LBF: Liebefeld/BE,
- MEI: Meikirch/BE,
- MUL: Mühlberg/BE,
- NEU: Neuenhof/AG,
- OEN: Oensingen/SO,
- PSI: Villigen/AG,
- TRA: Trasadingen/SH,
- WAL: Schmiedrued-Walde/AG.

Kühleinheiten der Firma Ortec geliefert. Um eine optimale Funktionsfähigkeit zu garantieren, muss der Germanium-Kristall auf sehr tiefe Temperaturen von unter -150°C gekühlt werden. Um diese Temperaturen zu erreichen, muss der Kristall mit einem Vakuum vor den Einflüssen der Umgebungstemperatur und deren Schwankungen geschützt werden. Die Sektion Umweltradioaktivität verfügt über eine geeignete Membranvakumpumpe um das Vakuum zu erneuern. Diese Vakuum-Erneuerung ist angezeigt, sobald sich Kondensation an der Aluminium-Kapsel des Detektors bildet. Zur Verstärkung des Vakuums und Verlängerung von dessen Haltbarkeit sind ein Zeolith-Molekularsieb und ein Palladium-oxid Getter in der Aluminium-Kapsel des Detektors eingebaut.

Auch zur Temperatur-Isolierung der Kontaktstelle zwischen der elektrischen Kühleinheit und dem Detektor ist ein Vakuum notwendig. Dieses Vakuum ist weniger stark, da es alleine durch ein weiteres Zeolith-Molekularsieb generiert wird. Mit der Zeit lässt die Adsorptions-Kapazität dieses Molekularsiebs nach. Dies ist einer der häufigsten Gründe für die Ausfälle der Messstationen.

Ohne Temperaturregulierung der Messkabine würde die hohe Wärmeproduktion des Seitenkanalverdichters rasch zu einer Überhitzung des Messgeräts führen und die Kristalle auch bei optimalem Vakuum letztlich zu stark aufwärmen. Vor allem in den Sommermonaten kann der Messbetrieb nur mit gut funktionierenden Klimageräten aufrechterhalten werden. Es werden regelmässige Wartungen der Klimageräte durchgeführt.

Im Jahr 2024 kam es zu einem mehrwöchigen Unterbruch des Transfers der Messwerte von der Station Bülach auf die Server der Sektion Umweltradioaktivität. Die von MeteoSchweiz zur Verfügung gestellte Hardware für diesen Transfer war defekt und die Beschaffung eines einwandfrei funktionierenden Ersatzes gestaltete sich mühsam.



Abbildung 2:

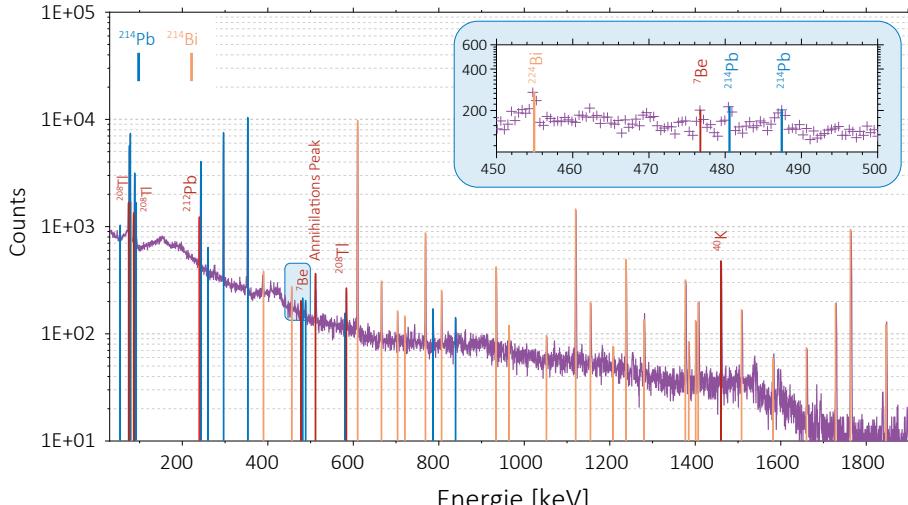
12h-Spektrum der Messstation Kaisten vom 9. Juni 2024 um 12:00 Uhr. Die Linien von ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallsstrecke sind orange und blau markiert, alle anderen rot. Der Bereich um die Linie von ^7Be bei 477.6 keV mit den naheliegenden Nebenlinien von ^{214}Pb ist vergrössert dargestellt. Die Auswertungs-Software konnte bei den beiden ^{214}Bi Linien von 469.8 keV und 474.4 keV noch keinen statistisch signifikanten Peak finden.

Die Aerosolmonitore wurden durch die URA weiterentwickelt und sind nun auch kompatibel mit den Germanium-detectoren der Firma Mirion. Aktuell sind die Stationen Kaisten, Aarau, Göttingen, Waltersholz, Neuenhof und Bülach mit Detectoren der Firma Mirion ausgerüstet. Sie weisen bislang eine höhere Beständigkeit gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen auf, was damit zusammenhängen könnte, dass die Kühleinheit direkt mit dem Detektor verbunden ist und keine Temperatur-Isolierung der Kontaktstelle benötigt. Zusätzlich ist durch die intelligente Temperaturregulierung der Geräte von Mirion der Energieverbrauch deutlich kleiner, obschon der Germanium-Kristall bei einer niedrigeren Temperatur als bei den Ortec-Geräten gehalten werden kann.

^{131}I -Monitore:

Die fünf ^{131}I Monitore werden nach einem ähnlichen Prinzip wie die Aerosolsammler betrieben. Bei einer Abgabe an die Umwelt durch ein Kernkraftwerk würde ^{131}I überwiegend in gasförmiger Form vorliegen und könnte somit nicht von einem Filter zurückgehalten werden. Aus diesem Grund sind die ^{131}I Monitore mit einer zylindrischen Kartusche ausgestattet, die mit AgNO_3 -Granulaten aufgefüllt wird, auf welche das ^{131}I adsorbiert. In der Mitte der zylindrischen Kartusche befindet sich ein Nal-Detektor, dessen Kanäle im Energiebereich von ca. 350 keV bis 380 keV gezielt nach der 364.49 keV-Linie von ^{131}I abgesucht werden. Aus der Zählrate und dem gefilterten Luftvolumen – bei den ^{131}I Monitoren ca. $10 \text{ m}^3/\text{h}$ – kann dann die Aktivitätskonzentration des ^{131}I in der Umgebungsluft berechnet werden. Der Nal-Detektor muss nicht gekühlt werden und ist weniger anfällig auf Schwankungen der Temperatur oder Luftfeuchtigkeit in der Messkabine.

Messresultate



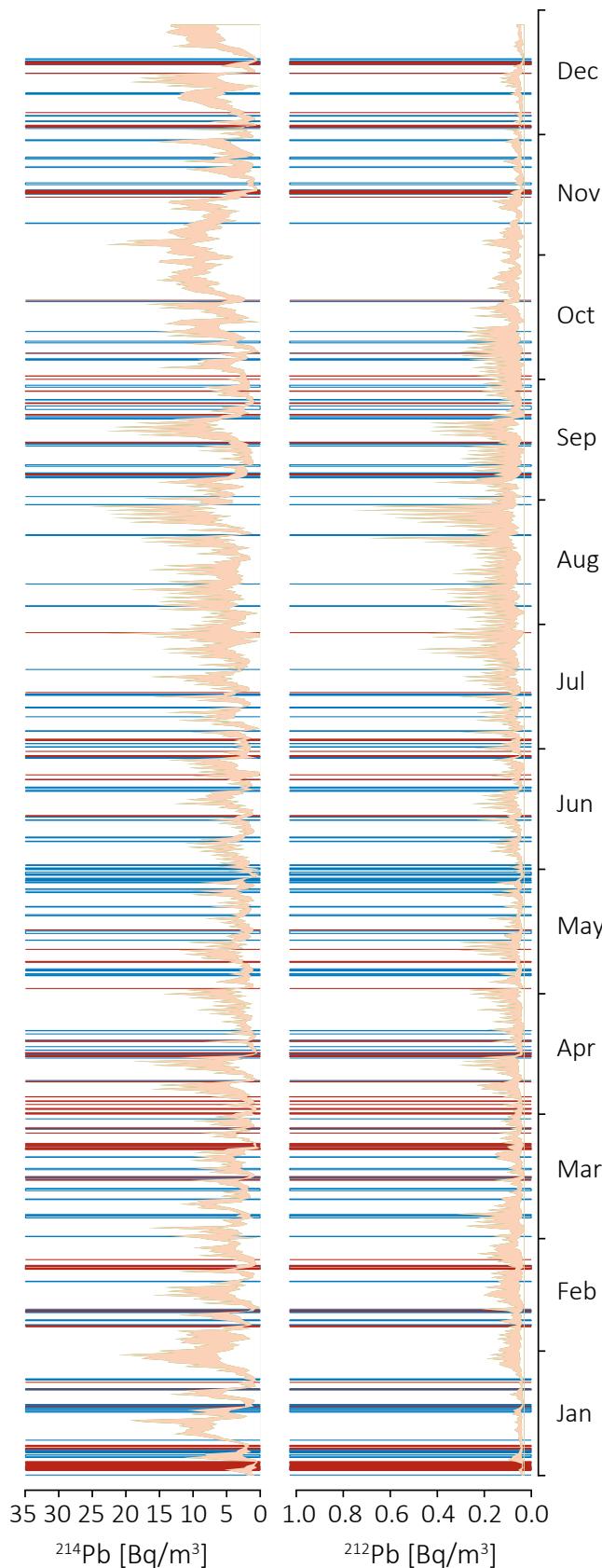


Abbildung 3 :
Bandbreite der Aktivitätskonzentrationen von ^{214}Pb und ^{212}Pb (12h-Mittelwerte) der URAnet aero Stationen auf der Alpennordseite. Markiert sind ebenfalls die Perioden mit Niederschlag (blau) und höheren Windgeschwindigkeiten (rot)

Abbildung 2 zeigt das Spektrum des Aerosolmonitors der Messstation in Kaisten am Ende der 12h-Bestaubungszeit vom 9. Juni 2024 um 12:00 Uhr. Die Linien von ^{214}Pb und ^{214}Bi und deren Compton-Kontinuen dominieren das Spektrum und den Untergrund. Die Auswertungs-Software identifizierte 13 Linien von ^{214}Pb und 29 Linien von ^{214}Bi . Weiter sind auch die Peaks von ^{212}Pb , ^{208}Tl , ^{40}K , ^7Be und der Annihilations-Peak im Spektrum zu finden. Die Hauptlinie von ^{212}Pb bei 238.6 keV befindet sich unmittelbar neben einer starken Linie von ^{214}Pb bei 242.0 keV und bedarf einer stabilen Regelung der Energiekalibration, um Schwierigkeiten durch eine Peak-Überlappung zu vermeiden. Die aus diesem Spektrum abgeleiteten Aktivitätskonzentrationen (12h-Mittelwerte) betragen :

- 3.92 (± 0.48) Bq/m^3 für ^{214}Pb ,
- 3.62 (± 0.24) Bq/m^3 für ^{214}Bi ,
- 19.51 (± 2.05) mBq/m^3 für ^{212}Pb ,
- 6.03 (± 0.64) mBq/m^3 für ^{208}Tl
- 5.47 (± 1.70) mBq/m^3 für ^7Be .

Der vergrösserte Ausschnitt in Abbildung 2 zeigt den Energiebereich um die Linie von ^7Be bei 477.6 keV. Der Nachweis von ^7Be im Spektrum ist noch anspruchsvoller als jener des oben beschriebenen ^{212}Pb , da sowohl die Linie von ^{214}Pb bei 480.4 keV als auch die Linie von ^{214}Bi bei 474.4 keV (in diesem Spektrum nicht signifikant) mit dem ^7Be -Peak interferieren können. Abhängig vom Untergrund des Spektrums liegt die Nachweigrenze von ^7Be nach 12h Messzeit in der Regel nahe bei den tatsächlichen Aktivitätskonzentrationen in der Umgebungsluft, d.h. in der Region von wenigen mBq/m^3 . Der gelegentliche Nachweis von ^7Be und die oben erwähnte präzise Vermessung der Hauptlinie von ^{212}Pb bestätigen die hohe Qualität der Spektren trotz der teilweise anspruchsvollen Bedingungen in den Messkabinen.

Die orangefarbene Fläche in Abbildung 3 zeigt den Zeitverlauf des Wertebereichs der Aktivitätskonzentrationen von ^{212}Pb und ^{214}Pb (jeweils 12h-Mittelwerte) über das Jahr 2024 für alle Stationen der Alpennordseite, d.h. sie deckt den ganzen Bereich zwischen dem höchsten und dem niedrigsten von den Messstationen gemessenen Wert zu jedem Zeitpunkt ab. Ebenfalls eingezeichnet sind Perioden mit Niederschlag und höheren Windgeschwindigkeiten. Obwohl diese meteorologischen Parameter einem Durchschnitt einer Reihe von Messstationen der MeteoSchweiz auf

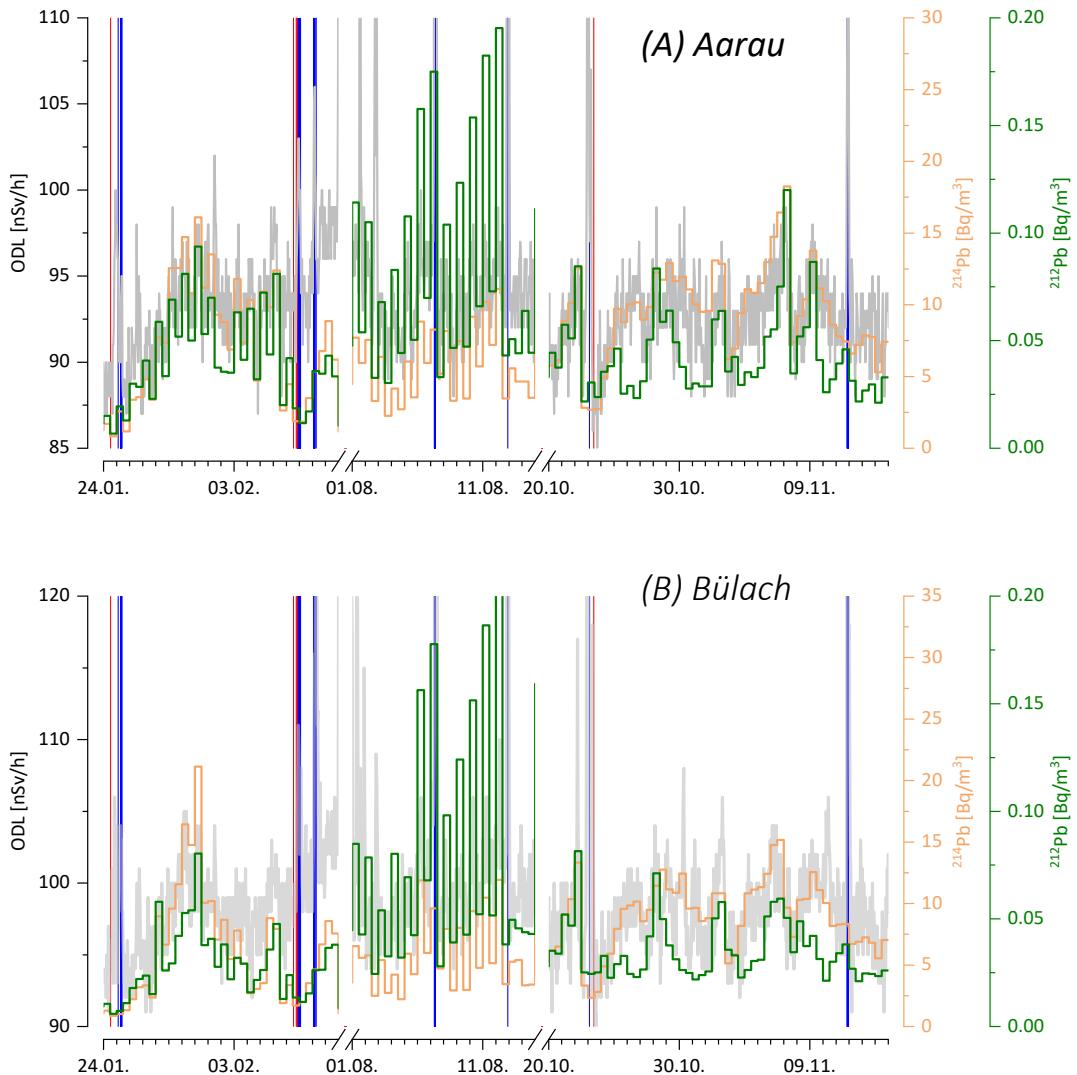
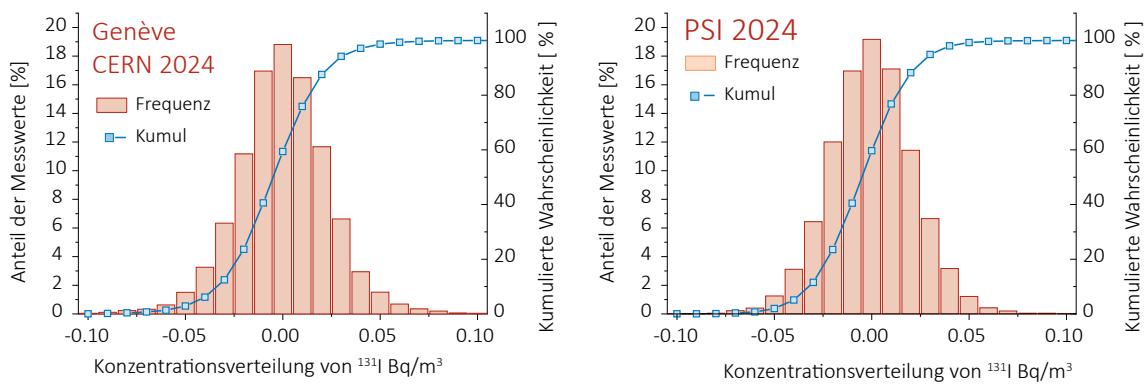


Abbildung 4 :

Ortsdosleistung, ^{214}Pb und ^{212}Pb Aktivitätskonzentrationen (12h-Mittelwerte) in den drei Perioden vom 24. Januar bis 11. Februar, vom 1. bis 15. August und vom 20. Oktober bis 15. November der Stationen Aarau und Bülach. In diesen Perioden gab es jeweils längere Zeiträume mit geringer Auswaschung oder Durchmischung der Atmosphäre.

der gesamten Alpennordseite entsprechen und somit nur eine grobe Abschätzung darstellt, zeigt Abbildung 3 doch deutlich den Zusammenhang zwischen den Aktivitätskonzentrationen dieser Radontöchter und dem meteorologischen Einfluss. Windigere Verhältnisse und die Auswaschung aus der Atmosphäre durch Niederschlag führen zu niedrigeren 12h-Mittelwerten. Nach den meisten dieser Perioden mit Auswaschung oder windigeren Verhältnissen messen alle Messstationen sehr ähnliche (tiefe) Aktivitätskonzentrationen von ^{212}Pb und ^{214}Pb . Höhere Aktivitätskonzentrationen und damit auch grössere Unterschiede zwischen den Messstationen treten erst auf, wenn über längere Zeit keine Auswaschung oder Durchmischung der Atmosphäre stattfindet.

In den kälteren Monaten, vor allem Januar, November und Dezember werden in der Regel sehr tiefe ^{212}Pb Aktivitätskonzentrationen gemessen; beim ^{214}Pb ist dieser Effekt viel weniger ausgeprägt. Die Wind- oder Niederschlagsverhältnisse scheinen nur wenig Einfluss auf diesen Unterschied zwischen kälteren Monaten und dem Rest des Jahres zu haben. Vermutlich hängt dieser Trend mit den unterschiedlichen Halbwertszeiten der zwei verschiedenen Radon-Isotope aus der Thorium- und der Uran-Radium-Zerfallsreihe zusammen. In der Uran-Radium-Zerfallskette hat das gasförmige ^{222}Rn eine Halbwertszeit von mehr als drei Tagen, das ^{220}Rn aus der Thorium-Zerfallskette weniger als eine Minute. Sowohl die Migration und Exhalation aus dem Boden als auch die Verteilung auf den Aerosolpartikeln in den Luftsichten können da-

**Abbildung 5 :**

Histogramm der Durchschnittskonzentration von ^{131}I auf den Stationen Genève CERN und PSI im Jahr 2024.

durch unterschiedlich ausfallen, in Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen und der Bodenbeschaffenheit.

Längere Zeiträume ohne nennenswerte feuchte Deposition oder atmosphärischer Durchmischung kommen in der Regel selten vor. Jeweils Ende Januar und Ende Oktober herrschten solche Bedingungen während ca. zwei Wochen. Abbildung 4 zeigt an den Beispielen der Stationen Bülach und Aarau die anfangs zuerst hohen Ortsdosisleistungen während und kurz nach den Niederschlagsereignissen, da die Radontöchter auf dem Boden abgelagert werden (siehe Kapitel 3.2). Die Aktivitätskonzentrationen von ^{214}Pb und ^{212}Pb in der Luft sind zu Beginn aufgrund dieser Auswaschung sehr niedrig. Danach korreliert vor allem ^{214}Pb während dieser zwei Wochen relativ gut mit den Modulationen in der Ortsdosisleistung.

Auch anfangs August lässt sich teilweise ein Zusammenhang zwischen der Ortsdosisleistung und den Aktivitätskonzentrationen der Radontöchter feststellen. ^{214}Pb und ^{212}Pb erreichen während der morgendlichen Inversion an Sommertagen jeweils hohe Werte, bevor die Sonnenstrahlung die Inversion aufbricht und die Durchmischung mit den höheren Luftsichten erlaubt. Die 12h-Mittelwerte von 00:00 bis 12:00 Uhr liegen daher viel höher als jene von 12:00 bis 24:00 Uhr, was sich ebenfalls deutlich in der Ortsdosisleistung zeigt. Die Werte steigen jeweils bis zum nächsten Niederschlagsereignis an, wobei hier anders als in den Wintermonaten der Beitrag von ^{212}Pb zu dominieren scheint.

Die fünf ^{131}I -Monitore der Stationen in Bellinzona, Genf, Aarau, Liebefeld und PSI haben zu keinem Zeitpunkt im Jahr 2024 gasförmiges ^{131}I in der Umgebungsluft feststellen können. Die Absenz von ^{131}I

in der Umgebungsluft wird auch dadurch bestätigt, dass die Histogramme der durchschnittlichen ^{131}I Konzentrationen – in Abbildung 5 an den Beispielen der Stationen Genève CERN und PSI gezeigt – eine Gausssche Glockenkurve mit einem Mittelwert von Null zeigen.

Schlussfolgerung

Weder die Aerosolmonitore noch die ^{131}I Monitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2024 künstliche Radionuklide in der Umgebungsluft festgestellt. Beide Messsysteme verfügen über zuverlässige automatische Regulierungen, die Schwankungen von Temperatur und Feuchte, die sich auf die Qualität der Spektren auswirken könnten, ausgleichen. Damit gewährleisten sie den Messbetrieb auch bei variierenden Bedingungen. Trotz teilweise schwierigen Bedingungen auf den Messstationen und den dominanten und möglicherweise interferierenden Peaks von ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe vermessen die Aerosolmonitore auch die Radontöchter ^{212}Pb , ^{212}Bi (im Spektrum in Abbildung 2 nicht nachweisbar) und ^{208}Tl aus der Thorium-Zerfallsreihe.

Die Zeitverläufe der Aktivitätskonzentrationen von ^{214}Pb und ^{212}Pb zeigen den Einfluss der meteorologischen Bedingungen, d.h. das Auswaschen der Radontöchter aus der Atmosphäre durch Niederschlag und in vielen Fällen auch die Durchmischung der Bodenluft. In jenen Zeiträumen wo dieser meteorologische Einfluss geringer ist, zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den Aktivitätskonzentrationen dieser Radontöchter und den geringen Schwankungen in der Ortsdosisleistung.

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

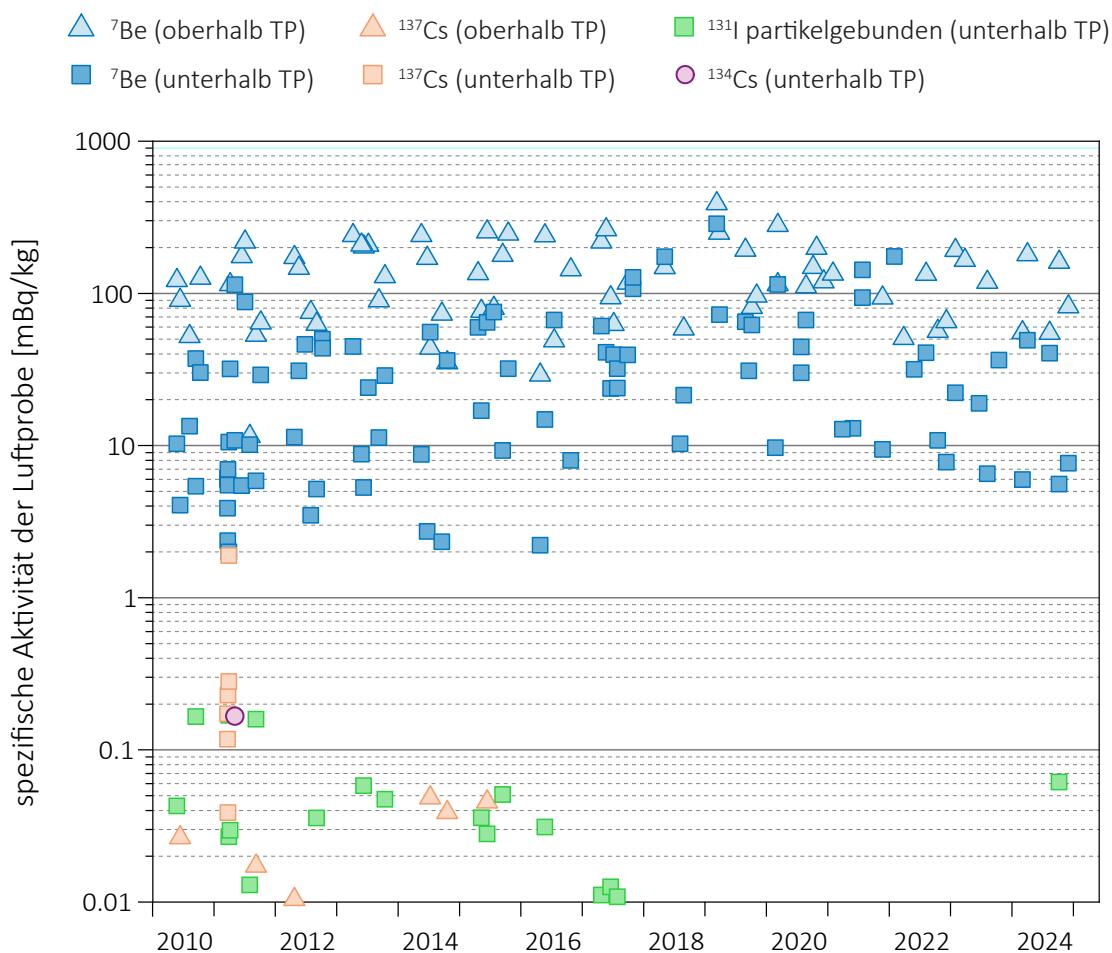
In den 1960er-Jahren wurden von den Grossmächten (USA, Grossbritannien, der damaligen UdSSR, später auch von Frankreich und China) zahlreiche Kernwaffenversuche (zuerst A-Bomben später auch H-Bomben) in der Atmosphäre durchgeführt. Diese führten zu einem deutlichen Anstieg der künstlichen Radioaktivität 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, Zu-

sammensetzung (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 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 flugerprob.

**Figur 3:** ${}^7\text{Be}$ -, ${}^{134}\text{Cs}$ -, ${}^{137}\text{Cs}$ - und partikelgebundene ${}^{131}\text{I}$ - Messwerte in mBq/kg Luft in den Jahren 2010-2024.

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 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 MeteoSchweiz 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.

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 fünfzehn Jahre liegt die durchschnittliche Konzentration des kosmogenen Radionuklids ^7Be oberhalb der Tropopause bei 126 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 ^7Be im Mittel bei 100 mBq/kg bzw. 20 mBq/kg liegen, jeweils 1'000 m über bzw. unter der Tropopause ermittelt.

Im Jahre 2024 lag ein ^{137}Cs -Wert mit 0.06 mBq/kg knapp über der Nachweisgrenze. In Figur 3 sind deutlich sichtbar 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. Das Radionuklid ^{134}Cs konnte in den Jahren nach 2011 nicht mehr nachgewiesen werden.

Quellen:

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

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

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).

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



Figur 2:
Höhenluftfilter-Aggregate montiert an den beiden Flügeln eines Tiger und Detail-Aufnahme eines Sammelgerätes.

4.4

Radioaktivität in aquatischen Systemen

M.S. Brennwald, P. Rünzi

Eawag, Überlandstrasse 133, Dübendorf

A. Pregler

Kantonales Labor Basel-Stadt, Gruppe Radioaktivität, Basel

Zusammenfassung

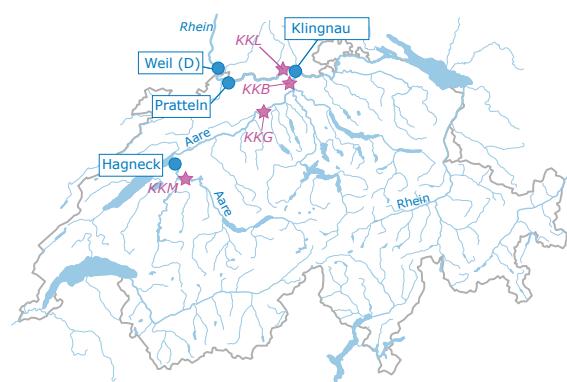
In den Wasserproben von Aare und Rhein wurden 2024 weder ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{134}Cs oder ^{137}Cs aus Abgaben der Kernkraftwerke Mühleberg, Gösgen, Beznau oder Leibstadt oberhalb der Nachweissgrenzen nachgewiesen. In den Schwebestoffproben von Aare und Rhein wurden vereinzelt ^{54}Mn und ^{131}I , sowie in allen Proben ^{137}Cs oberhalb der Nachweissgrenzen gefunden.

In Stichproben von Schwebestoffen 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. Ausserdem wurden hier einmalig ^{95}Zr und ^{95}Nb gefunden.

In allen Wasserpflanzenproben wurden geringe Mengen von ^{137}Cs , sowie in einer Probe ^{131}I nachgewiesen. In einer Probe von Fischen wurde eine geringe Menge ^{137}Cs gemessen, in Grundwasserproben keine künstlichen Radionuklide.

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, um die Radionuklid-Immissionen der entsprechenden Betriebe zu überwachen.



Figur 1:

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

Die kumulierten Radionuklidabgaben der Kernkraftwerke werden von der Eawag mittels monatlicher Wasserproben an verschiedenen Standorten entlang von Aare und Rhein überwacht (Figur 1). Die Station Hagneck liegt stromabwärts des im Rückbau befindlichen Kernkraftwerks Mühleberg, 900m oberhalb 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 Prätteln werden schliesslich auch die Abgaben des Kernkraftwerks Leibstadt überwacht.

Komplementär zu den Wasserproben aus Rhein und Aare werden bei Hagneck, Klingnau und Prätteln auch die spezifischen Aktivitäten von Radionukliden 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 Umwelt 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) gamma-spektrometrisch analysiert.

Ergebnisse

Wasserproben aus Aare und Rhein

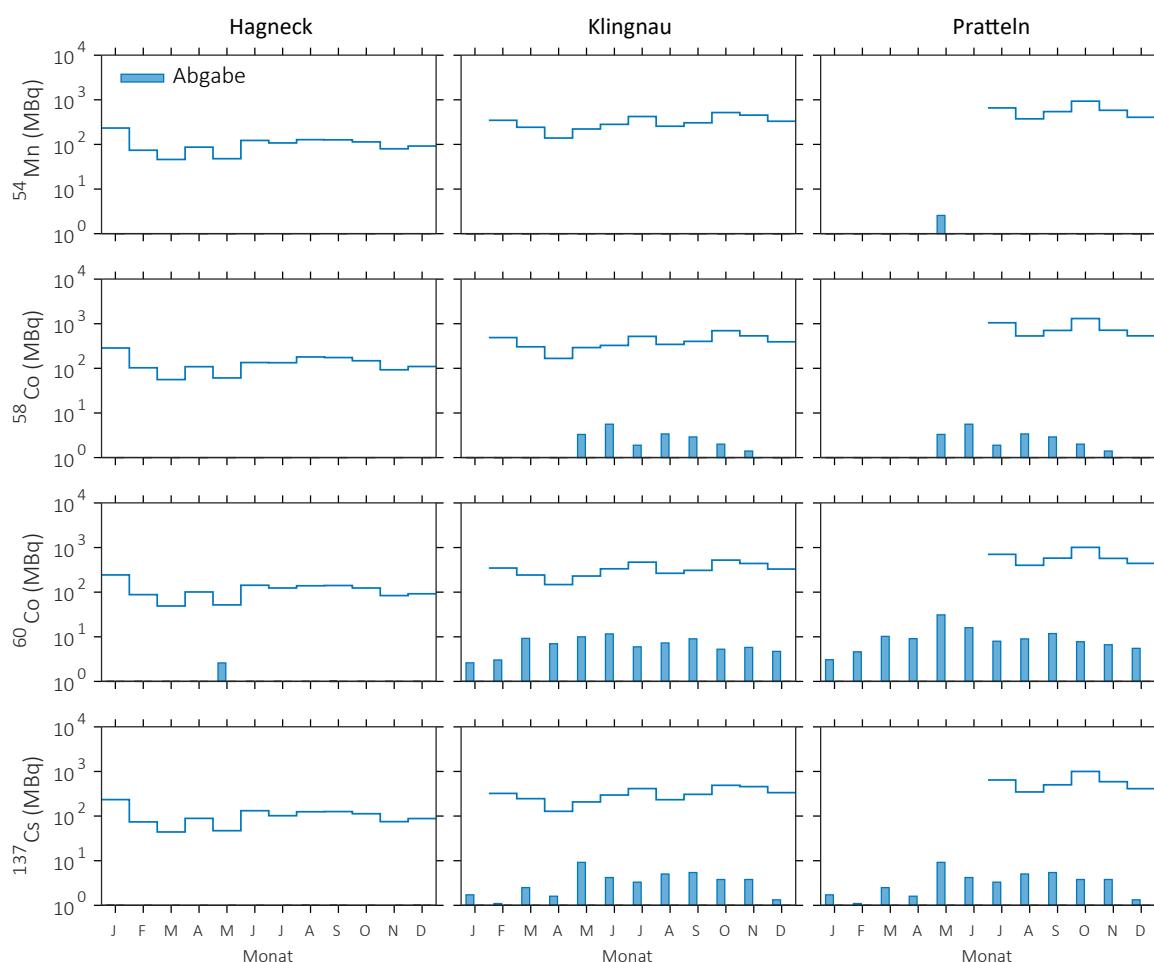
Die Wasserproben aus Aare und Rhein bei Hagneck, Klingnau und Pratteln werden als grossvolumige, monatliche Sammelproben entnommen. Entsprechend dem jeweiligen Abfluss werden pro Tag automatisch zwischen 20 und 80 Proben genommen, was monatliche Sammelproben zwischen 50L und 200L ergibt. Zur Bestimmung 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 Aktivitä-

ten der betreffenden Radionuklide bestimmt. Die Radionuklidfracht ergibt sich aus dem Produkt der gemessenen Aktivität 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.

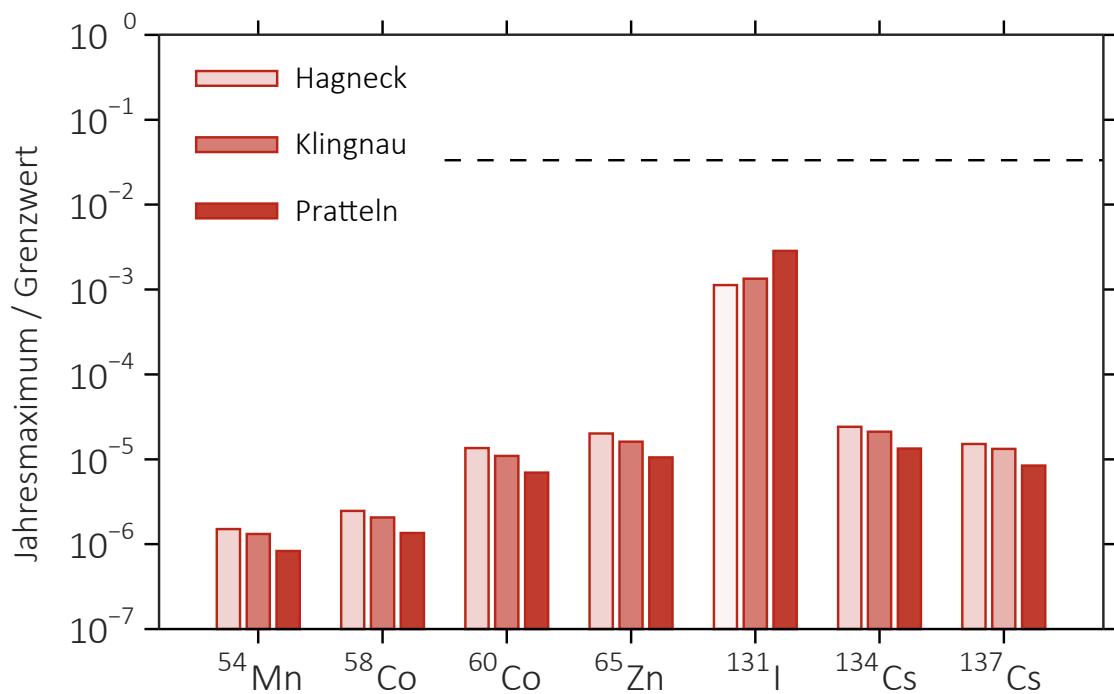
Die Summe der Radionuklidabgaben aus den Kernkraftwerken in die Aare bzw. in den Rhein waren für ^{58}Co , ^{65}Zn , ^{134}Cs und ^{137}Cs vorwiegend durch das KKW Beznau dominiert. ^{60}Co stammt zum grössten Teil aus den KKW's Mühleberg, Beznau und Leibstadt. Das KKW Gösgen hat kaum zu den Abgaben der genannten Nuklide beigetragen, wohl aber bei den Nukliden, wie $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und $^{123\text{m}}\text{Te}$.

Bei allen drei Stationen (Hagneck, Klingnau und Pratteln) wurden in den Wasserproben aus der Aare und dem Rhein über das ganze Jahr keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. In früheren Jahren wurden vereinzelt Spuren dieser Nuklide nahe der Nachweisgrenze (Limit of



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 bilanzierten Abgaben der flussaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte lagen immer unter der Nachweisgrenze (blaue Stufenlinie). Die 2023 begonnenen Austauscharbeiten an den Pumpen der Station Pratteln dauerten bis Juni 2024 an, wodurch für das erste Halbjahr keine Probe erhoben werden konnte.

**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 Prätteln (Jahresmaxima der Nachweisgrenzen), normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer gemäss StSV. Die gestrichelte Linie markiert die Untersuchungsschwelle (1/30 der Immissionsgrenzwerte).

Quantification, LOQ; Grenze, ab welcher eine quantitative Bestimmung möglich ist) 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 zurückgegangen und liegen für das Jahr 2024 auf einem Tiefststand (siehe weiter unten).

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

Konzentrationsmaxima im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten

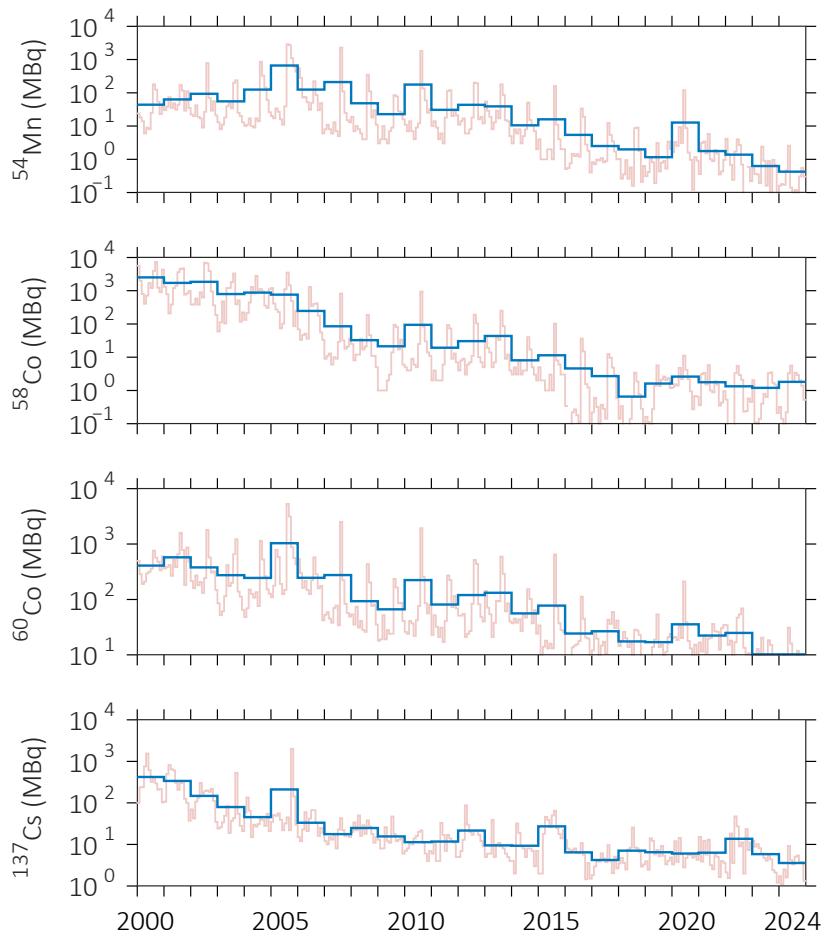
Figur 3 zeigt die jährlichen Maxima der Konzentrationen bzw. Nachweisgrenzen von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{131}I , ^{134}Cs und ^{137}Cs im Wasser, normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer gemäss StSV. Sie liegen um mindestens zwei Größenordnungen unterhalb der Immissionsgrenzwerte. Im Jahr 2024 wurden keine künstlichen Radionuklide in den Proben nachgewiesen.

Langfristige Entwicklung der Radionuklidabgaben 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 - 2024. 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 von 2005 bis ca. 2009 tendenziell abgenommen. Danach ist bis 2013 zunächst keine systematische Veränderung erkennbar. Von 2014 bis 2019 zeigt sich nochmals eine Reduktion der Abgaben von ^{54}Mn , ^{58}Co und ^{60}Co . Die Abgabe dieser Nuklide stieg 2020 wieder an, lag aber 2021 wieder in der Größenordnung von 2019. Für ^{137}Cs erfolgten 2022 leicht höhere Abgaben als in den vorherigen 6 Jahren, und für 2024 lagen insbesondere die Abgaben von ^{54}Mn und ^{137}Cs auf einem neuen Rekordtief.

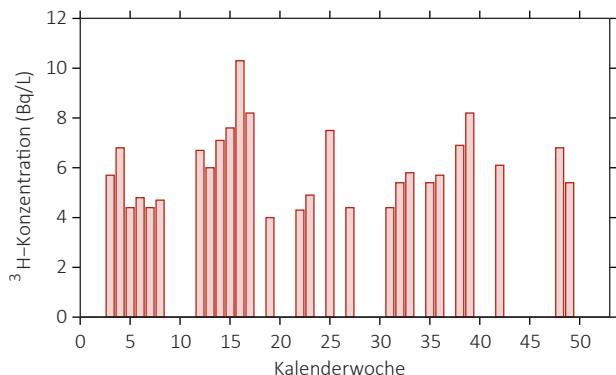
^{3}H -Überwachung bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D)

Bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D) werden durch das Amt für Umwelt 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. Die Nachweisgrenze liegt seit 2022 bei 4 Bq/L anstatt 2 Bq/L, wodurch der Anschein erweckt werden kann, es wurde seltener Tritium im Wasser gefunden.



Figur 4:
Entwicklung der summierten Abgaben der Kernkraftwerke über Abwasser von 2000 - 2024. Die **hellrote** Linie zeigt die Abgaben pro Monat, die **blaue** jeweils das Jahresmittel.

Die ${}^3\text{H}$ -Aktivität des Rheinwassers ist in Figur 5 dargestellt. Die ${}^3\text{H}$ -Konzentrationen betragen über das ganze Jahr < 12 Bq/L. Bei ca. 50 % aller Proben liegen die ${}^3\text{H}$ -Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze von 4 Bq/L.



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

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 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. Diese Schwebstoffproben werden gefriergetrocknet, gemörsert und danach gammaspektrometrisch analysiert.

Die spezifischen ${}^{137}\text{Cs}$ -Aktivitäten der Partikelproben liegen bei allen drei Stationen bei maximal 5 Bq/kg, und zeigen keine generelle Korrelation mit den Abgaben aus den Kernkraftwerken (Figur 6). Die ${}^{137}\text{Cs}$ -Nachweise werden, wie auch bei den Wasserproben, auf die Remobilisierung von ${}^{137}\text{Cs}$ vom Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt. Vereinzelt wurde ${}^{54}\text{Mn}$ gefunden; ${}^{58}\text{Co}$, ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{65}\text{Zn}$ und ${}^{134}\text{Cs}$ wurden nicht nachgewiesen.

Das AUE BS sammelt bei Weil am Rhein monatlich Schwebstoff-Stichproben. Dabei wird über Zeiträume von 3 Tagen Rheinwasser aus der Querprofiluntersuchung entnommen und davon die Schwebestoffe abzentrifugiert.

2024 wurde in einer Probe ^{95}Nb und ^{95}Zr gefunden. Bei ^{95}Nb handelt es sich um ein Tochternuklid von ^{95}Zr , ein Aktivierungsprodukt aus der Legierung von Kernbrennstäben. Die aus der Messung bestimmten Aktivitätskonzentrationen im Rheinwasser von 0.002 Bq/l (^{95}Zr) und 0.004 Bq/l (^{95}Nb) lagen um Grössenordnungen unter den Immissionsgrenzwerten (^{95}Zr : 210 Bq/l; ^{95}Nb : 380 Bq/l) und unter den Untersuchungsschwellen (^{95}Zr : 7 Bq/l; ^{95}Nb : 12.7 Bq/l). Weitere Messungen an der Probe liessen auf ein einzelnes Partikel als Träger der Aktivität schliessen. Aufgrund der bewilligten, bilanzierten Abgaben (Kapitel 8.1) ist die gemessene Aktivität auf Abgaben des KKB zurückzuführen.

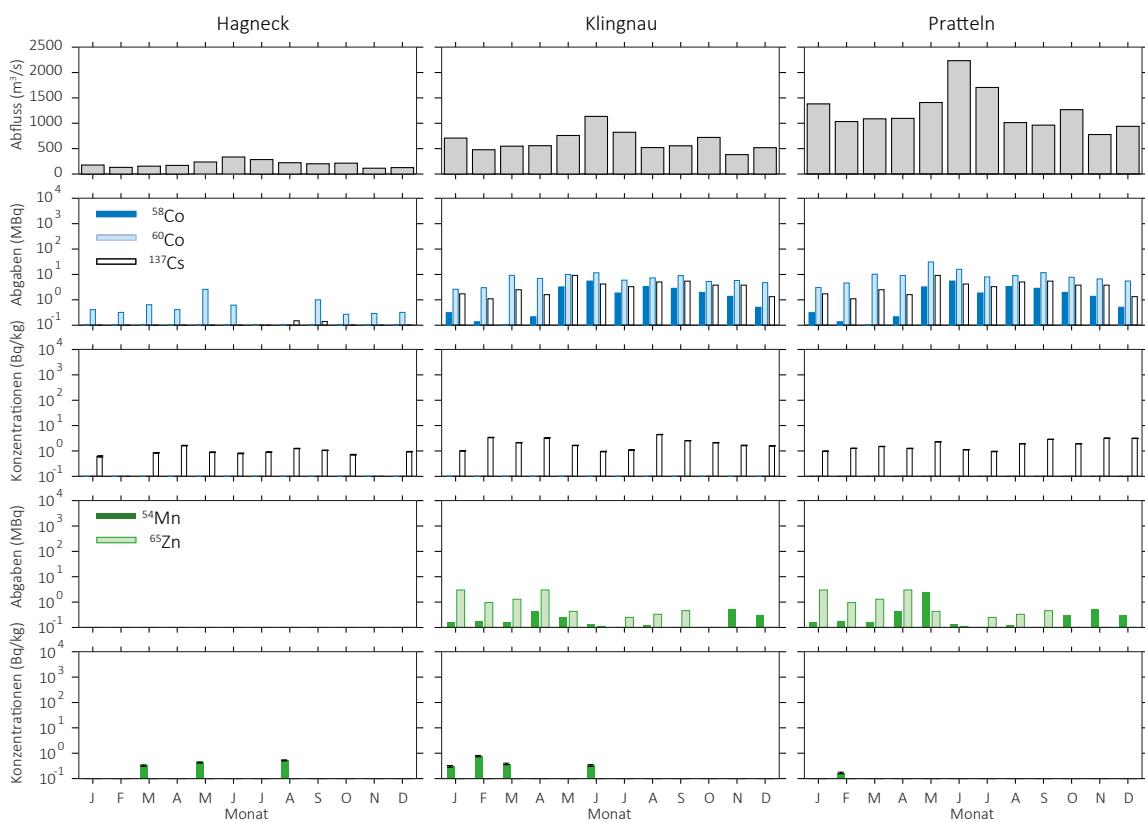
Figur 7 zeigt die Aktivitätskonzentrationen in den Stichproben bei Weil am Rhein (D). ^{137}Cs wurde jeden Monat nachgewiesen – auch diese Ergebnis-

se werden wiederum primär auf die Remobilisierung von ^{137}Cs aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt – und ^{54}Mn wurde in 7 Proben gemessen. 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 stromabwärts der Kernkraftwerke entnommen. Die Fische werden filetiert. Die Wasserpflanzenproben werden gereinigt, um eine Partikelkontamination mit Radionukliden zu vermeiden. Die Fisch- und Wasserpflanzenproben werden vor der Analyse homogenisiert und gefriergetrocknet. Die spezifische Aktivität dieser Proben wird in Bezug auf das Trockengewicht angegeben.

Fische : Im Jahr 2024 wurden Fische aus dem Aare-Hagneck-Kanal (gefangen am 17.01.2024), dem



Figur 6:

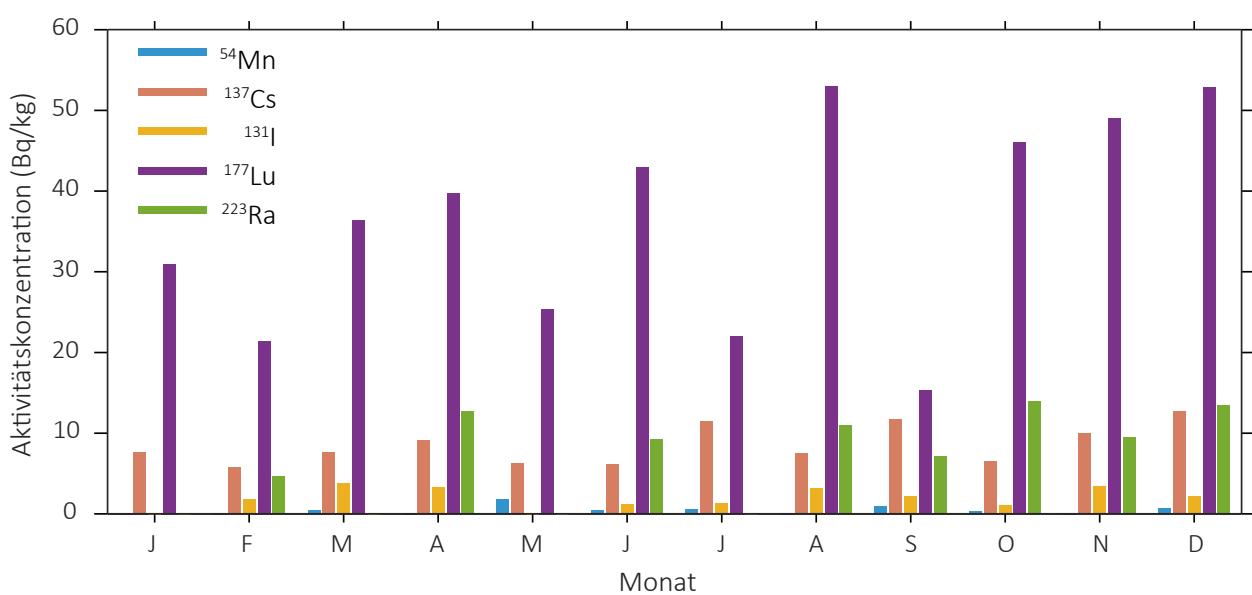
Spezifische Aktivitäten von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn und ^{137}Cs in den monatlichen Partikelproben aus den Sedimentfallen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln im Vergleich mit dem Abfluss und den kumulierten bilanzierten Abgaben der stromaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte wurden nur dann eingezeichnet, wenn die Nachweisgrenze der jeweiligen Messung erreicht wurde. Die Fehlerbalken zeigen den Standardmessfehler der spezifischen Aktivitäten.

Bielersee (24.08.2024), Wöschnau (16.09.2024), Beznau (27.07.2024) und dem Rhein bei Augst (07.06.2024) analysiert. In den Fischproben wurden natürliche Radionuklide gefunden, z.B. ^{40}K (577 - 703 Bq/kg). Es wurden lediglich in der Probe aus dem Rhein bei Augst eine Aktivität ^{137}Cs nachgewiesen, die um den Faktor 26 kleiner ist als der in der Tschernobyl-Verordnung vom 21.12.2020 (AS 2021 41) definierte Höchstwert.

Wasserpflanzen : Am 23.01.2025 wurden Wasserpflanzen aus der Aare oberhalb der Station in Hagneck, in Böttstein, oberhalb des Klingnauer Staausees, und aus dem Rhein bei Möhlin entnommen. In allen Proben wurde ^{137}Cs (1.75 - 6.20 Bq/kg) und in einer Probe ^{131}I (3.21 Bq/kg) nachgewiesen, und in allen Proben natürliche Radionuklide wie das kurzlebige ^7Be (10.1 - 159 Bq/kg) gefunden.

Grundwasser bei Aarberg, Schönenwerd, Böttstein- und Muttenz

Am 17.01.2025 wurden die Grundwasserströme bei Aarberg (Pumpwerk Römerstrasse II, in der Nähe der Überwachungsstation Hagneck), bei Schönenwerd (Pumpwerk Aarefeld in Gretzenbach, neben dem KKW Gösgen), im Hardwald bei Muttenz (Grundwasserbrunnen 16 der Hardwasser AG) und bei Böttstein (Pumpwerk Schulhaus, unterhalb des KKW Beznau) beprobt. Dabei werden die Radionuklide aus 150L Grundwasser analog zu den Flusswasserproben vor der Analyse angereichert und analysiert. Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen (Nachweisgrenzen 0.05 - 0.3 mBq/L).



Figur 7:
Aktivitätskonzentrationen von ^{54}Mn , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{177}Lu und ^{223}Ra auf Schwebestoffen bei Weil am Rhein (D). Die Stichproben wurden als Sammelprobe über 3 Tage erhoben.

4.5

URAnet aqua:

Automatisches Messnetz Flusswasser

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

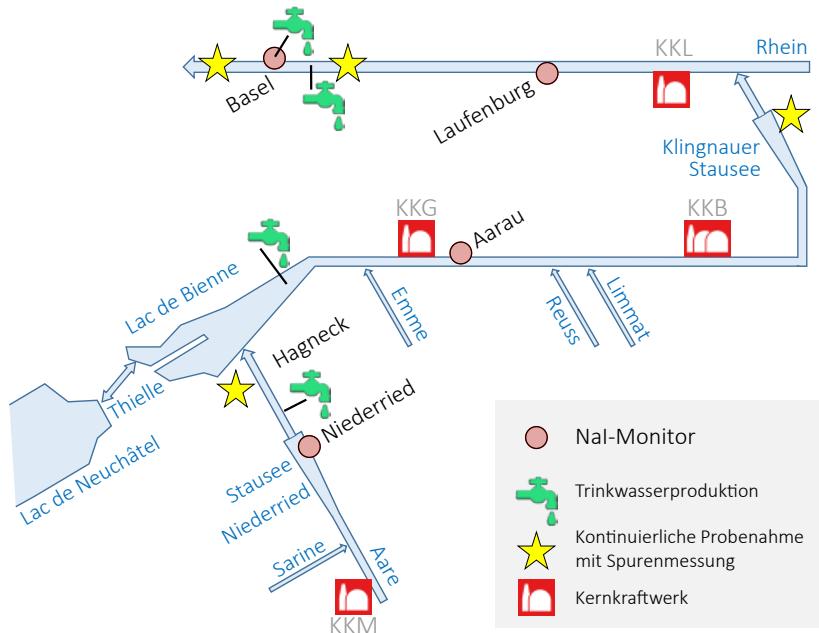
Zusammenfassung

Die vier automatische Natrium-Iodid-Sonden (NaI) des Messnetzes URAnet aqua messen fortlaufend die Konzentration von Gammastrahlern in Aare und Rhein flussabwärts der Kernkraftwerke. Sie übermitteln alle 10 Minuten einen Messwert. Künstliche Radionuklide konnten im Berichtsjahr im Flusswasser nicht nachgewiesen werden. Die Messsonde in Hagneck ist seit Ende Januar 2023 ausser Betrieb. Die Überwachung der Aare unterhalb KKM während des Rückbaus wird durch die Sonde in Niederried sichergestellt. Die vier Sonden in Niederried, Aarau, Laufenburg und Basel hatten 2024 keine Betriebsunterbrüche zu verzeichnen. Im Januar 2024 wurden die Sonden in Laufenburg und in Basel durch Sonden der neuen Generation Sara-2 ersetzt.

Das Messnetz und seine Aufgaben

Das Messnetz URAnet aqua überwacht kontinuierlich und automatisch das Flusswasser von Aare und Rhein stromabwärts der Kernkraftwerke (Figur 1). Die Überwachung der Aare flussabwärts des sich im Rückbau befindenden Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) wird durch die Sonde beim Stausee Niederried sichergestellt. Für diese Sonde ist am BAG in Liebefeld eine Ersatzsonde vorgehalten, die im Falle einer Störung rasch in Niederried eingesetzt werden kann. Flussabwärts des Kernkraftwerks Gösgen (KKG) sowie der beiden relativ nahe beieinander liegenden Standorte Beznau (KKB) und Leibstadt (KKL) sind zwei weitere Sonden installiert (bei Aarau und bei Laufenburg). Eine vierte Sonde überwacht das von IWB für die Trinkwasserversorgung der Stadt Basel aus dem Rhein entnommene Wasser. Damit befinden sich zwei Messsonden zwischen dem letzten Kernkraftwerk und der Trinkwasserentnahme in Basel. Die Aufgabe der automatischen Messsonden ist es starke Erhöhungen von Radioaktivität im Flusswasser rasch zu erkennen. Die tiefe Nachweisgrenze erlaubt es eine untere Meldestchwelle in Grössenordnung der Immissionsgrenzwerte für Gewässer aus der revidierten Strahlenschutzverordnung zu setzen.

Für ^{137}Cs , ^{60}Co und ^{131}I ist diese untere Meldestchwelle 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 aufgrund der höheren Radiotoxizität bei 250 Bq/l. Bei Überschreitung der unteren Meldestchwelle wird die Sektion Umweltüberwachung am Bundesamt für Gesundheit (BAG) sowie die Nationale Alarmzentrale (NAZ) benachrichtigt. Das BAG verifiziert die Messwerte, eruirt die Ursache einer allfälligen Kontamination. Die NAZ informiert die betroffenen Kantone. Bei Überschreitung der zweiten Schwelle ordnet die NAZ nach Rücksprache mit dem BAG die nötigen Massnahmen an. Eine jährliche von der NAZ organisierten Übung überprüft das Funktionieren des Alarmdispositivs. Die automatischen Messsonden sind komplementär zu den monatlichen Messungen der EAWAG (siehe Figur 1), die mit einer mehr als tausendmal tieferen Nachweisgrenze auch geringste Abgaben der Kernkraftwerke erfassen können (Kap. 4.4). Diese empfindlichen Messungen haben keine Alarmfunktion.



Figur 1:

Standorte der Nal-Monitore, der EAWAG-Stationen für Spurenmessungen (Hagneck, Klingnau und Pratteln), der Rheinüberwachungsstation RÜS in Weil a.Rh. sowie der Entnahmestellen von Trinkwasser (Bielersee: Biel; Rhein: Pratteln und Basel; Aare: Uferfiltrat vor Bielersee). Die Nal-Station Hagneck ist seit Ende Januar 2023 nicht mehr in Betrieb.

Messtechnik

Die eingesetzten Sonden enthalten 3“ Nal-Detektoren, welche im Wasser eine «Sichtweite» von rund einem Meter haben. Die Nal-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). Bei der Detektion von kleinsten Konzentrationen von ^{131}I ($< 10 \text{ Bq/l}$) 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 Nal Kristallen abhängig von der Temperatur schwanken kann,

ist es daher möglich, dass die 352 keV-Linie der Radiontochter ^{214}Pb fälschlicherweise dem künstlichen ^{131}I zugerechnet wird. Seit 2022 wurden die Sonden der ersten Generation gestaffelt durch Sonden der zweiten Generation «Sara-2» ersetzt (siehe auch Tabelle 1).

Verfügbarkeit der Messsonden und Messergebnisse 2024

Die Verfügbarkeit der Sonden, d.h. das Vorhandensein von 10-Minuten-Spektren, ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Generell sind diese Werte hoch. Werte von 99.9% in der Tabelle bedeuten, dass die Sonden nur wenige Stunden

Tabelle 1:
Verfügbarkeit (Uptime) der Nal-Wassersonden 2024.

Station	Uptime	Inbetriebnahme	Bemerkung
Niederried	99.9 %	Juni 2014	Sara-2 ab 27.11.2023
Hagneck		Juni 2015	Sonde seit 26.01.2023 ausser Betrieb; redundante Sonde: Niederried
Aarau	99.9 %	Juni 2014	Sara-2 ab set März 2022
Laufenburg	99.9 %	Januar 2015	Sara-2 ab 26.1.2024
Basel	99.9 %	Juli 2013	Sara-2 ab 26.1.2024

im Jahr nicht einsatzbereit waren und zwar während den jährlichen Messungen zur Konstanzprüfung, bei der Reinigung oder bei einem Austausch der Sonden.

Die Vorgabe für die Mindestverfügbarkeit des URAnet aqua Messnetzes ist so festgelegt, dass für die Stationspaare Aarau-Laufenburg, Laufenburg-Basel sowie für die Station Niederried (Station mit schnell einsetzbarer Ersatzsonde) während mehr als 99% der Zeit mindestens eine Sonde in Betrieb sein muss. Dank der lückenlosen Messungen bei allen Messstationen ist das Kriterium für 2024 eingehalten. Bei den auf radenviro.ch publizierten Tagesmittelwerten ist der Anteil fehlender Werte etwas höher, als die

in der Tabelle 1 genannten Uptime-Angaben. Der Grund dafür ist, dass die Sonde beim Fehlen eines einzigen 10-Minuten Wertes keinen Tagesmittelwert rechnet.

Die Nai-Detektoren des URAnet aqua Messnetzes konnten 2024 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. Das ist teilweise auch im Verlauf der Tagesmittelwerte auf radenviro.ch sichtbar.



Figur 2:

Radenviro Blog: Austausch einer URAnet aqua-Sonde in der Station Laufenburg.
(www.radenviro.ch/ein-schnappschuss-ein-link-nai-sonde-aus-dem-uranet-aqua-netzwerk)



4.6

Tritium-Monitoring (Kanton Bern und Raum Leibstadt)

Th. Stocker, R. Purtschert, T. Wagner

Abt. Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut Universität Bern, Sidlerstrasse 5, BERN

Zusammenfassung

Im Jahr 2024 setzte die Abteilung für Klima- und Umweltphysik (KUP) der Universität Bern das Monitoring von Tritium (${}^3\text{H}$) in Fließgewässern und im Niederschlag an ausgewählten Standorten im Kanton Bern sowie im Raum Leibstadt 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. Von Januar 2020 bis Juni 2024 wurde das Tritium-Monitoring der KUP im Raum Bern in reduzierter Form weitergeführt und anschliessend eingestellt, dafür das Monitoring im Rhein im Raum Leibstadt erweitert. Die höchsten Tritiumwerte wurden auch im Jahr 2024 im Niederschlag aus dem Raum Niederwangen gemessen.

Hintergrund

Tritium (${}^3\text{H}$) 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, bestand 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.

Probenahmen

Im Jahr 2024 wurden im Rahmen dieses Monitorings die folgenden Standorte beprobt:

- Aare flussabwärts vom KKM
(Tagesmischproben vom Standort Mühleberg-Rewag bis Ende Juni)
- Niederschlag Niederwangen
(Sammelproben bis Ende Juni, ~200 m E des Betriebs)
- Stadtbach Niederwangen
(Stichproben alle zwei Wochen bis Ende Juni)
- Niederschlag vom Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern
(Sammelproben ganzjährig)

Flussabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) wurden in den Vorjahren lediglich in den Wochen vor und während der Jahresrevision Tagesmischproben aus dem Rhein entnommen. Seit Mai 2024 werden jedoch ganzjährig Zweitägesproben entnommen und auf ihren Tritiumgehalt hin untersucht.

Im Einzelnen wurden im Jahr 2024 folgende Proben gemessen:

Tabelle 1:

Tritium-Messungen Januar bis Dezember 2024 nach Art oder Entnahmestandort der Probe.

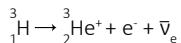
Art oder Entnahmestandort der Probe	Anzahl
Aare Mühleberg Rewag	129
Niederschlag Niederwangen	12
Stadtbach Niederwangen	12
Niederschlag Physikalisches Institut	12
Rhein flussabwärts vom KKL	123
Standards/Nulleffekt/Vergleichsmessungen	82
Total: 370	

Die regelmässigen 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 Probe flasche eine Mischprobe eines 24-Stunden-Intervalls (Mühleberg) bzw. eines 48-Stunden-Intervalls (KKL) enthält.

Im Raum Niederwangen wurde noch bis Juni 2024 alle zwei Wochen eine Stichprobe aus dem Stadtbach entnommen und gemessen. Der Niederschlag (Regen bzw. Schnee), der unweit der Firma MB Microtec in Niederwangen in einem Regensammler erfasst wird, wurde ebenfalls bis Juni 2024 alle zwei Wochen gemessen, sofern eine ausreichende Menge Niederschlag vorlag.

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 ${}^3\text{He}$ (Beta-Minus-Zerfall):

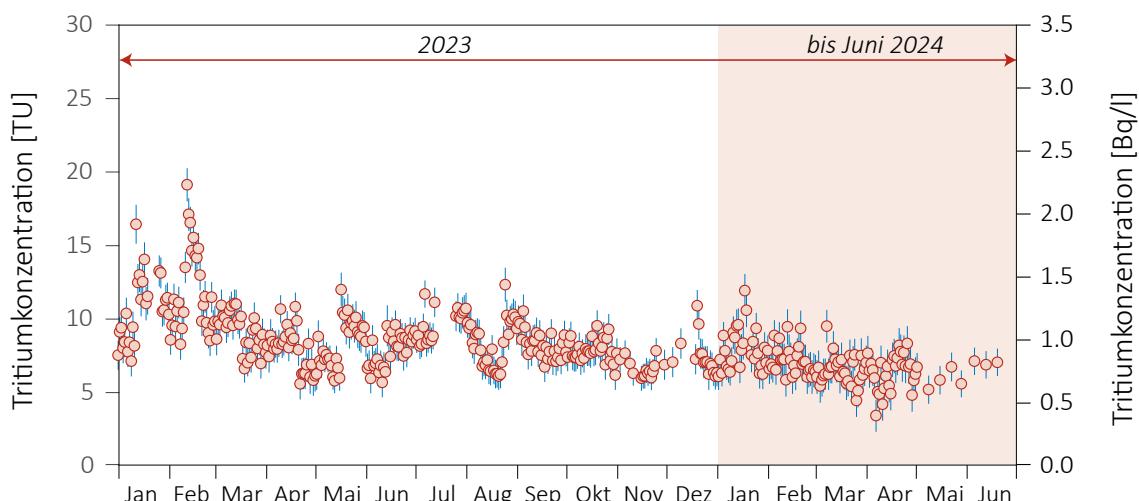


Zum Nachweis und zur Quantifizierung der in den Wasserproben emittierten Elektronen wurde, wie in den Vorjahren, ein Liquid-Szintillationsmessgerät vom Typ Aloka LSC-LBII verwendet, welches im Tiefelabor des Physikalischen Instituts der Universität Bern installiert ist. Die Nachweigrenze liegt bei 4 Tritium Units (TU, entsprechend 0.5 Bq/L) und ermöglicht somit auch die Bestimmung der natürlichen Hintergrundaktivität von ${}^3\text{H}$ im Niederschlag.

Messergebnisse Januar 2023 bis Juni 2024

Standort Mühleberg Rewag (Aare)

Die Tritium-Messwerte des Wassers vom Standort Mühleberg Rewag bewegten sich grösstenteils relativ stabil in einem Band zwischen 5 und 15 TU (entsprechend 0.6 - 2 Bq/L). Leicht erhöhte Werte traten



Figur 1:

Tritium-Messwerte Mühleberg Rewag. Die höchsten Messwerte traten im Januar/Februar auf.

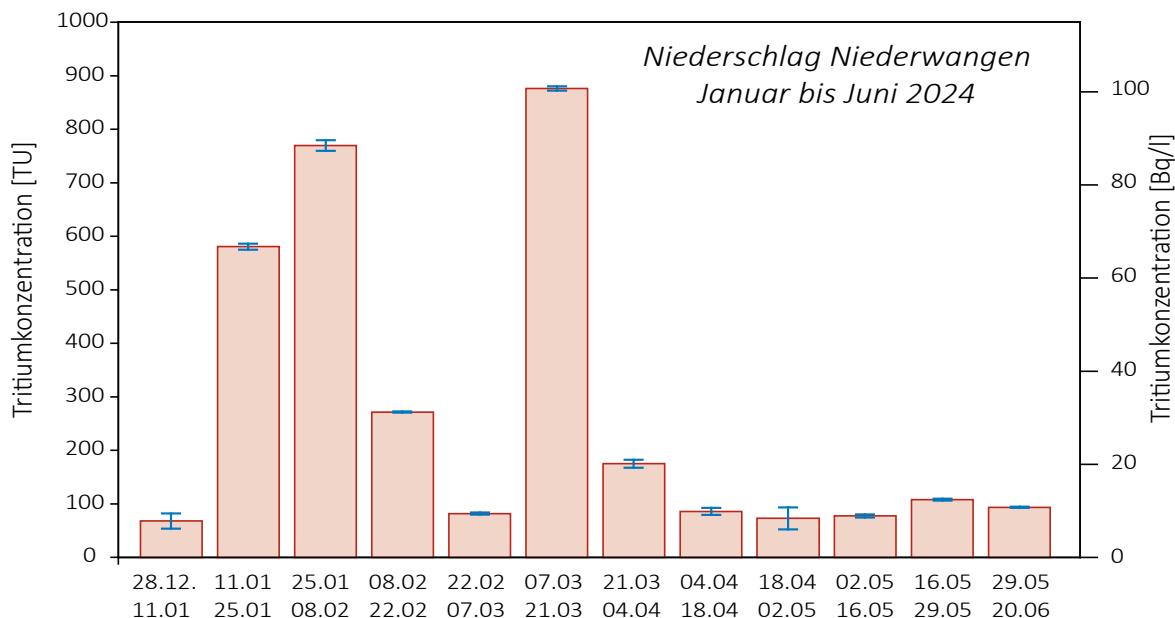
wie in vergangenen Jahren jeweils vor allem im Januar und Februar auf.

Da der Probennehmer im Juli 2023 aufgrund eines Defekts des Akku-Ladegerätes mehrere Tage lang ausfiel, konnten in diesem Zeitraum keine Proben entnommen werden. Außerdem wurden Ende November 2023 der Probennehmer und die darin befindlichen Flaschen wegen Hochwasser überschwemmt. Daher liegen für diese Zeiträume nur einige Stichproben und keine täglichen Sammelproben vor.

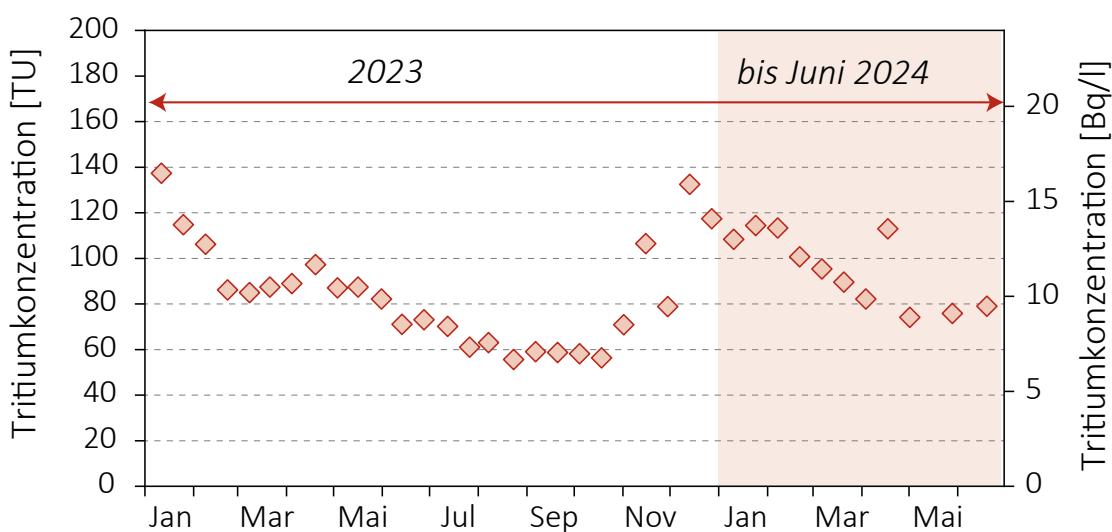
Standorte Niederwangen

Im Raum Niederwangen wurden in der Nähe der Firma MB-Microtec 12 Messungen am lokalen Niederschlag durchgeführt (Figur 2). Der höchste Messwert der Schnee- oder Regenwasserproben lag bei 875 TU (103 Bq/L) und trat im März auf.

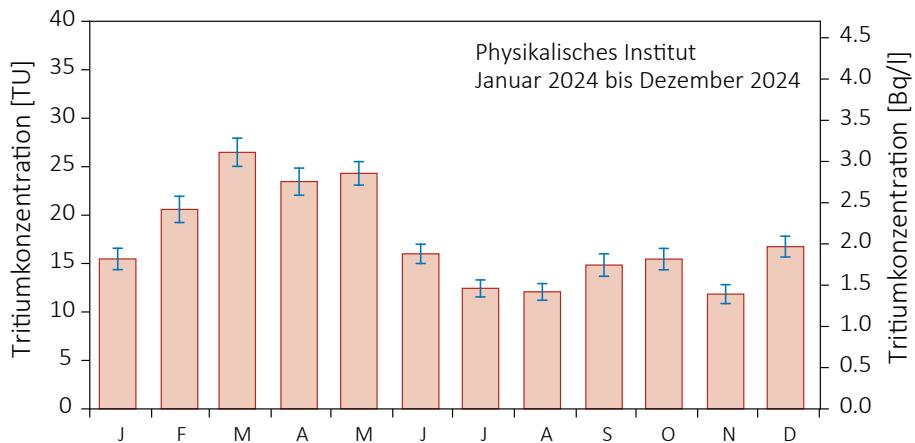
Von Herbst 2020 bis Sommer 2024 wurde in Niederwangen auch der Stadtbach regelmäßig alle zwei Wochen beprobt. Die Messwerte lagen im langjährigen Mittel von ca. 100 TU (Figur 3). Die höchsten Messwerte traten während der kalten Jahreszeit am Anfang und Ende des Jahres auf.



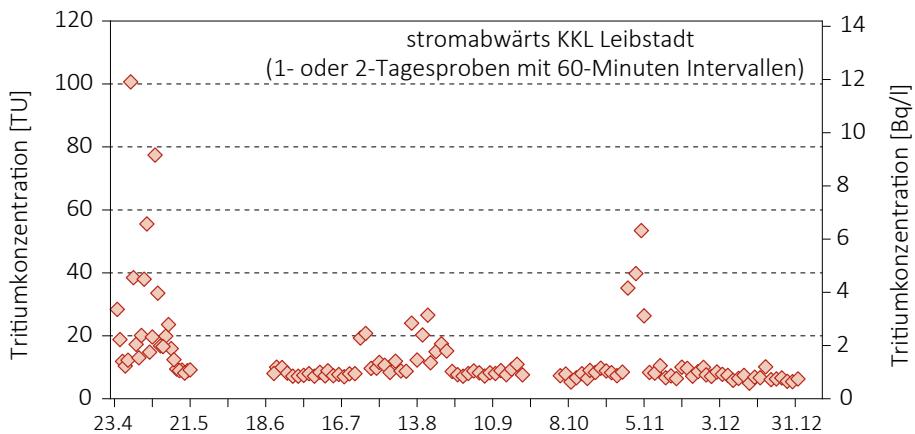
Figur 2:
Tritium-Messwerte im Niederschlag von Niederwangen (Messungen alle 2 Wochen).



Figur 3:
Tritium-Messwerte am Stadtbach Niederwangen (Stichproben alle 2 Wochen).

**Figur 4:**

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

**Figur 5:**

Tritium-Messwerte im Rhein stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt.

Standort Physikalisches Institut, Stadt Bern (Regenwasser)

Aufgrund der lokalen gasförmigen Emissionen, vor allen durch MB-Microtec, ist die Tritiumkonzentration im Niederschlag im Raum Bern generell höher als im Flusswasser der Aare und auch höher als in Niederschlägen andernorts in der Schweiz. Die im Jahr 2024 gemessenen Monatsproben wurden auf dem Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern gesammelt. Die Werte lagen generell deutlich unter den höchsten Werten der Vorjahre. Der höchste Messwert von 26 TU (3.1 Bq/L) trat im März auf.

Standort Leibstadt (Rhein)

Um den Tritiumgehalt des Rheins zu wurde stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) wieder ein automatischer Probennehmer betrieben. Es wurden Zweitagesproben mit einem Sammelintervall von je 60 Minuten entnommen. Die Probenahme wurde am 24.04.2024 begonnen und wird seitdem kontinuierlich weitergeführt.

Die höchsten Tritiumgehalte wurden Ende April, anfangs Mai festgestellt und sind auf Abgaben der Kernkraftwerke Leibstadt, Beznau und Gösgen zurückzuführen, die jeweils vor den Revisionsarbeiten stattfinden ca. 100 TU ab (Figur 5). Eine Datenlücke entstand im Juni 2024, da der Probenehmer durch Hochwasser beschädigt wurde und keine Wasserproben entnehmen konnte. Eine kleinere Messlücke im September 2024 ist auf eine Verstopfung des Ansaugschlauches zurückzuführen. Im weiteren Verlauf des Jahres wurden zwei weitere deutliche Peaks mit Spitzenwerten von 26 TU (3.1 Bq/L) bzw. 53 TU (6.3 Bq/L) gemessen.

4.7

Radioactivité du sol et de l'herbe

P.-A. Pittet, C. Pilloud, P. Froidevaux, R. Cusnir, 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, S. Röllin, S. Kradolfer, R. Althaus, H. Sahli, M. Astner, M. Stauffer

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 réalisés. 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 jusque dans les années soixante ainsi qu'aux retombées de l'accident de Tchernobyl.

Introduction

Le ^{90}Sr et le ^{137}Cs ont été largement dispersés dans l'environnement à la suite des essais nucléaires des années soixante. Une dissémination supplémentaire de ^{137}Cs a été causée par 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 chaîne alimentaire, et pourra finalement se trouver dans les tissus osseux [1] et les dents [2]. La mesure du ^{90}Sr dans des échantillons de sol, d'herbe, de céréale, de lait, de vertèbre et de dents de lait est effectuée en Suisse depuis les années soixante. La figure 3 du chapitre 1.1 illustre l'évolution des moyennes annuelles obtenues depuis plus de soixante ans pour chaque type d'échantillon correspondant à un compartiment de l'environnement. Après avoir atteint des valeurs maximales au milieu des années soixante, une décroissance conti-

nue de l'activité en ^{90}Sr est observée depuis l'arrêt des essais nucléaires atmosphériques. L'utilisation de ces données expérimentales a permis de montrer que les demi-vies biologiques de ce radioélément dans chacun des compartiments étaient très similaires, avec demi-vie moyenne de 13.1 ± 2 ans [3]. Le ^{137}Cs va aussi passer du sol aux végétaux et rejoindre la chaîne alimentaire. Au contraire du ^{90}Sr , il se retrouvera principalement dans les tissus musculaires des vertébrés et sera éliminé plus rapidement que le strontium. Les essais nucléaires atmosphériques ont également conduit à une dissémination de plutonium, présent sous la forme des isotopes 238, 239, 240 et 241. La décroissance relativement rapide de ^{241}Pu ($T_{1/2} = 14.4$ ans) est à l'origine de la présence de ^{241}Am dans les dépôts des retombées radioactives (chapitre 7.2). Ces actinides, au contraire du césium et du strontium, sont peu mobilisables et se retrouvent principalement dans les sols.

Résultats et discussion

Les résultats des mesures pour les sols sont présentés dans le Tableau 1. 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 0.2 à 0.5 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. La même tendance est observée pour les actinides, avec des activités inférieures à 0.26 Bq/kg pour le plutonium et à 0.11 Bq/kg pour l'américium sur le plateau suisse et des valeurs plus élevées pour les sites en altitude, ainsi qu'au sud des Alpes où 0.545 Bq/kg de plutonium et 0.229 Bq/kg d'américium ont été mesurés à Stabio. Les rapports $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (voir le chapitre 7.2, mesures de plutonium et d'américium) confirment que cette contamination est due aux essais nucléaires des années soixante.

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 où sont mesurées actuellement les plus fortes activités, de 12 à 132 Bq/kg. Le passage du nuage de Tchernobyl ayant également touché le nord-est de la Suisse, les valeurs relevées à Arenenberg (15.4 Bq/kg) et Güttingen (14.4 Bq/kg) sont supérieures à celles obtenues sur les autres sites du plateau suisse (5 à 11 Bq/kg). Toutes les activités mesurées sont toutefois restées dans les valeurs usuellement observées et en constante décroissance depuis l'accident de Tchernobyl ainsi qu'ilustré par la figure 2 du chapitre 1.1. Pour le ^{60}Co et le ^{134}Cs , deux radioéléments produits artificiellement dans les réacteurs nucléaires, aucune activité supérieure à la limite de détection n'a été décelée. Enfin, c'est pour le ^{40}K , un des trois isotopes constituant le potassium naturel, que l'activité mesurée est la plus élevée. Ces résultats, obtenus par des mesures effectuées en laboratoire, sont en accord avec les mesures in-situ (voir aussi le chapitre 3.1), qui permettent une évaluation directe de la présence des émetteurs gamma tels le ^{137}Cs .

Les mesures de radioactivité dans l'herbe sont rapportées dans le Tableau 2. On constate que la ra-

dioactivité de l'herbe est dominée par le ^{40}K , suivi du ^{7}Be , qui est formé par l'action du rayonnement solaire sur les couches supérieures de l'atmosphère. 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 prélèvement, l'incorporation de certains éléments (Ca, K) et radioéléments (^{137}Cs et ^{90}Sr) étant dépendante de la croissance végétale [4]. Toutefois, l'activité en ^{90}Sr de l'herbe est principalement fonction de celle du sol, les valeurs les plus importantes étant observées en altitude (3.3 - 7.3 Bq/kg) et au Tessin (0.5 à 5.4 Bq/kg), tandis que pour les échantillons collectés sur le plateau, les activités en ^{90}Sr ne dépassent pas 1.1 Bq/kg. Les activités en ^{137}Cs les plus élevées sont mesurées au Tessin, tandis que les valeurs mesurées sur les autres sites sont soit inférieures à 2.2 Bq/kg ou carrément non quantifiables.

Conclusions

Les mesures de la radioactivité dans les sols et les herbes en Suisse en 2024 présentent des valeurs similaires aux années précédentes. Aucune augmentation 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 du plateau, centrales nucléaires incluses. La distribution du plutonium et de l'américium dans les sols dépend également de la localisation et suit celle du ^{90}Sr . Un marquage assez important en ^{137}Cs dans des échantillons de sol et d'herbe de certains sites de prélèvement du Tessin est encore observé plus de trente ans après l'accident de Tchernobyl.

Références

- [1] Froidevaux, P. et al., Retention half times in the skeleton of plutonium and ^{90}Sr from above ground nuclear tests: A retrospective study of the Swiss population. *Chemosphere* 2010, 80, 519
- [2] Froidevaux, P.; Geering, J.-J.; Valley, J.-F. ^{90}Sr in deciduous teeth from 1950 to 2002: The Swiss experience. *Sci. Total Environ.* 2006, 367, 596
- [3] Froidevaux, P. et al., Radionuclides in the Environment in Switzerland: A Retrospective Study of Transfer from Soil to the Human Body. *Chimia* 2020, 74, 984-988.
- [4] Froidevaux, P. et al., chap. 4.6 de *Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse*, 2005, OFSP.

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 2024
(Bq/kg matière sèche, fraction < 2 mm).

Canton / Lieu	n	^{40}K	^{60}Co	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am
AG (Voisinage KKB)	2	395 ± 39	< 0.6	< 0.5	11.3 ± 3.5	0.23 ± 0.06	0.193 ± 0.017	0.076 ± 0.006
AG (KKB in-situ)	2	314 ± 42			7.2 ± 1.3			
AG (PSI)	1	393 ± 32	< 0.8	< 0.6	9.2 ± 1.0	0.21 ± 0.06	0.139 ± 0.014	0.058 ± 0.006
AG (PSI in-situ)	1	286 ± 26			4.7 ± 0.7			
AG (ZWILAG)	1	417 ± 33	< 0.5	< 0.4	9.1 ± 0.9	0.22 ± 0.10	0.164 ± 0.013	0.079 ± 0.007
AG (ZWILAG in-situ)	1	316 ± 32			6.3 ± 0.7			
AG (Vois. KKL)	4	406 ± 41	< 0.5	< 0.5	10.5 ± 1.9	0.44 ± 0.10	0.210 ± 0.016	0.086 ± 0.008
AG (KKL in-situ)	4	331 ± 14			8.4 ± 1.7			
AG/SO (Vois. KKG)	4	424 ± 30	< 0.5	< 0.4	9.5 ± 3.1	0.54 ± 0.12	0.260 ± 0.026	0.105 ± 0.009
AG/SO (KKG in-situ)	4	285 ± 15			5.2 ± 0.7			
BE (Voisinage KKM)	7	652 ± 72	< 0.6	< 0.5	7.0 ± 1.8	0.33 ± 0.10	0.163 ± 0.014	0.067 ± 0.006
BE (KKM in-situ)	7	450 ± 62			3.9 ± 1.1			
BE (Mürren) ¹⁾	1	480 ± 42	< 0.5	< 0.6	33.0 ± 4.1	4.10 ± 0.80	1.40 ± 0.01	0.67 ± 0.09
BE (Gimmelwald)	1	302 ± 27	< 0.4	< 0.5	8.9 ± 1.1	2.50 ± 0.50	0.41 ± 0.01	0.22 ± 0.04
BE (Fahrni) ²⁾	1	450 ± 39	< 0.4	< 0.4	10.4 ± 1.3	2.30 ± 0.40	0.47 ± 0.01	0.25 ± 0.04
BE (Diesses/Jura)	1	390 ± 34	< 0.4	< 0.5	12.8 ± 1.6	1.30 ± 0.30	0.47 ± 0.01	0.24 ± 0.04
BL (Sissach)	1	515 ± 24	< 0.1	< 0.1	12.9 ± 0.9	4.14 ± 1.65		
FR (Posieux)	1	411 ± 31	< 0.6	< 0.5	5.4 ± 0.6	0.41 ± 0.10	0.214 ± 0.02	0.084 ± 0.007
FR (Posieux in-situ)	1	320 ± 33			3.6 ± 0.5			
GE (Vois. CERN)	5	417 ± 22	< 0.6	< 0.5	7.0 ± 1.1	0.20 ± 0.07	0.163 ± 0.014	0.064 ± 0.006
GE (CERN in-situ)	5	282 ± 30			3.3 ± 0.9			
TG (Arenenberg)	1	405 ± 30	< 0.4	< 0.4	15.4 ± 1.3	0.20 ± 0.07	0.127 ± 0.01	0.053 ± 0.006
TG (Arenenberg in-situ)	1	319 ± 33			12.5 ± 1.4			
TG (Güttingen)	1	324 ± 25	< 0.5	< 0.5	14.4 ± 1.2	0.36 ± 0.09	0.157 ± 0.013	0.071 ± 0.006
TG (Güttingen in-situ)	1	256 ± 27			9.6 ± 1.1			
TI (Centovalli)	1	614 ± 32	< 0.2	< 0.2	64.3 ± 3.1	4.40 ± 3.10		
TI (Prato Leventina)	1	581 ± 29	< 0.2	< 0.2	12.4 ± 0.9	2.79 ± 1.11		
TI (Sessa)	1	728 ± 44	< 0.2	< 0.2	58.6 ± 3.5	3.05 ± 1.22		
TI (Cadenazzo)	1	683 ± 51	< 0.7	< 0.7	30.0 ± 2.5	0.72 ± 0.15	0.106 ± 0.009	0.048 ± 0.005
TI (Cadenazzo in-situ)	1	480 ± 49			21.0 ± 2.2			
Ti (Caslano)	1	571 ± 44	< 0.5	< 0.5	62.6 ± 5.0			
Ti (Caslano in-situ)	1	518 ± 53			39.6 ± 4.1			
TI (Stabio)	1	598 ± 47	< 0.9	< 0.8	132.0 ± 10.1	0.89 ± 0.18	0.545 ± 0.081	0.229 ± 0.025
TI (Stabio in-situ)	1	532 ± 55			94.7 ± 9.6			

n = nombre d'échantillons; ¹⁾ alpage (Allmendhubel, 1'900 m); ²⁾ bord des Alpes (850 m).

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 ${}^7\text{Be}$, ${}^{40}\text{K}$, ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{134}\text{Cs}$, ${}^{137}\text{Cs}$ et ${}^{90}\text{Sr}$ dans des échantillons d'herbe prélevés en Suisse en 2023 lors de deux saisons (printemps et automne) de coupe (Bq/kg de matière sèche).

Canton/Lieu	n	${}^7\text{Be}$	${}^{40}\text{K}$	${}^{60}\text{Co}$	${}^{134}\text{Cs}$	${}^{137}\text{Cs}$	${}^{90}\text{Sr}$
AG (Voisinage KKB)	4	108 ± 30 393 ± 51	868 ± 10 542 ± 114	< 1.1 < 1.1	< 0.9 < 0.8	< 1.0 1.6 ± 0.1	0.62 ± 0.13 ³⁾ 0.81 ± 0.18 ⁴⁾
AG (PSI)	2	134 ± 13 254 ± 23	675 ± 52 1'159 ± 86	< 0.7 < 1.1	< 0.6 < 0.9	< 0.6 1.7 ± 0.6	0.53 ± 0.12 ³⁾ 1.11 ± 0.23 ⁴⁾
AG (ZWILAG)	2	112 ± 11 322 ± 29	690 ± 54 627 ± 51	< 0.9 < 0.9	< 0.8 < 0.7	0.6 ± 0.5 0.9 ± 0.5	0.34 ± 0.10 ³⁾ 0.87 ± 0.19 ⁴⁾
AG (Voisinage KKL)	8	160 ± 84 388 ± 79	777 ± 117 798 ± 455	< 0.9 < 0.9	< 0.8 < 0.8	0.9 ± 0.2 2.2 ± 1.4	0.84 ± 0.17 ³⁾ 0.85 ± 0.20 ⁴⁾
AG/SO (Voisinage KKG)	8	123 ± 36 356 ± 67	859 ± 222 943 ± 329	< 1.0 < 1.0	< 0.8 < 0.9	0.9 ± 0.2 1.2 ± 0.4	0.63 ± 0.13 ³⁾ 0.76 ± 0.17 ⁴⁾
BE (Voisinage KKM)	8	86 ± 36 362 ± 46	912 ± 127 780 ± 174	< 1.0 < 0.9	< 0.8 < 0.7	0.8 ± 0.2 < 0.8	0.71 ± 0.15 ³⁾ 1.04 ± 0.22 ⁴⁾
BE (Lauterbrunnen)	1	8 ± 1.7	520 ± 45	< 0.4	< 0.3	0.6 ± 0.1	0.92 ± 0.19 ⁵⁾
BE (Mürren) ¹⁾	1	390 ± 62	810 ± 69	< 0.3	< 0.2	< 0.3	7.30 ± 2.0 ³⁾
BE (Gimmelwald)	1	155 ± 24	390 ± 34	< 0.3	< 0.2	0.1 ± 0.05	3.30 ± 1.0 ³⁾
BE (Fahrni) ²⁾	2	145 ± 23 340 ± 53	900 ± 77 1'100 ± 94	< 0.4 < 0.5	< 0.3 < 0.3	0.83 ± 0.1 < 0.3	2.50 ± 0.6 ³⁾ 2.10 ± 1.0 ⁴⁾
BE (Diesse/Jura)	2	128 ± 20 113 ± 18	1'240 ± 100 1'510 ± 100	< 0.4 < 0.6	< 0.3 < 0.3	< 0.3 < 0.4	0.84 ± 0.19 ³⁾ 2.10 ± 1.70 ⁴⁾
BL (Sissach)	1	256 ± 13	609 ± 30	< 0.2	< 0.2	< 0.2	1.39 ± 0.56
FR (Posieux)	2	71 ± 11 370 ± 33	878 ± 71 944 ± 72	< 1.6 < 1.2	< 1.1 < 0.9	< 1.2 < 0.9	0.81 ± 0.17 ³⁾
GE (Voisinage CERN)	4	529 ± 67	649 ± 183	< 1.1	< 0.9	< 1.0	0.74 ± 0.16 ⁴⁾
TG (Göttingen)	2	89 ± 12 376 ± 36	1'030 ± 82 1'156 ± 91	< 1.5 < 1.6	< 1.1 < 1.2	< 1.2 1.5 ± 0.9	0.26 ± 0.07 ³⁾
Ti (Centovalli)	1	108 ± 7	518 ± 26	< 0.1	< 0.1	13.0 ± 0.8	5.37 ± 2.15
TI (Prato Leventina)	1	89 ± 9	926 ± 45	< 0.2	< 0.2	1.60 ± 0.5	1.11 ± 0.45
TI (Sessa)	1	200 ± 12	804 ± 43	< 0.1	< 0.1	0.66 ± 0.22	1.16 ± 0.46
TI (Cadenazzo)	2	186 ± 17 315 ± 30	910 ± 68 1'037 ± 79	< 0.8 < 1.1	< 0.7 < 0.9	< 0.7 < 0.9	0.50 ± 0.11 ³⁾
Ti (Stabio)	1	358 ± 33	575 ± 49	< 1.1	< 0.9	< 1.1	

n = nombre d'échantillons; ¹⁾ alpage (Allmendhubel); ²⁾ bord des Alpes, 850 m ; ³⁾ coupe de printemps; ⁴⁾ coupe d'automne, ⁵⁾ fourrage en hiver.



Radioactivité
dans l'alimentation

5

Radioaktivität
in Lebensmitteln

-
- Lait
 - Céréales
 - Légumes
 - Viandes
 - Chasse
 - etc.
 - Milch
 - Getreide
 - Gemüse
 - Fleisch
 - Wild
 - usw.

2024

5

Radioaktivität in Lebensmitteln

P. Steinmann, S. Estier

Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern
mit Daten und Angaben von

A. Pregler

Kantonales Laboratorium, Basel

C. Gemperle

Amt für Verbraucherschutz, Aarau

S. Nussbaumer, F. Stöht

Kantonales Laboratorium, Bern

R. Brogioli

Amt für Lebensmittelkontrolle und
Verbraucherschutz, Luzern

D. Baumann, S. Schmid

Amt für Lebensmittelsicherheit und
Tiergesundheit, Chur

N. Forrer, M. De Rossa

Laboratorio Cantonale, Bellinzona

S. Reber

Kantonales Labor, Zürich

R. Cusnir, P. Froidevaux, P.-A. Pittet, M. Straub

Institut de Radiophysique, Lausanne

G. Ferreri, A. Gurtner

Sektion Umweltradioaktivität, URA/BAG, Bern

Zusammenfassung

Insgesamt wurden 2024 etwa 290 Lebensmittelproben aus der Schweiz (Spezialkampagnen für Wildschweine nicht mitgezählt) sowie rund 200 importierte Lebensmittel auf Radioaktivität untersucht. Die Analysen fanden im Rahmen des BAG Probenahmeplans und von kantonalen Messkampagnen statt. In den Hauptnahrungsmitteln waren wie erwartet Spuren der künstlichen Radionuklide ^{137}Cs , ^{90}Sr und Tritium nachweisbar. Bei rund 5% der untersuchten Wildschweine aus dem Tessin lag der ^{137}Cs -Gehalt über dem Grenzwert von 600 Bq/kg. Damit war der Anteil konfiszierter Wildschweine vergleichbar mit den Vorjahren. Auch bei Wildpilzen konnten vereinzelt erhöhte ^{137}Cs Aktivitätskonzentrationen festgestellt werden (Maximum 478 Bq/kg). Eine Milchprobe aus dem Tessin zeigte immer noch gut messbare Spuren von ^{137}Cs (17 Bq/l).

Bei den importierten Lebensmittel waren die festgestellten Konzentrationen künstlicher Radionuklide im allgemeinen sehr tief und ohne Grenzwertüberschreitungen. Auch hier zeigten eine Wildprobe, Pilze und Wildbeeren die höchsten ^{137}Cs -Aktivitätskonzentrationen (Maxima: 178 Bq/kg, 126 Bq/kg, bzw. 183 Bq/kg). Bei allen anderen Proben waren die Konzentrationen von künstlichen Radionukliden sehr tief.

Ausser bei den Wildschweinen wurden keine Grenzwertüberschreitungen festgestellt.

Im Text werden die kantonalen Ämter mit «KL» gefolgt vom Kanton abgekürzt.

Messprogramm

Die Radioaktivität von Lebensmitteln wird von den Bundesstellen und den kantonalen Laboratorien gemeinsam überwacht. Die am häufigsten angewandten Untersuchungsmethoden sind Gammaspektrometrie sowie ^{90}Sr - und Tritium-Analytik. Der Probenahmeplan des BAG umfasst Messungen an den Hauptnahrungsmitteln Milch, Getreide und Gemüse. Die untersuchten Proben stammen sowohl aus der Umgebung von Kernanlagen und

Tritium-verarbeitender Industrie als auch aus davon entfernten Standorten. Darüber hinaus messen einige Kantone weitere Lebensmittel wie einheimische oder importierte Wildpilze, Früchte, Gewürze etc. Seit dem Reaktorunfall in Fukushima 2011 besteht für Lebensmittelimporte aus Japan ein spezielles Überwachungsprogramm mit Messungen von Stichproben. Informationen zu den Messungen der KL finden sich auch in deren Tätigkeitsberichten (siehe www.kantonschemiker.ch).

Höchstwerte für Lebensmittel

Die wichtigsten Höchstwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für Radioaktivität in Lebensmittel gelten in der Schweiz die Tschernobyl-Verordnung, die Verordnung über Trinkwasser, Bäder und Dusch-Anlagen (TBDV) sowie der Kontaminantenverordnung (VHK). Die Verordnung über die Einfuhr von Lebensmitteln aus Japan (817.026.2) wurde im August 2023 ausser Kraft gesetzt.

Die Tschernobyl-Verordnung gilt für Lebensmittel (einheimische Produkte und Importe), die aufgrund des Reaktorunfalls in Tschernobyl (1986) kontaminiert

niert sind. Die in der VHK festgehaltenen Höchstwerte würden nach einem radiologischen Unfall zur Anwendung kommen. In der TBDV übernimmt die Schweiz Richtwerte für Radioaktivitätsparameter aus der Richtlinie 2013/51/EURATOM für Trinkwasser.

Für die vergleichende Einordnung der Radioaktivität in Lebensmitteln bieten sich die abgeleiteten Konzentrationen (AK) aus der Trink-, Dusch- und Badewasser-Verordnung (TBDV) an; diese in Tabelle 1 fett dargestellten Werte liegen in der Grössenordnung der Toleranzwerte der 2017 ausser Kraft getretenen Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV).

Tabelle 1:
Höchstwerte für Radionuklide in Lebensmitteln (Bq/kg).

Parameter	Referenz	LM für Säuglinge u. Kleinkinder	Trinkwasser	Milch & Getränke auf Milchbasis	Flüssige LM (andere)	LM allgemein	LM geringer Bedeutung
Summe der Strontium-Isotope insbesondere ⁹⁰ Sr	VHK HG	75	125 ^a	125	125	750	7'500
	TBDV AK	-	4.9	-	-	-	-
Summe der Iod-Isotope insbesondere ¹³¹ I	VHK HG	150	500 ^a	500	500	2'000	20'000
	TBDV AK	-	6.2	-	-	-	-
Summe Plutonium- und Transplutonium-Isotope	VHK HG	1	20 ^a	20	20	80	800
	TBDV AK	-	0.1	-	-	-	-
Summe der Cäsium-Isotope ¹³⁴ Cs und ¹³⁷ Cs (VHK auch weitere künstliche Isotope)	T-V. HW	370	600	370	600	600	600
	VHK HG	400	1'000 ^a	1'000	1'000	1'250	12'500
	Japan HG	50	10	50	10 ^b	100 ^c	100
	TBDV AK	-	11	-	-	-	-
³ H, ²²² Rn	TBDV PW	-	100	-	-	-	-
Gesamtdosis	TBDV PW	-	0.1 mSv/a ^d	-	-	-	-

VHK: Kontaminantenverordnung, Anhang 10: Höchstgehalte (HG) für Radionuklide nach einem nuklearen Unfall oder einem anderen radiologischen Notfall. Die Verordnung tritt nach einem Ereignis in Kraft.

TBDV: Trink-, Bade- und Duschwasser-Verordnung mit Parameterwerten (PW) und aus der Gesamtdosis abgeleiteten Konzentrationen (AK). Eine Überschreitung erfordert weitere Abklärungen.

T-V.: Die Tschernobyl-Verordnung gilt für Lebensmittel, die aufgrund des Reaktorunfalls in Tschernobyl (1986) kontaminiert sind.

HG: Höchstgrenzen.

Japan: Japanische Grenzwerte, die auch für Importe in die EU und in die Schweiz aus den vom Reaktorunfall in Fukushima betroffenen Gebiete gelten (817.026.2 Verordnung des BLV).

^a) Mit der Revision vom 1.7.2020 gelten Höchstwerte der VHK auch für Trinkwasser.

^b) Für Tee gilt ein Zubereitungsfaktor von 50, d.h. die Höchstgrenze für trockene Teeblätter ist 500 Bq/kg.

^c) Für Pilze gilt ein Rekurrenzfaktor von 5, d.h. die Höchstgrenze für getrocknete Pilze ist 500 Bq/kg.

^d) Die TBDV gibt einen Parameterwert für die Gesamtdosis durch alle Radionuklide (ohne ³H, ²²²Rn und kurzlebige Radonfolgeprodukte).

Ergebnisse der Überwachung der Lebensmittel aus der Schweiz

^{137}Cs , ^{131}I und ^{90}Sr in Milch

2024 wurden rund 153 Milchproben gammaspektrometrisch analysiert. Für ^{137}Cs waren die meisten Werte tiefer als die Nachweisgrenze, die zwischen 0.02 Bq/l und 1 Bq/l lag. Ein einziger Messwert war grösser als 1 Bq/l. Er wurde bei einer Probe aus dem Centovalli festgestellt (17 Bq/l). Solche leicht erhöhten Werte in der Nähe des Parameterwertes für Trinkwasser (11 Bq/l) sind in den letzten Jahren sporadisch in Proben aus dem Tessin oder den Bündner Südtälern immer wieder aufgetreten. Diese geringfügig erhöhten Werte sind immer noch eine Folge der hohen ^{137}Cs -Depositionen nach dem Unfall von Tschernobyl in der Südschweiz. Alle Werte liegen deutlich unterhalb der Höchstgrenze von 600 Bq/l aus der Tschernobyl-Verordnung. ^{131}I konnte 2024 in keiner Milchprobe nachgewiesen werden (Nachweisgrenze meist < 1 Bq/l oder tiefer). Das KL-BS, das IRA in Lausanne und das LABOR SPIEZ untersuchten insgesamt 55 Milchproben auf ^{90}Sr . Alle gemessenen Werte waren sehr tief mit einem Maximum von 0.2 Bq/l und einem Median von <0.05 Bq/l. Als Vergleich können wir die abgeleitete Konzentration aus der TBDV (4.9 Bq/l) oder auch den in Japan gültigen Höchstwert (50 Bq/l) heranziehen.

^{137}Cs und ^{90}Sr in Getreide, Obst und Gemüse

Bei 18 Getreideproben und 23 Gemüse- und Obstproben aus der Schweiz konnte ^{137}Cs nicht nachgewiesen werden (Nachweisgrenzen typischerweise 0.4 Bq/kg). Je etwa die Hälfte der Proben stammte aus der Umgebung der Kernkraftwerke bzw. aus davon entfernten Gegenden. Ein Unterschied zwischen diesen beiden Probengruppen konnte nicht festgestellt werden.

Die Nachweisgrenzen sind sehr tief und liegen deutlich unter den strengsten Höchstwerten für Lebensmittel (10 Bq/kg, siehe Tabelle 1).

Die ^{90}Sr Werte der Getreideproben (n=18), sowohl aus der Umgebung von Kernkraftwerken als auch aus entfernten Gebieten, variierten zwischen 0.02 und 0.14 Bq/kg Frischgewicht; mit Durchschnitt = 0.08 Bq/kg. Diese tiefen, mit den Vorjahren vergleichbaren Werte sind noch Folgen der Kontamination mit ^{90}Sr aus den Atombombentests in den frühen 60er-Jahren. Die Werte liegen deutlich unter den in der VHK vorgesehenen Höchstwerten und auch unterhalb der aus dem Parameterwert abgeleiteten Konzentration für ^{90}Sr von 4.9 Bq/l aus der Trinkwasserverordnung (siehe Tabelle 1).

Sechs Gemüse- und Obstproben aus der Umgebung des KKL zeigten ^{90}Sr -Spuren zwischen 0.01 und 0.06 Bq/kg Frischgewicht. Sieben Gemüseproben aus dem Kanton

Waadt befanden sich in einem Bereich zwischen 0.02 und 0.21 Bq/kg ^{90}Sr .

Tritium (^3H) in Obst und Milch

Die genehmigten Abgaben an die Umwelt der Firma mb-microtec in Niederwangen verursachen lokal erhöhte Tritiumwerte im Niederschlag (siehe Kapitel 9.3). Als Folge davon ist Tritium in diesem Gebiet auch in Lebensmitteln nachweisbar. Die gemeinsam vom KL-BE und BAG jährlich durchgeführten Routinemessungen von Gemüse- und Obstproben aus der Umgebung der Firma 2024 ergaben Tritiumkonzentrationen (^3H) von 5 - 79 Bq/l im Destillat (12 Proben; Mittelwert: 25 Bq/l, Maximum 79 Bq/l). Die ebenfalls leicht erhöhte ^3H -Aktivität der Milch aus der Umgebung des genannten Betriebes (4 - 10.5 Bq/l im Destillat von 3 Milchproben) ist auf die Aufnahme von ^3H aus lokalen Futtermitteln zurückzuführen.

In 8 Milchproben aus der Umgebung des KKW Mühlberg konnten keine Werte > 5 Bq/l Tritium nachgewiesen werden. Für Tritium gibt es für diese Art Proben keinen gesetzlichen Höchstwert. Der Vergleich mit dem für Trinkwasser geltenden Parameterwertes für Tritium von 100 Bq/l zeigt, dass alle untersuchten Gemüse-, Obst- und Milchproben darunter liegen.

^{137}Cs in Wildschweinen

Der Kanton Tessin hat die in Zusammenarbeit mit dem BAG eingeführten Triagemessungen an Wildschweinen mit einem empfindlichen Dosisleistungsmessgerät im Jahr 2024 weitergeführt. Tiere, bei denen die Triagemessung (Dosisleistung) vor Ort einen zu hohen Wert anzeigte, wurden konfisziert. Dies war bei 38 von 785 untersuchten Tieren der Fall. Das entspricht, ähnlich wie in den letzten Jahren, einer Quote von ca. 5 %. Bei diesen Tieren liegt die ^{137}Cs Konzentration im Fleisch über dem Grenzwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg. Nachmessungen der Proben (Zunge) im Labor ergaben einen Höchstwert von 4'621 Bq/kg ^{137}Cs .

Im Kanton Graubünden wurde ein Wildschwein untersucht, ohne einen erhöhten ^{137}Cs Gehalt festzustellen.

Andere Lebensmittel aus der Schweiz

In 5 untersuchten Fischproben aus Aare und Rhein wurde in einer Spuren von ^{137}Cs festgestellt (2 Bq/kg Frischgewicht). In drei der Proben werden auch die Aktinide Plutonium, Americium und Curium gemessen. In keiner Probe konnten Spuren der Aktinide nachgewiesen werden, mit Nachweisgrenzen im Bereich von wenigen mBq/kg Frischgewicht. Diese Nachweisgrenzen liegen weit unterhalb der Grenzwerte. Für die Summe der Aktinide (Pu und Am) beispielweise würde bei Anwendung der VHK ein Grenzwert von 80'000 mBq/kg gelten.

Eine grössere Kampagne zu Pilzen hat das KL-TI durchgeführt. Bei den 42 untersuchten Proben betrug der Mittel-

wert für ^{137}Cs 45 Bq/kg mit einem Maximalwert von 478 bei einem Perlpilz. Das KL-GR untersuchte 5 Pilzproben aus Liechtenstein und berichtet einen Höchstwert von 23 Bq/kg ^{137}Cs (Mittelwert: 11 Bq/kg). Das KL Basel-Stadt hat 2 Proben einheimischer Pilze untersucht: 378 bzw. 73 Bq/kg ^{137}Cs waren nachweisbar. Der Grenzwert von 600 Bq/kg aus der Tschernobylverordnung wurde somit nicht erreicht.

Beeren und Konfitüren, vom KL-BS untersucht, ergaben zweimal messbare ^{137}Cs -Werte (46 und 35 Bq/kg); ^{90}Sr war in einer Konfitüre nachweisbar (1.25 Bq/kg).

Importierte Lebensmittel

Die Kontrolle der Radioaktivität in importierten Lebensmitteln findet im Rahmen von gemeinsamen Kampagnen des Bundes und der Kantonalen Laboratorien sowie von eigenen Kampagnen der Kantonalen Laboratorien statt. Im Berichtsjahr wurden 195 importierte Lebensmittel geprüft.

Die höchste Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs bei 24 vom KL-BS untersuchten, importierten Pilzen wurde mit 126 Bq/kg in einer Steinpilzprobe festgestellt. Der Mittelwert lag bei 26 Bq/kg. Der Höchstwert gemäss Tschernobyl-Verordnung von 600 Bq/kg wurde deutlich unterschritten.

Rund ein Dutzend Beeren und Konfitürenproben aus Europa wurden im Kanton Basel-Stadt erhoben. ^{137}Cs konnte in der Hälfte der Proben nachgewiesen werden (Maximum: 100 Bq/kg; Mittelwert: 25 Bq/kg). ^{90}Sr konnte ebenfalls nachgewiesen werden mit einem Maximum von 1.75 Bq/kg in Wildheidelbeeren aus Polen und einem Mittelwert von 0.7 Bq/kg.

Das KL-BS hat weiter 30 verschiedene Lebensmittel aus Osteuropa (Früchte, Bohnen, Paprika und andere) untersucht, die nur Spuren von ^{137}Cs (<0.3 Bq/kg) enthielten. In zwei dieser Proben war ^{90}Sr nachweisbar (0.6 Bq/kg). Von 20 Gewürz- und 5 Teeproben aus der Türkei, erhoben vom KL-BS, enthielten nur die Teeproben etwas ^{137}Cs (Maximum: 23 Bq/kg). Zwei der Tees ergaben auch ^{90}Sr Messwerte über der Nachweisgrenze (7 bzw. 10 Bq/kg). Schliesslich untersuchte das KL-BS 20 Kakaoproben und konnte in einigen Proben Spuren von ^{137}Cs nachweisen aber kein ^{90}Sr .

Das KL-ZH untersuchte 54 Importproben gammaskopimetrisch. Es handelt sich dabei um Tintenfisch, Paranuss, Mineralwasser und andere. Es konnten keine künstlichen Radionuklide festgestellt werden.

Das KL-TI hat 25 Proben von importiertem Wild analysiert, vor allem aus Deutschland, Österreich, Slowenien und Neuseeland. Erwartungsgemäss enthielten die Proben aus Europa etwas ^{137}Cs mit einem höchsten Wert von 178 Bq/kg.

Grenzwertüberschreitungen sind bei den importierten Lebensmitteln im Berichtsjahr 2024 nicht aufgetreten.

Bewertung der künstlichen Radionuklide

Der Grenzwert für ^{137}Cs der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg) wurde 2024 von 38 Wildschweinproben aus der Schweiz überschritten (Maximum 4'621 Bq/kg). Bezogen auf die Gesamtzahl untersuchter Proben machen diese Grenzwertüberschreitungen mit 5% der untersuchten Tiere ähnlich viel aus wie in den letzten Jahren. Das untersuchte Wildschweinfleisch aus der Jagd ist im Allgemeinen nicht für den Markt bestimmt. Tiere mit ^{137}Cs Gehalten über dem Grenzwert werden konfisziert.

Leicht erhöhte ^{137}Cs Werte, aber deutlich unter dem Grenzwerte der Tschernobyl-Verordnung, traten erwartungsgemäss auch in einheimischen Wildpilzen (Maximum 478 Bq/kg Frischgewicht) und importierten Pilz- (Maximum 126 Bq/kg) und Wildproben (Maximum 178 Bq/kg) auf. Ebenfalls erwartet war die gemessenen Spuren von ^{137}Cs in einer Milchprobe aus dem Tessin (17 Bq/l).

Bei allen anderen Lebensmitteln aus der Schweiz und bei den Importierten sind die Konzentrationen von künstlichen Radionukliden sehr tief und der Grenzwert für ^{137}Cs war eingehalten.

Bei starkem Konsum der am stärksten mit künstlichen Radionukliden belasteten Lebensmittel – Wild, Wildpilze und Wildbeeren – könnte eine Dosis von einigen wenigen Hundertstel mSv akkumuliert werden. Im Vergleich dazu liegen die jährlichen Dosen durch die über die Nahrung aufgenommenen natürlichen Radionuklide im menschlichen Körper (ohne Kalium) bei durchschnittlich rund 0.22 mSv.

Tabelle 2:

Effektive jährliche Dosis durch natürliche Radionuklide in Lebensmitteln.

Ausführliche Angaben und Referenzen siehe: Jahresbericht «Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2023», BAG 2024, (bag.admin.ch/ura-jb)

Lebensmittelgruppe	Jährlicher Konsum (kg)	Dosisrelevante Nuklide	Summe pro Lebensmittel (mSv, %)	
Getreide	66	^{210}Po , ^{210}Pb	0.026	12 %
Früchte	58	^{210}Po , ^{210}Pb	0.020	9 %
Wurzelgemüse + Kartoffeln	37	^{228}Ra	0.013	6 %
Andere Gemüse	53	^{210}Po , ^{210}Pb	0.019	8 %
Konsummilch	51	^{210}Po	0.009	4 %
Milchprodukte	69	^{210}Po , ^{210}Pb , ^{228}Ra	0.028	12 %
Fleisch	45	^{210}Po , ^{210}Pb	0.013	6 %
Innereien	0.7	^{210}Po	0.001	0 %
Eier	11	^{210}Po , ^{210}Pb , ^{228}Ra	0.003	1 %
Süßwasserfisch	1.8	^{210}Po , ^{228}Ra	0.004	2 %
Meerfisch	7.5	^{210}Po , ^{228}Ra	0.028	13 %
Krustentiere	1.3	^{210}Po	0.012	5 %
Weichtiere: Muscheln	0.4	^{210}Po	0.016	7 %
Weichtiere: Tintenfisch	0.2	^{210}Po	0.001	0 %
Andere: Pilze (Champignons)	3.4	^{210}Po , ^{210}Pb , ^{228}Ra	0.004	2 %
Andere: Pilze (Boletaceae)	0.6	^{210}Pb	0.004	2 %
Andere: Kräuter	1.0	^{210}Po	0.002	1 %
Andere: Zucker und Honig	36	^{210}Po , ^{228}Ra	0.018	8 %
Andere: Nüsse	4.4	^{210}Po , ^{228}Ra	0.003	1 %
Andere: Paranuss	0.03	^{228}Ra	0.001	1 %
				0.22 mSv total

Natürliche Radionuklide in der Nahrung

Natürliche Radionuklide aus den Zerfallsreihen von Uran und Thorium kommen in allen Lebensmitteln vor. Die geschätzte durchschnittliche jährliche effektive Dosis durch natürliche Radionuklide in Lebensmitteln für Erwachsene in der Schweiz beträgt 0.22mSv. (Tabelle 2). Die Radionuklide mit dem grössten Dosisbeitrag sind ^{210}Po , ^{210}Pb und ^{228}Ra .

Die jährliche Strahlendosis, die eine Person durch natürliche Radioaktivität in der Nahrung erhält, hängt stark vom individuellen Ernährungsverhalten. Für Personen mit hohem Konsum von Muscheln (1% der Schweizer Bevölkerung) erhöht sich die jährliche Strahlendosis durch natürliche Radionuklide in der Nahrung um 0.45 mSv oder mehr.

Bei Nahrungsmittel mit einem generell hohen Konsum sind die individuellen Unterschiede kleiner. Für Getreide und Getreideprodukte beispielsweise liegt die Dosis bei 0.026 mSv im Mittel und bei 0.073 mSv für starke Konsumenten.

Ein besonderer Fall sind die Paranüsse mit bekannt hohen Aktivitätskonzentrationen der Radiumisotope. Der durchschnittliche Verzehr von Paranüssen ist mit 30g pro Jahr gering und entspricht einer Jahresdosis von 0.001 mSv. Es ist aber wahrscheinlich, dass einzelne Personen deutlich mehr Paranüsse essen. Für einen hohen Konsum von 2 Paranüssen täglich (8 g) resultiert eine jährliche Strahlendosis von 0.16 mSv für Erwachsene.

Eine ausführliche Diskussion der Strahlendosis durch natürliche Radionuklide in Lebensmitteln findet sich im Jahresbericht «Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2023», BAG 2024, (bag.admin.ch/ura-jb).





Radioactivité
dans le corps
humain

6

Radioaktivität
im Menschen

- 
- ^{90}Sr , ^{210}Po und ^{226}Ra in menschlichen Wirbeln
 - Inkorporationsmessungen mittels Ganzkörperzähler
-
- ^{90}Sr , ^{210}Po et ^{226}Ra dans les vertèbres humaines
 - Mesures d'incorporation au corps entier

2024

6.1

Mesures de ^{90}Sr , ^{210}Po et ^{226}Ra dans les vertèbres humaines

R. Cusnir, P.-A. Pittet, P. Froidevaux, C. Pilloud, M. Straub

Institut de radiophysique (IRA), CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

Résumé

L'évolution dans le temps de la radioactivité mesurée dans les vertèbres humaines permet de fournir des informations essentielles pour comprendre l'impact sur la santé ainsi que pour évaluer la contamination de la chaîne alimentaire. En 2024, la collecte des vertèbres dans les instituts de pathologie a été poursuivie, 8 échantillons prélevés au Tessin et 3 échantillons du canton de Vaud ont été utilisés pour réaliser 10 analyses du ^{90}Sr , 6 du ^{210}Po et 4 du ^{226}Ra . Ces échantillons ont été collectés en conformité avec le plan de mesures de la radioactivité environnementale de l'OFSP.

Les niveaux d'activité en ^{90}Sr mesurés dans les vertèbres restent très faibles et ne dépassent pas 10 mBq g $^{-1}$ Ca. Les activités en ^{210}Po varient entre 6.4 et 22.0 mBq g $^{-1}$ Ca, tandis que celles en ^{226}Ra se situent entre 0.8 et 2.2 mBq g $^{-1}$ Ca et sont proches des valeurs obtenues les années précédentes (moyenne à 1.8 ± 1.0 mBq g $^{-1}$ Ca, n=38).

Introduction

Le ^{90}Sr , produit de la fission de l'uranium, est un marqueur important de l'activité nucléaire. Son évaluation dans divers compartiments de l'environnement, de la chaîne alimentaire et chez l'homme permet d'estimer le transfert et l'exposition à ce radionucléide, issu notamment d'événements radiologiques. Depuis les années soixante, l'IRA, sur mandat de l'OFSP, surveille le ^{90}Sr dans les vertèbres humaines, permettant ainsi une évaluation de la contamination de la chaîne alimentaire, étant donné sa similitude chimique avec le calcium.

Parallèlement, le ^{210}Po , produit de la désintégration de ^{238}U , est également suivi depuis une décennie. Sa mesure dans les vertèbres permet d'évaluer l'incorporation de

^{210}Pb , suivant le métabolisme du calcium [1], notamment par inhalation des produits de filiation du gaz ^{222}Rn et par ingestion alimentaire, particulièrement via les fruits de mer.

De même, la mesure de ^{226}Ra dans les os humains vise à établir une référence pour la population suisse, notamment en lien avec les héritages radiologiques industriels, tel que celui de l'industrie horlogère. Comme le ^{90}Sr , le ^{226}Ra , similaire au calcium, se dépose dans la masse osseuse, guidé par les voies métaboliques du calcium. L'objectif est de constituer une base de données pour la population non professionnellement exposée à ce radioélément.

Méthodes

Les méthodes d'analyses du ^{90}Sr et du ^{210}Po sont décrites dans les références [2] et [3]. La méthode d'analyse de ^{226}Ra est décrite en détail dans la référence [4]. Les concentrations en ^{90}Sr , ^{210}Po et ^{226}Ra déterminées dans les os sont rapportées comme mBq de radionucléide par g Ca de façon à prendre en compte les variations de la densité osseuse en fonction de la constitution de chaque individu.

en 2024 vient de dépasser une centaine, pour une moyenne à $26 \text{ mBq g}^{-1} \text{ Ca}$ et un écart-type à $20 \text{ mBq g}^{-1} \text{ Ca}$. L'incorporation de $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ est variable selon les personnes et dépend de plusieurs facteurs, dont les habitudes en matière de tabagisme [5] et d'alimentation, ainsi que l'exposition au ^{222}Rn . Dans le métabolisme humain, c'est le plomb qui cible préférentiellement la masse osseuse. On peut donc faire l'hypothèse que ^{210}Pb et ^{210}Po sont à l'équilibre radioactif dans ce compartiment du modèle biocinétique du polonium.

Résultats et discussion

Les analyses de ^{90}Sr dans les vertèbres humaines révèlent des valeurs stables et sans anomalie, en diminution constante depuis la fin des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans les années soixante (voir Figure 3 du chapitre 1.1). En 2024, l'activité moyenne en ^{90}Sr pour 10 échantillons de vertèbres humaines s'est établie à $5.6 \pm 1.8 \text{ mBq g}^{-1} \text{ Ca}$. Depuis 2015, cette valeur moyenne annuelle est inférieure à $10 \text{ mBq g}^{-1} \text{ Ca}$, alors que des valeurs supérieures à 100 mBq ont été mesurées en 1966 et 1967. Ces résultats suggèrent l'absence de nouvel apport de ce radionucléide dans l'environnement suisse. Malgré la faible magnitude des valeurs actuelles, l'incertitude, majoritairement inférieure à 30%, souligne la sensibilité de la mesure de ^{90}Sr .

Depuis plusieurs années nous analysons régulièrement l'activité en ^{210}Po des vertèbres humaines. Le nombre de cas recensés dans notre base de données

Un plan d'action radium a débuté en 2015 à la suite de la découverte de déchets issus d'anciennes activités horlogères et a pu être terminé en 2023, après la clôture des travaux de diagnostic et d'assainissement d'anciens ateliers utilisant des peintures au radium. Profitant de l'opportunité du programme de mesure de radioactivité dans les vertèbres humaines, nous avons inclus la mesure de ^{226}Ra .

Nos observations n'ont révélé aucune différence significative d'activité en ^{226}Ra entre les vertèbres (os trabéculaire) et les fémurs ou les os de la mâchoire (os cortical), suggérant que le ^{226}Ra est assimilé dans l'organisme de la même manière que le calcium, probablement principalement par l'alimentation (y compris les boissons).

En 2024, les activités mesurées étaient parfaitement cohérentes avec les mesures des années précédentes (moyenne 1.82 Bq/g Ca , écart-type 0.99 Bq/g Ca , $n = 38$) et n'ont pas indiqué d'exposition au ^{226}Ra autre que par des sources naturelles.

Tableau 1:

Activités en ^{90}Sr , ^{210}Po et ^{226}Ra , normalisées au calcium, dans les vertèbres de personnes décédées en Suisse en 2024. Incertitudes pour ($k=2$).

Lieu décès	^{90}Sr (mBq/g Ca)	^{210}Po (mBq/g Ca)	^{226}Ra (mBq/g Ca)
Magliaso	9.4 ± 2.3	22.0 ± 1.8	1.6 ± 0.2
Viganello	6.0 ± 1.6	11.4 ± 1.0	1.2 ± 0.1
	6.0 ± 1.7 4.7 ± 1.5	20.5 ± 1.6	0.8 ± 0.1
Novaggio	3.6 ± 1.1	6.4 ± 0.6	
Locarno	6.9 ± 1.8	20.6 ± 1.6	
Giubiasco	5.3 ± 1.5		
Giumaglio		22.0 ± 1.7	
Lugano			
Lausanne	2.9 ± 1.1		2.2 ± 0.3
	4.5 ± 1.6		
	6.1 ± 1.8		
	5.6 ± 1.8 (n = 10)	17.2 ± 6.6 (n = 6)	1.2 ± 0.6 (n = 4)

Conclusions

Les mesures de radioactivité effectuées sur les vertèbres humaines en 2024 n'ont pas révélé d'exposition à des niveaux d'activité pouvant poser un problème en termes de dose reçue par le public suisse. Les activités en ^{226}Ra et ^{210}Po reflètent une exposition naturelle à ces radioéléments, principalement par ingestion alimentaire.

L'intégration de la mesure de différents radioéléments d'importance dosimétrique dans les analyses de routine du plan national de surveillance de la radioactivité permet l'acquisition de données précieuses pour une utilisation future. Malgré la contrainte temporelle liée au prélèvement d'échantillons humains, il est essentiel de maximiser l'information extraite de ces échantillons, compte tenu de leur disponibilité limitée.

La constitution de bases de données statistiquement représentatives de l'exposition naturelle de la population suisse à ces radioéléments est cruciale pour permettre une réaction rapide en cas de situations exceptionnelles.

Remerciements

Nous remercions les instituts de pathologie de Locarno et de Lausanne pour la collecte des vertèbres.

Références

- [1] Legett, RW. An age-specific kinetic model for lead metabolism in human. Env. Health Perspect. 1993, 101, 598-616.
- [2] Schrag et al. Dating human skeletal remains using a radiometric method: Biogenic versus diagenetic ^{90}Sr and ^{210}Pb in vertebrae. Forensic Sci. Int. 2012, 220, 271–278.
- [3] Froidevaux et al. Retention half times in the skeleton of plutonium and ^{90}Sr from above-ground nuclear tests: A retrospective study of the Swiss population. Chemosphere, 2010, 80, 519-524.
- [4] Straub et al. Determination of ^{226}Ra at low levels in environmental, urine, and human bone samples and ^{223}Ra in bone biopsy using alpha-spectrometry and metrological traceability to $^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ra}$ or ^{226}Ra . Anal. Chim. Acta, 2018, 1031, 178-184.
- [5] Desorger et al. Dosimetry in the lung of alpha-particles (^{210}Po) and beta-particles (^{210}Pb) present in the tobacco smoke of conventional cigarettes and heated tobacco products. J. Environ. Radioact. 2023, 263, 107178.

6.2

Inkorporationsmessungen mittels Ganzkörperzähler

R. Althaus, S. Kradolfer

Fachbereich Nuklearchemie, Labor Spiez

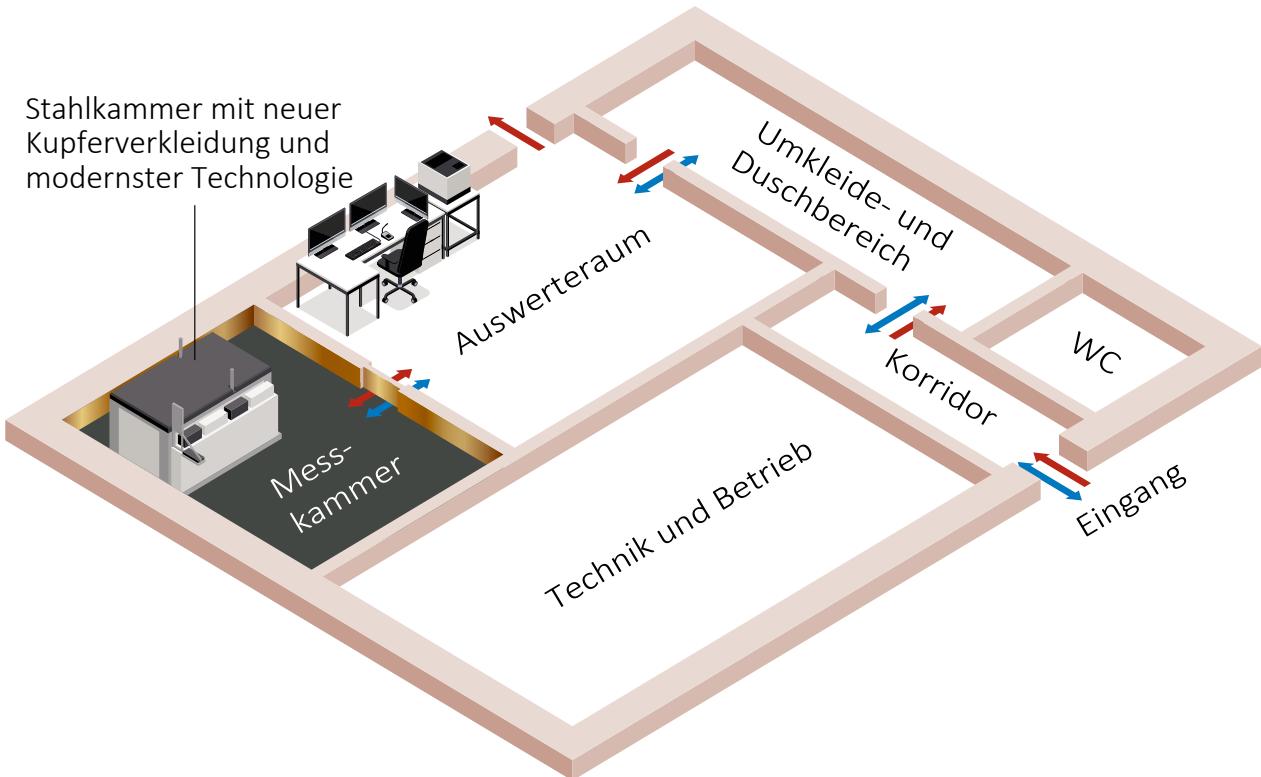
Zusammenfassung

Im Jahre 2023 wurde das Gebäude GZ eingeweiht, welches die Inkorporationsmessstelle des Labor Spiez beheimatet. Die Messtechnik besteht aus einem sogenannten Ganzkörperzähler in einem abgeschirmten Raum, der Gammastrahlung messen kann. Dies erlaubt es nicht-invasiv Radionuklide im Körper eines Menschen zu bestimmen und mittels Modellrechnungen deren Menge zu ermitteln. Neu werden seit 2024 ca. 50 Personen pro Jahr im Rahmen des URA-Überwachungsprogramms ausgemessen. Diese setzen sich grossmehrheitlich aus Mitarbeitern des Labor Spiez und Angehörigen der Armee aus den ABC Abwehr Kompanien zusammen. Die erhobenen Daten werden durch das BAG gesammelt und können im Ereignisfall als Vergleichswerte dienen.

Inkorporationsmessungen im Labor Spiez

Mit dem Neubau des Gebäudes für den Ganzkörperzähler im Labor Spiez konnte die vom Bundesamt für Gesundheit extern aufbewahrte Stahlkammer des Universitätsspitals Basel wieder für Inkorporationsmessungen eingesetzt werden. Die Stahlkammer aus Stahl mit geringer Eigenaktivität erstrahlt seit 2023 in einem neuen Glanz. Im Innenbereich fallen die Kupferverkleidung und die schlichte Ausführung des Ganzkörperzählers auf. Das Gebäude am Rande des Areals des ABC Zentrum Spiez mit direktem Zugang zur Strasse ist für unterschiedliche Nutzungsszenarien ausgelegt. Im Normalbetrieb können Einzelpersonen direkt begrüßt werden und die Räumlichkeiten lassen eine individuelle Vorbereitung, wie Umkleidung oder allfällige Dekontamination, zu. Im Herbst 2024 erfolgte dazu die Anerkennung der Inkorpora-

tionsmessstelle für die nächsten vier Jahre durch das Bundesamt für Gesundheit. Bei einem grossen Ereignis kann das Gebäude zusammen mit der naheliegenden Mehrfachturnhalle als Ergänzung der mobilen Messmöglichkeiten des Labor Spiez für grösserer Menschenmengen genutzt werden. Eine grossangelegte Übung im Sommer 2024 mit Soldaten im Wiederholungskurs der ABC Abwehr Kompanie zeigte auf, dass bei einer Messzeit von drei Minuten, bis zu 17 Personen pro Stunde ausgemessen werden können.



Figur 1:

Schematischer Grundrissplan des Gebäudes mit Raumfunktionalitäten. Der blaue Bereich wird durch die Besucher/innen entlang der Pfeile betreten (blaue Pfeile: Normalfall, rote Pfeile: Ereignis).

Ziel der Messungen

Anhand von Ganzkörpermessungen kann die Aktivität oder Menge von Gammastrahlung emittierenden Radionukliden im Körper bestimmt werden.

Von Interesse sind vor allem künstliche Radionuklide, welche durch den Menschen in die Umwelt abgegeben werden. Bekannte Beispiele sind die oberirdischen Kernwaffentests und Störfälle in Kernkraftwerken. Über die Atemwege oder die Nahrungskette werden die Radionuklide im Körper aufgenommen (inkorporiert) und führen zu einer Strahlendosis. Die gemessene Aktivität bildet eine Grundlage zur Bestimmung dieser Dosis, welche ein Mass für die Effekte und gesundheitliche Wirkung der Stoffe im Körper ist.

Jeder menschliche Körper enthält Kalium und somit auch das natürlich vorkommende radioaktive Isotop ^{40}K . Mit jeder Ganzkörpermessung kann also auch der Kalium-Gehalt des Körpers bestimmt werden.

Messmethode

Im Bett des Ganzkörperzählers befinden sich zwei Reinstgermanium-Detektoren, welche Gammastrahlung messen. Die Messzeit im Rahmen des Überwachungsprogramms dauert 20 Minuten, in welcher das Signal aufsummiert wird. Die Kalibrierung zur Quantifizierung erfolgt anhand verschiedener Referenz-Körpern mit bekannter Aktivität, sogenannte Phantome. Für die Zuordnung einer Person zu einem Kalibrier-Phantom wird nebst dem Gewicht auch die Größe berücksichtigt.

Erste Erfahrungen

Im 2024 konnten 53 Freiwillige im Alter von 11 - 63 Jahren auf dem Ganzkörperzähler ausgemessen werden, darunter waren auch vier Jugendliche (11 - 13 Jährige), welche das Labor Spiez im Rahmen des Zukunftstages besuchten. Bei keiner Person konnten künstliche Radionuklide nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze für ^{137}Cs variierte je nach Messung zwischen 20 Bq und 68 Bq und lag im Mittel bei 40 Bq. Der ^{40}K Gehalt variierte je nach Gewicht,

Grösse, Geschlecht und Alter zwischen 2'000 und 6'200 Bq pro Person. Die derzeitige Messstrategie für das URA-Programm mit einer Messzeit von 20 Minuten ergibt typische Messunsicherheiten von beinahe 20 % ($k=2$), welche deutlich grösser als bei

Systemen mit grossvolumigen Natriumiodid-Kristallen ist. Die ersten Resultate stimmen innerhalb der Unsicherheiten gut mit der Langzeitstudie am Kantonsspital Genf¹ überein.



Figur 2:

Herzstück des neuen Gebäudes: Die «alte» Stahlkammer mit neuer Kupferverkleidung und modernster Technologie. Zum Ausmes- sen legen sich die Besucher/innen auf die gepolsterte Fläche. Die blauen Reflexionen an der Wand deuten die Positionen der beiden Reinstgermanium-Detektoren unterhalb der Liegefläche an. Diese werden je nach Grösse und Gewicht der zu messenden Person platziert.

¹ BAG Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2016, Mme. S. Namy, K. Jeandet,

Mesures de nucléides spéciaux

7

^{14}C

Messung von Spezialnukliden



Kr

Pu

Am

- Carbone-14
- Krypton-85
- Argon-37
- Plutonium
- Américium

- Kohlenstoff-14
- Krypton-85
- Argon-37
- Plutonium
- Americium

2024

7.1

Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37

R. Purtschert und T. Wagner

Abt. Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut Universität Bern, Sidlerstrasse 5, Bern

S. Szidat, M. Staub

Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie, Universität Bern, Freiestrasse 3, Bern

C. Schlosser †, A. Bollhöfer, M. Konrad und S. Schmid

Bundesamt für Strahlenschutz, Rosastrasse 9, Freiburg im Breisgau

M. Heule

Paul Scherrer Institut, Villigen PSI

Zusammenfassung

Die Messungen des Gehalts an Kohlenstoff-14 (^{14}C) im Laub von Bäumen aus der Umgebung von Kernkraftwerken (Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg), Kehrichtverbrennungsanlagen (Bern, Lausanne und Zürich-Hagenholz), des Paul Scherrer Instituts und an verschiedenen Standorten der Stadt Basel wurden 2024 weitergeführt. Als Referenzwert diente hierbei der ^{14}C -Gehalt von Laubbäumen an drei Standorten ohne lokale ^{14}C -Quellen und -Verdünnungen, an denen im Jahresverlauf je drei Messungen (im Mai, August und Oktober 2024) durchgeführt wurden. Aus diesen Messungen resultierte für 2024 der $\Delta^{14}\text{C}$ -Referenzwert $-12 \pm 3\%$.

Die 83 auf ^{14}C untersuchten Standorte unterscheiden sich um -13% (Basel Stadt, Standort W-42 beim Badischen Bahnhof) bis maximal $+163\%$ (Kernkraftwerk Leibstadt, Standort Fullerfeld) von diesem Referenzwert. Im Raum Basel lag der Netto-Höchstwert bei knapp 3% (Standort E-06, E-34A, E-36). Der Grossteil der übrigen Standorte in Basel wies Messwerte $<0\%$ auf. Selbst die Maximalwerte entsprechen einer zusätzlichen Strahlendosis für die Bevölkerung von nicht mehr als $1 \mu\text{Sv}$ ($1 \mu\text{Sv} = 10^{-6}$ Sievert) in einem Jahr. Im Vergleich zur natürlichen Strahlenbelastung von ca. $4'500 \mu\text{Sv/a}$ fallen die gemessenen geringfügigen Erhöhungen im Berichtsjahr nicht ins Gewicht.

Die beiden Edelgas-Radionuklide Krypton-85 (^{85}Kr) und Argon-37 (^{37}Ar) werden in der Atmosphäre auf natürliche Weise nur in sehr geringen Mengen produziert. Zurzeit verharrt die Aktivitätskonzentration von ^{85}Kr auf konstantem Niveau. Die aktuellen Konzentrationen von ^{37}Ar sind praktisch nicht von künstlichen Quellen beeinflusst. Beide Isotope verursachen keine signifikante Erhöhung der jährlichen Strahlendosis.

Kohlenstoff-14 (^{14}C)

Die ^{14}C -Messungen im Berichtsjahr wurden von den beiden Radiocarbonlaboren der Universität Bern durchgeführt: dem ^{14}C -Labor der Klima- und Umweltphysik (KUP) des Physikalischen Instituts und/oder dem Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff mit AMS, LARA (AMS: accelerator mass spectrometry) des Departements für Chemie, Biochemie und Pharmazie.

Referenzwert

Zwischen 1955 und 1966 wurden im Rahmen von Nuklearwaffentests grosse Mengen an $^{14}\text{CO}_2$ in der Atmosphäre freigesetzt (so genannter Bomben-Peak). Der ^{14}C -Gehalt von atmosphärischem CO_2 nahm seitdem durch Aufnahme von $^{14}\text{CO}_2$ durch die Ozeane und Verbrennung fossiler, d. h. ^{14}C -freier, Brennstoffe weltweit wieder ab. Mittlerweile hat dieser Gehalt den als Basis für die Radiocarbonatierung definierten Standardwert für das Jahr 1950 unterschritten:

$$^{14}\text{A}_0 = (13.56 \pm 0.07) \text{ dpm/gC} = (0.226 \pm 0.001) \text{ Bq/gC} \quad (1)$$

Auf lokaler Ebene lässt sich eine als «Suess»- oder «Industrie»-Effekt bekannte Verdünnung des atmosphärischen $^{14}\text{CO}_2$ nachweisen. Der von terrestrischen Pflanzen durch Assimilation aufgenommene Kohlenstoff spiegelt in seinem ^{14}C -Gehalt im Wesentlichen den zeitlichen Verlauf der atmosphärischen $^{14}\text{CO}_2$ -Konzentration wider.

Radiocarbon-Quellen (KKW und Pharma) und -Verdünnungen (KVA, Industrie, Strassenverkehr) können den ^{14}C -Gehalt bei Knospen und Laub von Bäumen, die in deren Umgebung wachsen, insbesondere während der Blattwuchsphase beeinflussen. Laub und Knospen eignen sich somit als Monitor von atmosphärischem $^{14}\text{CO}_2$.

Die für diesen Bericht gemessenen ^{14}C -Werte werden mit dem Radiocarbonstandard $^{14}\text{A}_0$ verglichen:

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{Probe}} = \left(\frac{^{14}\text{A}_{\text{Probe}}}{^{14}\text{A}_0} - 1 \right) \cdot 1'000 [\text{\%}] \quad (2)$$

Sinnvoll ist auch ein Vergleich mit ^{14}C -Werten von Laub, welches von Bäumen ohne lokale ^{14}C -Quellen oder Verdünnungen stammt. Zu diesem Zweck wurden an drei ländlichen Standorten Buchen- bzw. Lindenblätter gesammelt. Ihr ^{14}C -Gehalt wurde bestimmt und nach (2) mit $^{14}\text{A}_0$ verglichen (Figur 1). Aus den resultierenden $\Delta^{14}\text{C}$ -Werten wurde für die Zeit der Hauptprobenahmen 2024 ein Referenzwert für Laub in ungestörter Umgebung definiert. Als Basis hierzu dienten die im Mai, August und Oktober gesammelten Blätter.

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref}, 2024} = -12 \pm 3 [\text{\%}] \quad (3)$$

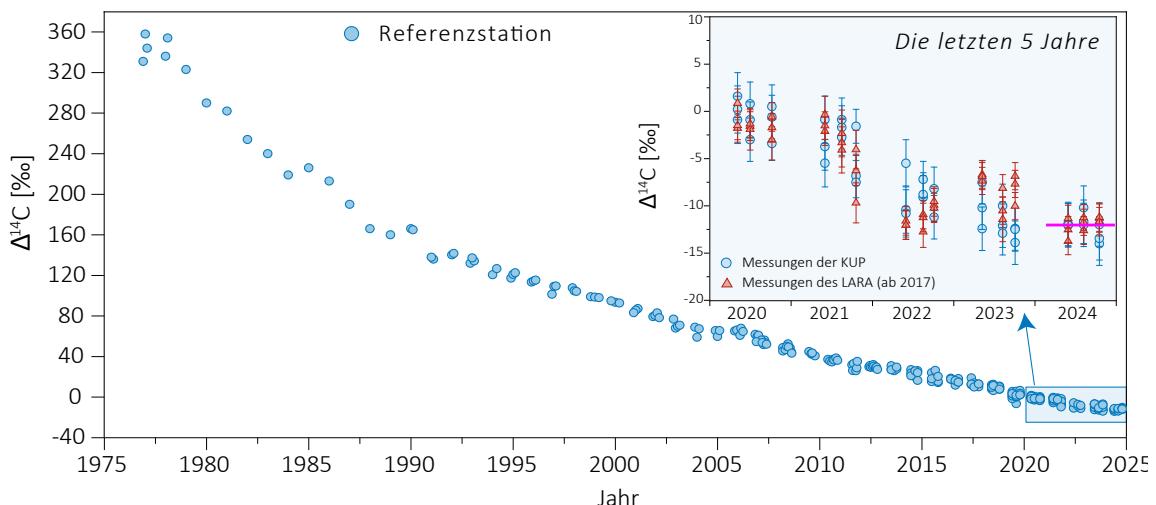
Die Differenz

$$\text{Netto } \Delta^{14}\text{C} = \Delta^{14}\text{C}_{\text{Probe}} - \Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref}, 2024} \quad (4)$$

weist auf ^{14}C -Quellen ($\text{Netto } \Delta^{14}\text{C} > 0$) oder -Verdünnungen ($\text{Netto } \Delta^{14}\text{C} < 0$) hin.

Tabelle 1:
Messwerte 2024 und Koordinaten der Referenzstationen für Laubmessungen

Ort	Labor	$\Delta^{14}\text{C} [\text{\%}]$			Koordinaten	[m.ü.M.]	Baumart/Standort
		Mai	Aug.	Okt.			
Taanwald	KUP	- 12	- 12	- 14	601'320 / 186'150	938	Rotbuchen im Wald
	LARA	- 13	- 13	- 11			
Belpberg	KUP	- 12	- 12	- 13	606'096 / 190'600	825	Rotbuchen auf Krete
	LARA	- 14	- 12	- 11			
Ballenbühl	KUP	- 12	- 10	- 12	612'550 / 192'800	852	2 Linden, freistehend
	LARA	- 11	- 11	- 12			



Figur 1:
 ^{14}C -Konzentrationen in Buchen- und Lindenblättern von den Referenzstationen. Die magentafarbene Linie zeigt den bestimmten Referenzwert während der Vegetationszeit.
Kreise in der Detailansicht: Messungen der KUP. Dreiecke (ab 2017): Messungen des LARA.

Aufbereitung von Laubproben für die ^{14}C -Messung

Es kommen zwei unterschiedliche Methoden zur Anwendung:

- *Methode A:* ^{14}C -Bestimmung nur in der Blattkohle¹
- *Methode B:* ^{14}C -Bestimmung im ganzen Blatt

An den Referenzstationen ergaben Messungen der Blattkohle (Methode A) im Vergleich zu Messungen am ganzen Blatt (Methode B) Unterschiede von weniger als 5%. An belasteten Standorten können die Unterschiede zwischen den Resultaten der nach den Methoden A und B aufbereiteten Proben jedoch grösser sein.

Im Radiocarbonlabor der KUP wird zur Aufbereitung von Laubproben seit 2021 ausschliesslich Methode A verwendet. Das LARA am Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie bereitet sowohl Holz- als auch Laubproben im Allgemeinen nach Methode B auf. Zur Ermittlung des Referenzwertes wurde von beiden Labors Methode A verwendet.

Der ^{14}C -Gehalt von Blättern der Referenzstationen ist im Jahr 2024 gegenüber dem Vorjahr weiter gesunken. Mit $-12 \pm 3\text{\%}$ (gerundeter Mittelwert aller in Tabelle 1 dargestellten Messergebnisse) liegt der Referenzwert um 2% unter dem Niveau von 2023.

^{14}C im Umfeld der Schweizer Kernkraftwerke

Gemäss Jahresrückblick des Eidgenössischen Nuklear-sicherheitsinspektorats ENSI [1] wurden die Schweizer Kernkraftwerke im Jahr 2024 sicher betrieben. Es traten zwei automatische Schnellabschaltungen auf: je eine im Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) und eine im Kernkraftwerk Beznau I.

Das Kernkraftwerk Mühleberg, dessen Leistungsbetrieb am 20. Dezember 2019 eingestellt wurde, gilt seit dem 15. September 2020 als endgültig ausser Betrieb genommen. Rückbau und Stilllegung sollen im Jahr 2034 abgeschlossen sein. Die ^{14}C -Messungen im Umfeld des Kernkraftwerks werden aber auch während des Rückbaus noch einige Jahre fortgesetzt.

Die Laubprobenahmen im Umfeld der noch im Leistungsbetrieb befindlichen Kernkraftwerke erfolgten im Allgemeinen während oder nach der jeweiligen Jahresrevision, um auch mögliche ^{14}C -Abgaben während des Revisionsstillstands erfassen zu können. Eine Ausnahme bildet das Kernkraftwerk Leibstadt (siehe folgenden Abschnitt). Die Messungen erfolgten im Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff mit AMS (LARA) am Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie der Universität Bern. Im Allgemeinen wurden ganze Blätter analysiert (Methode B).

¹ Die Probe wird im Stickstoffstrom pyrolysiert. Dabei können sich gewisse Kohlenstoffverbindungen verflüchtigen, die somit für die Analyse ihres ^{14}C -Gehaltes verloren sind.

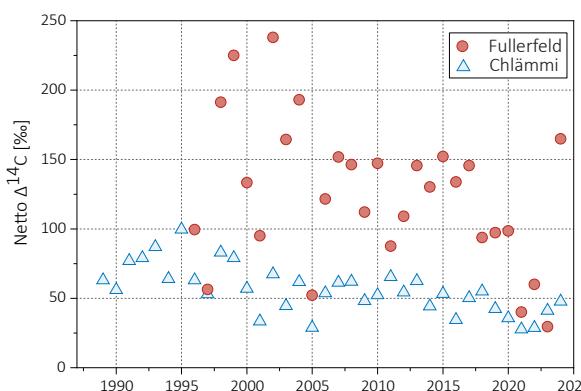
Kernkraftwerk Leibstadt

Im Umfeld des Kernkraftwerks Leibstadt (KKL) wurden im Jahr 2024 zwei Probenahmen durchgeführt: die erste am 23. April vor der Jahresrevision, die vom 29. April bis 31. Mai 2024 terminiert war, und eine zweite am 19. September nach Abschluss der Revision. Es wurden Blätter von Laubbäumen an verschiedenen Standorten in beiden Hauptwindrichtungen gesammelt und auf ihren ^{14}C -Gehalt hin untersucht. Die Blätter der ersten Probenahme wurden von der KUP, die der zweiten vom LARA gemessen. Dabei wurden die z. T. seit 1984 geführten Zeitreihen fortgesetzt. Die höchste ^{14}C -Konzentration mit einer Erhöhung von +163‰ ergab sich in ca. 1.5 km Distanz vom KKL in nordöstlicher Richtung am Standort Fullerfeld (Figur 2). In südwestlicher Richtung wies der Standort Schiessplatz mit +51‰ den höchsten Wert auf.



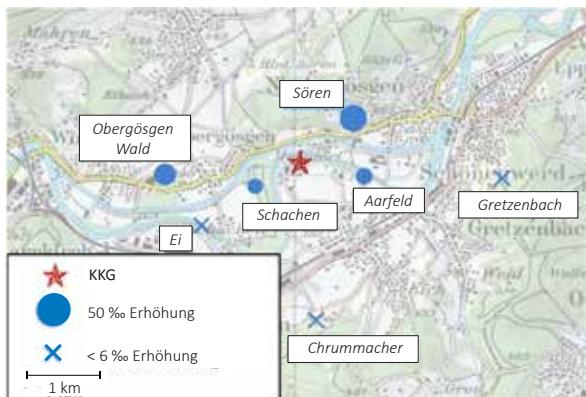
Figur 2:

Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Leibstadt (KKL) im Jahr 2024. Revisionsabschaltung: 29.04.2024 bis 31.05.2024. Probenahme: 19.09.2024. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.

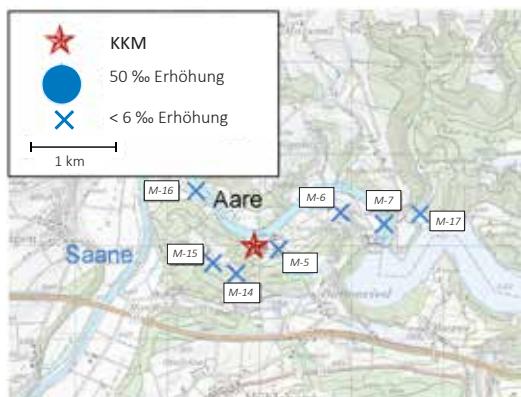


Figur 3:

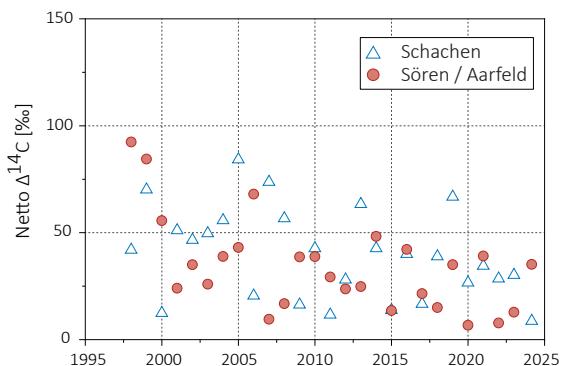
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte nordöstlich (●) und südwestlich (△) des Kernkraftwerkes Leibstadt. Der Standort Fullerfeld wird seit 1996, derjenige von Chlämmi seit 1989 beprobt (Standorte: siehe Figur 2). Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.



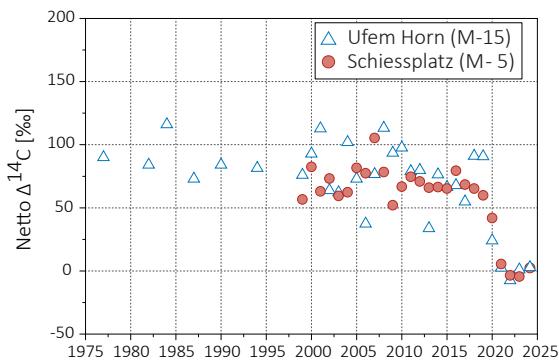
Figur 4:
Örtliche Verteilung der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Druckwasserreaktors Gösgen (KKG). Revisionsabschaltung: 25.05.2024 bis 24.06.2024. Probenahme: 25.06.2024. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 6:
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Mühleberg (KKM) im Jahr 2024. Probenahme: 05.09.2024. Es wurden keine oder nur sehr geringe Erhöhungen des ^{14}C -Gehalts gegenüber den unbelasteten Referenzstationen festgestellt.



Figur 5:
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (●) und westlich (△) des Kernkraftwerkes Gösgen. Standorte: siehe Figur 4.



Figur 7:
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (●) und westlich (△) des Kernkraftwerkes Mühleberg seit Messbeginn. Standorte: siehe Figur 6. Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.

In der folgenden Abbildung sind die Messergebnisse der zweiten Probenahme dargestellt. Die Differenz der Ergebnisse der beiden Probenahmen war im Allgemeinen gering, nur am Standort Schlüsselgraben lagen die Messergebnisse der ersten Probenahme deutlich über den Werten der zweiten Probenahme.

Figur 3 zeigt die Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte der Standorte Fullerfeld und Chlämmi seit Messbeginn. Es sind dies die beiden Standorte mit den traditionell höchsten Werten in der jeweiligen Windrichtung. Der grösste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert seit Messbeginn beträgt 238 % und stammt vom Standort Fullerfeld (2002).

Kernkraftwerk Gösgen

In Figur 4 sind die Resultate der am 25. Juni 2024 gesammelten Blattproben in der Umgebung des Kernkraftwerks Gösgen (KKG) dargestellt. Der höchste ^{14}C -Messwert westlich vom KKG resultierte mit einer Erhöhung von 23% am Standort Obergösgen Wald, in östlicher Richtung mit 34% am Standort Sören.

In Figur 5 sind die z. T. seit Messbeginn ermittelten höchsten Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte aufgeführt. Werte >100 % wurden in dieser Zeitspanne nie festgestellt. Höchstwerte resultierten in der Regel in ähnlicher Distanz zum Kraftwerk, jedoch nicht immer in derselben Windrichtung.

Kernkraftwerk Mühleberg

Die Beprobung des mittlerweile ausser Betrieb genommenen Kernkraftwerks Mühleberg (KKM) wurde auch im Jahr 2024 fortgesetzt. Der ^{14}C -Gehalt aller beprobten Standorte entsprach im Jahr 2024 in etwa dem der Referenzstationen: der tiefste Wert mit -3‰ im Vergleich zum Referenzwert stammte vom Standort Rewag, der höchste Wert mit 2.5‰ über dem Referenzwert wurde an Laub vom Standort Runtigenrain gemessen.

In Figur 6 sind die Ergebnisse der Probenahme dargestellt. An keinem der beprobten Standorte wurden Erhöhungen des ^{14}C -Gehalts um über 6‰ gegenüber dem Referenzwert festgestellt.

In Figur 7 sind die seit Messbeginn jährlich gemessenen höchsten Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte aufgeführt. Die Messwerte weichen seit der Stilllegung des Kernkraftwerks um nur wenige Promille von den Referenzwerten ab.

Paul Scherrer Institut, Zentrales Zwischenlager Würenlingen, Kernkraftwerk Beznau

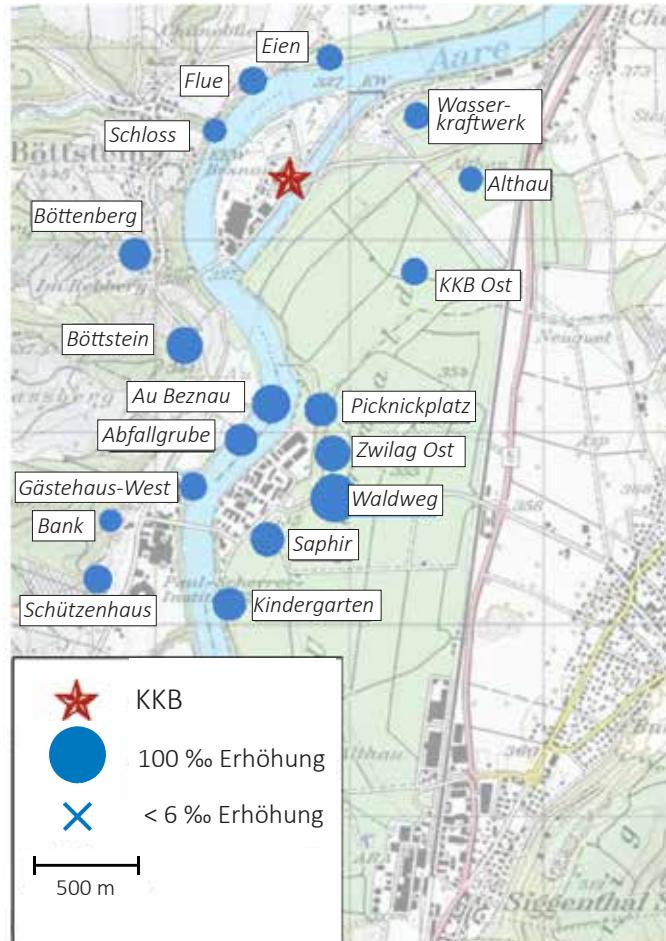
Auch im Jahr 2024 wurden die zu diesen Standorten gehörenden ^{14}C -Messungen im Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff mit AMS (LARA) des Departements für Chemie, Biochemie und Pharmazie der Universität Bern durchgeführt, wobei die Probenahme durch die KUP mit Unterstützung des PSI erfolgte. Die Messwerte im Umfeld des PSI und ZWILAG lagen im Jahr 2024 tendenziell über den Werten des Vorjahrs: sämtliche beprobten Standorte wiesen Erhöhungen von mehr als 6‰ gegenüber den unbelasteten Referenzstandorten auf. Die grösste Erhöhung (70‰) wurde am Standort Waldweg gemessen.

In Figur 9 sind Zeitreihen der Standorte aufgeführt, für die historisch gesehen die höchsten Messwerte ermittelt wurden.

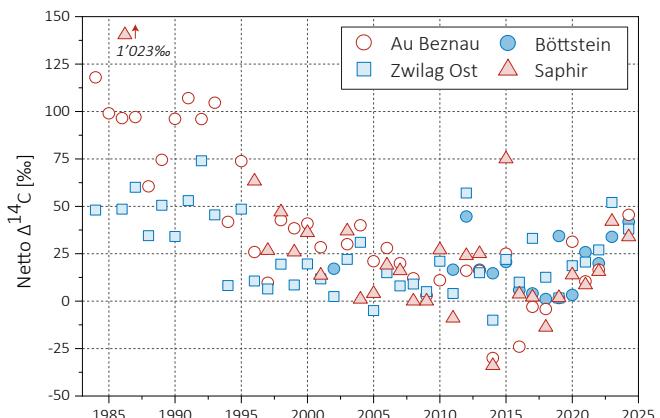
Kehrichtverbrennungsanlagen

KVA Bern

In Blättern von Bäumen, die am 05. September 2024 an vier Probenahmestellen im Umfeld der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) Bern Forsthaus gesammelt wurden, konnte praktisch keine erhöhte ^{14}C -Konzentration festgestellt werden. Die meisten Werte lagen deutlich unter dem Referenzwert von 12‰, nur im Bremgartenfriedhof (Standort B-3) wurde eine geringe Erhöhung um +0.1‰ gemessen. Im Gegensatz zu Blättern, die im Umfeld der Kernkraftwerke gesammelt wurden, findet im



Figur 8:
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Paul Scherrer Instituts (PSI), des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen (ZWILAG) und des Kernkraftwerks Beznau (KKB) im Jahr 2024. Revisionsabschaltung KKB I: 26.04.2024 bis 10.06.2024, KKB II: 06.08.2024 bis 19.08.2024. Probenahme: 19.04.2024. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 9:
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (■▲) und westlich (●○) des PSI/Zwilag sowie des Kernkraftwerkes Beznau seit Messbeginn. Standorte: siehe Figur 8. Im Jahr 2024 trat der höchste Messwert jedoch nicht an einer dieser Stellen, sondern am Standort Waldweg auf. Messungen bis 2016: KUP (Standort Böttstein) und PSI. Messungen 2017 bis 2019: LARA (Standort Böttstein) und PSI. Messungen ab 2020: LARA.

Stadtgebiet eine Verdünnung (oder Absenkung) der ^{14}C -Konzentration gegenüber den Referenzstationen statt. Dies ist eine Folge der Abgase von ^{14}C -freien, fossilen Brenn- und Treibstoffen, welche von den Bäumen aufgenommen werden (siehe «Suess»-Effekt weiter oben).

In Figur 10a sind oben die vier Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen dargestellt.

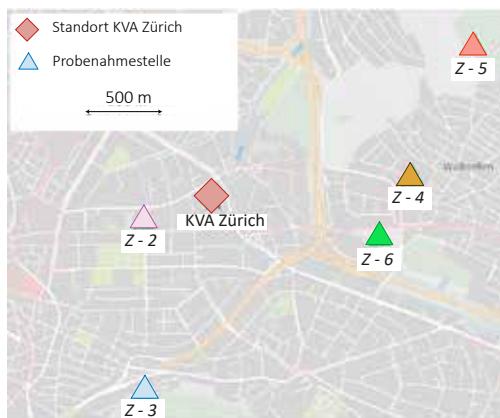
KVA Lausanne

Am 20. August 2024 wurden fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Lausanne beprobt. Nur im Park am Standort Ermitage wurde ein geringe Erhöhung der ^{14}C -Konzentration festgestellt. Die übrigen Werte lagen unter dem Referenzwert.

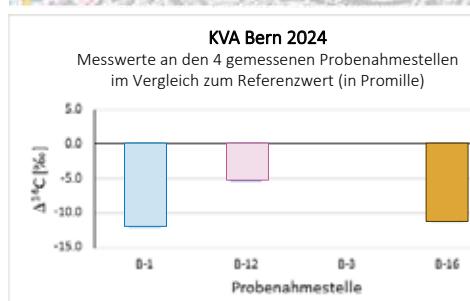
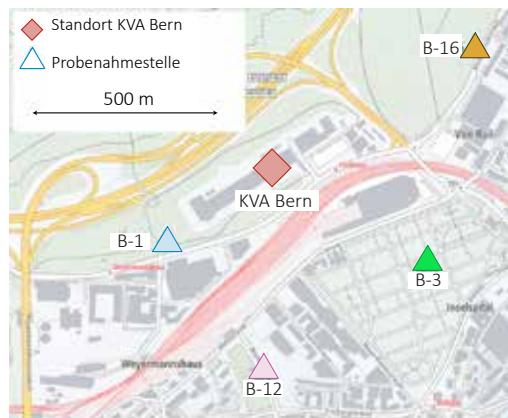
In Figur 10b sind oben die fünf Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen dargestellt.

KVA Zürich Hagenholz

In Blättern von Bäumen, die am 25. Juni 2024 an fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Zürich Hagenholz gesammelt wurden, konnte keine erhöhte ^{14}C Konzentration festgestellt werden. Der Wert am Standort Z-4 Neuwiesenstrasse entsprach exakt dem Referenzwert.



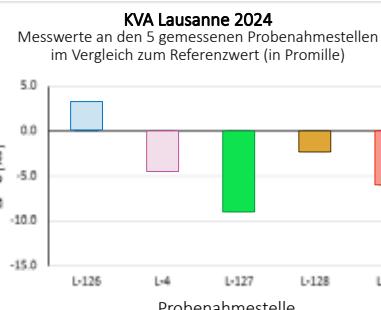
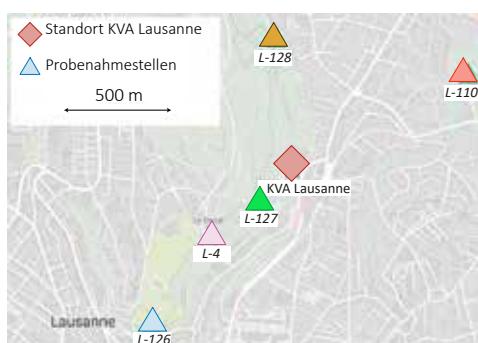
Figur 10c :
Probenahmestellen und $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte bei der KVA Zürich. Messungen: KUP. Der Messwert am Standort Z-4 betrug 0‰.



Figur 10a :

Probenahmestellen und $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte bei der KVA Bern. Messungen: LARA. Der Messwert am Standort B-3 betrug +0.1‰.

In Figur 10c sind oben die fünf Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen dargestellt



Figur 10b :
Probenahmestellen und $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte bei der KVA Lausanne. Messungen: KUP.

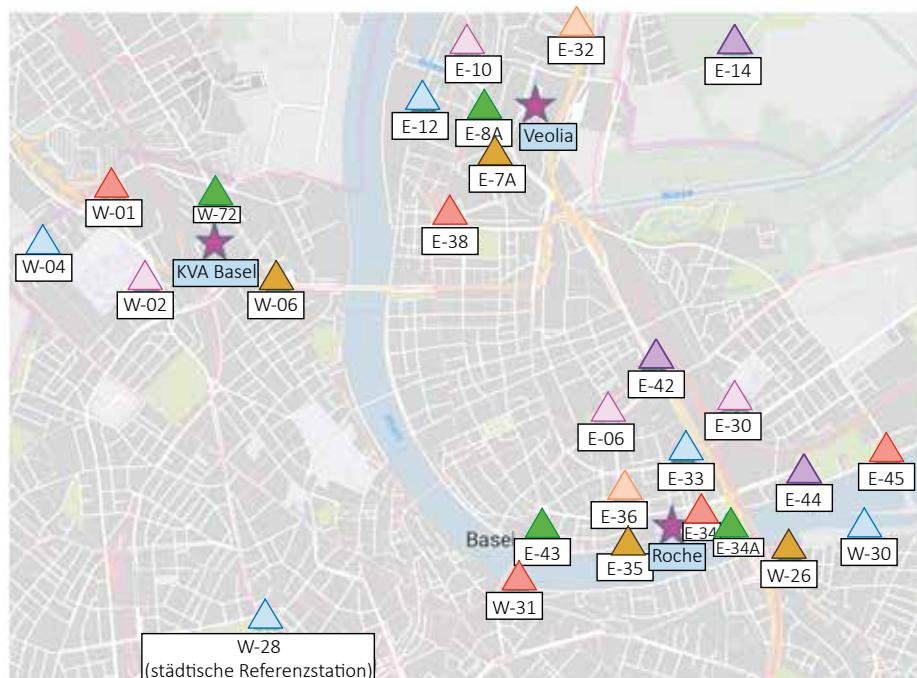
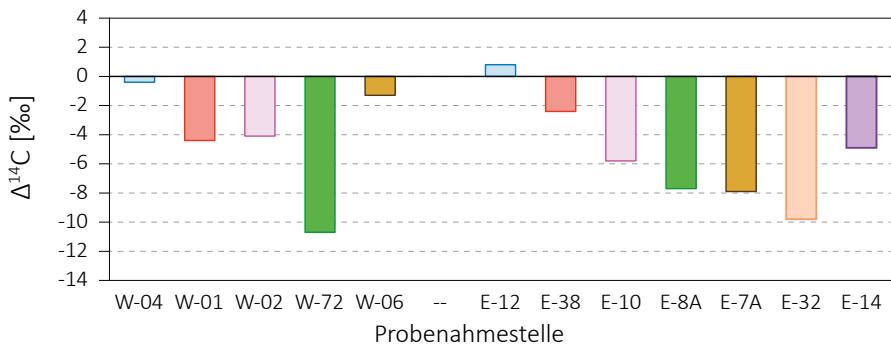
Messungen in der Region Basel-Stadt

Im Jahr 2024 wurden in Basel zwei Laubprobenahmen durchgeführt. Im Rahmen der ersten Probenahme am 10. Juni wurden hauptsächlich die Standorte im Südosten des Stadtgebietes um das Areal der Firma F. Hoffmann-La

Roche sowie die Standorte um das Areal der von der Firma Veolia betriebenen regionalen Sondermüllverwertungsanlage (RSMVA) beprobt. Die zweite, etwas umfangreichere Probenahme fand am 27. August statt und umfasste zusätzlich zu den Standorten der ersten Probenahme auch Standorte um die KVA Basel im Westen der Stadt.

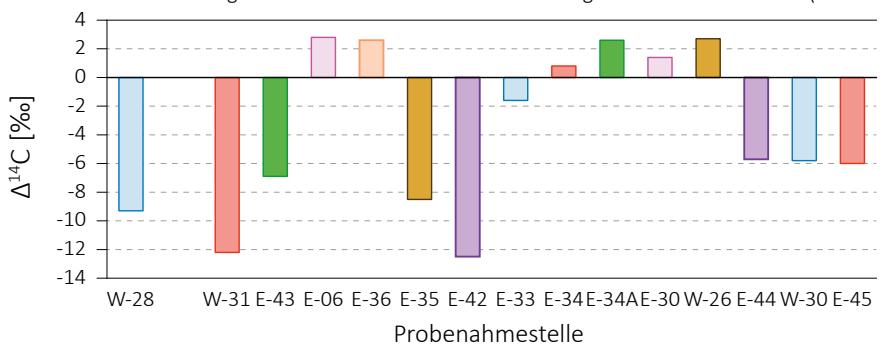
Basel 2024 Nord (KVA und Veolia)

Messwerte an den 12 gemessenen Probenahmestellen im Vergleich zum Referenzwert (in Promille)



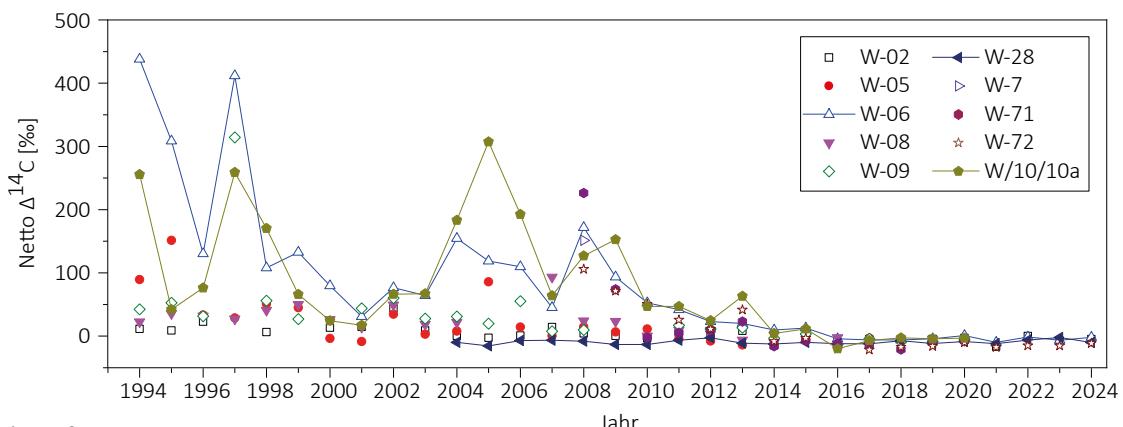
Basel 2024 Süd (Referenz und Roche)

Messwerte an den 15 gemessenen Probenahmestellen im Vergleich zum Referenzwert (in Promille)



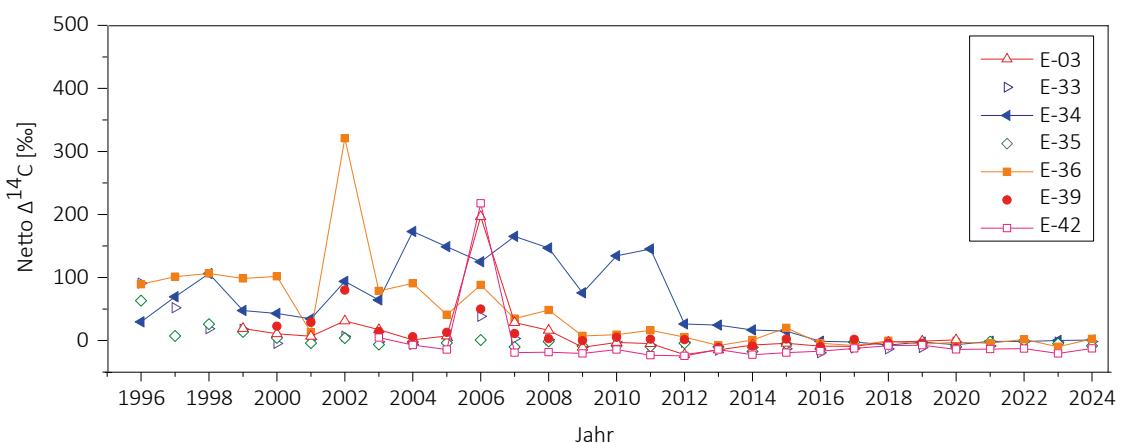
Figur 11 :

Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte für Blattproben aus dem Raum Basel. Die Balkendiagramme stellen die Erhöhung bzw. Absenkung der Messwerte gegenüber den unbelasteten ländlichen Referenzstationen dar.



Figur 12:

Zeitreihe der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte westlich des Rheins (östlich der KVA). Am Standort W-28 wird die von ^{14}C unbelastete Stadtluft gemessen. Liegen von einem Standort mehrere Messwerte vor, so ist der höchste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert eingetragen.



Figur 13:

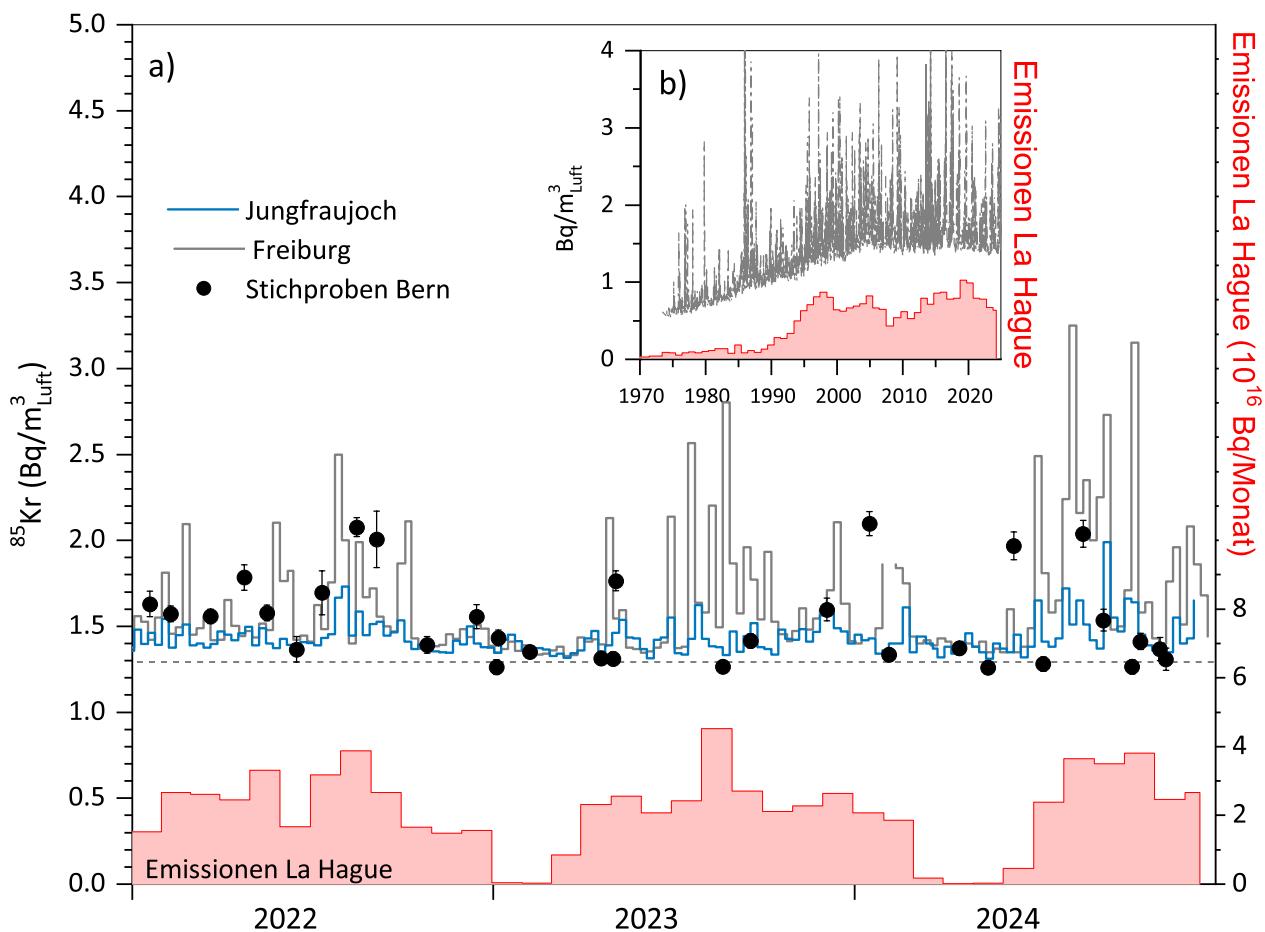
Zeitreihe der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte östlich des Rheins. Liegen von einem Standort mehrere Messungen vor, so ist der höchste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert eingetragen.

An den meisten Standorten wurde aufgrund des weiter oben erwähnten Suess-Effekts eine Verdünnung der $^{14}\text{CO}_2$ -Konzentration relativ zu den unbelasteten Referenzstationen festgestellt, zum Teil um 10 ‰ oder mehr (Figur 11). Auch im Umkreis der KVA Basel sowie im deutschen Grenzgebiet östlich des Völklingen-Verbrennungsofens wurden keine bzw. nur geringe Erhöhungen registriert. Keiner der Messwerte überstieg den Referenzwert um mehr als 3‰.

Im oberen Teil von Figur 11 sind die Messergebnisse von den Probenahmestellen im Norden der Stadt Basel, im unteren Teil diejenigen vom Süden der Stadt dargestellt, jeweils als Erhöhung bzw. Absenkung gegenüber den unbelasteten ländlichen Referenzstationen. Liegen von einem Standort mehrere Messwerte vor, so ist in Figur 11 der jeweils höhere Wert dargestellt.

Die Figuren 12 und 13 zeigen die Messergebnisse seit Messbeginn an ausgewählten Standorten. Die Netto-Messwerte haben sich in den letzten Jahren auf einem sehr niedrigen Niveau stabilisiert.

Der Rückgang der ^{14}C -Werte gegenüber früheren Jahren ist darauf zurückzuführen, dass die Firma Novartis das benötigte ^{14}C zunehmend von externen Zulieferern bezieht. Im Falle der F. Hoffmann-La Roche AG ist der Rückgang mit durchschnittlich deutlich geringeren Anfangsaktivitäten bei den Synthesen zu erklären. Westlich des Rheins wurden die historischen Netto-Höchstwerte (beispielsweise Standort W-10A auf dem Areal der Firma Novartis) bereits seit einigen Jahren nicht mehr erreicht, sodass diese Standorte seit 2021 nicht mehr beprobt werden. Auch die Standorte östlich des Rheins im Umfeld der Firma F. Hoffmann-La Roche AG sind weit von ihren Netto-Höchstwerten entfernt: der im Jahr 2002 gemessene Höchstwert von 320 ‰ am Standort E-36 wurde in den letzten Jahren deutlich unterschritten.



Figur 14:

a) Atmosphärische ^{85}Kr -Aktivitätskonzentrationen der Stationen Jungfraujoch (3'500 m. ü. M.), Freiburg i. Br. (276 m. ü. M.) sowie stichprobenartige Messungen in Bern (gemessen durch Uni Bern) über die letzten drei Jahre. Die Messungen der Proben von den beiden Stationen in Freiburg i.Br. und vom Jungfraujoch wurden am Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Freiburg i. Br. durchgeführt [2].

b) Langzeitmessreihe der ^{85}Kr -Aktivitätskonzentration an der Station Freiburg i. Br. gemessen am BfS. Zum Vergleich ist auch der Verlauf der Emissionsraten der Aufbereitungsanlage von La Hague dargestellt (rote Balken in Einheiten von 10^{16} Bq) [3].

Edelgas-Radionuklide

Die Edelgas-Radionuklide Krypton-85 (^{85}Kr) und Argon-37 (^{37}Ar) entstehen in der Atmosphäre nur in äußerst geringen Mengen auf natürliche Weise. Anthropogenes Krypton-85, das bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen freigesetzt wird, konnte sich aufgrund seiner relativ langen Halbwertszeit von 10.74 Jahren und der über Jahrzehnte steigenden Emissionsraten in der Atmosphäre ansammeln. Derzeit bleibt seine Aktivitätskonzentration stabil, mit einer leicht rückläufigen Tendenz. Die aktuellen Konzentrationen von ^{37}Ar werden kaum durch künstliche Quellen beeinflusst, doch lokale erhöhte Werte können auf nukleare Aktivitäten hinweisen. Keines der beiden Isotope trägt wesentlich zur jährlichen Strahlendosis bei.

Krypton-85 (^{85}Kr)

Das radioaktive Edelgasisotop ^{85}Kr ist ein Beta-Strahler mit einer Halbwertszeit von 10.74 ± 0.02 Jahren. Natürliches atmosphärisches ^{85}Kr hat seinen Ursprung in dem Einfang kosmischer Neutronen durch stabiles ^{84}Kr in der Atmosphäre und durch die Spaltung von Uran und anderen Aktiniden in der Lithosphäre. Die beiden Prozesse führen zu einem natürlichen atmosphärischen ^{85}Kr -Inventar von etwa $9 \cdot 10^{11}$ Bq oder einer spezifischen Aktivitätskonzentration von $\sim 0.2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$. Im Gegensatz dazu stammt das derzeitige ^{85}Kr in der Atmosphäre hauptsächlich aus der Wiederaufarbeitung von Brennstäben und wird lokal und zeitlich gepulst freigesetzt. Zurzeit ist die Aufbereitungsanlage in La Hague (F) die weltweit grösste Emissionsquelle (Figur 14a). Durch radioaktiven Zerfall nimmt das atmosphärische Inventar jährlich um 6.2% ab. Diese Reduktionsrate wurde lange Zeit von den globalen Freisetzungsraten von ^{85}Kr übertroffen, was zu einem Anstieg

der atmosphärischen Basisaktivitätskonzentration führte (Figur 14b). In der letzten Dekade ist eine Stabilisierung bei einer Aktivitätskonzentration von $1.4 - 1.5 \text{ Bq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$ in Mitteleuropa zu beobachten [2].

In der Schweiz wird ^{85}Kr an kumulativen Wochenproben gemessen, die auf dem Jungfraujoch (JFJ) gesammelt und im Edelgaslabor des BfS in Freiburg analysiert werden [2]. Zusätzlich werden Stichproben von Berner Luft auf dem Dach des Physikalischen Institutes genommen und vor Ort im Tiefenlabor der Universität Bern analysiert. In Figur 14 sind zum Vergleich auch die entsprechenden Werte von Freiburg im Breisgau (D) dargestellt. Die Basiswerte sind für alle Stationen (JFJ, Bern und Freiburg) identisch. Während Zeitperioden erhöhter Emissionsraten in La Hague [3] kommt es zu gehäuften Aktivitätsspitzen, die den Basiswert insbesondere in Freiburg deutlich übersteigen. Wegen der erhöhten Lage der Station JFJ wird diese Station weniger von bodennahen Emissionen beeinflusst und weist Aktivitätsspitzen geringerer Amplitude auf. Der kurze Sammelzeitraum für die Stichproben in Bern sowie die etwas grösse Entfernung zur Quelle in La Hague führen zu Abweichungen zwischen den Stationen Bern und Freiburg, wobei das Aktivitätsniveau jedoch ähnlich ist.

Für das Jahr 2024 lassen sich die folgenden Beobachtungen feststellen: Eine Phase leicht erhöhter ^{85}Kr -Aktivitätskonzentrationen zu Jahresbeginn, sowohl am JFJ als auch in Freiburg, fällt mit erhöhten Wiederaufarbeitungsaktivitäten und damit verbundenen ^{85}Kr -Emissionen aus La Hague zusammen (Abbildung 14a). Von März bis Juni waren die Emissionen deutlich geringer, und die Aktivitätskonzentrationen lagen an allen Stationen bei ca. $1.3 \text{ Bq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$. Im Sommer nahmen die Emissionen in La Hague wieder zu, was mit einer erhöhten Frequenz und Amplitude der ^{85}Kr -Aktivitätsspitzen an beiden Messstationen einherging. Die Amplitude der Spitzen, definiert als Differenz zwischen dem gemessenen Wert und einem Basiswert von $1.3 \text{ Bq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$, ist in Freiburg mindestens doppelt so hoch wie am JFJ. Bemerkenswert ist zudem, dass dieser Basiswert niedriger ist als in den vergangenen zehn Jahren, als Werte um $1.4 \text{ Bq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$ beobachtet wurden. Die generelle Stabilisierung, möglicherweise sogar ein Rückgang des Basiswerts, ist auch im Langzeiddatensatz von Freiburg i. Br. ersichtlich (Abbildung 14b). Dies deutet auf einen Rückgang der globalen Wiederaufarbeitungsaktivitäten hin, was durch zukünftige Messungen verifiziert werden muss. Die durch den ^{85}Kr Untergrundpegel verursachte jährliche effektive Dosis beträgt ca. 11

nSv/Jahr ($8 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq m}^{-3} \text{ Jahr}$ [4]) und ist damit vernachlässigbar gering in Relation zur Strahlenbelastung von etwa 1.1 mSv verursacht durch natürlich vorkommendes Radon und dessen Folgeprodukte.

Argon-37 (^{37}Ar)

^{37}Ar entsteht in der Atmosphäre auf natürliche Weise durch die Spallationsreaktion $^{40}\text{Ar}(n,4n)^{37}\text{Ar}$. Die daraus zu erwarteten Aktivitätskonzentrationen in der Troposphäre liegen zwischen 0.5 und $2 \text{ mBq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$. Emissionen aus Kernkraftwerken [5], insbesondere während Revisionen [6], oder aus Zyklotronen können lokal und kurzfristig zu leicht erhöhten Werten führen. Zwei Stichprobenmessungen der Berner Luft am 2.7.2024 und 10.12.2024 ergaben Konzentrationen von $1.2 \pm 1.2 \text{ mBq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$ bzw. $2.9 \pm 1.1 \text{ mBq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$. Die Aktivitätskonzentration von ^{37}Ar in der Atmosphäre ist somit etwa 1000-mal geringer als die von ^{85}Kr und damit irrelevant in Bezug auf die jährliche Strahlenbelastung.

Referenzen

- [1] <https://ensi.admin.ch/de/themen/vorkommnisse/>, aufgerufen am 20. März 2025
- [2] Bollhöfer, A., Schlosser, C., Schmid, S., Konrad, M., Purtschert, R. and Krais, R. (2019) Half a century of Krypton-85 activity concentration measured in air over Central Europe: Trends and relevance for dating young groundwater. Journal of Environmental Radioactivity 205-206, 7-16
- [3] Data provided by Orano, La Hague
- [4] ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.). Table C.1., p. 61
- [5] Kirchner, G., Gerfen, F., Heise, A., Schlüschen, T., 2020. Will ^{37}Ar emissions from light water power reactors become an obstacle to its use for nuclear explosion monitoring? Journal of Environmental Radioactivity 223-224, 106392.
- [6] Espic, C., Laemmle, T., Henne, S., Purtschert, R., Szidat, S., 2025. Atmospheric $^{14}\text{CH}_4$, $^{14}\text{CO}_2$ and ^{37}Ar measurements around a Swiss pressurized water reactor during an annual revision period. Journal of Environmental Radioactivity 281, 107576.



7.2

Mesures de plutonium et d'américium dans l'environnement

P. Froidevaux, C. Pilloud, P.-A. Pittet, R. Cusnir, M. Straub

Institut de radiophysique (IRA), CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

Résumé

Nous avons mesuré le plutonium (Pu) et l'américium (Am) dans des échantillons de sol, de sédiments, de filtres à air, de poissons, de plantes aquatiques et d'eau de surface, de pluie et souterraines. Les résultats sont compatibles avec une contamination provenant essentiellement des retombées des essais nucléaires des années soixante. Ce dépôt est bien fixé dans le sol, comme en attestent les mesures des filtres à air, qui montrent des activités très faibles, mais représentatives de la remise en suspension de particules de sol par le vent. Les poissons n'ont pas présenté d'activité en Pu et en Am mesurable au-dessus de la limite de détection de la méthode. Dans les sols, l'activité en $^{239+240}\text{Pu}$ est située entre 92 mBq/kg et 545 mBq/kg alors que l'activité en ^{241}Am est présente dans un rapport $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.43 ± 0.03 . L'activité en Pu des eaux de rivières prélevées en aval des centrales nucléaires ne dépasse pas 2.2 mBq/m³, et celle des eaux de pluie est proche de 1.0 mBq/m³, soit dans l'ensemble des valeurs très proches de celles mesurées les années précédentes. L'activité dans les plantes aquatiques reflète celle des particules adhérent à la surface des végétaux et peut atteindre, pour le $^{239+240}\text{Pu}$, 80 mBq/kg de masse sèche de plantes.

^{241}Am est présent dans l'environnement par sa filiation avec ^{241}Pu , un émetteur β du plutonium. Lors des retombées atmosphériques de plutonium issues des essais nucléaires des années 1955-1965, seuls les isotopes du plutonium étaient présents et l'activité en ^{241}Am a commencé à croître dès cette période. Nous pouvons donc calculer l'évolution d'un rapport théorique de $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ pour les sols utilisés comme réservoir de la déposition de plutonium et comparer les résultats obtenus sur la base de ce rapport. Des apports supplémentaires en ^{241}Am , dont l'origine seraient les centrales nucléaires par exemple, devraient ainsi être décelables par déviation à l'évolution du rapport théorique. C'est cette analyse qui est proposée dans ce rapport.

Introduction

Le plutonium que l'on retrouve dans l'environnement provient des retombées des essais nucléaires des années soixante, d'accidents nucléaires (p.ex. Tchernobyl), ainsi que des rejets autorisés d'installations nucléaires et de sites de retraitement de déchets nucléaires. Dans les dernières décennies, l'attention s'est focalisée principalement sur les émetteurs alpha du plutonium (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu), caractérisés par une forte radiotoxicité ainsi que de longues périodes de demi-vie physique (p.ex. $T_{1/2}$ (^{239}Pu) = 24'100 ans) et biologiques. Ainsi la demi-vie de

^{239}Pu dans les vertèbres humaines a été déterminée à 40 ± 14 ans [1]. Cependant, initialement, après les retombées radioactives, la contribution la plus importante à la radioactivité du plutonium provenait de l'isotope 241 du plutonium (^{241}Pu), un émetteur beta. Bien que le ^{241}Pu ne soit pas radiologiquement de la plus haute importance, notamment au vu de la basse énergie de son émission bêta et d'une courte demi-vie physique ($T_{1/2} = 14.4$ ans), sa désintégration donne lieu à ^{241}Am , un émetteur alpha de haute énergie (5.3 MeV) et de longue durée de vie ($T_{1/2} = 432.2$ ans) très radiotoxique. A l'origine de la déposition de plutonium dans notre environnement, le rapport

d'activité entre ^{241}Pu et $^{239+240}\text{Pu}$ était d'environ 15 pour la zone comprise entre les latitudes 40°N et 50°N. A titre de comparaison, ce rapport était entre 70 et 100 pour les retombées de plutonium lors de l'accident de Tchernobyl. Pour le plutonium de qualité militaire (pour les armes nucléaires), ce rapport est particulièrement bas (0.5 - 4) [2]. Ainsi la détermination de ^{241}Pu permet de déterminer, conjointement avec la mesure de $^{239+240}\text{Pu}$, l'origine d'une contamination radioactive au plutonium (combustible nucléaire > retombées des tests nucléaires des années soixante > armes atomiques actuelles). Toutefois, la détermination de ^{241}Pu à faible activité telle que rencontrée dans l'environnement est particulièrement difficile, c'est pourquoi il est préférable d'utiliser une méthode alternative, comme la détermination de l'accumulation de ^{241}Am , dont la mesure à bas niveau d'activité est plus aisée.

Dans ce travail, nous avons déterminé l'activité en $^{238}, 239+240\text{Pu}$ et ^{241}Am de différents compartiments de l'environnement tels que le sol, les sédiments de rivières, l'air, l'eau de rivière, de pluie et souterraine, ainsi que pour les poissons et les plantes aquatiques. Les sites de prélèvements sont principalement les environs des centrales nucléaires suisses, et plus particulièrement les rivières dans lesquelles elles rejettent leurs effluents radioactifs liquides. L'analyse des résultats s'est focalisée sur le rapport $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ des divers échantillons par rapport à une courbe théorique représentant ce rapport sur la base d'un rapport initial de $^{241}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de 15, l'hypothèse d'une activité nulle en ^{241}Am au moment du dépôt et de la filiation $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ déterminée par l'équation de Bateman lors d'équilibre séculaire.

Méthodes

Les méthodes d'analyses du plutonium et de l'américium dans les différents compartiments de l'environnement sont décrites en détail dans la référence [3]. De légères modifications ont été apportées pour améliorer la méthode. Il en résulte que certains échantillons du plan ont été mesurés à plusieurs reprises afin de tester la reproductibilité des résultats, c'est pourquoi certains sites présentent plusieurs résultats d'analyses. On constate aussi qu'il est nécessaire d'obtenir des rendements de séparation chimique supérieurs à 65 % dans les échantillons de sol et de filtres à air afin de pouvoir quantifier le ^{238}Pu , présent en très faible quantité dans nos sols ($0.03 \times ^{239+240}\text{Pu}$).

Résultats et discussion

Plutonium et américain dans les sols

Le Tableau 1 présente les résultats de mesure des sols échantillonnés sur l'ensemble du territoire suisse, avec une focalisation sur les sites aux environs des centrales nucléaires suisses. Les activités sont très proches de celles obtenues les années précédentes, qui sont en diminution constante ces vingt dernières années, et ne montrent pas de marquage autre que par les retombées des essais nucléaires des années soixante. 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. Pour l'année 2024, ces rapports

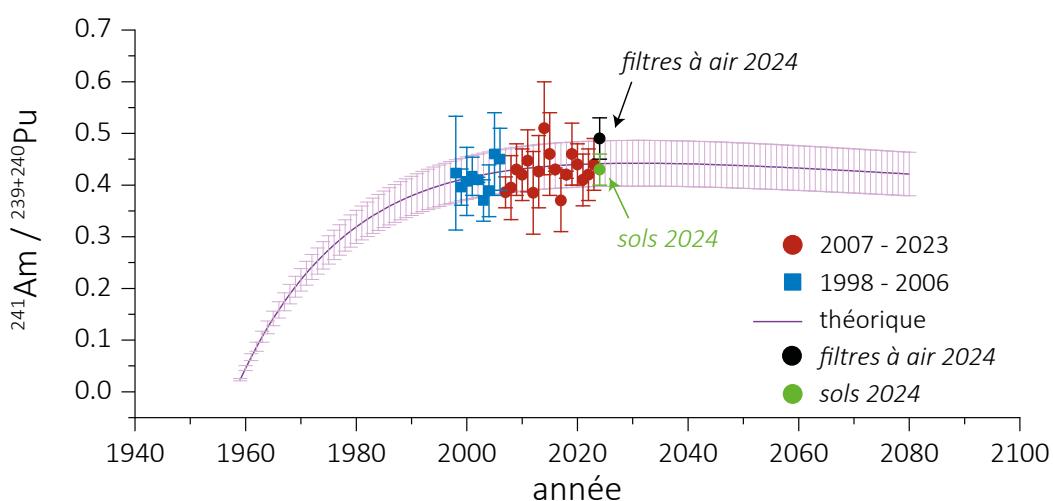


Figure 1 :

Evolution théorique du rapport $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (courbe violette) et valeurs moyennes de ce rapport mesurées sur les sols en Suisse entre 1998 et 2006 (carrées bleues, sans corrections d'impuretés dans les traceurs) et entre 2007 et 2023 (ronds rouges, avec correction des impuretés contenues dans les traceurs). La moyenne du rapport pour les filtres à air (rond noir) et les sols (rond vert) pour l'année 2024 est indiquée par une flèche.

Tableau 1:

Activités (Bq/kg de matière sèche MS) en plutonium et américium dans les échantillons de sol (0 - 5 cm) collectés sur le territoire suisse en 2024 (incertitudes à 95%).

Lieu	$^{239+240}\text{Pu}$ Bq/kg MS	^{238}Pu Bq/kg MS	^{241}Am Bq/kg MS	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$
Arenenberg	0.127 ± 0.010	0.0033 ± 0.0013	0.053 ± 0.006	0.417 ± 0.058	0.026 ± 0.011
Beznau	0.195 ± 0.019 0.193 ± 0.017	0.0048 ± 0.0022	0.080 ± 0.007 0.076 ± 0.006	0.409 ± 0.055 0.395 ± 0.048	0.025 ± 0.012
Cadenazzo	0.092 ± 0.015 0.119 ± 0.025 0.106 ± 0.009	0.0034 ± 0.0014	0.041 ± 0.004 0.048 ± 0.007 0.048 ± 0.004	0.447 ± 0.087 0.402 ± 0.102 0.451 ± 0.057	0.032 ± 0.013
Däniken (Gösgen)	0.260 ± 0.026	0.0081 ± 0.0033	0.104 ± 0.009	0.402 ± 0.053	0.031 ± 0.013
Güttingen	0.158 ± 0.015 0.167 ± 0.019 0.157 ± 0.013	0.0045 ± 0.0018	0.077 ± 0.007 0.072 ± 0.011 0.071 ± 0.006	0.487 ± 0.065 0.433 ± 0.081 0.451 ± 0.052	0.029 ± 0.012
Leibstadt	0.210 ± 0.016	0.0056 ± 0.0021	0.086 ± 0.008	0.411 ± 0.051	0.027 ± 0.010
Meyrin	0.156 ± 0.019 0.142 ± 0.018 0.163 ± 0.014	0.0044 ± 0.0019	0.063 ± 0.008 0.068 ± 0.007 0.064 ± 0.006	0.401 ± 0.070 0.477 ± 0.077 0.392 ± 0.049	0.027 ± 0.012
Mühleberg	0.163 ± 0.014	0.0051 ± 0.0021	0.066 ± 0.006	0.407 ± 0.052	0.031 ± 0.013
Posieux	0.201 ± 0.022 0.214 ± 0.019	0.0065 ± 0.0027	0.084 ± 0.007 0.088 ± 0.008	0.391 ± 0.049 0.436 ± 0.063	0.030 ± 0.013
Stabio	0.545 ± 0.081	0.0156 ± 0.0072	0.229 ± 0.025	0.421 ± 0.078	0.029 ± 0.014
Villigen-PSI	0.142 ± 0.014 0.139 ± 0.014	0.0047 ± 0.0021	0.058 ± 0.006 0.058 ± 0.006	0.419 ± 0.061 0.413 ± 0.056	0.034 ± 0.016
Würenlingen-ZWILaag	0.164 ± 0.013	0.0045 ± 0.0017	0.079 ± 0.007	0.480 ± 0.055	0.028 ± 0.011
moyenne				0.43 ± 0.03 (n=21)	0.029 ± 0.003 (n=12)

sont de 0.029 ± 0.003 (n=12) pour $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et de 0.43 ± 0.03 (n=21) pour $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ et correspondent parfaitement à ce qui est attendu pour une contamination ne provenant que des retombées radioactives des essais nucléaires des années soixante. Par comparaison, 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.

Dans la Figure 1, nous avons représenté l'évolution du rapport théorique de $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ à la suite de l'accumulation de ^{241}Am dans les sols par la désintégration de ^{241}Pu . Pour cela nous avons fait l'hypothèse que l'activité initiale de ^{241}Am était nulle (0), que l'activité en $^{239+240}\text{Pu}$ ne décroît pas significativement durant la période observée, et que le rapport initial $^{241}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ était de 15 [2]. Bien que, stricto sensu, la filiation de ^{241}Pu en ^{241}Am ne corresponde pas à un équilibre séculaire, car la demi-vie de la mère est plus petite que la demi-vie de la fille, l'application de la relation de Bateman pour les équilibres séculaires permet toutefois d'estimer raisonnablement l'activité de ^{241}Am . On constate ainsi que le rapport d'activité $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ a cru rapidement depuis les années soixante et atteindra un maximum vers 2030, après quoi il diminuera de

manière très lente, en fonction de la période de ^{241}Am (432.2 ans). Nous avons superposé à cette relation théorique les valeurs moyennes du rapport $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ déterminées sur les sols (valeur moyenne annuelle à partir de 7 à 36 valeurs individuelles) depuis le début des mesures (1998) et 2024. Entre 1998 et 2006, les valeurs du rapport ont pu être biaisées vers le haut car, pour des raisons liées à la préparation des traceurs radioactifs ^{242}Pu et ^{243}Am , avec entraîneur de $\text{Ln}(\text{III})$, il n'était pas possible de déterminer la contamination en ^{241}Pu du traceur ^{242}Pu . Cette correction a été appliquée dès 2007. On constate toutefois que toutes les valeurs moyennes obtenues au cours des 25 dernières années sont parfaitement compatibles, en tenant compte des incertitudes, avec les valeurs théoriques calculées. De plus, les valeurs 2024, autant pour les sols que pour les filtres à air, sont également bien compatibles avec le rapport théorique pour l'année en cours. Nous pouvons ainsi conclure que les sols en Suisse, comme compartiment de rétention des dépôts radioactifs des années soixante, n'ont pas accumulé de plutonium et/ou d'américium provenant d'autres sources.

Tableau 2:

Activités ($n\text{Bq}/\text{m}^3$) en $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu et ^{241}Am dans les filtres à air collectés sur différents sites en Suisse en 2024.
Incertitudes à 95 %.

Lieu	Volume m^3	$^{239+240}\text{Pu}$ $n\text{Bq}/\text{m}^3$	^{238}Pu $n\text{Bq}/\text{m}^3$	^{241}Am $n\text{Bq}/\text{m}^3$	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$
Klingnau	5'096'054	1.07 ± 0.08	0.045 ± 0.015	0.50 ± 0.05	0.46 ± 0.06	0.042 ± 0.014
Posieux	5'374'484	1.66 ± 0.11	0.188 ± 0.033	0.76 ± 0.08	0.46 ± 0.06	0.113 ± 0.021
Liebefeld, semestre 1	3'856'665	1.19 ± 0.11	0.198 ± 0.042	0.63 ± 0.07	0.53 ± 0.08	0.167 ± 0.038
Liebefeld, semestre 2	3'856'665	1.66 ± 0.14	0.092 ± 0.028	0.67 ± 0.06	0.47 ± 0.06	0.056 ± 0.018
Meyrin	4'714'682	1.59 ± 0.13	0.061 ± 0.021	0.76 ± 0.09	0.46 ± 0.07	0.039 ± 0.014
		Moyenne		R= 0.48 ± 0.03		

Plutonium et américium dans les filtres à air

Les résultats des mesures des filtres à air, présentés dans le Tableau 2, sont très proches de ceux des années précédentes. Toutefois, pour les sites de Posieux et de Liebefeld du semestre 1, le rapport $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ s'est significativement éloignés de la valeur attendue de 0.03. Ce rapport était de 0.11 pour Posieux et de 0.17 pour Liebefeld (semestre 1). Etant donnée la proximité de Mühlberg des deux sites de prélèvement d'air à haut débit, il n'est pas impossible que certains travaux liés au démantèlement de la centrale nucléaire aient pu provoquer une petite contamination de l'air en ^{238}Pu . Même si l'origine de ce rapport inhabituel était effectivement à mettre en relation avec les travaux de démantèlement, on notera que les rejets comptabilisés d'émetteurs alpha dans l'air par KKM se sont élevés, en 2024, à 7.7×10^3 Bq et étaient comparables aux rejets des autres centrales nucléaires (voir chapitre 8.1). L'activité totale mesurée sur les filtres était par ailleurs extrêmement basse. En effet, les activités totales de Pu mesurées sur les filtres étaient donc d'environ 6 ordres de grandeur inférieures à la limite d'immission dans l'air pour ces radionucléides et donc tota-

lement négligeables du point de vue du risque sanitaire. Le rapport $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ du prélèvement du deuxième semestre de Liebefeld était dans la norme (0.056 ± 0.018) compte tenu d'une incertitude proche de 35%. Le rapport $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ était lui, dans la norme sur tous les sites (voir Tableau 2) et sa moyenne s'inscrivait parfaitement dans le prolongement du rapport théorique (voir Figure 1).

Plutonium et américium dans les milieux aquatiques

Les activités des eaux de surface (eaux de rivière), des eaux de pluie ainsi que des eaux souterraines sont présentées dans le Tableau 3. Lorsque les activités sont quantifiables, les incertitudes atteignent souvent 30-50%, car les activités ne dépassent pas $3.5 \text{ mBq}/\text{m}^3$, ce qui est réjouissant. Pu et Am sont quantifiés dans les eaux de pluie; toutefois il s'agit probablement d'activités provenant de l'entrainement de particules en suspension dans l'air dans les collecteurs par les précipitations (lessivage de l'air).

Tableau 3:

Activités en $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu et ^{241}Am (mBq/m^3) des eaux collectées en Suisse durant l'année 2024. (Incertitudes à 95%).

Type	Lieu	Volume [L]	$^{239+240}\text{Pu}$ mBq/m^3	^{238}Pu mBq/m^3	^{241}Am mBq/m^3	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$
Eau de rivière	Rhône, Chancy	87	3.5 ± 1.2	< 2.5	< 3.6	0.39 ± 0.18
	Aar (Hagneck)	295	1.5 ± 0.4	< 0.5	0.6 ± 0.2	
	Aar (Klingnau)	270	2.2 ± 0.6	< 1.2	< 0.6	
	Rhin (Pratteln)	290	0.9 ± 0.3	< 0.8	< 0.6	
Eau souterraine	Aarberg	160	< 2.2	< 2.2	< 0.8	
	Schönenwerd	160	< 1.6	< 1.6	< 0.8	
	Döttingen	160	< 2.1	< 2.1	< 0.8	
	Pratteln	160	< 2.0	< 2.0	< 1.1	
Eau de pluie	Mühleberg	1181	1.0 ± 0.2	< 0.1	0.56 ± 0.11	0.55 ± 0.14
	Posieux	1209	1.2 ± 0.2	< 0.1	0.61 ± 0.13	0.51 ± 0.13
	Leibstadt	1197	0.9 ± 0.2	< 0.1	0.43 ± 0.12	0.44 ± 0.14

Tableau 4:

Activités ($\text{mBq/kg Matières Séches - MS}$) en plutonium et américium de différents échantillons aquatiques prélevés en 2024 en aval des centrales nucléaires suisses (Incertitudes à 95%).

Type	Lieu	MS analysée [g.ms]	$^{239+240}\text{Pu}$ mBq/kg MS	^{241}Am mBq/kg MS	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$
Sédiments	Aar (Hagneck)	52	41.4 ± 7.2	18.1 ± 2.7	0.44 ± 0.10
	Aar (Klingnau)	51	23.4 ± 3.6	6.7 ± 1.6	0.29 ± 0.08
	Rhin (Pratteln)	51	23.9 ± 3.5	11.5 ± 2.1	0.48 ± 0.11
Poissons	Aar (Mühleberg)	60	< 3.9	< 2.8	
	Aar (Mühleberg)	131	< 1.7	< 1.7	
	Aar (Beznau)	47	< 9.5	< 5.6	
	Rhin (Leibstadt)	128	< 1.2	1.2 ± 0.5	
	Aar (Gösgen)	86	< 1.8	1.6 ± 0.6	
Plantes aquatiques	Hagneck	56	57.1 ± 6.7	28.3 ± 4.4	0.49 ± 0.10
	Klingnau	30	58.9 ± 7.9	32.1 ± 7.4	0.55 ± 0.14
	Pratteln	27	78.0 ± 11.2	29.9 ± 6.7	0.38 ± 0.10

De plus, les volumes collectés sur l'année sont nettement supérieurs (~ 1'200 L) à ceux des prélèvements ponctuels (~ 150 - 300 L). Ainsi, bien que l'eau prélevée soit filtrée à 0.45 μm (exception: Meyrin), les activités mesurées sont probablement dues à la charge en particules amenées par lessivage des sols. Il est en effet peu probable que l'on passe par une phase dans laquelle le Pu et/ou Am seraient véritablement en solution et non adsorbés sur des particules ou des colloïdes. Toutefois, seule la détermination des activités par le système DGT (diffusive gradient in thin film) serait en mesure de donner des indications précises à ce sujet [3-6].

A l'exception des eaux de pluie qui sont collectées sur l'année en cours, tous les autres prélèvements sont effectués de manière ponctuelle ou sur un mois et peuvent donc potentiellement manquer un rejet. Nous proposons donc d'utiliser dans le cadre de la surveillance de routine un système de collecte qui moyenne l'activité sur un temps long afin d'éviter ce problème. De ce point de vue, la technique DGT représente clairement une avancée dans ce domaine [6].

Plutonium et américium dans l'environnement aquatique

Les résultats des mesures effectuées sur différents échantillons de l'environnement aquatique collectés en aval des centrales nucléaires sont présentés dans le Tableau 4. $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am sont mesurables au-dessus des limites de détection dans les sédiments (phase suspendue) de rivière, dans un rapport d'activité $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ proche de celui des sols (voir tableau 1). Il en est de même pour les plantes aquatiques, ce qui signifie probablement que l'activité mesurée provient principalement de particules

adhérant aux surfaces des plantes. Pour mieux distinguer l'absorption racinaire et la diffusion de cations à travers la surface des feuilles (phénomène biologique actif) de l'adhésion de particules de sédiments (phénomène physique passif) il serait nécessaire de procéder à un lavage sélectif séquentiel des échantillons de plantes. Ceci est toutefois long et coûteux et hors du contexte de la surveillance réglementaire de la radioactivité [4].

Les poissons n'ont pas présenté d'activité en Pu mesurable au-dessus de la limite de détection de la méthode, mais l'américium est parfois mesurable, avec une activité proche de 1 à 2 mBq/kg, car le facteur de transfert de la phase aqueuse aux poissons est plus élevé pour l'américium que pour le plutonium. Pour tous les échantillons aquatiques, ^{238}Pu est également resté en dessous des limites de détection.

Conclusions

Les mesures de Pu et Am effectuées dans ce travail ont montré la persistance, à un niveau d'activité très faible de Pu et Am dans les sols de Suisse. Sur le plateau suisse, ces activités ne dépassent pas 210 mBq/kg m.s pour le Pu et 95 mBq/kg m.s. pour l'Am. Le site de Stabio au Tessin présente des activités plus élevées, jusqu'à 545 mBq/kg m.s. en Pu et 230 mBq/kg m.s. en Am.

Ces radioéléments sont bien fixés dans le sol et leur présence résulte des retombées des essais nucléaires atmosphériques des années soixante. Les résultats de ce travail démontrent que le rapport des isotopes $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ mesuré dans les sols est représentatif d'un dépôt d'isotopes de plutonium lors des retombées radioactives des

essais nucléaires atmosphériques, à partir duquel ^{241}Am s'est formé par filiation avec l'isotope ^{241}Pu . Son activité a cru significativement pour atteindre un rapport d'activité $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ d'environ 0.4 actuellement.

Nous avons calculé que le maximum de ce rapport sera atteint en 2031 (valeur: 0.442). L'analyse détaillée du rapport d'activité $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ présentée ici démontre également qu'il n'y a pas eu d'apports significatifs autre que les retombées radioactives des années soixante dans l'environnement en Suisse. Dans le cas contraire, nous aurions détecté une variation significative par rapport à la valeur théorique calculée dans ce rapport (figure 1).

Dans l'ensemble, tous nos résultats montrent qu'il est nécessaire de prélever des masses ou des volumes importants d'échantillons pour être en mesure de déterminer le plutonium et l'américium au-dessus des limites de détection de la spectrométrie alpha. D'une manière générale, nos résultats montrent une situation saine de l'environnement en Suisse en ce qui concerne la dissémination de ces deux radioéléments fortement radiotoxiques. Une augmentation significative de ces radioéléments dans l'environnement, liée aux activités de l'industrie nucléaire, devrait être ainsi facilement détectée. Pour la mesure dans les milieux aquatiques, nous préconisons l'utilisation de la technique DGT, qui permet une intégration de l'activité présente dans le milieu dans le temps long, évitant ainsi de rater d'éventuels pics de contamination issus de rejets ponctuels.

Remerciements

Nous remercions l'OFSP et l'EAWAG pour le prélèvement des échantillons.

Références

- [1] Froidevaux et al. Chemosphere 2010, 80, 519-524.
- [2] Corcho et al. Radiochim. Acta, 2011, 99, 121-129.
- [3] Luisier et al. J. Radioanal. Nucl. Chem. 2009, 281, 425–432.
- [4] Chaplin et al. Water Research, 2022, 221, 118838.
- [5] Chaplin et al. ACS EST Water, 2022, 2, 1688-1696.
- [6] Chaplin et al. Analytical Chemistry, 2021, 93, 11937-11945.



**Surveillance des
installations nucléaires:
Emissions et Immissions**

8

**Überwachung der
Kernanlagen:
Emissionen und Immissionen**

- *Emissions et Immissions*
 - *Dose ambiante et débit de dose ambiante*
 - MADUK
 - ZWILAG
 - *Installations nucléaires et environnement*
 - CERN
-
- *Emissionen und Immissionen*
 - *Ortsdosis und Ortsdosisleistung*
 - MADUK
 - ZWILAG
 - *Nukleare Anlagen und Umwelt*
 - CERN

2024

8.1

Überwachung der Kernanlagen:

Emissionen und Immissionen

R. Habegger, D. Wittwer, A. Leupin

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Fortluft lagen im Jahr 2024 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Emissionen aus den Kernanlagen: Ergebnisse 2024

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1a für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahresabgabelimiten dargestellt. Figur 1b enthält eine Aufschlüsselung der Abgaben der Kernkraftwerke nach Monat für die limitierten radioaktiven Abgaben. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen gemäss Richtlinie ENSI G14 errechneten Personendosen für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2024. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Fortluft in den Tabellen 3b und

3c gegeben. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für die meistbetroffenen Personen (nur Erwachsene) über die letzten 28 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI 161 gammaskopmetrische Messungen durchgeführt. Dabei wurden Aerosol- und Iodfilter sowie Abwasserproben aus den Anlagen stichprobenweise analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

Bei der monatlichen Aufschlüsselung der radioaktiven Abgaben aus den Werken (vgl. Figur 1b) ist bei den flüssigen Abgaben beim KKG die jährlich jeweils vor dem Revisionsstillstand durchgeführte Verwerfungsaktion für tritiumhaltiges Wasser bei den Abgaben erkennbar. Solche

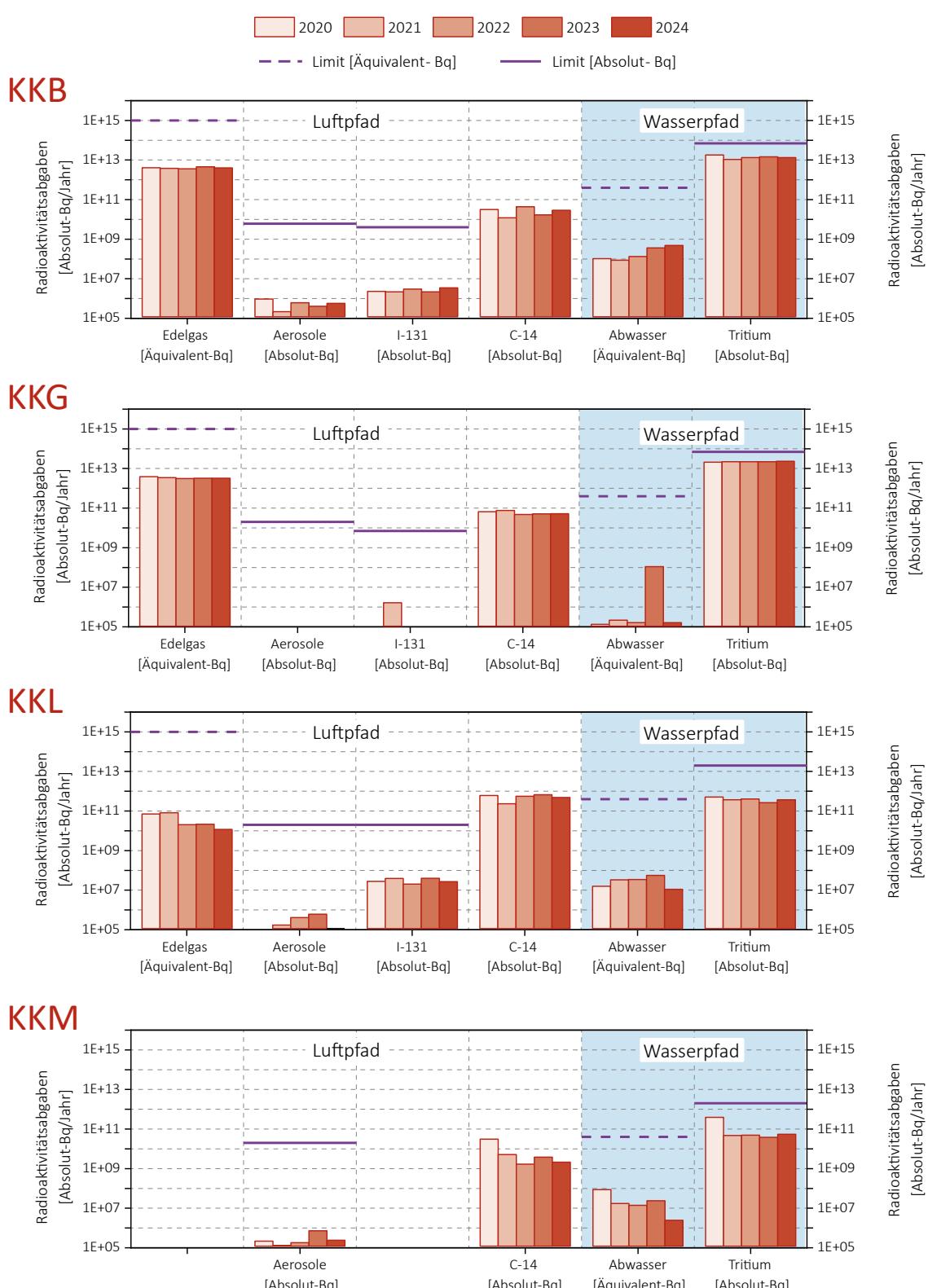
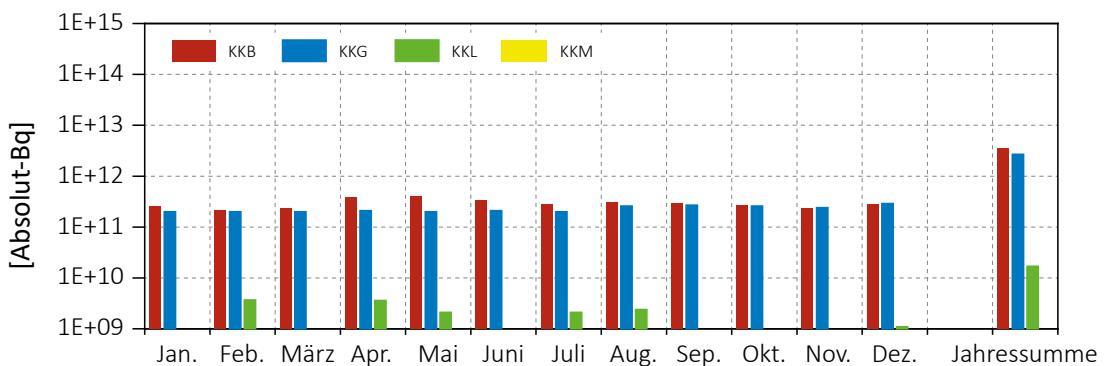


Fig 1.a :

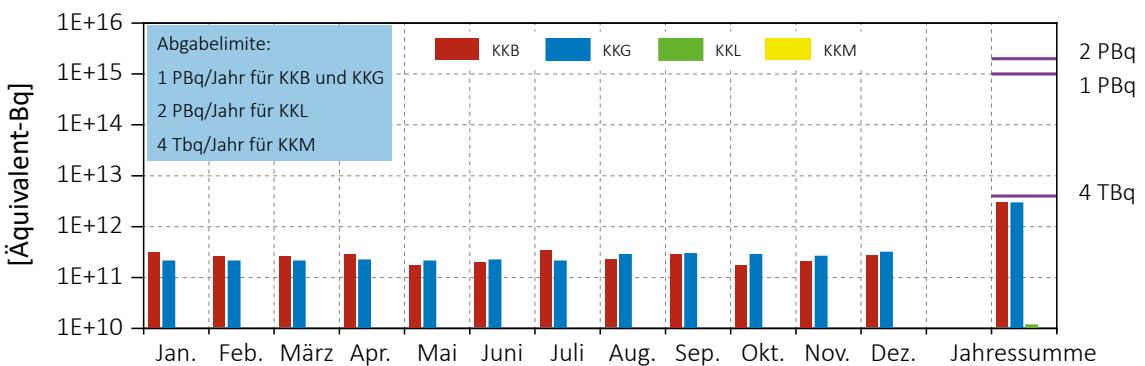
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2020 bis 2024) im Vergleich mit den Jahresabgabelimiten.

Angegeben ist für die jeweilige Nuklidgruppe und den Abgabepfad die Jahressumme der bei den einzelnen bilanzierenden Messungen durch die Kernkraftwerke ausgewiesenen Aktivitätsabgaben. Die Edelgasbilanzierung im KKB und im KKG basiert auf Beta-Totalmessungen. Für die Umrechnung in die für den Vergleich mit den Abgabelimiten notwendigen Edelgas-Abgabeäquivalente wurde in diesen Fällen ein konservatives Nuklidgemisch angesetzt. Das KKL bilanziert die Edelgase dagegen nuklidspezifisch mittels Gamma-Spektrometriemessungen. Die nuklidspezifischen Messungen liegen häufig unterhalb der Nachweisgrenze.

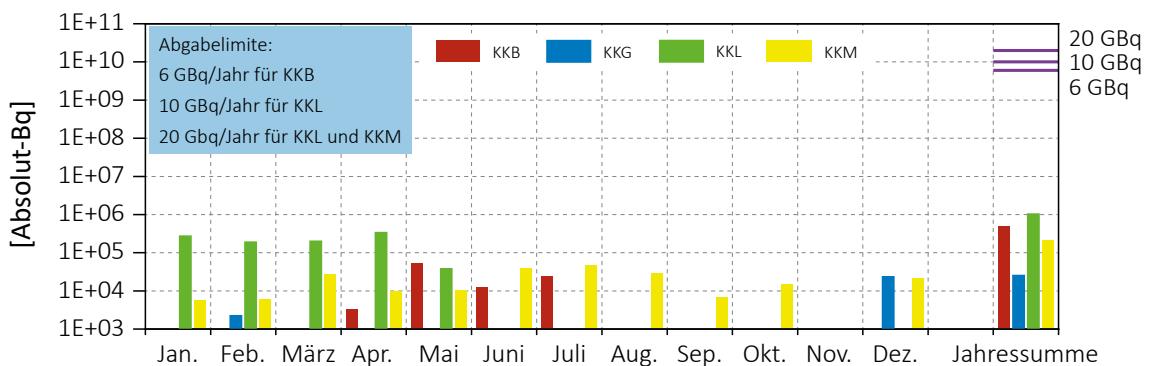
Monatliche Edelgasabgaben mit der Fortluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2024



Monatliche Äquivalent-Edelgasabgaben mit der Fortluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2024



Monatliche Aerosolabgaben mit der Fortluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2024



Monatliche Abgaben von Iod-131 mit der Fortluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2024

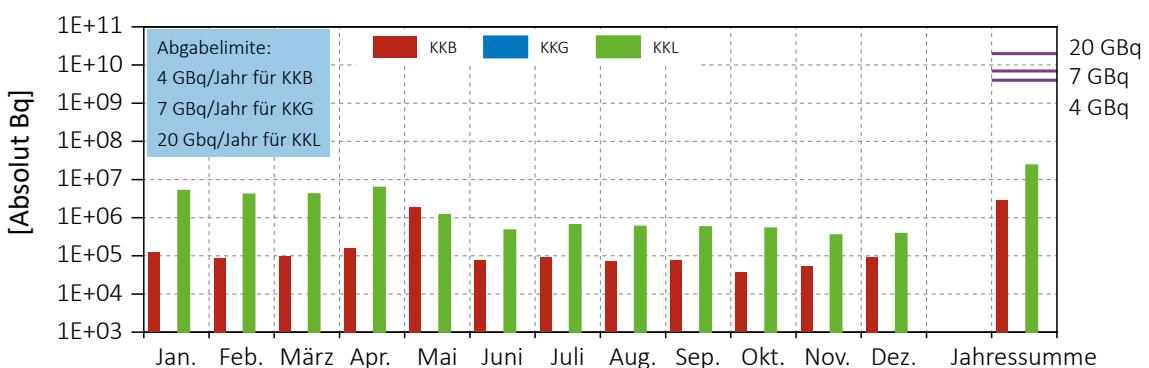
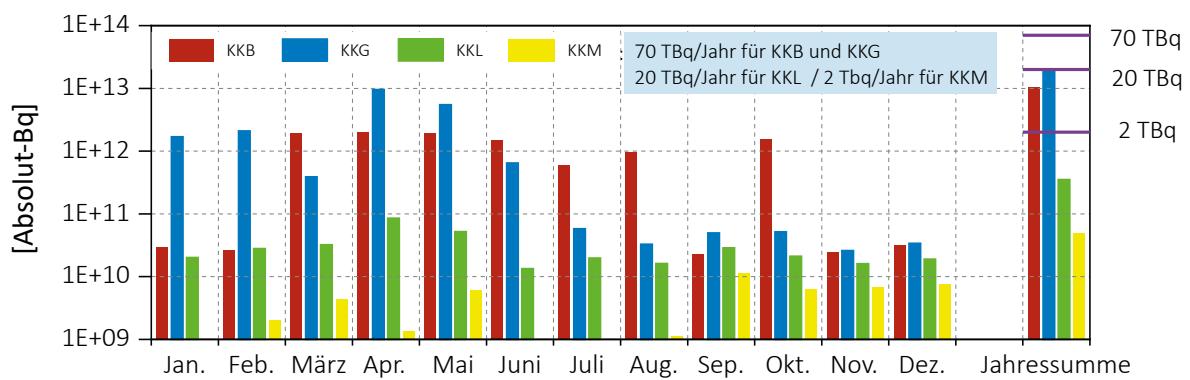


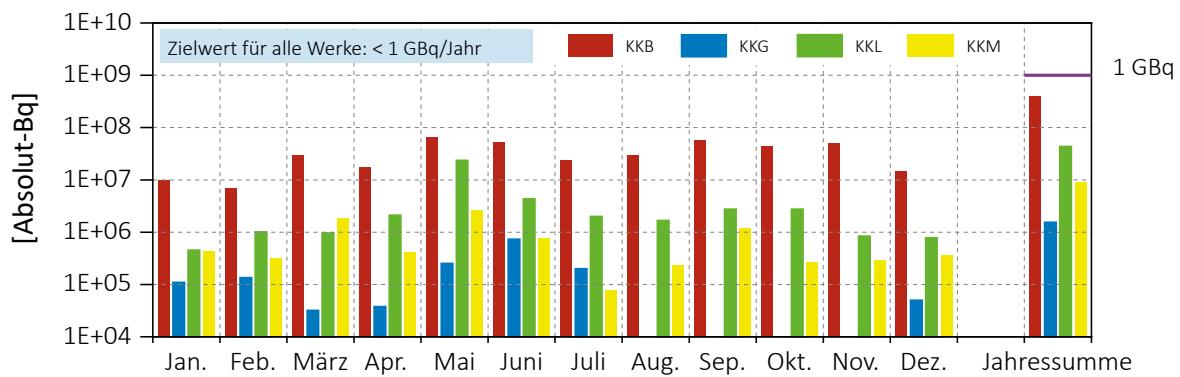
Fig 1.b (Teil 1):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2024 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.
Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.

Monatliche Abgaben von Tritium mit dem Abwasser aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2024



Monatliche Abgaben der übrigen Nuklide mit dem Abwasser aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2024



Monatliche Äquivalentabgaben der übrigen Nuklide mit dem Abwasser aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2024

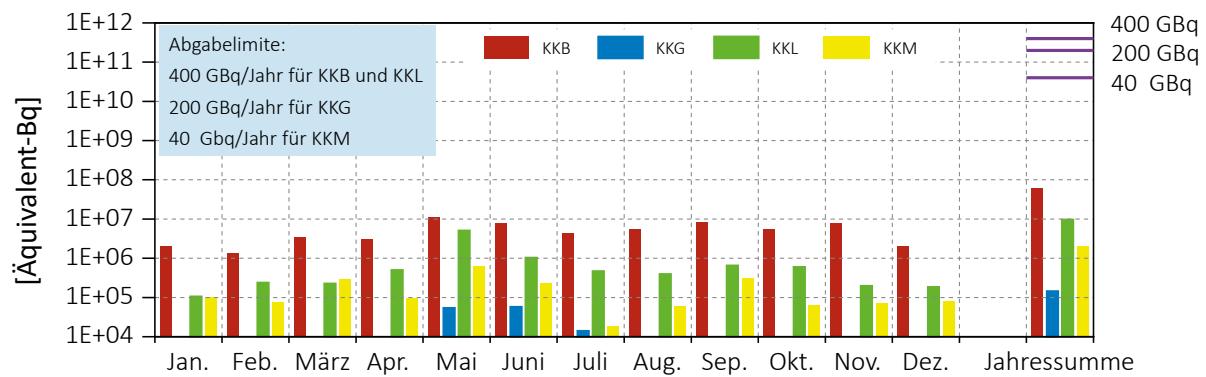
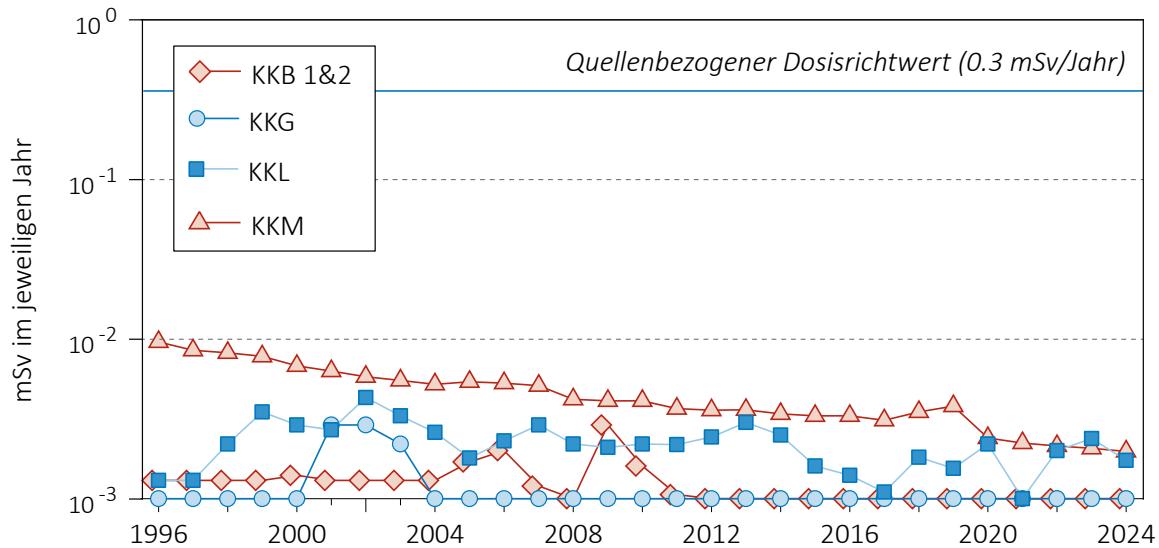


Fig 1.b (Teil 2):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2024 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.
Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.



Figur 2:

Berechnete Dosen für die meistbetroffenen Personen (Erwachsene) in der Umgebung der schweizerischen KKW, d.h. für eine erwachsene Person, die sich dauernd am kritischen Ort aufhält, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort bezieht und nur Trinkwasser aus dem Fluss unterhalb des jeweiligen Kernkraftwerks konsumiert. An diesem Ort ist der Dosisbeitrag durch die Direktstrahlung aus den Kernkraftwerken vernachlässigbar. Werte kleiner als 0.001 mSv werden in der Figur als 0.001 mSv dargestellt.

Anlage/Block	Betrieb 2024	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01.-26.04.; 19.06.-31.12. Revisionsstillstand: 27.04.-18.06.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01. - 06.08.; 12.08. -31.12. Revisionsstillstand: 07.08. - 18.08.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01. - 25.05.; 26.06. - 31.12. Revisionsstillstand: 26.05. - 25.06.	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 01.01. - 29.04.; 31.05. - 31.12. Revisionsstillstand: 30.04. - 30.05.	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019 Brennstofffreiheit ab September 2023	Siedewasserreaktor	- MW

Figur 3:

Betrieb der Kernanlagen 2024.

Abgaben sind bei den Druckwasserreaktoren systembedingt erforderlich, um den operationellen Strahlenschutz während der Revision zu optimieren. Im Gegensatz zum KKG erfolgen die Tritiumabgaben im KKB über das ganze Jahr verteilt.

Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKB und KKG weniger als 0.001 mSv, bei KKM etwa 0.002 mSv und bei KKL 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2024 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts.

Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI, die aus den Abgaben resultierende Dosis in der

Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von etwa 0.004 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Gasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeföhrten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der bewilligte Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Die für das Jahr 2024 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2024 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung. (Fussnoten siehe Text)

Ort	Medium	Art der Abgaben ¹	Bilanzierte Abgaben ²				Berechnete Jahresdosis ³		
			Abgabe	Äquivalent-abgaben ^{1,2}	Limiten ⁴		mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Prozent der Limite	Erw. mSv/Jahr	10j Kind mSv/Jahr	1j Kind mSv/Jahr
KKB1 + KKB2	Abwasser 4'100 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4·10 ⁸	6·10 ⁷	4·10 ¹¹	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	1·10 ¹³	-	7·10 ¹³	16 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	3·5·10 ¹²	3·3·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.3 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	4·7·10 ⁵	-	6·10 ⁹	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ¹³¹ I	2·9·10 ⁶	4·1·10 ⁶	4·10 ⁹	0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2·4·10 ¹⁰	-	-	-	< 0.001	< 0.001	0.0011
		Dosis total					< 0.001	< 0.001	0.0013
KKG	Abwasser 7'636 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1·6·10 ⁶	1·5·10 ⁵	2·10 ¹¹	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	2·0·10 ¹³	-	7·10 ¹³	29 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	< 2·7·10 ¹²	< 2·8·10 ¹²	1·10 ¹⁵	< 0.3 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	2·4·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ¹³¹ I	-	-	7·10 ⁹	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4·6·10 ¹⁰	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Dosis total					< 0.001	< 0.001	< 0.001
KKL	Abwasser 12'924 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4·3·10 ⁷	9·8·10 ⁶	4·10 ¹¹	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	3·5·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	1.8 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	1·7·10 ¹⁰	1·1·10 ¹⁰	2·10 ¹⁵	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	5·3·10 ⁴	-	2·10 ¹⁰	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ¹³¹ I	2·4·10 ⁷	2·5·10 ⁷	2·10 ¹⁰	0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4·6·10 ¹¹	-	-	-	0.0017	0.0023	0.0039
		Dosis total					0.0017	0.0032	0.0039
KKM	Abwasser 2'647 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	8·8·10 ⁶	2·1·10 ⁶	4·10 ¹⁰	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	5·0·10 ¹⁰	-	2·10 ¹²	2.5 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Aerosole	2·0·10 ⁵	-	2·10 ¹⁰	< 0.1 %	0.0020	0.0020	0.0019
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1·9·10 ⁹	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Dosis total					0.0020	0.0020	0.0019
ZZL	Abwasser 518 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2·3·10 ⁸	6·1·10 ⁷	2·10 ¹¹	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	5·8·10 ¹⁰	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	β-/γ-Aerosole	3·1·10 ⁵	-	1·10 ⁹	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		α-Aerosole	1·5·10 ⁴	-	3·10 ⁷	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	9·4·10 ⁸	-	1·10 ¹²	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	9·0·10 ⁹	-	1·10 ¹⁴	< 0.1 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Dosis total					< 0.001	< 0.001	< 0.001

Tabelle 2:

Zusammenstellung der Abgaben des Paul Scherrer Instituts im Jahr 2024 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

PSI Ost					
Hochkamin	SAPHIR, PROTEUS	Forschungs- labor	Betriebs- Gebäude radioaktive Abfälle	Bundes- zwischen- lager	
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Forluft^{1,2} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	-	-	-	-	-
β/γ -Aerosole, ohne Iod	-	-	$2.8 \cdot 10^4$	-	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	-	-	-	-	-
Tritium als HTO	$8.7 \cdot 10^9$	-	-	$9.0 \cdot 10^9$	$4.8 \cdot 10^9$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$4.0 \cdot 10^8$	-	-	$6.8 \cdot 10^8$	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Kind 10 Jahre	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Kleinkinder	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert ⁴	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%

PSI West		Gesamtanlage des PSI ^{1,2}			
Zentrale Forluftanla- gen	C-Labor	Abwasser 990 m ³	Forluft	Äquivalent- abgaben	
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	$4.0 \cdot 10^7$	-	$5.8 \cdot 10^6$
Tritium	-	-	$6.0 \cdot 10^{10}$	-	-
Abgaben über die Forluft^{2,4} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$1.0 \cdot 10^{14}$	-	-	$1.0 \cdot 10^{14}$	$4.3 \cdot 10^{14}$
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$4.9 \cdot 10^9$	-	-	$4.9 \cdot 10^9$	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	$3.8 \cdot 10^7$	-	-	$3.8 \cdot 10^7$	-
Tritium als HTO	$2.1 \cdot 10^{12}$	-	-	$2.1 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	$1.1 \cdot 10^9$	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	0.004	< 0.00015	< 0.00015	0.004	
Kind 10 Jahre	0.004	< 0.00015	< 0.00015	0.004	
Kleinkinder	0.004	< 0.00015	< 0.00015	0.004	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert ⁴	2.7 %	< 0.1%	< 0.1%	< 3.0 %	

Tabelle 3a:

*Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2024:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.*

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^3H	$1.1 \cdot 10^{13}$	$2.0 \cdot 10^{13}$	$3.5 \cdot 10^{11}$	$5.0 \cdot 10^{10}$	$6.0 \cdot 10^{10}$	$5.8 \cdot 10^{10}$
^7Be					$5.8 \cdot 10^5$	
^{22}Na					$2.7 \cdot 10^5$	$8.6 \cdot 10^6$
^{24}Na	$3.8 \cdot 10^6$					
^{51}Cr	$1.5 \cdot 10^6$					
^{54}Mn	$2.5 \cdot 10^6$		$2.6 \cdot 10^6$		$2.2 \cdot 10^4$	$3.3 \cdot 10^5$
^{57}Co					$7.0 \cdot 10^3$	
^{58}Co	$2.2 \cdot 10^7$				$2.5 \cdot 10^3$	
^{60}Co	$7.5 \cdot 10^7$	$2.2 \cdot 10^5$	$4.1 \cdot 10^7$	$7.1 \cdot 10^6$	$7.9 \cdot 10^5$	$4.9 \cdot 10^6$
^{65}Zn	$9.8 \cdot 10^6$					
^{67}Ga					$1.1 \cdot 10^6$	
^{89}Sr	$2.6 \cdot 10^5$			$1.3 \cdot 10^6$		
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$3.5 \cdot 10^5$			$6.7 \cdot 10^4$		
^{95}Zr	$8.5 \cdot 10^4$					
^{95}Nb	$2.7 \cdot 10^5$					
^{99m}Tc	$2.9 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$				
^{103}Ru	$5.3 \cdot 10^4$					
^{109}Cd					$3.8 \cdot 10^5$	
^{110m}Ag	$2.4 \cdot 10^7$					
^{122}Sb	$2.1 \cdot 10^6$					
^{124}Sb	$1.5 \cdot 10^8$					
^{125}Sb	$4.2 \cdot 10^7$					$1.1 \cdot 10^6$
^{123m}Te	$1.9 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^6$				
^{129m}Te	$1.9 \cdot 10^6$					
^{132}Te	$3.3 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^4$				
^{131}I	$3.5 \cdot 10^6$					
^{133}I	$1.8 \cdot 10^5$					
^{134}Cs	$1.5 \cdot 10^5$					$7.5 \cdot 10^5$
^{137}Cs	$4.3 \cdot 10^7$			$3.1 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^8$
^{152}Eu					$5.6 \cdot 10^3$	
^{160}Tb					$1.3 \cdot 10^4$	
^{161}Tb					$9.8 \cdot 10^6$	
^{172}Lu					$5.6 \cdot 10^3$	
^{173}Lu					$3.4 \cdot 10^4$	
^{177}Lu					$1.0 \cdot 10^7$	
^{207}Bi					$6.7 \cdot 10^3$	
α-Strahler	*)	$2.2 \cdot 10^5$	$4.7 \cdot 10^5$	$4.4 \cdot 10^4$		*)
$^{234}/^{238}\text{U}$					$1.9 \cdot 10^4$	
$^{239}/^{240}\text{Pu}$	$1.1 \cdot 10^4$					$4.6 \cdot 10^3$
$^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$	$3.1 \cdot 10^4$					
^{242}Cm	$9.8 \cdot 10^3$					
$^{243}/^{244}\text{Cm}$	$1.4 \cdot 10^4$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2023 bis und mit dem 3. Quartal 2024

Tabelle 3b:

*Abgaben der Kernanlagen mit der Fortluft, Edelgase und Iod 2024:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.*

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase. Edelgase						
Tritium	$6.8 \cdot 10^{11}$	$4.8 \cdot 10^{11}$	$3.6 \cdot 10^{11}$	$4.3 \cdot 10^9$	$2.1 \cdot 10^{12}$	$9.0 \cdot 10^9$
$^{14}\text{C} (\text{CO}_2)$	$2.4 \cdot 10^{10}$	$4.6 \cdot 10^{10}$	$4.6 \cdot 10^{11}$	$1.9 \cdot 10^9$	$1.1 \cdot 10^9$	$9.4 \cdot 10^8$
^{11}C					$1.6 \cdot 10^{13}$	
^{13}N					$1.7 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$6.8 \cdot 10^{13}$	
^{18}F					$5.0 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne						
^{41}Ar					$1.6 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr						
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$9.9 \cdot 10^{10}$					
^{88}Kr	$1.6 \cdot 10^{11}$					
^{133}Xe	$1.9 \cdot 10^{12}$		$7.1 \cdot 10^9$			
^{135}Xe	$1.3 \cdot 10^{12}$		$8.4 \cdot 10^9$			
$^{135\text{m}}\text{Xe}$			$1.4 \cdot 10^9$			
^{137}Xe						
EG-Aequiv.						
EG: β -total		$< 2.7 \cdot 10^{12}$				
Andere						
Iod						
^{123}I					$1.7 \cdot 10^6$	
^{124}I						
^{125}I					$3.6 \cdot 10^7$	
^{126}I						
^{131}I	$2.9 \cdot 10^6$		$2.4 \cdot 10^7$			
^{133}I	$6.4 \cdot 10^6$					

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Fortluft, Aerosole 2024.

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]						
	β/γ -Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{7}Be						$5.1 \cdot 10^5$	
^{24}Na						$1.2 \cdot 10^8$	
^{57}Co		$2.1 \cdot 10^3$					
^{60}Co			$5.3 \cdot 10^4$	$9.6 \cdot 10^4$	$5.1 \cdot 10^4$		
^{77}Br						$3.2 \cdot 10^5$	
$^{80\text{m}}\text{Br}$						$6.2 \cdot 10^7$	
^{82}Br						$7.5 \cdot 10^8$	
^{95}Zr	$7.2 \cdot 10^3$						
^{95}Nb	$2.0 \cdot 10^4$						
^{103}Ru	$6.2 \cdot 10^4$						
^{121}Te						$2.7 \cdot 10^5$	
^{137}Cs				$1.1 \cdot 10^5$			$1.1 \cdot 10^3$
^{144}Ce		$2.2 \cdot 10^4$					
^{181}Re						$3.6 \cdot 10^7$	
^{182}Re						$4.2 \cdot 10^8$	
$^{182\text{m}}\text{Re}$						$5.3 \cdot 10^6$	
^{183}Re						$8.6 \cdot 10^5$	
^{182}Os						$1.7 \cdot 10^8$	
^{183}Os						$2.1 \cdot 10^8$	
$^{183\text{m}}\text{Os}$						$7.4 \cdot 10^7$	
^{185}Os						$1.6 \cdot 10^7$	
^{191}Os	$3.8 \cdot 10^5$						
^{191}Pt						$1.0 \cdot 10^6$	
^{192}Au						$1.5 \cdot 10^9$	
^{193}Au						$1.1 \cdot 10^8$	
^{194}Au						$7.5 \cdot 10^5$	
^{195}Au							$2.4 \cdot 10^3$
^{192}Hg						$4.1 \cdot 10^7$	
$^{193\text{m}}\text{Hg}$						$1.1 \cdot 10^8$	
^{194}Hg						$7.5 \cdot 10^5$	$3.3 \cdot 10^3$
^{195}Hg						$4.6 \cdot 10^8$	
$^{195\text{m}}\text{Hg}$						$1.3 \cdot 10^8$	
^{197}Hg						$5.7 \cdot 10^8$	
$^{197\text{m}}\text{Hg}$						$1.4 \cdot 10^8$	
^{203}Hg						$1.0 \cdot 10^7$	
Nicht spezifizierte							$3.0 \cdot 10^5$
α -Aerosole	$7.5 \cdot 10^3$	$3.3 \cdot 10^4$	$3.9 \cdot 10^4$	$7.7 \cdot 10^3$			$1.5 \cdot 10^4$

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

[1] Bei der **Art der Abgaben** resp. den Bilanzierten Abgaben ist folgendes zu präzisieren:

Abwasser : Die Summe der Abwasserabgaben ist in der Spalte «Abgaben» angegeben. Für den Vergleich mit den Abgabelimiten werden die Werte mit einem Referenz-Immissionsgrenzwert für Gewässer ($IG_{Gw,ref}$ -Wert) von 10 Bq/l umgerechnet und als sogenannte Aequivalentabgaben angegeben:

$$Q_{Aeq} = \sum_i Q_i \frac{IG_{Gw,ref}}{IG_{Gw,i}}$$

Edelgase und Gase : Die Summe der Edelgas- bzw. Gasabgaben ist in der Spalte «Abgaben» angegeben. Für den Vergleich mit den Abgabelimiten werden die Werte mit einem Referenz-Immissionsgrenzwert für Luft ($IG_{Lf,ref}$ -Wert) von 2'000 Bq/m³ umgerechnet und als sogenannte Aequivalentabgaben angegeben:

$$Q_{Aeq} = \sum_i Q_i \frac{IG_{Lf,ref}}{IG_{Lf,i}}$$

Iod : Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von ¹³¹I limitiert; somit ist bei den bilanzierten Abgaben nur dieses Iod-Isotop angegeben. Beim PSI ist die Abgabe für die einzelnen Abgabestellen und die Gesamtanlage als Summe der Aktivität der gemessenen Iod-Nuklide angegeben. Für die Gesamtabgabe des PSI wird zudem auch ein ¹³¹Iod-Aequivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben.

Für die Berechnung der Jahresdosis werden sowohl für die KKW wie für das PSI immer sämtliche verfügbaren Iod-Messungen verwendet.

[2] Abgaben kleiner als 1'000 Bq werden in den Tabellen 3a-3c nicht aufgeführt.

[3] Die **Jahresdosis** wird für fiktive Personen konservativ abgeschätzt, indem angenommen wird, dass sie sich dauernd am kritischen Ort aufhalten, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort beziehen und ihren gesamten Trinkwasserbedarf aus dem Fluss unterhalb der Anlage decken. Die Dosis wird mit den in der Richtlinie ENSI G14 angegebenen Modellen und Parametern ermittelt. Dosiswerte kleiner als 0.001 mSv werden nicht angegeben.

[4] **Abgabelimiten** gemäss Bewilligung der jeweiligen Kernanlage. Die Abgabelimiten wurden so festgelegt, dass die Jahresdosis für Personen in der Umgebung (vgl. Fussnote 3) für die Kernkraftwerke unter 0.3 mSv/Jahr respektive das Zentrale Zwischenlager in Würenlingen (ZZL) unter 0.05 mSv pro Jahr bleibt. Für das Paul Scherrer Institut (PSI) sind die Abgaben gemäss Bewilligung 6/2013 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv pro Jahr limitiert.

8.2

Ortsdosis und Ortsdosleistung in der Umgebung der Kernanlagen

B. Bucher, R. Habegger

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

Die Ortsdosis, respektive die Ortsdosleistung durch externe Strahlung werden bei den Kernanlagen und beim PSI mit dem MADUK-Messnetz (siehe Kapitel 8.3) und mit passiven Dosimetern (Thermolumineszenz-Dosimeter, TLD und Environmental Direct Ion Storage-Dosimeter, EDIS) in der Umgebung sowie am Arealzaun überwacht. Zusätzlich dazu führt das ENSI vierteljährlich stichprobenweise Dosisleistungsmessungen am Arealzaun sowie bei Bedarf spezielle Messkampagnen durch. In der Umgebung der Kernanlagen wurden dabei keine signifikanten Erhöhungen der Ortsdosis festgestellt, welche durch den Betrieb der Anlagen verursacht wurde.

Ergebnisse 2024

Die Ortsdosleistung ist im Nahbereich (beispielsweise am Arealzaun) des Siedewasserreaktor in Leibstadt durch Direkt- und Streustrahlung aus dem Maschinenhaus erhöht. Diese Strahlung resultiert aus dem radioaktiven Zerfall des kurzlebigen Stickstoffnuklids ^{16}N , welches im Reaktor produziert und bei Siedewasserreaktoren mit dem Dampf in die Turbine im Maschinenhaus getragen wird. Weiter können Abfalllager zu einer erhöhten Ortsdosis am Zaun beitragen. Rückbauarbeiten, wie sie im KKM stattfinden, führen in der Regel zu temporären Erhöhungen der Ortsdosis am Zaun.

Beim KKB und KKG wurde am Zaun weder mittels TLD resp. EDIS noch bei den vierteljährlichen Messungen des ENSI eine signifikante Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt. Am Zaun des KKL ermittelte das ENSI bei seinen vierteljährlichen durchgeführten Messungen während des Leistungsbetriebes Ortsdosleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.155 \mu\text{Sv}/\text{h}$. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosierhöhung von etwa 0.016 mSv pro Woche. Die von KKL quartalsweise ausgewerteten EDIS am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosierhöhung von etwa 0.017 mSv . Am Zaun des KKM ermittelte das ENSI bei seinen vierteljährlichen durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen $0.08 \mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.11 \mu\text{Sv}/\text{h}$. Auf eine Woche hochgerechnet wür-

de basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosierhöhung von etwa 0.005 mSv resultieren. Die vom KKM quartalsweise ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosierhöhung von etwa 0.008 mSv . Am Zaun des PSI ermittelte das ENSI bei seinen vierteljährlichen durchgeführten Messungen Ortsdosleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.09 \mu\text{Sv}/\text{h}$. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosierhöhung von ca. 0.005 mSv pro Woche.

Die vom PSI quartalsweise ausgewerteten TLD am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosierhöhung von etwa 0.006 mSv . Beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) konnte weder aus den stichprobenweise durchgeführten Dosisleistungsmessungen noch aufgrund der am Zaun positionierten TLD und Neutronendosimeter eine signifikante Erhöhung der Ortsdosleistung festgestellt werden.

Die Messungen aller Betreiber und des ENSI gaben keinen Hinweis auf eine Verletzung der nach Art. 79 Absatz 2 der Strahlenschutzverordnung anzuwendenden Immissionsgrenzwerte für die Direktstrahlung ausserhalb des Kraftwerksareals von 0.02 mSv pro Woche für Wohn- und Aufenthaltsräume und von 0.1 mSv pro Woche für andere Bereiche.

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, D. Wittwer

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

Das **MADUK**-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und zur Schaffung von Transparenz gegenüber der Öffentlichkeit. Ebenso ermöglicht es das Erkennen von Betriebsstörungen und Unfällen, da Erhöhungen gegenüber den natürlichen Dosiswerten dem ENSI automatisch angezeigt werden.

Die Messwerte im Jahr 2024 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen wären, wurden keine festgestellt.

Übersicht

Das **MADUK**-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von **Anlageparametern (ANPA)** und **Kaminemissionswerten (EMI)** aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 in den operationalen Betrieb überführt. Da das System die Dosisleistung $H^*(10)$ in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr misst und überwacht, dient es der Beweissicherung für die Behörden und gegenüber der Öffentlichkeit. Ebenso ermöglicht es das Erkennen von Betriebsstörungen und Unfällen, da Erhöhungen gegenüber den natürlichen Dosiswerten ab einem vordefinierten Schwellenwert dem ENSI automatisch gemeldet werden. Bei einem Störfall unterstützt MADUK die Notfallorganisation bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.

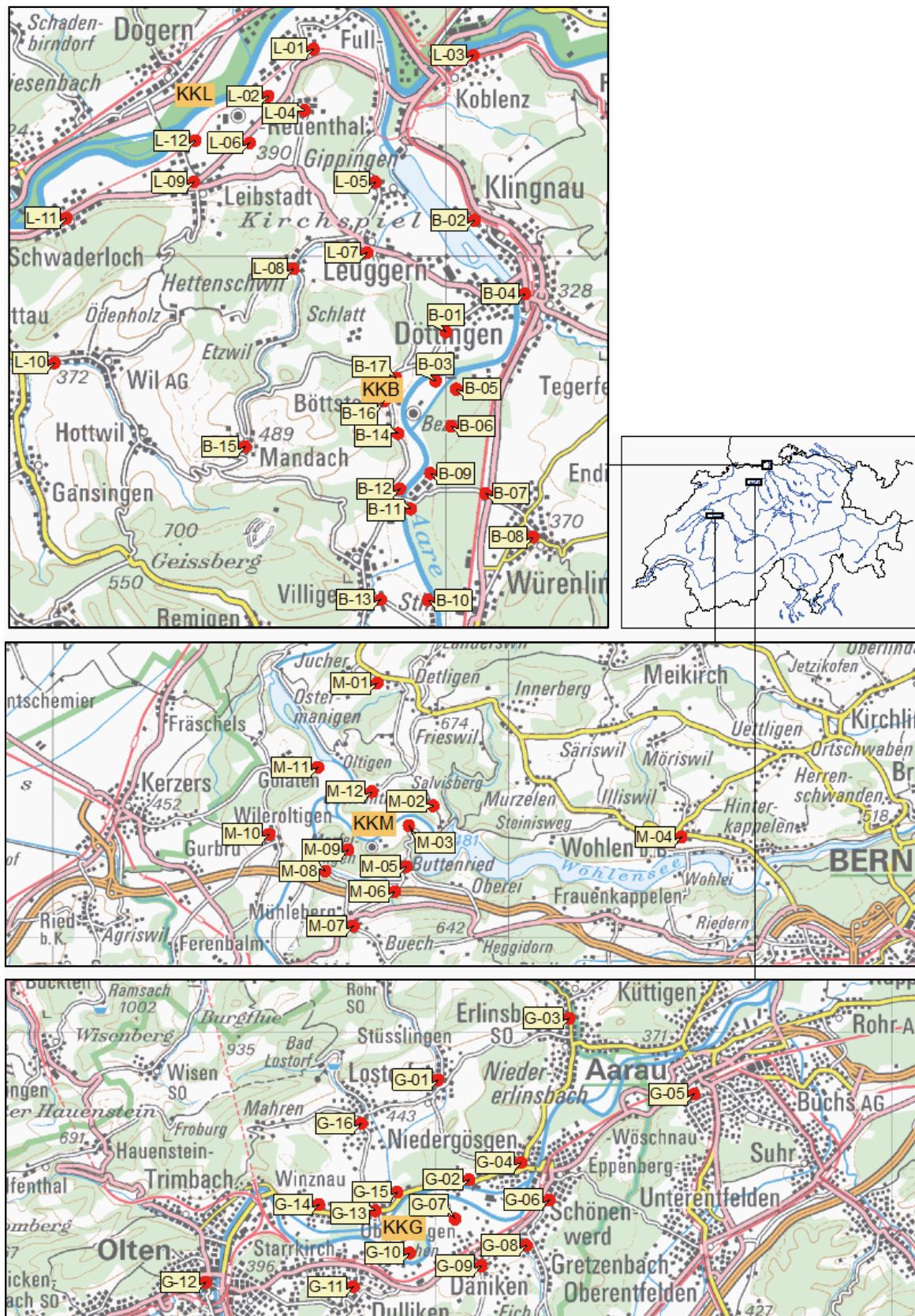
Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 76

Messstationen zählen kann. Die Geiger-Müller-Zählrohre in den Sonden ermitteln die Gamma-Dosisleistung im Messbereich von 10 nSv/h (Niederdosiszählrohr) bis 10 Sv/h (Hochdosiszählrohr). Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Zudem erfolgt ein permanenter Datenaustausch mit externen Partnern wie die Nationale Alarmzentrale (NAZ) und die Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg. Die Figur 1 zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.

Die Daten von MADUK können mittels einer speziellen Software auf bestimmten Windows-Arbeitsplatzrechnern im ENSI visualisiert werden.

Auf der Internetseite <https://ensi.admin.ch/de/messwerte-radioaktivitat/> sind alle seit 1994 archivierten Tages-, Stunden- und Zehnminutenmittelwerte der MADUK Stationen abrufbar.





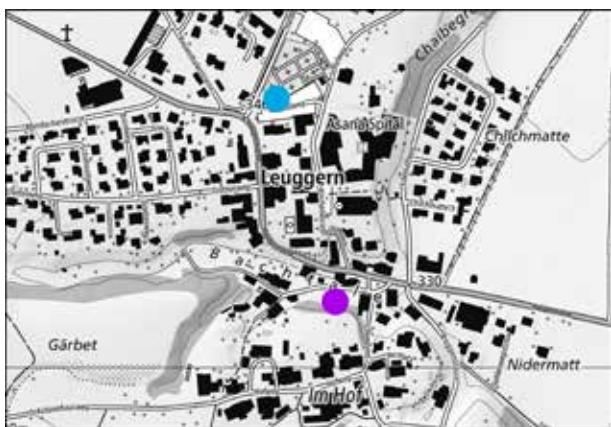
Figur 1:

Die Messstationen von MADUK um die vier KKW-Standorte. Kartendaten PK200 © Bundesamt für Landestopografie.

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Mai 2024 wurde die Station L-07 (Leuggern) in Zusammenarbeit mit der Gemeinde an einen neuen Standort beim Friedhof Leuggern verschoben (Figur 2). Der Wechsel wurde aufgrund eines Umbaus des Gebäudes nötig, auf dessen Dach sich bisher die Sonde befand.

Im 3. Quartal wurden die Rechner der MADUK-Zentrale auf die Virtualisierungsumgebung der Notfallorganisation migriert, die im Rahmen des Projektes DANFO aufgebaut wurde. Die Migration konnte aufgrund der vorhandenen Redundanzen ohne Unterbruch des Betriebs von MADUK durchgeführt werden.



Figur 2:
Alter (lila) und neuer (blau) Standort der Station L-07 in Leuggern.

Systemverfügbarkeit und Störungen

Die System- und Datenverfügbarkeit ist bei MADUK von besonderer Bedeutung, da das System eine kontinuierliche Überwachung gewährleisten muss, die auch von der Öffentlichkeit wahrgenommen wird. Die entsprechenden Kenngrößen wurden auf den 1. Januar 2024 neu definiert. Mit der Kenngröße «Systemverfügbarkeit» (Zielwert 100%) wird die Verfügbarkeit der MADUK-Zentrale beurteilt, mit der Kenngröße «Datenverfügbarkeit» (Zielwert 99%) die Verfügbarkeit der verschiedenen, in MADUK erfassten Daten. Im Jahr 2024 lag die Kenngröße «Systemverfügbarkeit» bei 100%, die Kenngröße «Datenverfügbarkeit» bei 98.9%. Dies war auf folgende Ereignisse zurückzuführen.

Am Wochenende vom 12. Mai führte ein Dateiüberlauf (>65'536 Dateien) in einem Rechnerverzeichnis zu einem Ausfall der Meteodaten und der ANPA-/EMI-Daten während rund 24 Stunden. Die Daten der MADUK-Stationen waren von dieser Störung nicht betroffen.

Ein Kabelschaden ausserhalb des Werkareals führte im Juni zu einem Ausfall der Datenübertragung aus dem KKG während insgesamt 51.4 Stunden. Abgesehen davon erreichte die Übertragung der Anlageparameter aus den KKW insgesamt wiederum eine sehr hohe Verfügbarkeit. Beim KKG

Tabelle 1:

Auflistung der Schwellwertüberschreitungen durch die Netto-dosisleistung im Jahr 2024.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
17.02.2024 10:20	L-12	0.2	60	179
12.08.2024 22:10	L-02	0.3	54	206
12.08.2024 21:50	L-05	0.5	53	206
12.08.2024 22:00	L-06	1.0	68	243
12.08.2024 21:40	L-07	0.7	66	209
12.08.2024 21:30	L-08	1.5	107	263
01.09.2024 21:30	B-08	0.8	81	240
01.09.2024 22:00	B-10	0.3	57	214
01.09.2024 21:20	G-11	0.8	75	246
01.09.2024 21:20	G-14	0.8	77	252
01.09.2024 22:10	L-09	0.3	56	187
01.09.2024 22:00	L-10	0.8	79	217
01.09.2024 21:40	L-11	0.8	83	212
01.09.2024 22:00	L-12	0.3	57	177
08.09.2024 16:30	G-08	0.5	57	183

führten angekündigte Wartungsarbeiten zu vier weiteren Unterbrüchen mit einer Gesamtdauer von 8.1 Stunden. Bei KKB war ein weiterer Unterbruch von 1.0 Stunden zu verzeichnen. Die Übertragung der Anlageparameter des KKL liefen ohne nennenswerte Unterbrüche (> 1 Stunde).

Die Immissionsmessungen des MADUK-Netzes ließen im Jahr 2024 störungsfrei. Nur die Standortverschiebung der Station L 07 führte zu einem permanenten Datenverlust von 96 Stunden. Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.97%.

Qualitätssicherung

Die Aufgaben im Bereich der Qualitätssicherung basieren auf dem Qualitätsmanagementsystem des ENSI. Dadurch ist gewährleistet, dass alle Aufgaben im Zusammenhang mit dem Betrieb, der Wartung und der Instandhaltung/Erneuerung qualitätsgesichert und nachvollziehbar bearbeitet werden.

Im dritten Quartal 2024 erfolgte wie üblich eine jährliche Funktionsprüfung der Messsonden mit Hilfe einer radioaktiven Quelle. Alle Messsonden erfüllten die Prüfkriterien.

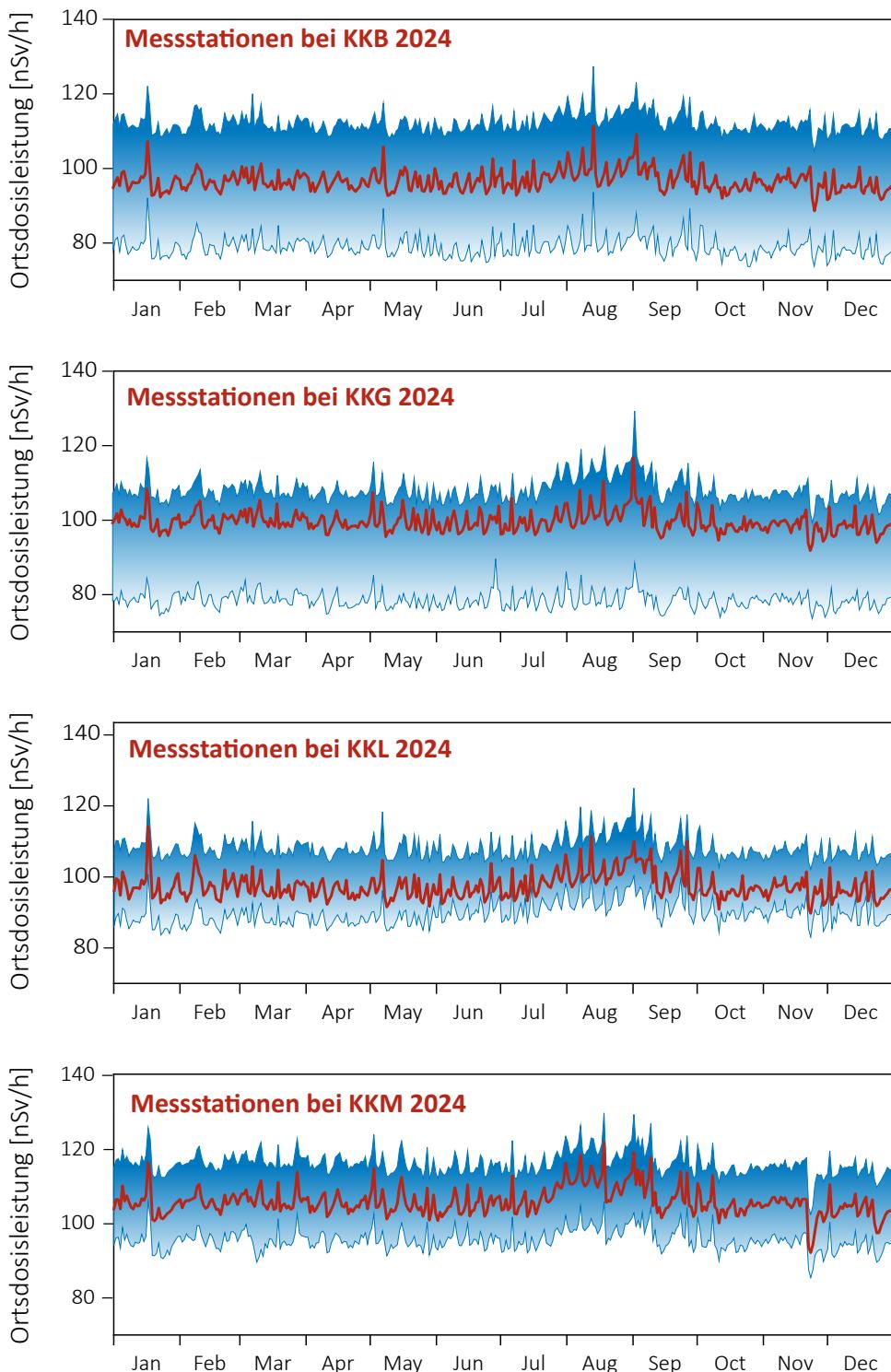
Als weitere qualitätssichernde Massnahme führt das ENSI üblicherweise Messungen mittels In-Situ-Gammaspektrometrie bei den Messstationen durch. Im Jahr 2024 erfolgten die Messungen an den MADUK-Standorten der Messstationen bei KKG und KKL. Bei allen Messungen konnten keine Immissionen der Kernanlagen nachgewiesen werden.

Messergebnisse

Im Jahr 2024 verzeichneten die Messstationen insgesamt fünfzehn Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h (Tabelle 1). Alle Erhöhungen waren auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen.

Das ENSI stellte keine erhöhten Ortsdosisleistungswerte fest, die auf Abgaben der KKW zurückzuführen waren.

Die Figur 3 zeigt die Maxima, die Minima und die Medianwerte der Tagesmittelwerte der Messstationen zum jeweiligen KKW.



Figur 3:
Maxima, Minima und Medianwerte der Tagesmittelwerte der Sonden der Messstationen bei KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2024.

8.4

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

P. Kramer, M. Jäggi, P. Zimmermann, M. Heule

Paul Scherrer Institut, Villigen

Zusammenfassung

Seit 1997 führt das PSI im Rahmen der Immissionsüberwachung Radionuklidmessungen an Waldbodenproben und Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG) durch. Die Staubfangplatten sind mit Vaseline beschichtet und werden γ -spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie ^{241}Am und ^{137}Cs sowie natürliche Radionuklide wie ^7Be , ^{210}Pb gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der γ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung von α - und β -Strahlern (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm und ^{131}I). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf 9 - 21 Bq/kg für das Jahr 2024. Diese Abnahmen sind mit dem radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von ^{137}Cs beträgt 30.17 Jahre) und mit der Verlagerung aus der obersten Bodenschicht in etwas tiefere Schichten durch neu darüber entstehendes Bodenmaterial zu erklären [1]. Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope ^{90}Sr und $^{239+240}\text{Pu}$ sind genauso festzustellen, zumal diese Radionuklide noch früher zu Beginn der 1960er Jahre als Fallout der A-Bombentests in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg, Stand 1997, auf Nachweisgrenze <(2 - 4) Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.1 - 0.3 Bq/kg im Jahr 2024.

Die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ betrugen im Mittel 0.63 in 2024 - bei einem erwarteten Wert von 0.35. Dies entspricht innerhalb der Unsicherheiten den langjährigen Erfahrungswerten. Für das Isotopenpaar $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ konnte das Verhältnis von erwartet 0.03 auch nur noch teilweise bestätigt werden, da für ^{238}Pu nur noch Nachweisgrenzen von <(0.004 - 0.006) Bq/kg erhalten wurden.

Einleitung

Das Zwischenlager (Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erbaut und in Betrieb genommen. Um potentielle, geringfügige Radionuklid-Emissionen in der Umgebung des Areals aus Abgaben aus der Anlage feststellen zu können, wurden vor der Inbetriebnahme im Rahmen des Projektes Beweissicherung umfangreiche Radionuklid-Messungen an Bodenproben in der unmittelbaren Umgebung des Areals durchgeführt [2]. Diese Analysen dienten der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B. ^7Be), terrestrischer (^{40}K sowie Radionuklide aus den U- und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropoge-

ner Radioisotope (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm und ^{131}I) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von oberirdischen Kernwaffentests der 60er Jahre und des Chernobyl-Reaktorunfalls im Jahr 1986. Seit der Durchführung dieser Studie zur Beweissicherung werden im Routinebetrieb einmal jährlich an 4 Erhebungsorten Waldbodenproben aus der oberen Schicht (0 - 5 cm) erhoben, getrocknet, verarbeitet und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades sind das ganze Jahr über 4 Staubfangplatten entlang der Umzäunung des Zwilag angebracht.

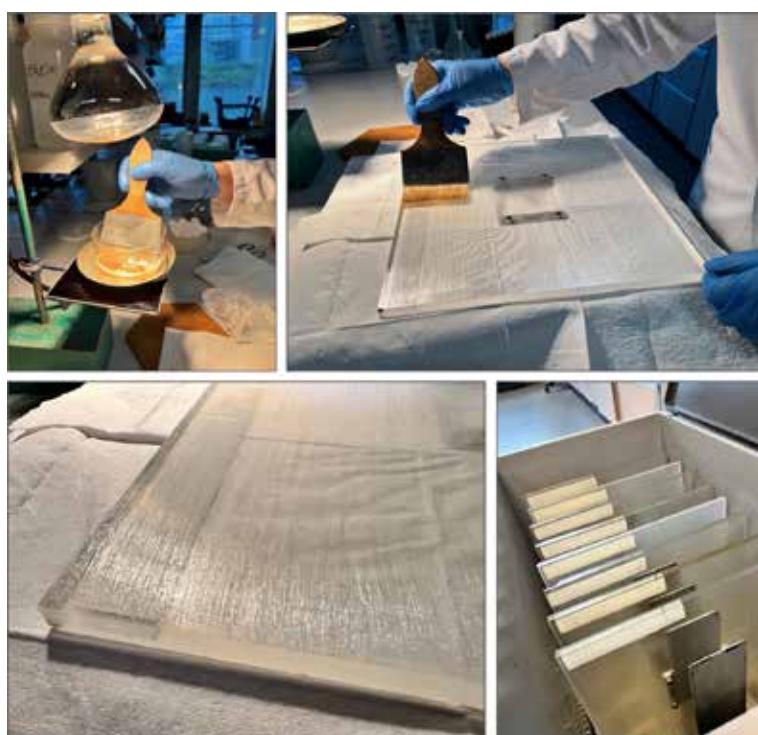
Radiochemische Trennmethoden für die Bearbeitung der Bodenproben

Nach der Probenerhebung werden die Bodenproben zunächst getrocknet, gesiebt und in Aliquote von je ca. 30 g aufgeteilt. Vor der Analyse werden ^{243}Am - und ^{242}Pu -Tracer hinzugegeben. Nach der Nass- und Trockenveraschung wird die Probe in 6 M HCl unter Kochen während 1 Stunde ausgelaugt («Leaching»), sodass die oberflächlich adsorbierten Fallout-Produkte in Lösung gehen. Die Lösung, welche die Fraktionen von Pu, Am und Cm, aber auch U und Th enthält, wird filtriert, um die verbleibenden festen Partikel zu entfernen.

Diese Leach-Lösung wird auf eine DGA-Säule gegeben in der die Actinoiden vorkonzentriert werden. Das zweiwertige ^{90}Sr läuft durch, wird eingedampft, mit Ca-Oxalat gefällt und über ein Sr-Resin getrennt. Die Actinoiden werden von der DGA eluiert, und zu einer 8 M HNO_3 Lösung hochkonzentriert. Durch die Zugabe von H_2O_2 (Oxidationsmittel) und nach Erhitzen liegt das Plutonium vorwiegend als Pu^{4+} vor. Die auf Raumtemperatur abgekühlte Lösung wird über eine Anionentauscher-Kolonne (Bio-Rad AG 1-X2, 100-200 mesh) gegeben. Durch Zugabe von HNO_3 und HCl-Waschlösungen werden potentiell bei der α -Spektrometrie interferierende, natürliche Radionuklide abgetrennt (z.B. α -Emission des natürlichen

Radionuklids ^{228}Th interferiert mit dem künstlichen Radionuklid ^{238}Pu bei 5.4 MeV). Im folgenden Schritt wird die Pu-Fraktion mit einer HI/HCl-Lösung eluiert. Diese bewirkt die Reduktion von Pu^{4+} zu Pu^{3+} , welches bei tiefem pH in Lösung geht. Die durch die Bio-Rad-Kolonne gelaufene Fraktion, welche ebenso das Am und Cm enthält, wird über zwei zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer UTEVA-Kolonne zur Retention von U und Th und einer DGA-Säule, die Am und Cm adsorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach salzauren NaNO_2 Lösung. Da Am in sehr geringer Konzentration vorliegt, ist ein weiterer Reinigungsschritt, die Trennung von den Lanthanoiden mit einer TEVA-Säule notwendig. Die Fraktionen von Pu bzw. Am und Cm werden anschliessend eingedampft, kalziniert und in einer Na_2SO_4 - NaHSO_4 -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Actinoiden verwendet wird. Nach der Elektrodeposition werden die verschiedenen Messpräparate über 3 Tage mit hochauflösender α -Spektrometrie gemessen (alle Details in [2]).

Das Radionuklid ^{90}Sr (reiner β -Strahler) wird nach der chemischen Trennung über eine Säule mit Sr-Resin eingedampft und in 2 ml Toluolsulfonsäure gelöst. Die Lösung wird mit der Szintillationsflüssigkeit Ultima Gold LLT vermischt und anschliessend im Flüssigszintillations-Spektrometer gemessen.



Figur 1:

Vorbereitung der Staubfangplatten im Labor für den Einsatz draussen. Das aufzutragende Fett wird unter einer Wärmelampe verflüssigt, mit einem Pinsel schnell und als dünne Schicht auf die Staubfangplatte aus Plexiglas aufgetragen (obere Reihe). Fertig beschichtete Platte, auf der sich Staub und Partikel aus der Luft ablagern können und Platten in der Transportkiste bereit zur Installation (untere Reihe). Fotos: Patricia Kramer und Martin Heule.

Staubfangplatten

Die 4 Staubfangplatten, eine pro Himmelsrichtung, befinden sich entlang der Umzäunung des Zwilag-Areals. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden nach etwa 4 Wochen Exposition ausgewechselt. Im Labor wird die Mischung aus Partikeln, Staub und Vaseline unter Erwärmung von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen gesammelt. Mittels hochauflösender Gamma-Spektrometrie werden Photonen-emittierende Radioisotope wie ^{7}Be , ^{241}Am , ^{137}Cs und ^{131}I gemessen. Die γ -Messung dauert 15 Stunden.

Niederschlag

In einem monatlichen Turnus wird das in diesem Zeitraum anfallende Niederschlagswasser aus dem Niederschlags-sammler beim Zwilag-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10 ml dieser Wasserproben werden für die Tritium-Messung verwendet und grossvolumige Monatsmischproben (falls verfügbar 6 Liter) werden für die Langzeit-Gamma-Spektrometrie genommen. Gemessen werden anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs , für welches bei den Langzeitmessungen von 48 Stunden Dauer tiefe Nachweisgrenzen von bis zu 0.04 Bq/Liter erreicht werden.

Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{131}I) und die natürlichen terrestrischen Isotope aus den U- und Th-Zerfallsreihen (als ^{226}Ra und ^{228}Ra ausgewiesen) zusammengefasst. Dargestellt ist der Streubereich der Probenmessungen aus den 4 Bodenentnahmestellen um das Zwilag-Areal. Die Aktivitätskonzentrationen sind über die Zeit innerhalb der Messunsicherheiten stabil und liegen

auf sehr tiefem Niveau. Die Aktivitätskonzentrationen gewisser Nuklide lagen in verschiedenen Jahren teilweise tiefer als die Nachweisgrenze des verwendeten Messverfahrens. Für 2024 konnte ^{238}Pu in keiner Probe mehr nachgewiesen werden. Dies bei Nachweisgrenzen von <0.004 Bq/kg bis <0.006 Bq/kg. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ lagen zwischen 0.09 und 0.29 Bq/kg. Die Messwerte streuten ebenfalls etwas stärker, aber um denselben Mittelwert verglichen mit dem Vorjahr. Die Aktivitätskonzentrationen von ^{241}Am bewegten sich zwischen 0.09 und 0.15 Bq/kg und lagen damit Erfahrungsbereich. Der Wertebereich für das Spaltprodukt ^{90}Sr lag 2024 durchgehend unterhalb der Nachweisgrenze von < 2 Bq/kg bis < 4 Bq/kg. Für ^{90}Sr ist die Erwartung, dass die Konzentrationen einem langsamen Abbau- und Zerfallstrend folgen. Es kann also sein, dass gelegentlich wieder Messwerte rund um die Nachweisgrenze auftreten werden. . Die Resultate für ^{137}Cs (9 - 21 Bq/kg, im Mittel 13 Bq/kg) liegen unterhalb des Niveaus des langjährigen Mittels. Der Grund für die grundsätzlich höheren Aktivitätskonzentrationen ist der Beitrag von Fallout-Cäsium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall von 1986.

Das Isotopenverhältnis für die Pu-Isotope konnte für dieses Jahr nur noch als Maximalgrösse abgeschätzt werden, da die Messwerte für ^{238}Pu bereits unterhalb der Nachweisgrenzen lagen. Das aus dem Fallout erwartete Isotopenverhältnis von $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ liegt aufgrund langjähriger Erfahrung bei 0.03, dem auch die Abschätzung entspricht. Für das andere charakteristische Isotopenverhältnis zwischen $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ wurde ein Mittelwert von 0.6 bestimmt (erwartet 0.35, in diesem Jahr etwas nach oben abweichend). Dieses Ergebnis bestätigt nach wie vor die Annahme, dass die gemessenen Werte für die Actinide den oberirdisch durchgeföhrten Kernwaffentests, welche bis vor 62 Jahren noch durchgeföhr wurden, zuschreiben sind [2,3]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten fünf Jahre.

Tabelle 1:

Anthropogene Fallout-Isotope in Bodenproben aus der Umgebung der Zwilag (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten fünf Jahre (2020-2024). Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2020	2021	2022	2023	2024
^{90}Sr	< 1 - 2	1.3 - 3.5	<1 - 2	< 2.6- 4.1	< 2- 4
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs ⁽¹⁾	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	10 - 40	7 - 60	8 - 30	9 - 41	10 - 21
^{238}Pu	< 0.005- 0.03	0.02 - 0.06	< 0.01	< 0.01	< 0.004 - 0.006
$^{239+240}\text{Pu}$	0.05 - 0.5	0.2 - 1.0	0.2 - 0.4	0.06- 0.5	0.09- 0.29
^{241}Am	0.02 - 0.3	0.02 - 0.4	0.05 - 0.3	0.03 - 0.2	0.09 - 0.15
^{226}Ra	20 - 30	19 - 30	25 - 35	17 - 32	22 - 29
^{228}Ra	20 - 40	15 - 40	20 - 40	22 - 35	20 - 37

⁽¹⁾ Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop ist inzwischen abgeklärt, da seit 1986 fast 40 Jahre vergangen sind.

In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 23 - 37 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Diese Werte liegen konstant zwischen 20 - 40 Bq/kg und zeigen keinen Trend über die Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingelagert sind und im säkularen Gleichgewicht mit ihren langlebigen Mutternukliden stehen. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für ^{238}U 2 - 3 ppm und für ^{232}Th 5 - 9 ppm, d.h. es handelt sich um typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 275 und 440 Bq/kg gemessen, ein recht stabiler Wert auch über die Jahre gesehen.

Literaturliste

[1] Corcho-Alvarado, J. A.; Balsiger, B.; Sahli, H.; et al. J. Environ. Radioact. 2016, 160, 54-63.

[2] Eikenberg, J., Bajo, S., Hitz, J., Beer, H., Gann, C., Wyer, L und Ziegler, J. (2002) Spezialnuklid-Analysen für die Beweissicherung Zwilag AG 1997-2001: Abschlussbericht der Immissionsmessungen. PSI-Bericht Nr. 02-15.

[3] UNSCEAR (2000), Sources and effects of ionising radiation. Report to the General Assembly, Volume 1, Annex C, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

Messresultate Staubfangplatten

Weniger aufwändig ist die Auswertung der Staubfangplatten. Mit der monatlichen Sammlung der auf dem Fett anhaftenden Partikel ist praktisch eine kontinuierliche Überwachung möglich. Seit Beginn der Probenahmen lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unterhalb der Nachweigrenzen von <0.3 Bq/m², bzw. <0.4 Bq/m². Anhand des in der oberen Atmosphäre durch Sonnenpartikel produzierten ^7Be lassen sich die mittleren Jahreszeitverläufe abbilden. Auch die Flächenaktivitäten auf den Staubfangplatten von ^7Be schwankten zwischen ca. 2.5 - 16 Bq/m² im Winter und stiegen im Sommerhalbjahr 2024 lediglich bis auf 53 Bq/m² an (Mai 2024). Damit wurden die Maximalwerte von 100 Bq/m² aus 2021 nicht mehr erreicht.

Messresultate Niederschlag

Bei den Regenwasserproben wurden mittels Flüssigszintillation (LSC) ^3H -Aktivitäts-Konzentrationen von <2 - 7.4 Bq/l nachgewiesen, wobei im Sommerhalbjahr die ^3H -Aktivität dicht bei oder unterhalb der Nachweigrenze von <2 Bq/l lag. Das Maximum wurde im November 2024 mit 7.4 Bq/l erreicht. Dies korreliert mit den Messungen auf dem PSI-Gelände, wo ebenfalls im November und Dezember die höchsten Werte des Jahres gemessen wurden. Mit der Gammapektrometrie konnten seit 1997 erwartungsgemäß im Regenwasser noch nie anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs oder ^{131}I nachgewiesen werden. Die Nachweigrenze dieser Radionuklide liegt anhand des ausgewerteten Leitnuklids ^{137}Cs jeweils bei 0.04 Bq/l.

8.5

Les installations nucléaires et l'environnement

S. Estier, J. Beuret, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller, P. Steinmann

Section radioactivité dans l'environnement, URA / OFSP, Berne

Résumé

Les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, mises en œuvre dans le cadre de la surveillance de la radioactivité au voisinage des centrales nucléaires ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques (^{14}C dans les feuillages) et des rejets liquides (^3H dans l'eau ou ^{54}Mn et ^{60}Co dans les sédiments) de ces installations. La contribution du rayonnement direct a également été détectée en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühleberg. Les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont toutefois restées nettement inférieures aux limites réglementaires et donc, sans danger pour la santé.

Hormis ces quelques exemples, les résultats des mesures environnementales sont similaires à ceux relevés dans les endroits situés hors de l'influence des installations nucléaires. Ils montrent que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que les contaminations détectables proviennent principalement des essais nucléaires des années 60 (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am) ainsi que de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs).

Introduction

Conformément aux recommandations internationales, un programme spécifique de surveillance de la radioactivité dans l'environnement est mis en œuvre au voisinage des centrales nucléaires suisses afin de s'assurer que les concentrations des radionucléides dans les différents compartiments de l'environnement restent inférieures aux limites légales et donc sans danger pour la population avoisinante. Ainsi, si les exploitants sont tenus de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois à l'IFSN, le programme de surveillance des immissions, défini conjointement par l'IFSN et l'OFSP, est coordonné et mis en œuvre de manière indépendante par l'OFSP dans le cadre du programme national de prélèvements et de mesures.

Le contrôle des autorités commence par des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, l'IFSN et l'OFSP sur divers échantillons contenant des radionucléides en

phase de rejet (filtres aérosols, charbons actifs piégeurs d'iode, eaux de rejet), permettant de valider les bilans établis par l'exploitant. La surveillance se poursuit par la mesure des immissions des centrales nucléaires (concentrations radioactives effectivement mesurées dans l'environnement). Tous les compartiments environnementaux sont examinés, de l'air jusqu'aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma *in situ*) complètent ces analyses en permettant d'évaluer directement la radioactivité déposée au sol. Ce programme spécifique de surveillance englobe non seulement les propres mesures de l'OFSP mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut de radiophysique (mesures alpha et ^{90}Sr), du laboratoire de Spiez (^{90}Sr dans les eaux de rejet), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université de Berne (^{14}C et ^{85}Kr) et du LUBW (Baden-Württemberg), conformément au programme germano-suisse autour de la centrale nucléaire de Leibstadt.

Tableau 1

Tableau récapitulatif indiquant les chapitres du présent rapport à consulter pour accéder aux résultats détaillés de la surveillance du voisinage des installations nucléaires en fonction du compartiment environnemental (milieu) ou du radionucléide d'intérêt.

Milieu/Isotope	Chapitre
Exposition ambiante	8.2 - 8.3
Air/Aérosols (émetteurs γ)	4.1 - 4.2
Précipitations (γ , ^{3}H)	4.1
Milieu aquatique	4.4
Mesures in situ	3.1
Sol et herbe (γ , ^{90}Sr)	4.7
Actinides Pu, ^{241}Am	7.2
^{14}C dans les feuillages	7.1
Denrées alimentaires	5

L'OFSP procède ensuite à l'examen de l'ensemble de ces données pour évaluer de manière pertinente l'impact des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce programme de surveillance des immersions au voisinage des installations nucléaires. Le tableau 1 indique les chapitres à consulter pour accéder aux résultats plus détaillés relatifs à un compartiment de l'environnement particulier ou un radionucléide spécifique.

Les concentrations des différents radionucléides émis par les centrales nucléaires étant le plus souvent difficilement mesurables dans l'environnement, l'estimation de la dose au public repose avant tout sur les calculs effectués à partir des émissions des installations. En effet, à la source, avant leur dispersion dans l'environnement, les niveaux de radioactivité sont beaucoup plus élevés, et les radionucléides rejetés peuvent être identifiés de manière plus exhaustive et aisément quantifiés. Leur impact sur l'environnement et l'homme est ensuite déterminé sur la base de modèles de transfert, basés sur des hypothèses conservatrices. En complément, les mesures dans l'environnement servent à vérifier ces modèles et à établir un bilan local réaliste de la radioactivité naturelle et artificielle.

La centrale nucléaire de Mühleberg, dont l'exploitation électrique a été arrêtée le 20 décembre 2019, a été mise définitivement hors service par le groupe BKW Energie SA le 15 septembre 2020. Cette étape marque le passage du régime de l'autorisation d'exploiter à la décision de désaffectation. Si à cette date, un nouveau règlement concernant le rejet de substances radioactives ainsi que la surveillance de

la radioactivité et du rayonnement direct dans le voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est entré en vigueur, seules certaines limites de rejet ont pour l'heure été modifiées. La surveillance de la radioactivité dans l'environnement se poursuit quant à elle comme en régime d'exploitation. Notons qu'en septembre 2023, un important jalon du processus de désaffectation de la centrale a été atteint, puisque les derniers éléments combustibles usagés ont été acheminés au centre de stockage provisoire de Würenlingen. Il ne reste donc plus de combustible nucléaire à la centrale nucléaire de Mühleberg.

Méthodologie

Dans le cadre du suivi de l'environnement, deux approches peuvent être envisagées: l'une radio-écologique qui consiste à rechercher les meilleurs indicateurs de la contamination du milieu, et l'autre dosimétrique, qui met l'accent sur ce qui peut contribuer aux doses reçues par la population. La surveillance des installations nucléaires s'oriente sur ces deux aspects. Les méthodes de prélèvement et de traitement sont définies de manière à assurer une reproductibilité et à viser à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à très bas niveaux.

Résultats 2024

Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP de filtres aérosols et d'échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet, ainsi que les contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que les 4 centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (KKB 1 et 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2024 (voir chapitre 8.1). Les rejets de substances radioactives dans l'air par la centrale nucléaire de Mühleberg ont, comme on pouvait s'y attendre, nettement diminué depuis sa mise à l'arrêt; les émissions de gaz rare, et surtout d'iode, ont ainsi cessé. Pendant les 4 premières années qui ont suivi la mise à l'arrêt (2020 - 2023), les rejets de substances radioactives dans les cours d'eau sont restés quant à eux comparables à ceux déclarés au cours des dernières années d'exploitation, pour diminuer significativement en 2024. On notera que toutes les centrales ont respecté la valeur cible de 1 GBq pour les rejets liquides en 2024.

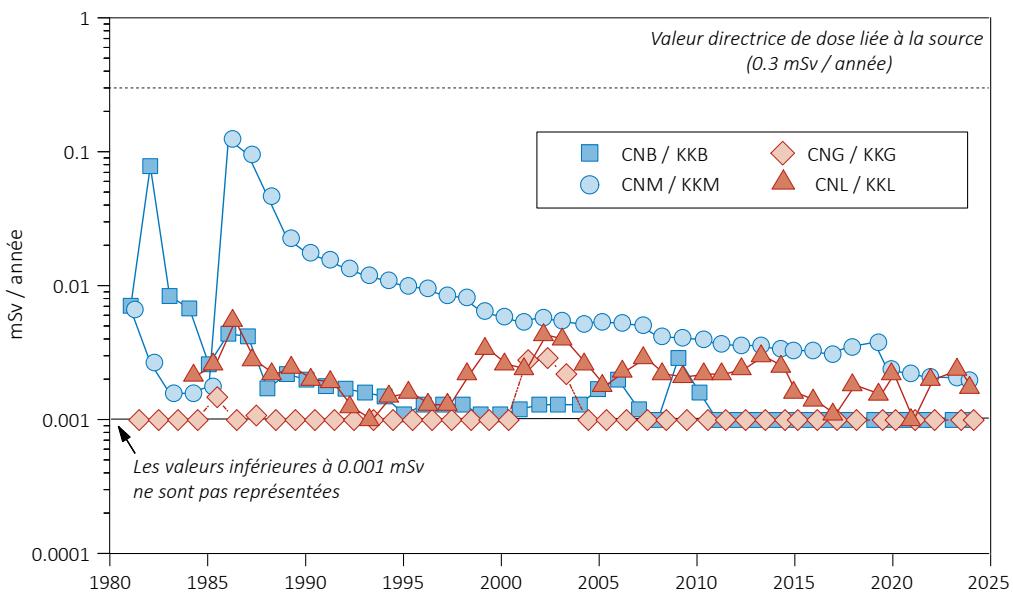


Figure 1:

Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2024 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

La figure 1 présente les doses calculées pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires suisses entre 1981 et 2024. Ces doses sont calculées sur la base des rejets effectifs, en appliquant des modèles de dispersion ainsi que sur la base de scénarios conservateurs en termes de temps de séjour en plein air et d'habitudes alimentaires des personnes les plus exposées selon la directive G14 de l'IFSN.

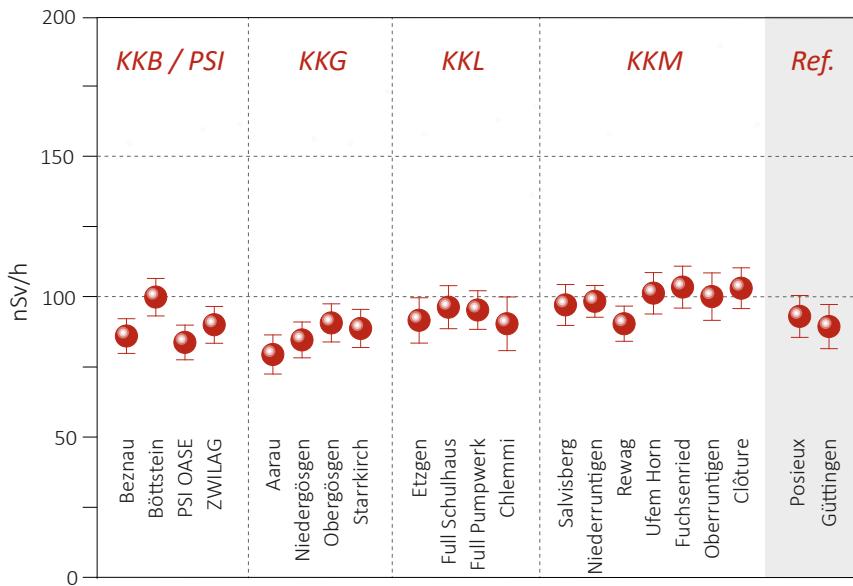
L'augmentation significative de la dose au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg en 1986 est due à un rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère. A partir des mesures de terre et d'herbe effectuées par la suite par la commission fédérale de surveillance de la radioactivité de l'époque, l'activité rejetée en septembre 1986 avait pu être estimée à 11 GBq (50% de ^{134}Cs , 40% de ^{137}Cs , 7% de ^{60}Co et quelques 3% de ^{65}Zn) et donc inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. Comme le montre la figure 1, l'impact radiologique de ce rejet très localisé a constamment diminué depuis.

Les doses calculées pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires sur la base des émissions effectives, en tenant compte des rejets des années précédentes, se sont échelonnées en 2024 entre <0.001 mSv pour KKG et KKB et env. 0.002 mSv pour KKM et KKL. Pour cette dernière installation, la dose calculée atteint environ 0.004 mSv pour les enfants de 1 an. La contribution majeure à la dose au voisinage de KKL provient des rejets atmosphériques de ^{14}C alors qu'à Mühleberg, la contribution rémanente des résines rejetées en 1986 est toujours responsable de la contribution supplémentaire à la dose.

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres passifs (dosimètres thermoluminescents, abrégés TLD, et Environmental Direct Ion Storage Dosimeter, EDIS) et par des mesures périodiques effectuées par l'IFSN à la clôture des installations.

Comme par le passé, les résultats de cette surveillance ont mis en évidence des valeurs plus élevées en certains points de la clôture du réacteur à eau bouillante de Leibstadt en raison du rayonnement direct et diffusé en provenance de la salle des machines. Les résultats des mesures instantanées de l'IFSN tout comme les valeurs trimestrielles des EDIS ont montré que l'augmentation de la dose ambiante à la clôture de la centrale de Leibstadt, après soustraction du bruit de fond naturel, avait atteint au maximum 0.017 mSv par semaine en 2024. Ce rayonnement résulte de la désintégration radioactive du ^{16}N , à courte demi-vie (15 h), qui est produit dans le réacteur et, dans le cas des réacteurs à eau bouillante, est transporté avec la vapeur dans la turbine du bâtiment des machines. Avec l'arrêt de l'exploitation de la centrale de Mühleberg, la contribution de l' ^{16}N a disparu, toutefois, les travaux de démantèlement peuvent entraîner des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture. L'évaluation des TLD, disposés à la clôture de la centrale de Mühleberg, a ainsi indiqué une élévation maximale de la dose ambiante de 0.008 mSv par semaine (calculée sur la base de la valeur trimestrielle) par rapport au fond naturel ambiant. Lors de ses contrôles trimestriels effectués sur le site, l'IFSN a enregistré des valeurs instantanées de débit de dose comprises entre 0.08 (correspondant au fond naturel) et 0.11 $\mu\text{Sv}/\text{h}$. En extrapolant cette valeur instantanée

**Figure 2:**

Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2024 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).

maximale sur une semaine, il en résulterait une dose ambiante hebdomadaire supplémentaire par rapport au fond naturel d'environ 0.005 mSv.

Aucune valeur plus élevée n'a en revanche pu être mesurée à la clôture des centrales nucléaires de Beznau et Gösgen.

A la clôture du PSI, les contrôles ponctuels de l'IFSN ainsi que l'évaluation des TLD ont mis en évidence des élévations de la dose ambiante pouvant atteindre respectivement au maximum 0.005 à 0.006 mSv par semaine (après soustraction du bruit de fond naturel).

Une dosimétrie d'ambiance du rayonnement des neutrons et des gammas est en outre réalisée par l'IRA sur mandat de l'OFSP depuis 2004 autour du PSI-West (11 dosimètres à thermoluminescence TLD) sur une base trimestrielle. Trois points de mesures supplémentaires sont par ailleurs situés autour de SwissFEL au PSI. Il s'agit de contrôler des endroits accessibles au public sur le toit du bâtiment, au-dessus des beam dumps de l'injecteur, d'Athos et d'Aramis.

Aucune dose de neutrons n'a été relevée autour du PSI-West et de SwissFEL au cours du 1^{er} trimestre 2024, l'ensemble des valeurs étant inférieures à limite de détection. Ceci était attendu puisque les installations étaient à l'arrêt pendant cette période. Le reste de l'année, les doses des neutrons sont également le plus souvent restées inférieures à la limite de détection mais quelques faibles doses, comparables à celles enregistrées au cours des années

précédentes, ont été mesurées en certains points autour du PSI West (valeur maximale de 0.035 mSv/trimestre au 4^{eme} trimestre). Notons que les équivalents de dose ambients attendus dans l'environnement, dus à l'irradiation naturelle, sont de l'ordre de 0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons.

Les doses des photons sont restées au niveau de l'irradiation naturelle (0.2 mSv par trimestre) dans tous les emplacements autour du PSI-West et de SwissFEL, avec quelques petites fluctuations, en particulier en un point situé près de la clôture où une valeur un peu plus haute (maximum de 0.270 mSv au 3^{eme} trimestre) a été observée, comme dans le passé.

Aucune augmentation significative du débit de dose local n'a en revanche pu être décelée au voisinage du ZWILAG, ni sur la base des dosimètres TLD et neutroniques positionnés le long de la clôture, ni sur la base des mesures ponctuelles du débit de dose réalisées par l'IFSN.

Toutes ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés. En effet, cet article stipule que la dose ambiante ne doit pas dépasser 0.02 mSv par semaine aux endroits situés à l'extérieur de ces secteurs où peuvent séjourner durablement des membres du public. Cette valeur peut être dépassée jusqu'à 5 fois (0.1 mSv/semaine) dans les endroits où personne ne séjourne durablement, comme c'est le cas à la clôture des centrales nucléaires. Il convient de relever qu'il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne, puisque le

temps de séjour n'est pas considéré. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside durant de longues périodes en ces endroits.

L'OFSP effectue également des mesures de débit d'équivalent de dose ambiante H*(10) à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1 m au-dessus du sol dans un voisinage plus étendu. La figure 2, illustrant les résultats de ces mesures, montre que l'exposition ambiante aux environs des installations nucléaires ne se distingue pas de manière significative de celle enregistrée à Posieux ou à Göttingen, situées hors de leur influence. Les résultats des mesures in situ (voir chapitre 3.1) effectuées parallèlement aux mesures d'équivalent de dose ambiante n'excluent pas une faible contribution supplémentaire au débit de dose ambiant sur le site de mesure situé à proximité immédiate de la clôture de la centrale nucléaire de Mühleberg, attribuable au stockage temporaire de matériaux issus des travaux de démantèlement. Les valeurs de débit de dose légèrement plus élevées mesurées sur les autres sites de mesure du voisinage de KKM sont toutefois dues à une concentration généralement plus élevée en ^{40}K (naturel) dans les sols de cette région (cf. figure 3).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La surveillance du milieu atmosphérique au voisinage des installations nucléaires comprend la mesure de la radioactivité dans les aérosols et les précipitations par l'OFSP et le PSI ainsi que l'analyse des dépôts sur plaques de vaseline par l'exploitant.

La surveillance de la radioactivité dans l'air dans le rayon d'influence des centrales nucléaires est assurée par les 9 stations du réseau URAnet aero. Le collecteur à moyen débit du PSI, dédié à la surveillance des immissions dans l'air dans son voisinage, est par ailleurs toujours en fonction. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a été mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2024 (voir aussi chapitre 4.2). Les activités du ^{137}Cs sont ainsi restées inférieures à la limite de détection d'env. 3 - 7 mBq/m³ (pour une mesure de 12h).

Le collecteur à grand débit (HVS) situé à Klingnau, à quelques km seulement du PSI, est dédié à la surveillance de traces de radioactivité dans l'air et permettrait de mettre en évidence de faibles rejets de substances radioactives dans la région. La limite de détection pour le ^{137}Cs de ce dispositif très sensible est de l'ordre de 0.2 - 0.3 µBq/m³ pour un temps de collecte de 7 jours et une mesure en laboratoire de 48h. En période sèche, les poussières de sol contenant le ^{137}Cs déposé à la suite des essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl en 1986, peuvent être remises en suspension dans l'air. Le ^{137}Cs est alors parfois détecté sur

les filtres aérosols des collecteurs HVS. Avec une concentration maximale de ^{137}Cs de $0.7 \pm 0.2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ mesurée la dernière semaine de décembre 2024, les concentrations de ^{137}Cs enregistrées à la station HVS de Klingnau ne se sont toutefois pas distinguées de celles enregistrées à la station de référence de Göttingen (valeur maximale de $0.6 \pm 0.2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ à la même période), située hors influence des installations nucléaires. Ces résultats confirment que le ^{137}Cs provient d'anciennes contaminations.

Des traces de ^{24}Na ont également été sporadiquement mesurées dans les filtres HVS de la station de Klingnau en 2024. Ce radionucléide de très courte demi-vie (7 s) peut, quant à lui, être produit dans les accélérateurs de particules du PSI et n'a pas été détecté dans les filtres HVS de la station de référence de Göttingen. La concentration maximale mesurée en 2024 s'élève à $70 \pm 30 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$; elle ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immission dans l'air, fixée dans l'ORaP à $48 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Les activités des émetteurs gamma d'origine artificielle dans les échantillons de pluie collectés aux environs des centrales nucléaires de Mühleberg, Leibstadt, Gösgen et Beznau ainsi que ceux du voisinage du PSI et du ZWILAG sont restées inférieures aux limites de détection, à l'exception d'une valeur légèrement supérieure ($0.4 \pm 0.2 \text{ mBq/l}$) mesurée pour le ^{137}Cs en mars 2024 aux environs de Leibstadt. La limite de détection pour un radionucléide donné dépend en particulier de la quantité de précipitations et du temps de mesure et se situe, pour le ^{137}Cs , entre 0.2 et 0.9 mBq/l pour les mesures OFSP (voisinage KKM, KKG et KKL) et aux environs de 40 mBq/l pour les mesures PSI.

Les résultats des mesures du tritium (^{3}H) dans les échantillons mensuels de précipitations des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. Ils montrent qu' hormis quelques valeurs légèrement plus élevées enregistrées au voisinage du PSI et de Beznau, les concentrations de tritium dans les précipitations sont

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2024.

Lieu	Valeur min/max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruttingen * (environs KKM)	< 2.0	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2.0	-
Full (environs KKL) *	< 2.0	-
Beznau (environs KKB) **	2.2 - 36.0	6.9
PSI **	< 1.4 - 21.0	-
ZWILAG **	< 1.4 - 7.4	2.4

* mesures OFSP / ** mesures PSI

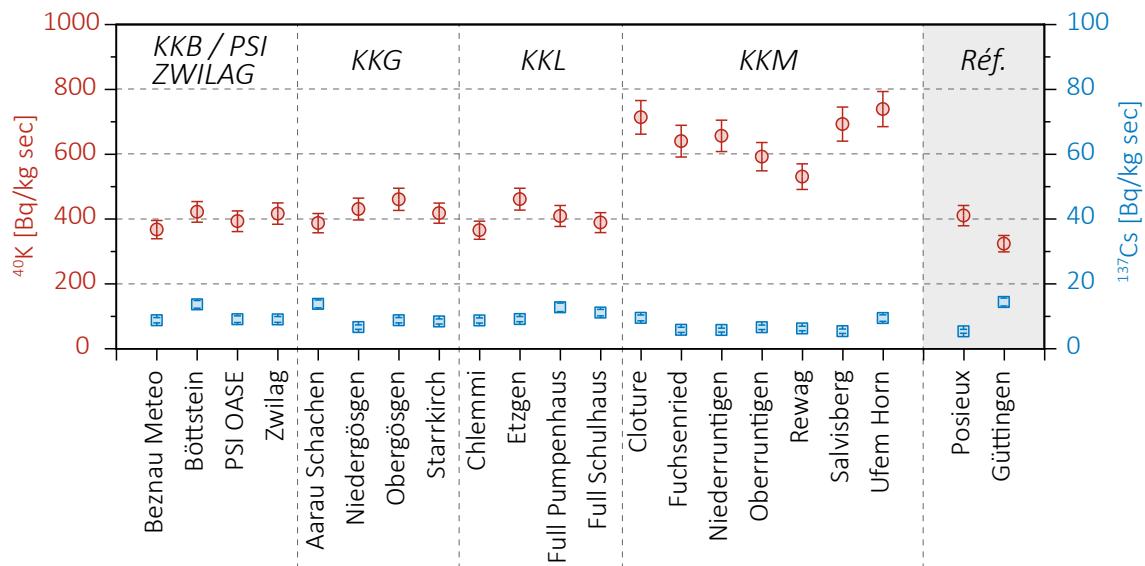


Figure 3:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2024 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

restées proches de la limite de détection, de l'ordre de 2 Bq/l.

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C . Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2024 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 163 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. A titre indicatif, notons qu'une teneur supplémentaire de 100 pour mille de ^{14}C dans les denrées alimentaires induit une dose annuelle supplémentaire de l'ordre de 1 micro-Sv. L'augmentation mesurée étant très localisée, on peut conclure que les doses supplémentaires par ingestion de denrées alimentaires locales pour les populations avoisinantes sont donc restées minimales.

Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout déterminé par des mesures dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats enregistrés en 2024 pour les échantillons de sol et de plantes prélevés au voisinage des installations nucléaires montrent à nouveau que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que la radioactivité d'origine artificielle (^{137}Cs , ^{90}Sr , Pu et Am) provient principalement des essais nucléaires des années 60 et de l'accident de Tchernobyl. La figure 3 présente à

titre d'exemple la contamination rémanente en ^{137}Cs dans les sols prélevés par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires en 2024.

Les denrées alimentaires constituent le prochain maillon susceptible de transférer les radionucléides jusqu'à l'homme. Les résultats des mesures de la radioactivité dans les aliments, coordonnées par l'OFSP en étroite collaboration avec les laboratoires cantonaux, n'ont pas révélé de marquage attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires. Les mesures additionnelles de l'OFSP, en particulier celles du programme germano-suisse au voisinage de Leibstadt dans les produits agricoles et les poissons ont confirmé ce constat, puisqu'aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a été détecté dans ces échantillons. Les résultats des mesures de ^{90}Sr effectuées par l'Institut de Radiophysique dans des échantillons de lait et de céréales prélevés au voisinage des centrales nucléaires ainsi que de fruits et légumes prélevés au voisinage de Leibstadt ne diffèrent pas de ceux enregistrés ailleurs sur le plateau suisse.

Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL).

Depuis la réduction significative des rejets d'effluents liquides par les centrales de Beznau au début des

années 2010 (réduction d'un facteur 100 entre 2000 et 2010) ainsi que par celle de Mühleberg une dizaine d'années plus tard, aucune trace des produits d'activation tels que le ^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co n'a plus été mesurée dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln. Ceci s'est confirmé en 2024.

Le ^{137}Cs , lui reste sporadiquement présent dans les échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin. Il est essentiellement dû à la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes nucléaires 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.

La figure 4 montre, que de manière générale, les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2024 dans les eaux de l'Aar et du Rhin sont restées inférieures ou proches de la limite de détection de 2 Bq/l. Toutefois, en début d'année, et en particulier en avril et mai, les concentrations de tritium dans l'Aar (et, dans une moindre mesure, dans le Rhin) étaient légèrement plus élevées, en raison de rejets plus importants de tritium par les centrales nucléaires de Beznau et, surtout, de Gösgen.

En plus des rejets plus importants de tritium effectués, comme chaque année, par la centrale nucléaire de Gösgen en avril et mai, avant sa période de révision (voir chapitre 8.1), celle-ci a également rejeté des quantités plus élevées de tritium en janvier et février¹. En conséquence, des concentrations supérieures aux limites de détection ont été enregistrées dans les eaux de l'Aar prélevées à Brugg, situé en aval de KKG, pendant les 5 premiers

¹ La quantité totale de tritium rejetée dans l'Aar par KKG est toutefois restée presque identique à celle de 2023

mois de l'année, avec un maximum de 9.8 Bq/l en avril.

Les rejets de tritium dans l'Aar par la centrale nucléaire de Beznau ont été les plus importants de mars à mai, restant toutefois inférieurs à ceux de Gösgen pendant cette période, sauf en mars. La station de collecte d'échantillons d'eaux de l'Aar de Klingnau étant située en aval de KKB, elle enregistre à la fois les rejets de la centrale de Gösgen (de manière diluée) et ceux de Beznau. La légère augmentation mesurée en mars reflète principalement les rejets de KKB, alors que l'augmentation la plus importante enregistrée à cette station en avril (7.8 ± 0.8 Bq/l) résulte des rejets combinés de KKB et KKG. En raison de la forte dilution, les traces des rejets liquides de tritium des centrales nucléaires ne sont que très faiblement mesurables dans le Rhin. La concentration de tritium enregistrées à Weil am Rhein n'a ainsi que très légèrement augmenté pour atteindre un maximum de 3.2 Bq/l en avril.

En ce qui concerne les émetteurs gamma, les traces des rejets liquides sont essentiellement décelables dans les sédiments. En effet, les produits d'activation, comme le ^{54}Mn et le ^{60}Co , ne sont pas (ou peu) dissous dans l'eau, mais sont présents sous forme particulaire (corrosion) dans les effluents liquides. De faibles activités de ^{54}Mn ont ainsi pu être sporadiquement mesurées dans les sédiments prélevés aussi bien à Hagneck, Klingnau que Pratteln. En revanche aucune trace des isotopes du cobalt n'a été décelée dans ces échantillons en 2024, contrairement aux années précédentes.

Du ^{95}Nb et du ^{95}Zr ont par ailleurs été mesurés par le laboratoire cantonal de Bâle dans un échantillon de matières en suspension de l'eau du Rhin, prélevé par sondage sur trois jours à la station de Weil am Rhein en mai 2024. ^{95}Nb

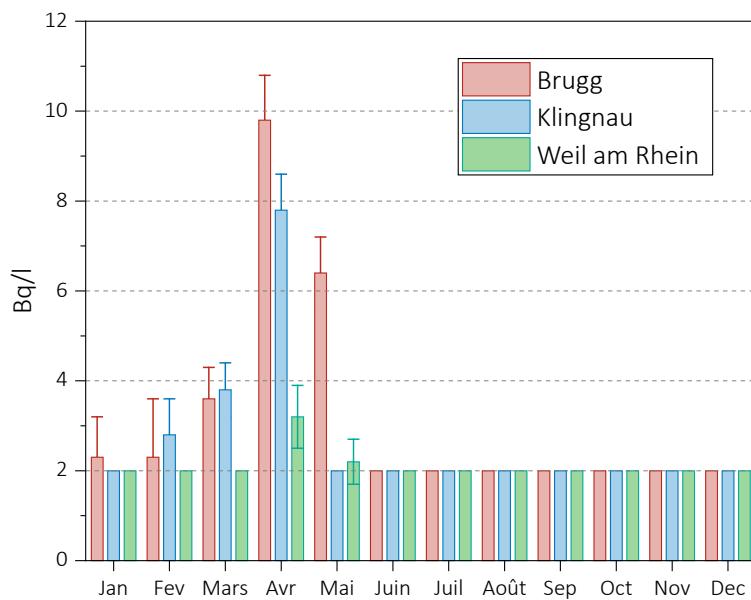


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et à Klingnau/AG et du Rhin prélevés à Weil am Rhein/D en 2024.

est la fille du ^{95}Zr , un produit de fission qui devrait provenir d'une installation nucléaire. Après une analyse plus détaillée, et la mesure de différentes fractions de l'échantillon, il s'est avéré qu'il s'agissait d'une particule chaude (particule présente dans une seule fraction de l'échantillon) dont l'activité n'a pas pu être précisément quantifiée. L'origine du rejet n'a pas été déterminée, mais la centrale nucléaire de Beznau rejette du $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ dans l'Aar selon le bilan communiqué à l'IFSN.

Le ^{137}Cs est, quant à lui, présent dans pratiquement tous les échantillons de sédiment de l'Aar et du Rhin, et provient essentiellement de l'érosion des sols contaminés à la suite de l'accident de Tchernobyl ou des essais nucléaires atmosphériques.

Notons encore que les analyses des $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am effectuées par l'IRA dans les échantillons annuels de sédiments ont montré un rapport d'activité $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ proche de celui des sols et ne montrent pas de marquage autre que par les retombées des essais nucléaires des années soixante.

Les analyses des poissons prélevés en 2024 dans le canal d'Hagneck, dans le Lac de Biel, dans l'Aar à Wöschnau et Beznau, ainsi que dans le Rhin, près d'Augst, n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle, mis à part le ^{137}Cs (1.5 Bq/kg m.f.) dans le poisson pêché dans le Rhin. Aucune activité quantifiable au-dessus de la limite de détection n'a par ailleurs été mesurée pour $^{239+240}\text{Pu}$, mais l'américium est parfois mesurable, avec une activité proche de 1 à 2 mBq/kg, car le facteur de transfert de la phase aqueuse aux poissons est plus élevé pour l'américium que pour le plutonium.

Comme chaque année, des échantillons de plantes aquatiques ont également été prélevés en 2024 dans l'Aar, en amont de la station de Hagneck, à Böttstein, en amont du barrage de Klingnau et dans le Rhin à Möhlin. Hormis le ^{137}Cs détecté dans tous les échantillons (1.75-6.20 Bq/kg m.s.), le seul radio-nucléide gamma d'origine artificielle mesuré dans un des échantillons était l' ^{131}I , provenant très probablement d'un institut de médecine nucléaire. $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am sont mesurables au-dessus des limites de détection dans les plantes aquatiques dans un rapport d'activité $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ proche de celui des sols, ce qui signifie probablement que l'activité mesurée provient principalement de particules adhérant aux surfaces des plantes.

L'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Schönenwerd, Böttstein et Hardwald (Muttenz) n'a mis en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle.

Situation radiologique du site démantelé de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens (*site soustrait à la législation sur les installations nucléaires*)

La surveillance du site de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens effectuée par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP comprend la mesure de la radioactivité (émetteurs gamma, tritium (^3H) et ^{90}Sr) dans les eaux provenant du bassin de contrôle (BdC) et de la chambre de contrôle (CdC). Le bassin de contrôle est un bassin de collecte dans lequel sont réunies les eaux de drainage provenant des 9 drains principaux du système de drainage; la chambre de contrôle est située juste avant le rejet dans la Broye (voir figure 5). Les prélèvements sont effectués à l'aide de collecteurs automatiques et envoyés à l'IRA par un membre du personnel du dépôt de conservation des objets culturels du Canton de Vaud, qui occupe maintenant l'ancienne grotte des machines.

En 2024, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4 heures aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyé à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2024. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont par exemple restées inférieures aux limites de détection de 0.2 à 0.6 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^3H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2024 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 3.7 ± 0.8 Bq/l et 3.6 ± 0.9 Bq/l respectivement. Mis à part le phénomène de resurgence locale décelé fin 2011 et début 2012, où des valeurs atteignant 230 Bq/l avaient été mesurées et qui avaient nécessité la mise en place d'un programme spécifique, les valeurs enregistrées sont en constante diminution depuis le début de la surveillance en 2001, ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive du tritium (demi-vie du tritium = 12.32 ans).

Pour la mesure du ^{90}Sr , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Aucune activité supérieure à la limite de détection de 7 à 8 mBq/l n'a été mise en évidence en 2024.

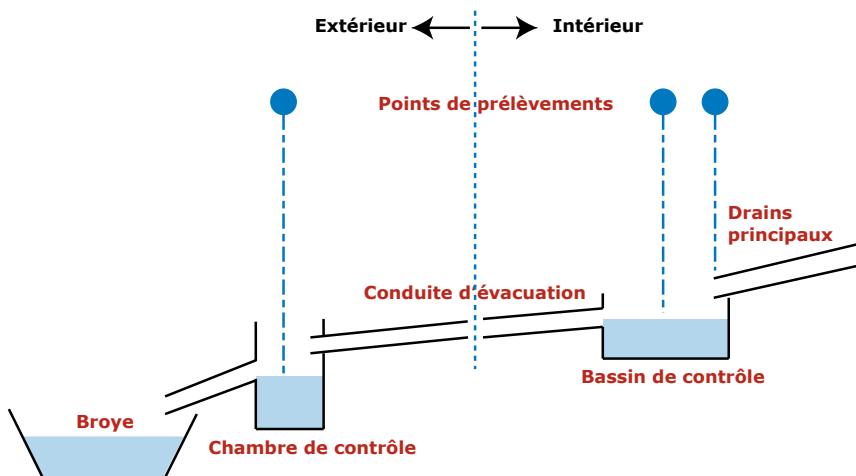


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2024.

Les doses résultant du fonctionnement des centrales nucléaires pour la population avoisinante sont restées nettement inférieures aux limites réglementaires. Les calculs effectués à partir des rejets effectifs et du rayonnement direct en se basant sur des modèles de transfert jusqu'à l'homme indiquent que l'impact dosimétrique des centrales nucléaires est resté très inférieur à la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv par an. Les calculs de dose effectués de manière indépendante par le PSI et les autorités de surveillance ont montré que les doses pour la population avoisinante générées par le centre de recherche sont également restées nettement inférieures à la valeur directrice de dose liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour l'ensemble du site PSI/ZWILAG (dont 0.05 mSv/an pour le ZWILAG).

Les mesures effectuées dans les différents compartiments environnementaux ont mis en évidence un faible marquage du milieu. La détection du rayonnement direct ou du ^{14}C issu des rejets atmosphériques dans les feuillages ainsi que du ^{3}H et des produits d'activation (^{54}Mn) issus des effluents liquides dans les eaux, respectivement les sédiments, de l'Aar et du Rhin, témoigne du fonctionnement normal de ces installations pendant l'année sous revue.

Même si les rejets des installations nucléaires conduisent à des doses très faibles par rapport à celles d'origine naturelle ou médicale, le principe de précaution implique de poursuivre les contrôles et les études avec le plus de précision possible afin de répondre aux différents objectifs d'ordre scientifique, réglementaire et d'information du public.

8.6

CERN - Rejets et environnement (Mesures CERN)

I. Brunner, F. Malacrida, P. Vojtyla

CERN - Organisation européenne pour la Recherche nucléaire,
Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE), Genève

Résumé

Pour l'année 2024, comme pour les années précédentes, les résultats du programme de surveillance du CERN et les calculs de dose pour les personnes représentatives ont confirmé que l'Organisation a respecté la limite réglementaire de 0.3 mSv/a fixée par le CERN [1]. La dose efficace maximale délivrée aux membres du public est demeurée inférieure à 0.007 mSv. Le contrôle des immissions n'a révélé que de faibles traces de radioéléments dans des échantillons prélevés dans les cours d'eau, dans l'eau de nappes phréatiques s'écoulant sous le site CERN de Prévessin et dans l'air du site CERN de Meyrin. Le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN demeure donc très faible.

Le CERN

Le CERN, l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Le CERN a son siège à Genève et ses installations sont situées d'un côté et de l'autre de la frontière franco-suisse. Il a pour mission la recherche fondamentale en physique des particules afin de découvrir les constituants et lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière: les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la nature. Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent les résultats de ces collisions.

La Figure 1 présente la carte de l'implantation des sites du CERN, tandis que la Figure 2 présente le complexe des accélérateurs du CERN de manière schématique. Pour un complément d'information, se référer au site web du CERN (www.cern.ch).

Aspects environnementaux

L'interaction de particules de hautes énergies avec la matière génère des radiations ionisantes et produit des nucléides instables, c'est-à-dire radioactifs. Ces interactions se produisent entre autres lorsque les particules se percutent entre-elles ou percutent des cibles fixes, ainsi que lors de l'extraction et de la collimation des faisceaux. Les accélérateurs sont blindés et les plus puissants d'entre eux sont situés profondément sous terre, de telle manière à ce que seule une fraction infime des rayonnements traverse ces protections; ce type de rayonnement est nommé rayonnement diffusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Conséquemment, le rayonnement diffusé, les effluents gazeux et liquides sont surveillés en continu.

En termes d'impact environnemental, le risque radiologique induit par des installations mettant en

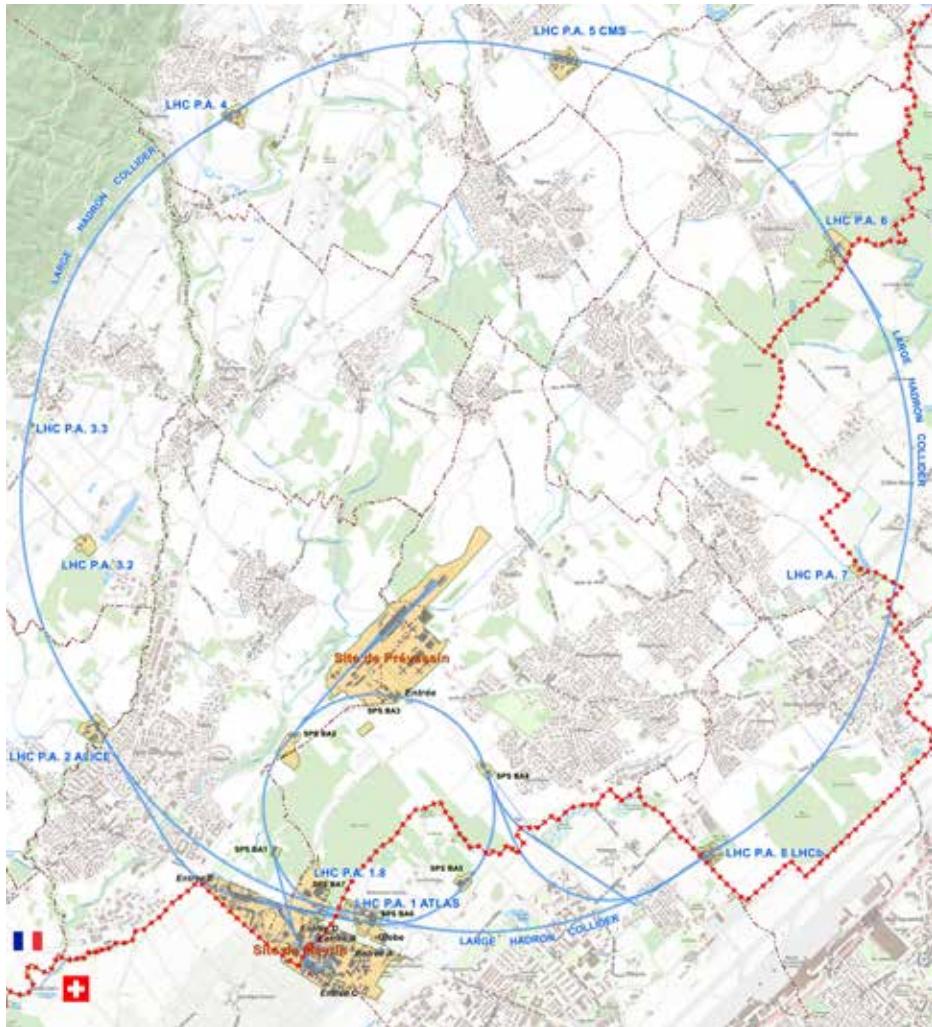


Figure 1:
Implantation des sites du CERN.

jeu des accélérateurs est très faible. Maintenir un faisceau de particules en orbite requiert une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radionucléides produits sont principalement des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités. Pour plus d'information, se référer au site: voisins.cern/fr/radiation.

Lorsque les accélérateurs sont arrêtés, l'émission atmosphérique de gaz de demi-vies courtes et le rayonnement diffusé cessent. Néanmoins, les composantes des tunnels, des machines, des cibles et des détecteurs sont sensiblement marquées par leur exposition au faisceau; ceux-ci contiennent donc des radionucléides produits par activation. L'eau d'infiltration des tunnels peut donc toujours potentiellement se charger en radionucléides lors de sa

percolation, avant d'être évacuée vers les eaux de surface. De la même manière, des traces de radionucléides peuvent être mesurées dans l'air, lorsque par exemple le tritium dégaze des composantes précitées. Certaines installations peuvent par ailleurs émettre des petites quantités de radioéléments, lors d'opérations de purges de circuits (p.ex. rejet de gaz stockés dans les réservoirs d'ISOLDE et MEDICIS).

Programme de surveillance

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnemental, qui est élaboré en tenant compte des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance du rayonnement diffusé se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou prédis par des calculs. Chaque

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN

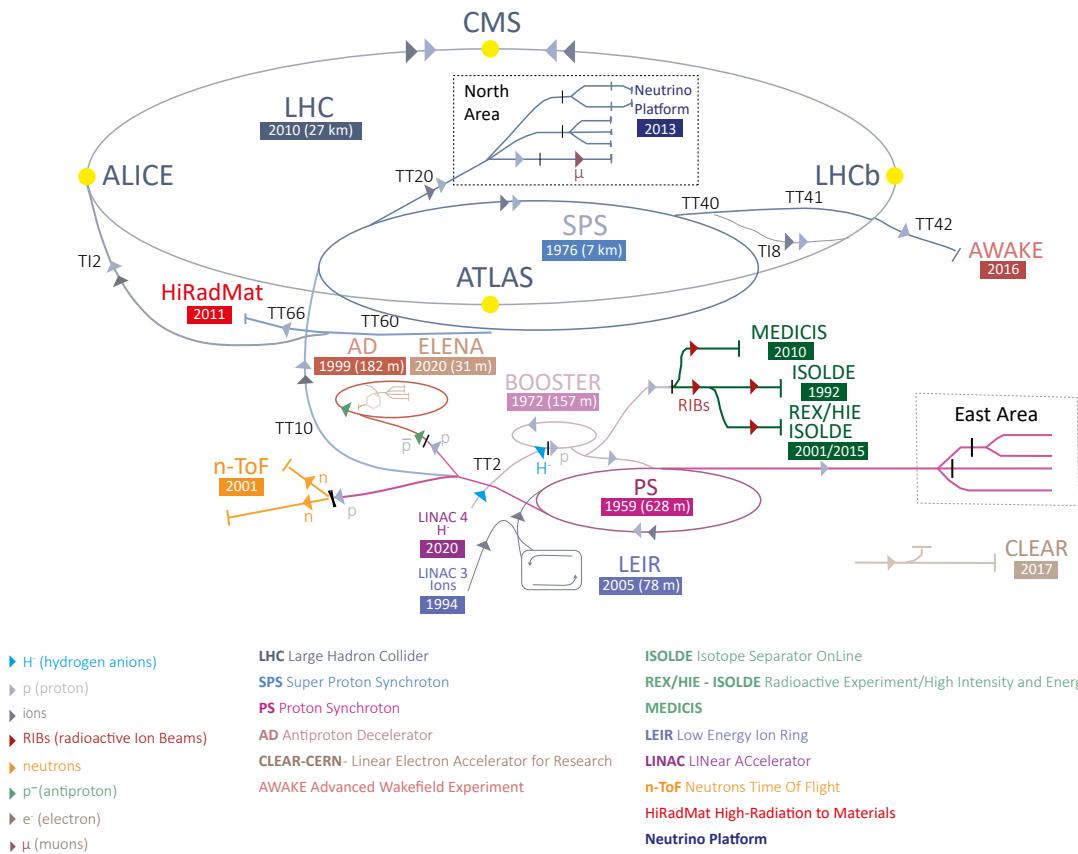


Figure 2:
Le complexe des accélérateurs du CERN.

station est équipée d'une chambre d'ionisation argon dédiée à la mesure en continu des photons et des particules chargées et pénétrantes, comme les muons, ainsi que d'un moniteur de neutrons. En 2024, 35 stations de ce type étaient en opération. Les points d'extraction d'air, d'où des substances radioactives peuvent être émises, sont équipés de stations de surveillance qui mesurent en continu les radionucléides gazeux à demi-vies courtes et échantillonnent les aérosols sur des filtres périodiquement analysés en laboratoire. En 2024, 42 stations étaient en opération. De manière similaire, les points de rejet des eaux claires qui sont déversées dans les cours d'eau récepteurs sont équipés de stations de surveillance de l'eau (15 stations en 2024); les eaux claires incluent les eaux de refroidissement des circuits secondaires, les eaux d'infiltration des tunnels et les eaux de pluie. Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vies courtes et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement.

quement en laboratoire. Deux stations contrôlent indépendamment les eaux de refroidissement et d'infiltration du SPS et du LHC. En parallèle, cinq stations météorologiques sont réparties sur l'entièreté du périmètre des installations. Leurs données servent à établir des statistiques utiles aux calculs de dispersions des rejets atmosphériques.

La dose efficace reçue par les membres du public a été calculée à partir des équivalents de dose ambients mesurés aux clôtures du site [2]. S'y ajoutent les doses induites par les rejets atmosphériques et dans les cours d'eau, évaluées par le biais de modèles développés en interne [3, 4], basés sur les directives [5, 6]. Les modèles utilisés par le CERN, agréés par les autorités dans le contexte des accords Tripartites [7], ne diffèrent que peu de ceux proposés par les directives, tandis qu'ils prennent en compte les spécificités de ses installations.

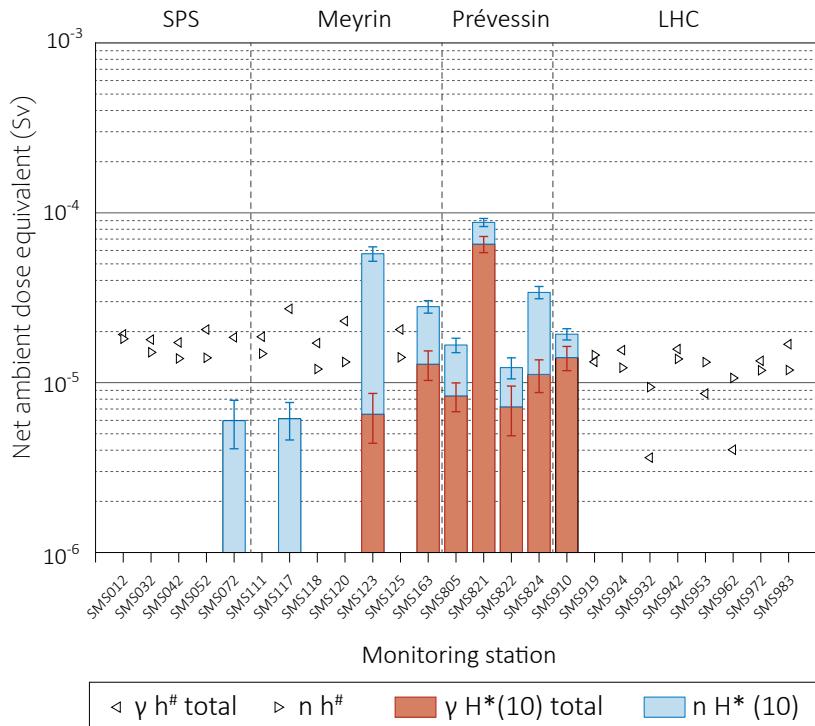


Figure 3:

Doses annuelles nettes gamma (γ) total et neutron (n) enregistrées par les moniteurs de rayonnement diffusé situés en clôtures (CERN, 2024). Les limites de détection $h^{\#}$, représentées par des triangles horizontaux, supposent une probabilité inférieure à 0.001 d'une décision incorrecte affirmant que l'équivalent de dose ambiant net est nul. Les barres d'erreur indiquent les limites des intervalles de confiance probabilistes symétriques, en considérant une probabilité totale de 0.95

La surveillance des émissions est complétée par la surveillance des immissions, qui est un processus impliquant la collecte d'échantillons environnementaux et leur analyse en laboratoire. Les résultats doivent corrélérer avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont adéquats. Cette surveillance implique également un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (13 stations). Sur le site de Meyrin, trois d'entre-elles collectent aussi les éléments volatils comme l'iode gazeux sur charbons actifs, tandis que deux collectent l'humidité pour la mesure du tritium dans l'air. Sont aussi collectés des échantillons d'herbes (12 points d'échantillonnage), d'eau, de bryophytes (mousses aquatiques) et de sédiments dans les cours d'eau (14 points), de l'eau des nappes phréatiques et de consommation (27 points), ainsi que des échantillons de produits d'agriculture locaux, tels que p. ex. blé, graines de tournesol, asperges et vin.

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2024

Suite à la période d'arrêt technique et à partir de février 2024, le CERN a graduellement redémarré toutes ses installations, qui ont été opérées jusqu'à début décembre.

Résultats 2024

Rayonnement diffusé

La Figure 3 présente les équivalents de dose ambients nets intégrés à l'année par les moniteurs de rayonnement diffusé localisés aux barrières des sites.

Les principales sources de rayonnement diffusé sont les installations localisées proches de la surface, soit le Complexe du PS du site de Meyrin et la Zone Nord du site de Prévessin. Depuis 2024, l'expérience ATLAS du LHC, située à 100 m sous terre, produit également une petite fraction de neutrons qui diffusent à travers les blindages et les puits d'accès, montent en altitude et interagissent avec les composants de l'air. Une partie de ces neutrons est ensuite redirigée vers le sol. Ce phénomène dit du *skyshine* contribue à une faible hausse de l'équivalent du débit de dose ambiant en clôtures et à proximité immédiate.

Les doses dites gamma sont quant à elles à la fois induites par le rayonnement diffusé (muons) et aussi les photons émis par les gaz de demi-vies courtes rejetés par les installations. Les calculs démontrent que les valeurs gamma total s'expliquent très principalement par les émissions locales de gaz radioactifs et que, conséquemment, les niveaux de rayonnement diffusé de ce type sont minimes. Font exception les stations en aval de la Zone Nord du site de Prévessin, notamment au niveau de la SMS821, où la dose est induite par des muons.

Tableau 1:

Rejets dans l'air en 2024. Les installations n'ayant pas rejeté de quantités mesurables de radioéléments ne sont pas listées.
Lorsque localisés à proximité, les sites sont groupés.

Groupe Site	Installation	Rejets par groupe de radioéléments (Bq)				
		Gas de demi-vies courtes	⁷ Be	β total	³ H	Iode
Meyrin		6.2E+13	1.1E+08	2.7E+06	5.7E+10	4.5E+08
Meyrin site						
PS-SPS TT10	8.6E+11	1.0E+06	9.2E+04	2.4E+09	< LD	
Water Evaporators	< LD	< LD	< LD	7.8E+08	< LD	
MEDICIS	3.0E+08	< LD	< LD	2.4E+10	8.5E+06	
ISOLDE	1.4E+13	1.6E+04	6.8E+05	7.5E+09	4.4E+08	
n-TOF TARGET AREA	8.6E+12	7.2E+07	1.7E+04	6.1E+09	4.7E+05	
PS-SPS TT60	< LD	< LD	< LD	1.1E+08	< LD	
BOOSTER	2.5E+11	1.9E+07	5.8E+05	8.2E+08	< LD	
PS STACK 1/4	4.0E+11	< LD	< LD	2.6E+09	< LD	
PS STACK 2/4	4.1E+11	< LD	< LD	1.3E+09	< LD	
PS STACK 3/4	3.4E+11	< LD	< LD	1.2E+09	< LD	
PS STACK 4/4	1.2E+11	< LD	< LD	1.2E+09	< LD	
EA IRRAD/CHARM	3.5E+12	1.4E+07	1.3E+06	9.3E+07	< LD	
AD TARGET AREA	1.8E+13	< LD	1.9E+04	6.7E+08	< LD	
EA PRIMARY AREA	1.1E+12	1.1E+05	2.9E+03	2.1E+08	< LD	
n-TOF COOLING STATION	4.8E+11	< LD	2.0E+03	3.1E+08	< LD	
SPS BA5						
SPS RING SECTORS 4-5/6-5	5.8E+12	3.0E+04	2.8E+03	3.4E+09	< LD	
SPS BA7						
HIRADMAT	4.3E+10	< LD	1.9E+02	4.1E+09	< LD	
LHC PA1						
LHC MACHINE SECTORS 8-1/2-1	9.2E+12	< LD	< LD	3.8E+08	< LD	
LHC ATLAS STACK 3/4	4.0E+08	< LD	< LD	< LD	< LD	
LHC ATLAS STACK 4/4	1.3E+10	< LD	< LD	< LD	< LD	
Prévessin		5.5E+12	4.2E+06	3.5E+05	2.3E+10	< LD
SPS RING SECTORS 2-3/4-3	1.4E+11	2.7E+04	< LD	2.7E+09	< LD	
SPS-NA TT20	5.3E+12	1.5E+06	2.2E+05	3.2E+09	< LD	
NA TCC2/TDC2	1.9E+10	1.6E+06	1.2E+05	1.5E+10	< LD	
NA TCC8	6.3E+10	1.1E+06	3.0E+03	1.8E+09	< LD	
NA ECN3	2.1E+09	< LD	1.2E+03	< LD	< LD	
SPS BA4		< LD	< LD	< LD	9.2E+09	< LD
AWAKE	< LD	< LD	< LD	8.0E+09	< LD	
SPS-LHC TI8	< LD	< LD	< LD	1.2E+09	< LD	
LHC PA3	LHC MACHINE SECTORS 2-3/4-3	1.3E+11	< LD	< LD	< LD	< LD
LHC PA5		5.0E+12	< LD	< LD	1.2E+09	< LD
LHC MACHINE SECTORS 4-5/6-5	5.0E+12	< LD	< LD	1.2E+09	< LD	
LHC CMS STACK 3/3	4.8E+08	< LD	< LD	< LD	< LD	
LHC PA7	LHC MACHINE SECTORS 6-7/8-7	1.8E+12	< LD	< LD	1.6E+09	< LD

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère sont résumés au Tableau 1.

Dû à la faible hauteur des cheminées ainsi qu'aux courtes demi-vies des radionucléides émis, l'impact reste local et est très faible. Les radionucléides se répartissent en cinq catégories : les gaz radioactifs de demi-vie courtes (^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O et ^{41}Ar ; le ^{7}Be ; l'activité bêta total (majoritairement ^{32}P et ^{33}P); le tritium (^{3}H) ainsi que les isotopes de l'iode. Cette dernière catégorie est principalement émise par l'installation ISOLDE.

Rejets de substances radioactives dans les cours d'eau

Les effluents du CERN sont rejetés dans plusieurs cours d'eau qui rejoignent finalement le bassin du lac Léman ou le Rhône. Les radionucléides rejetés se répartissent en quatre catégories : le tritium sous forme aqueuse (HTO); le ^{22}Na ; les rejets d'émetteurs de positrons de demi-vie courte (^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O) et le ^{24}Na d'une demi-vie de 15 heures. Le Tableau 2 présente les rejets de 2024, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés. L'eau des tours de refroidissement du site de Prévessin est traitée et une fraction de cette eau est évacuée par le réseau d'eau usée. Les traces de tritium mesurées proviennent des diffusions à travers les échangeurs de chaleur.

Surveillance des immissions

Les rejets atmosphériques des installations du site de Meyrin ont conduit aux concentrations locales maximales présentées dans le Tableau 3. Seules les stations EAS123 (EAS: Environmental Aerosols Sampler, échantilleur d'aérosols environnementaux), EAS163 et EAS164 sont équipées de filtres à charbon actif. Les stations EAS123 et EAS163 sont également équipées de pièges passifs de tritium. L'iode gazeux et la vapeur d'eau tritée ne sont pas échantillonnés aux autres stations. La fraction de la limite d'immission (Li) est donnée à titre indicatif et est surévaluée, car, pour chaque radioisotope les concentrations maximales ont été mesurées au cours d'une période limitée, mais sont considérées comme ayant été représentative de toute l'année. Les traces des isotopes de l'iode proviennent majoritairement de l'installation ISOLDE.

Concernant l'environnement aquatique et comme pour les années précédentes, des traces de radioéléments ont été mesurées dans l'eau dans les cours d'eau du Lion (F) et de l'Allondon (F/CH) (Tableau 4). Le marquage est induit par les eaux d'infiltration des installations de la Zone Nord de Prévessin. Comme par le passé, l'activité du ^{54}Mn rejetée dans le Lion est inférieure à la limite de détection au

Tableau 2:

Rejets dans les cours d'eau en 2024 (aucun ^{22}Na détecté). WMS : Water Monitoring Station (station de surveillances de l'eau), n.m : non mesuré.

Cours d'eau récepteur	Rejets (Bq)			
	^{11}C	^{24}Na	^{3}H	^{22}Na
Meyrin / Nant d'Avril	6.4E+10	< LD	1.7E+09	< LD
	WMS073 / WRNA1	n.m	n.m	9.5E+07
	WMS101 / WRNA3	< LD	< LD	1.9E+09
	WMS910 / WRNA1	6.4E+10	< LD	< LD
Prévessin / Lion	< LD	1.4E+08	1.3E+10	< LD
	WMS021 / WRLI2	< LD	1.4E+08	1.3E+10
	WMS103 / WRLI3	< LD	< LD	7.7E+06
	WMS806 / WRLI1	n.m	n.m	1.4E+08
Oudar	< LD	< LD	6.9E+06	< LD
Marquet	< LD	< LD	7.1E+07	< LD
Nant	< LD	< LD	1.1E+09	< LD

Réseau d'eaux usées	Rejets (Bq)		
	^{11}C	^{24}Na	^{3}H
Site de Prévessin	n.m	n.m	1.4E+08

Tableau 3:

Concentrations maximales mesurées dans l'air sur le site de Meyrin (immissions). Le terme gaz fait référence aux formes physico-chimiques de l'iode qui ne sont pas piégées sur les filtres en fibre de verre.

Station de surveillance	^{3}H (Bq/m ⁻³)	^{131}I gaz (Bq/m ⁻³)	% Li
EAS123	$(5.3 \pm 1.7) \times 10^{-2}$	$(1.3 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	0.02 %
EAS163	$(7.2 \pm 1.9) \times 10^{-2}$	$(3.2 \pm 1.1) \times 10^{-5}$	0.05 %

point de rejet. Ce radioélément s'accumule néanmoins dans les bryophytes (les mousses aquatiques) qui agissent comme bioaccumulateurs. Les bryophytes en question (RML15) sont prélevées à quelques dizaines de mètres du point de rejet.

Une nappe phréatique profonde prend source sous le site de Prévessin par accumulation de l'eau des glaciers sur le toit de la molasse, qui à cet endroit prend la forme d'un bassin. Cette eau s'écoule alors sous les installations de la Zone Nord et peut potentiellement recevoir une fraction de l'eau percolant autour ou exfiltrant les installations. Des traces de tritium et plus rarement de ^{22}Na sont mesurées dans l'eau de cette nappe, prélevée à 40 m de profond, par l'intermédiaire de piézomètres ayant servi son étude hydrogéologique. Ces valeurs sont rapportées dans le Tableau 5.

Tableau 4:

Concentrations mesurées dans les échantillons prélevés dans les cours d'eau.

Cours d'eau récepteur	Date échantillonnage	Code échantillon eau	^{3}H (Bq/L)	% Li	Code échantillon bryophyte	^{54}Mn (Bq/kg masse sèche)
Allodon (F/CH)	06.08.2024	RWAL3	2.4 ± 1.2	0.02 %		
Lion (F)	06.08.2024	RWL15	3.6 ± 1.2	0.04 %	RML15	9.5 ± 3.2
Lion (F)	06.08.2024	RWL17	4.8 ± 1.3	0.02 %		

Tableau 5:

Concentrations maximales mesurées dans les nappes phréatiques profondes s'écoulant sous certaines installations de la Zone Nord du site de Prévessin. L'eau s'écoule dans des graviers plusieurs dizaines de mètres sous le site du CERN et n'est pas accessible au public. Conséquemment, une comparaison directe avec la limite d'immission (Li) est une approche conservatrice.

Code	Date échantillonnage	^{3}H (Bq/L)	^{22}Na (Bq/L)	% Li
GWPI05	25.04.24	32.0 ± 2.0	0.3 ± 0.1	0.64%
GWPI07	25.04.24	11.0 ± 2.0	< LD	0.06%
GWPI09	25.04.24	6.0 ± 1.2	< LD	0.04%
GWPIE01	12.04.24	13.0 ± 1.0	< LD	0.07%
GWPIE02	12.04.24	11 ± 1.0	< LD	0.04%
GWPIE03	12.04.24	3.0 ± 1.1	< LD	0.02%
GWPIE04	12.04.24	8.4 ± 1.3	< LD	0.02%

Aucun autre radioélément d'origine artificielle n'a été détecté, dans aucun des autres échantillons prélevés dans l'environnement, tandis que toutes les valeurs susmentionnées étaient bien inférieures aux limites applicables [8]. Le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN peut donc être considéré comme très faible.

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du public a été calculée à partir des équivalents de dose ambients mesurés aux clôtures des sites [2] et des activités rejetées dans l'air et dans l'eau, en utilisant des modèles [3, 4] basés sur les directives [5, 6]. La dose efficace est demeurée inférieure à 0.007 mSv. Cette valeur correspond à la dose estimée pour une personne représentative, au sens de la Publication 101 de la Commission internationale de protection radiologique [9]. Il s'agit d'un individu hypothétique parmi les plus exposés de la population, défini de manière réaliste mais prudente, en tenant compte de caractéristiques telles que les modes de vie, l'alimentation et le temps passé à proximité des clôtures des sites du CERN.

Conclusions

- Les résultats du programme de surveillance effectué par le CERN, combinés aux calculs de dose pour les populations des personnes représentatives ont démontré, pour l'année 2024 comme pour les années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur limite de 0.3 mSv fixée dans la réglementation du CERN [1].
- Des radionucléides ont été détectés dans des échantillons prélevés dans l'air du site de Meyrin et certains cours d'eau récepteurs. Les valeurs de concentration sont restées inférieures aux limites d'immission applicables [8]. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN demeure très faible.
- De manière à confronter l'impact dosimétrique des activités du CERN aux valeurs typiques d'expositions naturelles, la Figure 4 compare la dose susmentionnée de 0.007 mSv avec la dose équivalente annuelle mesurée en plusieurs localités proches et éloignées des sites CERN. Les fractions présentées, avec 54% de contribution à la dose par les rejets atmosphériques de gaz de demi-vies courtes, sont uniquement valides pour la personne représentative. Pour les membres du public moins exposés, ces fractions peuvent varier.

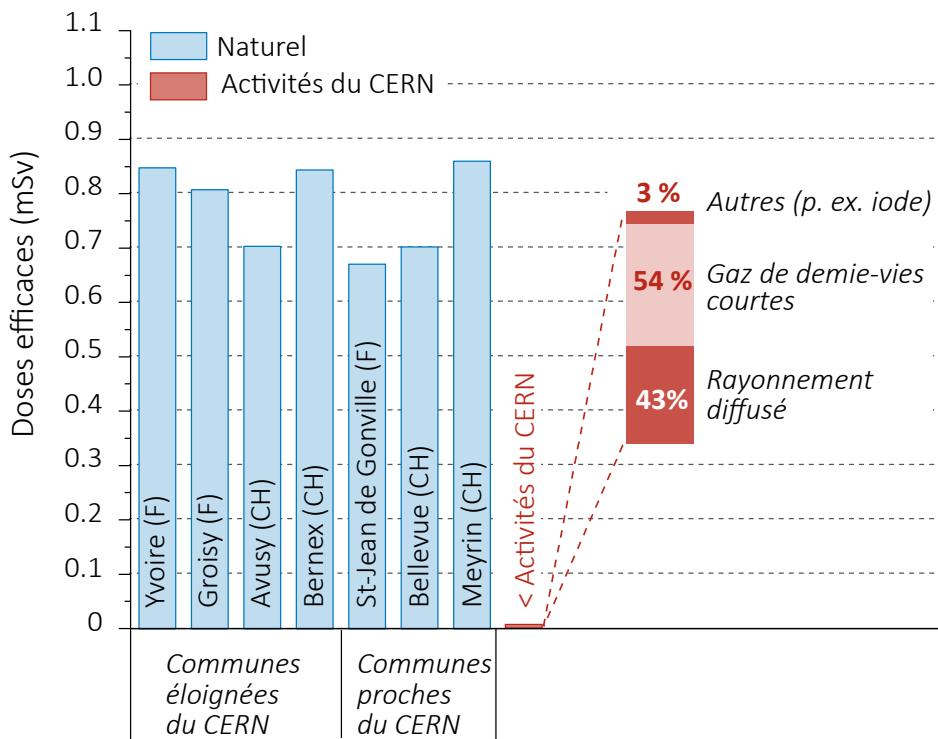


Figure 4:

Doses annuelles de rayonnement gamma externe d'origine naturelle par TLD dans des communes proches et éloignées du CERN, comparées à la dose efficace liée aux activités du CERN pour l'année 2024, reçue par la personne représentative (voir texte). Le segment à droite du graphique illustre les contributions relatives à cette dose.

Références

- [1] Code de Sécurité F Rev., Radioprotection CERN (2006)
- [2] Evaluation of doses from stray radiation in the environment of CERN (2022)
- [3] Models for assessing the dosimetric impact of releases of radioactive substances from CERN facilities to the environment – Air (2022)
- [4] Models for assessing the dosimetric impact of releases of radioactive substances from CERN facilities to the environment- Watercourses (2022)
- [5] Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), Calcul de l'exposition aux radiations ionisantes dans l'environnement due à l'émission de substances radioactives par les installations nucléaires, IFSN-G14/f rév.1 (2009).
- [6] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
- [7] Accord entre le Gouvernement de la République française, le Conseil fédéral suisse, et L'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire relatif à la Protection contre les rayonnements ionisants et à la Sûreté des Installations de l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire (2010).
- [8] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (version 2022), Annexe 3.
- [9] ICRP, 2006. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101a. Ann. ICRP 36 (3).

8.7

Environnement du CERN (mesures OFSP)

S. Estier, J. Beuret, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller, P. Steinmann

Section Radioactivité de l'environnement, URA / OFSP, Berne

J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus

Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau,

Université de Genève, Genève

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE) du CERN, l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnements au voisinage du centre de recherche. L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2024 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Même si des traces de radionucléides, produits dans les installations du centre de recherche, ont pu être détectées, les activités maximales enregistrées sont restées nettement inférieures aux limites suisses et leur impact radiologique peut être considéré comme très faible.

Programme de surveillance de l'OFSP

L'OFSP surveille l'environnement du CERN de manière indépendante par les mesures suivantes (territoire suisse uniquement, à l'exception de la dosimétrie d'ambiance):

- Dosimétrie d'ambiance du rayonnement gamma ainsi que des neutrons sur une base trimestrielle (11 dosimètres à thermoluminescence-TLD- évalués par l'IRA) et mesures instantanées de l'équivalent de dose ambiant effectuées par l'OFSP sur 8 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants.
- Aérosols: mesure continue par spectrométrie gamma des aérosols déposés sur un filtre déroulant par le moniteur URAnet et spectrométrie gamma hebdomadaire des filtres d'un collecteur à haut débit.
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel, mesure du tritium par l'OFSP).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) et végétaux ainsi que certains produits locaux (comme le ${}^3\text{H}$ dans le vin).

On notera qu'après la période d'arrêt technique et à partir de février 2024, le CERN a graduellement redémarré l'opération de toutes ses installations, qui ont fonctionné jusqu'à début décembre 2024.

Mesures de l'exposition ambiante

Onze sites ont été surveillés en 2024 par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP. Cinq d'entre eux sont situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français) et 5 sur le parcours du LHC; la surveillance est complétée par la mesure d'un TLD placé sur un site de référence situé dans un voisinage plus éloigné. Par le passé, 6 dosimètres étaient placés sur le parcours du CERN, mais l'un d'entre eux a été éliminé car il était situé sur une zone publique et il a disparu de nombreuses fois. L'abandon de ce point est justifié par le fait qu'il n'a pas montré de dose notable entre 2005 et 2018.

En plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée. Les résultats de ces mesures sont illustrés sur la figure 1.

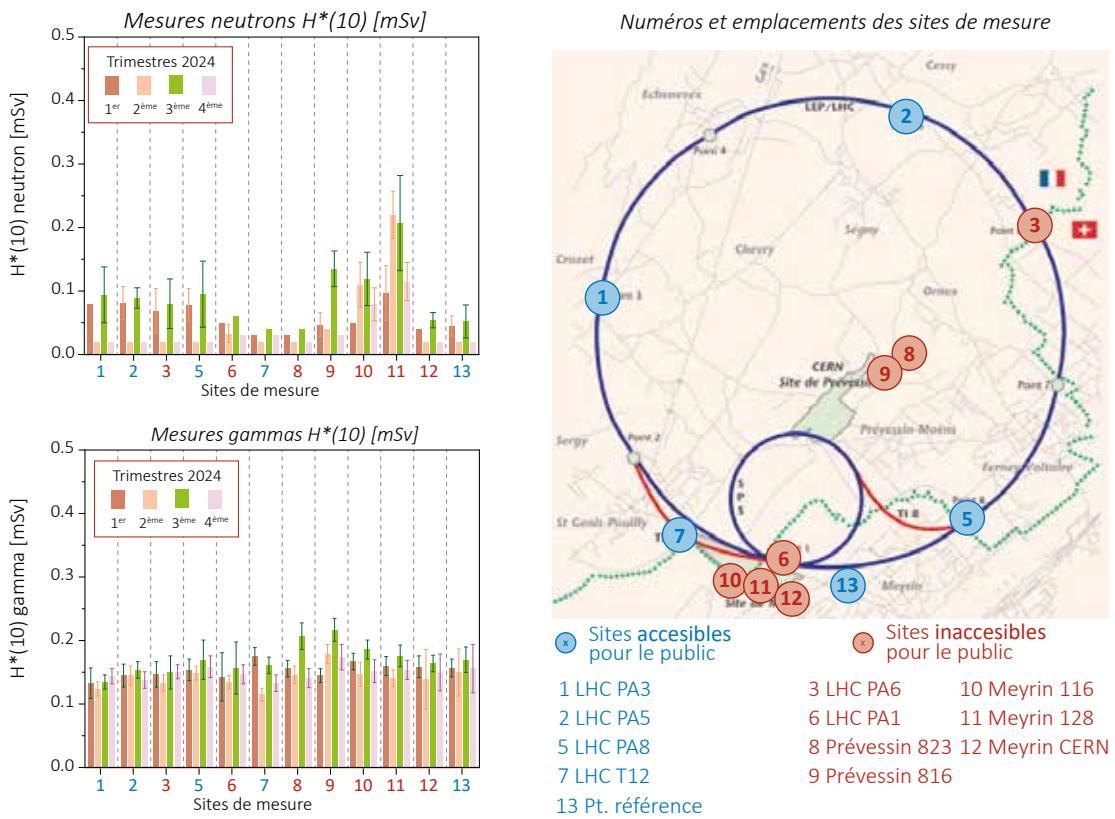


Figure 1:
Relevé trimestriel de l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ en mSv sur différents sites de mesure au CERN pour les neutrons et les gammas en 2024.

Au premier trimestre 2024, les doses des neutrons étaient faibles ou inférieures à la limite de détection. Les installations, en arrêt hivernal depuis le mois de novembre, ont repris vers la fin de la présente période de surveillance.

Si les équivalents de dose ambients des neutrons sont restés faibles pendant tout le reste de l'année, des doses mesurables ont été relevées en quelques points, en particulier près du synchrotron à protons à Meyrin (jusqu'à 0.22 mSv par trimestre au point 11) ainsi qu'au point 9 à Prévessin (0.135 mSv par trimestre). L'emplacement de ce dernier point de mesure a dû être temporairement déplacé en 2024, à quelques dizaines de mètres de son emplacement usuel, car la cabine du CERN dans lequel le TLD était situé a été supprimée. Il a retrouvé son emplacement habituel au 4^{ème} trimestre, mais il est maintenant situé sur un poteau et non plus dans une cabine. Notons encore que les doses des neutrons mesurées en 2024 à proximité du synchrotron à protons sont similaires à celles habituellement observées par le passé lors du fonctionnement de ces installations.

Les doses des photons enregistrées au cours de l'année 2024 correspondaient partout à l'irradiation naturelle (environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas).

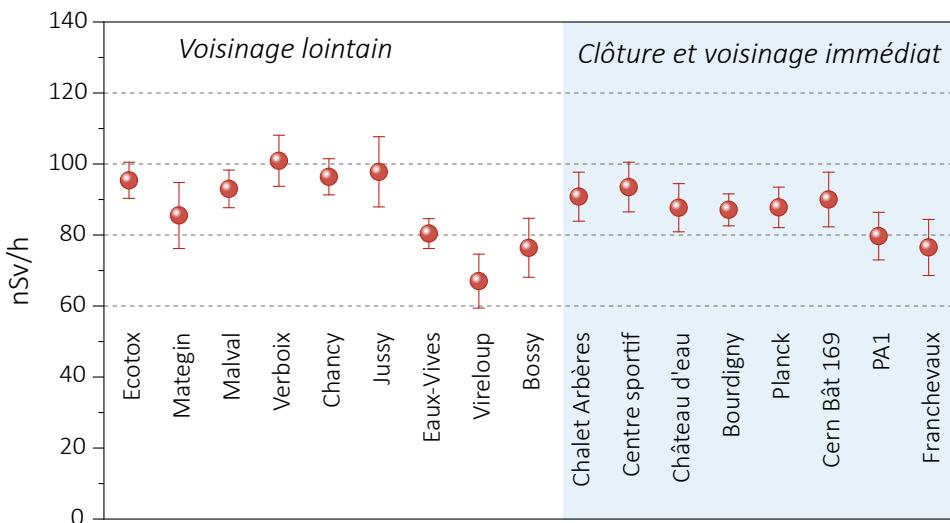
Ainsi, les résultats des mesures des équivalents de dose ambients des neutrons et des photons effectuées par

l'IRA en 2024 n'ont mis en évidence aucune valeur inhabituelle.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (figure 2) en octobre 2024, sur 8 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants (tous en territoire suisse) n'ont par ailleurs montré aucune influence du centre de recherche sur l'exposition ambiante due au rayonnement gamma. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$) (pour les photons) se sont échelonnées entre 67 et 101 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 87 ± 6 nSv/h; moyenne des sites distants 88 ± 11 nSv/h).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air, URAnet, située au CERN, a fonctionné sans interruption en 2024. Les moniteurs spectrométriques permettent de mesurer en continu les concentrations individuelles des différents émetteurs gamma présents dans l'air (aérosols) (voir chapitre 4.2). Si les concentrations du ^{214}Pb et du ^{214}Bi , descendants du radon, sont clairement mesurables, les concentrations des émetteurs gamma d'origine artificielle sont toutes restées

**Figure 2:**

Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2024 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1m au-dessus du sol.

inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 4 à 8 mBq/m³ pour le ¹³⁷Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2024. Le moniteur d'iode également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l'¹³¹I gazeux, n'a révélé aucune valeur supérieure à la limite de détection de l'ordre de 50 mBq/m³.

Les résultats des mesures hebdomadaires des filtres aérosols à haut débit (HVS) du CERN ont confirmé, comme les années précédentes, la prédominance des radioéléments d'origine naturelle, tels que ⁷Be et ²¹⁰Pb (figure 3). Le cas du ⁷Be est toutefois particulier du fait de sa double origine: naturelle et anthropogénique (production/émissions par les installations du CERN, voir tableau 1 du chapitre 8.6).

Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ⁷Be mesurées en 2024 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Tableau 1 :

Concentrations du ⁷Be mesurées en 2024 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

Station de collection à haut débit	Valeur min/max (mBq/m ³)	Moyenne (mBq/m ³)
CERN (Meyrin/GE)*	1.0 - 4.6	2.8 ± 0.9
Posieux/FR	0.7 - 5.8	2.9 ± 1.1
Klingnau/AG	0.9 - 5.2	2.7 ± 1.0
Göttingen/TG	0.9 - 5.4	2.9 ± 1.1
Cadenazzo/TI	0.7 - 6.0	3.2 ± 1.3

Des traces de ²²Na, également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre < 0.3 et 0.8 µBq/m³).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ¹³⁷Cs (valeur maximale de 0.5 ± 0.2 µBq/m³) provenant des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont été détectées à quelques reprises, comme partout en Suisse. La remise en suspension dans l'air des particules de sol qui contiennent le ¹³⁷Cs est plus importante par temps sec, raison pour laquelle ces traces sont le plus souvent mesurées en hiver.

De faibles concentrations de ²⁴Na (40 - 77 µBq/m³) ainsi que quelques traces d'¹³¹I (0.7 à 1.4 µBq/m³) ont également été décelées dans les filtres aérosols en 2024. Ces radioisotopes de courte demi-vie (15 h pour le ²⁴Na et 8 jours pour l'¹³¹I) sont produits dans les installations du CERN et sont sporadiquement mesurables dans l'environnement quand celles-ci sont en fonction. Lors des changements de cible de l'installation ISOLDE, il se peut que plusieurs isotopes d'iode soient mesurables simultanément dans l'environnement, ce qui ne fut pas le cas en 2024; sinon, c'est essentiellement l'¹³¹I qui est détecté.

Même si la concentration d'¹³¹I mesurée sur les filtres aérosols ne représente qu'une fraction de la concentration totale d'¹³¹I présent dans l'air, car la partie gazeuse, prédominante, ne se dépose pas sur les filtres, il est possible de conclure que l'impact radiologique de ces radionucléides sur la population avoisinante est resté très faible. En effet, sur la base des mesures effectuées par le CERN au cours

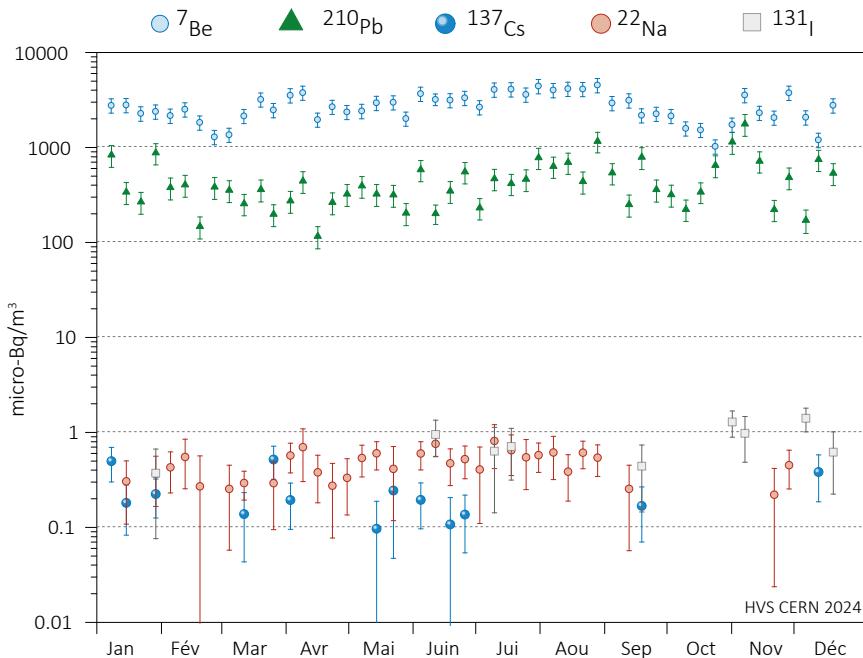


Figure 3 :

Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées en 2024 dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2024.

des années précédentes, la concentration d' ^{131}I gazeux peut être estimée à environ 50 à 100 fois celle de l' ^{131}I particulaire. Ainsi même en considérant le facteur le plus conservateur (100), la concentration totale maximale d' ^{131}I dans l'air n'aurait pas dépassé environ 0.015% de la limite d'immissions dans l'air pour ce radionucléide selon l'Ordonnance sur la radioprotection. De si faibles concentrations ne peuvent pas être décelées par les moniteurs d'iode du réseau URAnet. Si ceux-ci sont capables

de mesurer l'iode gazeux, ils ne sont pas assez sensibles pour mesurer des concentrations inférieures ou de l'ordre du milli-becquerel (limite de détection de l'ordre de 50 mBq/m³); ces moniteurs sont en effet conçus pour pouvoir détecter rapidement une augmentation significative de la concentration d'iode dans l'air et, le cas échéant, transmettre automatiquement une alarme aux autorités.

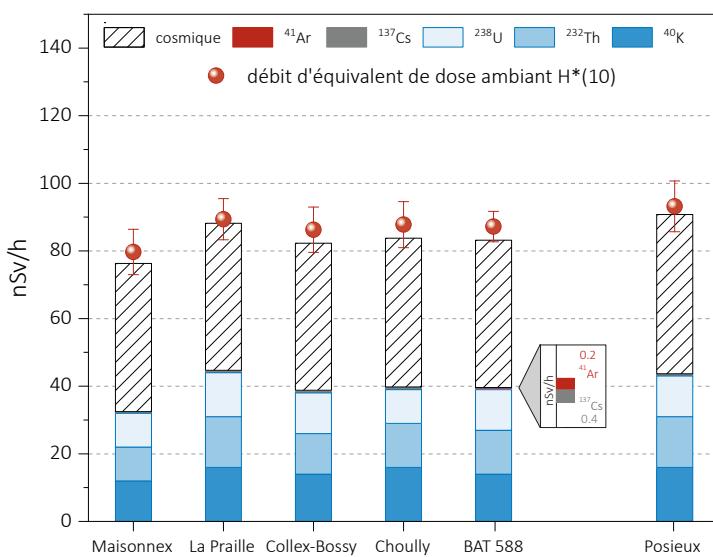


Figure 4 :

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres *in situ* (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2024. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma *in situ* permettent de distinguer les contributions d'origine naturelle et artificielle à l'exposition externe du public. La figure 4 montre que les valeurs mesurées au voisinage du centre de recherche sont généralement comparables à celles relevées sur des sites hors de son influence, tel que Posieux/FR (pour plus de détails sur les mesures *in situ*, se référer au chapitre 3.1). D'infimes traces d' ^{41}Ar , un gaz rare de demi-vie inférieure à 2 heures produit dans les accélérateurs du centre de recherche, ont toutefois été enregistrées au point de mesure situé à l'intérieur de la clôture du centre de recherche (BAT 588). La contribution supplémentaire à l'exposition ambiante due à ce radionucléide, présent dans l'air, est minime (0.2 nSv/h à l'intérieur de la clôture).

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux prélevés au voisinage proche du centre de recherche ont confirmé l'absence de marquage du milieu par des radio-nucléides produits par le centre de recherche. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioéléments d'origine naturelle, dont les concentrations prédominent, on y détecte encore les traces des injections artificielles des essais nucléaires des années 50 et 60 et, dans une moindre mesure de l'accident de Tchernobyl.

Mesures dans le milieu aquatique

La station de prélèvement d'échantillons d'eau du Rhône située à Chancy/GE a été à l'arrêt pendant la première moitié de 2024 en raison de travaux à la suite d'un glissement de terrain. Les échantillons mensuels d'eau du Rhône collectés au cours de la seconde moitié de l'année n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle mesurable. Les concentrations de tritium dans ces échantillons sont par ailleurs généralement restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l, à l'exception du mois de septembre où une valeur légèrement supérieure à la limite de détection (2.8 ± 1.4 Bq/l) a été mesurée.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril, conduit par le département F-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau à l'initiative de l'OFSP depuis 1999, a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme ont fait l'objet d'un rapport spécifique [1].

Au total 26 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) dans le Nant

d'Avril entre le 20 novembre 2023 et le 21 novembre 2024, avec une durée de prélèvement moyenne de 13.7 ± 2.1 jours par échantillon. A noter que certaines périodes (1.12.-7.12.23, 24.02.-29.02.24, 23.08.-29.08.24, 6.09 – 12.09.24, 19.10 - 25.10.24) ne sont pas couvertes à la suite de pannes de l'échantillonneur ou de batterie.

Les échantillons d'eau sont acidifiés pour limiter l'adsorption d'éléments à la surface des récipients, avant d'être filtrés à 1.2 µm. Les filtres sont séchés à l'air et pesés. Le filtrat est évaporé à sec et le résidu repris dans de l'acide nitrique. Les résultats des mesures sur les eaux et les filtres sont ensuite agrégés pour obtenir un résultat global sur l'eau (eau brute). Les eaux ayant été acidifiées avant traitement, la répartition des radioisotopes entre l'eau et les particules ne correspond plus à celle existante dans la rivière.

Dans les échantillons d'eau brute, outre les radioisotopes géogènes, le ⁷Be est le principal radioisotope détecté (figure 5). Son activité moyenne (lorsque l'isotope est présent) pour la période couverte par le rapport s'est élevée à 0.3 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ⁷Be (1.61 ± 0.05 Bq/l) a été mesurée en juin 2024.

Le ¹³⁷Cs, issu des tests nucléaires dans l'atmosphère et de l'accident de la centrale de Tchernobyl, a été mesuré sur les particules à quatre reprises, avec une valeur maximale 4 ± 1 mBq/l.

Ni le ²²Na, ni aucun autre radioisotope susceptible de provenir du CERN n'a été détecté dans les échantillons d'eau au cours de la période sous revue.

L'échantillonnage des eaux ayant été réalisé en fonction du débit, il est possible d'estimer le flux d'un isotope en multipliant les débits (exprimés en m³/période) par l'activité spécifique du radionucléide.

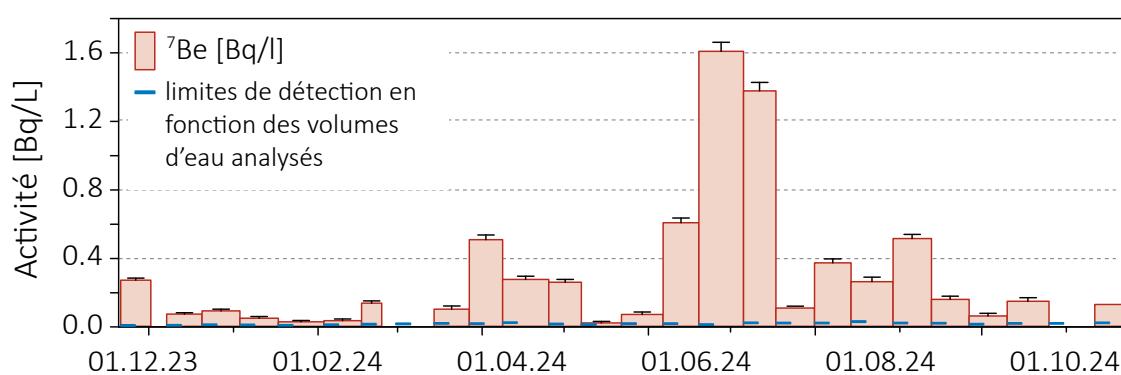


Figure 5 : Activités du ⁷Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'avril entre novembre 2023 et novembre 2024.

Le flux annuel de ${}^7\text{Be}$ s'étant écoulé dans le Nant d'Avril au point de mesure pour la période 2023- 2024 peut ainsi être estimé à 2'170 MBq/an au minimum et 2'505 MBq/ an au maximum. Ces valeurs sont les 5èmes plus élevées des 25 années de surveillance (figure 6). Un test de Mann-Kendall montre qu'une tendance temporelle se dessine avec une augmentation des flux de ${}^7\text{Be}$ significative (p -value = 0.02) au cours des 25 dernières années.

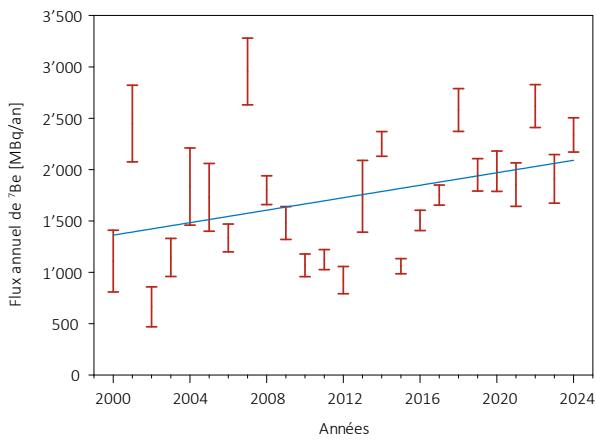


Figure 6 :
Estimation des flux annuels minimums et maximums de ${}^7\text{Be}$ dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ${}^7\text{Be}$ et de ${}^{137}\text{Cs}$ dans tous les échantillons avec des activités spécifiques variant respectivement entre 350 et 2'436 Bq/kg (moyenne 1'100 \pm 600 Bq/kg), et entre 4.0 et 7.8 Bq/kg. Ces résultats se situent dans la moyenne des valeurs mesurées les années précédentes.

Aucun autre radioisotope mesuré par le passé (${}^{60}\text{Co}$, ${}^{57}\text{Co}$, ${}^{54}\text{Mn}$) n'a été détecté dans les sédiments au cours de la période sous revue.

Afin de mettre en évidence d'éventuelles augmentations des immissions radioactives dans le milieu aquatique dues au fonctionnement du LHC, des sédiments et des bryophytes sont par ailleurs prélevés une fois par an aux 8 principaux points de rejet des eaux du LHC et analysés par le département F-A. Forel. Les pièges à sédiments ont été exposés du 12 septembre au 3 octobre 2024. Dû à la disparition du piége au point PA7, un nouveau piége a été posé entre le 3 et le 20 octobre 2024. Des bryophytes de l'espèce *Rhynchosstegium riparioides* ont été prélevées le 12 septembre 2024. En raison de l'absence de bryophytes sur les points PA7 et PA8, aucune mesure de ce type d'échantillon n'a pu être effectuée pour ces sites en 2024. Notons que le LHC était en activité pendant la période des prélèvements.

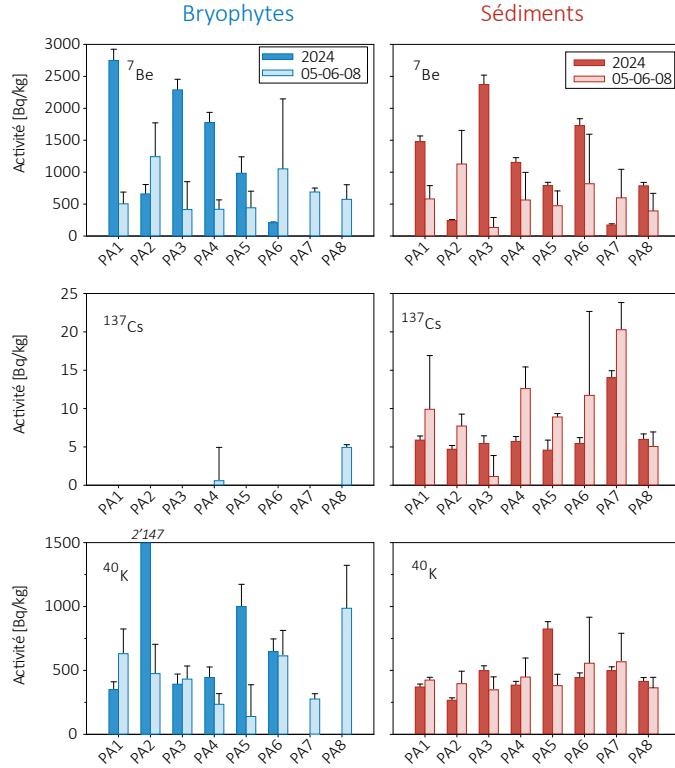


Figure 7 :
Activités des radioisotopes dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8, voir figure 2). Les valeurs 05-06-08 correspondent aux moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008, avant la mise en service du LHC. Il n'y avait pas de bryophytes au point PA7 et PA8 en 2024.

Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux points de rejet du LHC se sont échelonnées entre 243 et 1'731 Bq/kg pour le ^{7}Be et entre 4.6 et 14 Bq/kg pour le ^{137}Cs . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^{7}Be variant entre 210 et 2'750 Bq/kg; les activités spécifiques du ^{137}Cs étaient, quant à elles, toutes inférieures à la limite de détection dans ces échantillons.

La comparaison (figure 7) de ces résultats avec ceux des années de référence (2005, 2006 et 2008), alors que le LHC n'était pas encore en activité, ne montre pas de nouveaux radioisotopes.

En résumé, les résultats du programme de surveillance mené par le département F.-A. Forel ont montré, comme lors des années précédentes, qu'hormis les radioisotopes d'origine géogène, les radioisotopes présentant les plus fortes activités sont le ^{7}Be et le ^{137}Cs . Le ^{7}Be est d'origine naturelle et les mesures effectuées ne mettent pas en évidence une origine anthropique. Le ^{137}Cs résulte de l'érosion des sols contaminés par les essais nucléaires dans l'atmosphère et par l'accident de Tchernobyl.

Aucune trace de ^{22}Na n'a été détectée dans les eaux du Nant d'Avril au cours de l'année sous revue. Les autres radioéléments parfois détectés précédemment dans le Nant d'Avril comme le ^{57}Co , le ^{58}Co , le ^{60}Co ou le ^{54}Mn , n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes mesurées pour contrôler les immissions au voisinage du LHC.

Conclusions

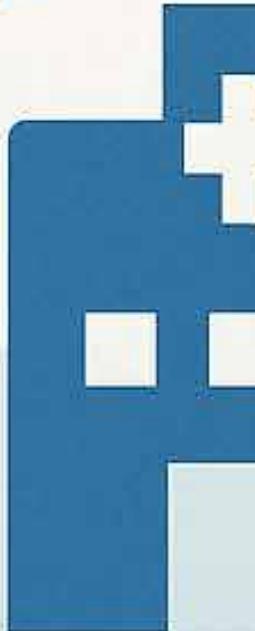
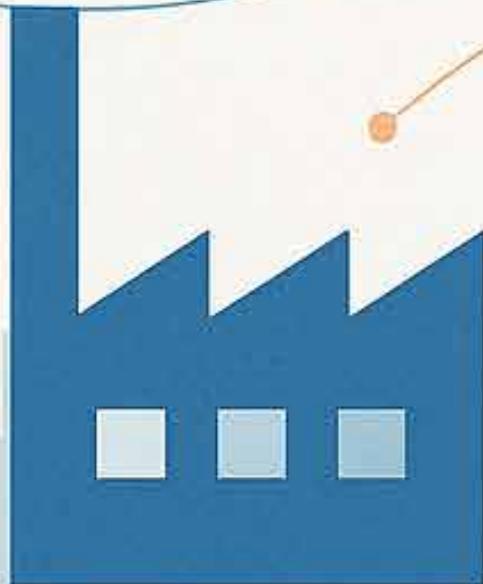
Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec l'IRA et le département F.-A. Forel, a montré que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement et la population avoisinante a été très faible en 2024.

Si des traces des radionucléides de courte demi-vie, produits par les installations du CERN, comme les isotopes d'iode ou l' ^{41}Ar , ont sporadiquement pu être décelées dans l'air au voisinage du CERN en 2024, elles témoignent essentiellement de la sensibilité des méthodes de mesure mises en œuvre, mais n'ont pas eu d'impact radiologique notable sur la santé de la population. Les autres résultats des mesures dans l'air, le milieu terrestre ou encore les eaux et sédiments du Nant d'Avril ne se sont que peu distingués de ceux enregistrés dans les stations de mesures de référence, situées hors influence du centre de recherche.

Industries
Hôpitaux

9

Industrien
Spitäler



- Emissions des industries
 - Emissions des hôpitaux
 - Surveillance au voisinage des industries
- Radionucléides dans les stations d'épurations
 - Plan d'action Radium
- Überwachung in der Umgebung von Industrien
 - Emissionen der Betriebe
 - Emissionen der Spitäler
- Radionuklide in Kläranlagen
 - Aktionsplan Radium

2024

9.1

Emissionen der Betriebe

Flavia Danini Fischer

Suva, Abteilung Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz,
Bereich Chemie, Physik & Ergonomie/Strahlenschutz, Luzern

Zusammenfassung

Der Umsatz von radioaktiven Stoffen sowohl in den Produktionsbetrieben wie auch in den Forschungsbetrieben variiert im Allgemeinen stark je nach Auftragslage und Forschungsschwerpunkt. Dies trifft insbesondere für den Einsatz von mit ^3H und ^{14}C markierten Stoffen zu. Sämtliche Abgabelimiten wurden im Berichtsjahr eingehalten.

Überwachte Betriebe

Die Suva betreut als Aufsichtsbehörde folgende Betriebe, die mit offenen radioaktiven Stoffen arbeiten:

Produktionsbetriebe (Total 3 Betriebe)

Radioaktive Stoffe werden benötigt für die Produktion von:

- Radioaktiv markierten Verbindungen für die Forschung (^3H , ^{14}C)
- Kalibrierquellen (^{90}Sr , ^{147}Pm , ^{204}Tl).
- Tritiumgaslichtquellen (^3H)

Seit 2009 wird keine tritiumhaltige Leuchtfarbe mehr produziert.

Tabelle 1 :

Umsatz radioaktiver Stoffe 2014 - 2024.

	Isotope	2024	2023*	2022*	2021*	2020*	2019*	2018*	2017*	2016*	2015*	2014*	Einheit
Produktionsbetriebe	^3H	10.11	3.44	10.3	12.3	12.11	11.26	12.75	7.31	10.54	5.74	4.07	PBq
	^{14}C	0.01	0	0.37	0.19	0.26	0.26	0	0	0.07	0	0.74	TBq
	^{147}Pm	0.01	0.05	0.01	0	0.07	0	0	0	0	0	0	TBq
Forschungsbetriebe	^3H	0.01	0.20	7.6	0.1	7.4	0.2	7.6	7.6	3.8	7.6	0.2	TBq
	^{14}C	6.37	18.9	31.7	10.4	51.1	35.4	21.3	17.1	41.3	53.9	158.9	GBq
	^{18}F	20.00											
	^{32}P	0.13	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.9	0.5	0.9	0.9	GBq
Analytische Laboratorien	^{35}S	0.01	0	0	0.2	0	0	0	1.4	1.4	2.4	2.4	GBq
	^{51}Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.1	0	GBq
	$^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$	0.74											
	^{125}I	0.39	0.1	0.2	0.1	0	0.2	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	GBq
	^{177}Lu	0.69											TBq

* die aufgeführten Werte beziehen sich auf den Einkauf von radioaktiven Stoffen

Forschungsbetriebe und medizinisch analytische Laboratorien (Total 67 Betriebe)

Es sind dies Unternehmungen der chemischen Industrie, die unter anderem Stoffwechseluntersuchungen mit radioaktiv markierten Stoffen durchführen sowie Laborbetriebe, welche für Hormonbestimmungen sogenannte Radioimmuno-assay Kits (Ria-Kits) mit ^{125}I einsetzen.

Resultate

Im Berichtsjahr 2024 haben sämtliche Betriebe die Abgabelimiten eingehalten. In den Tabellen 2a und 2b sind die Jahresabgabewerte der Basler Chemie an die Abluft und das Abwasser mit den entsprechenden Abgabelimiten zusammengefasst. Der Synthesebetrieb bei Novartis wurde im Verlauf von 2016 eingestellt. Dies führte dazu, dass in diesem Betrieb keine Abgaben an die Abluft mehr gemessen wurden. Tabelle 3 gibt die Aktivitätsmengen an, die gemäss Art. 116 der Strahlenschutzverordnung (StSV) in einem Ofen mit Zustimmung des BAG verbrannt wurden.

Die Tritium-Abgaben der drei Produktionsbetriebe, sowie die Tritium-Messungen in der Umgebung der Firma RC Tritec AG sind in den Figuren 1a, 1b, 1c und 1d graphisch dargestellt.

Der Anstieg in Figur 1b im Jahr 2023 ist durch einen erhöhten Jahresumsatz von Tritium zu erklären. Aufgrund eines Produktionsfehlers im Jahr 2024 wurden zusätzliche 2 TBq Tritium (HTO) mit der Abluft freigesetzt.

Der erhöhte Abgabewert von 2010 ans Abwasser bei RC Tritec AG ist zurückzuführen auf die Umbauarbeiten in den Labors, welche in diesem Jahr stattgefunden haben. Die damals bei der Dekontamination angefallenen wässrigen radioaktiven Flüssigkeiten wurden unter Einhaltung der in der Bewilligung festgehaltenen Abgabelimiten ins Abwasser abgeleitet.

Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft. Die Proben der Umgebungsüberwachung werden von der Suva analysiert. Wegen eines Personenwechsels und Unklarheiten bei der Nachfolgeregelung wurden 2022 keine Proben in der Umgebung von RC Tritec entnommen, so dass in Figur 1d für dieses Jahr kein Messwert aufgeführt ist. Die Messserie wurde 2023 wieder aufgenommen. In Tabelle 4 sind die bewilligten Jahresabgabelimiten der drei Produktionsbetriebe zusammengefasst.

Tabelle 2a :
Abgabe radioaktiver Stoffe an die Abluft während des Jahres 2024 (GBq).

	Abgaben an die Abluft (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	^3H	^{14}C	^3H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	39.9 (org.) 0 (Gas)	3.5	120 (org.) 2'000 (Gas)	80
Novartis Pharma AG	0 (org.) 0 (Gas)	0	500 (org.) 4'000 (Gas)	60

Tabelle 2b :
Abgabe radioaktiver Stoffe an das Abwasser während des Jahres 2024 (GBq).

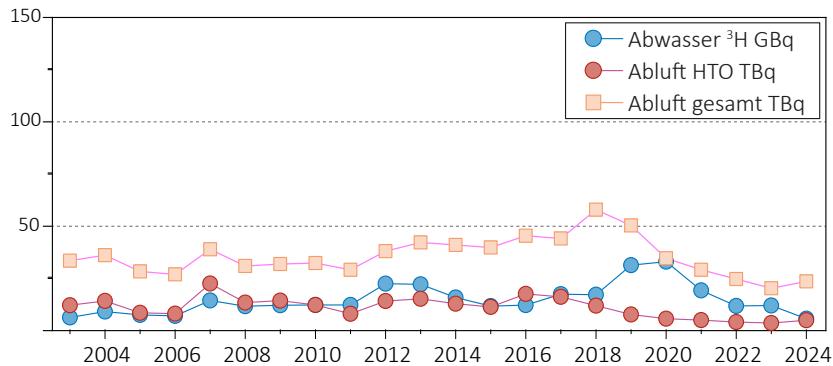
	Abgaben an das Abwasser (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	^3H	^{14}C	^3H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	8.07	0.03	80	40
Novartis Pharma AG	0	0	300	30

Tabelle 3 :
Verbrennung in einem Ofen mit Zustimmung des BAG gemäss StSV, Art. 116 während des Jahres 2024 (GBq).

	^3H (GBq)	^{14}C (GBq)
SOVAG Basel	492.75	68.18
KVA St. Gallen	414.47	0
ES Dottikon	0.17	2.45
Energie Wasser Bern	5.97	0.01
Renergia Perlen	0	0
ZAB Bazenheid	456.43	0

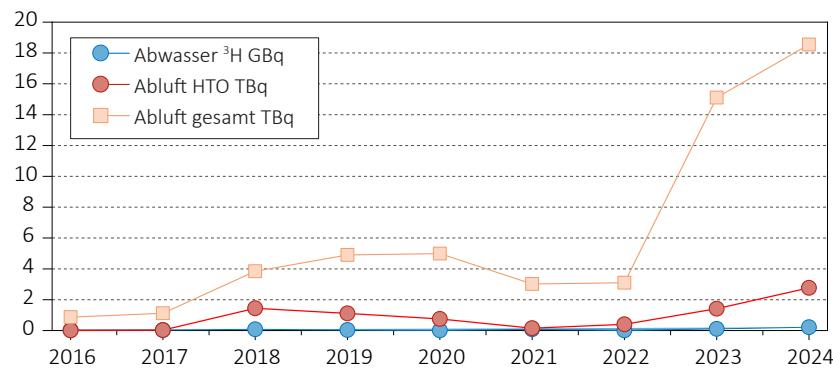
Tabelle 4 :
Jahresabgabelimiten der Produktionsbetriebe.

	Abwasser	Abluft	
	^3H	^3H (HT)	^3H (HTO)
MB-Microtec AG, Niederwangen / BE	40 GBq	370 TBq	37 TBq
Smolsys AG, Root / LU	1.3 GBq	40 TBq	4 TBq
RC-Tritec AG, Teufen / AR	20 GBq	7.5 TBq	7.5 TBq



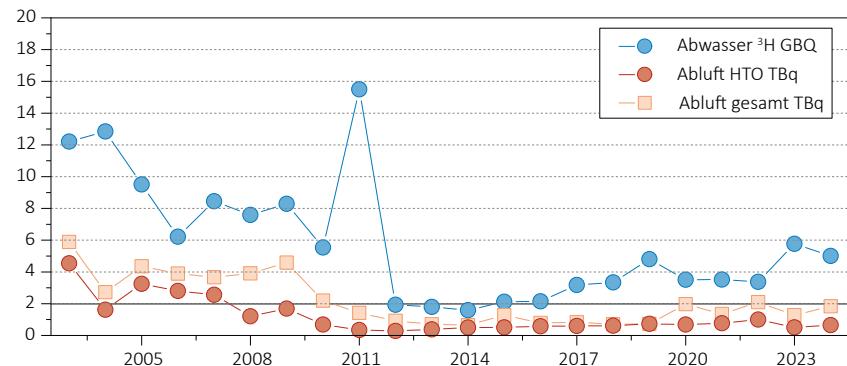
Figur 1a:

Mb-microtec AG, Niederwangen/BE: Jahreswerte der Emissionen. Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



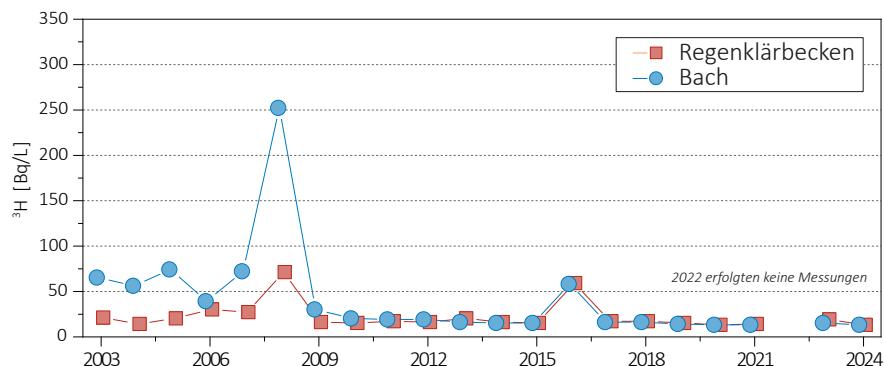
Figur 1b:

Smolsys AG, Root/LU: Jahreswerte der Emissionen. Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



Figur 1c:

RC Tritec AG, Teufen/AR: Jahreswerte der Emissionen. Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



Figur 1d:

RC Tritec AG, Teufen/AR: Umgebungsüberwachung. Die Proben der Umgebungsüberwachung werden von der Suva analysiert.

9.2

Emissionen der Spitäler

R. Linder, N. Stritt, T. Flury
Sektion Forschungsanlagen und Nuklearmedizin, BAG, Bern

Zusammenfassung

Im Berichtsjahr 2024 hat lediglich der Umsatz von ^{177}Lu für therapeutische Anwendungen gegenüber dem Vorjahr deutlich zugenommen. Der Umsatz anderer therapeutischer Radionuklide (^{131}I , ^{90}Y , ^{166}Ho , ^{223}Ra) blieb mehr oder weniger konstant. Die Abgabe von Radionukliden an die Umwelt aus der stationären Behandlung von Patienten mit ^{177}Lu und ^{131}I bleibt gegenüber dem Vorjahr unverändert. Die Abgabe von diagnostisch verwendeten Radionukliden wie $^{99\text{m}}\text{Tc}$ oder ^{18}F ins Abwasser wird nicht systematisch messtechnisch überwacht, da die Immissionsgrenzwerte für diese kurzlebigen Radionuklide unter den gegebenen Umständen nicht überschritten werden können.

Ausgangslage

Spitäler und Institute, die offene radioaktive Quellen zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken am Menschen anwenden sind verpflichtet, den Umsatz, den Zweck der Applikation, sowie die Abgabemenge kontaminierten Abwässer an die Umwelt der Aufsichtsbehörde BAG jährlich zu melden. Die gemelten Daten werden durch das BAG ausgewertet und können zur Festlegung von Aufsichtsschwerpunkten verwendet werden.

von 1m zum Patienten unterschritten wird. Bei Therapien mit ^{177}Lu (zur Behandlung von neuroendokrinen- und Prostata-Tumoren) müssen Patienten bis zu ihrer Entlassung mindestens 48 Stunden hospitalisiert werden. Die Ausscheidungen hospitalisierter Therapiepatienten, welchen ^{177}Lu oder ^{131}I verabreicht wurde, werden in speziell dafür vorgesehenen Abwasserkontrollanlagen gesammelt und erst nach dem Abklingen unterhalb der bewilligten Abgabekomitee an die Umwelt (Kanalisation) abgegeben.

Andere Radionuklide wie zum Beispiel ^{90}Y , ^{166}Ho oder ^{223}Ra werden bei Patienten mit einer Tumorerkrankung zur Therapie verwendet. Weitere Nuklide wie ^{169}Er oder ^{186}Re werden zur Behandlung rheumatischen Erkrankungen zur Entzündungshemmung oder Schmerzlinderung in Gelenke appliziert. Die Applikation für diese Radionuklide erfolgt in der Regel ambulant, so dass die Patienten unmittelbar nach der therapeutischen Behandlung aus dem Spital entlassen werden können. Erstmals in 2024 wird in der Umsatzstatistik ^{161}Tb aufgeführt. Dieses Therapienuklid wurde im Rahmen klinischer Studien zur Behandlung von Prostatakarzinomen und neuroendokrinen Tumoren eingesetzt.

Therapeutische Anwendung von Radionukliden

^{131}I , das zur Schilddrüsentherapie verwendet wird, kann den Patienten bis zu einer Aktivität von 200 MBq ambulant verabreicht werden. Bei höheren Aktivitäten werden die Patienten mindestens für die ersten 48 Stunden in speziellen Therapiezimmern isoliert und dürfen erst entlassen werden, wenn eine Dosisleistung von 10 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ in einem Abstand

Abgabe radioaktiver Stoffe ans Abwasser

Die für einen Betrieb bewilligte Abgabeaktivität radioaktiver Stoffe ans Abwasser richtet sich nach Art. 24 Abs. 2 der Strahlenschutzverordnung. Danach darf die Aktivitätskonzentrationen in öffentlich zugänglichen Gewässern im Wochenmittel die in Anhang 7 StSV festgelegten Immissonsgrenzwerte für Gewässer (IG_{GW}) nicht überschreiten. Die in der Praxis durch das BAG bewilligte Abgabelimite für ^{131}I beruht auf den Angaben bezüglich der gesamten Abwassermenge des jeweiligen Betriebs und der zusätzlichen Verdünnung in der Abwasserkläranlage. Die Einhal-

tung der oben erwähnten Abgabelimiten gewährleistet, dass die geltenden Immissionsgrenzwerte in öffentlichen Gewässern zu keiner Zeit überschritten werden. Werden andere Nuklide als ^{131}I an die Umwelt abgegeben (z.B. ^{177}Lu), wird dieser Anteil in ^{131}I Äquivalente anhand des Verhältnisses der IG_{GW} von ^{177}Lu zu ^{131}I umgerechnet und in die Abgabeaktivität mit einbezogen. Die Spitäler sind verpflichtet, die Abgaben radioaktiver Abwässe so gering wie möglich zu halten und dazu organisatorische und technische Optimierungsmassnahmen vorzunehmen. Dafür werden Abklingtankanlagen mit ausreichendem Lagervolumen betrieben, damit die kurzlebigen Radionuklide in den Abwässern aus den Therapiezimmern ausreichend lange abklingen können.

Tabelle 1: Applikationen radioaktiver Stoffe zu therapeutischen Zwecken 2024 in GBq.

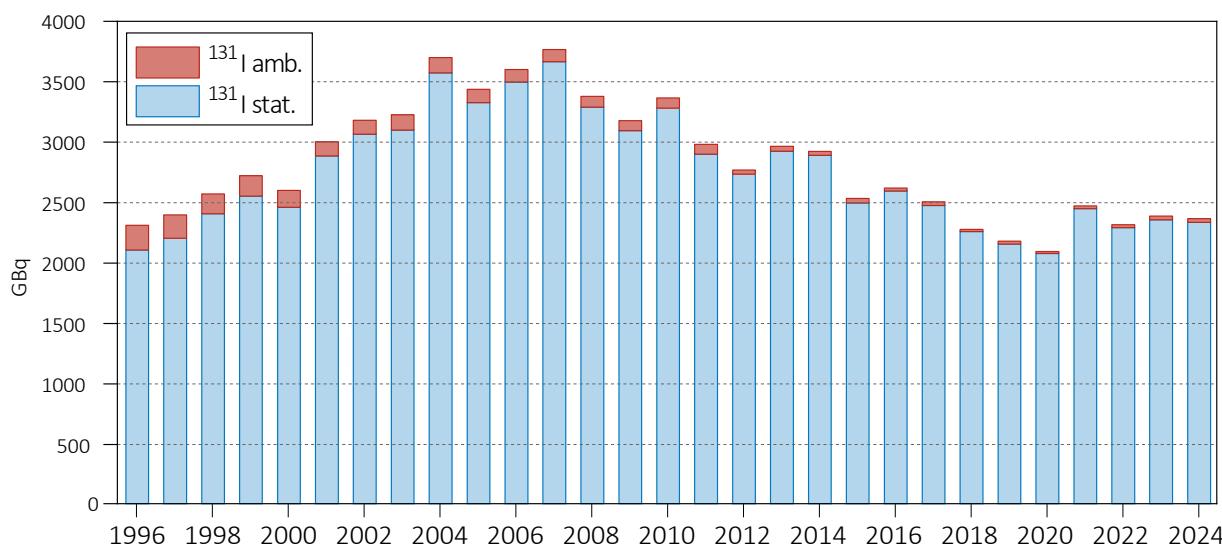
Spital	^{131}I amb.	^{131}I stat.	^{131}I Total GBq	^{177}Lu GBq	^{186}Re GBq	^{169}Er GBq	^{90}Y GBq	^{223}Ra GBq	^{166}Ho GBq	^{161}Tb GBq
Kantonsspital Aarau	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.000	0.0	0.0
Kantonsspital Baden	2.0	48.7	50.7	678.4	0.1	0.0	9.6	0.015	0.0	0.0
Insel Gruppe AG, Bern	0.0	286.3	286.3	2'353.2	0.3	0.1	47.4	0.043	0.0	0.0
Kantonsspital Basel-Land, Bruderholz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.000	0.0	0.0
St. Claraspital, Basel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.000	0.0	0.0
Universitätsspital Basel	0.0	328.8	328.8	2'747.1	0.1	0.0	5.0	0.016	63.2	7.2
HFR Hôpital cantonal Fribourg	0.0	85.5	85.5	0.0	0.1	0.0	0.6	0.000	0.0	0.0
Hôpitaux universitaires de Genève HUG	0.0	142.3	142.3	213.7	0.1	0.0	69.8	0.007	0.0	0.0
Stiftung Kantonsspital Graubünden, Chur	0.0	69.6	69.6	273.8	0.0	0.0	0.6	0.004	0.0	0.0
Hirslanden Klinik St. Anna, Luzern	0.0	114.2	114.2	1'313.6	0.0	0.0	45.5	0.021	0.0	0.0
Luzerner Kantonsspital	0.0	97.9	97.9	452.3	0.1	0.0	29.7	0.004	0.0	0.0
RHNe Site de La Chaux-de-Fonds	2.1	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
Kantonsspital St.Gallen	0.0	201.9	201.9	1'740.9	0.1	0.0	23.2	0.104	0.0	0.0
Spital Thurgau AG KS Münsterlingen	0.0	59.6	59.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.010	0.0	0.0
Fondation La Source, Lausanne	1.4	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
CHUV Vaudois, Lausanne	0.8	129.0	129.8	2'451.6	0.0	0.0	65.6	0.004	0.0	0.0
HVS Site Sion	0.0	30.3	30.3	0.0	0.0	0.0	12.1	0.000	0.0	0.0
Klinik Hirslanden, Zürich	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	188.6	0.004	0.0	0.0
Universitätsspital Zürich	14.1	148.1	162.2	762.5	1.0	0.4	55.7	0.044	0.0	0.0
Kantonsspital Winterthur	0.0	257.9	257.9	355.2	0.0	0.0	32.5	0.071	0.0	0.0
Engeriedspital, Bern	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.022	0.0	0.0
Stadtspital Triemli, Zürich	0.0	207.5	207.5	1'000.7	0.0	0.0	19.0	0.007	29.4	0.0
Hôpital Riviera-Chablais, Vd-Vs, Rennaz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.2	0.000	0.0	0.0
soH AG Bürgerspital Solothurn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.014	0.0	0.0
Hirslanden Salem-Spital, Bern	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.000	0.0	0.0
Ente Ospedaliero Cantonale OCL, Lugano	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.3	0.000	0.0	0.0
Ente Ospedaliero Cant. ORBV, Bellinzona	0.0	126.1	126.1	510.6	0.0	0.0	83.5	0.252	0.0	0.0
Schilddrüsen-Praxis Zürich	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
Gesamte Schweiz 2024	20.5	2'333.8	2'354.3	14'853.6	2.1	0.7	705.8	0.6	92.6	7.2

Tabelle 2a:Abgabe von ^{131}I aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2024 in MBq.

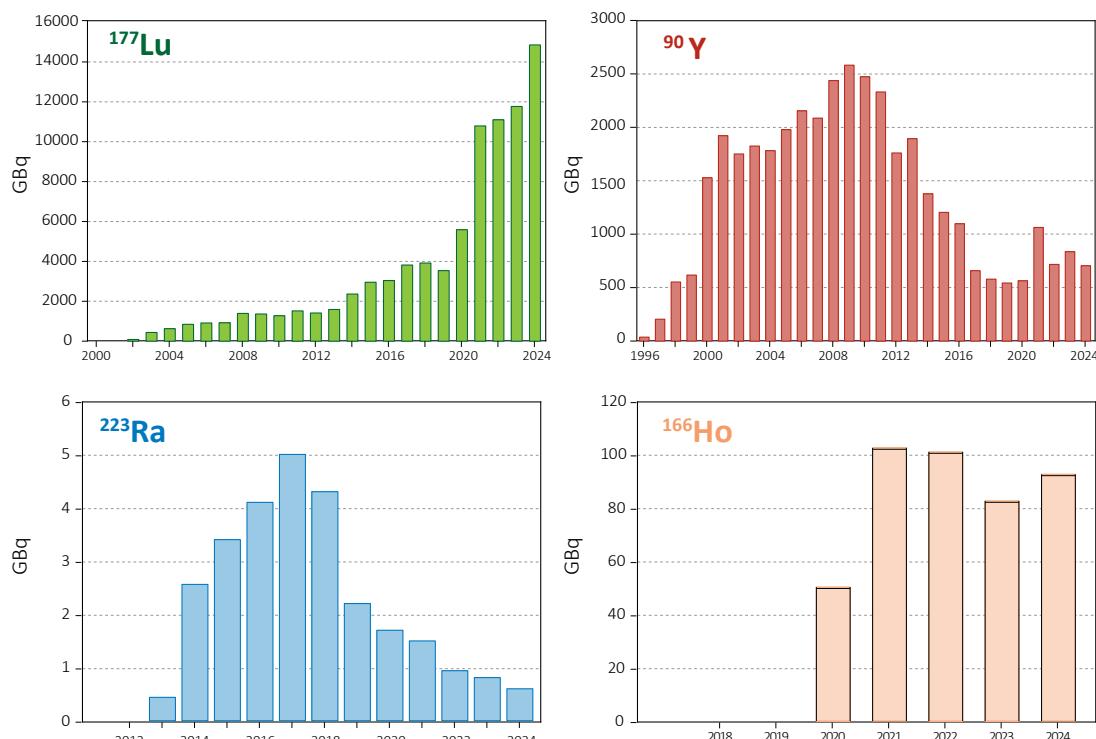
Abgabe MBq/Monat Nuklearmedizin	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Total 2024
Luzerner Kantonsspital	0.0	8.5	0.0	0.0	7.7	9.0	0.0	11.3	0.0	0.0	8.2	0.0	44.7
Hirslanden Klinik St. Anna	3.8	2.8	2.5	19.6	0.0	3.9	5.2	0.0	4.2	0.2	2.4	0.0	44.7
Hôp. Genève HUG	5.6	4.1	3.9	10.2	0.0	12.3	0.6	19.9	0.0	3.7	0.0	12.5	72.8
HVS Site Sion	0.0	0.0	0.0	2.1	1.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5
Insel Gruppe AG	6.8	1.6	10.5	5.7	71.2	4.5	56.4	27.8	0.3	4.8	4.8	59.2	253.6
Kantonsspital Baden AG	2.1	1.6	3.3	4.4	14.5	17.8	18.7	12.5	9.3	3.1	8.8	9.8	105.9
Kantonsspital St.Gallen	3.2	5.7	50.4	7.3	27.4	17.9	16.7	12.6	4.7	36.9	0.9	0.0	183.6
Universitätsspital Basel	326.2	122.2	196.3	270.4	109.7	182.5	209.7	209.1	159.8	240.2	144.2	232.0	2'402.3
Universitätsspital Zürich	2.6	0.0	8.8	0.0	0.0	46.7	47.5	0.0	0.0	3.9	0.0	2.4	111.9
Ente Ospedaliero Cant. (EOC)	2.0	0.0	1.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	2.9	7.5	0.0	15.3
HFR Hôpital cant. Fribourg	0.0	1.0	0.0	0.0	3.8	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	11.3
Kantonsspital Winterthur	0.0	25.7	12.8	26.6	48.7	18.2	60.8	11.3	41.1	19.8	26.6	68.5	360.1
Stadtspital Triemli	1.0	0.6	4.7	1.9	1.9	3.4	1.0	4.3	3.1	3.3	3.3	1.9	30.4
CHUV Lausanne	1.2	1.8	28.1	20.9	23.8	20.2	6.1	26.0	0.3	16.9	7.9	0.0	153.2
Stiftung Kant. Graubünden	0.0	0.0	0.0	174.2	3.5	1.7	0.9	11.1	11.9	48.0	25.8	54.5	331.6
Gesamte Schweiz 2024 MBq													4'124.9

Tabelle 2b:Abgabe von ^{177}Lu aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2024 in MBq.

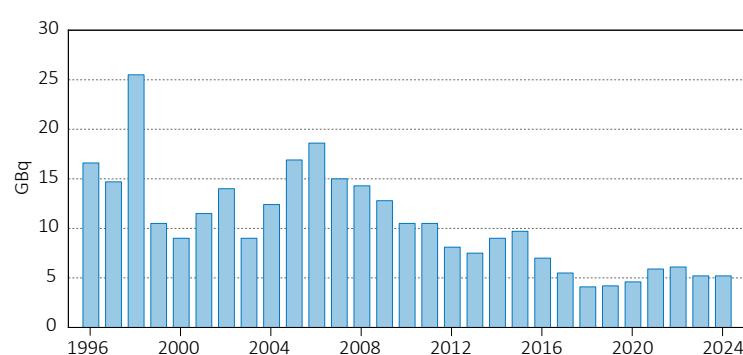
Abgabe MBq/Monat Nuklearmedizin	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Total 2024
Luzerner Kantonsspital	0.0	12.8	0.0	0.0	12.8	25.9	0.0	25.7	0.0	0.0	14.3	0.0	91.5
Hirslanden Klinik St. Anna	5.4	6.3	19.6	26.1	0.0	3.5	11.0	0.0	9.9	0.7	3.1	0.0	85.5
Hôp. Genève HUG	0.0	0.0	139.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	586.0	0.0	0.0	725.0
HVS Site Sion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Insel Gruppe AG	18.9	2.1	9.4	3.7	61.2	11.8	24.1	97.7	0.1	2.1	6.5	32.9	270.5
Kantonsspital Baden AG	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Kantonsspital St.Gallen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Universitätsspital Basel	2805.2	1740.9	3479.3	5319.3	4990.5	2442.4	7258.1	286.2	3011.3	5578.1	6870.5	1401.1	45'183.0
Universitätsspital Zürich	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ente Ospedaliero Cant. (EOC)	9.7	0.0	8.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.6	1.7	13.1	0.9	0.1	34.9
HFR Hôpital cant. Fribourg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Kantonsspital Winterthur	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9	4.4	15.3	12.8	17.3	24.1	22.0	44.9	161.6
Stadtspital Triemli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHUV Lausanne	26.8	15.1	136.0	40.5	53.7	401.0	56.7	150.0	102.5	34.5	106.5	0.0	1'123.3
Stiftung Kant. Graubünden	0.0	0.0	0.0	735.1	8.7	3.1	3.1	25.3	37.0	154.5	81.7	160.1	1'208.4
Gesamte Schweiz 2024 MBq													48'883.8



Figur 1:
Umsatz pro Jahr an ^{131}I zu therapeutischen Zwecken in GBq.



Figur 2:
Umsatz weiterer Therapie-Nuklide in GBq.



Figur 3:
Abgabe von ^{131}I Äquivalente ans Abwasser in der Schweiz in GBq.

9.3

Surveillance de la radioactivité au voisinage des industries, stations d'épuration et usines d'incinération des déchets

S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller, P. Steinmann

Section Radioactivité de l'environnement URA / OFSP Berne

A. Pregler

Kantonales Labor Basel-Stadt, Basel

Résumé

Les résultats de la surveillance effectuée en 2024 au voisinage des entreprises utilisatrices de tritium ont montré, comme par le passé, un marquage de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) par ce radionucléide, à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier à Niederwangen. Les valeurs enregistrées en 2024 se situent toutefois dans la fourchette basse de celles observées au cours des 10 dernières années. L'incident qui s'est produit à Root, ayant entraîné le rejet non contrôlé de 2 TBq de tritium dans l'atmosphère (soit la moitié de la valeur limite annuelle autorisée) le 5 février 2024, n'a pas conduit à des doses significatives pour la population avoisinante.

La surveillance de la radioactivité dans les eaux des stations d'épuration et dans les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération n'a mis en évidence aucune valeur anormale.

Introduction

Tout comme les installations nucléaires, les entreprises qui utilisent des substances radioactives et qui disposent d'une autorisation réglementant leurs rejets dans l'environnement font l'objet d'une surveillance spécifique, mise en place par la SUVA (autorité de surveillance pour les industries) et l'OFSP. Ces programmes ciblés commencent au terme source, par la surveillance des rejets effectuée par les exploitants, qui sont tenus de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois aux autorités. La SUVA vérifie ces déclarations par le biais de mesures de contrôle. La surveillance

se poursuit par la mesure, par l'OFSP, des concentrations radioactives effectivement présentes dans l'environnement (immissions) à proximité des sites concernés, afin de s'assurer du respect des limites légales et pour évaluer les doses reçues par la population.

L'OFSP coordonne également un programme spécifique de prélèvements et de mesures des eaux des stations d'épuration (STEP) ainsi que des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM).

Des échantillons d'eaux usées sont ainsi prélevés chaque semaine dans les STEP des grandes agglomérations, afin de déterminer, en laboratoire, les concentrations des émetteurs gamma tels que l'iode-131 (^{131}I) et le lutécium-177 (^{177}Lu) qui proviennent majoritairement des urines de patients traités dans les centres de médecine nucléaire. La surveillance des usines d'incinération vise à s'assurer, autant que possible, qu'aucun déchet radioactif n'a été accidentellement ou intentionnellement éliminé par le circuit des ordures conventionnelles.

Cependant, en raison des mesures d'économie adoptées par le Conseil fédéral et le Parlement depuis 2023 – et qui seront encore renforcées pour 2025 et 2026 – les programmes de surveillance des eaux des stations d'épuration et des eaux de lavage des fumées ont dû être réduits dès 2024, avec notamment l'arrêt du suivi des eaux de la STEP et de l'UIOM de Zurich. Ces programmes seront progressivement supprimés d'ici à 2026.

Voisinage des entreprises utilisatrices de Tritium ^3H

Certaines industries ont recours au tritium pour la fabrication de sources lumineuses au gaz de tritium ou pour la production de marqueurs radioactifs au tritium pour la recherche. C'est le cas des entreprises mb microtec à Niederwangen/BE, de RC Tritec à Teufen/AR et de Smolsys AG à Root/LU. Les émissions de ces entreprises sont détaillées au chapitre 9.1. Dans le cadre de la surveillance radiologique de l'environnement dans leur voisinage, l'OFSP collecte des échantillons de précipitations à Teufen, à Root ainsi qu'en 4 endroits distincts à Niederwangen. Les concentrations en tritium des échantillons de précipitations sont analysées tous les 15 jours. Le programme de surveillance comprend également la mesure de l'activité du ^3H dans l'humidité de l'air dans les échantillons bimensuels pour un site de prélèvement à Niederwangen et Teufen, et 2 sites à Root. Pour ces analyses, les échantillons sont collectés à l'aide de piégeurs passifs à filtre moléculaire depuis 2020.

Comme par le passé, la surveillance mise en œuvre au voisinage des entreprises utilisatrices de tritium a révélé un marquage significatif de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) par ce radionucléide, à proximité immédiate de ces entreprises, par rapport aux niveaux usuuellement mesurés ailleurs en Suisse. Le tableau 1, qui résume les résultats obtenus en 2024 dans les échantillons de précipitations, illustre ce marquage, sachant que les concentrations mensuelles de tritium mesurées dans les précipitations de la station de référence de Posieux, éloignée de toute usine manipulant du tritium, sont généralement inférieures ou proches de la limite de détection de 2 Bq/l.

Le 5 février 2024, l'entreprise Smolsys, spécialisée dans le développement et la fabrication de produits à base de tritium a rejeté accidentellement 2 TBq de tritium (HTO) dans l'atmosphère, en raison d'une erreur de production (voir aussi [lien \[1\]](#)). Cette quantité d'activité dépasse la valeur limite hebdomadaire et correspond à la moitié de la valeur limite annuelle de rejet dans l'environnement selon l'autorisation de l'OFSP. Pendant l'incident, trois employés ont incorporé un peu de tritium. La concentration maximale mesurée dans l'urine équivaut à 65 kBq/l, ce qui correspond à une dose estimée d'environ 60 μSv pour un employé.

La surveillance en continu du tritium dans l'environnement menée par l'OFSP a montré que, même si les concentrations de ce radionucléide dans les échantillons de pluie et d'humidité de l'air collectés début février étaient nettement plus élevées que celles habituellement enregistrées, l'impact sanitaire pour la population avoisinante est resté négligeable. En effet, les doses de rayonnement calculées sur la base de ces résultats de mesure sont restées de l'ordre de quelques microsievert (μSv) au maximum pour les personnes du public les plus exposées. Les concentrations ont ensuite rapidement diminué pour rester, la plupart du temps, très faibles au cours de 2024 (voir figure 1).

Les niveaux de tritium mesurés dans les échantillons bimensuels de précipitations prélevés en 2024 à proximité immédiate de l'entreprise mb Microtec à Niederwangen/BE, se sont échelonnés entre 5 et 790 Bq/l (voir figure 2). La figure 3, qui présente les valeurs moyennes

Tableau 1 :
Tritium dans les précipitations au voisinage des entreprises utilisatrices de ^3H en 2024.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Mediane / moyenne (Bq/l)
Root / LU ~ 250 m SO Smolsys (N=24*)	<5 - 197	13 / -
Teufen/AR ~ 65 m E Firma RCT (N=25*)	9 - 82	33 / 34
Niederwangen/BE (N=22*)		
Bauernhaus ~ 100 m SO de l'entreprise	6 - 191	31 / 53
Garage ~ 200 m O de l'entreprise	5 - 142	24 / 37
Gemeinde Köniz ~ 330 m N de l'entreprise	7 - 79	29 / 29
Firma Schär ~ 260 m NE de l'entreprise	21 - 790	222 / 270

* la quantité d'échantillons prélevés en 2024 selon une périodicité d'environ 15 jours peut varier en raison soit de l'absence de précipitations, soit de problèmes techniques aux stations de prélèvement.

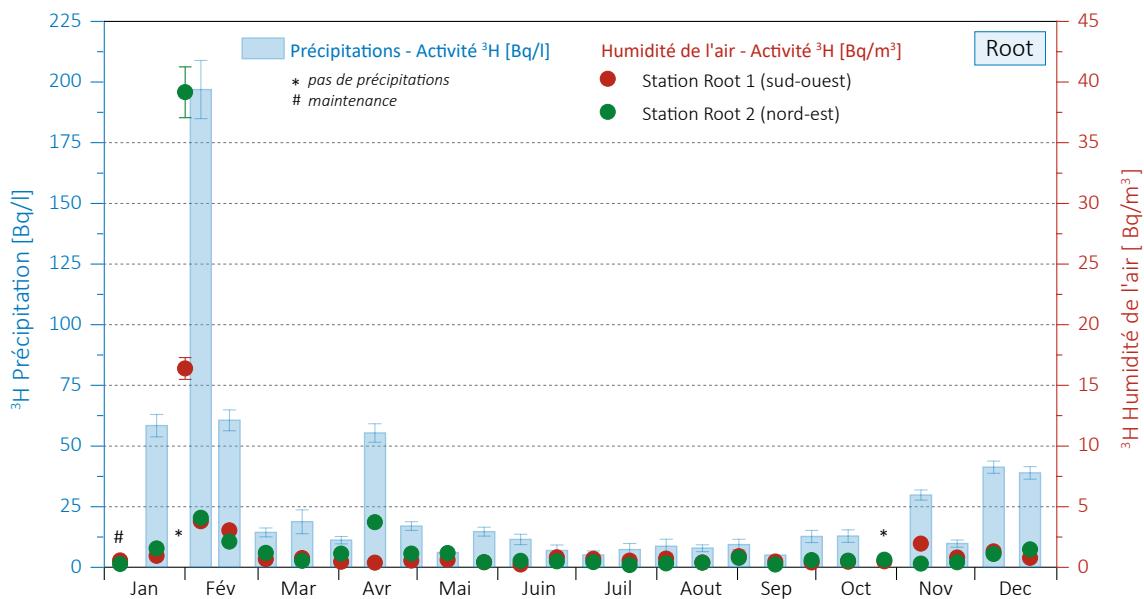


Figure 1 : Concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] et dans l'humidité de l'air [Bq/m³] de ROOT/LU en 2024

et médianes des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations collectées à la station Firma (voisinage immédiat de l'entreprise) ainsi qu'à König au cours des 15 dernières années, montre que les concentrations de tritium mesurées en 2023 et 2024 sont parmi les plus basses enregistrées depuis 2008. Elles reflètent la baisse des émissions constatée

ces deux dernières années par rapport aux années précédentes (voir chapitre 9.1). La concentration maximale de tritium mesurée en 2024 dans les précipitations à la station Firma ne représente ainsi que 4% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ORaP pour le tritium dans les eaux accessibles au public, alors qu'elle a atteint 10% de cette valeur en 2022.

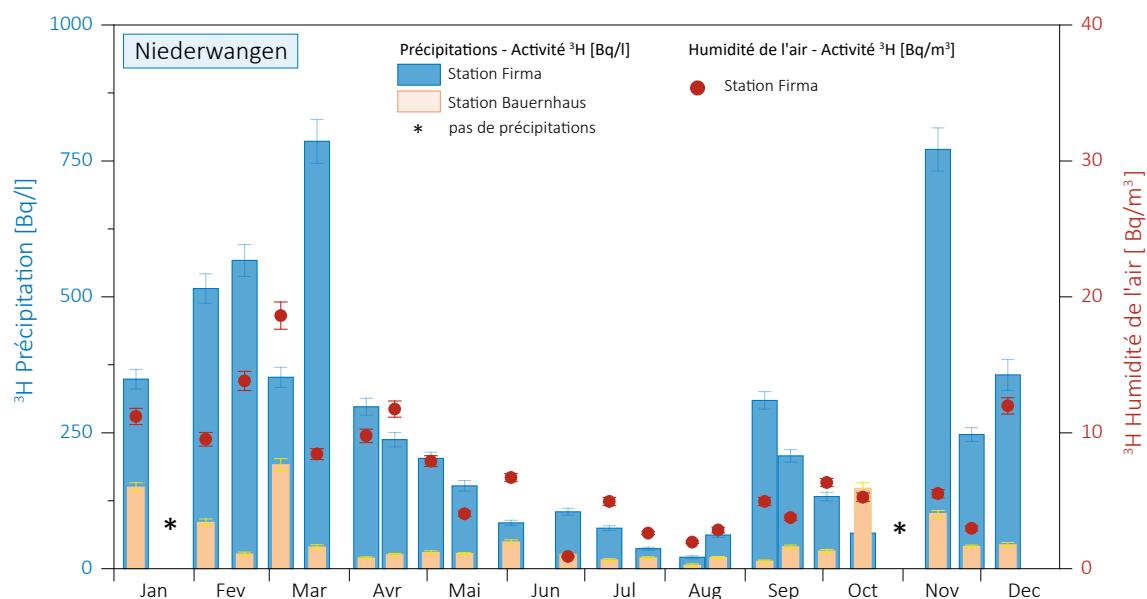


Figure 2 : Concentrations de tritium [Bq/l] enregistrées en 2024 dans les précipitations des stations de collecte «Bauernhaus» (située à 100 m au sud de l'entreprise) et «Firma» (située à 260 m au nord est de l'entreprise) et concentration de tritium dans l'humidité de l'air [Bq/m³] à la station de «Firma».

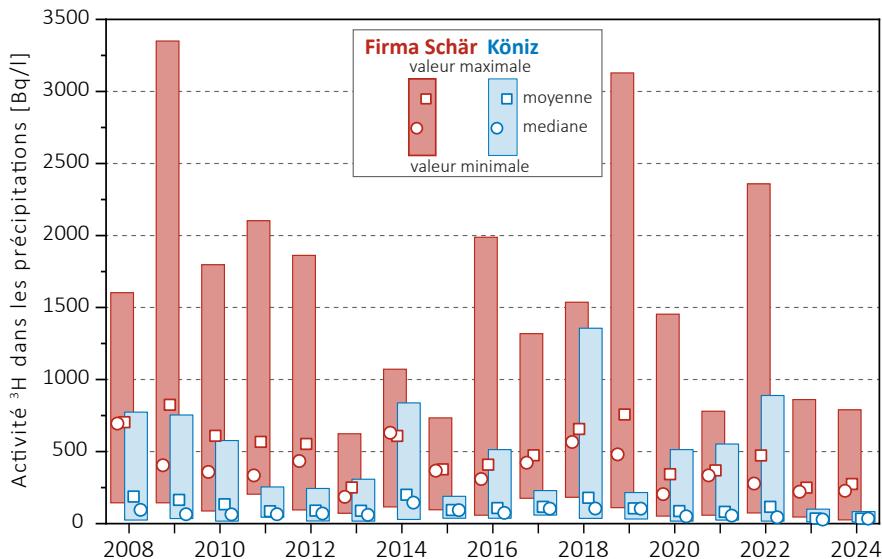


Figure 3 :

Valeurs moyennes et médianes annuelles des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations aux stations de Firma Schär et Köniz à Niederwangen entre 2008 et 2024.

Les concentrations de tritium mesurées dans l'humidité de l'air à la station Firma se sont, quant à elles, échelonnées entre 0.9 et 19 Bq/m³ avec une valeur moyenne de 7.0 Bq/m³. Comme le montre la figure 2, les concentrations de ³H mesurées dans l'humidité de l'air et dans les précipitations ne sont pas toujours corrélées. En effet, les concentrations de tritium dans l'environnement (précipitation et humidité de l'air) ne dépendent pas seulement des quantités de tritium rejetées dans l'atmosphère, mais également des conditions météorologiques responsables de leur dispersion (vitesse et direction des vents, quantité de précipitations, etc). Des variations locales importantes peuvent ainsi être observées.

Dans les distillats des 12 échantillons de fruits et légumes (pommes, poires, prunes, pruneaux et tomates) et des 3 échantillons de lait prélevés fin août par le canton de Berne à proximité de l'entreprise, les valeurs mesurées de tritium variaient respectivement entre 5 et 79 Bq/l (médiane de 10 Bq/l) et entre 10 et 20 Bq/l. Ces concentrations se situent également dans la fourchette basse de celles enregistrées au cours des 10 dernières années et confirment les résultats des mesures dans les précipitations et l'humidité de l'air.

La figure 4 montre le suivi des concentrations de ³H enregistrées dans les précipitations collectées à 65 m à l'est de la cheminée de la firme RC Tritec à Teufen et mesurées par l'OFSP au cours des 20 dernières années. Les valeurs 2024 étaient à nouveau très basses, avec, comme le montre la figure 5, quelques augmentations comme à la fin août et en novembre. Un piègeur passif à filtre moléculaire pour la mesure du ³H dans l'humidité de l'air a également été installé au voisinage de l'entreprise fin 2020. Les résultats des mesures 2024 sont représentées sur la figure 5. Avec

une valeur moyenne de 1.3 Bq/m³, identique à celle de 2023, les concentrations du tritium dans l'humidité de l'air sont le plus souvent restées faibles, avec quelques valeurs plus élevées pendant l'été.

Stations d'épuration (STEP) et eaux de lavage des fumées des usines d'incinération

Jusqu'en 2023, plusieurs laboratoires analysaient les eaux des stations d'épuration des agglomérations de Zürich, Bâle, Bienne, Berne, Lausanne et La Chaux-de-Fonds ainsi que les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération de Bâle-Ville, de Berne et Zürich afin de déceler d'éventuelles éliminations de ³H ou de ¹³¹I dans l'environnement.

Toutefois comme mentionné dans l'introduction, ces programmes devront être redimensionnés et en grande partie supprimés d'ici 2026 pour satisfaire aux mesures d'économie décidées par le Parlement et le Conseil fédéral.

En ce qui concerne la surveillance des eaux des STEP, la réduction du programme a concerné, en 2024, l'agglomération de Zürich. Celles de Lausanne, Berne et Bienne suivront d'ici 2026. En cas de besoin, ou pour évaluer des changements de pratique de certains centres de médecine nucléaire, des programmes de surveillance ponctuels pourront être réalisés à l'aide d'une sonde de mesure aquatique. Celle-ci présente l'avantage de mesurer en continu et donc de pouvoir détecter aussi des radionu-

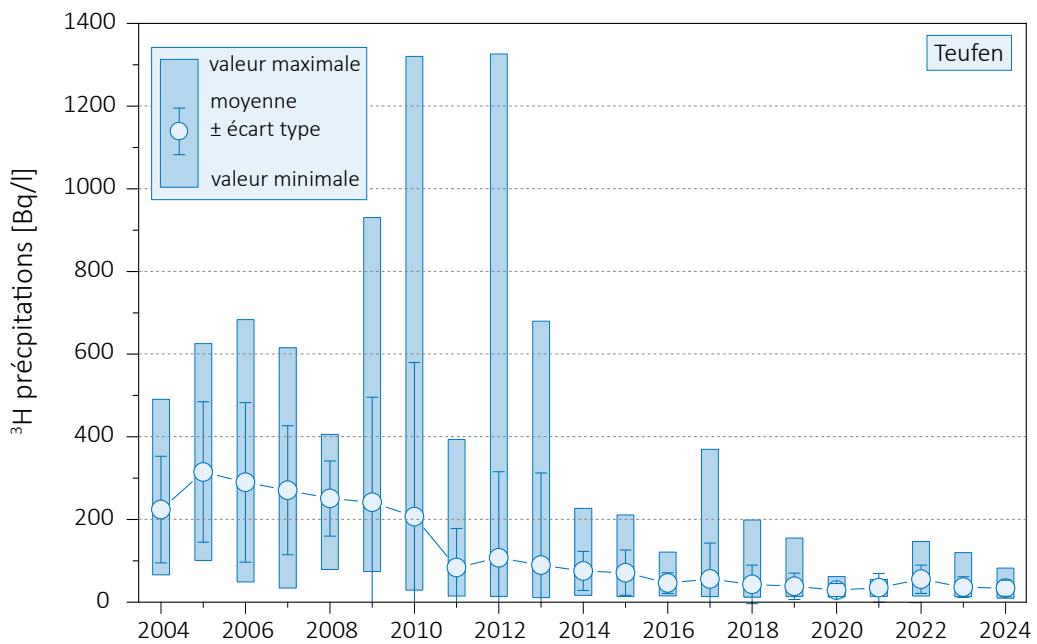


Figure 4 :

Suivi des concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] de Teufen/AR de 2004 à 2024.

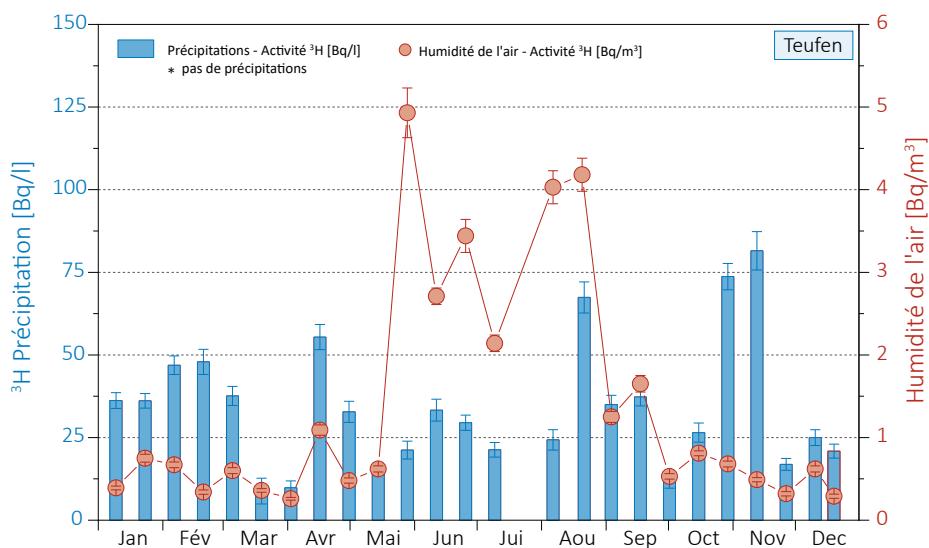


Figure 5 :

Concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] et dans l'humidité de l'air [Bq/m³] à Teufen/Ar 2024.

cléides de courte demi-vie. Cependant, la limite de détection de cette méthode est plus élevée que celles des analyses effectuées en laboratoire réalisées jusqu'à présent.

Les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) sont, quant à elles, tenues de contrôler, depuis l'entrée en vigueur de l'ORaP révisée en 2018, l'éventuelle présence d'émetteurs gamma dans les déchets avant leur incinération, afin de réduire les risques pour le personnel et l'environnement. Des mesures gamma des échantillons d'eaux de lavage

des fumées, n'étaient dans un tel contexte, plus jugées nécessaires et ont déjà été en partie supprimées.

Si l'installation de portiques de détection à l'entrée de ces usines supprime le risque pour les émetteurs gamma, elle n'empêche pas l'incinération accidentelle de tritium, un émetteur bêta pur indétectable par ces portiques. Ce type d'incident s'est produit de nombreuses fois au cours des dernières années, en particulier à Bâle, mais leur origine n'a jamais pu être élucidée. Compte tenu des moyens d'action

Tableau 2 :

Tritium (3H) et ${}^{131}I$ dans les eaux de rejet des usines d'incinération et des stations d'épuration (STEP) en 2024.

Ville	Laboratoire	Isotope	n.	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)	Moyenne (Bq/l)
STEP Bâle	KL-BS	${}^{131}I$	52	< 0.03 / 0.4	< 0.1	-
		3H	52	< 4.0 / 177	< 4.0	-
Incinération Bâle		${}^{131}I$	51	0.05 / 1.6	0.4	0.6
		3H	51	14.0 / 7'870	149	409
STEP Berne	Labor Spiez	${}^{131}I$	52	< 0.06 / 0.24	-	-
	URA/OFSP	3H	12	< 5.0 / 11.0	< 5.0	-
STEP Biel/Bienne	URA/OFSP	3H	52	< 5.0 / 8.0	< 5.0	-
STEP La Chaux-de-Fonds	URA/OFSP	3H	50	< 5.0 / 63	7.4	-
STEP Lausanne	IRA	${}^{131}I$	49	< 0.3 / < 1.6	< 0.4	-
		3H	12	< 2.0 / 2.8	< 2.0	-

limités en cas d'incinération accidentelle, et du coût lié au maintien d'une surveillance uniquement pour l'analyse du tritium (prélèvement et envoi des échantillons), l'OFSP a dû se résoudre à supprimer également cette surveillance pour l'UOIM de Zürich dès 2024. Le laboratoire cantonal de Bâle continue, quant à lui, d'assurer cette surveillance pour l'UIOM de Bâle.

Les résultats des mesures effectuées dans les eaux des STEP et des eaux de lavage des fumées en 2024 sont résumés dans le tableau 2.

Eaux des stations d'épuration

Comme les années précédentes, les concentrations de tritium mesurées par le laboratoire cantonal de Bâle dans les eaux de la STEP de Bâle sont le plus souvent restées proches ou inférieures à la limite de détection de 4 Bq/l, avec sporadiquement quelques valeurs plus élevées (maximum de 177 ± 12 Bq/l début août). Ces augmentations sont dues à des rejets, dans la STEP, d'eaux de lavage des fumées provenant de l'usine de traitements des déchets spéciaux (RSMVA) Veolia, après l'incinération de déchets contenant du tritium. Cette usine dispose en effet d'un accord de l'autorité délivrant les autorisations (section FANM de l'OFSP) pour incinérer jusqu'à 100 GBq de tritium par semaine, conformément à l'Art.116 de l'ORaP.

Les concentrations de tritium observées à la STEP de la région de La Chaux-de-Fonds sont restées faibles en 2024, le plus souvent proches de la limite de détection de 5 Bq/l, avec sporadiquement des valeurs plus élevées (maximum de 60 Bq/l en mars). Depuis l'arrêt complet, en 2008, des activités de posage de peinture luminescente au tritium dans les ateliers de La Chaux-de-Fonds, les concentrations de tritium dans les eaux de la STEP de la ville se sont stabilisées à des niveaux très bas.

A la STEP de Biel/Bienne, les concentrations hebdomadaires de tritium dans les échantillons d'eau sont le plus souvent restées inférieures ou voisines de la limite de détection de 5 Bq/l en 2024. Il en va de même pour les échantillons mensuels d'eaux de la STEP de Berne.

Eaux de lavage des fumées des usines d'incinération

Contrairement aux années précédentes, le laboratoire cantonal de Bâle Ville n'a pas mis en évidence de niveau anormalement élevé de tritium dans les échantillons hebdomadaire d'eaux de lavage des fumées de l'UIOM de Bâle en 2024. Une valeur dépassant les 5'000 Bq/l a tout de même été mesurée fin octobre 2024, mais elle pourrait s'expliquer par une incinération de montres contenant du tritium. Si la concentration annuelle moyenne de tritium dans les eaux de lavage des fumées enregistrées en 2024 était bien inférieure à celle de 2023 (651 Bq/l en 2023), on notera que la concentration médiane de tritium mesurée en 2024 était supérieure à celle enregistrée en 2023 (97 Bq/l).

Conclusions

Comme par le passé, les résultats des mesures effectuées en 2024 aux environs des entreprises utilisatrices de tritium ont montré un marquage significatif de l'environnement par ce radionucléide dans leur voisinage immédiat, en particulier à Niederwangen; les concentrations de tritium enregistrées dans l'environnement à proximité de cette entreprise en 2024, comparables à celles de 2023, sont toutefois en diminution par rapport aux années précédentes et les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont restées très faibles. Le rejet non contrôlé de 2 TBq de tritium dans l'environnement par l'entreprise Smolsys en février 2024, dépassant la valeur limite hebdomadaire de rejet autorisée par l'OFSP, n'a par ailleurs pas entraîné de doses significatives pour la population vivant à proximité de cette entreprise.

Les mesures du tritium réalisées dans les eaux des stations d'épuration ainsi que dans les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération n'ont pas révélé de valeurs anormales en 2024. Ce programme de surveillance, déjà redimensionné en 2024, sera progressivement mis à l'arrêt d'ici 2026 pour satisfaire aux mesures d'économie décidées par le Parlement et le Conseil fédéral.

Référence

- [1] <https://www.bag.admin.ch/de/radiologische-ereignisse-und-notfallvorsorge>



9.4

Messung von Radionukliden aus der Medizin mit NaI-Sonden in Abwasserreinigungsanlagen

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

Zusammenfassung

Die in der Medizin eingesetzten Radionuklide ^{177}Lu und ^{131}I (Beta/Gammaemitter für Radiotherapie), ^{111}In , ^{123}I und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (Gammaemitter für SPECT) sowie ^{18}F und ^{68}Ga (Positron-Emitter für PET) können kontinuierlich mit NaI-Detektoren im Zulauf von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) gemessen werden. Dieser Bericht bespricht die Messungen im Zulauf zur ARA Giubiasco (Bellinzona) sowie Ergebnisse aus der ARA Lausanne, wo eine Sonde nach der biologischen Reinigung installiert ist. Die häufig eingesetzten Nuklide ^{131}I und ^{177}Lu mit einer Halbwertszeit von rund einer Woche werden in den Spitälern in Abklingtanks zurückgehalten, bis der Grossteil zerfallen ist. Die sehr kurzlebigen Nuklide $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und $^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ erfordern aufgrund des hohen Immissionsgrenzwertes keine Rückhaltung im Spital und sind dementsprechend regelmässig nachweisbar. Die Nuklide ^{111}In und ^{123}I mit einer «mittleren» Halbwertszeit werden ambulant für Diagnostik verwendet und können vom Wohnort der Patienten via Kanalisation in die ARA gelangen. Die Immissionsgrenzwerte aller Radionuklide sind im Wochenmittel bereits im Zulauf der ARAs eingehalten.

Kontinuierliche Messungen mit NaI-Sonden

Viele der in der Medizin eingesetzten Radionuklide können gammaspektrometrisch gemessen werden. In erster Linie trifft dies natürlich für die in bildgebenden Untersuchungen (SPECT und PET) eingesetzten Isotope zu. Aber auch die in der Therapie angewandten Betastrahler ^{131}I und ^{177}Lu haben gut messbare Gammalinién.

NaI-Gammaspektrometrie-Sonden sind gut geeignet um Radionuklide aus der Medizin in Wasser mit empfindlicher Nachweisgrenze kontinuierlich zu überwachen.

Die hier eingesetzten Sonden vom Typ SARA Water bzw. TUNA (Scienta Envinet GmbH) detektieren mit einem 3-Zoll NaI(Tl)-Kristall Gammastrahlung im Energiebereich

zwischen ca. 40 keV und 2'700 keV. Die Sonden nehmen 10-Minuten Spektren auf, werten diese aus und übermitteln die Ergebnisse an eine Datenzentrale. Die Sonde aggregieren zudem die 10-Minuten Spektren zu Stundenspektren und übermitteln auch diese. Die Nachführung der Energiekalibrierung beruht auf dem ^{40}K -Peak von in der Sonde eingebautem KCl.

Für diese Arbeit wurden die 10-Minuten-Spektren und für die Sonde in Lausanne auch Stundenspektren ausgewertet. Der Beitrag von ^{214}Pb (351.9 keV) zum ^{131}I -Peak (364.5 keV) wurde anhand des ^{214}Bi -Peaks bei 609 keV geschätzt und abgezogen. Die Unsicherheit der Messwerte ist mit dieser nachträglichen Auswertung für alle Isotopen in der Grössenordnung von 20%. Die Nachweisgrenzen für die Stundenswerte liegen bei rund 0.5 Bq/l für ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I und ^{214}Bi , bei 1 - 5 Bq/l für ^{111}In , ^{131}I und ^{177}Lu .

Messungen in der ARA Giubiasco (Bellinzona)

Seit Mai 2019 ist eine Nal-Sonde im Zulauf der ARA von Giubiasco (Bellinzona) im Einsatz. Die ARA Giubiasco (Processo di depurazione dell'acqua a Bellinzona | Azienda Multiservizi Bellinzona (AMB)) hat 80'000 angeschlossene Nutzern (Einwohner, Büros, Industrien, Regionalspital Bellinzona). Die Radioaktivitätssonde ist in einem Becken mit genügend Wassertiefe (>1 m Wasser auf allen Seiten) zwischen Rechen/Sandfang und Vorklarbecken installiert, misst also das Wasser vor dem Reinigungsprozess.

Das typische Auftreten der Radionuklide in der ARA ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Beobachtungen für das Jahr 2024 decken sich mit denen der früheren Jahre. Eine Überschreitung der Immissionsgrenzwerte wurde selbst bei diesem Messpunkt beim Einlass in die ARA nicht festgestellt.

Das in der Radiotherapie eingesetzte ^{131}I hat einen tiefen Immissionsgrenzwert für Gewässer (7 Bq/l) und wird in deshalb in den Spitäler in Abklingtanks gelagert. Nach der Entlassung von Patienten kann aber am Wohnort immer noch ein kleiner Teil der Radionuklide in das Abwasser gelangen. In der ARA Bellinzona ist ^{131}I regelmäßig zu messen (Abbildung 1). Die Nachweisgrenze für ^{131}I hängt von der Konzentration der Radionuklid-Tochter ^{214}Pb ab und liegt bei den hier ausgewerteten 10-Minuten Messungen typischerweise im Bereich von 1 bis 5 Bq/l. Die höchste gemessene 10-Minuten-Konzentration für 2024 betrug 55 Bq/l, das höchste Wochenmittel 5.3 Bq/l.

Gemessen an der eingesetzten Aktivität ist in der Schweiz ^{177}Lu das meistverwendete Isotop für die Radiotherapie. ^{177}Lu wird im Spital vor der Abgabe in die Kanalisation wie ^{131}I in Abklingtanks gelagert, ist aber weniger radiotoxisch. In der ARA Giubiasco ist es regelmässig nachweisbar (Abbildung 1). Erhöhte Konzentrationen halten typischerweise für ein bis zwei Wochen an. Die höchste gemessene 10-Minuten-Konzentration betrug 2024 rund 216 Bq/l. Das höchste Wochenmittel lag bei 11.2 Bq/l und damit deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 308 Bq/l.

Indium-111 war Ende August für knapp eine Woche im Zulauf der ARA nachweisbar. Die höchste gemessene 10-Minuten-Konzentration betrug 28 Bq/l und das Wochenmittel 3 Bq/l, beides Werte weit unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 705 Bq/l (siehe Tabelle 1). Die Untersuchungen mit ^{111}In finden ambulant statt und das Radionuklid gelangt vom Wohnort der Patienten via die Kanalisation in die ARA.

Nur an zwei Tagen war ^{123}I nachweisbar. Die höchste 10-Minuten-Konzentration lag mit 14 Bq/l deutlich unter dem IGGw (632 Bq/l).

Die ^{99}Mo -Tochter ^{99m}Tc ist ein häufig für SPECT-Aufnahmen verwendetes Radionuklid. Aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von 6 Stunden ist eine Rückhaltung im Spital nicht erforderlich. Deshalb kann ^{99m}Tc in der ARA werktags fast immer, besonders in der ersten Wochenhälfte, nachgewiesen werden. Selbst die höchsten 10-Minuten-Spitzen sind deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes.

Tabelle 1 :
Radionuklide in den Abwasserreinigungsanlagen (ARA).

Nuklid	Ursprung	HWZ ¹	IG _{GW} ²	Auftreten in ARA	Max. Konz. BEL «VOR» ³	Max. Konz. LAU «NACH» ⁴
^{99m}Tc	SPECT	6.0 h	9'230	Täglich werktags	10-Min.-Max. 1'100 Bq/l	10 Min.-Max. 36 Bq/l
^{111}In	SPECT	2.8 d	705	Vereinzelt 29.8.2024	Wochenmittelmax. 3 Bq/l 10-Min.-Max. 28 Bq/l	-
^{123}I	SPECT	13.2 h	632	Vereinzelt (13.6./30.10.)	10-Min.-Max. 14 Bq/l	-
^{18}F	PET	1.8 h	4'000	Täglich werktags	10-Min.-Max. 35 Bq/l	10-Min.-Max. 5 Bq/l
^{177}Lu	Therapie	6.6 d	308	Regelmässig, monatliche «Zyklen»	10-Min.-Max. 220 Bq/l Wochenmittelmax. 11 Bq/l	10-Min.-Max. 42 Bq/l
^{131}I	Therapie	8.0 d	7	Mehrmals jährlich, über mehrere Tage	Wochenmittelmax. 5 Bq/l 10-Min.-Max. 55 Bq/l	10-Min.-Max. 5 Bq/l
^{7}Be	natürlich	53 d		Im Sommer	-	-
^{214}Bi	natürlich	0.3 h		Bei Niederschlag	10-Min.-Max. 293 Bq/l	10-Min.-Max. 26 Bq/l

¹ Halbwertzeit, h: Stunden; d: Tage.

² Immissionsgrenzwerte für Gewässer (StSV Anhang 7) in Bq/l.

³ Konzentrationen vor der Reinigung beim Zulauf in die ARA gemessen, ARA Giubiasco.

⁴ Konzentrationen nach mechanischer und biologischer Reinigung gemessen, ARA Lausanne.

In der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) kommen besonders kurzlebige Radionuklide zum Einsatz: ^{18}F , ^{13}N und ^{68}Ga . Die Halbwertszeit von ^{13}N ist mit 10 Minuten so kurz, dass nicht zu erwarten ist, dass es in einer ARA noch nachgewiesen werden kann. Hingegen sind ^{18}F (1.8 Stunden) und ^{68}Ga (1.13 Stunden) ausreichend stabil, um bis in die ARA zu gelangen und sich dort mit dem Annihilationspeak bei 511 keV seiner Beta-plus-Zerfälle bemerkbar zu machen. Eine Unterscheidung dieser beiden Isotope wäre theoretisch durch den Gammapeak von ^{68}Ga bei 1'067 keV möglich. Der Peak ist aber schwach und wurde nie erkannt. Die PET-Nuklide kommen in den Spitälern regelmäßig zum Einsatz und können in der ARA unter der Woche fast täglich nachgewiesen werden. Der Immissionsgrenzwert ist bereits im Zulauf zur ARA problemlos eingehalten

Lutetium-177 (^{177}Lu) in der ARA Lausanne

Das CHUV in Lausanne hat 2024 an einer Pilotstudie zur früheren Entlassung von Patienten nach einer ^{177}Lu -Therapie teilgenommen. Deshalb lag bei den Messung in der ARA von Lausanne das Augenmerk auf der Messung von dieses Radionuklids. Eine TUNA-Sonde misst seit 21. Mai 2024 in der ARA von Lausanne (STEP – Ville de Lausanne), an der 240'000 Einwohner angeschlossen sind. Diese Sonde ist nach der mechanischen und biologischen Reinigungsstufe, aber vor der chemischen Reinigung eingesetzt. Das analysierte Wasser ist also schon stark vorgereinigt. Das typische Auftreten der Radionuklide aus

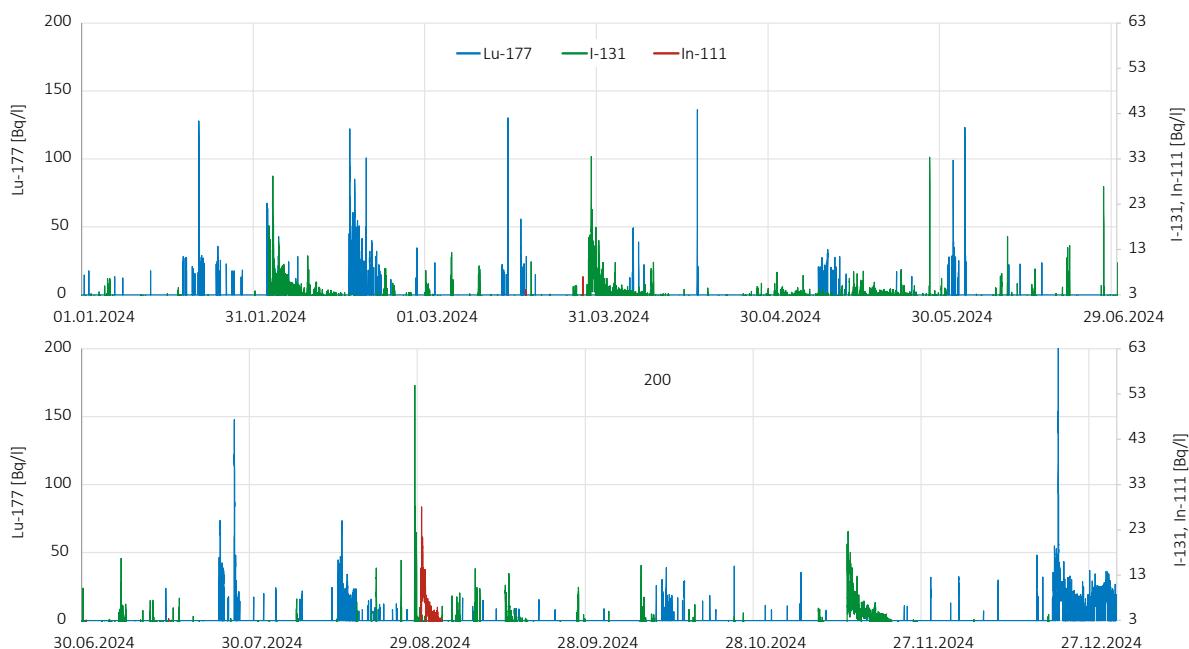


Abbildung 1 :
Zeitverlauf der 10-Minuten-Konzentrationen von ^{177}Lu , ^{131}I und ^{111}In im Zulauf der ARA Giubiasco im Jahr 2024.

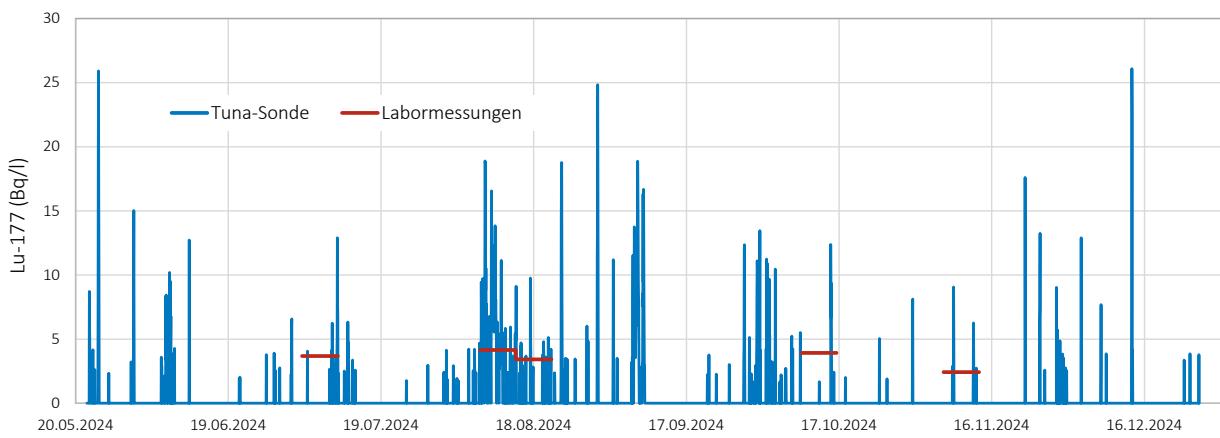


Abbildung 2 :
Zeitverlauf der ^{177}Lu 10-Minuten-Konzentrationen in der ARA Lausanne, Mai bis Dezember 2024.

der Medizin an den unterschiedlichen Stellen in den beiden ARAs ist in Tabelle 1 verglichen. Den Zeitverlauf der gemessenen ^{177}Lu -Konzentrationen der ARA Lausanne zeigt Abbildung 2.

Wie in Bellinzona ist ^{177}Lu in Lausanne regelmässig nachweisbar und es gibt in beiden ARAs bestimmte Perioden von ein bis zwei Wochen mit gehäuftem Auftreten. Das Konzentrationen im Abwasser in der ARA Lausanne, gemessen nach zwei Reinigungsstufen, sind deutlich tiefer als in Bellinzona, wo die Sonde im Zulauf der ARA installiert ist.

Ein Vergleich der Messung mit der Sonde in der ARA Lausanne und Labormessungen zeigte eine befriedigende Übereinstimmung (siehe Abbildung 2). Hierbei ist zu beachten, dass der Probenahmeort für die Labormessung nicht ganz identisch ist mit dem Standort der Sonde. Zudem sind die Zerfallskorrektur für die im Labor gemessene Wochenprobe nur approximativ korrekt, da sie von der Annahme einer konstanten Konzentration ausgeht.

Ortsdosisleistung im Wasser

Die Nal-Sonden errechnen aus dem gemessenen Spektrum auch Ortsdosisleistung (ODL) in nSv/h. Hier tragen vor allem $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (durch seine relativ hohen Konzentrationen), PET-Nuklide (durch die höhere Gammaenergie) und am deutlichsten das natürliche ^{214}Bi (durch hohe Konzentrationen und hohe Gammaenergien) bei. Die Herkunft des natürlichen ^{214}Bi ist die folgende: Das natürliche, radioaktive Edelgas Radon gelangt aus dem Boden in die Atmosphäre. Dort lagern sich seine Zerfallsprodukte (^{214}Bi und auch ^{214}Pb) an die Aerosolpartikel an. Diese werden dann bei einem Niederschlagsereignis ausgewaschen und gelangen mit dem Regenwasser in die ARA.

9.5 Überwachung von Deponien

A.-C. Senn,
Sektion Forschungsanlagen und Nuklearmedizin FANM / BAG Bern

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

Zusammenfassung

Radioaktive Abfälle mit geringer Aktivität können gemäss Artikel 114 der Strahlenschutzverordnung (StSV) unter bestimmten Voraussetzungen auf einer Deponie abgelagert werden. Dies gilt insbesondere für Abfälle, welche Radium-226 enthalten. Das BAG überwacht die Radioaktivität in diesen Deponien im Rahmen des Probenahme- und Messprogramms (Art.193 StSV). Dies erfolgt durch die Analyse von Sicher- und/oder Grundwasser. Die Messungen stellen sicher, dass die Immissionsgrenzwerte zu keiner Zeit eingehalten werden und keinerzeit eine Gefährdung für Personen und die Umwelt besteht. Die Resultate dieser langjährigen Überwachung zeigen, dass die Immissionsgrenzwerte stets eingehalten werden.

Einführung

Artikel 114 der Strahlenschutzverordnung (StSV) erlaubt unter bestimmten Bedingungen die fallweise Deponierung von radioaktiven Abfällen mit geringer Aktivität mit Zustimmung der Bewilligungsbehörde. Diese Möglichkeit gilt insbesondere für Abfälle, die ^{226}Ra enthalten und vor dem Inkrafttreten der StSV angefallen sind.

Ebenfalls gemäss Artikel 114 muss das BAG eine Überwachung der Deponien durchführen, in denen solche Abfälle endgültig abgelagert wurden, um die Einhaltung Immissionsgrenzwerte sicherzustellen. Diese Überwachung erfolgt durch Messungen von ^{226}Ra im Sickerwasser und / oder im Grundwasser. Liegen die Radiumkonzentrationen im Sickerwasser der Deponie unter dem Immissionsgrenzwert, ist die Einhaltung der in der Gesetzgebung festgelegten Dosisgrenzwerte gewährleistet (siehe Wegleitung des BAG «Deponierung von radioaktiven Abfällen mit geringer Aktivität auf einer Deponie»).

Der Immissionsgrenzwert für ^{226}Ra im Wasser beträgt 580 mBq/l. Die Proben wurden ohne vorherige Filtration gemessen, was einen konservativen Ansatz darstellt. Ein Vergleich von ungefilterten und gefilterten Proben aus dem letzten Jahr zeigte, dass ein grosser Teil des ^{226}Ra in gelöster Form vorliegt und somit potenziell ausgewaschen werden könnte.

Fortsetzung des Aktionsplans Radium

Im Teilprojekt «Deponien» des Aktionsplans Radium wurden ehemalige Deponien identifiziert, die möglicherweise mit ^{226}Ra kontaminierte Abfälle enthalten. In Zusammenarbeit mit den betroffenen Kantonen (Bern, Genf, Jura, Neuenburg und Solothurn) und dem Bundesamt für Umwelt wurden rund 260 ehemalige Deponien identifiziert; der entsprechende technische Bericht sowie die Liste sind auf der Internetseite des BAG veröffentlicht. Die

Tabelle 1:Konzentrationen von ^{226}Ra im Sickerwasser von Deponien im Jahr 2024.

Typ der Probe	Ort	Datum	Bemerkung	^{226}Ra (mBq/l)
Deponien, Sickerwasser	Tavannes (BE)	04.12.2024	ungefiltert	7.6 ± 1.1
	Elbisgraben (BL)	05.12.2024	ungefiltert	11.7 ± 1.3
	Chlowald (NW)	04.12.2024	ungefiltert	3.78 ± 0.6
	Tännlimoos (ZG)	08.01.2025	ungefiltert	NWG Gamma-Spektrometrie
	Tamburg (ZH)	02.12.2024	ungefiltert	NWG Gamma-Spektrometrie

betroffenen Deponien sind auch in den kantonalen Katastern belasteter Standorte aufgeführt. Arbeiten an solchen Standorten werden von spezialisierten Unternehmen durchgeführt oder überwacht, welche Kenntnisse im Umgang mit Schadstoffen haben, zum Beispiel chemischen Kontaminationen oder Schwermetallen. Ist ein belasteter Standort auch auf der Liste des BAG aufgeführt, müssen zusätzliche Strahlenschutz-Massnahmen getroffen werden, um die Umwelt sowie die Gesundheit des Personals und der Bevölkerung zu schützen. ^{226}Ra war bisher jedoch meist nicht Teil von Vor- oder Detailanalysen und Entsorgungskonzepten. Um die betroffenen Betriebe und Behörden bei der Umsetzung der neuen Regelungen zu unterstützen, hat das BAG im Herbst 2024 eine Wegleitung publiziert, welche insbesondere die Strahlenschutz-Massnahmen beschreibt und die Verantwortlichkeiten der Beteiligten festlegt. Sie kann von der Webseite des BAG heruntergeladen werden.

Die Wegleitung trägt dazu bei, dass auch nach Abschluss des Aktionsplans Radium die noch vorhandenen Radiumaltlasten identifiziert und konform entsorgt werden können. Damit werden die Arbeitnehmenden, die Bevölkerung und die Umwelt geschützt.

Ergebnisse 2024

Aufgrund der niedrigen erforderlichen Nachweissgrenze (in der Größenordnung von 1 mBq/l) und der Schwierigkeiten, die mit der Beschaffenheit der Sickerwasserproben aus Deponien verbunden sind, eignen sich weder die Gammaspektrometrie noch die Methode «MnO₂-Scheibe – angepasst an Trinkwasser» für die Analyse.

Die Proben wurden daher mit einer vom Institut de Radiophysique (IRA) in Lausanne entwickelten Methode analysiert. Diese Methode umfasst die Zugabe des Tracers ^{229}Th (^{225}Ra), gefolgt von einer chemischen Trennung, einer Elektroabscheidung des

Ra-Anteils auf einer Silberscheibe und der Messung mittels Alphaspektrometrie mit einem PIPS-Detektor. Die mit dieser Methode vom IRA durchgeföhrten Messergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Sie zeigen, dass die Konzentrationen von ^{226}Ra im Sickerwasser der Deponien, in denen in den letzten Jahren Abfälle mit ^{226}Ra abgelagert wurden, sehr niedrig und deutlich unter dem Immissionsgrenzwert liegen (< 6 %).

Schlussfolgerung

Eine Deponierung radioaktiver Abfälle mit geringer Aktivität nach Artikel 114 StSV ermöglicht es, diese Abfälle mit einem vertretbaren (finanziellen) Aufwand zu entsorgen. Die Wegleitung des BAG unterstützt betroffene Betriebe dabei, mögliche radioaktive Kontamination frühzeitig zu erkennen und so die Entsorgung bereits in die Planung aufzunehmen. Die Resultate der langjährigen Überwachung der Deponien, auf welchen mit Radium kontaminierte Abfälle abgelagert werden, bestätigen zudem, dass dieser Entsorgungsweg für die Bevölkerung und die Umwelt keine Gefährdung darstellt. Zusammen gewährleisten die Überwachung der Deponien und die Wegleitung des BAG auch über den Abschluss des Aktionsplans Radium hinaus den Schutz der Arbeitnehmenden, der Bevölkerung und der Umwelt.

9.6

Plan d'action Radium 2015-2023

M. Palacios,
Risques radiologiques, Division Radioprotection / OFSP Berne

Résumé

Le Plan d'action radium 2015 - 2023 a permis d'assainir avec succès plus de 160 anciens ateliers horlogers contaminés au radium. Par ailleurs, quelque 250 anciennes décharges pouvant contenir des déchets au radium ont été identifiées et requièrent des mesures de radioprotection en cas d'ouverture. Tels sont les principaux résultats du rapport final du plan d'action présenté au Conseil fédéral lors de sa séance du 27 novembre 2024.

Suite à l'achèvement des travaux du plan d'action radium fin 2023, l'OFSP a élaboré un rapport final à l'intention du Conseil fédéral, dressant le bilan des actions menées ainsi que les principaux enseignements à en tirer, tout en formulant des perspectives sur les futures nécessités d'action. Ce rapport se base notamment sur l'évaluation externe du plan d'action réalisée par l'entreprise EBP Schweiz AG et sur l'avis d'expert du Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN) en France. L'ensemble de ces documents sont publiés sur le site internet de l'OFSP ([Rapport final du Plan d'action radium 2015 - 2023](#)).



Principaux résultats

La gestion des contaminations dans les anciens ateliers de posage du radium s'articulait autour de trois axes d'action: la recherche historique des biens-fonds potentiellement contaminés, leur diagnostic et si nécessaire leur assainissement.

Les recherches historiques ont permis de dresser un inventaire de 1'100 biens-fonds à contrôler, principalement situés dans les cantons de Berne, Neuchâtel et Soleure. Il est toutefois difficile de garantir l'exhaustivité de l'inventaire en raison de l'ampleur du travail à domicile non déclaré à l'époque. Sur les 1'093 biens-fonds examinés selon un protocole validé par des pairs, 163 biens-fonds ont révélé une nécessité d'assainissement (principalement dans des logements et des jardins privés). Les personnes ayant vécu dans ces biens-fonds ont été exposées à des doses

de radiation non acceptables dépassant le niveau de référence de 1 millisievert par an, toutefois sans que des mesures de protection immédiates aient dû être engagées. On relèvera par ailleurs les fortes concentrations de radium mesurées dans les jardins (600 à 700 supérieures aux concentrations naturelles de radium en moyenne au hotspot). De plus, de nombreux objets contenant du radium, notamment des fournitures horlogères, ont été détectés lors des diagnostics.

Les assainissements, mis en œuvre dans 161 biens-fonds, ont permis de réduire significativement l'exposition des occupants actuels et futurs. Les coûts d'assainissement (s'élevant à 40'000 francs en moyenne) ont été pris en charge par la Confédération, les personnes à l'origine des contaminations n'étant que rarement identifiables. On relèvera par ailleurs que l'élimination des déchets d'assainissement a constitué un défi tout au long du plan d'action,

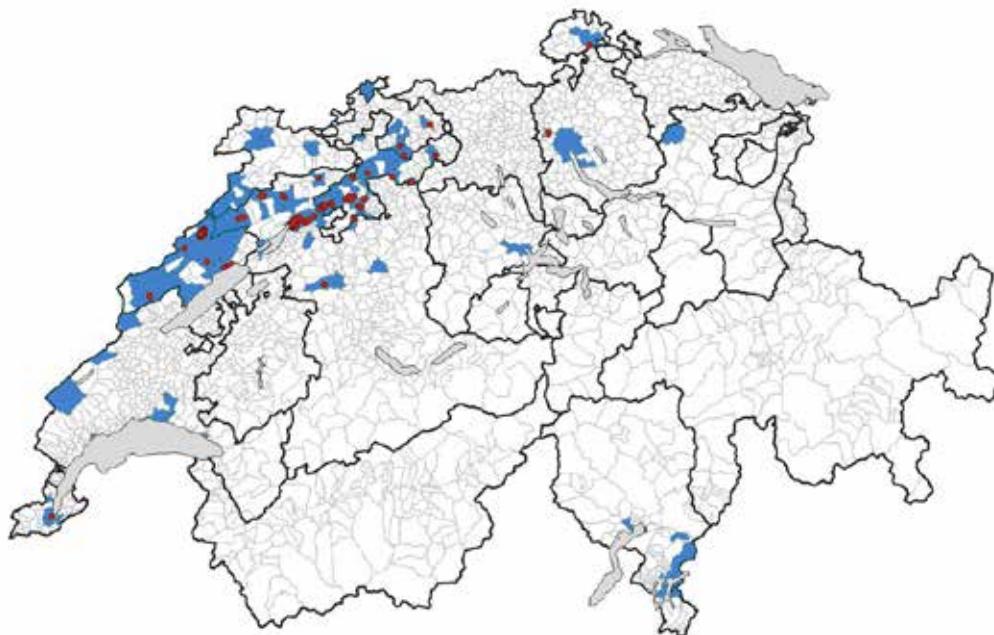


Figure 1 :
Communes concernées par les diagnostics (en bleu) et cas d'assainissement (en rouge)

en particulier en présence de pollutions mixtes. Les communes concernées par des diagnostics et des assainissements sont illustrées sur la figure 1.

Une stratégie a été mise en place afin d'identifier les anciennes décharges pouvant contenir des déchets contaminés au radium et les classer en catégories de risque. Cette approche, appuyée sur la politique de gestion des sites pollués, a été développée en collaboration avec l'Office fédéral de l'environnement, la Suva ainsi que les cantons de Berne, Genève, Jura, Neuchâtel et Soleure. Plus de 250 anciennes décharges ont été identifiées comme nécessitant des mesures de radioprotection en cas d'ouverture, afin de réduire le risque pour les travailleurs et éviter une dispersion de la contamination dans l'environnement. La directive «Travaux sur d'anciennes décharges» publiée par l'OFSP en octobre 2024 fixe désormais les modalités pour la gestion de ces décharges.

Enseignements et atteinte des objectifs de protection

Le plan d'action a atteint ses objectifs en matière de protection de la population, des travailleurs et de l'environnement. Les vastes recherches historiques, ainsi que la grande acceptation des diagnostics et des assainissements ont permis de réduire significativement ces expositions et de garantir l'habitabilité à long terme des biens-fonds. Le recours à des entreprises d'assainissement spécialisées a contribué à minimiser les risques pour les travailleurs et à éviter une dispersion des déchets contaminés dans l'environnement. Les mesures de radioprotection à mettre en œuvre en cas d'ouverture d'une ancienne décharge susceptible de contenir des déchets au radium poursuivent le même objectif. Ces constats ont été confirmés par les évaluations externes du plan d'action, qui ont aussi souligné les progrès accomplis en matière de communication avec le public et les parties prenantes. Au total, le plan d'action a coûté près de 11 millions de francs à la Confédération. Le Contrôle fédéral des finances a mené un audit transversal de la gestion des substances problématiques par la Confédération, notamment le radium. Le rapport d'audit conclu que le plan d'action radium illustre de manière exemplaire la manière dont la Confédération traite une substance problématique de manière globale.

Futures nécessités d'action

Sur la base de ces enseignements, certains points restent encore ouverts au terme du plan d'action. En raison de l'ampleur de l'utilisation historique du radium en Suisse, la découverte de nouvelles adresses à examiner et éventuellement à assainir est probable. Il est donc nécessaire de maintenir les compétences pour de futures interventions. Suite à la révision actuelle de la loi fédérale sur la radioprotection, il est prévu de réglementer la prise en charge des coûts d'assainissement dans l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP). La traçabilité des contaminations rési-

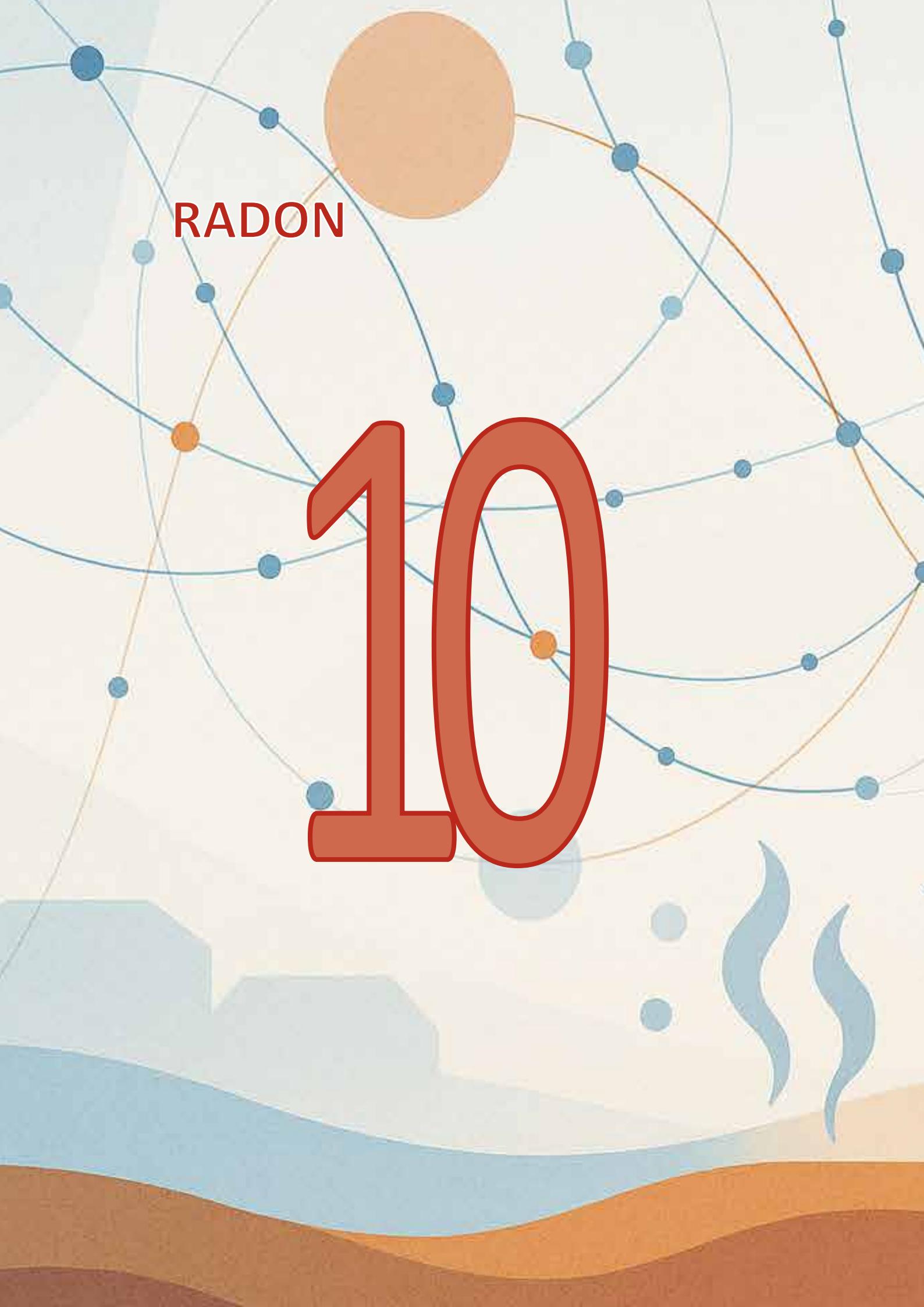
duelles dans les biens-fonds devra aussi être garantie. Les mesures de radioprotection à mettre en œuvre lors de l'ouverture d'une ancienne décharge susceptible de contenir des déchets au radium s'inscrivent sur le long terme ; lors de la prochaine révision de l'ORaP, il conviendra de préciser les responsabilités et les procédures associées. Enfin, l'OFSP se chargera de la mise en place d'une vigilance pour les décharges susceptibles de contenir des déchets au radium d'origine non horlogère et de la définition de mesures appropriées pour les objets contenant du radium encore en circulation sur le marché (voir figure 2).



Figure 2 :
Kit de posage de peinture au radium découvert lors d'un diagnostic chez un horloger

RADON

10





Aktionplan Radon 2021-2030

- Immobilienpark
- Gesundheitsrisiko
- Radonkompetenz
- Arbeitnehmerschutz

Plan d'action Radon 2021-2030

- Parc immobilier
- Risques sanitaire
- Compétences Radon
- Protection des travailleurs

2024

10

Aktionplan Radon

2021 – 2030

F. Barazza, E. Christen, M. Palacios, D. Storch
Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Im Jahr 2024 hat das BAG die Projekte des Aktionsplans Radon 2021-2030 fortgeführt. Aufgrund von Sparmassnahmen des Bundes wurden die finanziellen Möglichkeiten leider stark eingeschränkt. Erfreulicherweise hat das Bundesamt für Energie (BFE) mit Unterstützung des BAG die Neulancierung der Ausschreibung für eine Geschäftsstelle «Energie und Gesundheit», begonnen. Die Entwicklung des neuen Radonportals als Nachfolge der Radondatenbank schreitet voran.

Stand der Arbeiten im Rahmen der vier Stossrichtungen Immobilienpark, Gesundheitsrisiko, Radonkompetenz und Arbeitnehmerschutz

Immobilienpark

Im Jahr 2024 hat das BAG die Entwicklung der Radondatenbank zu einem Radonportal vorbereitet. Die direkte Anbindung des Radonportals an das Gebäude- und Wohnungsregister wird die Interoperabilität erhöhen. Außerdem ist geplant, neue Statistiken zu den durchgeföhrten Radonmessungen auf kommunaler und kantonaler Ebene zu programmieren und das Radium-Inventar in das Radonportal zu integrieren. Das BAG hat anlässlich einer Koordinationsplattform das Projekt den Kantonen vorgestellt und diskutiert, um ihre Wünsche und Bedürfnisse bestmöglich zu berücksichtigen und die Benutzerfreundlichkeit zu verbessern. Anfang 2025 startet die Programmierung der neuen Funktionalitäten.

Radon war ein Thema an der Swissbau 2024 in der Messe Basel. Vom 16. bis 19. Januar 2024 war das BAG mit einem Infopoint vor Ort und hat zwei Veranstaltungen mit verschiedenen Referenten organisiert (Abbildung 1). Am Infostand konnte das BAG viele Gespräche mit Baufachleuten, aber auch mit Privatpersonen führen. Einige Personen konnten dazu motiviert werden, eine Radonmessung durchzuführen. Auch das Radonhandbuch war beliebt und wurde gerne mitgenommen. Beide Veranstaltungen (Vorträge zum Radonschutz in Gebäuden sowie Podiumsgespräch zum Thema «Energie und Gesundheit») wurden jeweils von mehr als 40 Personen besucht.

Als Konsequenz der Teilnahme bei der Swissbau hat die Vereinigung staatlicher und kommunaler Leiter Immobilien (VSLI) das BAG angefragt, am diesjährigen «Swiss Public Real Estate Forum» in Aarau teilzunehmen. Deshalb war das BAG mit einen kleinen Infostand vertreten.

Nachdem die WTO-Ausschreibung für eine Geschäftsstelle «Energie und Gesundheit» letztes Jahr aus formalen Grün-



Figure 1:

An der Swissbau in Basel 2024 führten die BAG-Vertreter Emanuel Christen, Fabio Barazza und Daniel Storch (von links nach rechts) zahlreiche Gespräche über Radon – sowohl mit Fachpersonen aus der Baubranche als auch mit interessierten Privatpersonen.

den nicht abgeschlossen werden konnte, musste die Ausschreibung wiederholt werden. Aufgrund von personellen Wechseln verzögerte sich das Projekt. Erfreulicherweise kann nun das BFE die Ausschreibung erneut vorbereiten. Es ist geplant, sie im April 2025 zu starten, so dass die Geschäftsstelle im Idealfall ihre Arbeit im Herbst 2025 aufnehmen kann. Die Geschäftsstelle soll die beiden Bundesämter rund um die Schnittstellen Legionellen, Radon und Innenraumluftqualität beraten und informieren und auch Texte sowie Fachartikel erarbeiten. Zum anderen soll sie den künftigen Austausch zwischen den Akteuren gewährleisten (bspw. durch die Schaffung von Fachgremien) und neue Erkenntnisse aus der Forschung der Branche vermitteln.

Gesundheitsrisik

Der Kanton Zürich hat das Thema Radon in einer Folge einer Podcast-Serie thematisiert. In der als Umweltkrimi angelegten Serie konnte das BAG die Radonmessungen in Schulen und Kindergärten, den Aktionsplan als auch die Gesetzgebung erläutern. Der ganze Podcast (unter Uf de Spur. De Umweltkrimi vo Züri. | Kanton Zürich verfügbar), der sich auch mit der Lichtverschmutzung, dem Foodwaste und elektromagnetischen Feldern befasst, liefert einen guten Beitrag zur Kommunikation von Gesundheitsrisiken.

Den geplanten Start zur Entwicklung eines Vorher-sagetools musste aufgrund der limitierten finanziellen Mittel um ein weiteres Jahr verschoben werden.

Radonkompetenz

In Zusammenarbeit mit den regionalen Radonfachstellen (Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz; Haute école d'ingénierie et d'architecture, Fribourg; Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Mendrisio) hat das BAG das Aus- und Fortbildungskonzept weiter verbessert und erweitert. Es legt die Grundanforderungen für die Ausbildung von Radonfachpersonen und deren Fortbildung fest. Das BAG hat zudem seine digitale Lernplattform in einigen Modulen angepasst und neue Prüfungsfragen definiert.

Mithilfe eines eigens dafür erarbeiteten Flyers hat das BAG verschiedene Berufsverbände kontaktiert um abzuklären, ob sie Unterstützung bei der Aufnahme des Themas Radon in die Ausbildung von relevanten Bauberufen benötigen. Die meisten angefragten Verbände behandeln Radon bereits in der Grundbildung. Um dieses Thema zu vertiefen und noch weitere Berufsverbände für das Thema Radon zu motivieren, wird das BAG 2025 eine Tagung mit Berufsverbänden zum Thema Lüftung, Bauen, Energie, Gebäudetechnik durchführen.

Durch die neuen Anforderungen an Messstellen, die vor zwei Jahren eingeführt wurden, muss jede Messstelle vor der Erneuerung der Anerkennung eine halbtägige Fortbildung besuchen. Dieses Jahr hat das BAG zwei solcher Kurse auf Deutsch und einen Kurs auf Französisch durchgeführt. Außerdem hat das BAG vier neue Radonmessstellen anerkannt, so dass es nun 84 anerkannte Radonmessstellen in der Schweiz zur Verfügung stehen.

Arbeitnehmerschutz

Die Strahlenschutzverordnung macht Vorgaben, wie mit radonexponierten Arbeitsplätzen umzugehen ist. Die Arbeitsgruppe «Radon am Arbeitsplatz» hat im Berichtsjahr ein Messprotokoll für personenbezogene Radonmessungen erarbeitet, das kurz vor der Verabschiedung steht und im Sommer 2025 eingeführt werden soll. Die Radondatenbank wird ebenfalls ergänzt, sodass die entsprechenden Messresultate aufgenommen werden können. Die personenbezogenen Radonmessungen dienen der Dosisabschätzung für eine fiktive Person am Arbeitsplatz. Erst wenn diese Abschätzung ergibt, dass im entsprechenden Betrieb Radon-Jahresdosen von über 10 mSv möglich sind, wird eine individuelle Dosisüberwachung des Personals notwendig. Erste Stichprobenmessungen der Suva haben jedoch gezeigt, dass es in der Schweiz vermutlich nicht viele Arbeitsplätze gibt, an denen eine solche Dosiometrie notwendig ist.

Weitere Themen

Vergleichsmessung 2024 :

Im Jahr 2024 hat das eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) im Auftrag des BAG eine Vergleichsmessung für aller zugelassenen, passiven Radondosimeter durchgeführt. Die gewählte Radonexposition und -konzentration lag ein wenig höher als vor zwei Jahren. Alle Dosimeter haben die geforderten Kriterien erfüllt und bleiben damit zugelassen.

Radontagung 2025 :

Am 20. Mai 2025 findet die nationale Radontagung statt, die das BAG zusammen mit der Krebsliga organisiert und die Halbzeit des Aktionsplans Radon 2021 - 2030 markieren soll. Das BAG hat bereits ein vorläufiges Programm mit interessanten Referentinnen und Referenten zusammengestellt. Erkenntnisse aus der Tagung und den damit verbunden Diskussionen sollen dann auch in den Zwischenbericht zum Aktionsplan an den Bundesrat fließen.

Ausblick

In der zweiten Hälfte des Jahres 2025 wird der Zwischenbericht zum Aktionsplan Radon 2021 - 2030 an den Bundesrat übergeben. Dieser soll den Stand der Umsetzung der Ziele mit Hilfe von Indikatoren beschreiben.

Annexes

11

Anhänge

- Organismes et laboratoires participants
 - Laboratoires cantonaux
 - Programme de mesures
 - Domaine de surveillance
- Grandeurs utilisées en radioprotection
- Beteiligte Stellen und Laboratorien
 - Kantonale Laboratorien
 - Messprogramm
 - Überwachungsbereiche
 - Im Strahlenschutz verwendete Größen

2024

1. 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 SRR	Radiologische Risiken, Bundesamt für Gesundheit	Bern	D. Storch, M. Palacios
BAG FANM	Forschungsanlagen und Nuklearmedizin, Bundesamt für Gesundheit	Bern	N. Stritt, R. Linder, T. Flury
BAG URA	Umweltradioaktivität, Bundesamt für Gesundheit	Bern	S. Estier, P. Steinmann., J. Beuret, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller
Bfs	Bundesamt für Strahlenschutz	Freiburg im Breisgau /D	H. Sartorius, C. Schlosser, S. Schmid
BAFU	Abteilung Hydrogeologie, Bundesamt für Umwelt	Bern	Robert Lukes
CERN	CERN, Occupational Health & Safety and Environmental Protection (HSE) unit	Genève	F. Malacrida
EAWAG	Wasserressourcen & Trinkwasser	Dübendorf	M. Brennwald, P. Rünzi
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat	Brugg / AG	R. Sardella, A. Leupin, B. Bucher, J. Löhle, M. Schibli, R. Habegger
ETHZ	Institut für Geophysik ETHZ	Zürich	L. Rybach
HUG	Division de médecine nucléaire, Hôpital Cantonal	Genève	S. Namy, K. Jeandet
IFAF	Département F.-A- Forel, Université de Genève	Versoix	J.-L. Loizeau
IRA	Institut de Radiophysique, CHUV	Lausanne	M. Straub, R. Cusnir, P. Froidevaux, C. Pilloud, P.A. Pittet
LS	LABOR SPIEZ, Bundesamt für Bevölkerungsschutz des VBS	Spiez/BE	S. Röllin, J.A. Corcho Alvarado, M. Astner, R. Althaus, R. Gosteli, H. Sahli, C. von Gunten, S. Kradolfer
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg	Karlsruhe / D	R. Bechtler
NAZ	Nationale Alarmzentrale, Bundesamt für Bevölkerungsschutz des VBS	Zürich	A. Hess, F. Stoffel, C. Poretti
PSI	Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit, Paul Scherrer Institut	Villigen / AG	M. Heule, M. Jäggi, P. Kramer, H. Hauswirth, E. G. Yukihara
Suva	Bereich Physik, Abt. Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz	Luzern	M. Hammans, F. Danini
Uni-BE	Physikalisches Institut, Abt. Klima- und Umwelphysik, Universität	Bern	T. Stocker, R. Purtschert, P. Dürring, T. Wagner,
	Departement für Chemie, Universität	Bern	S. Szidat

2. Kantonale Laboratorien - Laboratoires cantonaux

AG	A. Breitenmoser	Amt für Verbraucherschutz Obere Vorstadt 14, 5000 Aarau
BE	O. Deflorin, S. Nussbaumer	Kantonales Laboratorium Muesmattstr. 19, 3000 Bern
BL	P. Brodmann	Kantonales Laboratorium Gräuberstrasse 12, 4410 Liestal
BS	P. Hübner, A. Pregler	Kantonales Laboratorium Kannenfeldstr. 2, Postfach, 4012 Basel
FR	X. Guillaume	Laboratoire Cantonal Impasse de la Colline 4, 1762 Givisiez
GE	P. Edder, E. Cognard	Service de la consommation et des affaires vétérinaires, Quai Ernest-Ansermet 22 Case postale 76, 1211 Genève 4 Plainpalais
GR	M. Beckmann, D. Baumann	Amt für Lebensmittelsicherheit und Tiergesundheit Bereich Lebensmittelsicherheit Ringstrasse 10, 7001 Chur
JU	F. Beuchat, L. Babst	Laboratoire Cantonal Fbg des Capucins 20, CP 272, 2800 Delémont 1
LU	S. Arpagaus, R. Brogioli	Kantonales Amt für Lebensmittelkontrolle und Verbraucherschutz Vonmattstr. 16, Postfach, 6002 Luzern
NE	P.-F. Gobat	Service de la consommation Rue Jehanne-de-Hochberg 5, 2001 Neuchâtel
SG	P. Kölbener	Kantonales Amt für Lebensmittelkontrolle Blarerstr. 2, 9001 St. Gallen
AR / AI / GL / SH	K. Seiler	Amt für Lebensmittelkontrolle der Kantone AR AI GL SH Mühlentalstr. 184, Postfach 786, 8201 Schaffhausen
SO	M. Kohler	Kantonale Lebensmittelkontrolle Greibenhof, Werkhofstr. 5, 4509 Solothurn
TG	C. Spinner	Kantonales Laboratorium Spannerstr. 20, 8510 Frauenfeld
TI	N. Forrer	Laboratorio Cantonale Via Mirasole 22, 6500 Bellinzona
NW / OW / SZ / UR	D. Imhof	Laboratorium der Urkantone Postfach 363, 6440 Brunnen
VD	C. Richard	Service de la consommation et des affaires vétérinaires 155, ch. des Boveresses, 1066 Epalinges
VS	E. Pfammatter	Laboratoire Cantonal Rue Pré-d'Amédée 2, 1950 Sion
ZG	M. Fricker	Amt für Lebensmittelkontrolle Postfach 262, 6312 Steinhhausen
ZH	M. Brunner, S. Reber	Kantonales Labor Postfach, 8032 Zürich
LI	W. Burtscher	Amt für Lebensmittelkontrolle Postplatz 2, Postfach 684, FL-9494 Schaan

3. Das Messprogramm im Überblick

Expositionspfade	Probenahmestellen	Proben und Messung
Ortsdosen (externe Gamma-Strahlung)	Automatische Überwachung der Ortsdosen: landesweit mit NADAM und in der Umgebung der KKW mit MADUK. TLD in der Nahumgebung von KKW und Forschungsanlagen (PSI und CERN)	NADAM: 71 Stellen, Betrieb durch die Nationale Alarmzentrale NAZ (landesweites Dosis-Warnnetz) MADUK: je 12-17 Stellen, Betrieb durch das ENSI TLD (γ -Komponente) und n-Dosis (PSI, CERN)
In-situ Messung	Umgebung der Kernanlagen Ganze Schweiz nach speziellem Programm	Direkte vor-Ort-Messung des γ -Spektrums Bestimmung des Radionuklidgehaltes des Bodens und deren Beiträge zur Ortsdosis
Luft	6 High-Volume-Sampler: ca. 500-1'000 m ³ /h 1 Digitel-Aerosolsammler Jungfraujoch URAnet: Aerosolwarnnetz 15 Stellen on-line-Messung mit Datenfernübertragung ⁸⁵ Kr-Messungen an Luftproben vom Jungfraujoch	Aerosolsammler und High-Volume-Sampler: kontinuierliche Sammlung auf Aerosolfiltern mit γ -Spektrometrie im Labor: Nachweisgrenze für ¹³⁷ Cs: 1 μ Bq/m ³ bzw. 0.1 μ Bq/m ³ RADAIR: α/β -Messung (FHT-59S) Ende 2017 eingestellt, 4 Stellen mit Jod-Monitor (FHT-1700); URAnet: 15 Stationen nuklidspezifischer Monitor (FHT-59N1)
Niederschläge	Regensammlerstationen, ganze Schweiz inkl. Umgebung der KKW, sowie Forschungsanlagen und Industrien	10 Regensammler mit Trichtern von 1 m ² Fläche, wöchentlich γ -Spektrometrie der Rückstände; Nachweisgrenze für ¹³⁷ Cs: 10 mBq/l (monatliche Probe) An 14 Stellen Sammlung der Niederschläge für die Tritium-bestimmung; eine Stelle: Bestimmung des Tritiumgehaltes in der Luftfeuchte.
Aquatisches Milieu	Kontinuierlich gesammelte Wochenproben aus Rhein, Rhone, Ticino und Doubs sowie oberhalb und unterhalb der KKW (Aare) Bei den KKW auch Grundwasser, Sedimente, Fische, Wasserpflanzen, URAnet: 5 automatische Messstationen in Aare und Rhein	γ - und α -Spektrometrie Tritium-Messung URAnet: Gammaspektrometrie mit NaI-Detektoren
Erde	30 Stellen in den Alpen, dem Mittelland, dem Jura, auf der Alpensüdseite inkl. Umgebung der KKW, PSI, CERN	Erdschicht 0-5 cm für ⁹⁰ Sr-Bestimmung und γ -Spektrometrie und z.T. α -Spektrometrie
Bewuchs (Gras, Pflanzen)	Gleiche Stellen wie Erdboden Baumblätter aus Umgebung KKW, Industrieverbrennungsanlage Basel (RSMVA) und Referenzstationen	Gras zweimal jährlich; γ -Spektrometrie und ⁹⁰ Sr Bäumblätter: ¹⁴ C-Bestimmung (jährlich)
Milch	Gleiche Regionen wie Erde und Gras Milchzentralen und Grossverarbeiter	γ -Spektrometrie und ⁹⁰ Sr-Messung Einzel- und Sammelmilchproben , z.T. Tritium-Messungen
Andere Lebensmittel	Getreide-Mischproben aus verschiedenen Regionen und Umgebung KKW Weitere Proben nach Bedarf, z.B. Gemüse Umgebung KKW, Mineralwässer, Wildpilze, Importproben etc.	γ -Spektrometrie ⁹⁰ Sr-Bestimmung
Menschlicher Körper	Mitarbeiter PSI Zahnärzte, Schulzahnkliniken und pathologische Institute aus verschiedenen Gegenden	Ganzkörpermessungen am PSI ⁹⁰ Sr-Bestimmungen an Wirbelknochen und Milzhähnen
Emissionen von KKW, Betrieben etc.	Kernanlagen, Forschungsanlagen, etc. Kläranlagen der Agglomerationen Sickerwässer von Deponien	Abluftfilter, Abgas etc. Abwässer aus Spitäler, Deponien, Kehricht-verbrennungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen γ -, α - und ⁹⁰ Sr-Messung

4. Überwachungsbereiche und Kompetenzzentren

Bereich:	überwacht wird:	Kompetenzzentren ¹⁾ :
Atmosphäre	Aerosole, Niederschläge ¹⁴ C, Edelgase	URA (BAG) inkl. URAnet / RADAIR UniBE
Deposition	Boden, Bewuchs, in-situ ⁹⁰ Sr- und Alpha-Messung Aeroradiometrie	URA (BAG), IRA und LABOR SPIEZ ENSI, NAZ
Aquatisches Milieu	Gewässer, Fische, Sedimente Grund- und Quellwasser, Deponien	EAWAG, Institut Forel, LABOR SPIEZ, URA BAG
Lebensmittel	Milch, Getreide, Gemüse, Wild, Pilze, etc.	Kantonale Laboratorien, URA, IRA, LABOR SPIEZ
Dosis	α - und n-Dosen automatische Dosiswarnnetze	PSI, IRA NAZ (NADAM), ENSI (MADUK)
menschliche Körper	Ganzkörpermessungen ⁹⁰ Sr in Knochen und Zähnen	PSI IRA
Kernanlagen	Emissionen, Umgebung	ENSI, URA (BAG)
Betriebe	Emissionen, Umgebung	Suva, URA (BAG)
Spitäler	Emissionen	FANM (BAG)
Radon	Radon in Häusern und im Boden	SRR (BAG), URA (BAG)

¹⁾ Liste der Abkürzungen s. Anhang 1.

5. Im Strahlenschutz verwendete Größen und ihre Bedeutung

Aktivität A

angegeben in Bq (Becquerel)

Die Aktivität einer Substanz ist die mittlere Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Zeiteinheit. 1 Bq = 1 Zerfall/s.
Die alte Einheit war das Ci (Curie) mit 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Zerfälle/s; 1 nCi = 37 Bq oder 1 Bq = 27 pCi.

Absorbierte Dosis oder Energiedosis D

angegeben in Gy (Gray)

Die durch Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie in einer Masseneinheit deponierte Energie. Der spezielle Name dieser Einheit ist das Gray (Gy); 1 Gy = 1 J/kg.

Organ-Äquivalentdosis H_T

angegeben in Sv (Sievert)

Das Produkt aus der absorbierten Dosis $D_{T,R}$ infolge der Strahlung R im Gewebe T und dem Strahlen-Wichtungsfaktor w_R (vgl. auch Dosis, effektive).

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Der spezielle Name der Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert (Sv); 1 Sv = 1 J/kg.

Effektive Dosis E

angegeben in Sv (Sievert)

Summe der mit den Wichtungsfaktoren w_T gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben.

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ = Im Gewebe T durch Strahlung R absorbierte Dosis

w_R = Wichtungsfaktor der Strahlung

w_T = Wichtungsfaktor für Gewebe (Anteil am Gesamtrisiko für Gewebe/Organ T)

H_T = Äquivalentdosis des Gewebes/Organs T

Die spezielle Einheit der effektiven Dosis ist das Sievert (Sv); 1 Sv = 1 J/kg.

Effektive Folgedosis E_{50}

angegeben in Sv (Sievert)

Effektive Dosis, die als Folge einer Aufnahme eines Nuklids in den Körper im Verlauf von 50 Jahren akkumuliert wird.

Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze ist der kleinste Wert einer Messgröße die mit einem gegebenen Messverfahren und einer gegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit (typischerweise 5%) noch ermittelt werden kann.

Umgebungsäquivalentdosis $H^*(10)$

angegeben in Sv (Sievert)

Die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ am interessierenden Punkt im tatsächlichen Strahlungsfeld ist die Äquivalentdosis im zugehörigen ausgerichteten und aufgeweiteten Strahlungsfeld in 10 mm Tiefe der an diesem Punkt zentrierten ICRU-Kugel auf demjenigen Kugelradius, der dem ausgerichteten Strahlungsfeld entgegengerichtet ist.

6. Grandeurs utilisées en radioprotection et leur signification

Activité A

exprimée en Bq (Becquerel)

L'activité d'une substance est le nombre moyen de désintégrations radioactives par unité de temps.

1 Bq = 1 désintégration/s. L'ancienne unité était le Ci (Curie) avec 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ désintégrations/s; 1 nCi = 37 Bq ou 1 Bq = 27 pCi.

Dose absorbée ou dose énergétique D

exprimée en Gy (Gray)

Energie déposée dans la matière, lors de l'interaction des rayonnements ionisants, par unité de masse de matière. Le nom de cette unité est le gray (Gy); 1 Gy = 1 J/kg.

Dose équivalente H_T

exprimée en Sv (Sievert)

Produit de la dose absorbée D_{T,R} dans le tissu T due à un rayonnement R et du facteur de pondération w_R (voir la définition de la dose effective);

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

l'unité de la dose équivalente est le sievert (Sv); 1 Sv = 1 J/kg.

Dose efficace E

exprimée en Sv (Sievert)

Somme des doses équivalentes reçue par tous les tissus et organes, pondérées à l'aide de facteurs spécifiques w_T

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

D_{T,R} = dose absorbée dans le tissu T sous l'effet du rayonnement R

w_R = facteur de pondération du rayonnement R

w_T = facteur de pondération du tissu (apport de l'organe ou tissu T au risque total)

H_T = dose équivalente reçue par l'organe ou par le tissu T

L'unité de la dose effective est le sievert (Sv); 1 Sv = 1 J/kg.

Dose efficace engagée E₅₀

exprimée en Sv (Sievert)

Dose effective accumulée durant 50 ans suite à l'incorporation d'un nucléide.

Equivalent de dose ambiante H*(10)

exprimé en Sv (Sievert)

En un point dans un champ de rayonnements, dose équivalente produite à 10 mm de profondeur de la sphère CIUR, centrée en ce point, par le champ en question, étendu et aligné, sur le rayon opposé à la direction du champ aligné.

Limite de détection

La limite de détection est la plus petite valeur de la grandeur mesurée qui peut être détectée, avec un certain degré de confiance (typiquement 95 %), avec le procédé de mesure en question.

Impressum

@ Bundesamt für Gesundheit (BAG)
Herausgeber : Bundesamt für Gesundheit
Layout: André Gurtner, URA
Illustrationen Titel- und Innenseiten: erstellt mithilfe von AI
Publikationszeitpunkt : August 2025

Weitere Informationen und Bezugsquelle :
BAG, Direktionsbereich Gesundheitsschutz, Abteilung Strahlenschutz,
Umweltradioaktivität, 3003 Bern

Telefon +41 (0)58 462 96 14, Telefax +41 (0)58 462 83 83
E-Mail :str@bag.admin.ch, www.bag.admin.ch/ura-jb, www.radenviro.ch

Impressum

@ Office fédéral de la santé publique (OFSP)
Editeur : Office fédéral de la santé publique
Layout: André Gurtner, URA
Illustrations pages titres et intérieures : réalisées à l'aide de l'IA
Date de publication : Août 2025

Informations supplémentaires et diffusion :
OFSP, Unité de direction Protection de la santé, Division Radioprotection,
Radioactivité de l'environnement, 3003 Berne

Téléphone +41 (0)58 462 96 15, Télécopie +41 (0)58 462 83 83
Courriel :str@bag.admin.ch, www.bag.admin.ch/ura-rapports, www.radenviro.ch

