Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz

Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse

Radioattività dell'ambiante e dosi d'irradiazione in Svizzera

2023

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

Schweizerische Eidgenossenschaft
Bundesamt für Gesundheit BAG
Abteilung Strahlenschutz

Confédération suisse
Office fédéral de la santé publique OFSP
Division Radioprotection

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

2023

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 Hôpitaux Universitaires de Genève (HUG) effectuent des mesures corps entiers.
- 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 2023.

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.
- Das Universitätsspital Genf (HUG) führt Ganzkörpermessungen durch.
- 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 (ein zweites Mal per Videokonferenz …) die Gelegenheit wichtige Fragen und letzte Korrekturen im Plenum zu besprechen.

Das Ergebnis dieses Prozesses für das Jahr 2023 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 8
Tâches et programme de mesures
Résultats de la surveillance 2023
Evaluation

2 Exposition de la population aux rayonnements ionisants 41
Radioactivité dans le tabac, dose efficace et effets sur la santé en Suisse 46

3 Rayonnement externe 54
Mesures in situ et exposition externe 56
Réseau NADAM 62
Mesures d'aéroradiométrie 72

4 Environnement 80
Radioactivité dans l'air (Aérosols) et dans les précipitations 82
URAnet aero 88
Surveillance de la radioactivité de l'air avec des avions militaires 94
Radioactivité dans les systèmes aquatiques 97
URAnet aqua 103
Tritium-Monitoring 106
Radioactivité du sol et de l'herbe 110

5 Radioactivité dans l'alimentation 114

6 Radioactivité dans le corps humain 124
Mesures de ^{90}SR, ^{210}Po et ^{226}Ra dans les vertèbres 126

7 Mesures de nucléides spéciaux 130
Carbone-14, Krpton-85, Argon-37 132
Mesures de plutonium et d'américium dans l'environnement 142

8 Surveillance des installations nucléaires 148
Emissions et immissions 150
Dose ambiante et débit de dose ambiante 161
MADUK 162
ZWILAG 166
Les installations nucléaires et l'environnement 170
CERN, rejets et environnement 179
CERN- Mesures OFSP 187

9 Industries et hôpitaux 194
Emissions des industries 196
Emissions des hôpitaux 199
Industries, stations d'épurations et usines d'incinération 203
Radionucléides médicaux 212
Tritium dans l'humidité de l'air au voisinage de mb Microtec 215
Plan d'action Radium 2015-2023 221

10 Plan d'action sur le radon 2021- 2030 224

11 Annexes 230

Inhaltverzeichnis

1 Umweltüberwachung: Zusammenfassung 22
Auftrag und Messprogramm
Ergebnisse der Umweltüberwachung 2023
Beurteilung

2 Strahlenexposition der Bevölkerung 36
Radioaktivität in Tabak, effektive Dosis und gesundheitliche Auswirkungen in der Schweiz 46

3 Externe Strahlung 54
In situ Messungen 56
Netzwerk NADAM 62
Aeroradiometrische Messungen 72

4 Umwelt 80
Aerosol und Niederschlag 82
URAnet aero 88
Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen 94
Aquatische System 97
URAnet aqua 103
Tritium-Monitoring 106
Boden und Gras 110

5 Radioaktivität in Lebensmittel 114

6 Radioaktivität im Menschen 124
^{90}SR, ^{210}Po und ^{226}Ra in den Wirbeln 126

7 Messung von Spezialnukliden 130
Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37 132
Plutonium und Americium 142

8 Überwachung der Kernanlagen 148
Emissionen und Immissionen 150
Ortsdosis und Ortsdosisleistung 161
MADUK 162
ZWILAG 166
Nukleare Anlagen und Umwelt 170
CERN, Emissionen und Umwelt 179
CERN, BAG-Messungen 187

9 Industrien und Spitäler 194
Emissionen der Betriebe 196
Emissionen der Spitäler 199
Industrien, Kläranlagen, Verbrennungsanlagen 203
Radionukliden aus der Medizin 212
Titium in der Luftfeuchtigkeit in der Nähe von mb Microtec 215
Plan d'action Radium 2015-2023 221

10 Aktionsplan Radon 2021- 2030 224

11 Anhänge 230

Surveillance
Environnement
Résumé

1

Umwelt
Überwachung
Zusammenfassung

- *Tâches et programme de mesure*
- *Résultats de la surveillance 2023*
- *Evaluation*

- *Auftrag und Messprogramm*
- *Ergebnisse der Umweltüberwachung 2023*
- *Beurteilung*

2023

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 (accident radiologique). Le programme de surveillance vise, d'autre part, 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 suisse. 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 soient respectées et, d'autre part, à surveiller leurs immissions, à savoir 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 (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. A 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 décharges ou encore des eaux de lavage des fumées d'usines d'incinération.

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 de mesure 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 prélèvements 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 dans des échantillons environnementaux effectuées en laboratoire sont consultables en ligne sur le site www.radenviro.ch. Par contre les résultats de mesures spécifiques (par ex. mesure dans les vertèbres, dents de lait, ^{14}C dans les feuillages, etc.) ne sont, pour l'heure, disponibles que dans le rapport publié annuellement. Les programmes de surveillance sont comparables à ceux en vigueur 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 césium-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 pour ce radionucléide dans l'air est fixée à 8.5 Bq/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.

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

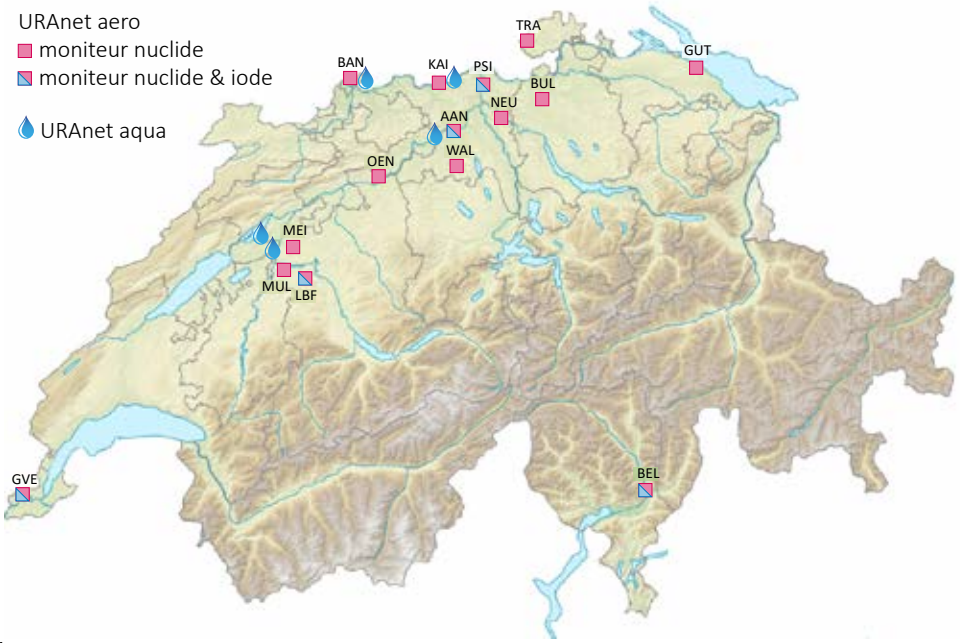


Figure 1:
Réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air (URAnet aero) et dans les cours d'eau (URAnet aqua).

aval des centrales nucléaires suisses, et est opérationnel depuis 2015. Précédemment, le réseau comprenait 5 sondes, mais la sonde de mesure de Hagneck est tombée en panne fin janvier 2023 et n'a pas été remplacée, puisque la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM) 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

Le dispositif de mesure de la radioactivité dans l'air situé à la station de recherche du Jungfraujoch ne répond plus aux exigences actuelles. Lors de sa séance du 13 avril 2022, le Conseil fédéral a donc décidé de le moderniser. La nouvelle station permettra la mesure en continu de la radioactivité dans l'air, mais aussi l'analyse ultérieure en laboratoire. Sa mise en service est prévue d'ici fin 2024.

Compte tenu des conditions climatiques extrêmes prévalant à la Jungfraujoch, le projet a démarré par l'étude de la taille et de la cinétique des particules transportant la radioactivité dans l'air sur ce site culminant à près de 3'500 m d'altitude, étape indispensable pour s'assurer que la surveillance effectuée soit bien représentative de la radioactivité présente dans l'air.

La seconde étape, réalisée en 2023, consistait à choisir les différents composants de la nouvelle station, afin d'atteindre les objectifs fixés en termes de qualité et de sensibilité de la surveillance. Le fabricant de la partie principale (soit toute la ligne d'aspiration, le caisson de collecte contenant le filtre, la ligne d'extraction et la pompe) a mené un long travail d'ingénierie numérique, afin de proposer une solution permettant d'intégrer l'ensemble de ce dispositif unique en Europe dans l'espace restreint à disposition. Une fois le prototype validé, les travaux de fabrication et de transformation du bâtiment ont pu démarrer. Ainsi, il a fallu démonter les anciens appareils de mesure, percer des trous dans les murs, revoir entièrement l'électricité du bâtiment, refaire la menuiserie du local et repenser l'isolation thermique et phonique de l'installation.

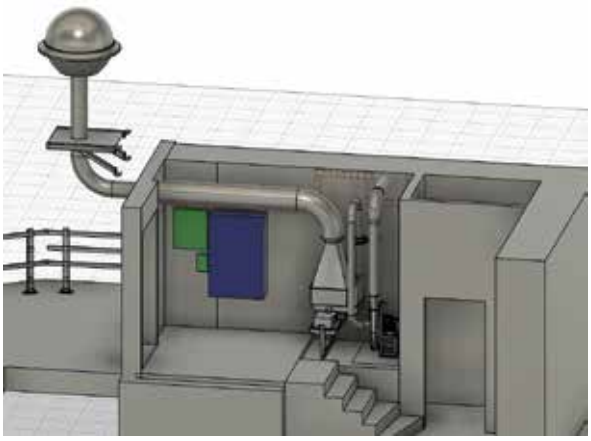


Figure 2:
Modélisation 3D de la nouvelle station de mesure du Jungfraujoch.

La figure 2 montre une modélisation en 3D des équipements prévus pour la nouvelle station de mesure du Jungfraujoch. On y voit la ligne d'aspiration, le caisson de collecte contenant le filtre, la ligne d'extraction ainsi que la pompe, tout cela dans un petit espace de quelques mètres carrés.

Après son installation sur site, le câblage électrique de la machine ainsi que son automation et la programmation informatique de la station seront mis en œuvre en 2024, afin que la nouvelle station soit opérationnelle en décembre 2024, comme prévu par le Conseil fédéral.

La nouvelle station de mesure du Jungfraujoch devait également palier à l'arrêt des vols de collecte effectués avec des avions de chasse Tiger, l'armée suisse ayant décidé de mettre fin à l'exploitation de ces avions en 2025. Le Parlement a toutefois exigé, en septembre 2022, le maintien des Tiger jusqu'en 2027 au moins. L'Etat-major de l'armée a confirmé à l'OFSP en juillet 2023 que les vols de collecte à haute altitude en vue de la mesure ultérieure de la radioactivité pourraient être maintenu avec les avions de chasse Tiger jusqu'à fin 2027.

Résultats de la surveillance 2023

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 2023 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 ^{7}Be cosmogénique (produit par le rayonnement cosmique dans les hautes couches de l'atmosphère) ainsi que le ^{210}Pb et les autres produits de filiation du radon. L'évolution des concentrations de ^{7}Be dans l'air reflète les conditions météorologiques, en particulier le mélange vertical convectif de la troposphère pendant les chaudes journées d'été ; l'air riche en ^{7}Be est transporté depuis la troposphère supérieure vers le sol, raison pour laquelle les concentrations de ^{7}Be mesurées sont plus élevées en été. Les précipitations (lessivage de ^{7}Be) influencent également les concentrations mesurées. Les mêmes radionucléides naturels se retrouvent par ailleurs également dans les eaux de pluie.

Hormis les radionucléides d'origine naturelle, d'infimes concentrations de radioactivité artificielle, en particulier de ^{137}Cs (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 sont plus fréquemment détectées par temps sec, lorsque le ^{137}Cs déposé au sol en Suisse suite aux essais d'armes nucléaires des 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 qu'en hiver, lorsque du bois contaminé par le même accident est brûlé dans les chaudières. En 2023, des traces de ^{137}Cs ont également été décelées dans 7 échantillons de précipitations parmi les 96 échantillons mesurés, mais aucun autre émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ce type d'échantillon. Il en va de même pour les rivières. L'observation de ^{137}Cs dans les précipitations est plutôt inhabituelle; la remise en suspension dans l'air de particules de sol contenant du ^{137}Cs en est probablement la cause. Dans les rivières en revanche des traces de ^{137}Cs sont observées régulièrement et proviennent de l'érosion des sols.

La teneur en tritium (^{3}H) 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 ^{90}Sr, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Am et ^{137}Cs) ainsi que de l'accident de Tchernobyl en 1986 (essentiellement ^{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 3) 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 radionucléides artificiels comme le ^{137}Cs ou le ^{90}Sr (voir figure 4), 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 2023, des analyses de radioactivité ont été menées dans environ 300 échantillons de denrées alimentaires suisses (sans compter les campagnes spéciales pour les sangliers) et 200 échantillons de denrées alimentaires importées. 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 150 analysés en 2023 a présenté une activité en ^{137}Cs >1 Bq/l ; la teneur en ^{137}Cs, s'élevant à 14 Bq/l dans cet échantillon provenant des Centovalli, était toutefois nettement inférieure à la valeur maximale de 600 Bq/kg admise

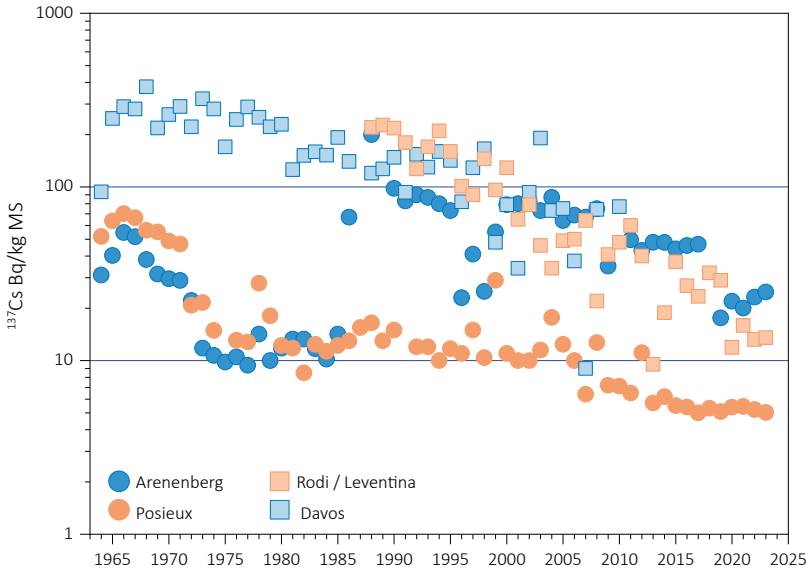


Figure 3:
^{137}Cs (en Bq/kg de matière sèche) dans les échantillons de sol de différentes stations de Suisse (1964 - 2023).

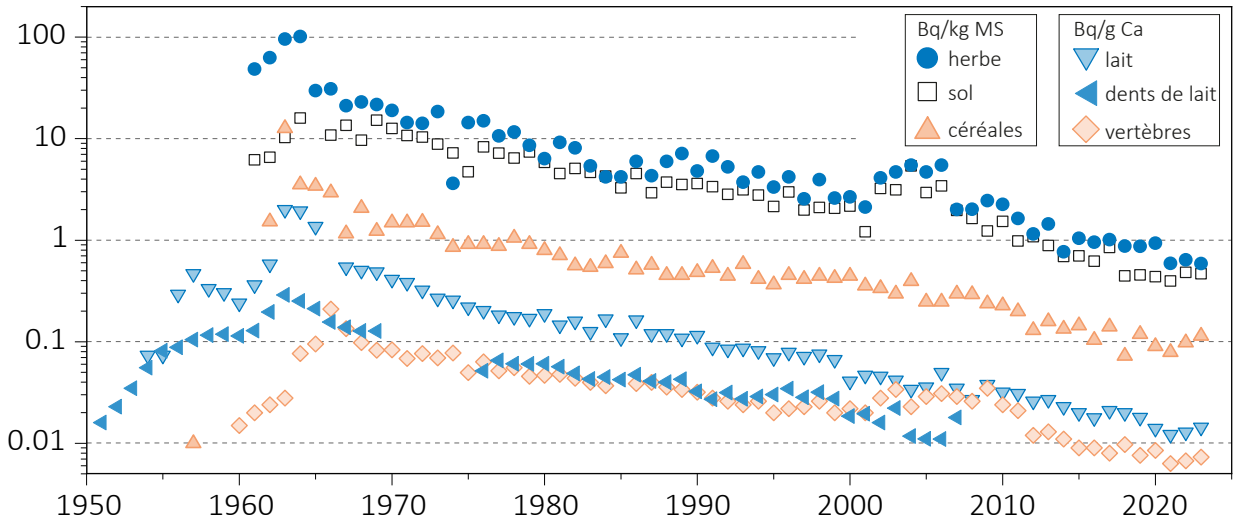


Figure 4:
^{90}Sr (strontium-90) dans divers échantillons prélevés entre 1950 et 2023.

pour le ^{137}Cs selon l'Ordonnance Tchernobyl. Ces traces de ^{137}Cs sont en effet toujours dues aux contaminations de notre territoire après l'accident de Tchernobyl. Rappelons qu'en Suisse les régions situées au Sud des Alpes, et en particulier au Tessin, ont été les plus touchées par ces retombées radioactives en 1986, ce qui explique que le ^{137}Cs y soit toujours mesurable dans certains échantillons, près de 40 ans après l'accident. Les teneurs en ^{90}Sr mesurées dans 62 échantillons de lait par le canton de Bâle-Ville, l'Institut de radiophysique (IRA) et le Laboratoire de Spiez étaient très basses en 2023, avec une valeur maximale de 0.21 Bq/l et une valeur médiane de 0.008 Bq/l. Le ^{90}Sr mesuré 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.

Dix-huit échantillons de céréales et 28 échantillons de fruits et légumes indigènes ont par ailleurs été analysés en 2023. Parmi ceux-ci, un seul échantillon de céréale en provenance du Tessin a présenté une très faible activité mesurable de ^{137}Cs (0.1 Bq/kg). Dans les autres échantillons, 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 0.05 et 0.21 Bq/kg avec une moyenne de 0.12 Bq/kg, étaient également 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 2023, 681 sangliers ont ainsi fait l'objet d'une mesure de tri, réalisée sur place à l'aide d'un débitmètre. Vingt-deux sangliers, soit env. 3% 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 4'830 Bq/kg. Le vétérinaire cantonal a confisqué les sangliers concernés. Rappelons que la consommation par les sangliers de truffes de cerf, des champignons non-comestibles pour l'homme qui accumulent le ^{137}Cs, est à l'origine de la contamination de ces animaux. Le ^{137}Cs déposé au sol après l'accident de Tchernobyl a, par la suite, migré dans les couches plus profondes, où poussent ce type de 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 9 échantillons de champignons indigènes analysés en 2023 par les cantons des Grisons et de Berne. La valeur maximale enregistrée s'est élevée à 95 Bq/kg (masse fraîche), et la valeur moyenne à 17 Bq/kg.

En outre, le laboratoire cantonal de Bâle-Ville a mené en 2023 une campagne de mesure de la radioactivité dans les eaux minérales provenant en grande partie de Suisse. Des traces de ^{226}Ra ont été détectées dans 7 des 30 échantillons. La valeur la plus élevée était de 53 ± 22 mBq/l dans une eau minérale provenant de Suisse. Aucun des 30 échantillons ne contenait de ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{224}Ra ou ^{3}H. Aucun des échantillons analysés n'a présenté de dépassement de la dose totale de 0.1 mSv/an fixée comme valeur indicative dans l'annexe 3 de l'ordonnance sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD).

Suite à l'accident de Fukushima-Daichi, la Suisse comme l'Union Européenne, avait initié un programme de contrôle des denrées alimentaires en provenance du Japon. Depuis 2017, les échantillons analysés en Suisse sur des denrées importées du Japon n'ont que rarement présenté des traces de ^{137}Cs. La Suisse a levé les restrictions d'importation de denrées du Japon en août 2023 et l'ordonnance sur l'importation de denrées alimentaires originaires ou en provenance du Japon (RS 817.026.2) a été abrogée.

Comme chaque année, les laboratoires cantonaux ont également analysé la radioactivité dans certaines denrées alimentaires importées: environ 200 échantillons ont ainsi été mesurés par spectrométrie gamma en 2023. Le laboratoire cantonal de BS a par exemple mesuré 26 échantillons de gibier importés, 20 échantillons d'algues et 15 échantillons d'agrumes. La concentration la plus élevée de ^{137}Cs a été mesurée dans un ragoût de chamois de Slovénie. Avec 23 Bq/kg, cette concentration était toutefois nettement inférieure à la valeur maximale de 600 Bq/kg fixée pour le ^{137}Cs dans l'Ordonnance Tchernobyl. Le laboratoire cantonal de BE a quant à lui analysé 33 échantillons de champignons importés. La concentration d'activité la plus élevée a été atteinte par les chanterelles de Lituanie, avec 183 Bq/kg (poids frais) de ^{137}Cs. D'autres chanterelles provenant du même pays d'origine contenaient nettement moins de ^{137}Cs, voire pas du tout. La valeur médiane de tous les échantillons était de 1 Bq/kg.

En résumé, aucun dépassement de la valeur maximale pour le ^{137}Cs n'a été enregistré en Suisse dans les denrées alimentaires importées en 2023.

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'eau en phase 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 2023.

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 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 CNM. La surveillance de la radioactivité dans l'environnement se poursuit toutefois toujours comme en régime d'exploitation.

Les résultats 2023 de la surveillance mise en œuvre au voisinage des centrales nucléaires sont conformes à ce qui était attendu. 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 0.02 mSv par semaine. Ce rayonnement résulte de la désintégration radioactive de l'azote-16 (^{16}N), de courte demi-vie, 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, les travaux de démantèlement, tels que ceux qui y ont actuellement lieu, peuvent toutefois entraîner des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture. Ainsi, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la CNM a montré une élévation maximale de la dose ambiante de 0.016 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 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 de 91 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt par rapport à la station de référence). 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 provenant des rejets atmosphériques occasionnellement détecté dans les précipitations est le tritium, les activités étant toutefois très faibles.

Les rejets d'effluents radioactifs liquides par la CNM en 2023 ont été comparables à ceux des années 2017-2019, alors que la centrale était encore en exploitation. Les activités rejetées sont restées inférieures à la valeur cible de 1 GBq/an et n'ont pas conduit à une augmentation mesurable des concentrations des produits d'activation (isotopes du cobalt ou manganèse) dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar. L'empreinte des rejets liquides des centrales nucléaires sur le milieu aquatique est essentiellement mesurable dans les sédiments. En 2023, des traces de ^{54}Mn et de ^{60}Co ont ainsi été sporadiquement mesurées dans des échantillons de sédiments prélevés dans l'Aar (Hagneck et Klingnau) et le Rhin (Pratteln). Les activités mesurées sont toutefois 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 $^{239+240}Pu$ et de ^{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 montré de marquage propre aux rejets des centrales, les rapports isotopiques $^{241}Am/^{239+240}Pu$ indiquant une contribution très majoritaire des retombées des essais nucléaires des années 60.

Les concentrations mensuelles de tritium mesurées dans l'Aar et le Rhin sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l. Comme chaque année, la période entre avril et mai a toutefois fait exception, une légère augmentation ayant été constatée dans l'Aar (valeur maximale d'env. 10 Bq/l à Brugg en avril) et dans le Rhin (env. 4 Bq/l à Weil am Rhein en avril), en raison de rejets plus importants d'eau contenant du ^{3}H par la centrale nucléaire de Gösgen avant la période de révision.Notons que des rejets plus importants de ^{3}H par la centrale de Beznau en février et en mai ont également donné lieu à des augmentations mesurables des concentrations de ce radionucléide dans l'Aar pendant cette période (jusqu'à 5 Bq/l dans l'Aar à Klingnau en février).

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval des centrales nucléaires suisses en 2023 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 (en effet, 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).

En ce qui concerne l'ancienne centrale nucléaire de Lucens, plus aucune valeur de tritium significativement plus élevée n'a été enregistrée dans son système de drainage depuis que l'OFSP a engagé un programme de surveillance rapprochée au printemps 2012.

Hormis les quelques exemples précités et comme le montre la figure 5, les résultats des mesures environnementales effectuées au voisinage des installations nucléaires ne se distinguent pas de ceux enregistrés en dehors de leur zone d'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).

Même si l'exposition de la population attribuable aux rejets des centrales nucléaires conduit à des doses très faibles (doses supplémentaires annuelles pour les adultes les plus exposés situées entre <0.001 mSv pour Beznau et Gösgen et env. 0.002 mSv pour Mühleberg et Leibstadt en 2023) par rapport à celles d'origine naturelle ou médicale, les autorités se doivent de poursuivre les contrôles et les études avec le plus de précision possible, afin de répondre aux différents objectifs à la fois d'ordre scientifique, réglementaire et d'information du public.

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 2023. Après la période d'arrêt technique, le CERN a en effet progressivement remis en exploitation toutes ses installations à partir de février 2023. Le LHC a dû être arrêté à partir de mi-juillet pour une période d'environ deux mois. Quant à l'arrêt technique de 2023, il a débuté à la mi-novembre 2023.

Le bilan et le contrôle des émissions de ses propres installations effectués par le CERN en 2023, 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 efficace maximale délivrée aux membres du public suisse est demeurée inférieure à 0.005 mSv. Le programme indépendant de surveillance des immissions mis en œuvre par

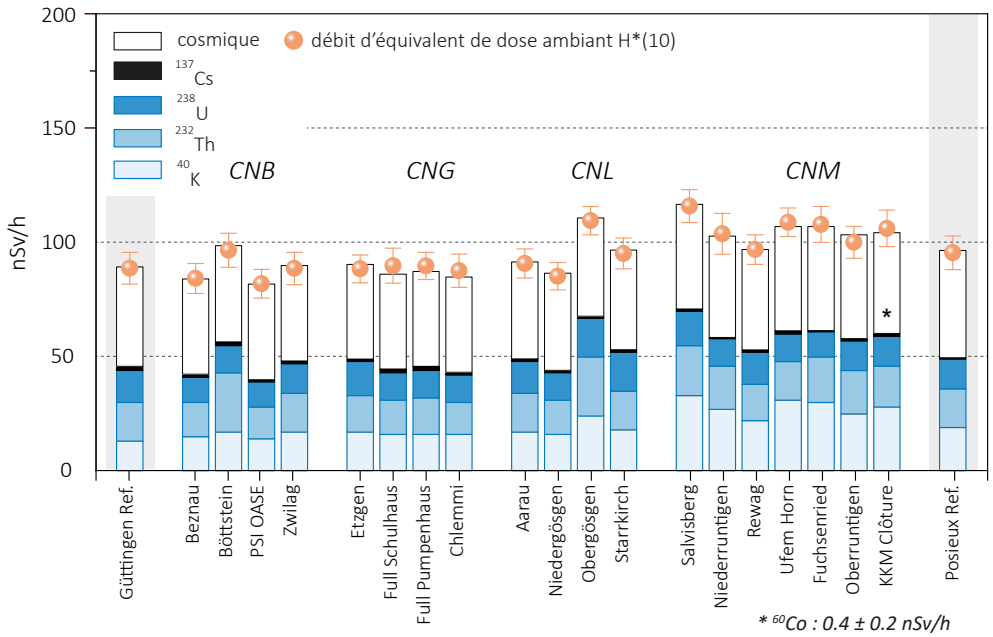


Figure 5:
Contributions individuelles à l'exposition ambiante (H(10)) attribuables aux différents radionucléides présents sur les sites examinés par l'OFSP en 2023 au voisinage des centrales nucléaires suisses ainsi qu'aux sites de référence de Güttingen et Posieux (grisé). Ces contributions ont été 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'apprécier la fiabilité de la méthode.*

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 très faible.

Si des traces des radionucléides de courte demi-vie produits par les installations du CERN, comme les isotopes d'iode (^{126}I, ^{131}I) ou l'^{41}Ar ont sporadiquement pu être décelées dans l'air au voisinage du centre de recherche en 2023, leurs concentrations ne représentaient que d'infimes fractions des limites d'immissions dans l'air définies dans l'ORaP (moins de 0.1% de la limite d'immissions dans l'air pour l'^{131}I 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 en dehors de la zone d'influence du CERN.

La dose d'irradiation 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 2023 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. La surveillance de l'environnement est assurée par le PSI ainsi que par l'OFSP qui effectue des mesures supplémentaires de manière indépendante.

Hormis quelques valeurs sporadiquement plus élevées de tritium dans les précipitations ou de ^{14}C dans les feuillages, les résultats de la surveillance au voisinage du PSI n'ont pas mis en évidence de marquage de l'environnement dû 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 2023, toutes les entreprises concernées ont respecté les valeurs limites pour les rejets fixées dans leur autorisation. 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.

Comme par le passé, les résultats de cette surveillance ont montré que les concentrations de tritium dans l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) étaient significativement plus élevées à proximité immédiate de ces entreprises, notamment à Niederwangen. Les niveaux de tritium mesurés dans les échantillons bimensuels de précipitations prélevés en 2023 à proximité immédiate de l'entreprise se sont échelonnés entre 40 et 860 Bq/l, soit au maximum un peu plus de 4% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ORaP pour le tritium dans les eaux accessibles au public. Les concentrations de tritium mesurées dans des distillats d'échantillons de lait ainsi que de fruits et légumes (pommes, poires, prunes, rhubarbe, etc.) prélevés fin août 2023 par le canton de Berne à proximité de l'entreprise se sont échelonnées entre 8 et 120 Bq/l. Ces concentrations se situent dans la moyenne inférieure de celles enregistrées au cours des années précédentes.

Les concentrations de tritium mesurées dans les échantillons hebdomadaires de précipitations de Teufen/AR, au voisinage de l'entreprise RC Tritec sont généralement restées basses en 2023 (valeur médiane de 29 Bq/l), avec toutefois une légère augmentation fin novembre (valeur maximale de l'ordre de 120 Bq/l).

Fin 2021, l'OFSP et la SUVA ont par ailleurs initié un programme de surveillance du tritium dans les précipitations et l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise Smolsys, située à Root/LU qui dispose également d'une autorisation de rejet de tritium dans l'environnement. Avec une valeur maximale de l'ordre de 80 Bq/l dans les précipitations, les résultats 2023 montrent une tendance à la hausse par rapport à celles enregistrées lors de la première année de surveillance, corrélée avec l'augmentation des émissions de l'entreprise.

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

Héritages radiologiques

Le Plan d'action radium 2015 - 2023 vise à régler le problème des héritages radiologiques liés à l'application de peinture luminescente au radium dans l'industrie horlogère jusque dans les années 1960. L'année 2023 a été marquée par la clôture de l'ensemble des diagnostics et des assainissements dans les anciens ateliers de posage du radium, l'occasion ici de dresser un bilan final de ces travaux.

Projet sectoriel «Bâtiments»

Les recherches historiques ont permis de dresser un inventaire d'environ 1'100 biens-fonds principalement situés dans l'Arc jurassien, dans lesquels d'anciens ateliers de posage de peinture au radium étaient implantés (voir Recherches historiques (admin.ch)). Au total, 1'093 biens-fonds ont fait l'objet d'un diagnostic du radium, dont plus de 50 en 2023. Ainsi, l'OFSP a examiné la quasi-totalité des biens-fonds de l'inventaire. Seuls les propriétaires de sept biens-fonds ont refusé le diagnostic ou n'ont jamais réagi aux courriers de l'OFSP.

Si les mesures de diagnostic révèlent que la dose efficace de 1 mSv par an est dépassée pour les occupants, un assainissement est nécessaire. Pour ce qui est des espaces extérieurs, la valeur de seuil est fixée à 1'000 Bq/kg pour la concentration de ^{226}Ra dans la terre.

Les diagnostics ont révélé une nécessité d'assainissement dans 163 des 1'093 biens-fonds examinés (soit 93 locaux intérieurs et 109 jardins), portant ainsi la fraction des biens-fonds à assainir à 15%. Dans ces 93 locaux, les doses efficaces calculées pour les occupants étaient comprises entre 1 et 20 mSv/an selon les cas. Les concentrations maximales de radium mesurées dans les échantillons de sol prélevés dans les 109 jardins à assainir étaient en moyenne de 26'500 Bq/kg. Dans un cas, elles avoisinaient les 670'000 Bq/kg.

Tous les biens-fonds contaminés ont pu être assainis à deux exceptions près: il s'agit d'une part d'un refus d'un propriétaire et d'autre part d'un assainissement d'un site industriel fortement contaminé au radium et chimiquement, dont la complexité nécessite un projet dédié en dehors du plan d'action.

Projet sectoriel «Décharges»

Le projet sectoriel «décharges» a d'une part pour objectif de recenser les anciennes décharges susceptibles de contenir des déchets contaminés au radium et d'autre part, de définir les mesures appropriées à prendre pour protéger la santé de la population et des travailleurs ainsi que l'environnement des dangers liés à la présence de ces déchets. Plus de 250 anciennes décharges nécessitant une surveillance radiologique lors de futurs travaux d'excavation ont été identifiées avec l'aide des cantons concernés (Berne, Genève, Jura, Neuchâtel et Soleure) et de l'OFEV. La liste correspondante ainsi que le rapport technique sont disponibles sous «Héritages au radium dans des décharges (admin.ch)». L'OFSP a par ailleurs élaboré une directive pour concrétiser les mesures de radioprotection à mettre en œuvre en cas d'ouverture d'une décharge susceptible de contenir des déchets au radium. La Suva, l'OFEV et les cantons concernés ont été consultés en 2023. La directive sera publiée en 2024.

L'OFSP élaborera en collaboration avec l'OFEV un rapport final du plan d'action radium à l'intention du Conseil fédéral d'ici fin 2024.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 9.5.

Utilisation de substances radioactives dans les hôpitaux

Les hôpitaux utilisent depuis de nombreuses années de l'^{131}I (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 méga Bq = 10^6 Bq) en ambulatoire peuvent quitter l'hôpital après la thérapie. Les patients ayant reçu plus de 200 MBq doivent par contre être isolés dans des chambres spéciales pendant au moins 48 heures après le traitement. Les excréments de ces patients sont collectés dans des cuves de décroissance dédiées au contrôle des eaux usées et ne sont rejetées dans l'environnement qu'après diminution de leur activité en dessous des valeurs limites d'immissions.

Si l'^{131}I 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 ^{177}Lu (demi-vie d'env. 7 jours) utilisé pour le traitement des tumeurs neuroendocrines et du cancer de la prostate. Après la très forte augmentation de l'activité totale de ^{177}Lu appliquée en Suisse en 2021 (doublement par rapport à 2020), celle-ci tend à se stabiliser (11.8 TBq en 2023 et 10.8 TBq en 2021). Pour tenir compte de la radiotoxicité, on calcule l'activité du ^{177}Lu en équivalent ^{131}I, ce qui donne 0.26 TBq d'équivalent ^{131}I (à comparer aux 2.38 TBq d'^{131}I appliqués en Suisse en 2023). Du point de vue de la radiotoxicité, l'^{131}I reste donc le radionucléide dominant. Comme pour l'^{131}I, les patients traités avec le ^{177}Lu doivent être hospitalisés pendant au moins 48h après leur traitement, leurs excréments étant collectés dans des cuves de décroissance.

L'^{90}Y, l'^{166}Ho ou le ^{223}Ra sont également utilisés en médecine nucléaire pour le traitement de cancers. L'utilisation de l'^{166}Ho est relativement récente (premières applications en 2020). L'application de l'^{90}Y et du ^{223}Ra ont nettement diminué au cours des 5 à 10 dernières années. D'autres nucléides comme le ^{169}Er ou le ^{186}Re 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.

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 (^{131}I, ^{177}Lu). Des mesures en continu à l'aide d'une sonde automatique ont également été effectuées en 2023 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'^{131}I, de ^{177}Lu ainsi que de ^{223}Ra ont régulièrement été mis en évidence dans les particules en suspension prélevées dans le Rhin à Weil am Rhein en 2023.

Pour davantage d'informations, consulter les chapitres 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 un programme spécifique de prélèvements et de mesures de la radioactivité (émetteurs gamma et ^{3}H) des eaux des STEP ainsi que des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération des déchets ménagers (UIOM).

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 en 2023. 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 l'environnement ; ils n'apparaissent donc que sporadiquement dans l'environnement. Les nucléides à vie très courte tels que le ^{99m}Tc et le ^{18}F/^{68}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. Ces mesures ont montré que les valeurs limites d'immission pour chacun de ces radionucléides ont été en grande partie respectées en moyenne hebdomadaire à l'entrée de la STEP

de Bellinzona. La seule exception a été constatée en décembre pour l'^{131}I : la valeur moyenne hebdomadaire pour ce radionucléide (18 Bq/l) à l'entrée de la STEP a en effet dépassé la valeur limite d'immission (env 7 Bq/l). On peut toutefois supposer que cette valeur de 7 Bq/l a été clairement respectée dans le cours d'eau récepteur, c'est-à-dire dans les «eaux accessibles au public», déterminantes selon l'ordonnance sur la radioprotection. Si l'^{131}I est stocké pour décroissance dans les hôpitaux, les patients peuvent encore excréter une petite partie de la radioactivité qui leur a été administrée dans les eaux usées de leur domicile, après leur sortie de l'hôpital, raison pour laquelle de tels dépassements sont parfois observés.

Les mesures en continu dans les STEP seront poursuivies, car elles fournissent des informations supplémentaires sur les émissions des hôpitaux, qui représentent globalement une source non-négligeable de radionucléides artificiels dans l'environnement.

Les résultats des mesures du tritium dans les eaux des STEP de grandes agglomérations suisses (Bâle, Berne, Zürich, Lausanne) n'ont pas présentés de valeurs inhabituelles. Si des concentrations plus élevées de ^{3}H ont parfois été mesurées dans les eaux de la STEP de Bâle, ces augmentations (jusqu'à 325 Bq/l en mai 2023) sont dues à des rejets d'eaux de lavage des fumées de l'usine de traitements des déchets spéciaux (RSMVA) Veolia après l'incinération de déchets contenant du ^{3}H. Cette usine dispose en effet d'un accord de l'OFSP, en tant qu'autorité délivrant les autorisations, pour incinérer jusqu'à 100 GBq de ^{3}H par semaine, conformément à l'Art.116 de l'ORaP. Mis à part ces quelques valeurs plus élevées qui sont toujours restées inférieures à 2% de la valeur limite d'immissions, les concentrations de ^{3}H dans la STEP de Bâle sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 4 Bq/l.

La surveillance 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. Des mesures du tritium sont donc réalisées dans les eaux de lavage des fumées des UIOM de grandes agglomérations.

Dans le cadre de cette surveillance, le Laboratoire cantonal de Bâle-Ville a mesuré un niveau anormalement élevé de tritium (environ 27 kBq/l) dans un échantillon hebdomadaire d'eaux de lavage des fumées de l'UIOM de Bâle, collecté entre les 6 et 12 juin 2023. Selon l'estimation de l'OFSP, l'activité totale de tritium incinérée s'élevait à 32 GBq, soit plus de 100 fois la limite d'autorisation fixée à 0.3 GBq pour l'eau tritiée, représentant ainsi une infraction à l'ORaP. Comme lors des précédents incidents de ce type, Fedpol a été alertée, mais il est très difficile de retrouver l'origine de tels déchets après incinération. Vous trouverez de plus amples informations sur cet événement radiologique sur le site internet de l'OFSP [2].

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 fixée pour 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 2023 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 limite d'immission.

Pour les informations détaillées, se référer aux chapitres 9.3 et 9.4.

Radioactivité assimilée par le corps humain

L'assimilation de radionucléides par l'intermédiaire de 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 dents de lait et les vertèbres humaines. Sur la base des résultats des mesures au corps entier réalisées au sein des 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 d'une dizaine de mBq/g de calcium (figure 4). Le strontium est assimilé par le corps humain, tout 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 4) 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. Notons que le programme de mesure de ^{90}Sr dans les dents de lait touche à sa fin : les activités sont aujourd'hui très basses (< 10 mBq g^{-1} Ca) et il devient de plus en plus difficile d'obtenir des tailles d'échantillons suffisantes pour être en mesure de quantifier de tels niveaux de ^{90}Sr. Ainsi pour la première fois depuis près de 40 ans, aucun échantillon de dent de lait de taille suffisante n'a pu être mesuré en 2023.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 6.1.

Evaluation

Comme les années précédentes, les concentrations de radionucléides dans l'environnement et les doses d'irradiation de la population dues aux sources de rayonnement artificielles sont restées nettement inférieures aux limites légales durant l'année 2023 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 2023 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 feuillages ou le ^{60}Co et 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 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}H mesurées dans l'environnement en 2023 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. 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 travailleurs ou pour l'environnement. Toutefois, quelques concentrations anormalement élevées de tritium ont pu être décelées en 2023 dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Bâle, en raison de l'incinération de déchets contenant de grandes quantités de tritium éliminés illégalement. Comme ce fut le cas dans le passé lors d'événements similaires dans les usines d'incinération, une enquête a été ouverte. Il s'avère hélas très difficile de retrouver l'origine de déchets éliminés de manière non-conforme avec les déchets conventionnels.

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 reflètent un fonctionnement normal de ces installations et témoignent de l'efficacité des programmes de surveillance mis en œuvre.

Référence

[1] Evénements 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 (Strahlenunfall). Mit dem Überwachungsprogramm sollen andererseits auch die Referenzwerte für die Umweltradioaktivität in der Schweiz und deren Schwankungen bestimmt werden, damit die Strahlendosen für die Schweizer 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 sowie in Abwässern aus Kläranlagen, Deponien und Kehrichtverbrennungsanlagen.

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 Messnetz URAnet des BAG sichergestellt : URAnet «aero» für die Überwachung der Luft und URAnet «aqua» für die Überwachung des Fluss-

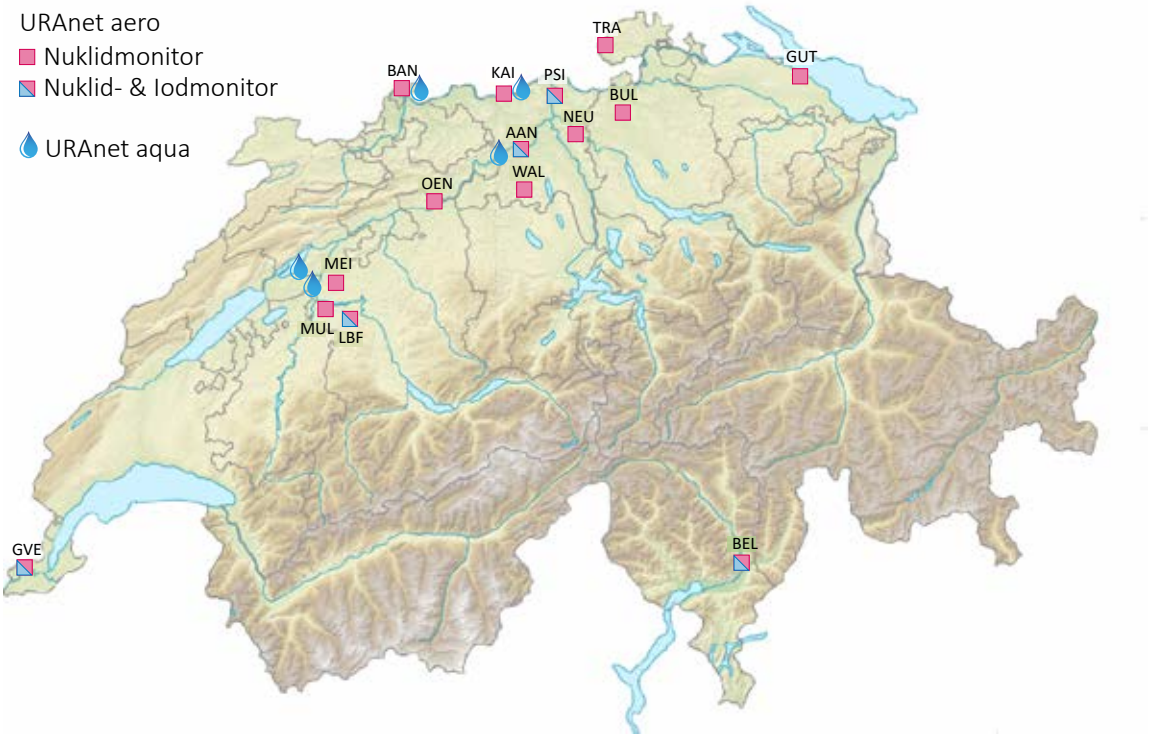
wassers. Zusätzlich zu den automatischen Messungen werden von Aerosolen, Niederschlägen und Flusswasser kontinuierlich Proben für empfindliche Messungen im Labor entnommen. Die Überwachung von Sedimenten, Erdproben, Gras, Milch und Lebensmitteln (inklusive Importe) erfolgt stichprobenweise. Die Daten 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. Hingegen werden die Ergebnisse von speziellen Messprogrammen (z.B. Messungen von Wirbelknochen oder Milchzähnen; ^{14}C-Messungen in Baumblättern) 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 (^{137}Cs) liegt beispielsweise bei einer 12-Stunden-Messung im Bereich von 3 bis 7 Millibecquerel pro Kubikmeter (mBq/m^3), während der Immissionsgrenzwert für Luft für dieses Radionuklid in der Luft bei 8. 5 Bq/m^3 liegt. Das bedeutet, dass ein unübliches Vorkommen von ^{137}Cs in der Luft automatisch detektiert würde, und das bereits bei Konzentrationen die 1’000 Mal unter Grenzwerten 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



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

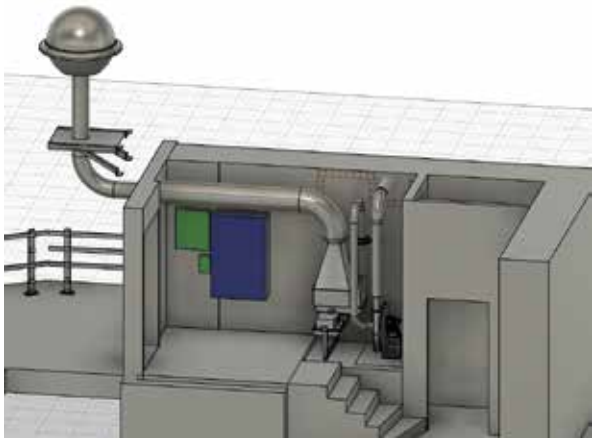
Betrieb. Ursprünglich bestand das Netzwerk aus 5 Sonden, aber die Messsonde in Hagneck fiel Ende Januar 2023 aus und wurde nicht ersetzt, da das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) nicht mehr in Betrieb ist. Die Messungen unterhalb des KKM werden durch die Sonde in Niederried sichergestellt.

Modernisierung der Probenahme und Messung von Höhenluft

Die Messstation für Radioaktivität in der Luft in der hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch entspricht nicht mehr den aktuellen Anforderungen. Der Bundesrat hat deshalb an seiner Sitzung vom 13. April 2022 beschlossen, die Anlage zu modernisieren. Die neue Station, soll empfindlicher und fortlaufend die Konzentrationen einzelner Radionuklide in der Luft messen. Die Filter kommen nachher für zusätzliche Analysen ins Labor. Die Inbetriebnahme ist für Ende 2024 vorgesehen.

Aufgrund der extremen klimatischen Bedingungen auf dem Jungfraujoch begann das Projekt mit einer Studie der Grösse und Kinetik der dort vorhandenen Luftpartikel, die möglicherweise Radioaktivität transportieren können. Ein notwendiger Schritt, um sicherzustellen, dass die Überwachung repräsentativ ist für die an diesem Standort auf rund 3'500 m Höhe vorhandene Radioaktivität in der Luft.

Der zweite, 2023 durchgeführte Schritt bestand darin, die geeigneten Komponenten auszuwählen, um die gesetzten Ziele hinsichtlich der Qualität und Empfindlichkeit der Überwachung zu erreichen. Der Hersteller des Hauptteils (d. h. der gesamten Ansaugleitung, der Filtereinheit, der Fortluftleitung und der Pumpe) führte umfangreiche Simulationen durch, um eine Lösung zu finden, die es ermöglichte, diese in Europa einzigartige Anlage in den zur Verfügung stehenden begrenzten Raum zu integrieren. Nachdem die Pläne abgenommen waren, konnte mit der Herstellung des Gerätes und den Umbauarbeiten im Gebäude begonnen werden. Das alte Messgeräte ist inzwischen abgebaut, Öffnungen sind in die Wände gebohrt, die elektrischen Verteiler komplett neu installiert, Schreinerarbeiten ausgeführt und die Wärme- und Schalldämmung der Anlage ist neu überdacht und im Bau.



Figur 2:
3D-Modell der neuen Messstation auf dem Jungfraujoch.

Figur 2 zeigt ein 3D-Modell der geplanten Ausrüstung für die neue Messstation auf dem Jungfraujoch. Zu sehen sind die Ansaugleitung, die Filtereinheit, die Fortluftleitung sowie die Pumpe- alles auf kleinstem Raum von wenigen Quadratmetern.

Nach der Installation des Gerätes werden 2024 die elektrische Verkabelung der Maschine sowie die Programmierung für die automatisierten Messungen und die Datenübermittlung in Angriff genommen, damit die neue Station, wie vom Bundesrat vorgesehen, im Dezember 2024 betriebsbereit ist.

Die neue Messstation auf dem Jungfraujoch sollte auch das Ende der Sammelflüge mit Tiger-Jagdflugzeugen abfedern, das die Schweizer Armee ursprünglich für 2025 beschlossen hatte. Das Parlament verlangte jedoch im September 2022, dass die Tiger bis mindestens 2027 im Einsatz bleiben sollten. Der Armeestab bestätigte dem BAG im Juli 2023, dass die Sammelflüge mit den Tiger-Jagdflugzeugen für die Messung der Radioaktivität in hohen Luftschichten bis Ende 2027 weitergeführt werden können.

Ergebnisse der Umweltüberwachung 2023

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

Die Resultate 2023 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 ^{7}Be, das durch kosmische Strahlung in den oberen Schichten der Atmosphäre entsteht, sowie ^{210}Pb und anderen Radonfolgeprodukte. Die Entwicklung der ^{7}Be-Konzentration in der Luft spiegelt die Wetterbedingungen wider. An heissen Sommertagen wird durch die konvektive vertikale Durchmischung ^{7}Bereiche Luft aus der oberen Troposphäre zum Boden transportiert, weshalb die dort gemessenen ^{7}Be-Konzentrationen im Sommer höher sind. Auch Niederschläge (Auswaschung von ^{7}Be) 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 ^{137}Cs (Halbwertszeit 30 Jahre), auf den Aerosolfiltern nachgewiesen. Diese Spuren werden häufiger bei trockenem Wetter festgestellt, wenn das in der Schweiz nach den Kernwaffentests der 60er Jahre und vor allem nach dem Unfall von Tschernobyl 1986 am Boden abgelagerte ^{137}Cs wieder in die Luft aufgewirbelt wird, sowie im Winter, wenn durch denselben Unfall kontaminiertes Holz in den Heizkesseln verbrannt wird.

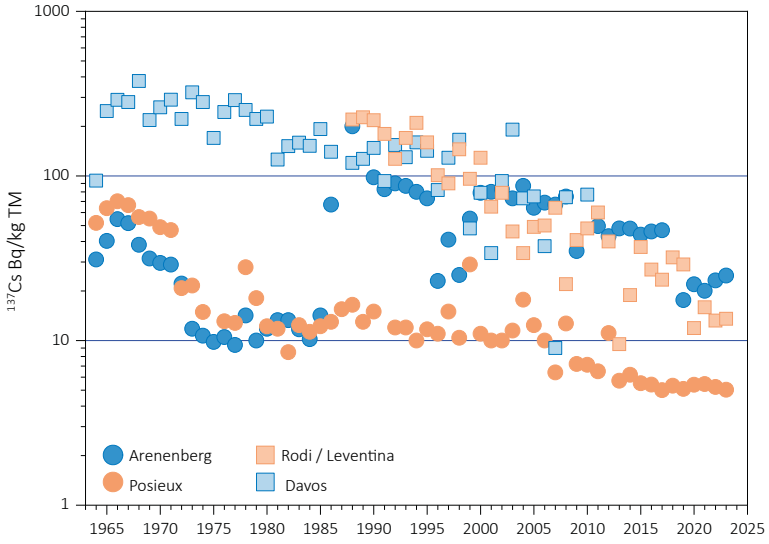
Im Jahr 2023 wurden in 7 von 96 gemessenen Niederschlagsproben ebenfalls Spuren von ^{137}Cs nachgewiesen. Andere künstliche Radionuklide sind in Niederschlagsproben hingegen nie aufgetaucht. Dasselbe gilt für Flüsse. Die Beobachtung von ^{137}Cs im Niederschlag ist eher ungewöhnlich; wahrscheinlich ist die Resuspension von ^{137}Cs-haltigen Bodenpartikeln in die Luft die Ursache dafür. In den Flüssen hingegen werden regelmässig Spuren von ^{137}Cs beobachtet, die von der Bodenerosion herrühren.

Der Gehalt an natürlich vorkommendem Tritium (^{3}H) 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 von diesen Betrieben nachgewiesen (siehe Kapitel über die Überwachung dieser Betriebe).

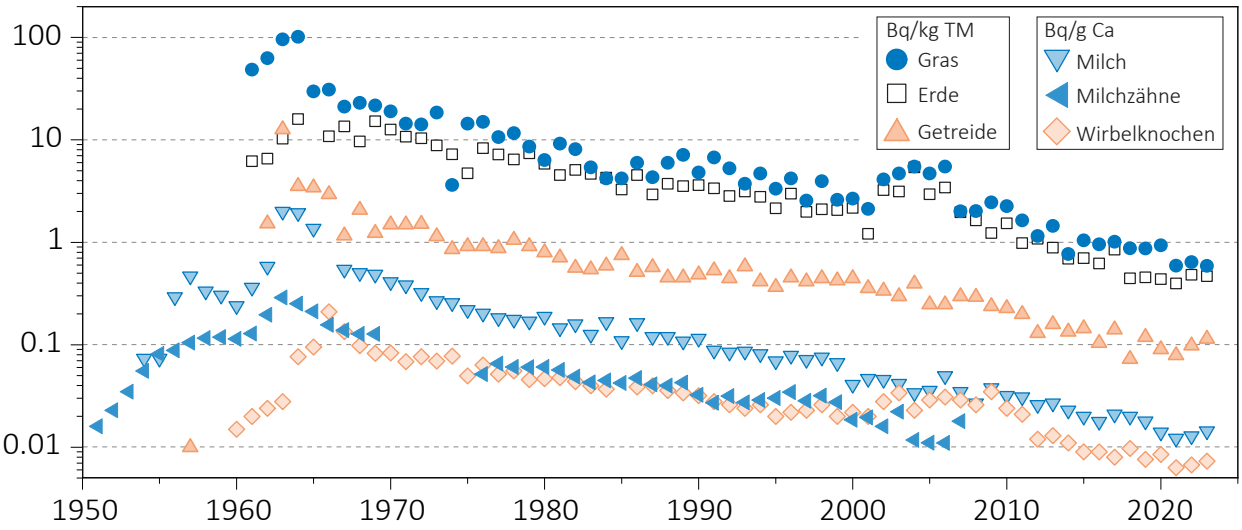
Im Erdboden dominieren die natürlichen Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen sowie das ^{40}K. Künstliche Radioisotope im Boden stammen aus Ablagerungen aus der Luft und zeigen regionale Unterschiede, die mit dem unterschiedlichen «Fallout» von Radioaktivität aus den oberirdischen Kernwaffenversuchen 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 3) 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 4), 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.

Die Radioaktivität wurde in etwa 300 Proben von Schweizer Lebensmitteln (ohne spezielle Kampagnen für Wildschweine) und 200 Proben von importierten Lebensmitteln analysiert. In der einheimischen Kuhmilch lag der ^{137}Cs-Gehalt mit einer Ausnahme unter der Nachweisgrenze, die nahe oder unter 1 Bq/l lag. Nur eine der 150 im Jahr 2023 untersuchten Milchproben wies eine etwas höhere ^{137}Cs-Aktivität: Die ^{137}Cs-Konzentration von 14 Bq/l in dieser Probe aus dem Centovalli lag jedoch deutlich unter dem Höchstwert von 600 Bq/kg aus der Tschernobyl-Verordnung. Auch diese Spuren von ^{137}Cs sind immer noch auf die Kontamination (Fallout) unseres Territoriums nach dem Unfall in Tschernobyl zurückzuführen. Es sei daran erinnert, dass in der Schweiz die Regionen südlich der Alpen und insbesondere das



Figur 3:
^{137}Cs (in Bq/kg Trockenmasse) in Bodenproben von verschiedenen Messstationen in der Schweiz (1964 - 2023).



Figur 4:
^{90}Sr (Strontium-90) in verschiedenen, zwischen 1950 und 2023 entnommenen Proben (logarithmische Skala).

Tessin 1986 am stärksten von diesem radioaktiven Niederschlag betroffen waren. Das erklärt, warum ^{137}Cs dort 37 Jahre nach dem Unfall immer noch in einigen Proben messbar ist. Die ^{90}Sr-Gehalte, die vom Kanton Basel-Stadt, dem Institut für Radiophysik (IRA) und dem Labor Spiez in 62 Milchproben gemessen wurden, waren 2023 mit einem Höchstwert von 0.21 Bq/l und einem Medianwert von 0.008 Bq/l sehr niedrig. Das in der Schweiz gemessene ^{90}Sr stammt aus dem Fallout der atmosphärischen Atombombentests in den 1960er Jahren. Die höher gelegenen Regionen, die mehr Niederschlag erhielten, waren daher stärker betroffen als die tiefer gelegenen Regionen.

Achtzehn Getreideproben und 28 Proben von einheimischem Obst und Gemüse wurden 2023 analysiert. Nur eine Getreideprobe aus dem Tessin wies eine messbare, sehr geringe ^{137}Cs-Aktivität (0.1 Bq/kg) auf; in den anderen Proben lag die ^{137}Cs-Aktivität unter der Nachweisgrenze von rund 0.4 Bq/kg. Die im Getreide gemessenen ^{90}Sr-Werte lagen zwischen 0.05 und 0.21 Bq/kg mit einem Mittelwert von 0.12 Bq/kg und waren ebenfalls 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 2023 wurden 681 Wildschweine vor Ort mit einem dosimetrischen Instrument ausgemessen. Zweiundzwanzig Tiere, also ca. 3% der Fälle, überschritten den Höchstwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs. Nachmessungen im Labor zeigten einen ^{137}Cs-Höchstwert von 4'830 Bq/kg. Die betroffenen Wildschweine wurden vom Kantonstierarzt beschlagnahmt. Die Ursache der Kontamination der Wildschweine ist bekanntlich 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 Reifpilze 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 9 Proben einheimischer Pilze überschritten, die 2023 von den Kantonen Graubünden und Bern analysiert wurden. Der höchste verzeichnete Wert betrug 95 Bq/kg (Frischmasse), der Durchschnittswert 17 Bq/kg.

Darüber hinaus führte das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt im Jahr 2023 eine Kampagne zur Messung der Radioaktivität in Mineralwasser durch, das grösstenteils aus der Schweiz stammte. In 7 von 30 Proben wurden Spuren von ^{226}Ra nachgewiesen. Der höchste Wert betrug 53 ± 22 mBq/l in einem Mineralwasser aus der Schweiz. Keine der 30 Proben enthielt ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{210}Pb, 210Po, ^{224}Ra oder ^{3}H oberhalb der Nachweisgrenzen. Die Gesamtdosis überschritt in keiner der untersuchten Proben den Richtwert von 0.1 mSv/Jahr, der in Anhang 3 der Verordnung über Trinkwasser und Wasser aus öffentlich zugänglichen Bade- und Duschanlagen (VTBD) festgelegt ist.

Nach dem Reaktorunfall in Fukushima-Daiichi hatte die Schweiz gleich wie die Europäische Union ein Programm für die Kontrolle von Lebensmittelimporten aus Japan aufgestellt. Seit 2017 haben in der Schweiz analysierte Proben aus Japan nur noch selten Spuren von ^{137}Cs gezeigt. Die Schweiz hob die Einfuhrbeschränkungen für

Lebensmittel aus Japan im August 2023 auf und die Verordnung über die Einfuhr von Lebensmitteln mit Ursprung oder Herkunft Japan (SR 817.026.2) wurde aufgehoben.

Wie jedes Jahr analysierten die kantonalen Laboratorien auch die Radioaktivität in einigen importierten Lebensmitteln. 2023 wurden etwa 200 Proben mit Gammaspektrometrie gemessen. Das Kantonale Labor BS hat beispielsweise 26 Proben von importiertem Wild, 20 Proben von Algen und 15 Proben von Zitrusfrüchten gemessen. Die höchste Konzentration von ^{137}Cs wurde in einem Gamsragout aus Slowenien gemessen. Mit 23 Bq/kg lag diese Konzentration jedoch deutlich unter dem Höchstwert von 600 Bq/kg aus der Tschernobyl-Verordnung. Das Kantonale Laboratorium BE analysierte 33 Proben von importierten Pilzen. Die höchste Aktivitätskonzentration wurde bei Pfifferlingen aus Litauen mit 183 Bq/kg (Frischgewicht) ^{137}Cs erreicht. Andere Pfifferlinge aus demselben Herkunftsland enthielten deutlich weniger oder gar kein ^{137}Cs. Der Medianwert aller Proben lag bei 1 Bq/kg.

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 des BAG an Aerosol- und Jodfiltern sowie an Wasserproben während der Betriebsphase ermöglichen eine regelmässige Überprüfung der den Behörden gemeldeten Werte. Die verschiedenen Kontrollen 2023 haben bestätigt, dass die Betreiber die gesetzlichen Grenzwerte einhalten.

Das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) wurde am 20. Dezember 2019 für die Stromproduktion abgeschaltet und am 15. September 2020 von der BKW definitiv stillgelegt. Dies markiert 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 2023 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 0.02 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 1^{6}N verschwunden, jedoch können die Stilllegungsarbeiten, die gegenwärtig stattfinden, selber zu einer kurzzeitig erhöhten Dosis am Zaun führen. Die Auswertung der am Zaun des KKM angebrachten TLD-Dosimeter ergab eine maximale Erhöhung der Umgebungsdosis von 0.016 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, da sich keine Person dauerhaft an diesen Orten aufhält. Hier ist zu beachten, 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 2023 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 91 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 Abgaben flüssiger radioaktiver Stoffe durch das KKM im Jahr 2023 waren vergleichbar mit denen der Jahre 2017-2019, als das KKM noch in Betrieb war. Die abgegebene Aktivität lag unter dem Zielwert von

1 GBq/Jahr und führte nicht zu einem messbaren Anstieg der Konzentrationen der Aktivierungsprodukte (radioaktive Isotope von Mangan oder Kobalt) in den monatlichen Wasserproben der Aare. Die Auswirkungen der flüssigen Abgaben aus Kernkraftwerken auf die aquatische Umwelt sind hauptsächlich in den Sedimenten messbar. So wurden 2023 in Sedimentproben aus der Aare (Hagneck und Klingnau) und dem Rhein (Pratteln) sporadisch Spuren von ^{54}Mn und ^{60}Co festgestellt. Die gemessenen Aktivitäten sind sehr niedrig und stellen kein Gesundheitsrisiko dar; sie spiegeln die Wirksamkeit der durchgeführten 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).

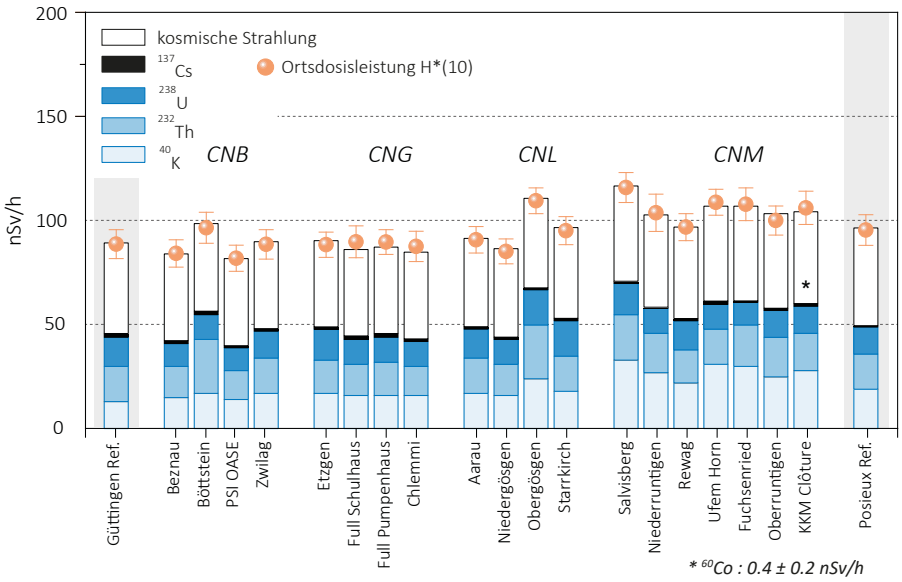
Die vom IRA durchgeführten $^{239+240}$Pu und ^{241}Am Messungen an verschiedenen, stromabwärts der Kernkraftwerke entnommenen Proben der aquatischen Umwelt (Wasser aus Aare und Rhein, Wasserpflanzen, Sedimente) ergaben keinen Hinweis auf einen möglichen Einfluss durch Abgaben der Kernkraftwerke, vielmehr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

Die Monatsmittelwerte für Tritium in der Aare und im Rhein blieben meist unter der Nachweisgrenze von 2 Bq/l mit Ausnahme der Monate April bis Mai, wo wie jedes Jahr eine leichte Erhöhung der Werte in der Aare festgestellt wurde (Höchstwert 10 Bq/l in der Aare bei Brugg im April) und in etwas geringerem Ausmass im Rhein (ca. 4 Bq/l in Weil am Rhein im April). Die Ursache ist die Abgabe von Tritium-haltigem Abwasser durch das KKW Gösgen vor der Revision. Anzumerken ist, dass höhere ^{3}H-Freisetzungen aus dem AKW Beznau im Februar und Mai ebenfalls zu messbaren Erhöhungen der Konzentrationen dieses Radionuklids in der Aare während dieser Zeit führten (bis zu 5 Bq/l im Februar in der Aare bei Klingnau).

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.

Im Drainagewasser des Standortes des ehemaligen Kernreaktors in Lucens wurden seit den verdichteten Kontrollmessungen im Frühling 2012 keine erhöhten Tritiumwerte mehr festgestellt.

Wie die Figur 5 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



Figur 5:
Beiträge zur Ortsdosis (H(10)) durch die verschiedenen Radionuklide, die vom BAG 2023 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.*

Kontaminationen sind vorwiegend eine Folge der Kernwaffenversuche in den 60er-Jahren und des Reaktorunfalls in Tschernobyl (^{137}Cs).

Doch selbst wenn die Exposition der Bevölkerung durch die Emissionen der Kernkraftwerke im Vergleich zu natürlichen oder medizinischen Quellen zu sehr niedrigen Dosen führt (jährliche zusätzliche Dosis 2023 für meistbetroffene Erwachsene von < 0.001 mSv für KKB und KKG bzw. 0.002 mSv für KKM und KKL), 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

Nach dem Wartungsstillstand 2022 nahm das CERN ab Februar 2023 schrittweise alle seiner Anlagen wieder in Betrieb. Ab Mitte Juli musste der LHC für einen Zeitraum von etwa zwei Monaten abgeschaltet werden und der Wartungsstillstand 2023 wurde etwas vorgezogen und begann bereits Mitte November 2023. Das CERN überwacht und bilanziert der Emissionen aus seinen eigenen Anlagen und führt Dosisberechnungen für die Bevölkerung (Referenzgruppen) durch. Diese Überwachung hat für 2023 gezeigt, dass der festgelegte Grenzwert von 0.3 mSv/Jahr eingehalten waren. Die maximale effektive Dosis für die Schweizer Öffentlichkeit blieb unter 0.005 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 2023 sporadisch Spuren der von den CERN-Anlagen produzierten Radionuklide mit kurzer Halbwertszeit, wie die Jod-Isotope ^{126}I und ^{131}I oder Argon-41 (^{41}Ar) nachgewiesen werden. Die gemessenen Konzentrationen waren jedoch sehr gering, für ^{131}I beispielsweise weniger als 0.1 % 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 2023 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 Umweltüberwachung wird vom PSI selber sowie mit unabhängigen Messungen durch die Behörden 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 den Betrieb der Anlagen des Forschungszentrums.

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 2023 haben alle betroffenen Betriebe die in ihren jeweiligen Bewilligungen festgehaltenen Abgabelimiten respektiert. 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.

Wie in der Vergangenheit zeigten die Ergebnisse dieser Überwachung, dass die Tritiumkonzentrationen in der Umwelt (Niederschlag, Lebensmittel) in unmittelbarer Nähe dieser Unternehmen, insbesondere in Niederwangen, signifikant höher waren. Die gemessenen Tritiumwerte in den zweiwöchentlichen Niederschlagsproben aus der unmittelbarer Nähe des Unternehmens lagen 2023 zwischen 40 und 860 Bq/l. Das entspricht maximal etwas mehr als 4 % des in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerts für Tritium in öffentlich zugänglichen Gewässern. Die Tritiumkonzentrationen, die in Destillaten von Milch- sowie Obst- und Gemüseproben (Äpfel, Birnen, Pflaumen, Rhabarber usw.) gemessen wurden, die Ende August 2023 vom Kanton Bern in der Nähe des Unternehmens erhoben wurden, lagen zwischen

8 und 120 Bq/l. Diese Konzentrationen insgesamt etwas tiefer als der Mittelwert der in der Vorjahre.

Die Tritiumkonzentrationen in den wöchentlichen Regenproben von Teufen/AR in der Umgebung der Firma RC Tritec blieben 2023 tief (Median 29 Bq/l), mit einer kleinen Erhöhung im November (Maximum 120 Bq/l).

Ende 2021 initiierten das BAG und die SUVA ein Programm zur Überwachung von Tritium im Niederschlag und in der Luftfeuchtigkeit in der Umgebung des Unternehmens Smolsys in Root/LU, das ebenfalls über eine Bewilligung zur Freisetzung von Tritium in die Umwelt verfügt. Mit einem Höchstwert von rund 80 Bq/l im Niederschlag zeigen die Ergebnisse 2023 im Vergleich zu den im ersten vollen Überwachungsjahr gemessenen Werten eine steigende Tendenz, die mit der Zunahme der Emissionen des Unternehmens korreliert.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 5, 9.1 und 9.3.

Radium-Altlasten

Der Aktionsplan Radium 2015-2023 zielt darauf ab, das Problem der radiologischen Altlasten, die mit dem Setzen von radiumhaltiger Leuchtfarbe in der Uhrenindustrie bis in die 1960er Jahre verbunden sind, zu lösen. Im Jahr 2023 wurden alle Diagnosen und Sanierungen in den ehemaligen Radiumsetzateliers abgeschlossen. Damit kann hier eine Schlussbilanz dieser Arbeiten gezogen werden.

Teilprojekt «Gebäude»

Die historischen Recherchen ergaben ein Inventar von rund 1'100 hauptsächlich im Jurabogen gelegenen Liegenschaften, in denen Radiumsetzateliers angesiedelt waren (siehe historische Recherchen (admin.ch)). Insgesamt wurde in 1'093 Liegenschaften eine Radium-Diagnostik durchgeführt, davon über 50 im Jahr 2023. Damit hat das BAG fast alle Liegenschaften im Inventar untersucht. Nur sieben Eigentümer lehnten eine Diagnoseuntersuchung ab oder reagierten nie auf die Schreiben des BAG.

Ergibt sich aus den Diagnosemessungen, dass die effektive Dosis von 1 mSv pro Jahr für die Bewohner überschritten wird, ist eine Sanierung notwendig. Im Aussenbereich gilt für eine Sanierung ein Schwellenwert von 1'000 Bq/kg für die Konzentration von ^{226}Ra in der Erde.

Die Diagnosemessungen ergaben, dass bei 163 der 1'093 untersuchten Liegenschaften Sanierungsarbeiten erforderlich waren (93 Innenräume und 109 Gärten). Der Anteil der sanierungsbedürftigen Liegenschaften liegt damit bei 15%. In den 93 Innenräumen lagen die berechneten effektiven Dosen für die Bewohner zwischen 1 und 20 mSv/Jahr. Die maximalen Radiumkonzentrationen, die in den Bodenproben aus den 109 sanierungsbedürftigen Gärten gemessen wurden, lagen im Durchschnitt bei 26'500 Bq/kg. In einem Fall wurden rund 670'000 Bq/kg gemessen.

Alle Sanierungsarbeiten konnten erfolgreich abgeschlossen werden bis auf zwei Ausnahmen: Einmal verweigerte der Eigentümer die Sanierung, der andere Fall ist ein stark mit Radium plus chemischen Schadstoffen kontaminierter Industriestandort, dessen Komplexität ein dediziertes Projekt ausserhalb des Aktionsplans erfordert.

Teilprojekt «Deponien»

Ziel des Teilprojekts «Deponien» ist die Identifikation alter Deponien, die möglicherweise mit ^{226}Ra kontaminierte Abfälle enthalten. Ausserdem sollen Massnahmen festgelegt werden, die die Gesundheit der Bevölkerung und des Personals sowie die Umwelt vor den Gefahren solcher Abfälle schützen. Mithilfe der betroffenen Kantone (Bern, Genf, Jura, Neuenburg und Solothurn) und mit dem Bundesamt für Umwelt wurden über 250 ehemalige Deponien identifiziert, die bei künftigen Aushubarbeiten radiologisch überwacht werden müssen. Die entsprechende Liste sowie der technische Bericht sind unter Radium-Altlasten in Deponien (admin.ch) verfügbar. Eine neue Richtlinie des BAG detailliert zudem die Strahlenschutzmassnahmen, die bei Arbeiten auf einer Deponie, die Radiumabfälle enthalten könnte, zu treffen sind. Für diese Richtlinie wurden die Suva, das BAFU und die betroffenen Kantone wurden im Jahr 2023 konsultiert, die Veröffentlichung wird 2024 sein.

Das BAG wird in Zusammenarbeit mit dem BAFU bis Ende 2024 einen Schlussbericht zum Aktionsplan Radium zuhanden des Bundesrates erstellen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.5.

Verwendung von radioaktiven Stoffen in Spitälern

In Spitälern wird bei der Diagnostik und Behandlung von Schilddrüsenerkrankungen ^{131}I verwendet (Halbwertszeit 8 Tage). Jodtherapie-Patienten, die mit weniger als 200 MBq (1 MegaBq = 10^6 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 Abwasserkontrollanlagen gesammelt und erst nach Abklingen unter die bewilligten Immissionsgrenzwerte an die Umwelt abgegeben.

Während ^{131}I in der Schweiz sehr lange das häufigste eingesetzte Radionuklid in der Nuklearmedizin war, steht es heute bezüglich der eingesetzten Aktivität hinter ^{177}Lu (Halbwertszeit ca. 7 Tage), das zur Behandlung von neuroendokrinen Tumoren und Prostatakrebs eingesetzt wird. Nach dem sehr starken Anstieg der Gesamtaktivität von

^{177}Lu im Jahr 2021 (Verdoppelung gegenüber 2020), ist gegenwärtig eine Stabilisierung zu beobachten (11.8 TBq im Jahr 2023 und 10.8 TBq im Jahr 2021). Für einen Vergleich der Radiotoxizität, wird die Aktivität von ^{177}Lu in ^{131}I-Äquivalent berechnet. Für 2023 entspricht die ^{177}Lu Aktivität 0.26 TBq ^{131}I-Äquivalent, gegenüber von 2.38 TBq für das eigentliche ^{131}I. Von der Radiotoxizität her bleibt also ^{131}I das dominierende Radionuklid. Wie bei ^{131}I müssen Patienten, die mit ^{177}Lu behandelt werden, nach der Behandlung mindestens 48 Stunden im Krankenhaus bleiben, und ihre Exkremente werden in Abklingbehältern gesammelt.

Auch ^{90}Y, ^{166}Ho oder ^{223}Ra werden in der Nuklearmedizin zur Behandlung von Krebserkrankungen eingesetzt. Die Verwendung von ^{166}Ho ist relativ neu (erste Anwendungen im Jahr 2020). Die Anwendung von ^{90}Y und ^{223}Ra ist in den letzten 5 bis 10 Jahren deutlich zurückgegangen. Andere Nuklide wie ^{169}Er oder ^{186}Re werden zur Behandlung von rheumatischen 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 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 2023 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).

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 2023 auch kontinuierliche Messungen mit einer automatischen Messsonde im Zulauf der Kläranlage von Bellinzona durchgeführt.

Wie bereits erläutert, werden die in der Radiotherapie verwendeten Nuklide ^{131}I, ^{177}Lu mit Halbwertszeiten von etwa einer Woche in Krankenhäusern in Abklingbehältern zurückgehalten, bis der grösste Teil zerfallen ist, bevor sie in die Umwelt abgegeben werden. Sie treten daher nur sporadisch in der Umwelt auf. Die sehr kurzlebigen Nuklide ^{99m}Tc und ^{18}F/^{68}Ga müssen aufgrund der hohen Immissionsgrenze in Krankenhäusern nicht zurückgehalten werden und erscheinen daher bei den kontinuierlichen Messungen regelmässig. Die kontinuierlichen Messungen zeigten, dass die Immissionsgrenzwerte im Wochenmittel am Eingang der ARA Bellinzona weitgehend eingehalten wurden. Die einzige Ausnahme wurde im Dezember für ^{131}I festgestellt: Der Wochenmittelwert für dieses Radionuklid (18 Bq/l) am Eingang der ARA überschritt den Immissionsgrenzwert (6.7 Bq/l). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser Wert im Vorfluter (lies im Ticino), dem nach der Strahlenschutzverordnung massgeblichen «öffentlich zugänglichen Gewässern», klar eingehalten wurde. Während ^{131}I im Krankenhaus in Abklingtanks gelagert wird, können die Patienten nach der Entlassung aus dem Krankenhaus doch noch einen kleinen Teil der ihnen verabreichten Radioaktivität via Abwasser in die Kanalisation abgeben, weshalb solche Überschreitungen gelegentlich beobachtet werden.

Die kontinuierlichen Messungen in ARAs werden weitergeführt, da sie zusätzliche Informationen zu den Emissionen der Spitäler geben, die insgesamt doch ein nicht zu vernachlässigende Quelle für künstliche Radionuklide in der Umwelt darstellen.

Die Ergebnisse der Tritiummessungen im Wasser der Kläranlagen der großen Schweizer Ballungszentren (Basel, Bern, Zürich, Lausanne) zeigten keine ungewöhnlichen Werte. Wenn gelegentlich höhere ^{3}H-Konzentrationen im Wasser der ARA Basel gemessen wurden, sind diese Erhöhungen (bis zu 325 Bq/l im Mai 2023) auf die Einleitung von Rauchgaswaschwasser aus der Sondermüllverwertungsanlage (RSMVA) Veolia nach der Verbrennung von ^{3}H-haltigem Abfall in die ARA zurückzuführen. Diese Anlage verfügt über eine Genehmigung der Genehmigungsbehörde (FANM/BAG), bis zu 100 GBq ^{3}H pro Woche gemäss Art. 116 der StoV zu verbrennen. Abgesehen von den wenigen erhöhten Werten, die immer

unter 2% des Immissionsgrenzwertes lagen, blieben die ^{3}H-Konzentrationen in der ARA Basel meist unterhalb der Nachweisgrenze von 4 Bq/l.

Die Überwachung 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 die 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. Daher werden Tritiummessungen im Rauchgaswaschwasser von KVAs in grossen Ballungsgebieten durchgeführt. Dabei hat das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt einen ungewöhnlich hohen Tritiumgehalt (ca. 27 kBq/l) in einer wöchentlichen Probe des Rauchgaswaschwassers der KVA Basel gemessen (Probe vom 6. – 12. Juni 2023). Gemäss Schätzung des BAG betrug die gesamte verbrannte Tritiumaktivität 32 GBq, was mehr als dem 100-fachen der bewilligten Limite von 0.3 GBq für Tritium-haltiges Wasser entspricht und somit einen Verstoss gegen die StSV darstellt. Wie bei früheren Vorfällen dieser Art wurde die Fedpol eingeschaltet, doch ist es sehr schwierig, die Herkunft solcher Abfälle nach der Verbrennung zu ermitteln. Weitere Informationen zu diesem radiologischen Ereignis finden Sie auf der Website des BAG [1].

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 dauerhaft 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 226Ra-haltige Abfälle abgelagert wurden, niedrig sind und weit unter dem Immissionsgrenzwert liegen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.3.

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 Wirbelknochen von Menschen bestimmen. Anhand der Resultate der seit rund 40 Jahren durchgeführten Ganzkörpermessungen am Universitätsspital in Genf ist es möglich das natürlich im menschlichen Körper vorkommende ^{40}K zu quantifizieren: 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 4). 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 4) sind deshalb nach Geburtsjahr der Kinder aufgeführt. Dies erklärt, weshalb die Kurven zu den Milchzähnen und jene zur Milch beinahe parallel verlaufen. Es ist anzumerken, dass das Programm zur Messung von ^{90}Sr in Milchzähnen zu Ende geht: Die Aktivitäten sind heute sehr niedrig (< 10 mBq g^{-1} Ca) und es wird immer schwieriger, ausreichende Probengrössen zu erhalten, um solche 90Sr-Werte quantitativ zu bestimmen. 2023 konnten zum ersten Mal seit fast 40 Jahren nicht genügend Milchzähne gesammelt werden um eine ^{90}Sr-Messung durchzuführen..

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 6.1.

Beurteilung

In der Schweiz blieben 2023 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 Umweltradioaktivität bestehen regionale Unterschiede. Die natürliche Radioaktivität wird im Wesentlichen durch die Geologie beeinflusst, aber 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, mehr als 36 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 im Berichtsjahr nachgewiesen.

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 ^{60}Co und ^{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 von auf die Umwelt (Regen und Lebensmittel), insbesondere in Niederwangen. Die 2023 in der Umgebung des betroffenen Unternehmens gemessenen ^{3}H-Konzentrationen in der Umwelt 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. Bei den Abgaben von Radionukliden mit dem Abwasser aus Spitälern 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 die dort tätigen Berufsgruppen oder für die Umwelt darstellen könnten. Allerdings konnten 2023 im Rauchgaswaschwasser der KVA Basel einige ungewöhnlich hohe Tritiumkonzentrationen festgestellt werden, als Folge der Verbrennung von illegal entsorgten Abfällen, die grosse Mengen Tritium enthielten. Wie schon in der Vergangenheit bei ähnlichen Vorfällen in Verbrennungsanlagen wurde eine Untersuchung eingeleitet. Leider erweist es sich als sehr schwierig, die Herkunft von Abfällen, die vorschriftswidrig mit herkömmlichen Abfällen entsorgt wurden, zu ermitteln.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die zusätzliche Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Nachbarschaft von Kernkraftwerken, Forschungseinrichtungen, Industrien und Spitälern sehr gering geblieben ist. Die tiefen Messwerte für künstliche Radionuklide in Umweltproben zeigen ein ordnungsgemässes Funktionieren dieser Betriebe und können als Bestätigung für die Wirksamkeit der Überwachungsprogramme gedeutet werden.

Referenz:

[1] Strahlenschutzereignisse (admin.ch)

Exposition de la population aux rayonnements ionisants

2

Strahlen-exposition der Bevölkerung

• Catégorie
• Origines
• Population générale
• Patients
• Kategorien
• Ursachen
• Allgemeine Bevölkerung
• Patienten
2023

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 Strahlenexpostion 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.

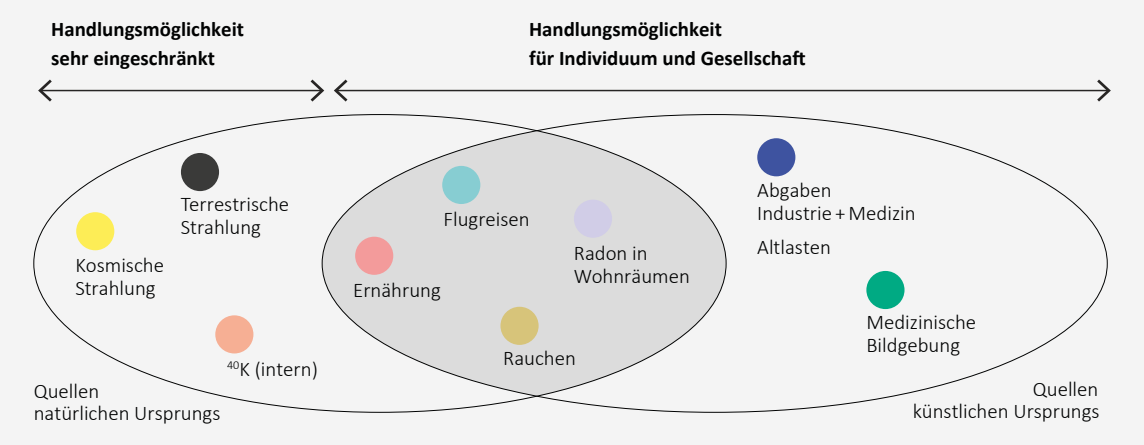


Abbildung 1 :
Die wichtigen Beiträge zur Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung, aufgeteilt nach Möglichkeiten der Einflussnahme durch die einzelne Person oder die Gesellschaft. Unterschieden wird zudem zwischen Quellen natürlichen Ursprungs und künstlichen Ursprungs, wobei die Exposition durch einige natürliche Quellen teilweise auch durch menschliches Verhalten beeinflusst wird (dunkler Hintergrund).

Aus Sicht der öffentlichen Gesundheit ist es daher sinnvoller, die Expositionsquellen 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.

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 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-

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 Lungenkrebsrisikoaufgrund 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/m^3 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-

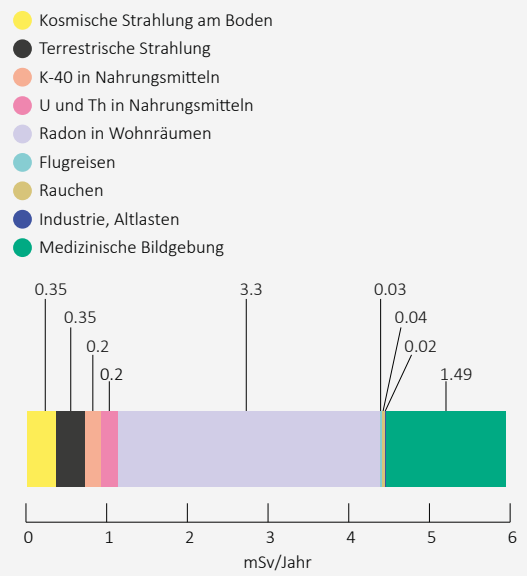


Abbildung 2 :
Durchschnittliche Beiträge zur effektiven Dosis pro Jahr und Einwohner/in der Schweiz in mSv.

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 Person (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 mSv[1] 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

[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

für jede und jeden besser nachvollziehbar, inwiefern 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/m³),

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 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 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).

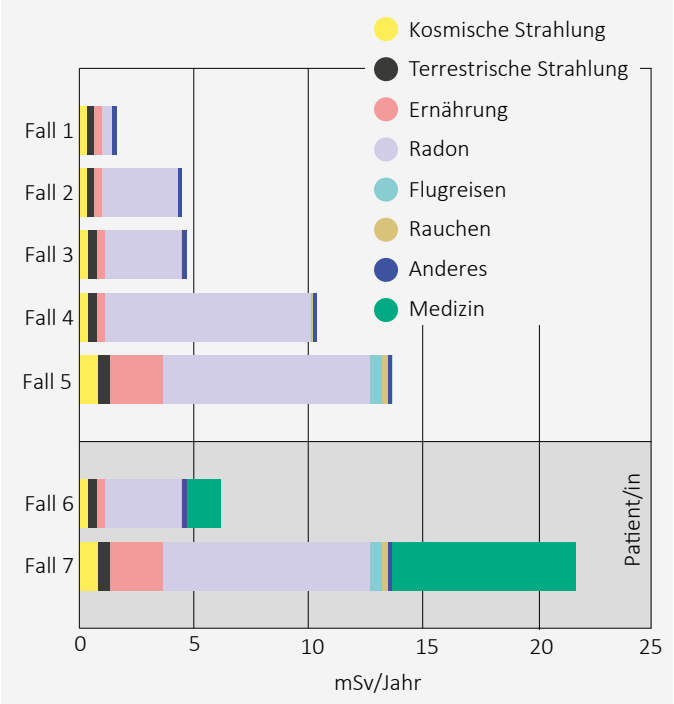


Abbildung 3:
Standardisierte Expositionsszenarien der Bevölkerung mit Angabe der Jahresdosis in mSv.

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 bâtiments, en raison d'une construction mal adaptée, qui est responsable des doses de rayonnement

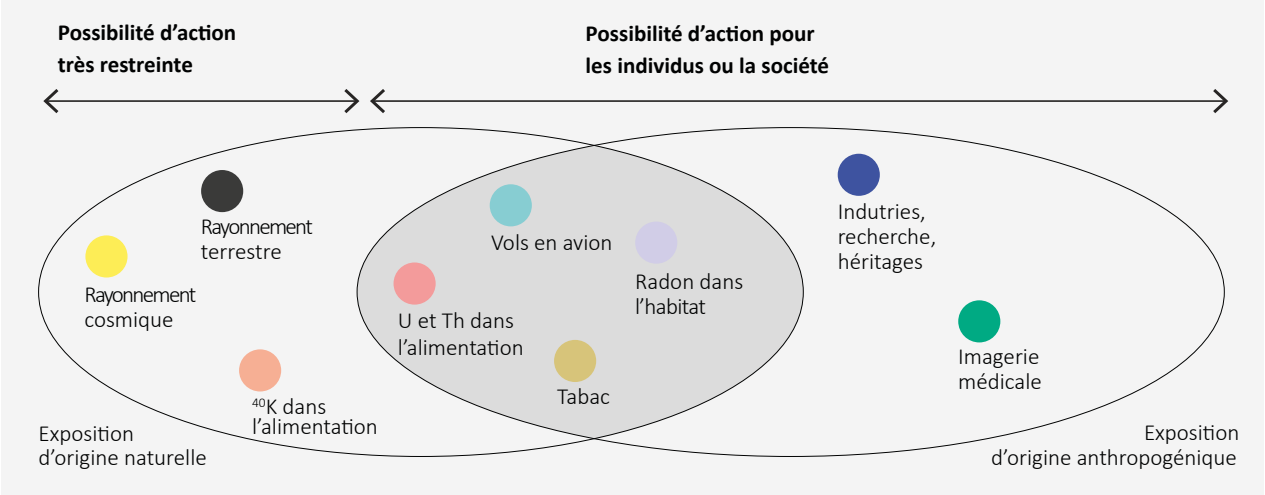


Figure 1 :
Les contributions importantes à l'exposition aux rayonnements de la population générale. Ovale gauche: exposition d'origine naturelle. Ovale droit: exposition d'origine anthropogénique. Zone de chevauchement (fond sombre): la source de rayonnement est d'origine naturelle, mais l'exposition 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.

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 ^{40}K et les autres radionucléides. En effet, le ^{40}K est un radionucléide naturel en équilibre homéostatique: l'autorégulation par l'organisme conduit à une concentration stable de ^{40}K. Un individu est ainsi toujours exposé de la même manière, quel que soit son régime alimentaire. Le ^{40}K 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 ^{210}Po et le ^{210}Pb) ou artificielle (p.ex. le ^{137}Cs et le ^{90}Sr). Contrairement au ^{40}K, 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.

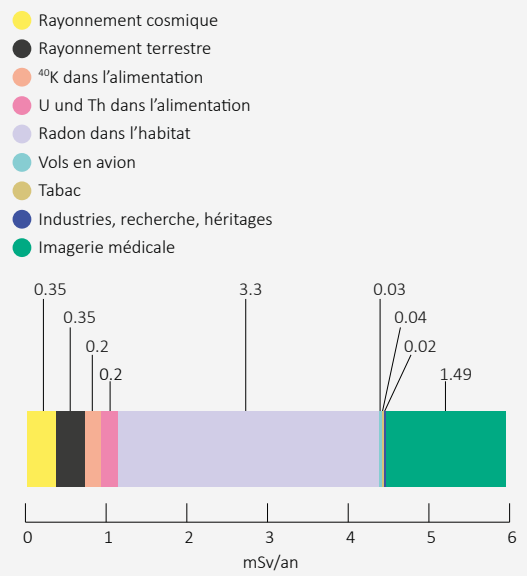


Figure 2 :
Contributions moyennes à la dose efficace (en mSv) par année et par habitant en Suisse.

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 permettent 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 mSv[1] 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/j.ejmp.2020.07.014*

Afin d'illustrer ces différences d'exposition aux rayonnements, quelques scénarios d'exposition fictifs, mais réalistes, 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/m³).

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).

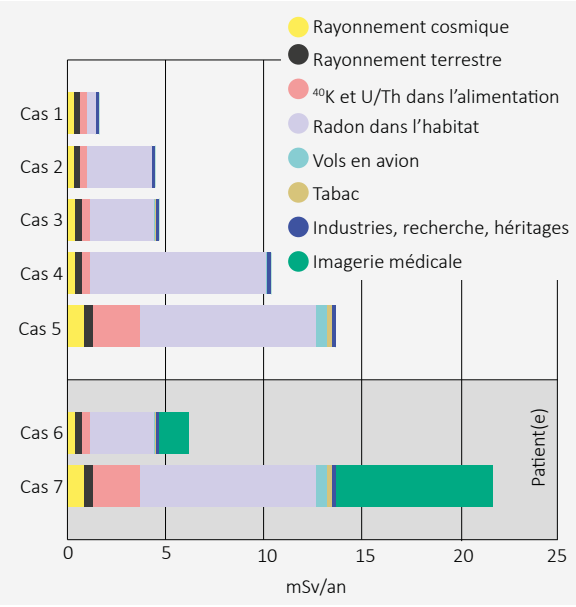


Figure 3 :
Variabilité de l'exposition de la population suisse: dose efficace d'un individu en mSv/an pour 7 scénarios standardisés.

2.3
Radioactivité dans le tabac, dose efficace et effets sur la santé en Suisse

P. Froidevaux,[1] A. Berthet,[2] L. Desogher,[1] Jérémie Rossier,[1] Isabelle Jacot Sadowski[3] et F. Bochud[1]

[1] Institut de radiophysique, CHUV, Lausanne

[2] Centre universitaire de médecine générale et santé publique, Dép. Santé travail et environnement, Epalinges

[3] Centre universitaire de médecine générale et santé publique, unité tabacologie clinique Unisanté, Epalinges

Résumé

Le plomb-210 (^{210}Pb) et le polonium-210 (^{210}Po) sont deux radioéléments présents dans les feuilles de tabac. Lors de la combustion du tabac, ces deux radioéléments, relativement volatiles, sont partiellement transférés dans la fumée du tabac. Les particules de fumée contenant ^{210}Po et ^{210}Pb, de la taille de 0.1 μm à 1 μm environ, sont ensuite déposées dans le système respiratoire, notamment les poumons. L'irradiation des poumons par ces deux radioéléments est en partie responsable des cancers pulmonaires observés chez les fumeurs.

Dans ce travail, nous avons mesuré l'activité en ^{210}Po et ^{210}Pb du tabac vendu en Suisse sous différentes marques ainsi que dans les cigarettes HEETS, consommées dans un système électronique de chauffage du tabac IQOS (PMI). Nous avons ensuite déterminé la fraction de ^{210}Po et ^{210}Pb effectivement transférée dans la fumée inhalée. A l'aide de ces données, nous avons, en utilisant un modèle dosimétrique de calcul de la dose de radiation aux poumons, déterminé la dose efficace due à cette inhalation.

Les résultats montrent que l'activité en ^{210}Po est remarquablement constante pour toutes les marques testées avec une valeur moyenne de 25.2 ± 2.6 mBq par gramme de tabac (n = 15). Les cigarettes HEETS (IQOS) ont une activité similaire (23.7 ± 2.1 mBq.g^{-1}). L'activité en ^{210}Pb est égale à celle du ^{210}Po, ce qui indique la présence d'un équilibre séculaire dans ces produits. La fraction de radioactivité transférée du tabac à la fumée inhalée est de 13.6 ± 4.2% (n = 24) pour le ^{210}Po et de 7% pour le ^{210}Pb lorsque la cigarette est fumée de manière classique. Lorsqu'une cigarette HEETS est fumée dans un système de chauffage IQOS, le transfert à la fumée inhalée est de 1.8 ± 0.3% (n = 8) et de 1.5% pour le ^{210}Pb. En utilisant un appareil de chauffage homogène des cigarettes, nous avons déterminé que la moitié de l'activité en ^{210}Po est perdue à une température de 256°C et plus de 80% de l'activité est volatilisée à partir de 300°C. Le ^{210}Pb, moins volatil, a une température de perte de 50% plus élevée (530°C), mais il faut une température de 800°C, soit la température de combustion d'une cigarette classique, pour volatiliser plus de 80% de ^{210}Pb à partir du tabac.

En utilisant ces données et un modèle dosimétrique numérique, nous avons calculé une dose équivalente aux poumons de 0.3 mSv par an pour un fumeur de 20 cigarettes par jour (1 paquet) dans une modalité de consommation classique. Cette dose représente 1/3 de la limite de dose efficace pour le public (1 mSv/an). Cette dose est divisée par dix (0.03 mSv/an) pour un système IQOS. Toutefois, sur la base d'un bilan de radioactivité et de nos expériences de perte de ^{210}Po et ^{210}Pb au chauffage, nous concluons que le système IQOS ne chauffe qu'une petite fraction du tabac HEETS (environ 15%) à la température cible de 330°C, l'essentiel du tabac étant retrouvé non chauffé.

Introduction

La présence d'éléments radioactifs, notamment du ^{210}Po, dans les produits du tabac, est avérée depuis 1964, grâce aux travaux pionniers de Radford et Hunt [1]. Une seule cigarette contient environ 15 mBq de ^{210}Po, dont une partie va être inhalée et déposée dans l'épithélium bronchial et les alvéoles pulmonaires [2]. En effet, le polonium fait partie des éléments dits métalloïdes dont une caractéristique est la relative volatilité. Le ^{210}Po ($T_{1/2}$=138 jours) appartient à la série de désintégration de l'^{238}U dont un certain nombre de membres peuvent également se retrouver dans le tabac, conséquence de la déposition sur les feuilles de produit de filiation de ^{222}Rn, qui est gazeux, ou par intégration à la plante par transfert racinaire. Ainsi, ^{210}Pb, précurseur direct de ^{210}Po, est présent dans le tabac principalement par la déposition des produits de filiation du ^{222}Rn sur les feuilles [3,4]. Le plomb étant aussi un métal volatil, il va également se retrouver dans la fumée de cigarette, dont la température de combustion atteint 800°C. Le ^{210}Po étant la petite-fille de ^{210}Pb, il se retrouve à l'équilibre radioactif avec ^{210}Pb après environ 1.8 an. Etant donnés les délais dans la manufacture des produits du tabac et leur distribution au public, il est raisonnable d'estimer que ces deux isotopes se retrouvent avec des activités similaires dans les produits du tabac et probablement dans la fumée inhalée.

Les travaux de Radford et Hunt [1] font l'hypothèse d'une déposition de ^{210}Po à la bifurcation des bronches, créant ainsi un « point chaud » de radioactivité, avec une dose équivalente locale qu'ils estiment à environ 360 mSv pour un fumeur de deux paquets de cigarettes par jour durant 25 ans (soit 14 mSv/an). En revanche, en utilisant le modèle de calcul de dose de la Commission internationale de radioprotection (ICRP) avec les données de Radford and Hunt, une dose équivalente au poumon entier de 11 mSv seulement (soit 0.4 mSv/an) a été déterminée [5]. Martell et al. ont été les premiers à s'intéresser au métabolisme de la plante à tabac, afin de déterminer le mécanisme d'accumulation de ces radioéléments dans la plante, et ainsi peut-être trouver une parade à l'incorporation de ^{210}Pb et ^{210}Po [6]. Ces derniers ont démontré que ^{210}Pb se retrouve collé aux trichomes présents à la surface des feuilles, sorte de poils munis d'une substance visqueuse et collante. Par l'hydrophobicité de cette substance, ^{210}Pb ne peut pas être lessivé des feuilles du tabac par la pluie. Si les travaux de Martell et al. démontraient bien l'incorporation de ^{210}Pb par l'intermédiaire d'une déposition d'aérosols radioactifs, il semble toutefois que l'utilisation d'engrais riches en uranium soluble, dont le ^{222}Rn peut facilement s'échapper, a également une importance dans le contenu en ^{210}Po du tabac.

En 1974, les travaux de Little and O'Toole montrent que l'exposition sur plusieurs semaines de hamsters à des aérosols contenant du ^{210}Po, conduit au développement de tumeurs pulmonaires chez 94% des hamsters [7]. L'industrie du tabac n'a pas répondu publiquement à cette vague de recherche des années soixante et septante sur la problématique du ^{210}Po dans le tabac [8]. En l'état de la recherche sur le ^{210}Po dans le tabac au niveau académique, ce dernier était considéré au milieu des années septante comme le responsable principal des cancers pulmonaires des fumeurs. Ces résultats sont en accord avec des découvertes plus récentes qui indiquent que la protection du public contre le ^{222}Rn et ses produits de filiation bénéficie principalement aux fumeurs, probablement parce que l'effet radiotoxique est amplifié par l'inflammation due aux toxiques chimiques présents dans la fumée du tabac [9].

Depuis les années 2000 un certain nombre d'études impliquant le ^{210}Po et le tabac sont parues, semblant indiquer un renouveau dans cette problématique. Les estimations de dose couvrent un large intervalle de valeurs, de quelques µSv jusqu'à 1 mSv par an, en utilisant le modèle ICRP d'inhalation de particules radioactives. Ces larges variations en dose, à l'intérieur de ces dernières études et par rapport aux estimations de dose des années soixante et septante, beaucoup plus péjorant, montrent qu'il n'y a pas de consensus sur le modèle à appliquer pour une réelle estimation de dose. De plus, l'étude de Little et al.[10] impliquant la mesure de ^{210}Po dans des zones particulières de l'épithélium bronchique de fumeurs décédés et la mise en évidence de « points chauds » de radioactivité n'a ainsi jamais été reproduite et de ce fait jamais confirmée, malgré son intérêt évident pour la radiobiologie et les mesures de prévention en santé publique.

Début 2020, l'OFSP a désiré procéder à une évaluation de la situation en Suisse, avec la détermination de la dose efficace aux fumeurs due à la consommation de tabac. L'apparition de nouvelles modalités de consommation, comme le chauffage du tabac (IQOS) a également motivé l'extension de cette étude au système de chauffage IQOS de Philipp Morris, très majoritaire en Suisse, parmi les systèmes HTP (Heated Tobacco Products).

Dans cette étude, nous avons mesuré le ^{210}Po et le ^{210}Pb présents dans le tabac de différentes marques vendues en Suisse, en incluant également les cigarettes HEETS du système IQOS, ainsi que différentes

formes de CBD, devenu légal en Suisse. En utilisant une machine à fumer, qui permet d'imiter le rythme et le volume d'aspiration d'un fumeur tout en collectant les aérosols produits, nous avons déterminé la fraction de ^{210}Po et ^{210}Pb transférée du tabac à la fumée inhalée. Pour simuler un chauffage homogène du tabac dans une cigarette, nous avons développé un appareillage permettant la mesure de la perte de ^{210}Po et ^{210}Pb en fonction de la température, ceci afin de comparer la fraction de ^{210}Po et ^{210}Pb d'un système IQOS et celle d'un chauffage du tabac homogène. Finalement, sur la base des données obtenues, nous avons déterminé, à l'aide d'un modèle dosimétrique impliquant la modélisation du système respiratoire selon l'ICRP, la dose efficace annuelle lors de la consommation d'un paquet (20 cigarettes) par jour.

Méthodes

Les méthodes utilisées pour mesurer ^{210}Po et ^{210}Pb dans les différents échantillons analysés dans cette étude, ainsi que le modèle dosimétrique sont détaillés dans deux publications en libre accès, auquel le lecteur peut se référer (voir en fin de texte).

Tableau 1:

Activité en ^{210}Po (mBq par cigarette et mBq par gramme de tabac, n = 5) dans les cigarettes et dans des mélanges de tabac et de CBD en Suisse. Les valeurs sont la moyenne de 5 réplicas de mesure par produit du tabac.

Produit du tabac	^{210}Po [mBq/cig]	^{210}Po [mBq/g]
Cigarettes conventionnelles		
Camel Filter	15.8 ± 2.0	26.0 ± 3.4
L&M Red Label	13.4 ± 2.6	23.4 ± 3.9
Lucky Strike Red	16.6 ± 1.3	24.8 ± 2.0
Kent Taste+	15.2 ± 0.8	26.9 ± 0.9
Philip Morris Quantum Blue	12.7 ± 0.8	24.2 ± 1.0
Marylong Filter	17.1 ± 0.7	28.0 ± 1.7
Winston Blue	13.5 ± 1.0	27.3 ± 2.1
Marlboro Red	12.7 ± 1.6	21.0 ± 3.2
Parisienne yellow	13.9 ± 1.3	21.9 ± 2.1
Chesterfield Original	14.1 ± 0.6	27.1 ± 0.9
Benson & Hedge (White/Blue)	13.6 ± 2.7	24.3 ± 4.1
Natural American Spirit yellow	15.8 ± 3.6	24.9 ± 5.8
Gauloises Bleues	21.2 ± 2.0	30.1 ± 2.8
Cigarette de référence IR6F	14.0 ± 0.2	22.3 ± 0.4
Produit de tabac chauffé (HTP)		
IQOS® Heets® bronze label[a])	6.9 ± 0.4	23.7 ± 2.1
Produit de la plante de tabac et CBD		
Fleur du Pays N°1 (Yellow)	-	24.5 ± 0.8
Al Capone Cigarillos (CBD)[b])	-	22.3 ± 1.0
Cigar Villiger No 7[c])	-	15.0 ± 0.4

[a]) Une cigarette IQOS Heets contient en moyenne 290 mg of de tabac comparé à 600 mg pour une cigarette conventionnelle cigarettes.

[b]) Un cigarillos Al Capone CBD (mélange de tabac et de CBD) pèse en moyenne 1'240 mg.

[c]) Un cigare Villiger N°7 pèse en moyenne 4'330 mg.

Résultats et discussion

Activité en ^{210}Po et ^{210}Pb des cigarettes et produits du tabac

Treize marques de cigarettes, ainsi que la cigarette de référence 1R6F, l'IQOS Heet (label bronze), quelques produits CBD et quelques échantillons de tabac en vrac ont été testés pour quantifier leur teneur en ^{210}Po (tableau 1). L'activité du ^{210}Po est remarquablement constante dans le tabac conventionnel avec une activité moyenne de 15.0 et un écart-type de 2.3 mBq par cigarette ou 25.2 ± 2.6 mBq g^{-1} de tabac (n = 15). Les échantillons de tabac en vrac présentent des résultats similaires, avec une activité moyenne de 22.5 ± 1.5 mBq g^{-1} de tabac (n = 3). Seuls les échantillons de CBD, ne contenant pas de tabac en tant que tel, présentent une faible activité de ^{210}Po de 1.8 ± 0.2 mBq g^{-1} de produit. Les cigarillos CBD Al Capone contiennent un mélange de tabac et de CBD et présentent donc une activité ^{210}Po proche de celle des échantillons de tabac (22.3 ± 0.2 mBq g^{-1}), en raison de la faible teneur en CBD. L'IQOS Heets a une teneur en ^{210}Po équivalente à celle des cigarettes conventionnelles, soit 23.7 ± 2.1 mBq.g^{-1} de tabac, ce qui prouve que l'origine du tabac est similaire à celle des cigarettes conventionnelles. L'analyse du ^{210}Pb par la méthode de double traçage a montré que l'activité du ^{210}Po est supportée par la présence d'une activité similaire du ^{210}Pb (rapport ^{210}Po/^{210}Pb de 1.06 ± 0.05). Cela démontre que le ^{210}Po et ^{210}Pb sont en équilibre séculaire dans le tabac disponible sur le marché suisse.

Fraction de ^{210}Po et ^{210}Pb transférée dans la fumée inhalée

Les résultats relatifs à neuf marques de cigarettes différentes, y compris 1R6F, ont montré que 13.6 ± 4.2% (n = 24) du ^{210}Po total présent dans la cigarette est transféré à la fumée inhalée. Cette fraction est de 7% pour le ^{210}Pb, moins volatil. Les résultats sont très différents pour l'IQOS. La majorité du ^{210}Po est retrouvée dans le résidu des cigarettes Heets extraites du système électronique après avoir été chauffées (78%). L'activité mesurée dans la fumée inhalée représente 1.8 ± 0.3% (n = 8) du ^{210}Po et 1.5 ± 0.5% du ^{210}Pb. Afin de déterminer si le plus faible pourcentage de radioactivité transmis à la fumée inhalée est le résultat d'un chauffage partiel du tabac par la résistance électrique qui chauffe le tabac à 300 °C dans un système IQOS, nous avons utilisé un appareil de chauffage homogène du tabac afin de mesurer le pourcentage de perte en ^{210}Pb et ^{210}Po en fonction de la température de chauffe (Figure 1).

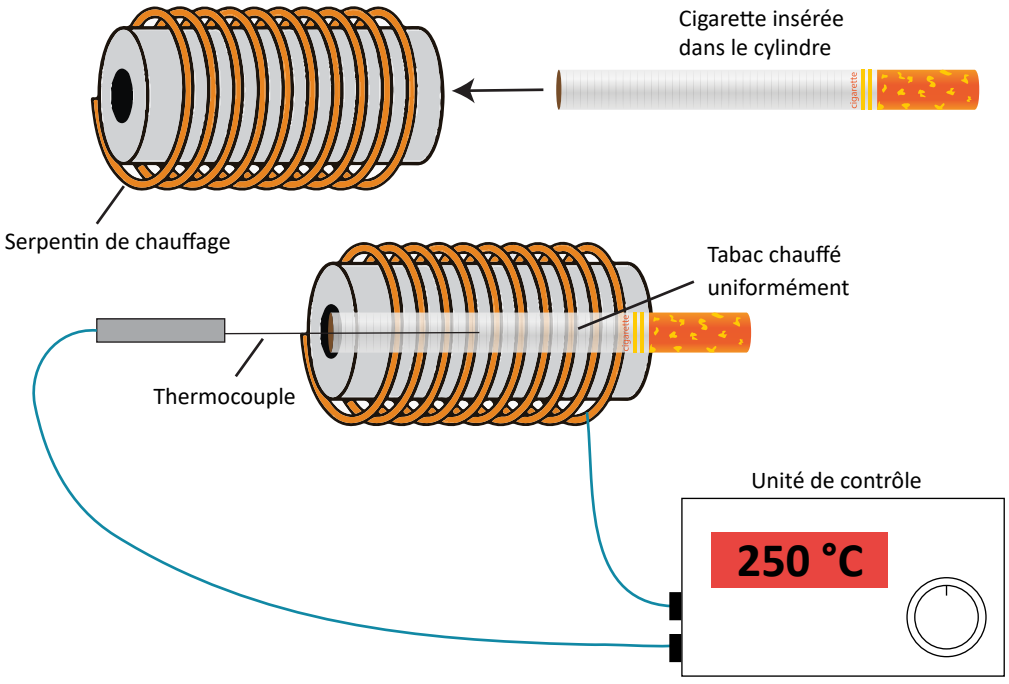


Figure 1:
Système de chauffage homogène du tabac développé dans ce travail pour mesurer la perte en ^{210}Po et ^{210}Pb en fonction de la température. La cigarette est introduite dans un cylindre de cuivre qui est chauffé de manière homogène par un corps de chauffe. La température au centre de la cigarette est mesurée par un thermocouple qui contrôle la valeur cible programmée. La durée de chauffage est fixée à 5 minutes.

Les résultats des mesures sont présentés dans la figure 2.

On constate immédiatement que la température de perte de 50% de l'activité en ^{210}Po par le tabac est atteinte déjà à 256°C. A la température de 300°C, plus de 80% de l'activité en ^{210}Po est perdue par le tabac. Or, à cette température, qui est celle atteinte par le système IQOS, on retrouve plus de 78% de l'activité dans les résidus des cigarettes HEETS. Ce bilan de radioactivité démontre que seulement une petite fraction du tabac, estimée dans ce travail à 15%, est effectivement chauffé à la température de 300°C dans le système IQOS.

Détermination de la dose efficace liée au tabagisme et attribuée à ^{210}Po et ^{210}Pb

Pour mesurer le risque de dommages causés par la radioactivité présente dans la fumée de tabac, il est nécessaire de mettre en œuvre une dosimétrie des rayonnements, qui permette à son tour d'effectuer des comparaisons avec d'autres sources de rayonnement telles que celles utilisées en médecine et celle mesurant l'exposition professionnelle ou l'exposition environnementale. La littérature contient de nombreuses études portant sur la détermination de la dose annuelle au poumon causée par le tabagisme (pour une revue, voir par exemple Laking 2016 [11]). Toutefois, ces études rapportent souvent des résultats contradictoires, utilisant par exemple des facteurs de transfert irréalistes de ^{210}Po du tabac à la fumée inhalée de 100%, ce qui est très surestimé, et manquant souvent d'un calcul rigoureux de la dose. En conséquence, les doses efficaces rapportées couvrent un large éventail de valeurs (de 10 µSv/an a plusieurs mSv/an pour une consommation d'un paquet de cigarettes par jour).

Dans ce travail, nous avons utilisé des données sur la teneur en ^{210}Po et ^{210}Pb de la fumée de tabac déterminée précédemment ainsi que des modèles biocinétiques et dosimétriques pour calculer la dose efficace induite par le tabagisme conventionnel et par l'utilisation d'un appareil HTP (système IQOS). La dose efficace induite par l'inhalation de la fumée de tabac a été calculée selon les modèles

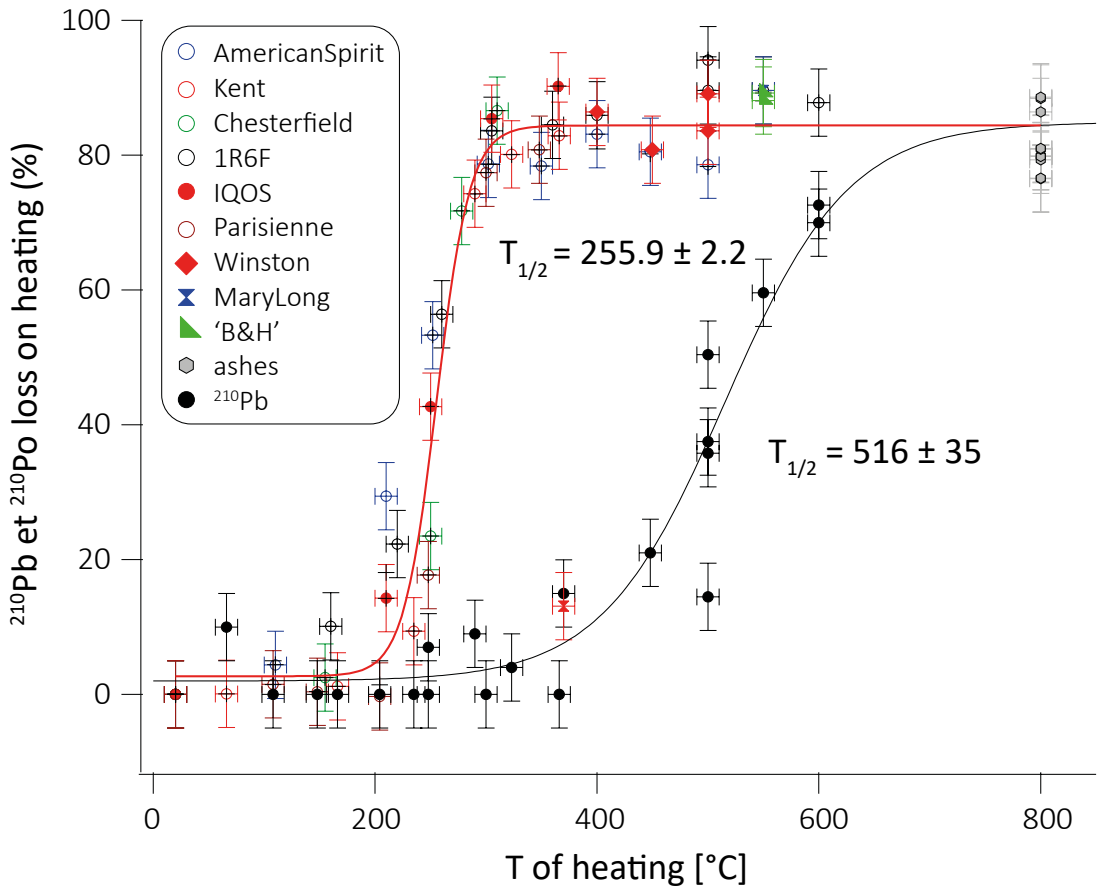


Figure 2 :
Pourcentage (%) de perte de ^{210}Po et ^{210}Pb lors du chauffage pour une cigarette chauffée de manière homogène dans un cylindre de cuivre. $T_{1/2}$ représente la température à laquelle la moitié de l'activité du ^{210}Po ou du ^{210}Pb est perdue par le tabac de la cigarette. 1R6F : grand cercle noir ouvert ; Heets : grand disque rouge fermé. 800 °C a été fixé comme la température maximale atteinte lors du fumage conventionnel (cendres prélevées par un fumeur conventionnel).

biocinétiques et dosimétriques de l'ICRP pour le ^{210}Pb et ^{210}Po. Ces modèles permettent de calculer les activités de ^{210}Pb et ^{210}Po contenues dans chaque organe du corps humain au fil du temps après l'inhalation de la fumée ainsi que la dose efficace résultant de l'émission de particules ionisantes induites par la désintégration des radioisotopes dans les différents organes et tissus. L'originalité de nos calculs a été de combiner les modèles de l'ICRP avec un modèle de dépôt initial du ^{210}Pb et du ^{210}Po dans les voies respiratoires basé sur l'étude de Tiwari et al. [12] sur la distribution des tailles de particules dans la fumée de tabac.

Les résultats montrent que le fait de fumer un paquet de cigarettes par jour induit une dose au poumon d'environ 0.3 mSv/an. Cette dose diminue d'un facteur dix (0.03 mSv/an) pour le système IQOS. Cependant, cette réduction de dose n'est pas obtenue par des contre-mesures spécifiques mais par le fait que le système IQOS ne chauffe que 15% de la charge de tabac à la température cible de 330°C. Si elles étaient chauffées de manière homogène à 300°C, les cigarettes Heets (IQOS) libèreraient environ 80% du ^{210}Po du tabac, comme les cigarettes conventionnelles; ce qui entraînerait des doses similaires pour les poumons, et par voie de conséquence une même dose efficace.

Conclusions

Dans ce travail, nous avons apporté un soin particulier à la mesure de ^{210}Po et ^{210}Pb dans les cigarettes et autres produits du tabac, en incluant la cigarette HEETS utilisée dans le système de chauffage électronique IQOS. Pour un calcul de dose représentatif de la réalité, il est très important de déterminer méticuleusement la fraction de ^{210}Po et ^{210}Pb transférée du tabac à la fumée inhalée. Ceci a été réalisé grâce à l'utilisation d'une machine à fumer qui permet la récupération des aérosols et leur mesure successive. La détermination de la courbe de réponse de la perte au chauffage de ^{210}Po et ^{210}Pb en fonction de la température est essentiel à la comparaison d'un tabagisme classique avec la nouvelle modalité de chauffage du tabac (IQOS). L'application rigoureuse du modèle respiratoire de l'ICRP, associée à une distribution de taille des particules composant la fumée du tabac tiré d'un travail méticuleux de la littérature [12] et aux données obtenues durant cette étude a permis une évaluation de la dose efficace aux poumons que l'on peut considérer comme scientifiquement fondée. La dose efficace déterminée de 0.3 mSv par an pour une consommation quotidienne d'un paquet de 20 cigarettes est proche des valeurs déterminées dans d'autres études [11]. La diminution d'un facteur dix de cette dose lors de l'utilisation du système IQOS est due uniquement au fait que celui-ci ne chauffe qu'une petite fraction du tabac, en contact direct avec la résistance de chauffe, laissant le reste du tabac non impacté. Le fait que la dose de radioactivité due uniquement au ^{210}Po et ^{210}Pb s'approche de la dose limite pour le public de 1.0 mSv/an justifierait donc pleinement d'apposer le sigle de danger de radioactivité (trèfle noir sur fond jaune) sur les paquets de cigarettes [13].

Remerciements

Nous remercions l'Office fédéral de la santé publique, qui a financé cette étude (P.F., contrat n°18.010124 / 434.0000-204/1).

Ce travail a donné lieu à deux publications dans des revues spécialisées auxquelles le lecteur peut accéder librement :

Aurélie Berthet, Audrey Butty, Jérémie Rossier, Isabelle Jacot Sadowski, Pascal Froidevaux. ^{210}Po and ^{210}Pb content in the smoke of Heated Tobacco Products versus Conventional Cigarette smoking. *Scientifc Reports* 2022 12:10314. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14200-2.

Laurent Desorgher, Aurélie Berthet, Jérémie Rossier, François Bochud, Pascal Froidevaux. Dosimetry in the lungs of α-particles (^{210}Po) and β-particles (^{210}Pb) present in the tobacco smoke of conventional cigarettes and heated tobacco products, J. Environ. Radioact. 2023, 263, 107178. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107178.

Références

[1] Radford, E. P. & Hunt, V. R. Polonium-210-Volatile radioelement in cigarettes. Science 143, 247-&, doi:10.1126/science.143.3603.247 (1964).

[2] Tiwari, M., Sahu, S. K., Bhangare, R. C. & Pandit, G. G. Polonium in size fractionated mainstream cigarette smoke, predicted deposition and associated internal radiation dose. J Environ Radioact 162, 251-257, doi:10.1016/j.jenvrad.2016.06.005 (2016)..

[3] Papastefanou, C. Radioactivity of Tobacco Leaves and Radiation Dose Induced from Smoking. International Journal of Environmental Research and Public Health 6, 558-567, doi:10.3390/ijerph6020558 (2009).

[4] Corcho et al. Nature Communications, 2014, 5, article n° 3030.

[5] Martell, E. A. Radioactivity of tobacco trichomes and insoluble cigarette-smoke particles. Nature 249, 215-217, doi:10.1038/249215a0 (1974).

[6] Skrable, K. W. et al. Polonium-210 in cigarette smokers. Science 146, 86-+, doi:10.1126/science.146.3640.86 (1964).

[7] Martell, E. A. Radioactivity of tobacco trichomes and insoluble cigarette-smoke particles. Nature 249, 215-217, doi:10.1038/249215a0 (1974).

[8] Little, J. B. & Otoole, W. F. Respiratory-tract tumors in hamsters induced by benzo(α)pyrene and Po-210 alpha-radiation. Cancer Research 34, 3026-3039 (1974).

[9] Rego, B. The Polonium Brief A Hidden History of Cancer, Radiation, and the Tobacco Industry. Isis 100, 453-484, doi:10.1086/644613 (2009).

[10] Darby,S.etal.Radoninhomesandriskoflungcancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Br. Med. J. 330, 223-226, doi:10.1136/bmj.38308.477650.63 (2005).

[11] Little, J. B., Radford, E. P. & Holtzman, R. B. Polonium-210 in bronchial epithelium of cigarette smokers. Science 155, 606-&, doi:10.1126/science.155.3762.606 (1967).

[12] Laking, G.R., 2019. Human exposure to radioactivity from tobacco smoke: systematic review. Nicotine Tob. Res. 21, 1172–1180. https://doi.org/10.1093/ntr/nty111.$

[13] Tiwari, M., Sahu, S.K., Bhangare, R.C., Pandit, G.G., 2016. Polonium in size fractionated mainstream cigarette smoke, predicted deposition and associated internal radiation dose. J. Environ. Radioact. 162, 251–257. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.005

[14] Swayampakala, K., Thrasher, J.F., Hammond, D., Yong, H.H., Bansal-Travers, M., Krugman, D., Brown, A., Borland, R., Hardin, J., 2015. Pictorial health warning label content and smokers' understanding of smoking-related risks-a cross-country comparison. Health Educ. Res. 30, 35–45. https://doi.org/10.1093/her/cyu022.

Rayonnement externe

3

Externe Strahlung

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

- *In situ Messungen*
- *Netzwerk NADAM*
- *Aeroradiometrische Messungen*

2023

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 2023, les campagnes de mesures de spectrométrie gamma in situ ont principalement ciblé les environs des centrales nucléaires et des centres de recherche tels que le PSI et le CERN. De plus, elles ont visé à surveiller la contamination résiduelle en ^{137}Cs issue des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. Bien que cette contamination demeure plus prononcée au Tessin et dans le nord-est de la Suisse par rapport au Plateau suisse, les résultats pour l'année 2023 n'ont relevé aucune valeur présentant un risque pour la santé du public.

Introduction

En Suisse, la surveillance en continu de l'exposition ambiante s'appuie sur les réseaux NADAM à l'échelle nationale et MADUK au voisinage des installations nucléaires. Ces réseaux automatiques ont pour objectif de détecter, 24 heures sur 24, toute augmentation anormale de l'exposition ambiante. Toutefois, ces réseaux, tout comme les dosimètres à thermoluminescence enregistrent l'exposition ambiante globale sans pouvoir différencier ses composantes individuelles.

Les analyses d'échantillon en laboratoire par spectrométrie gamma visent quant à elles principalement la détection de traces de radionucléides. Ces résultats sont très ponctuels et ne fournissent pas d'informations sur l'exposition ambiante.

Pour pallier 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 ICRU[1], 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 radionucléides 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/m^2], 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 1[2,3].

Tableau 1 :
Facteurs de conversion de l'activité spécifique en débit d'équivalent de dose ambiant H(10) utilisés par l'OFSP pour les séries naturelles de l'^{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 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 H*(10) :

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

où Z est l'altitude en km.

Pour connaître la contribution des radionucléides artificiels au débit d'équivalent de dose ambiant H*(10), deux approches sont possibles. La première consiste à soustraire la contribution d'origine naturelle, calculée précédemment, à la valeur globale de 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.

2 Lemercier et al., «Specific Activity to 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.
3 https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/dokumente/str/kommission-strahlenschutz/stellungnahmen-dosimetrie/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspektrometrie.pdf.download.pdf/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspektrometrie.pdf

Sites examinés en 2023

Conformément au programme de surveillance habituel, en 2023, 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 Mühleberg (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 2023. Les sites additionnels d'Arenenberg/TG, Coglio/TI, San Bernadino/GR et le col du Nufenen complètent la liste des emplacements visités au cours de cette année.

Résultats 2023

Les contributions respectives au débit d'équivalent de dose ambiant 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 2023. 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'apprécier la fiabilité de la reconstitution, la valeur ainsi que l'incertitude de la mesure globale avec chambre d'ionisation sont également représentées.

En 2023, le ^{137}Cs a été le seul émetteur gamma d'origine artificielle mis en évidence sur l'ensemble des sites. Du ^{60}Co a été détectés à la clôture de la centrale nucléaire en démantèlement de Mühleberg et de l'^{41}Ar dans l'air sur deux sites du CERN.

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

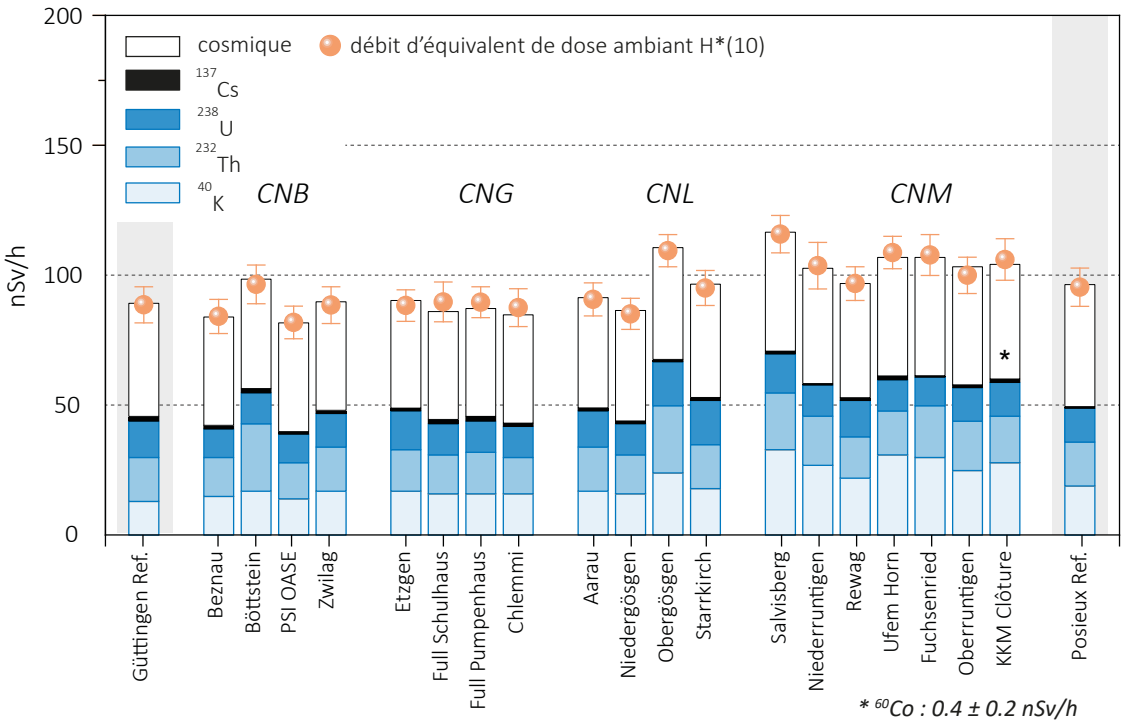


Figure 1 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage des centrales nucléaires suisses en 2023 ainsi qu'aux points de référence de Güttingen/TG et Posieux/FR (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre d'ionisation est également représentée.*

Pour la centrale nucléaire de Mühleberg (suivi 2017-2023, figure 2), mise hors service en septembre 2020, les mesures in situ ont été réalisées en 2023 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 2017-2019 [4] de l'IFSN et l'OFSP, est consultable sur le site internet de l'OFSP.

En sus des quatre sites examinés au cours de la période d'exploitation, ce programme comprend l'analyse de trois points supplémentaires (Fuchsenried, 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 désaffectation devrait être localisé dans un périmètre plus restreint.

En 2023 du ^{60}Co a été détecté au point de mesure situé à proximité de la clôture de la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM). La mesure en laboratoire de l'échantillon de sol prélevé simultanément, n'a révélé aucune trace de ^{60}Co (< 0.6 Bq/kg). Le ^{60}Co visible sur le spectre in situ provenait très certainement, tout comme en 2021, de matériaux du démantèlement entreposés temporairement sur le site de la centrale.

4 https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/dokumente/str/ura/AutresRapports/KKM_NULLPEGELMESSUNG_2017_2019.pdf.download.pdf/KKM_NULLPEGELMESSUNG_2017_2019.pdf

Les valeurs de débit de dose enregistrées lors des mesures in situ au voisinage de la CNM en 2023 étaient toutefois 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).

Pour l'année 2023, 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'autoabsorption 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 2023. 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 aux points de mesure Choully et BAT588.

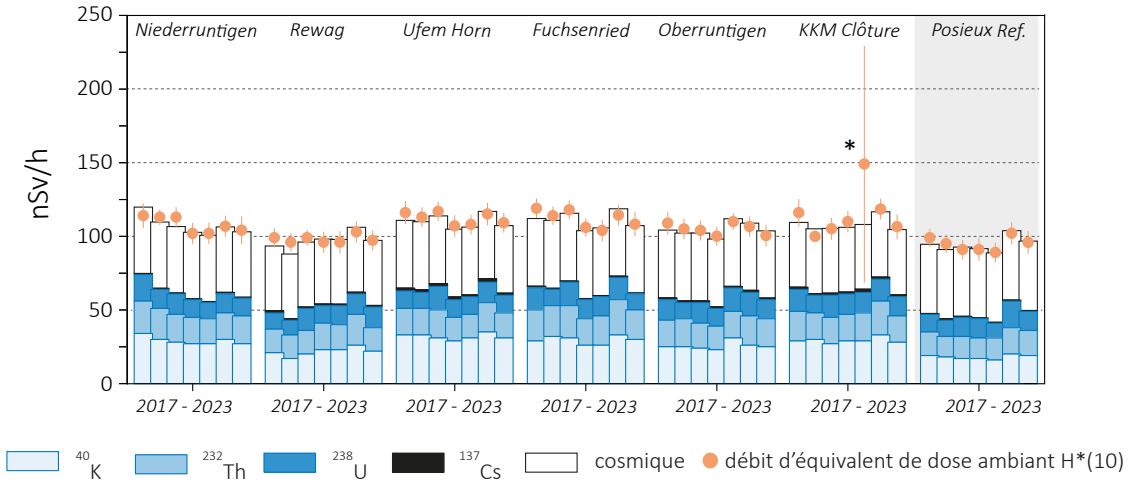


Figure 2:
Suivi 2017-2023 des contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg ainsi qu'au point de référence de Posieux/FR (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.*

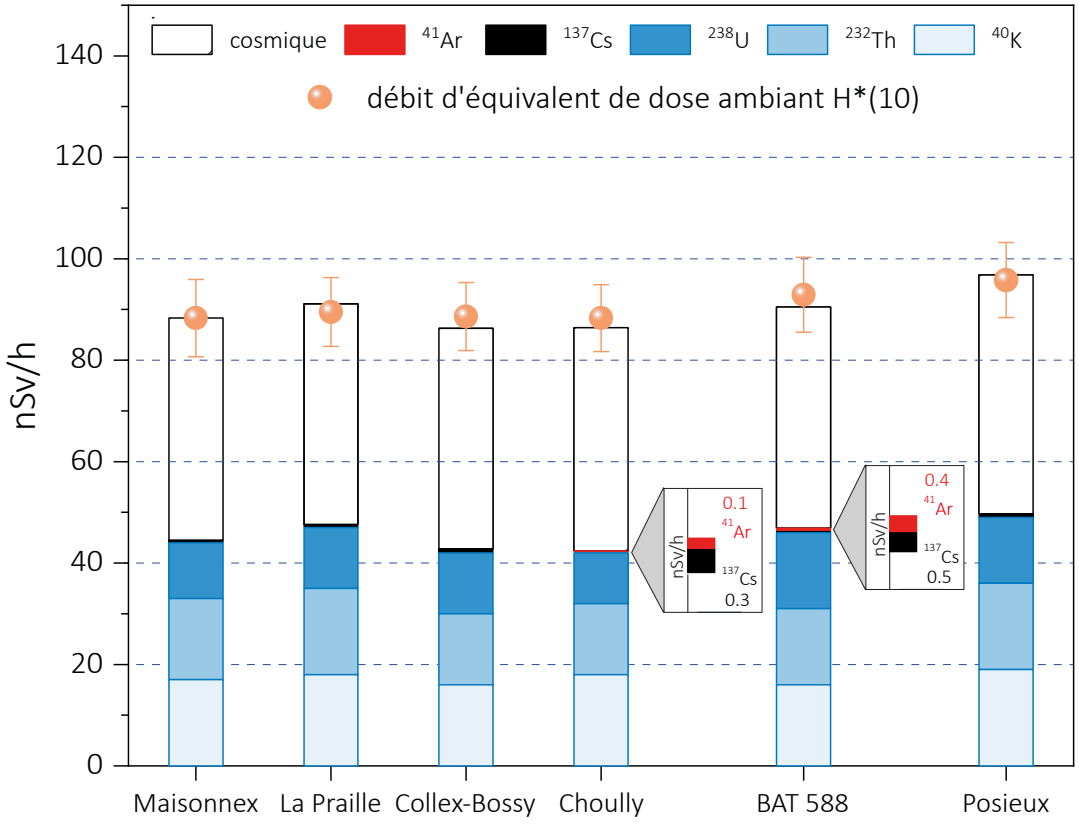


Figure 3 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2023 au voisinage du CERN. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre d'ionisation est également représentée.*

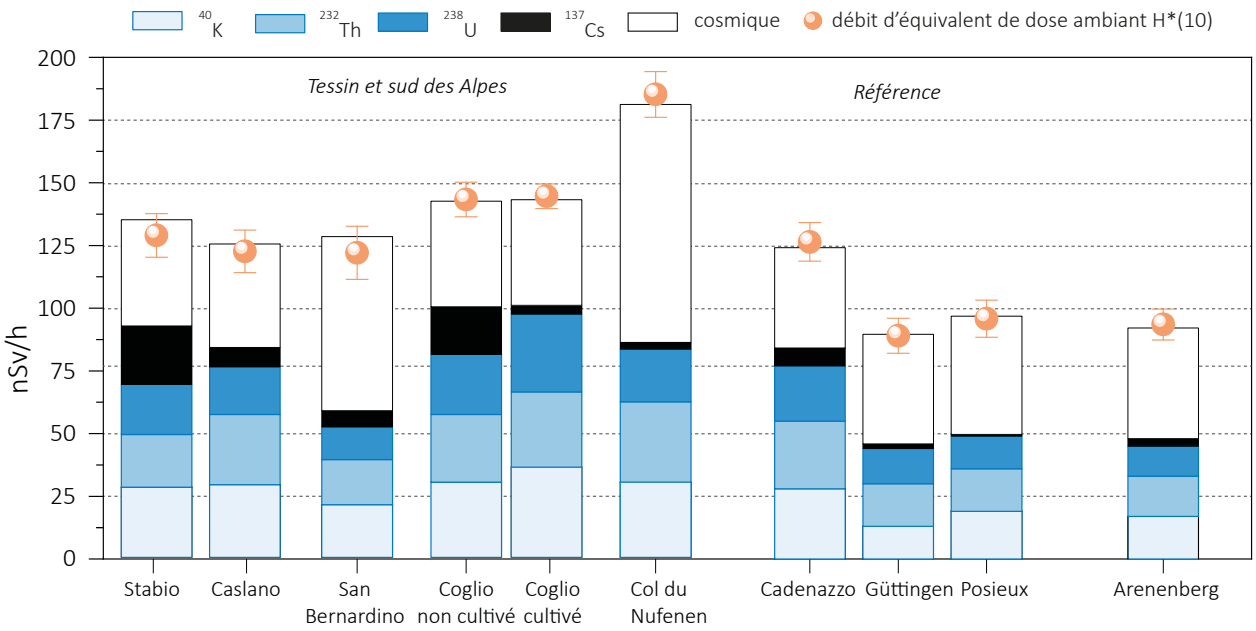


Figure 4 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2023 au sud des Alpes, à Arenenberg / TG ainsi que sur les 3 sites de référence. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant 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. 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.

Un cas particulier illustre bien ce phénomène de disparité. Sur le site de Coglio (figure 5) dans le val Maggia, deux mesures in situ ont été réalisées à moins de 25 m de distance. L'une sur un sol régulièrement cultivé et l'autre sur un sol non cultivé très probablement depuis l'accident de Tchernobyl. Les prélèvements de terre (carottes de 0-5 cm de profondeur, d'un diamètre de 6 cm, réparties sur un rectangle de 2 m^2, lyophilisées, tamisées 0.2 mm) indiquent, comme le montre le tableau 2, des rapports d'activité d'un facteur 12 pour le ^{137}Cs, et d'un facteur 11 pour le ^{90}Sr entre les deux emplacements. Pour les mesures in situ, le facteur est de 6. La zone non cultivée étant très petite, la «vision» d'environ 300 m^2 du spectromètre gamma in situ englobe également des zones non cultivées, ce qui moyenne l'activité du sol.

Tableau 2:

Comparaison des activités en Bq/kg (matière sèche) du ^{137}Cs et du ^{90}Sr sur le site de Coglio/TI pour un sol cultivé et un sol non cultivé en 2023 (mesures URA et IRA).

Type de sol	^{137}Cs [Bq/kg] in situ	^{137}Cs [Bq/kg] prélèvement	^{90}Sr [Bq/kg] prélèvement
cultivé	18.0 ± 2.6	18.5 ± 1.0	0.32 ± 0.09
non cultivé	99.0 ± 10	224 ± 10.6	3.56 ± 0.70

Ce site très contrasté a également été inondé suite à des crues de la rivière Maggia, ce qui a déposé des sédiments et déplacé une partie de la couche supérieure du sol vers la route cantonale. D'où la grande diversité dans la répartition de la contamination. Cet exemple illustre parfaitement, que sans connaissance de l'historique du site examiné, il est très difficile de donner une valeur unique pour de tels terrains et à fortiori pour de plus grandes surfaces.

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.

Figure 5 :
Site de mesure de Coglio dans le val Maggia au Tessin. Vue aérienne et emplacement des mesures in situ et des prélèvements de sols.

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.

Conclusions

Les mesures de spectrométrie gamma in situ réalisées par l'OFSP en 2023 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.

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 die NADAM-Station in La Chaux-de-Fonds (NE) als Beispiel herangezogen, um die Charakteristik der erhobenen Daten und deren Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen zu illustrieren.

Im Jahr 2023 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 und setzt sie ein als zentrales Element für die Bewältigung eines radiologischen oder nuklearen Ereignisses. Dies ermöglicht der EO NAZ den Zugriff auf ein umfangreiches Netzwerk von eigenen und fremden Messressourcen. Dazu zählen sowohl fest installierte Systeme als auch Komponenten, die mobil und flexibel eingesetzt werden können.

Gemäss der Verordnung über den Bevölkerungsschutz (BevSV, SR 520.12) ist die NAZ zuständig für den Betrieb des **N**etzes für die **a**utomatische **D**osisleistungs-**A**larmierung und -**M**essung (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. So kann die EO NAZ bei einem radiologischen Ereignis rasch das gefährdete Gebiet bestimmen, Behörden des betroffenen Kantons orientieren und bei unmittelbarer Gefährdung eine Alarmierung auslösen und Sofortmassnahmen zum Schutz der Bevölkerung anordnen.

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 Stunden- und Tagesmittelwerte berechnet und zweimal täglich auf der Internetseite der 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.

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

Weitere Vorteile dieser Konfiguration liegen in der vorhandenen Infrastruktur für Stromversorgung, Messdatenübermittlung und -speicherung und darin, dass die Wartung der Sonden durch Techniker von MeteoSchweiz erfolgen kann, welche auch andere Systeme auf ihren Stationen betreuen. In diesem Rahmen wird jede Sonde einmal 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, Regensensor, 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 Equipen 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 2023 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.

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 Beeinträchtigun-

gen der terrestrischen Kommunikationsnetze gerechnet werden muss.

Im MADUK-Netz in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen setzt das ENSI baugleiche Sonden ein. 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 im Jahr 2023 mit 196 nSv/h 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 2023 mit 177 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 µSv/h (1 Mikrosievert pro Stunde) liegen.

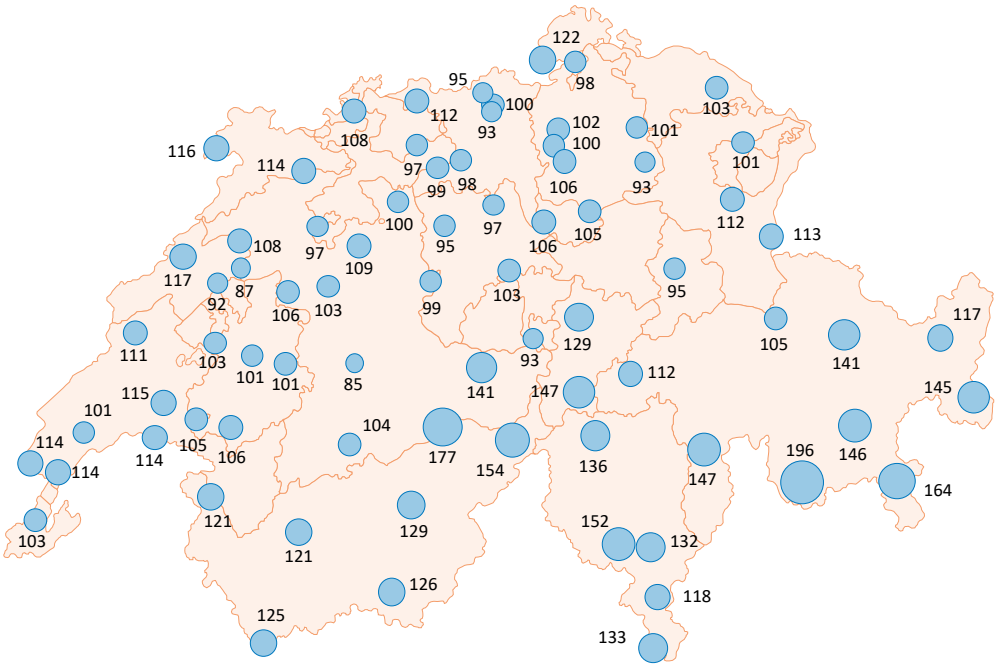
Aus der gemessenen ODL werden auch Mittelwerte für jede volle Stunde und für jeden Kalendertag berechnet. Diese werden ausländischen Partnern zur Verfügung gestellt und online publiziert. Für die Stundenmittelwerte sind ebenfalls Erfahrungsbereiche definiert, welche enger ausfallen als diejenigen für 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 ganze 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 La Chaux-de-Fonds gab es 2023 sowohl im Januar/Februar als auch Anfang Dezember eine Schneedecke und deren Wirkung auf die ODL ist gut zu erkennen. Der auf dieser Station ermittelte ODL-Verlauf wird daher im aktuellen Bericht detaillierter betrachtet.

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



Figur 1:
Karte mit den Jahresmittelwerten 2023 aller NADAM-Sonden in Nanosievert pro Stunde, basierend auf den 10 min-Werten. Der Jahresmittelwert der Ortsdosisleistung variiert je nach Standort zwischen 85 nSv/h in Thun (BE) und 196 nSv/h in Vicosoprano (GR).

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.

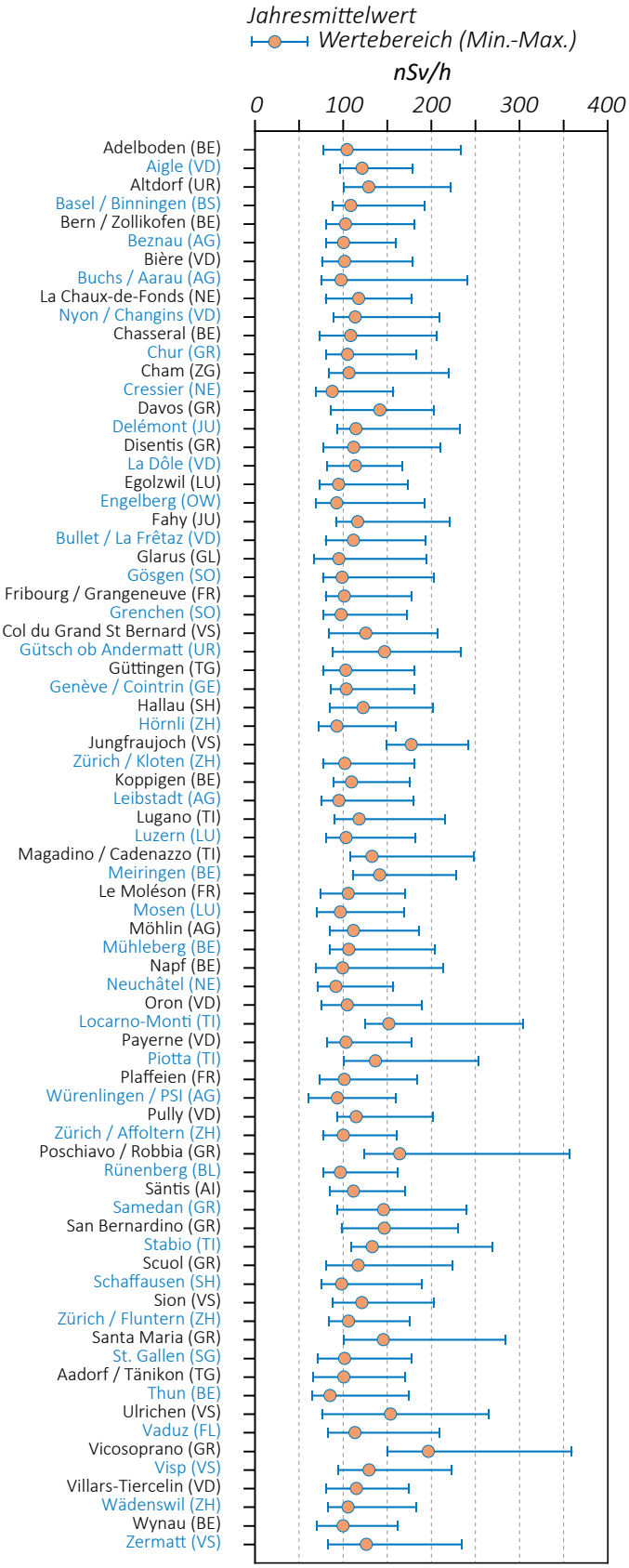
Auch im Jahr 2023 war es so, dass deutlich über dem Jahresmittelwert liegende Maxima während oder unmittelbar nach einsetzendem Niederschlag gemessen wurden, wenn natürlicherweise in der Luft befindliche radioaktive Partikel ausgewaschen und am Boden, d.h. in Sondennähe, deponiert wurden. Dieser Effekt 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 tief unter den Mittelwerten an Standorten mit zeitweise dicker Schneedecke.

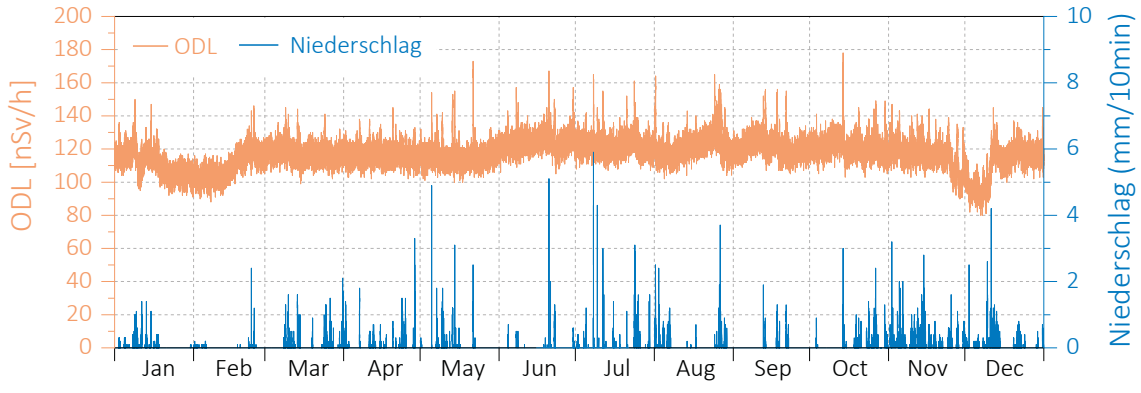
Detaillierte Betrachtung der NADAM-Station La Chaux-de-Fonds

Figur 3 zeigt den Verlauf der ODL-10 min-Mittelwerte in Nanosievert pro Stunde (nSv/h) am Standort La Chaux-de-Fonds (NE) über das ganze Jahr 2023. Ebenfalls aufgetragen und auf der rechten y-Achse skaliert ist die Niederschlagsmenge in Millimetern pro 10 Minuten (mm/10 min). Sowohl der ODL-Jahresmittelwert als auch der häufigste gemessene Wert liegen bei 117 nSv/h. Dazu sind Spikes bis zu einem Maximalwert von 178 nSv/h zu erkennen.

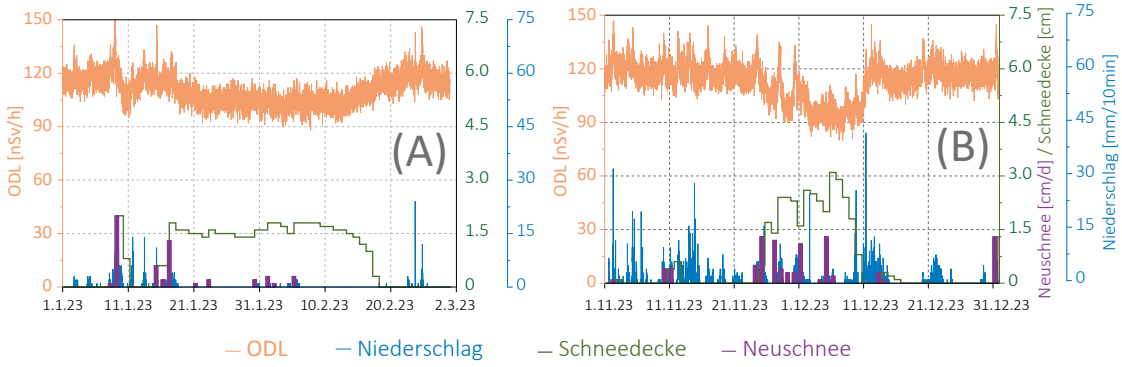
Die ODL-Spikes über 145 nSv/h korrelieren eindeutig mit Niederschlag. Die Höhe der ODL-Spikes korreliert dabei nicht mit der Niederschlagsmenge, da der kurzfristige ODL-Anstieg primär davon abhängt, wie viele partikelgetragene



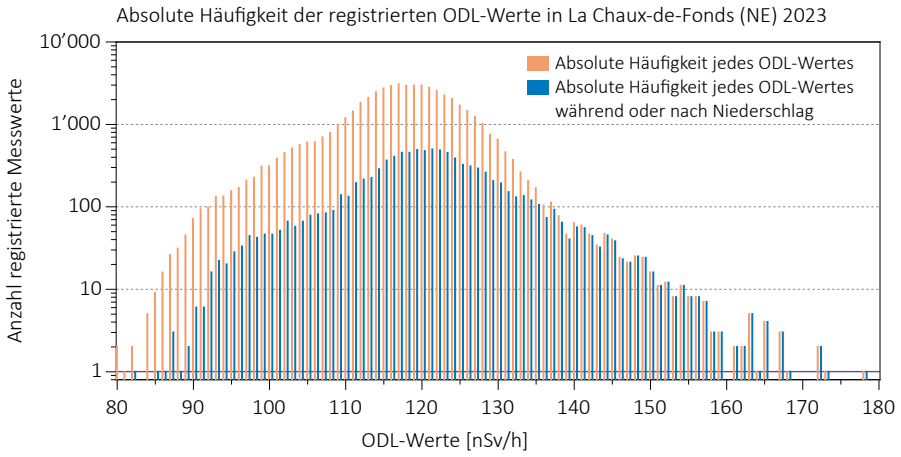
Figur 2:
Jahresmittelwerte und Messwertebereiche der NADAM-Sonden. Der dargestellte Messwertebereich jeder Station entspricht dem Bereich zwischen dem minimalen und dem maximalen 10 min-Wert der Sonden im Jahr 2023.



Figur 3:
Verlauf der 10 min-ODL-Werte (orange, auf der linken y-Achse skaliert) und 10 min-Niederschlagswerte (blau, rechte y-Achse) am Standort La Chaux-de-Fonds (NE) über das Jahr 2023. Die ODL-Spikes jeweils bei einsetzendem Niederschlag sind gut zu erkennen. Die höchste 10 min-ODL von 178 nSv/h wurde am 14.10.2023 zwischen 03:50 und 04:00 UTC bei Niederschlag gemessen.



Figur 4:
Verlauf der 10 min-ODL-Werte (skaliert an der linken y-Achse), der Niederschlagsmenge (skaliert an der rechten y-Achse aussen), Neuschnee und Schneedecke (skaliert an der rechten y-Achse innen) am Standort La Chaux-de-Fonds (NE) im Januar/Februar (A) und November/Dezember (B) 2023. Die Korrelation zwischen Schneedecke und reduzierter ODL ist deutlich zu erkennen.



Figur 5:
Verteilung der 10 min-ODL-Werte am Standort La Chaux-de-Fonds (NE) im Jahr 2023, logarithmisch skaliert. Rot: Alle Messwerte, blau: Messwerte, die zeitnah mit erfolgtem Niederschlag registriert wurden.

Radionuklide (v.a. Zerfallsprodukte von Radon ^{222}Rn) 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 La Chaux-de-Fonds (NE) reicht von 50 bis 250 nSv/h. Im Jahr 2023 wurden an diesem Standort keine Werte ausserhalb dieses Erfahrungsbereiches gemessen.

Mitte Januar bis Mitte Februar und Ende November bis Anfang Dezember sind Perioden zu erkennen, während denen die ODL um ca. 20 nSv/h tiefer war als im restlichen Teil des Jahres. Auf der Wetterstation in La Chaux-de-Fonds wird neben anderen Wetterparametern täglich um 06:00 Uhr UTC der in den vergangenen 24 h gefallene Neuschnee und die Dicke der eventuell vorhandenen Schneedecke gemessen.

In Figur 4 sind die erwähnten Messdaten während der zwei ersten (A) und letzten (B) Monate des Jahres dargestellt. Die ODL ist wiederum auf der linken y-Achse, der Niederschlag auf der rechten y-Achse aussen skaliert, Neuschnee und Schneedecke auf der rechten y-Achse innen. Die Korrelation zwischen Schneedecke und der aufgrund der teilweisen Abschirmung reduzierten ODL ist gut zu erkennen. Erwartungsgemäss ist ebenfalls ersichtlich, dass der Niederschlag in den Perioden mit Schneedecke mehrheitlich als Schneefall erfolgte.

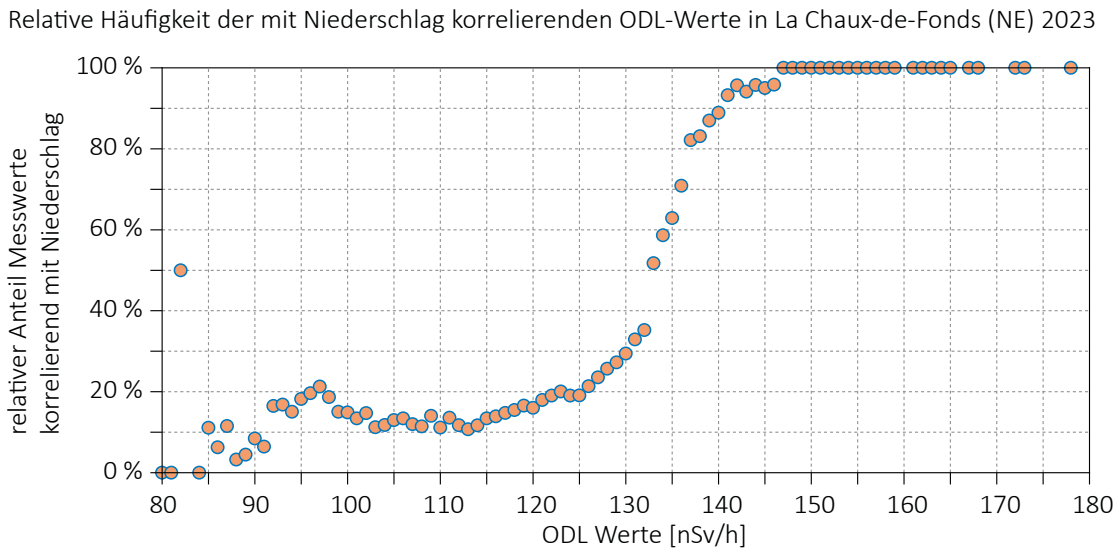
Die Häufigkeit aller in La Chaux-de-Fonds im Jahr 2023 erhobenen ODL-Messwerte ist logarithmisch skaliert in Figur 5 als orange Balken aufgetragen. Der ODL-Wert 117 nSv/h wurde 3’050 mal und damit am häufigsten gemessen. Eine Schulter lässt sich links im Bereich von 90 bis 105 nSv/h erahnen, bedingt durch die Perioden mit aufgrund der Schneedecke reduzierten ODL.

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 140 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 2023 in La Chaux-de-Fonds gemessenen ODL-Werte mit Niederschlag dargestellt. Auch in dieser Darstellung mit der linearen Skala sind oberhalb von 140 nSv/h nur noch einzelne 10 min-ODL-Werte ohne Niederschlag zu erkennen. ODL-Werte von 125 nSv/h oder tiefer wurden nur in weniger als 20% während oder kurz nach Niederschlag gemessen. Der Datenpunkt von 50 % bei 82 nSv/h ergibt sich aus einem einzigen Messwert, der im Dezember gemessen wurde, als eine Schneedecke vorhanden war und gleichzeitig Niederschlag fiel, und einem zweiten ebenso tiefen Messwert, der ebenfalls im Dezember erwartungsgemäss bei trockener Witterung registriert wurde.

Kennzahlen und Eckwerte zu den Messungen im NADAM-Netz im Jahr 2023

Für alle NADAM-Stationen sind für das Jahr 2023 die ODL-Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte in Tabelle 1 zusam-



Figur 6:
Anteil der 10 min-ODL-Werte für die Station La Chaux-de-Fonds (NE) im Jahr 2023, welche innerhalb von 10 min vor oder 50 min nach Niederschlag gemessen wurden. Für Werte oberhalb von 146 nSv/h liegt dieser Anteil bei 1.

mengestellt. 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 2023 an den Standorten Poschiavo / Robbia (GR; niederschlagsbedingter Maximalwert liegt 118% über dem Jahresmittelwert), Adelboden (BE; 124%) und Buchs (AG; 147%) am stärksten ausgeprägt. Die daraus resultierenden Höchstwerte sind auch in Figur 2 dargestellt, als Obergrenze der eingetragenen Messwertbereiche.

Im ausserordentlich trockenen Sommer 2022 waren die Verhältnisse dieser Maxima zu den Jahresmittelwerten an den jeweiligen Stationen tendenziell höher als die entsprechenden Verhältnisse in den letzten Jahren. 2023 waren die ODL-Peaks wieder weniger ausgeprägt und die Maxima liegen weniger weit über den jeweiligen Mittelwerten.

Am Standort La Chaux-de-Fonds (NE) lagen 2023 der Jahresmittelwert und der häufigste Messwert beim selben Wert, nämlich 117 nSv/h, was die Folgerung zulässt, die Wirkung von Faktoren, die eine Erhöhung und Reduktion des ODL-Mittelwertes zur Folge haben, sich ungefähr neutralisiert hat. Mittelwerte, die am Deutlichsten unter den häufigsten Messwerten lagen, wurden 2023 wie schon mehrfach in der Vergangenheit an den schneereichen Standorten Gütsch ob Andermatt (Jahresmittelwert 17.6% unter dem häufigsten Wert), Ulrichen (VS; 12.7% tiefer). Am drittstärksten ausgeprägt war dieser Effekt 2023 in San Bernardino (GR; 4.2% tiefer). Wiederum sind das diejenigen Standorte, die auch die tiefsten ODL-Minima relativ zum Jahresmittelwert aufweisen. Auf dem grossen St. Bernhard lag der häufigste gemessene Wert mit 14.1% am deutlichsten unter dem Jahresmittelwert, wahrscheinlich dadurch bedingt, dass an mehr als der Hälfte der Zeit eine Schneedecke vorhanden war.

Erkenntnisse

Im Jahr 2023 wurden keine Werte gemessen, die auf eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung schliessen lassen. Die NADAM-Sonden sind stabil und zuverlässig. 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 2023 keine grossen Auffälligkeiten.

Tabelle 1: Teil 1
Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte aller NADAM-Stationen im Jahr 2023.

Station	Kanton	Datum Inbetriebnahme	Datum Sondenwechsel NADAM 2020	Höhe [m.ü.M]	Jahresmittelwert	Häufigster Wert	Minimum	Maximum
						[nSv/h		
Adelboden (ABO)	BE	04.11.09	25.07.22	1322	104.2	104	78	233
Aigle (AIG)	VD	09.09.09	07.10.21	382	121.3	119	97	179
Altdorf (ALT)	UR	28.10.09	11.10.21	439	128.8	127	101	222
Basel-Binningen (BAS)	BS	19.11.09	14.10.21	317	108.3	107	88	192
Bern-Zollikofen (BER)	BE	30.09.09	08.06.21	554	102.5	101	81	181
Beznau (BEZ)	AG	19.11.09	25.08.21	327	100.3	98	81	160
Bière (BIE)	VD	12.01.17	15.04.21	684	101.4	100	76	179
Buchs/Aarau (BUS)	AG	20.11.09	14.06.21	388	97.5	95	75	241
La Chaux-de-Fonds (CDF)	NE	17.09.09	13.09.21	1018	117.5	117	80	178
Nyon-Changins (CGI)	VD	23.09.09	29.09.21	459	113.6	109	89	209
Chasseral (CHA)	BE	17.09.09	05.07.22	1594	108.3	112	73	206
Chur (CHU)	GR	09.10.09	12.10.21	557	104.9	103	81	183
Cham (CHZ)	ZG	29.01.18	10.06.21	442	106.4	104	84	220
Cressier (CRM)	NE	03.11.16	01.10.20	431	87.4	86	69	157
Davos (DAV)	GR	08.10.09	02.06.21	1589	141.4	147	86	203
Delémont (DEM)	JU	03.11.16	27.10.21	439	114.4	111	93	232
Disentis/Sedrun (DIS)	GR	28.10.09	21.09.21	1197	111.7	111	78	210
La Dôle (DOL)	VD	23.09.09	16.08.22	1670	113.6	116	82	167
Egolzwil (EGO)	LU	22.09.10	16.08.21	523	94.7	93	73	173
Engelberg (ENG)	OW	30.10.09	01.09.21	1035	92.5	92	69	192
Fahy/Boncourt (FAH)	JU	14.10.09	31.05.21	597	116.2	113	92	221
Bullet/La Frêtaz (FRE)	VD	24.09.09	29.09.20	1206	111.5	112	80	193
Glarus (GLA)	GL	02.12.09	28.06.21	518	95	94	67	194
Gösgen (GOE)	SO	20.11.09	22.06.21	381	98.5	96	77	203
Fribourg / Grangeneuve (GRA)	FR	13.01.17	18.05.21	646	101	99	80	177
Grenchen (GRE)	SO	06.12.10	30.03.21	431	97.4	96	78	172
Col du Gd-St-Bernard (GSB)	VS	09.09.09	30.09.20	2491	125.5	110	84	207
Gütsch ob Andermatt (GUE)	UR	01.09.05	10.08.21	2296	146.7	178	88	233
Güttingen (GUT)	TG	03.12.09	28.10.21	441	102.8	102	77	181
Genève (GVE)	GE	24.09.09	27.10.20	412	103.4	102	86	181
Hallau (HLL)	SH	29.01.18	02.06.21	419	122.3	117	85	202
Hörnli (HOE)	ZH	12.11.09	08.09.21	1133	92.6	91	72	159
Jungfraujoch (JUN)	VS	29.09.09	07.09.21	3581	176.9	173	149	242
Kloten/Zürich (KLO)	ZH	24.11.09	11.11.21	427	101.7	98	77	181
Koppigen (KOP)	BE	13.01.17	27.10.21	484	109.4	105	89	176
Leibstadt (LEI)	AG	19.11.09	22.09.21	342	94.9	93	75	180
Lugano (LUG)	TI	21.10.09	15.12.21	273	117.9	117	90	215
Luzern (LUZ)	LU	05.11.09	29.06.21	455	102.9	101	81	182
Magadino-Cadenazzo (MAG)	TI	22.10.09	27.10.21	204	132.4	129	108	248
Meiringen (MER)	BE	06.10.11	12.10.21	590	141.2	138	111	228
Le Moléson (MLS)	FR	19.08.09	12.05.21	1975	105.5	108	74	170

Tabelle 1: Teil 2
Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte aller NADAM-Stationen im Jahr 2023.

Station	Kanton	Datum Inbetriebnahme	Datum Sondenwechsel NADAM 2020	Höhe [m.ü.M]	Jahresmittelwert	Häufigster Wert	Minimum	Maximum
					[nSv/h			
Mosen (MOA)	LU	19.01.18	13.08.21	452	96.7	94	70	169
Möhlin (MOE)	AG	09.09.10	09.06.21	341	111.6	108	85	186
Mühleberg (MUB)	BE	15.10.09	08.06.21	481	106.1	104	85	204
Napf (NAP)	BE	05.11.09	10.06.21	1405	99.2	101	69	213
Neuchâtel (NEU)	NE	10.12.09	21.09.21	485	91.7	90	71	157
Oron (ORO)	VD	29.02.12	04.06.21	828	104.6	103	75	189
Locarno-Monti (OTL)	TI	22.10.09	22.11.21	368	151.6	151	125	304
Payerne (PAY)	VD	13.08.09	28.09.20	490	103.2	101	82	177
Piotta (PIO)	TI	29.10.09	16.06.22	990	136.3	135	101	253
Plaffeien (PLF)	FR	14.08.09	13.07.22	1043	101.2	102	73	184
Paul Scherrer Institut (PSI)	AG	27.07.11	23.06.21	335	93.3	91	61	160
Pully (PUY)	VD	23.09.09	22.10.21	456	114.5	112	93	202
Zürich-Affoltern (REH)	ZH	13.11.09	26.04.21	444	99.9	98	77	161
Poschiavo-Robbia (ROB)	GR	07.10.09	11.11.21	1079	163.9	156	124	357
Rünenberg (RUE)	BL	20.11.09	07.10.21	612	96.7	95	78	162
Säntis (SAE)	AI	11.11.09	20.10.21	2503	111.5	111	85	170
Samedan (SAM)	GR	25.08.09	24.06.21	1710	145.7	151	93	240
San Bernardino (SBE)	GR	29.10.09	06.07.21	1640	146.6	153	98	230
Stabio (SBO)	TI	21.10.09	25.08.22	352	132.9	131	109	269
Scuol (SCU)	GR	27.08.09	10.06.21	1305	116.9	117	81	224
Schaffhausen (SHA)	SH	04.12.09	26.08.21	439	98.1	96	75	189
Sion (SIO)	VS	10.09.09	10.11.21	482	121	119	88	203
Zürich-Fluntern (SMA)	ZH	24.11.09	04.11.21	557	106	104	84	175
Santa Maria (SMM)	GR	15.12.11	01.07.21	1385	145.4	146	101	284
St. Gallen (STG)	SG	12.11.09	07.09.21	777	101.5	99	71	177
Aadorf/Tänikon (TAE)	TG	03.12.09	08.03.22	539	100.6	99	66	170
Thun (THU)	BE	29.01.18	15.10.21	570	85	84	65	174
Ulrichen (ULR)	VS	04.11.09	18.08.21	1347	153.6	176	76	265
Vaduz (VAD)	FL	03.12.09	30.09.21	458	113.1	108	83	209
Vicosoprano (VIO)	GR	06.02.13	23.09.21	1089	196.4	191	150	359
Visp (VIS)	VS	11.09.09	20.09.21	640	129.1	126	94	223
Villars-Tiercelin (VIT)	VD	29.01.18	26.08.22	859	114.8	115	81	174
Wädenswil (WAE)	ZH	02.12.09	11.05.22	487	105.3	103	83	183
Wynau (WYN)	BE	15.10.09	02.06.21	423	99.6	97	70	162
Zermatt (ZER)	VS	11.09.09	11.07.22	1640	126.2	130	83	234

3.3
Aeroradiometrische Messungen

B. Bucher
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg
G. Butterweck, 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
St. Maillard
Kompetenzzentrum ABC-KAMIR, Spiez

Zusammenfassung

Bei den Messflügen im Juni und September 2023 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Gösgen (KKG) und Mühleberg (KKM) abgedeckt. Zudem wurden die Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 südlich des KKG bis 50 km Distanz ergänzt. Die Ergebnisse bei den Kernkraftwerken lagen im Bereich der Ergebnisse aus früheren Jahren. Weitere Messflüge erfolgten im Kanton St. Gallen und Zürich (Rapperswil und Umgebung), in Graubünden (Landquart, Klosters) und in der Westschweiz (Bercher, Estavayer, Noreaz, Monthey). In diesen Arealen wurden Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse registriert.

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 Radionukliden an Bord 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 (NEOC) und militärisch unter der Regie des Kompetenzzentrums ABC-KAMIR der Armee. Zum Training der ARM-Teams, bestehend aus Operatoren (Messspezialisten an Bord), Piloten und Bodenpersonal, werden jährlich von der NAZ und dem Kompetenzzentrum ABC-KAMIR der Armee Übungsmessflüge durchgeführt.

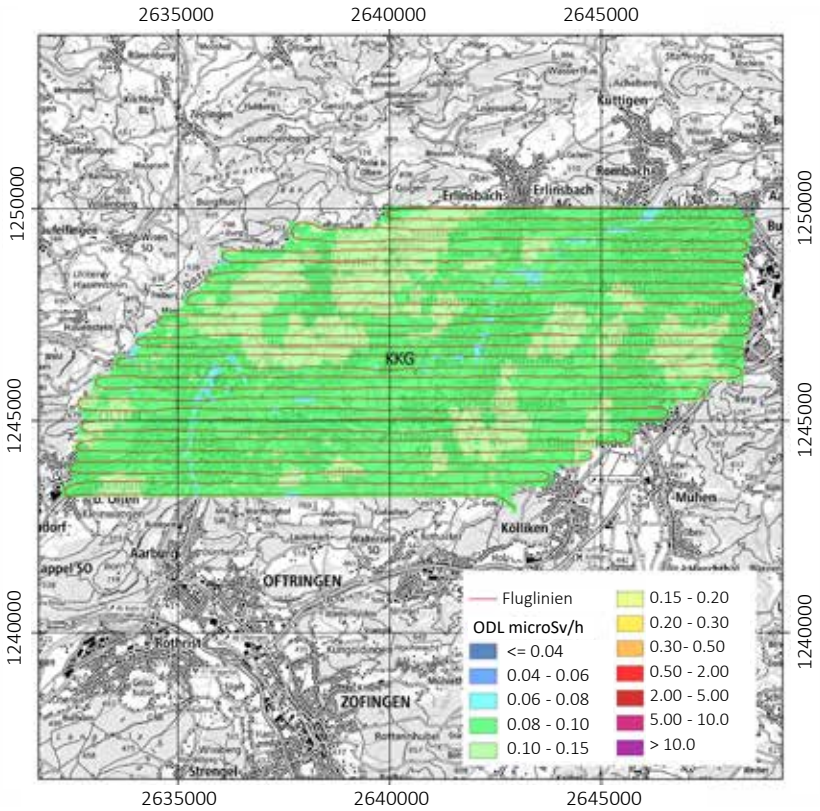
Im Jahre 2010 (Bucher & Rybach, 2010) wurde mithilfe der Auswertung der Langzeitdaten die Nachweisgrenze der Messmethode ermittelt: Erhöhungen von 0.02 μSv/h werden in 95 von 100 Fällen erkannt (Vertrauensbereich 95%).

Mit den Messflügen 2018 erfolgte die Ablösung der alten Ausrüstung durch ein Messsystem der Firma Mirion, welches durch die RUAG im Super Puma Helikopter der Schweizer Luftwaffe integriert wurde. Dieses wurde in den vorangehenden Messübungen eingehend getestet und die Ergebnisse mit denen des alten Systems verifiziert. Das neue System steht in vierfacher Ausführung für die Aufgaben der NAZ sowie des Kompetenzzentrums ABC-KAMIR der Armee zur Verfügung. Wartung und Unterhalt erfolgen in Zusammenarbeit mit den Lieferanten.

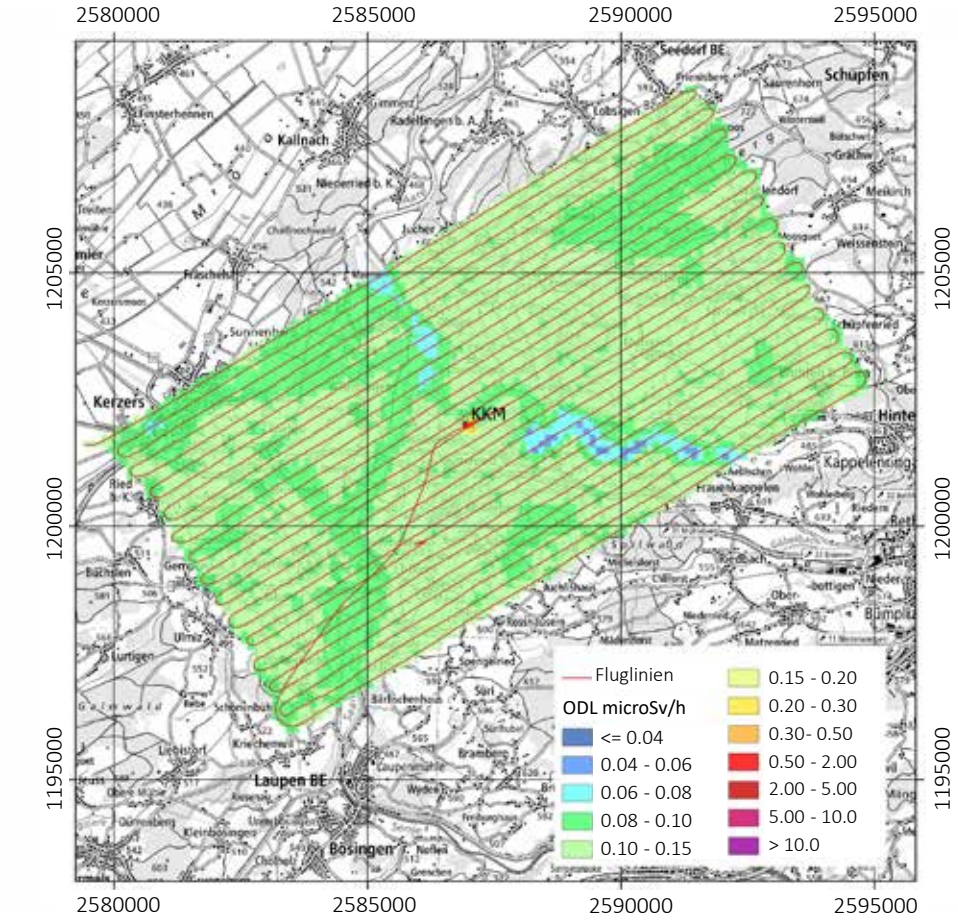
Messungen und Messresultate 2023

Bei den Messflügen im Juni und September 2023 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Gösgen (KKG) und Mühleberg (KKM) abgedeckt. Das Standardmessprogramm um das KKG wurde gegenüber den Vorjahren erweitert, um die Städte Olten und Aarau vollständig abzudecken. Zudem wurden die Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 südlich des KKG bis 50 km Distanz ergänzt. Weitere Messflüge erfolgten über Rapperswil und Umgebung (Kantone St. Gallen und Zürich), in Graubünden (Landquart, Klosters), in der Westschweiz (Bercher, Estavayer, Noreaz, Monthey). Beide Teams führten auch Trainingsflüge zur Ortung von radioaktiven Quellen durch, die nicht Gegenstand dieses vorliegenden Berichtes sind. Die detaillierten Ergebnisse sämtlicher Messungen wurden im PSI-Bericht 24-02 im März 2024 publiziert (Butterweck et al., 2024). Dieser ist auch auf der Webseite der Fachgruppe Aeroradiometrie unter https://far.ensi.ch verfügbar.

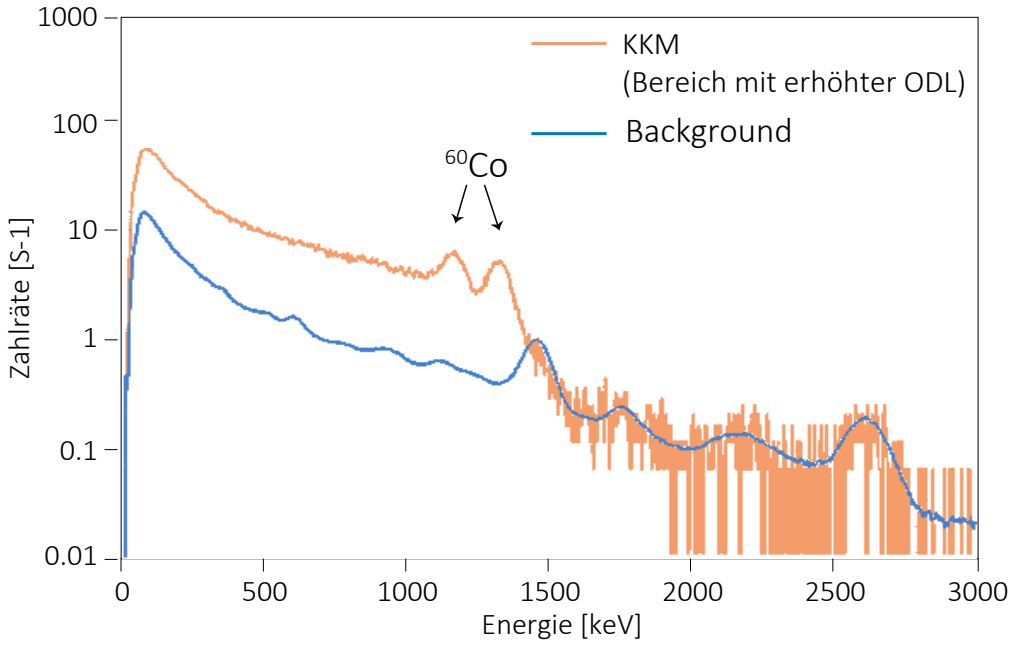
Die Messresultate in den Messgebieten KKG und KKM zeigten ein ähnliches Bild wie in vorangegangenen Messkampagnen. Im Bereich des KKG sind keine besonderen Werte bei der Ortsdosisleistung (Figur 1) zu erkennen. Das KKG mit seinem Druckwasserreaktor konnte aeroradiometrisch weder aufgrund der Ortsdosisleistung (Figur 1) noch aufgrund des Man Made Gross Count (MMGC) Verhältnisses erkannt werden. Das MMGC-Verhältnis steht für den Quotienten der Zählraten im Energiebereich von 400 - 1’400 Kiloelektronenvolt [keV] und 1’400 - 3’000 keV. Da die meisten Spaltprodukte Gammalinien im Energiebereich unterhalb von 1’400 keV aufweisen, stellt das MMGC-Verhältnis ein empfindliches Instrument zur Lokalisierung künstlicher Radionuklide dar.



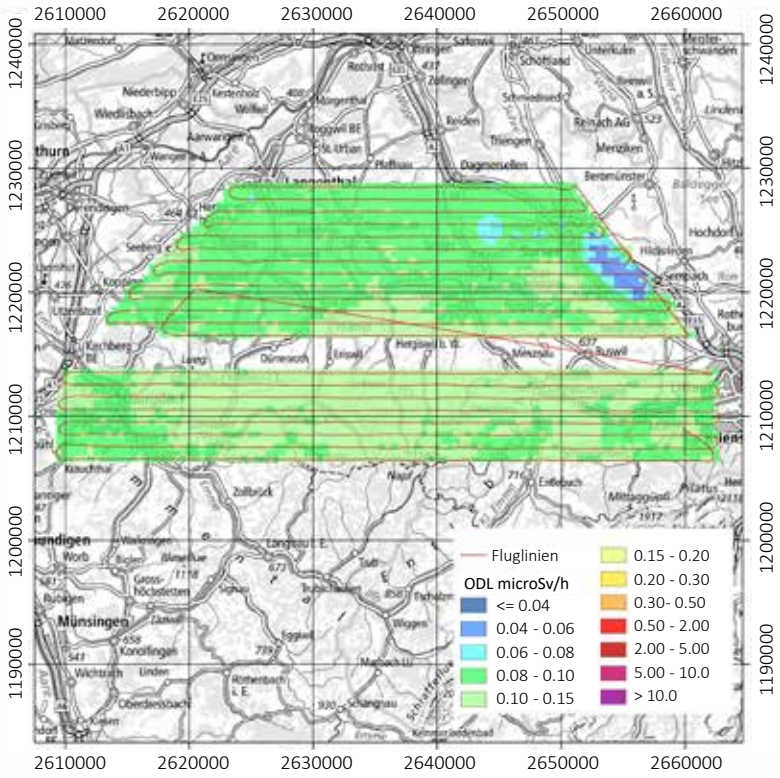
Figur 1:
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2023 im Messgebiet KKG. Kartendaten PK100 © swisstopo.*



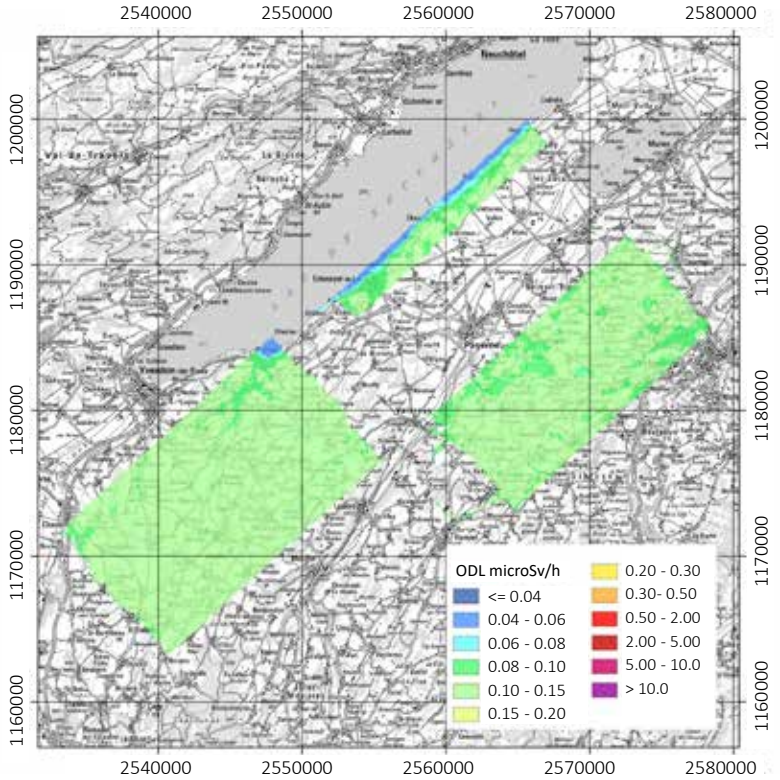
Figur 2:
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2023 im Messgebiet KKM. Kartendaten PK100 © swisstopo.*



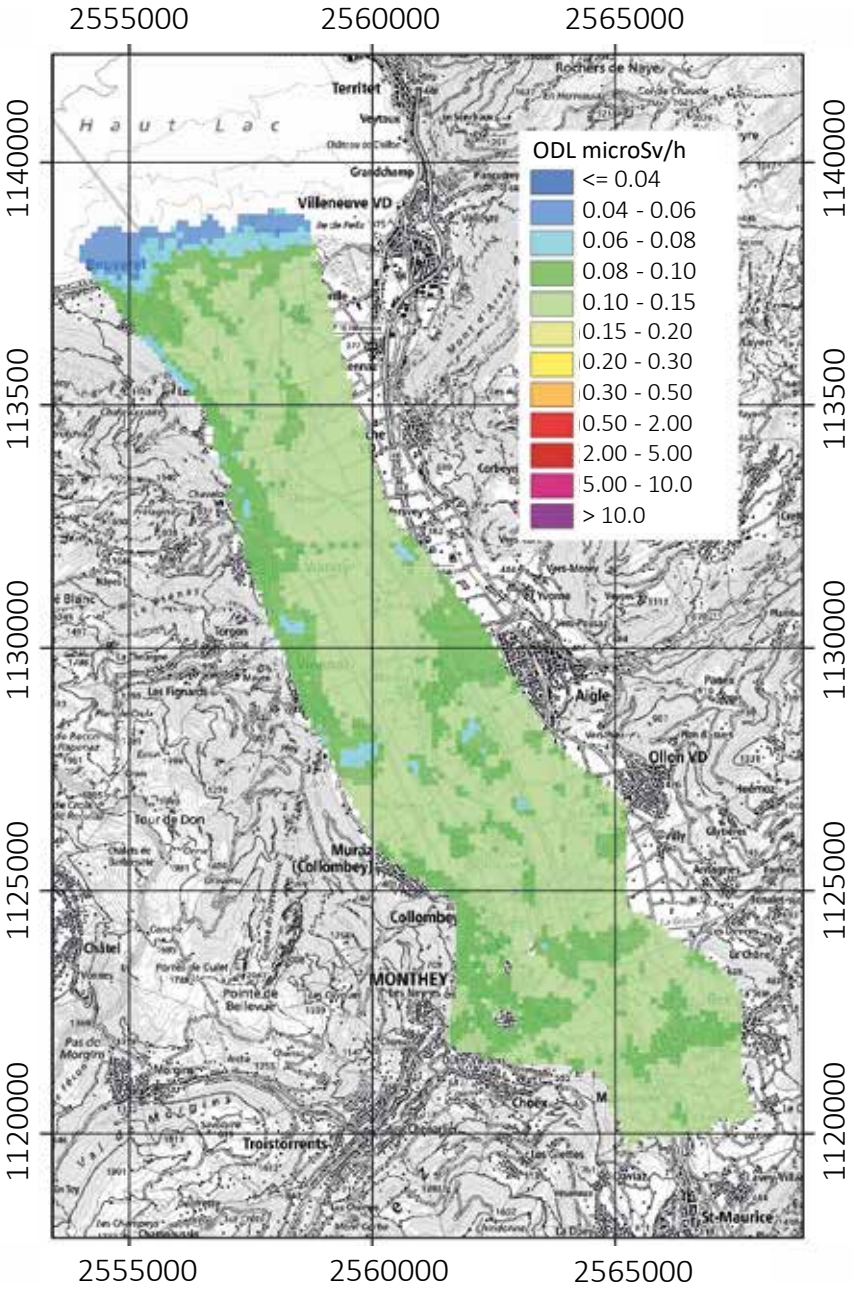
Figur 3:
Gemittelte Spektren im Bereich der erhöhten ODL beim KKM und in der weiteren Umgebung (Background).



Figur 4 :
Ortsdosisleistung 2023 H(10) in den Messgebieten ausserhalb der Notfallschutzzone 2 südlich des KKG.*
Kartendaten PK500 © swisstopo.



Figur 5 :
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2023 in den Messgebieten in der Nähe des Neuenburgersees.*
Kartendaten PK200 © swisstopo.

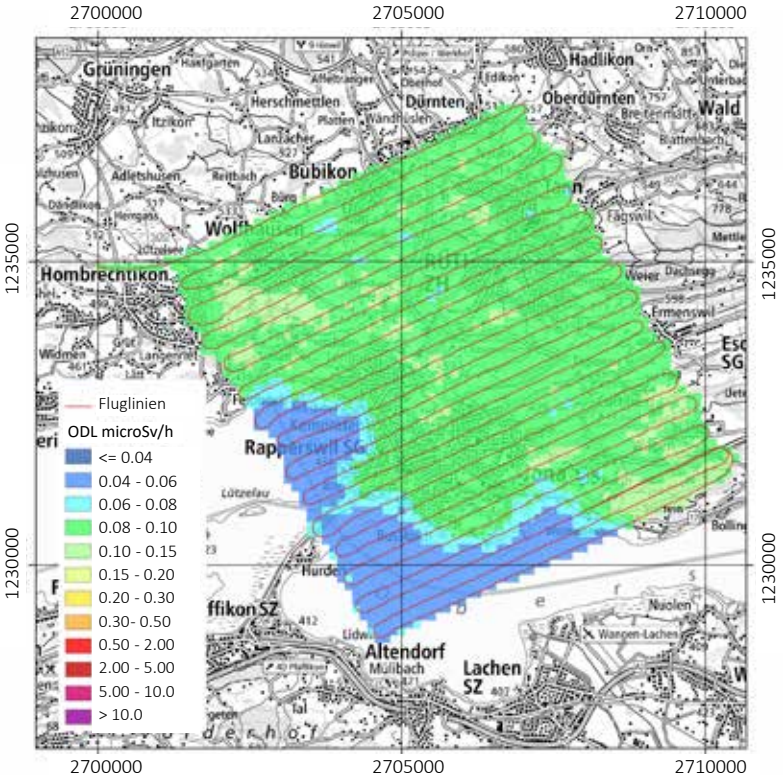


Figur 6:
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2023 im Messgebiet bei Monthey. Kartendaten PK200 © swisstopo.*

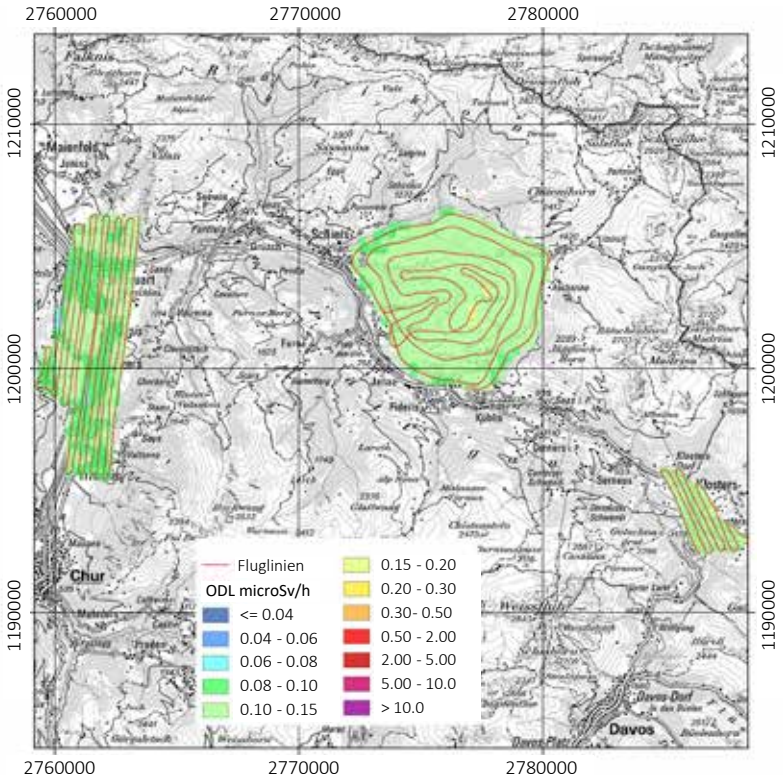
Im Messgebiet KKM sind am Standort des KKM in der Ortsdosisleistungskarte (Figur 2) leichte Erhöhungen mit einem Maximalwert von rund 0.52 µSv/h erkennbar. Das KKM befindet sich im Rückbau. Dabei werden Komponenten ausgebaut und auf dem Werksareal zwischengelagert. Diese enthalten teilweise das Aktivierungsprodukt ^{60}Co, welches in den gemessenen Spektren auch identifiziert werden kann (Figur 3). Die Ortsdosisleistungen ausserhalb des Zauns vom KKM werden regelmässig überprüft und entsprechen den gesetzlichen Vorgaben (siehe Kapitel 8.1). Andere erhöhte Werte waren nicht erkennbar. Weitere Unterschiede in der Ortsdosisleistung sind auf Einflüsse der Topographie wie Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen.

Im Messgebiet ausserhalb der Notfallschutzzone 2 des KKG liegen die Messwerte im erwarteten Bereich. Unterschiede sind auf Einflüsse der Topographie wie Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen (Figur 4). Aufgrund der ungünstigen Witterung und fehlender Flugzeit konnte das Messgebiet nicht vollständig abgeflogen werden. Die zwei fehlenden Messlinien werden in einem anderen Jahr ergänzt.

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 5, 6, 7 und 8 sind



Figur 7 :
Ortsdosisleistung 2023 H(10) im Messgebiet Rapperswil und Umgebung. Kartendaten PK100 © swisstopo.*



Figur 8 :
Ortsdosisleistung H(10) in Jahr 2023 in den Messgebieten bei Landquart, Klosters und dem Berg Chrüz bei Schiers. Kartendaten PK200 © swisstopo.*

die Ortsdosisleistungskarten der Messungen in der Westschweiz (Figuren 5 und 6), über Rapperswil-Jona SG und Rüti ZH (Figur 7) und in Graubünden bei Landquart, Klosters und Schiers (Figur 8) dargestellt.

Im Ereignisfall könnte es nützlich sein, auch Kontaminationen von landwirtschaftlich genutzten Flächen wie Alpwiesen zu erfassen. Deshalb wurde beim Berg Chrüz in der Nähe von Schiers (Figur 8) ein neues Messverfahren bei starker Topographie getestet. Bei diesem Messverfahren folgt der Helikopter möglichst den Höhenlinien, anstatt die sonst üblichen parallelen Linien abzufliegen. Dies entlastet Maschine und Besatzung, da deutlich weniger Steig- und Sinkflüge nötig sind, und lässt sich im manuellen Flug gut umsetzen. Es ist geplant, in einem späteren Jahr dasselbe Messgebiet noch einmal zu befliegen, jedoch im herkömmlichen Verfahren mit parallelen Messlinien.

Literatur

- Schwarz, G. F., 1991: Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 23, Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- 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.
- Butterweck, G., Stabilini, A., Bucher, B., Breitenmoser, D., Rybach L., Poretti, C., Maillard, S., Hess, A., Kasprzak, M., Scharding G., Mayer, S., 2024: Aeroradiometric Measurements in the Framework of the Swiss Exercise ARM23. PSI Bericht Nr. 24-02. March 2024. DOI: https://doi.org/10.55402/psi:600054.

Environnement
4
Umwelt

- *Aérosols et précipitations*
- *Uranet Aero*
- *Surveillance de l'air avec des avions militaires*
- *Systèmes aquatiques*
- *Uranet Aqua*
- *Tritium dans l'Aar*
- *Sols et herbes*

- *Aerosol und Niederschlag*
- *Uranet Aero*
- *Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen*
- *Aquatische Systeme*
- *Uranet Aqua*
- *Tritium in der Aare*
- *Boden und Gras*

2023

4.1 Radioaktivität in der Luft (Aerosol) und im Niederschlag

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

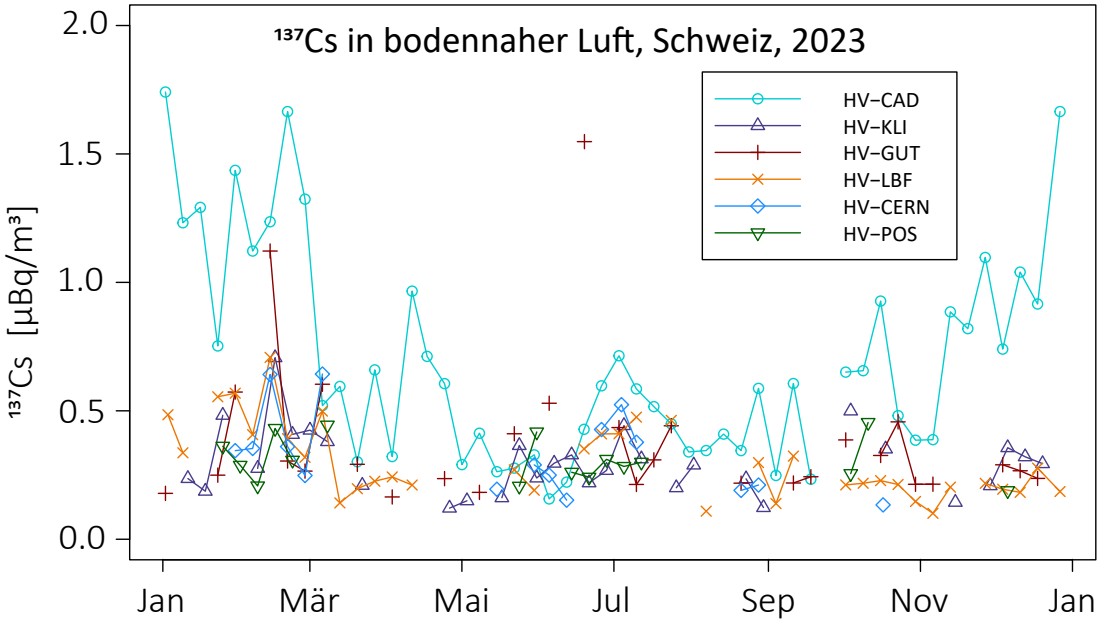
Zusammenfassung

Die Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag zeigte 2023 keine erhöhten Werte, welche die Gesundheit der Bevölkerung gefährdet haben könnten. In der Atmosphäre überwiegt die natürliche Radioaktivität deutlich. Dank der grossen Empfindlichkeit der verwendeten Messmethoden konnten trotzdem kleinste Spuren von künstlichen Radionukliden auf den Aerosolpartikeln nachgewiesen werden. Im Niederschlag wurden 2023 mit Ausnahme von Tritium und sporadischen Spuren von ^{137}Cs keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. Im Tessin wurde – wie üblich – auch in den Wintermonaten etwas mehr ^{137}Cs in der Luft gemessen. In der unmittelbaren Umgebung von Tritium-verarbeitenden Industriebetrieben erreichten die ^{3}H 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 m^3 bis 150'000 m^3 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 abgebaut und wird ab nächstem Jahr durch einen HVS ersetzt. Die Filter der MV-Sammler werden wöchentlich gewechselt und als Monatsprobe (4 - 5 Filter) gammaspektrometrisch gemessen. Im 2023 hat das BAG zudem tägliche PM-10 Filter vom Standort Bern-Morgartenstrasse ausgemessen, die vom Stadtlabor in Bern zur Verfügung gestellt wurden.



Figur 1 :
^{137}Cs Konzentrationen in der Luft für das Jahr 2023.

Künstliche Radioisotope in der Luft

Das einzige regelmässig in den Spurenmessungen nachgewiesene künstliche Radioisotop in der Luft war wie in den Vorjahren ^{137}Cs. Von den 311 gemessenen Hochvolumenfiltern zeigten 180 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 µBq/m³). Etwas höhere Werte (bis knapp 2 µBq/m³) wurden 2023 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 damit auch des Holzes im Kanton Tessin nach Tschernobyl erklärt die meist etwas höheren Werte der Station Cadenazzo. Geringfügig höhere ^{137}Cs Konzentrationen (bis 1.1 µBq/m³) wurden zudem bei Güttingen im sehr trockenen Februar (Klimabulletin Jahr 2023 – MeteoSchweiz) gemessen. Auch die höchsten gemessenen Werte sind mehr als eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert für ^{137}Cs von 8.5 Bq/m³.

Das radioaktive Natriumisotop ^{24}Na mit einer Halbwertszeit von 15 Stunden kann sowohl natürliche als auch künstliche Quellen haben. Natürliches ^{24}Na wird wie das ^{7}Be und ^{22}Na in der oberen Atmosphäre durch die kosmische Strahlung erzeugt. Künstliches ^{24}Na kann in Beschleunigern erzeugt werden, wie sie 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

Tabelle 1:
HVS-Stationen des BAG

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

Tabelle 2:

Statistik der 2023 in der Schweiz gemessenen ^{210}Pb und ^{7}Be Aktivitäten in bodennaher Luft sowie der Referenz von 2013-2018. Aktivitätsangaben in mBq/m^3.

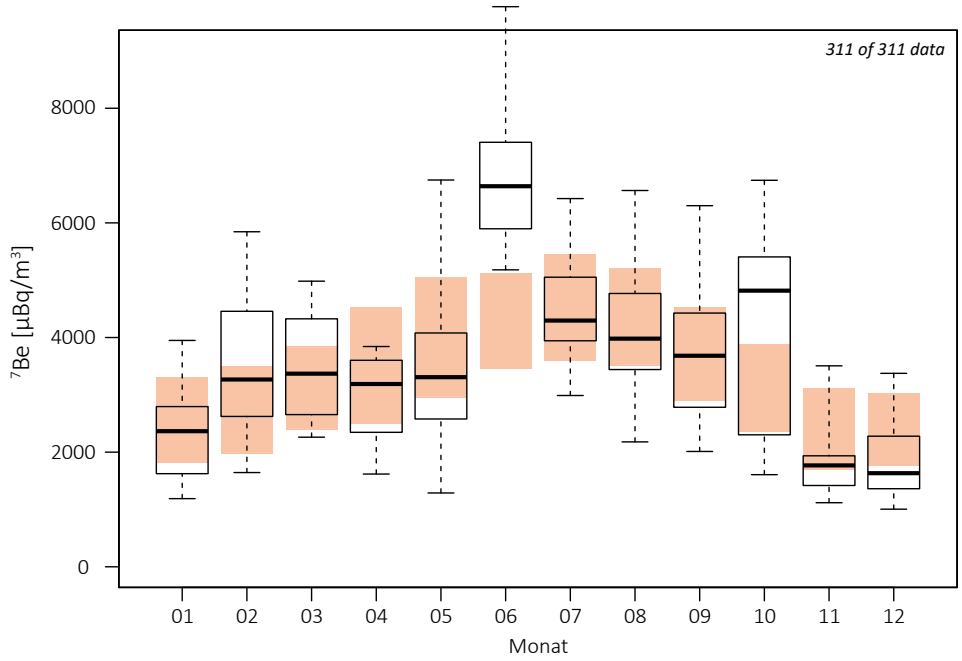
	^{210}Pb Referenz	^{210}Pb 2023	^{7}Be Referenz	^{7}Be 2023
5% - 95%-Perzentil	0.18 - 1.18	0.15 - 1.37	1.48 - 6.40	1.36 - 6.54
Min - Max	0.07 - 2.76	0.07 - 2.11	0.15 - 8.74	1.01 - 9.77
Mittelwert / Median	0.57 / 0.49	0.55 / 0.45	3.66 / 3.50	3.55 / 3.36
Anzahl Messwerte	*1'864*	*311*	*1'864*	*311*

Berichtsjahr insgesamt 15 Mal Spuren von ^{24}Na nachgewiesen werden (zwischen 15 und 174 µBq/m^3). Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{24}Na kann die Nachweisgrenze variieren und lag 2023 bei etwas weniger als 4% der Messungen bei > 1'000 µBq/m^3. Die gemessenen ^{24}Na Werte und die Nachweisgrenzen insgesamt liegen allerdings stets um Grössenordnungen unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 100 Bq/m^3.

Geringste Spuren von Jod-131 (^{131}I) tauchten 2023 in 11 HVS Filtern der Station beim CERN auf (Maximum 16 µBq/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 2023 an zwei Sammelproben von HVS-Filtern der Station Liebefeld bestimmt, eine Probe mit Filtern vom Winter (Okt. 2022 – März 2023) und eine Probe mit Filtern vom Sommer (April – Sept. 2023). Die Summe der Plutoniumisotope ^{239}Pu und ^{240}Pu ergab 0.8 ± 10 % nano-Becquerel pro m^3 Luft (nBq/m^3) im Winter und 1.4 ± 10 % nBq/m^3 im Sommer. Zusätzliche Proben von den Stationen CERN, Klingnau und Posieux ergaben für Oktober 2022 bis September 2023 zwischen 0.9 und 1.5 nBq/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 (Jungfraujoch, 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.



Figur 2 :

Boxplot der monatlichen ^{7}Be Konzentrationen bei allen HVS Stationen im Jahr 2023. 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)

Natürliche Radioisotope in der Luft

Die 2023 auf den HVS Filtern gemessenen Radioisotope waren fast ausschliesslich natürlicher Herkunft. Vorherrschend waren das Radonfolgeprodukt ^{210}Pb (Halbwertszeit 21 Jahre) und das durch die kosmische Strahlung in hohen Schichten der Atmosphäre gebildete ^{7}Be (Halbwertszeit 53 Tage).

Neunzig Prozent der 2023 gemessenen ^{210}Pb-Konzentrationen lagen zwischen 0.15 und 1.37 mBq/m^3. Diese Werte streuen geringfügig mehr als die Werte der hier als Referenz verwendeten Periode 2013 - 2018 (Tabelle 2). Wie in den Vorjahren sind die Werte der Station Cadenazzo deutlich höher, als die Werte der Stationen nördlich der Alpen: im Durchschnitt 0.84 mBq/m^3 für Cadenazzo gegenüber 0.5 mBq/m^3 für die anderen 5 Stationen.

Bei ^{7}Be-Werte lagen 2023 neunzig Prozent der Werte zwischen 1.4 und 6.5 mBq/m^3 (Mittelwert = 3.6 mBq/ m^3; Median = 3.4 mBq/m^3). Dies entspricht den Werten für ein Jahr mit mittlerer kosmischer Strahlung und ist etwas unter dem langjährigen Mittelwert (siehe Tabelle 2). Die Figur 2 zeigt für jeden Monat die Verteilung der ^{7}Be Konzentrationen aller Stationen im Vergleich mit dem langjährigen Jahresverlauf. Der Jahresverlauf der ^{7}Be Konzentrationen in der Luft widerspiegelt das Wettergeschehen, insbesondere die konvektive vertikale Durchmischung der Troposphäre an warmen Sommertagen, wobei ^{7}Be reiche Luft aus der obersten Troposphäre an den Boden gelangt. Weitere Einflüsse auf die ^{7}Be Konzentration sind Niederschlag (Auswaschen von ^{7}Be) und die kosmische Strahlung (Produktion von ^{7}Be). Die kosmische Strahlung (IGY Neutron Monitor Jungfraujoch, cosray.unibe.ch) war 2023 19% tiefer als 2020, dem Beginn des Sonnenzyklus 25. Die Sonnenaktivität hat in diesem Zyklus bereits stark zugenommen und somit die kosmische Strahlung besser abgeschirmt. Der Vergleich der warmen Jahre 2020 und 2023 zeigt, dass der Rückgang (um 22%) des Jahresmittelwerts der in der Bodenluft gemessenen ^{7}Be Konzentrationen gut mit der Verminderung der kosmischen Strahlung zusammenpasst. Über das Jahr entspricht der Verlauf der ^{7}Be-Monatsmittelwerte grob demjenigen der langjährigen Monatsmittel mit einigen Ausnahmen (Figur 2). Die beiden trockensten Monate (relativ zum erwarteten Niederschlag) waren 2023 der Februar und der Juni (Klimabulletin, MeteoSchweiz). In diesen Monaten war auch die ^{7}Be Konzentration höher als erwartet, was sicher zum Teil auf das fehlende Auswaschen durch den Regen zurückzuführen ist. Besonders warm (relativ zur erwarteten Temperatur) waren 2023 Juni, September und Oktober. Im Juni und Oktober widerspiegelt sich dies in einer stark erhöhten ^{7}Be Konzentration (Figur 2), zurückzuführen auf stärkere vertikale Konvektion. Anfangs September waren die ^{7}Be Konzentrationen in der bodennahen Luft zwar hoch, sind dann aber in der etwas kühleren und z.T. regnerischen Monatsmitte zurückgegangen. Sehr regenreich und entsprechend mit wenig ^{7}Be in der bodennahen Luft waren November und Dezember.

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

Als weiteres natürliches Radioisotop findet sich in den HVS Filtern auch ^{40}K. Die Konzentrationen lagen 2023 meist im typischen Bereich von 5 - 15 µBq/m^3. Wie oft tauchte der höchste ^{40}K Wert (µBq/m^3) zu Jahresbeginn bei der stadtnahen Station Liebefeld auf. Ursache dafür: die Feuerwerke (siehe dazu auch https://www.radenviro.ch/feuerwerk/).

Niederschlag

Messungen von Gammastrahlern

Im Berichtsjahr 2023 wurde an folgenden Sammelstationen kontinuierlich Niederschlag gesammelt: Umgebung der Kernkraftwerke Mühleberg, Leibstadt, Gösgen und Benznau, 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 ^{7}Be und ^{210}Pb waren die Messresultate in der Grössenordnung ähnlich wie im Vorjahr (^{7}Be: 0.2 - 1.7 Bq/l, Mittelwert 0.6 Bq/l; ^{210}Pb: 0.01 - 0.43 Bq/l, Mittelwert 0.03 Bq/l). Die Probe mit den höchsten Konzentrationen ist bei diesen Werten nicht berücksichtigt. Es handelt sich um die Probe vom Februar 2023 aus Cadenazzo. In diesem Monat gab es an dieser Station praktisch keinen Niederschlag, so dass mit einer kleinen Menge von Wasser sehr viel ^{7}Be und ^{210}Pb ausgewaschen wurde. Rechnen wir die Radionuklid-Aktivität als Depositionsfluss pro Quadratmeter und Tag (mBq/m^2/d) so sind die Werte im normalen Bereich, d.h. zwischen 4 und 37 mBq/m^2/d (5. bis 95. Perzentil). Für den ^{7}Be-Depositionsfluss 2023 ist dieser Bereich 30 -611 mBq/m^2/d) mit einem Mittelwert von 136 mBq/m^2/d. Damit ist die ^{7}Be-Deposition mit dem Niederschlag 2023 etwas tiefer als im Vorjahr.

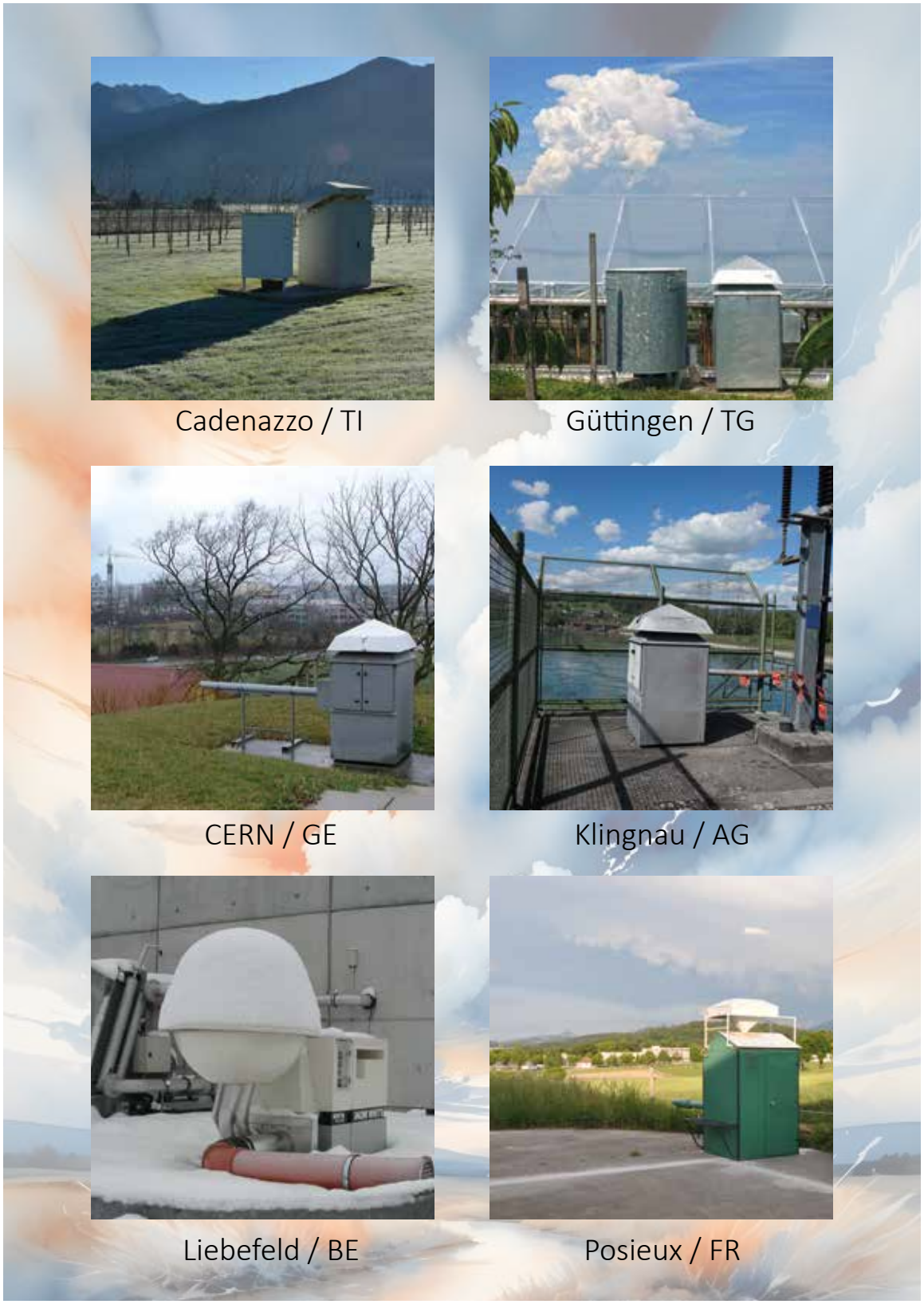
In 7 von 96 Niederschlagsproben war ^{137}Cs messbar, mit Aktivitätskonzentrationen zwischen 0.2 und

0.9 mBq/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 nur zweimal knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l. Der höchste Wert wurde mit 3.4 ± 1.4 Bq/l im Februar bei Posieux festgestellt.

Ein ähnliches Bild zeichnen die Ergebnisse der Tritium-Messungen an Regenproben aus der Umgebung der Kernkraftwerke KKG, KKL und KKM. Von den drei Proben mit Werten über der Nachweisgrenze lag der höchste bei 3.0 ± 1.1 Bq/l. Bei den Sammelstationen PSI, KKB und Zwilag ergaben sich 2023 wie gewohnt etwas häufiger Werte über der Nachweisgrenze. Bei rund der Hälfte der Proben war dies der Fall. Das höchste Monatsmittel trat bei der Station PSI im Januar auf (32.0 ± 1.7 Bq/l). Die Jahresdurchschnitte der drei Stationen PSI, ZWILAG und KKB betrugen 6, 5 und 3 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 857 Bq/l Tritium mit einem Mittelwert von 72 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). Ausführlicher werden diese Tritium-Resultate in Kapitel 9.3 besprochen.



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 2023 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/m^3. Somit blieben alle Aktivitätskonzentrationen unter den in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerten.

Auf allen Stationen wurden die natürlich vorkommenden Radontöchter aus der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallskette täglich nachgewiesen, was die Funktionsfähigkeit der Aerosolmonitore bestätigt. Ein Vergleich der Tagesmittelwerte 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 wiesen die Aerosolmonitore vor allem in den Sommermonaten teilweise auch kosmogenes ^{7}Be nach.

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 messen.

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 m^3/h viel niedriger ist als derjenige von Hochvolumensammlern (ca. 500 m^3/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 auf der Internet-Plattform Radenviro für die Öffentlichkeit einsehbar (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. 1 cm Abstand die Bestaubungsstelle mit 5 cm 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 m^3/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 soweit vorgeschoben werden kann, 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 hochaufgelösten 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 ^{214}Bi und ^{214}Pb und einer eingebauten schwachen ^{40}K Quelle automatisch nach.

Durch die hohe Auflösung gibt es wenige Überlappungen der einzelnen Peaks, was die eindeutige Zuordnung zu den verschiedenen Radionukliden vereinfacht. Anhand der Peak-Fläche und des gefilterten Luftvolumens kann dann die Aktivitätskonzentration der Radionuklide in der Umgebungsluft berechnet werden. Bei jeder Auswertung werden die aus den Spektren bestimmten Aktivitätskonzentrationen auf Grenzwertüberschreitungen geprüft.

Die Aerosolmonitore des Herstellers Thermo Fisher wurden mit Germaniumdetektoren und elektrischen

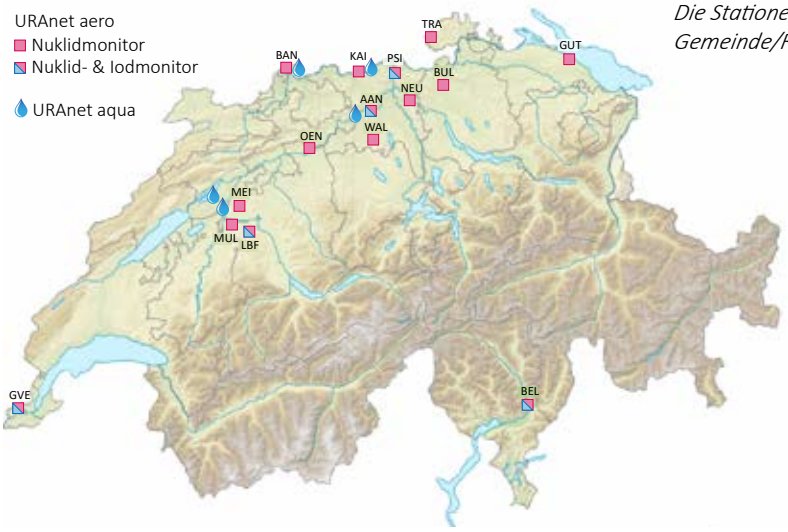


Abbildung 1 :
Standorte der 15 Aerosol- und fünf Iod-Monitore von URAnet aero.

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: Mühleberg/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 (URA) verfügt über eine geeignete Membranvakuumpumpe 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-Absorber 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 wird alleine durch ein Zeolith-Molekularsieb generiert, welches zu diesem Zweck ebenfalls zuerst auf tiefere Temperaturen (typischerweise unter -40°C) abgekühlt werden muss. Dieses Vakuum ist dadurch weniger stark als jenes der Detektor-Kapsel. Aus diesem Grund muss dieses Molekularsieb häufig ausgetauscht werden, kann aber bei 150°C regeneriert und danach wiederverwendet werden.

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. Durch den Ausfall des Klimageräts der Messkabine in Basel konnte diese Station in der ersten Hälfte 2023 während ca. zwei Monaten nicht betrieben werden.

Die Aerosolmonitore wurden durch die URA weiterentwickelt und sind nun auch kompatibel mit den Germaniumdetektoren der Firma Mirion. Aktuell sind die Stationen Kaisten, Aarau und Güttingen mit Detektoren der Firma Mirion ausgerüstet. Sie weisen bislang eine höhere Beständigkeit gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen auf, was damit zusammenhängen könnte, dass die Kühleinheit fest mit dem Detektor verbunden ist und somit nur ein Vakuum notwendig ist. 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. 2023 wurden weitere Germaniumdetektoren der Firma Mirion beschafft, um defekte Ortec-Geräte ersetzen zu können.

^{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 Aerosolfilter 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 NaI-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 m^3/h – kann dann die Aktivitätskonzentration des ^{131}I in der Umgebungsluft berechnet werden. Der NaI-Detektor muss nicht gekühlt werden und ist weniger anfällig auf Schwankungen der Temperatur oder Luftfeuchtigkeit in der Messkabine.

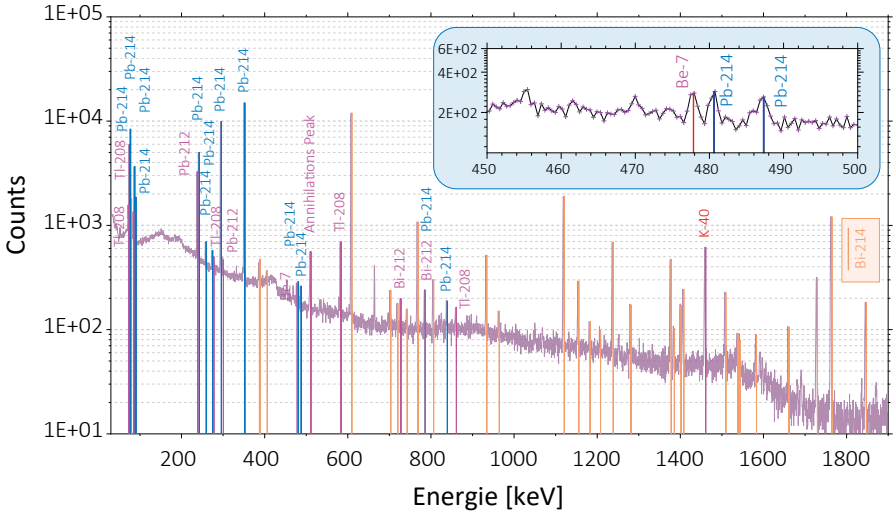


Abbildung 2 :
12h-Spektrum der Messstation Mühleberg vom 18. Juni 2023 um 00:00 Uhr. Die Linien von ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallskette sind orange und blau markiert, alle anderen rot. Der Bereich um die Linie von ^{7}Be bei 477.6 keV mit den naheliegenden Nebenlinien von ^{214}Pb 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.

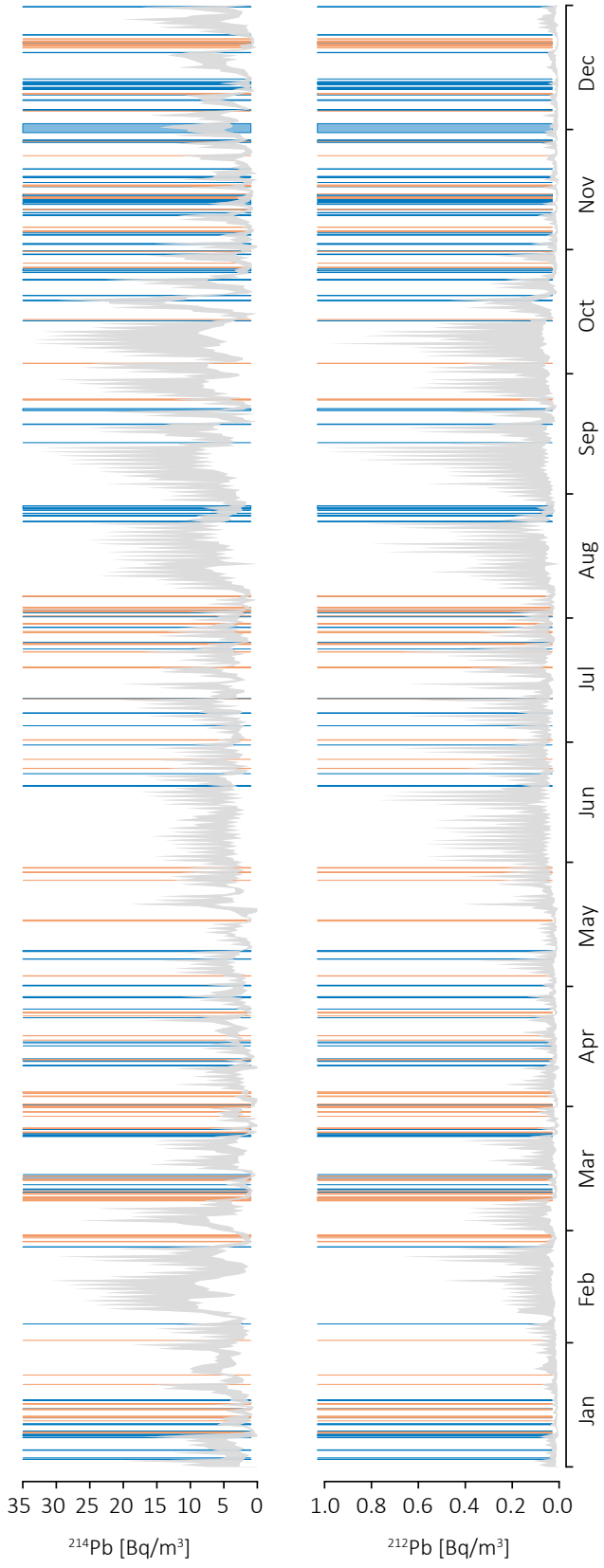


Abbildung 3 :
Bandbreite der Aktivitätskonzentrationen von ^{214}Pb und ^{212}Pb (12h-Mittelwerte) der URAnet aero Stationen auf der Alpennordseite. Markiert sind ebenfalls die Perioden mit Niederschlag (blau) und höheren Windgeschwindigkeiten (orange)

Messresultate

Abbildung 2 zeigt das Spektrum des Aerosolmonitors der Messstation in Mühleberg am Ende der 12h-Bestaubungszeit vom 18. Juni 2023 um 00:00 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 34 Linien von ^{214}Bi. Weiter sind auch die Peaks von ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl, ^{40}K, ^{7}Be 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 Aktivitätskonzentrationen in diesem Spektrum betragen 0.0604 (± 0.0034) Bq/m^3 für ^{212}Pb, 0.0555 (± 0.0083) Bq/m^3 für ^{212}Bi. Da ^{212}Bi nur zu 35.9% zu ^{208}Tl zerfällt (zu 64.1% zu ^{212}Po), liegt die Aktivitätskonzentration von ^{208}Tl bei 0.0186 (± 0.0013) Bq/m^3.

Die graue Fläche in Abbildung 3 zeigt den Zeitverlauf des Wertebereichs der Aktivitätskonzentrationen von ^{212}Pb und ^{214}Pb über das Jahr 2023 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 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 12 h-Mittelwerten. Nach den meisten dieser Perioden mit Auswaschung oder windigeren Verhältnisse messen alle Messstationen sehr ähnliche (tiefe) Aktivitätskonzentrationen ^{212}Pb und

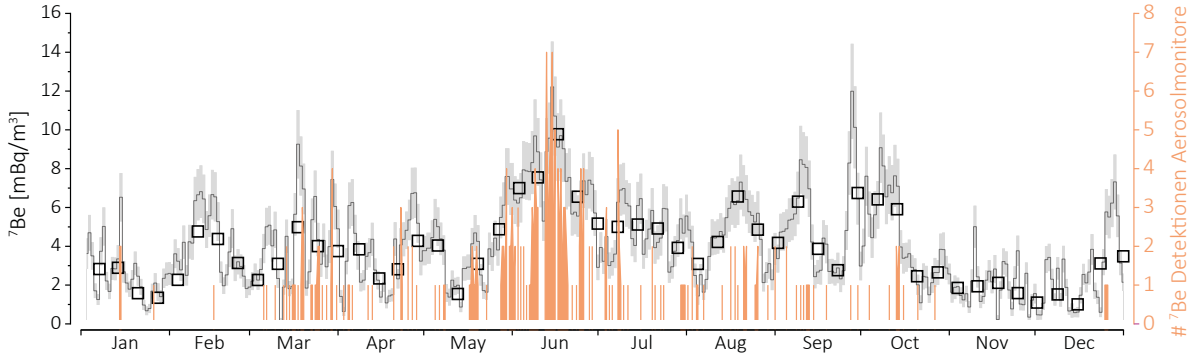


Abbildung 4 :
^{7}Be Aktivitätskonzentrationen, gemessen auf den Aerosolfiltern eines Digitel Aerosolsammlers an der Morgartenstrasse in Bern (schwarze Linie, 95%-Konfidenzintervall in grau) und vom Hochvolumensammler in Liebefeld (Quadrate), und Anzahl ^{7}Be Detektionen am Ende der 12h-Sammelperioden der Aerosolsammler von URAnet aero (orange).

^{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 die Verteilung auf den Aerosolpartikeln in den Luftschichten können dadurch unterschiedlich ausfallen, in Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen und der Bodenbeschaffenheit.

Der vergrösserte Ausschnitt in Abbildung 2 zeigt den Energiebereich um die Linie von ^{7}Be bei 477.6 keV. Der Nachweis von ^{7}Be 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 mit dem ^{7}Be Peak interferieren können. Abhängig vom Untergrund des Spektrums liegt die Nachweisgrenze von ^{7}Be 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 ^{7}Be 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.

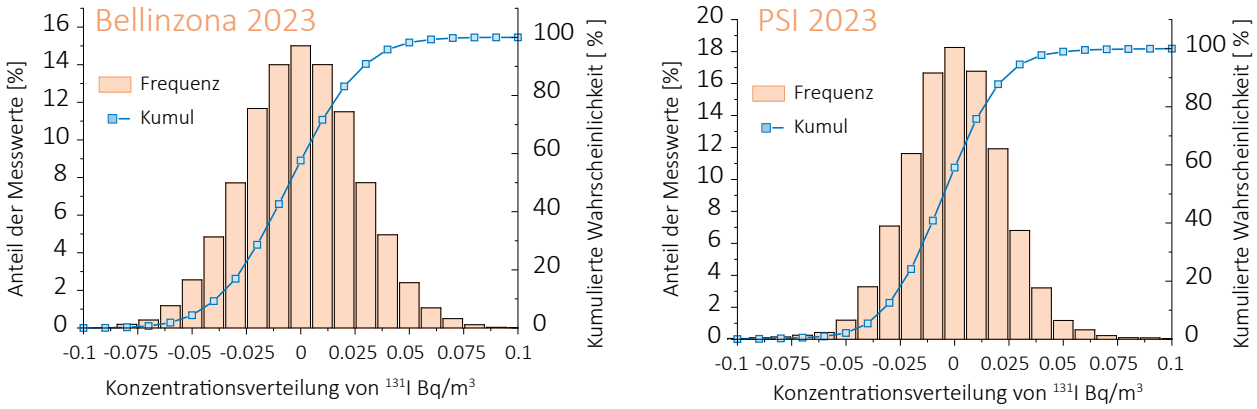


Abbildung 5 :
Histogramm der Durchschnittskonzentration von ^{131}I auf den Stationen Bellinzona und PSI im Jahr 2023.

Abbildung 4 zeigt die Anzahl ^{7}Be Detektionen am Ende der 12 h-Bestaubungszeiten von allen 15 Aerosolmonitoren, verglichen mit den Wochenmittelwerten vom Hochvolumensammler in Liebefeld (siehe Kapitel 4.1) und den Tagesmittelwerten von einem Digitel Aerosolsammler in der Stadt Bern. Im Sommer detektieren die Aerosolmonitore ^{7}Be auffallend häufiger als während dem Rest des Jahres, obwohl nicht nur im Sommer sondern beispielsweise auch Ende September und anfangs Oktober ebenfalls hohe ^{7}Be Aktivitätskonzentrationen aufgetreten sind. Der Grund für diese Unterschiede liegt vermutlich in einer geringfügigen Jahresschwankung in der Nachweisgrenze von ^{7}Be.

Die fünf ^{131}I-Monitore der Stationen in Bellinzona, Genf, Aarau, Liebefeld und PSI haben zu keinem Zeitpunkt im Jahr 2023 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 Bellinzona 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 2023 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 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 den Wintermonaten liegen die ^{212}Pb Aktivitätskonzentrationen verhältnismässig tief, was wahrscheinlich mit der unterschiedlichen Halbwertszeit der Radon-Isotope aus den beiden Zerfallsreihen und der Bodenbeschaffenheit zusammenhängt. Die Detektionslimiten der Aerosolmonitore reichen vor allem in den Sommermonaten gerade aus, um ^{7}Be nachzuweisen.

4.3
Überwachung der Radioaktivität der Luft mit Militärflugzeugen

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

Zusammenfassung

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

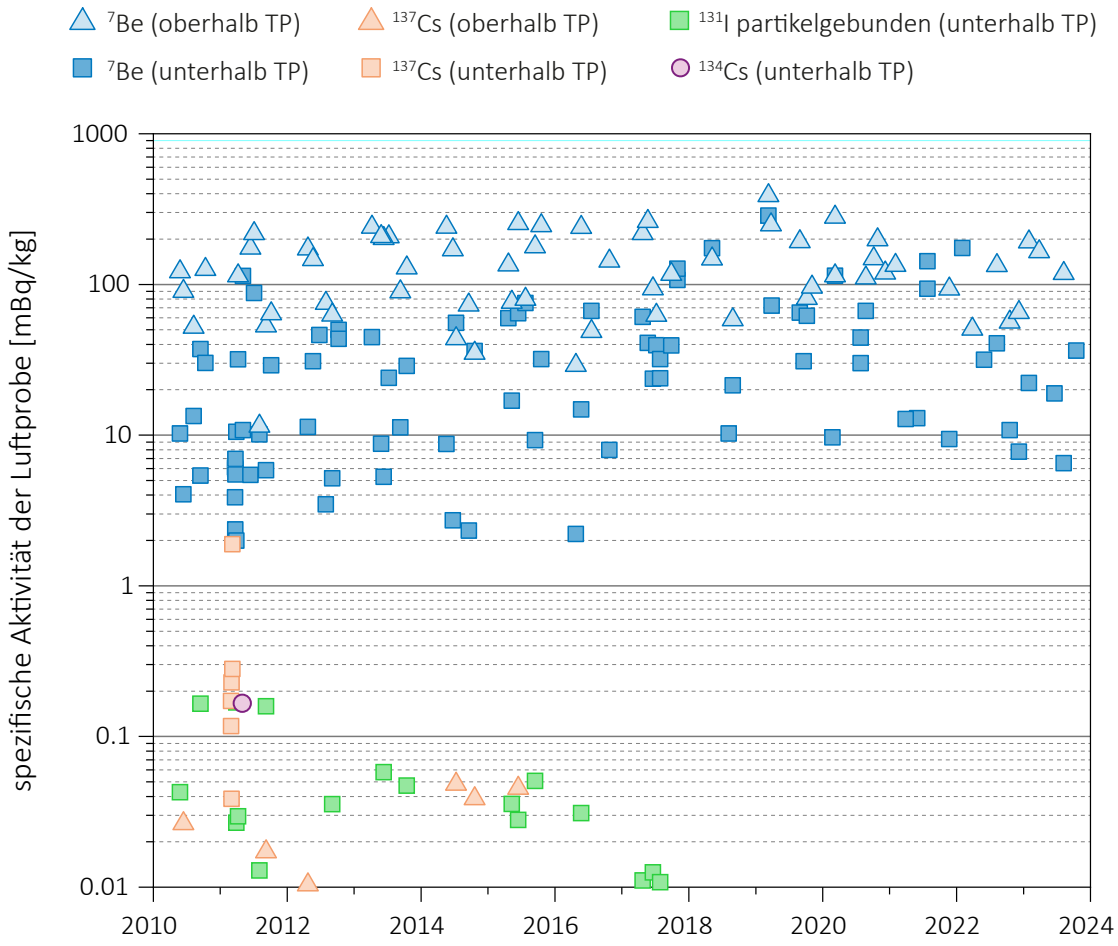
Vorgeschichte

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

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

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

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



Figur 1:
^{7}Be-, ^{134}Cs-, ^{137}Cs- und partikelgebundene ^{131}I- Messwerte in mBq/kg Luft in den Jahren 2010-2023.

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 radio-chemischen oder massenspektrometrischen Verfahren.

Über die letzten vierzehn Jahre liegt die durchschnittliche Konzentration des kosmogenen Radionuklids ^{7}Be oberhalb der Tropopause bei 127 mBq/kg. Bei den Messungen 1 km unterhalb der Tropopause liegt der Durchschnittswert bei 24 mBq/kg. Als Vergleich seien hier die Werte von P. Winiger [1] bis [4] erwähnt, die für ^{7}Be im Mittel bei 100 mBq/kg bzw. 20 mBq/kg liegen, jeweils 1'000 m über bzw. unter der Tropopause ermittelt.

Die ^{137}Cs-Werte lagen im Jahr 2023 alle unter der Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg. In Figur 1 deutlich sichtbar sind die nach dem Reaktorunfall Fukushima (Japan) gemessenen ^{131}I-Konzentrationen, welche jedoch infolge der Halbwertszeit von 8 Tagen schon kurze Zeit später nicht mehr messbar waren. Auch das Radionuklid ^{134}Cs konnte in den Jahren nach 2011 nicht mehr nachgewiesen werden.

Quellen:

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

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

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

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

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

4.4
Radioaktivität in aquatischen Systemen

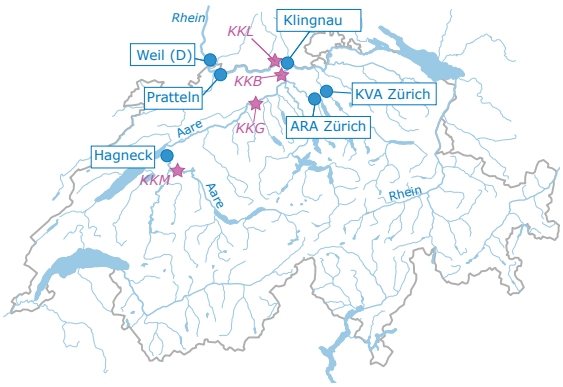
M.S. Brennwald, P. Rünzi
Eawag, Überlandstrasse 133, Dübendorf
A. Pregler
Kantonales Labor Basel-Stadt, Gruppe Radioaktivität, Basel

Zusammenfassung

In den Wasserproben von Aare und Rhein wurden 2023 weder ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn oder ^{134}Cs und nur vereinzelt ^{137}Cs aus Abgaben der Kernkraftwerke Mühleberg, Gösgen, Beznau oder Leibstadt oberhalb der Nachweisgrenzen (Limit of Quantificaton, LOQ; Grenze, ab welcher eine quantitative Bestimmung möglich ist) nachgewiesen. In den Schwebestoffproben von Aare und Rhein wurden vereinzelt ^{54}Mn und ^{60}Co, sowie in allen Proben ^{137}Cs oberhalb der Nachweisgrenzen gefunden. In Stichproben von Schwebstoffen im Rhein bei Weil (D) wurden im Weiteren die kurzlebigen Radionuklide ^{131}I, ^{177}Lu und ^{223}Ra gefunden, welche in der Nuklearmedizin eingesetzt werden. In zwei Wasserpflanzenproben wurden geringe Mengen von ^{137}Cs im Bereich der jeweiligen Nachweisgrenzen beobachtet. In Fischen und Grundwasserproben wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

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 Radionuklidimmissionen 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) und weiteren Betrieben.

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 Kernkraftwerks Mühleberg, 900 m 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 Pratteln werden schliesslich auch die Abgaben des Kernkraftwerks Leibstadt überwacht.

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

Ergebnisse

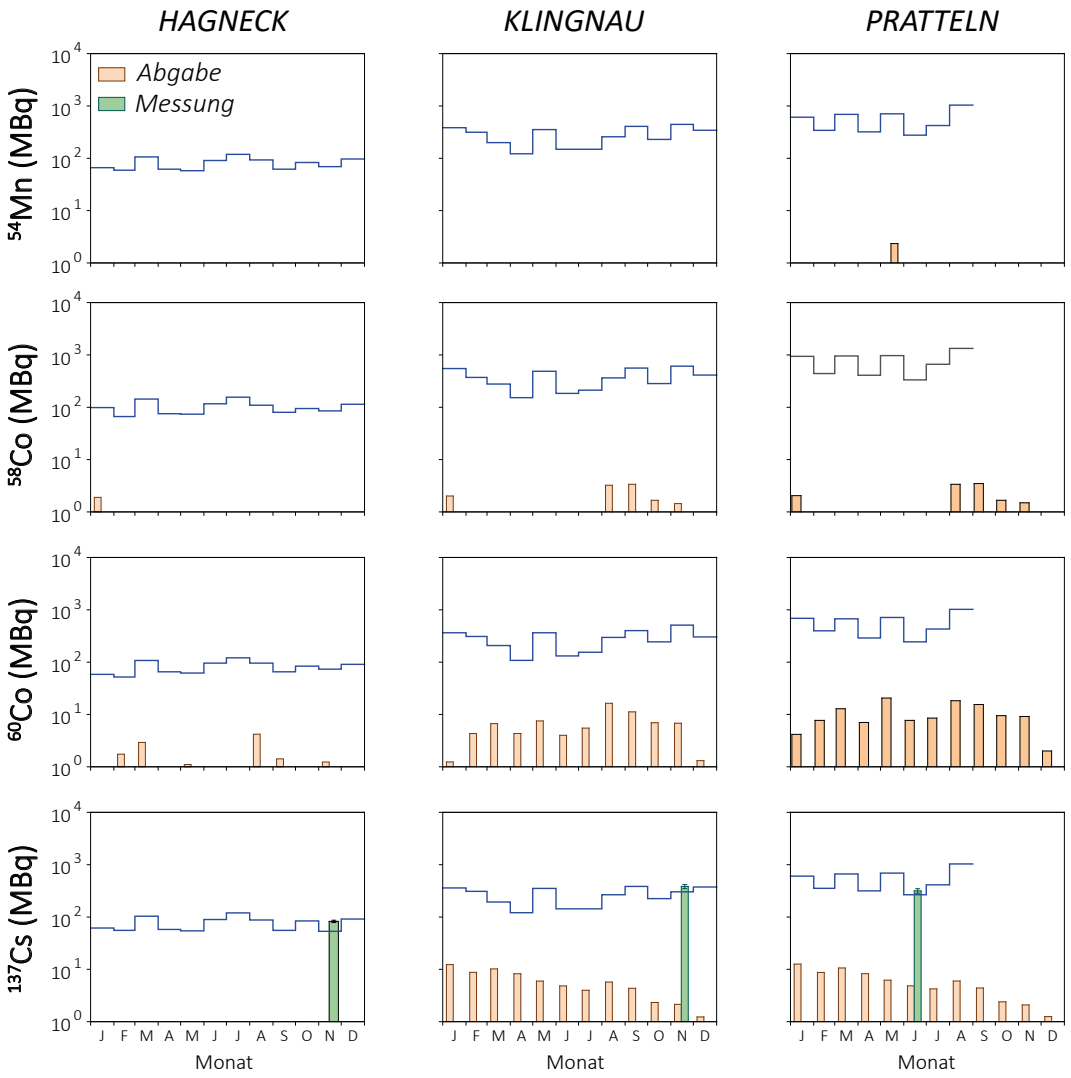
Wasserproben aus Aare und Rhein

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 Aktivitäten 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 KKWs Beznau und Leibstadt, und ^{54}Mn wurde von allen drei KKWs abgeben. Das KKW Gösgen hat kaum zu den Abgaben der genannten Nuklide beigetragen, wohl aber bei den Nukliden ^{99m}Tc und ^{132}Te.

Bei allen drei Stationen (Hagneck, Klingnau und Pratteln) wurde in den Wasserproben aus der Aare und dem Rhein über das ganze Jahr lediglich ^{137}Cs, jedoch kein ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn oder ^{134}Cs nachgewiesen. In früheren Jahren



Figur 2 :
Vergleich der berechneten (Balken ohne Messunsicherheit) und gemessenen Frachten (Balken mit Messunsicherheit) 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 mit Ausnahme von ^{137}Cs unter der Nachweisgrenze (blaue Stufenlinie). Aufgrund einer technischen Störung konnte ab September bei Pratteln keine Probe gewonnen werden.

wurden vereinzelt Spuren dieser Nuklide nahe der Nachweisgrenze gefunden, als die Abgaben aus den KKW noch systematisch höher waren. Über die letzten zwei Jahrzehnte sind die Abgaben dieser Radionuklide aus den KKW jedoch um mehrere Grössenordnungen zurückgegangen und liegen für das Jahr 2023 auf einem Tiefststand (siehe weiter unten).

In Proben aller drei Stationen wurde vereinzelt ^{137}Cs nachgewiesen, wobei die Aktivitäten über den bilanzierten Abgaben der KKW lagen. Wie auch in der Vergangenheit wird dies auf die Remobilisation von Ablagerungen aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt.

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 Immissionsgrenzewerte. Im Jahr 2023 wurde lediglich vereinzelt ^{137}Cs in den Proben nachgewiesen.

Langfristige Entwicklung der Radionuklidabgaben in Aare und Rhein

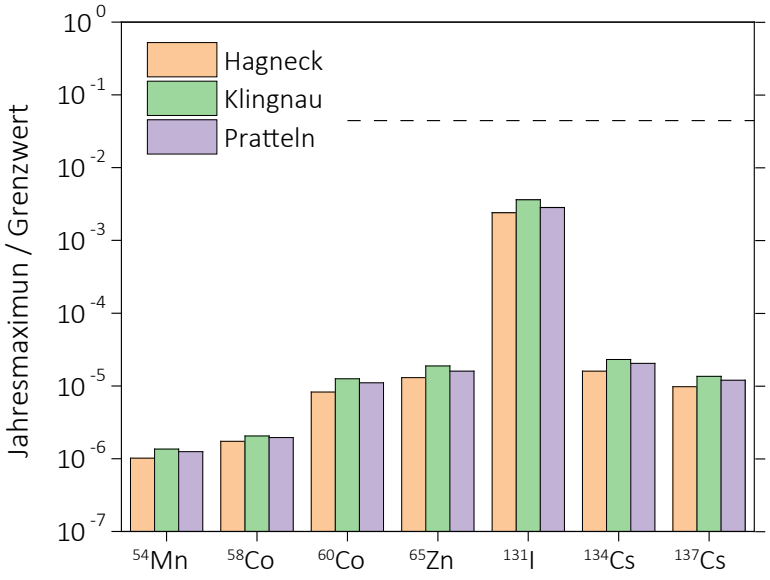
Figur 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abgaben von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs aller Kernkraftwerke während den Jahren 2000 - 2023. Als Folge der Revisionen der Kernkraftwerke sind die Abgaben in der Regel im Sommer/Herbst am grössten. Über die Jahre betrachtet haben die Abgaben von ^{58}Co, ^{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 2023 lagen insbesondere die Abgaben von ^{54}Mn und ^{60}Co auf einem neuen Rekordtief.

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

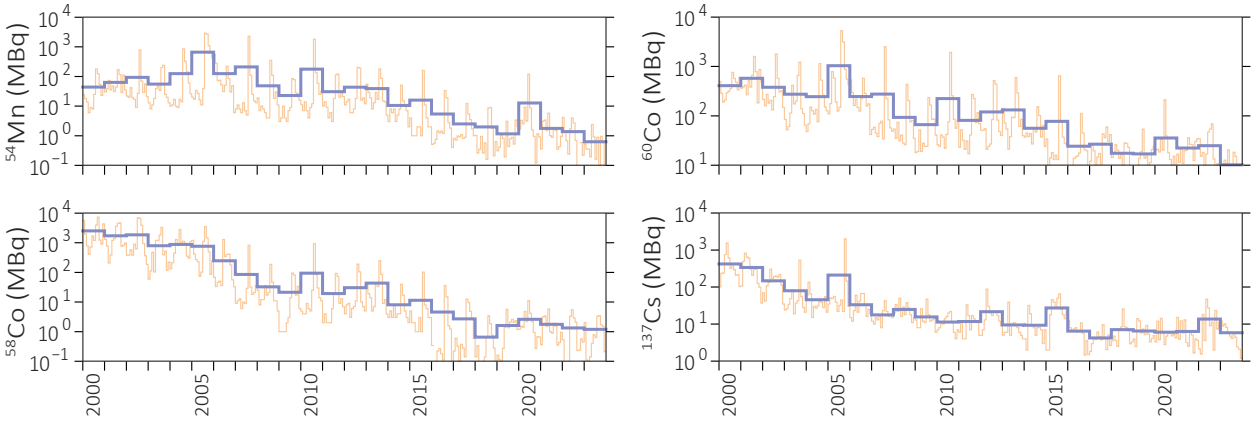
Bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D) werden durch das Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt (AUE BS) täglich Wasserproben gesammelt. Das kantonale Labor Basel-Stadt (KLBS) mischt die Tagespoben zu Wochenmischproben und bestimmt deren ^{3}H-Aktivität. Die Nachweisgrenze liegt seit 2022 bei 4 Bq/l anstatt 2 Bq/l.

Die ^{3}H-Aktivität des Rheinwassers ist in Figur 5 dargestellt.

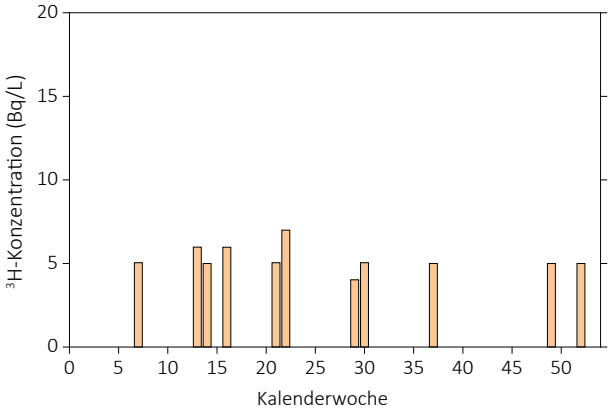
Die ^{3}H-Konzentrationen liegen über das ganze Jahr unter 10 Bq/L. Bei 80 % aller Proben liegen die ^{3}H-Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze von 4 Bq/L.



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



Figur 4 :
Entwicklung der summierten Abgaben der Kernkraftwerke über Abwasser von 2000 - 2023. Die orange Linie zeigt die Abgaben pro Monat, die blaue jeweils das Jahresmittel.



Figur 5 :
^{3}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.

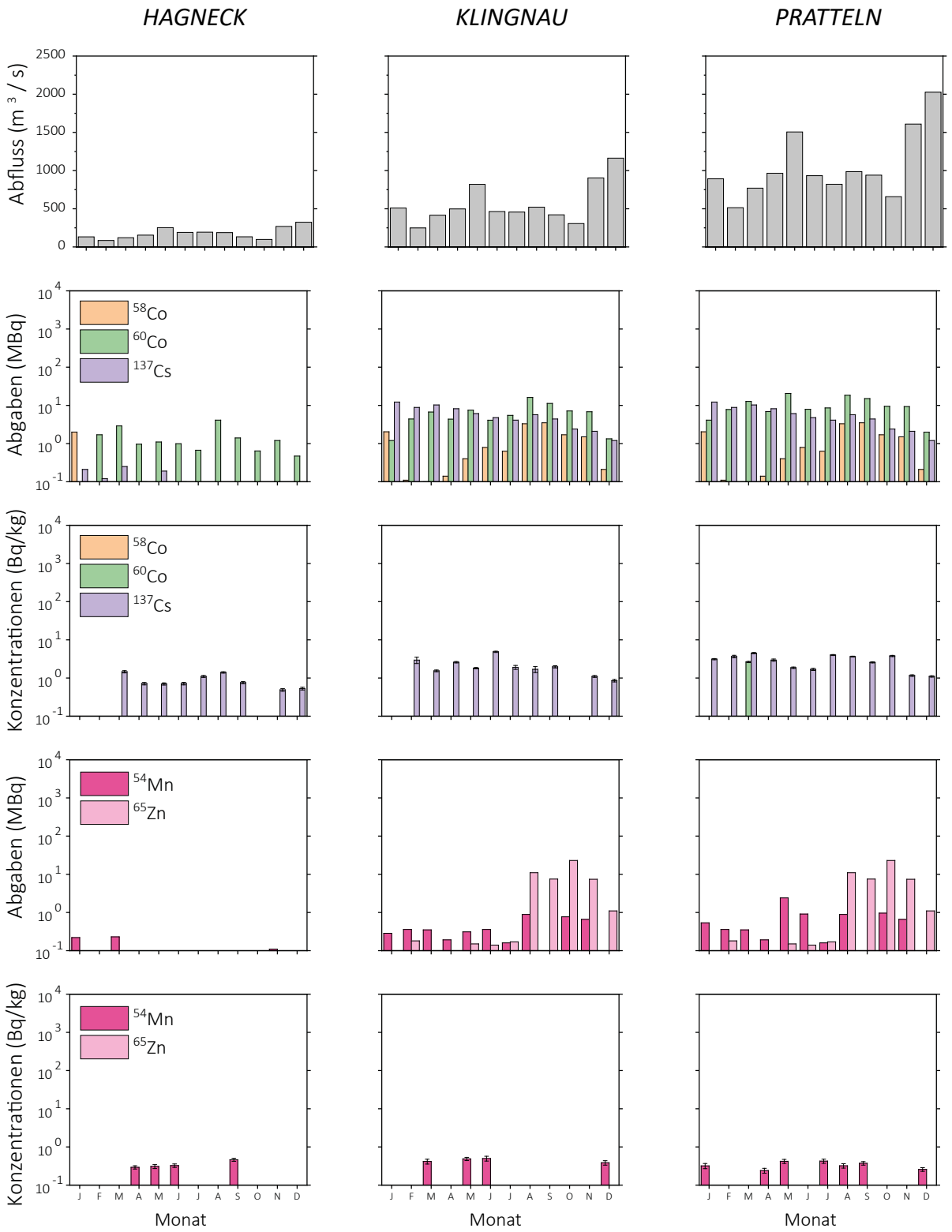
Mit Hilfe von Sedimentfallen gewinnt die Eawag monatliche Sammelproben der Schwebestoffe bei den Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln. Diese Schwebstoffproben werden gefriergetrocknet, gemörsert und danach gammaspektrometrisch analysiert.

Die spezifischen ^{137}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}Cs-Nachweise werden, wie auch bei den Wasserproben, auf die Remobilisierung von ^{137}Cs vom Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt. Vereinzelt wurden ^{54}Mn und ^{60}Co gefunden; ^{58}Co, ^{65}Zn und ^{134}Cs wurden nicht nachgewiesen.

Das AUE BS sammelt bei Weil am Rhein monatlich Schwebstoff-Stichproben. Dabei wird über Zeiträume von einigen Tagen Rheinwasser aus der Querprofilmischung entnommen und davon die Schwebestoffe abzentrifugiert. ^{137}Cs wurde jeden Monat nachgewiesen, auch diese Beobachtung ist wiederum primär auf die Remobilisierung von ^{137}Cs aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückzuführen. ^{54}Mn wurde in 4 Proben gemessen. ^{58}Co und ^{60}Co wurden nicht nachgewiesen. Zusätzlich konnten in den Stichproben von Weil am Rhein (D) auch kurzlebige Radionuklide aus medizinischen Anwendungen nachgewiesen werden: ^{131}I (Halbwertszeit: 8 Tage), ^{177}Lu (Halbwertszeit: 6.7 Tage) und ^{223}Ra (Halbwertszeit: 11.4 Tage). Tabelle 1 zeigt, dass die Konzentration von künstlichen Radionukliden in den Schwebestoffen tief ist. Wird die Aktivität auf das Volumen des gesammelten Rheinwassers bezogen, so kann diese Aktivitätskonzentration (in mBq/l) für die partikelreaktiven Elemente Mangan, Cäsium, Lutetium und Radium mit der Untersuchungsschwelle gemäss StSV Art. 195 verglichen werden. Die gemessenen Aktivitätskonzentrationen liegen deutlich unter der Untersuchungsschwelle (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1:
Messergebnisse aus monatlichen Stichproben von Schwebestoffen im Rheinwasser bei Weil am Rhein. «Max. Schwebestoffe»: Höchste gemessene Konzentration in getrockneten Schwebestoffen. «Max. Suspension»: Höchste Konzentration auf das gesammelte Rheinwasservolumen (Suspension) gerechnet.

	^{137}Cs	^{54}Mn	^{131}I	^{177}Lu	^{223}Ra
Max. Schwebestoff (Bq/kg)	11	0.8	10	67	37
Max. Suspension (mBq/l)	0.8	0.1	0.2	2.1	0.6
Untersuchungsschwelle (mBq/l)	1'200	12'000	223	10'333	33



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.

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 2023 wurden Fische aus dem Aare-Hagneck-Kanal (gefangen am 12.08.2023), dem Bielersee (01.09.2023), Erlinsbach (20.09.2023), Beznau (24.08.2023) und dem Rhein bei Augst (04.08.2023) analysiert. In allen Fischproben wurden natürliche Radionuklide gefunden, z.B. ^{40}K (373 - 653 Bq/kg). Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

Wasserpflanzen : Am 20.09.2022 wurden Wasserpflanzen oberhalb der Station in Hagneck und im Rhein bei Möhlin, sowie am 31.10.2022 im Klingnauer Stausee entnommen. In zwei der Proben wurde ^{137}Cs (0.33 - 0.71 Bq/kg) nachgewiesen, und in allen Proben natürliche Radionuklide wie ^{40}K (147 - 167 Bq/kg).

Grundwasser bei Aarberg, Schönenwerd, Böttstein und Muttenz

Am 20.07.2023 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 0.10 - 0.47 mBq/L).

4.5 URAnet aqua:

Automatisches Messnetz Flusswasser

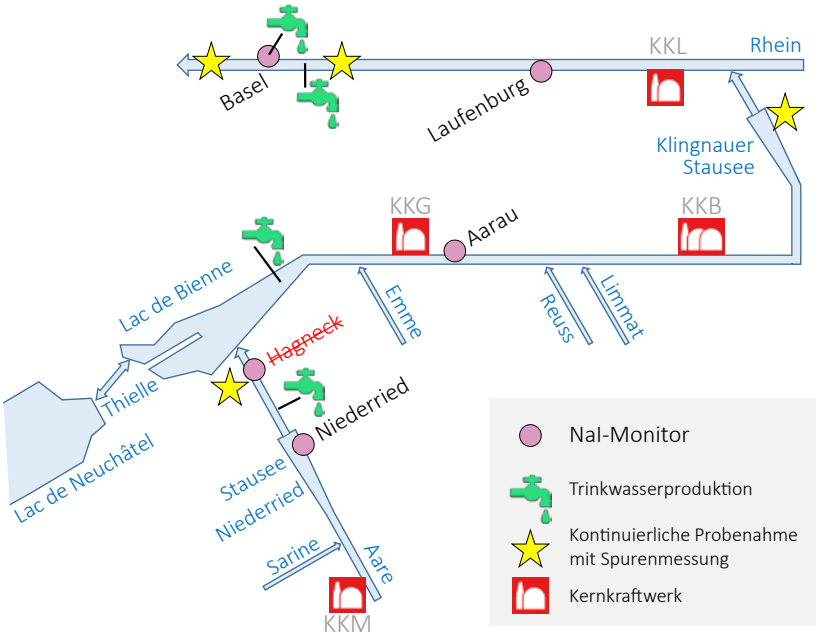
P. Steinmann, M. Müller, D. Lienhard, S. Estier
Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Vier automatische Natrium-Iodid-Sonden des Messnetzes URAnet aqua messen fortlaufend die Aktivitätskonzentration von Gammastrahlern in Aare und Rhein und übermitteln alle 10 Minuten einen Messwert. Künstliche Radionuklide konnten im Berichtsjahr im Flusswasser nicht nachgewiesen werden. Die fünfte Messsonde in Hagneck ist Ende Januar 2023 ausgefallen und wurde nicht mehr ersetzt, da das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) nicht mehr in Betrieb ist. Die Überwachung der Aare unterhalb des KKM während des Rückbaus wird durch die Sonde in Niederried sichergestellt. Die vier Sonden in Niederried, Aarau, Laufenburg und Basel hatten 2023 keine Betriebsunterbrüche zu verzeichnen. Im November 2023 wurde die Sonde in Niederried durch eine Sonde 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 Sonde bei Niederried misst zwischen dem KKW Mühleberg (KKM) und dem Bielersee, welcher ein wichtiges Wasserreservoir zur Trinkwasseraufbereitung für die Stadt Biel ist. Die Sonde bei Hagneck ist ab 26. Januar aufgrund eines defekten Kabels ausgefallen. Da das KKM im Rückbau ist und sich dort seit 1. September 2023 keine Brennelemente mehr befinden, wird diese Sonde, die etwas schwer zugänglich in der Mitte der Aare platziert ist, nicht ersetzt. Die Überwachung der Aare unterhalb des KKM wird durch die näher gelegene Sonde bei 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 sowie der beiden relativ nahe beieinander liegenden Standorte Beznau und Leibstadt sind zwei weitere Sonden installiert (Aarau und 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 Entnahme von Rheinwasser zur Trinkwasseraufbereitung 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 Meldeschwelle in Grössenordnung der Immissionsgrenzwerte für Gewässer gemäss der Strahlenschutzverordnung zu setzen. Für ^{137}Cs, ^{60}Co und ^{131}I ist die untere Meldeschwelle auf 10 Bq/L gesetzt. Eine zweite Schwelle mit Alarmauslösung basiert auf dem Dosisgrenzwert für Personen aus der Bevölkerung von 1 mSv/Jahr. Die Überlegung dabei ist, dass bei der Nutzung des Flusswassers als Trinkwasser der Dosisgrenzwert eingehalten ist, wenn getroffene Massnahmen spätestens nach einem Monat greifen. Für ^{137}Cs und ^{60}Co liegt die obere Radioaktivitätsschwelle bei 500 Bq/L; für ^{131}I etwas tiefer bei 250 Bq/L. Bei Überschreitung der unteren Meldeschwelle wird die zuständige Stelle



Figur 1 :
Standorte der NaI-Monitore, der EAWAG-Stationen (Hagneck, Klingnau und Pratteln) und der Rheinüberwachungsstation RüS in Weil a.Rh für Spurenmessungen, sowie der Entnahmestellen zur Trinkwasseraufbereitung (Bielersee: Biel; Rhein: Pratteln und Basel; Aare: Uferfiltrat vor Bielersee). Der NaI-Monitor Hagneck ist seit Ende Januar 2023 nicht mehr in Betrieb .

am Bundesamt für Gesundheit (BAG) sowie die Nationale Alarmzentrale (NAZ) benachrichtigt. Das BAG verifiziert die Messwerte und eruiert 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 organisierte Übung überprüft das Funktionieren des Alarmdispositivs. Die automatischen Messsonden sind komplementär zu den monatlichen Messungen der EAWAG (siehe Figur 1), welche mit einer mehr als tausendmal tieferen Nachweisgrenze auch deutlich geringere Abgaben der Kernkraftwerke erfassen können (Kap. 4.4).

Messtechnik

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

Tabelle 1:
Verfügbarkeit (Uptime) der NaI-Wassersonden 2023

Station	Uptime	Inbetriebnahme	Bemerkung
Niederried	99.8%	Juni 2014	Sara-2 ab 27.11.2023
Hagneck		Juni 2015	Sonde seit 26.01.2023 defekt; kein Ersatz geplant: redundante Sonde: Niederried
Aarau	99.7%	Juni 2014	Sara-2 ab set März 2022
Laufenburg	99.9%	Januar 2015	Wechsel auf Sara-2 2024
Basel	99.9%	Juli 2013	Wechsel auf Sara-2 2024

Seit 2022 werden die Sonden der ersten Generation gestaffelt durch Sonden der zweiten Generation «Sara-2» ersetzt (siehe auch Tabelle 1).

Verfügbarkeit der Messsonden und Messergebnisse 2023

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 im Jahr nicht einsatzbereit waren und zwar während den jährlichen Messungen zur Konstanzprüfung oder bei der Reinigung. Die Sonde bei Hagneck ist, wie erwähnt, ab 26. Januar aufgrund eines defekten Kabels ausgefallen und wurde nicht ersetzt. Die Überwachung der Aare unterhalb des KKM wird durch die Sonde bei Niederried sichergestellt.

Die Vorgabe für die Mindestverfügbarkeit des URAnet aqua Messnetzes ist so festgelegt, dass für die Stationspaare 'Niederried-Hagneck' (d.h. in Zukunft die Sonde in Niederried alleine), 'Aarau-Laufenburg' sowie 'Laufenburg-Basel' während mehr als 99% der Zeit mindestens eine Sonde in Betrieb sein muss. Dank der lückenlosen Messungen der Sonden bei Laufenburg und Niederried ist dieses Kriterium für 2023 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 2023 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 (siehe auch Figur 2) sichtbar.

Figur 2 :
Radenviro Blog: Austausch einer URAnetaqua-Sonde in der Station Laufenburg.
(www.radenviro.ch/ein-schnappschluss-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 2023 setzte die Abteilung für Klima- und Umweltphysik (KUP) der Universität Bern das Monitoring von Tritium (^{3}H) in Fliessgewässern und im Niederschlag an ausgewählten Standorten im Kanton Bern fort. Das Monitoring wurde 2017 im Auftrag der BKW Energie AG (BKW) und des Kantons Bern sowie mit Unterstützung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) begonnen und in dieser Partnerschaft bis zum 31.12.2019 durchgeführt. Seit dem 1.1.2020 wird das Tritium-Monitoring vom BAG und der KUP in reduzierter Form weitergeführt. Die höchsten Tritiumwerte wurden auch im Jahr 2023 im Niederschlag aus dem Raum Niederwangen gemessen.

Hintergrund

Tritium (^{3}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, besteht u.a. aufgrund der Richtlinien des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) zur Stilllegung von Kernanlagen (ENSI, 2014, Art. 4.5 und 5.4.4) der Bedarf, Tritium im Wasser der Aare in hoher zeitlicher Auflösung zu messen. Um den Zustand vor der Stilllegung des KKM bezüglich Tritium in den Fliessgewässern zu charakterisieren, führte die KUP von Anfang 2017 bis Ende 2019 Tritium-Messungen durch, die eine Detektion von allfälligen späteren Veränderungen ermöglichen. Tritium wurde dabei jährlich in mehr als 900 Wasserproben gemessen.

Tabelle 1:

Tritium-Messungen Januar bis Dezember 2023 nach Art oder Entnahmeort der Probe

Art oder Entnahmeort der Probe	Anzahl
Aare Mühleberg Rewag	318
Niederschlag Niederwangen	27
Stadtbach Niederwangen	26
Niederschlag Physikalisches Institut	12
Rhein flussabwärts vom KKL	44
Standards/Nulleffekt/Vergleichsmessungen	104
	Total: 531

Probenahmen

Im Jahr 2023 wurden im Rahmen dieses Monitorings die folgenden Standorte beprobt:

- Aare flussabwärts vom KKM
  (Tagesmischproben vom Standort Mühleberg-Rewag)
- Niederschlag Niederwangen
  (Sammelproben)
- Stadtbach Niederwangen
  (Stichproben alle zwei Wochen)
- Niederschlag vom Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern
  (Sammelproben)

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

Tabelle 1 (links) zeigt die im Jahr 2023 gemessenen Proben im Einzelnen.

Die täglichen Probenahmen aus der Aare am Standort Mühleberg sowie aus dem Rhein flussabwärts vom KKL erfolgten mit Hilfe von automatischen Probenehmern vom Typ ISCO 6712, welche in regelmässigen Abständen einige Milliliter Flusswasser in Probeflaschen abfüllen, sodass jede Probeflasche eine Mischprobe eines

24-Stunden-Intervalls enthält. Im Raum Niederwangen wurde alle zwei Wochen eine Stichprobe aus dem Stadtbach entnommen und gemessen. Seit Herbst 2020 erfolgen diese Probenahmen wieder regelmässig alle zwei Wochen. Der Niederschlag (Regen bzw. Schnee), der unweit der Firma MB Microtec in Niederwangen in einem Regensammler erfasst wird, wurde 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}He (Beta-Minus-Zerfall):

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

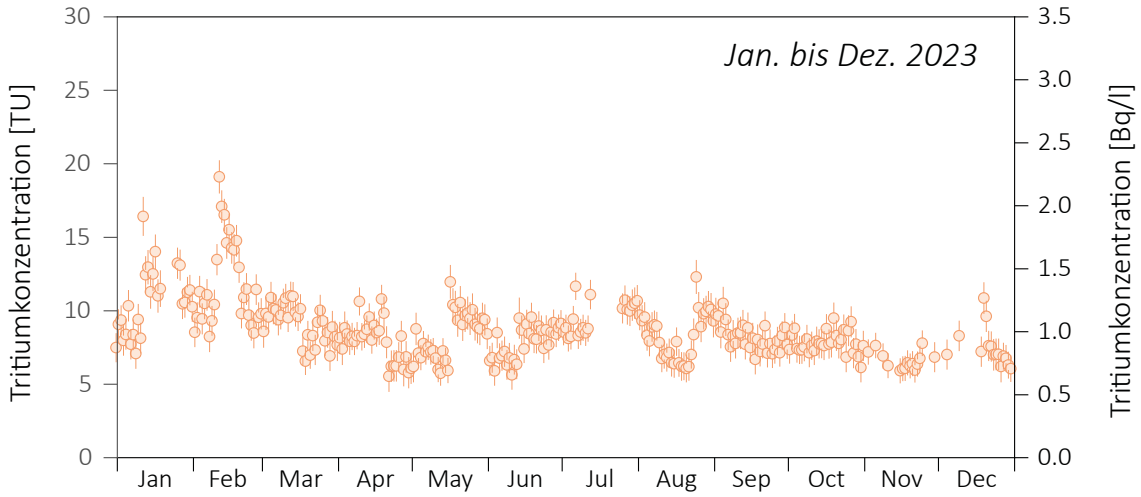
Zum Nachweis und zur Ladungsmessung der in den Wasserproben emittierten Elektronen kam wie in den Vorjahren ein Liquid-Szintillationsmessgerät vom Typ Aloka LSC-LBIII zum Einsatz, welches im Tieflabor des Physikalischen Instituts der Universität Bern installiert ist. Die Nachweisgrenze liegt bei 4 Tritium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

Messergebnisse Januar bis Dezember 2023

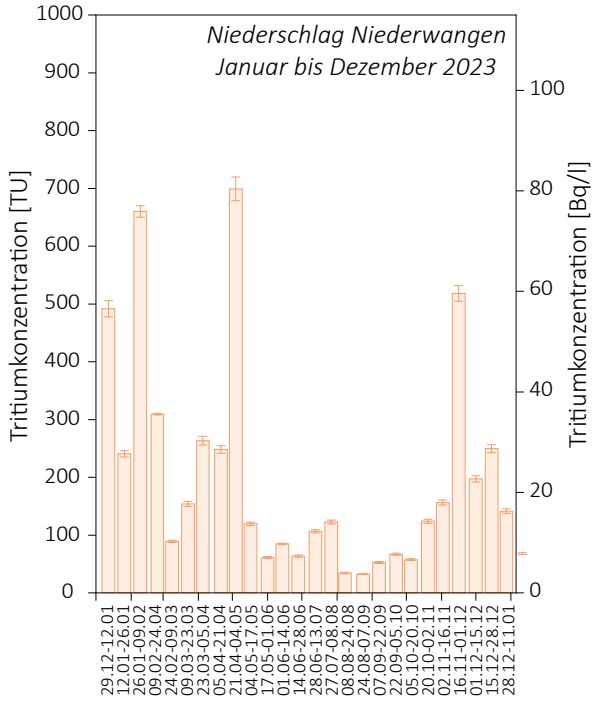
Standort Mühleberg Rewag (Aare)

Die Tritium-Messwerte des Wassers vom Standort Mühleberg Rewag (Figur 1) bewegten sich grösstenteils relativ stabil in einem Band zwischen 5 und 15 TU (entsprechend 0.6 - 2 Bq/L). Leicht erhöhte Werte traten wie in vergangenen Jahren jeweils vor allem im Januar und Februar auf.

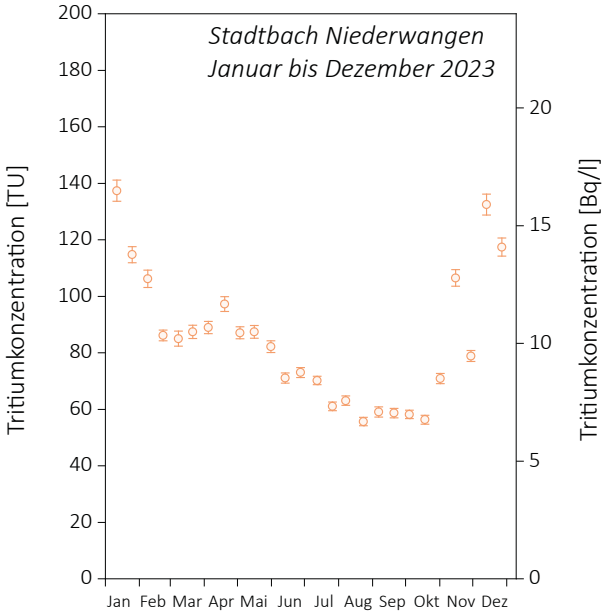
Da der Probennehmer im Juli 2023 aufgrund eines Defekts des Akku-Ladegerätes mehrere Tage lang ausfiel, konnten in diesem Zeitraum keine Proben entnommen werden. Ausserdem wurden Ende November 2023 der Probennehmer und die darin befindlichen Flaschen wegen Hochwasser überschwemmt. Daher liegen für diese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



Figur 1 :
Tritium-Messwerte Mühleberg Rewag. Die höchsten Messwerte traten im Januar/Februar auf.



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

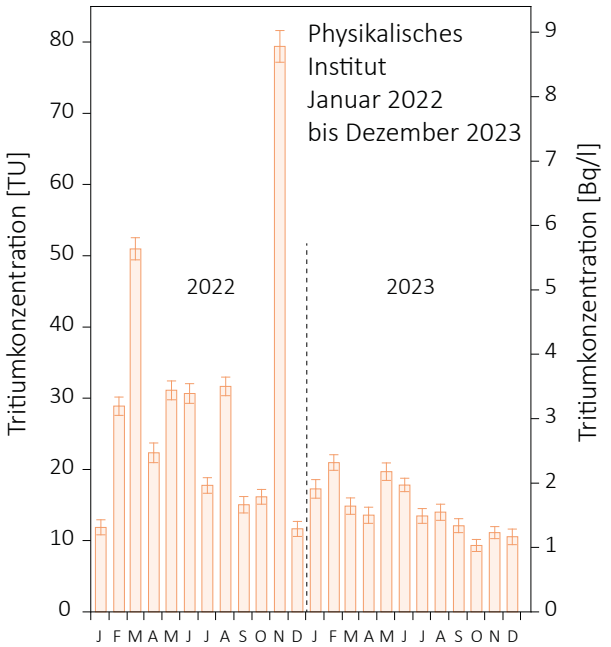


Figur 3 :
Tritium-Messwerte am Stadtbach Niederwangen (Stichproben alle 2 Wochen).

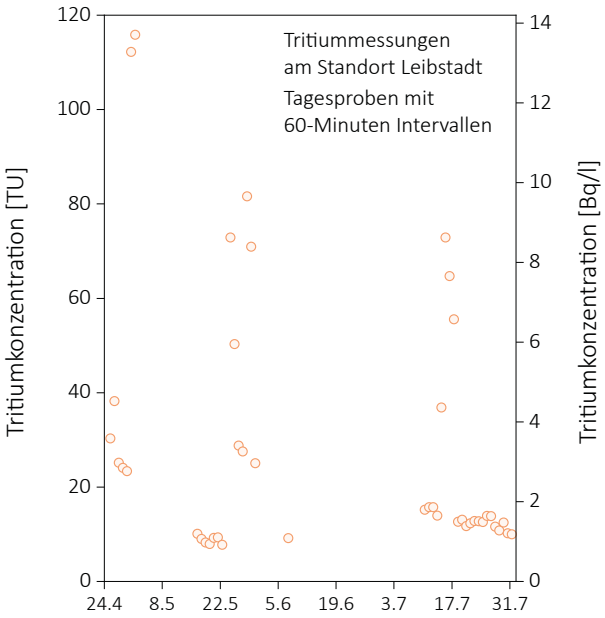
Standorte Niederwangen

Im Raum Niederwangen wurden in der Nähe der Firma MB-Microtec 27 Messungen am lokalen Niederschlag durchgeführt (Figur 2). Der höchste Messwert der Schnee- oder Regenwasserproben lag bei 700 TU (82.5 Bq/L) und trat im April auf. Die Tritiumkonzentration im Niederschlag und in der Luftfeuchtigkeit in der näheren Umgebung ist örtlich stark unterschiedlich (siehe Kap. 9.3, Fig. 1 für Niederschlag und Kap. 9.5, Fig. 3 für Luftfeuchtigkeit).

Seit Herbst 2020 wird in Niederwangen auch der Stadtbach wieder 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 4 :
Tritium-Messwerte des Regenwassers vom Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern (Monatsproben).



Figur 5 :
Tritium-Messwerte im Rhein stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt. Revisionsstillstand: 01.05.2023 bis 30.05.2023.

Standort Physikalisches Institut, Stadt Bern (Regenwasser)

Die Aufgrund der lokalen gasförmigen Emissionen, vor allem durch MB-Microtec, ist die Tritiumkonzentration im Niederschlag im Raum Bern generell höher als in der Aare und auch höher als in Niederschlägen andernorts in der Schweiz. Die im Jahr 2023 gemessenen Monatsproben wurden auf dem Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern gesammelt. Die Werte lagen generell deutlich unter den Werten der Vorjahre. Der höchste Messwert von 21 TU (2.5 Bq/L) trat im Februar auf.

Standort Leibstadt (Rhein)

Um den Tritiumgehalt des Rheins vor, während und nach dem Revisionsstillstand zu ermitteln, welcher vom 01.05.2023 bis 30.05.2023 stattfand, wurde stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) wieder ein automatischer Probennehmer betrieben. Es wurden Tagesproben mit einem Sammelintervall von je 60 Minuten entnommen.

Kurz nach Revisionsbeginn zeichnete sich ein deutlicher Anstieg von ca. 20 TU auf über 100 TU ab (Figur 5). Da die Stromversorgung auch an diesem Standort aufgrund des defekten Ladegerätes nur für wenige Tage lang gewährleistet war, entstand eine Datenlücke von einigen Tagen. Im weiteren Verlauf des Sommers wurden jedoch zwei weitere Messreihen durchgeführt, bei denen jeweils wieder ein deutlicher Peak von 82 TU (9.6 Bq/L) bzw. 73 TU (8.6 Bq/L) gemessen wurde.

Die höheren Messwerte im April und Mai sind auch von den Abgaben der stromaufwärts gelegenen Kernkraftwerke Gösgen und Beznau beeinflusst. Diese beiden Werke geben deutlich mehr Tritium ab, als KKL (siehe auch Kap. 8.1 Fig. 1b und Kapitel 8.5 Fig. 4). Im Juli wurden geringfügig erhöhte Tritiumgehalte auch bei Weil am Rhein gemessen (Kap. 4.4 Fig. 5).

4.7
Radioactivité du sol et de l'herbe

P.-A. Pittet, C. Pilloud, P. Froidevaux, F. Barraud, A. Bonnin, 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 réalisées. Les résultats montrent que l'activité artificielle dans le sol et l'herbe est restée faible et est principalement due aux retombées des essais d'armes atomiques réalisées 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 chaine 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 4 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 continue 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 chaine alimentaire. Au contraire du ^{90}Sr, il se retrouvera principalement dans les tissus musculaires des vertébrés et sera éliminé plus rapidement que le strontium.

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 0.3 à 0.7 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 0.21 Bq/kg pour le plutonium et à 0.09 Bq/kg pour l'américium sur le plateau suisse et des valeurs plus élevées pour les sites en altitude, notamment

à Mürren, ainsi qu'à Stabio au sud des Alpes. Les rapports ^{241}Am/ $^{239+240}$Pu (voir le chapitre 7.2, mesures de plutonium et d'américium) confirment que cette contamination est due aux essais nucléaires des années soixante. Les données collectées pendant les 25 dernières années montrent que les activités en plutonium ont diminué, avec une demi-vie apparente de 19 ± 5 ans pour les sites de plaine et une période de 10 et 9 ans pour 2 sites de prélèvement en altitude (chapitre 7.2).

La situation est plus complexe dans le cas du ^{137}Cs, car le passage du nuage radioactif émis lors de l'accident de Tchernobyl en 1986 a provoqué une déposition supplémentaire dont la répartition géographique n'est pas uniforme. De fortes précipitations s'étant produites au Tessin lors du passage du nuage, c'est dans cette région que les dépôts les plus importants ont eu lieu et où sont mesurées actuellement les plus fortes activités (jusqu'à 224 Bq/kg). Le passage du nuage de Tchernobyl a également touché le nord-est de la Suisse, les valeurs relevées à Arenenberg (24.8 Bq/kg) et Güttingen (18.2 Bq/kg) étant supérieures à celles obtenues sur les autres sites du plateau suisse (5 à 10 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'illustré par la figure 3 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 radioactivité 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 (0.6 - 5.6 Bq/kg) et au Tessin (0.9 - 5.3 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 1.5 Bq/kg soit non quantifiables.

En 2022, un échantillon de sol non cultivé et marécageux prélevé à Coglio avait montré un marquage au ^{90}Sr et ^{137}Cs caractéristique du sud des Alpes. Aucun échantillon d'herbe n'ayant été collecté en 2022, un prélèvement d'herbe et de sol a été effectué en 2023 sur le même lieu. Lors de la mesure de spectrométrie gamma in-situ (chapitre 3.1), il est apparu que le sol du champ cultivé limitrophe montrait une activité en ^{137}Cs beaucoup plus faible. Un autre prélèvement de sol et d'herbe a été effectué dans ce champ cultivé et se situait à une distance d'environ 25 m du premier site. Les résultats de la mesure en laboratoire du ^{137}Cs et ^{90}Sr du sol non cultivé étaient identiques pour les prélèvements effectués en 2022 et 2023 tandis que le marquage en ^{137}Cs et ^{90}Sr était d'un ordre de magnitude plus faible pour le sol cultivé prélevé en 2023. Les aspects physiques de ces deux sols étaient également significativement différents, le non cultivé étant décrit comme une terre très noire et granuleuse (perte de masse de 15% lors de la calcination) tandis que le cultivé apparaissait comme une terre grise et très légère (perte de masse de 5% lors de la calcination). Les compositions de ces deux sols sont donc clairement distinctes et leur utilisation est clairement différente. La présence de dépôts d'alluvions hétéroclites par la rivière Maggia très proche ne peut également être exclue. En l'absence de l'historique des évènements liés à ces deux sols, il est impossible de trouver une explication à ces disparités mais cela montre que des sites très proches peuvent avoir des marquages significativement différents. Pour les herbes collectées sur ces 2 sols, les résultats obtenus n'ont pas montré de différence significative.

Conclusions

Les mesures de la radioactivité dans les sols et les herbes en Suisse en 2023 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. Un marquage assez important en ^{137}Cs dans des échantillons de sol et d'herbe de certains sites de prélèvement du Tessin et de Suisse orientale est encore observé plus de trente ans après l'accident de Tchernobyl.

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 2023 (Bq/kg matière sèche, fraction < 2 mm).

Canton / Lieu	n	^{40}K	^{60}Co	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}Pu$	^{241}Am
AG (Voisinage KKB)	2	422 ± 35	0.6	0.5	4.9 ± 1.7	0.62 ± 0.15	0.149 ± 0.012 m = 2 [3]	0.068 ± 0.006 m = 3 [3]
AG (KKB in-situ)	2	307 ± 22			7.9 ± 1.1			
AG (PSI)	1	395 ± 31	0.5	0.4	9.1 ± 0.8	0.33 ± 0.08	0.148 ± 0.010	0.063 ± 0.006 m = 2 [3]
AG (PSI in-situ)	1	273 ± 28			5.2 ± 0.7			
AG (ZWILAG)	1	410 ± 33	0.8	0.6	9.1 ± 1.0	0.40 ± 0.09	0.171 ± 0.011	0.077 ± 0.007 m = 3 [3]
AG (ZWILAG in-situ)	1	324 ± 34			6.2 ± 0.8			
AG (Vois. KKL)	4	390 ± 31	0.7	0.6	10.4 ± 3.0	0.66 ± 0.15	0.195 ± 0.018	0.080 ± 0.007 m = 2 [3]
AG (KKL in-situ)	4	317 ± 8			7.8 ± 1.8			
AG/SO (Vois. KKG)	4	459 ± 71	0.8	0.6	8.1 ± 1.1	0.47 ± 0.11	0.208 ± 0.014	0.087 ± 0.007 m = 2 [3]
AG/SO (KKG in-situ)	4	364 ± 65			5.7 ± 0.7			
BE (Voisinage KKM)	7	681 ± 67	0.9	0.7	6.7 ± 2.1	0.49 ± 0.11	0.190 ± 0.013	0.072 ± 0.006 m = 3 [3]
BE (KKM in-situ)	7	548 ± 74			5.4 ± 1.7			
BE (Mürren) [1]	1	420 ± 36	< 0.4	< 0.4	36 ± 4.4	2.68 ± 0.40	1.56 ± 0.04	0.74 ± 0.10
BE (Gimmelwald)	1	313 ± 26.6	< 0.4	< 0.5	10.3 ± 1.3	2.45 ± 0.40	0.40 ± 0.01	0.20 ± 0.06
BE (Fahrni) [2]	1	430 ± 36	< 0.4	< 0.4	9.1 ± 1.1	1.62 ± 0.40	0.41 ± 0.01	0.22 ± 0.05
BE (Diesse/Jura)	1	470 ± 40	< 0.4	< 0.5	11 ± 1.4	0.98 ± 0.19	0.38 ± 0.01	0.17 ± 0.04
BL (Sissach)	1	555 ± 25	< 0.03	< 0.04	15.7 ± 0.7	4.93 ± 1.97		
FR (Posieux)	1	403 ± 31	0.6	0.6	5.0 ± 0.7	0.37 ± 0.10	0.195 ± 0.015	0.079 ± 0.006 m = 3 [3]
FR (Posieux in-situ)	1	373 ± 38			3.5 ± 0.6			
GE (Vois. CERN)	5	426 ± 60	0.8	0.6	4.9 ± 1.7	0.31 ± 0.08	0.111 ± 0.014 m = 2 [3]	0.050 ± 0.007 m = 2 [3]
GE (CERN in-situ)	5	330 ± 11			2.5 ± 1.0			
TG (Arenenberg)	1	409 ± 32	0.5	0.4	24.8 ± 2.0	0.51 ± 0.12	0.125 ± 0.010	0.048 ± 0.006
TG (Arenenberg in-situ)	1	336 ± 35			15.6 ± 1.7			
TG (Güttingen)	1	349 ± 26	0.4	0.4	18.2 ± 1.5	0.30 ± 0.07	0.168 ± 0.013	0.081 ± 0.008 m = 2 [3]
TG (Güttingen in-situ)	1	255 ± 27			9.9 ± 1.1			
TI (Centovalli)	1	507 ± 24	< 0.8	< 0.1	195.0 ± 8.7	6.80 ± 2.72		
TI (Prato Leventina)	1	554 ± 29	< 0.1	< 0.1	13.6 ± 7.6	5.11 ± 2.04		
TI (Sessa)	1	408 ± 20	< 0.1	< 0.1	51.5 ± 2.2	4.13 ± 1.65		
TI (Cadenazzo)	1	675 ± 50	0.8	0.7	48.8 ± 3.8	0.76 ± 0.16	0.131 ± 0.013	0.059 ± 0.007 m = 2 [3]
TI (Cadenazzo in-situ)	1	554 ± 57			37.0 ± 3.9			
Ti (Caslano)	1	580 ± 42	0.5	0.5	71.3 ± 5.4			
Ti (Caslano in-situ)	1	652 ± 57			40.0 ± 4.2			
TI (Coglio), non cultivé	1	618 ± 32	< 0.8	< 0.8	224 ± 10.6	3.56 ± 0.70		
TI (Coglio in situ), non cultivé	1	580 ± 59			99 ± 10.0			
TI (Coglio), cultivé	1	831 ± 41	< 0.7	< 0.9	18.5 ± 1.0	0.32 ± 0.09		
TI (Coglio in situ), cultivé	1	697 ± 75			18.0 ± 2.6			
TI (Stabio)	1	601 ± 47	1.0	0.8	166 ± 13	0.95 ± 0.21	0.573 ± 0.034 m = 2 [3]	0.275 ± 0.018 m = 2 [3]
TI (Stabio in-situ)	1	548 ± 56			122 ± 12			

n = nombre d'échantillons; [1] alpage (Allmendhubel, 1'900 m); [2] bord des Alpes (850 m); [3] m = moyenne pour m analyses, détails dans chapitre 7.2 plutonium et américium dans l'environnement.
Remarque: les résultats des mesures in situ sont représentatifs de l'activité moyenne du sol sur une surface d'environ 300 m^2, alors que les mesures en laboratoire permettent la détermination précise de l'activité du sol au point de prélèvement.

Tableau 2 :

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

Canton/Lieu	n	^{7}Be	^{40}K	^{60}Co	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr
AG (Voisinage KKB)	4	182 ± 35	762 ± 186	< 2.0	< 1.3	< 1.3	0.35 ± 0.09 [3] 0.74 ± 0.15 [4]
AG (PSI)	2	164 ± 32	623 ± 57	< 1.1	< 1.0	1.5 ± 1.0	0.34 ± 0.08 [3] 0.65 ± 0.15 [4]
AG (ZWILAG)	2	219 ± 13	587 ± 159	< 1.3	< 1.1	< 1.0	0.51 ± 0.12 [3] 1.04 ± 0.21 [4]
AG (Voisinage KKL)	8	198 ± 84	698 ± 224	< 1.8	< 1.3	1.1 ± 0.3	0.72 ± 0.15 [3] 0.61 ± 0.13 [4]
AG/SO (Voisinage KKG)	8	180 ± 38	865 ± 273	< 1.7	< 1.3	1.0 ± 0.2	0.42 ± 0.12 [3] 0.80 ± 0.16 [4]
BE (Voisinage KKM)	8	183 ± 36	781 ± 166	< 2.0	< 1.5	1.3 ± 1.2	0.23 ± 0.06 [3] 0.77 ± 0.17 [4]
BE (Lauterbrunnen)	1	151 ± 24	526 ± 45	< 0.4	< 0.3	< 0.3	1.2 ± 0.2 [3]
BE (Mürren) [1]	1	262 ± 38	893 ± 76	< 0.5	< 0.3	< 0.3	5.6 ± 0.7 [3]
BE (Gimmelwald)	1	190± 28	810 ± 70	< 0.5	< 0.3	< 0.5	2.3 ± 0.3 [3]
BE (Fahrni) [2]	2	239 ± 34	1150 ± 97	< 0.5	< 0.3	< 0.4	1.6 ± 0.1 [3] 2.25 ± 0.23 [4]
BE (Diesse/Jura)	2	170 ±24	1340 ± 113	< 0.5	< 0.4	< 0.4	0.80 ± 0.12 [3] 0.57 ± 0.06 [4]
BL (Sissach)	1	32 ± 4	868 ± 46	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.71 ± 0.28
FR (Posieux)	1	173 ± 13	775 ± 249	< 1.8	< 1.3	< 1.3	0.58 ± 0.12 [3]
GE (Voisinage CERN)	4	230 ± 37	770 ± 261	< 1.6	< 1.1	< 0.9	0.83 ± 0.17 [4]
TG (Güttingen)	1	141 ± 26	997 ± 33	< 1.3	< 1.1	< 0.9	0.36 ± 0.08 [3]
Ti (Centovalli)	1	120 ± 10	276 ± 19	< 0.2	< 0.2	12.1 ± 0.9	5.27 ± 2.11
TI (Prato Leventina)	1	147 ± 11	778 ± 38	< 0.2	< 0.2	0.5 ± 0.29	0.85 ± 0.34
TI (Sessa)	1	310 ± 20	951 ± 51	< 0.2	< 0.2	1.2 ± 0.3	7.56 ± 3.02
TI (Cadenazzo)	1	396 ± 361	740 ± 202	< 1.3	< 1.0	2.1 ± 1.4	2.44 ± 0.48 [3]
TI (Coglio, non cultivé)	1	69 ± 20	1'387 ± 100	< 5.0	< 3.0	< 3.0	1.46 ± 0.31
TI (Coglio, cultivé)	1	393 ± 40	917 ± 67	< 4.0	< 4.0	< 4.0	1.22 ± 0.25
Ti (Stabio)	1	86 ± 10	978 ± 74	< 1.2	< 1.0	1.4 ± 0.4	1.97 ± 0.40

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

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.

Radioactivité dans l'alimentation

5

Radioaktivität in Lebensmitteln

- *Lait*
- *Céréales*
- *Légumes*
- *Viandes*
- *Chasse*
- *etc.*

- *Milch*
- *Getreide*
- *Gemüse*
- *Fleisch*
- *Wild*
- *usw.*

2023

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
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
F. Barraud, 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 2023 etwa 300 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, von kantonalen Messkampagnen und von Spezialprogrammen statt. In den Hauptnahrungsmitteln waren wie erwartet Spuren von ^{137}Cs, ^{90}Sr und Tritium als künstliche Radionuklide nachweisbar. Bei rund 3 % 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. In einer Milchprobe aus dem Tessin konnten immer noch Spuren von ^{137}Cs nachgewiesen werden (14 Bq/l). Auch ein Wildpilz aus dem Kanton Bern zeigte leicht erhöhte ^{137}Cs Aktivitätskonzentrationen (95 Bq/kg).

Bei den importierten Lebensmitteln waren die festgestellten Konzentrationen künstlicher Radionuklide im allgemeinen sehr tief und ohne Grenzwertüberschreitungen. Auch hier zeigten eine Wildprobe (Gams) und Pilze die höchsten ^{137}Cs-Aktivitätskonzentrationen (Maxima: 23 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 Duschanlagen (TBDV), der Kontaminantenverordnung (VHK) sowie die Verordnung über die Einfuhr von Lebensmitteln mit Ursprung oder Herkunft Japan (seit August 2023 aufgehoben). Die Tschernobyl-Verordnung gilt für Lebensmittel (einheimische Produkte und Importe), die aufgrund des Reaktorunfalls in Tschernobyl (1986) kontaminiert 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. Ebenfalls in Übereinstimmung mit EU-Recht war die Festlegung von Höchstwerten für Cäsium-Isotope für Importe aus Japan nach dem Reaktorunfall in Fukushima in der BLV Verordnung über die Einfuhr von Lebensmitteln aus Japan.

Für die vergleichende Einordnung der Radioaktivität in Lebensmitteln bieten sich die abgeleiteten Konzentrationen (AK) aus der Trink-, Dusch- und Badewasserverordnung (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	Trink-wasser	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: Kontaminatenverordnung, 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 Duschwasserverordnung 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 Höchswerte 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 Rekkonstitutionsfaktor 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 ^{3}H, ^{222}Rn und kurzlebige Radonfolgeprodukte).

Ergebnisse der Überwachung der Lebensmittel aus der Schweiz

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

2023 wurden rund 150 Milchproben gammaspektrometrisch analysiert. Für ^{137}Cs waren die meisten Werte tiefer als die Nachweisgrenze, die zwischen 0.02 Bq/l und 0.3 Bq/l lag. Ein einziger Messwert war grösser als 1 Bq/l. Er wurde bei einer Probe aus dem Centovalli festgestellt (14 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 2023 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 63 Milchproben auf ^{90}Sr. Alle gemessenen Werte waren sehr tief mit einem Maximum von 0.21 Bq/l und einem Median von 0.008 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 28 Gemüse- und Obstproben aus der Schweiz konnte in einer Getreideprobe aus dem Tessin Spuren von ^{137}Cs erkannt werden (0.1 Bq/kg Frischgewicht). In allen anderen Proben 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 gemessenen Konzentrationen 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=17), sowohl aus der Umgebung von Kernkraftwerken als auch aus entfernten Gebieten, variierten zwischen 0.05 und 0.21 Bq/kg Frischgewicht; mit Median = Durchschnitt = 0.12 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. Ebensoviele Gemüseproben aus dem Kanton Waadt befanden sich in einem Bereich zwischen 0.04 und 0.22 Bq/kg ^{90}Sr.

Tritium (^{3}H) 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 2023 ergaben Tritiumkonzentrationen (^{3}H) von 9 - 119 Bq/l im Destillat (12 Proben; Mittelwert: 40 Bq/l). Die ebenfalls leicht erhöhte ^{3}H-Aktivität der Milch aus der Umgebung des genannten Betriebes (7.6 - 10.6 Bq/l im Destillat von 3 Milchproben) ist auf die Aufnahme von ^{3}H aus lokalen Futtermitteln zurückzuführen.

In 10 Milchproben aus der Umgebung des KKW Mühleberg konnten keine Werte > 5 Bq/l Tritium nachgewiesen werden. Für Tritium gibt es für diese Art Proben keinen gesetzlichen Höchstwert. Verglichen mit dem für Trinkwasser geltenden Parameterwertes für Tritium von 100 Bq/l liegen zwei Gemüse und Obstproben leicht darüber, alle anderen Proben sind deutlich tiefer.

^{137}Cs in Wildschweinen

Der Kanton Tessin hat die in Zusammenarbeit mit dem BAG eingeführten Triagemessungen an Wildschweinen mit einem empfindlichen Dosisleistungsmessgerät im Jahr 2023 weitergeführt. Tiere, bei denen die Triagemessung (Dosisleistung) vor Ort einen zu hohen Wert anzeigte, wurden konfisziert. Dies war bei 22 von 681 untersuchten Tieren der Fall. Das entspricht, ähnlich wie in den letzten Jahren, einer Quote von ca. 3 %. 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 4'832 Bq/kg ^{137}Cs.

Andere Lebensmittel aus der Schweiz

In den 6 untersuchten Fischproben aus Aare und Rhein wurden keine Spuren von ^{137}Cs festgestellt (Nachweisgrenze < 0.3 Bq/kg Frischgewicht). In diesen Proben werden auch die Aktinide Plutonium, Americium und Curium gemessen. In keiner Probe konnten Spuren von Aktiniden 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) beispielsweise würde bei Anwendung der VHK ein Grenzwert von 80'000 mBq/kg gelten.

Die KL Bern und Graubünden haben 9 Proben einheimischer Pilze untersucht: Mittelwert 17 Bq/kg (Frischgewicht) ^{137}Cs; Maximum 95 Bq/kg ^{137}Cs; Median 6 Bq/kg ^{137}Cs. Der Grenzwert von 600 Bq/kg aus der Tschernobylverordnung wurde somit nicht erreicht.

Des Weiteren führte das KL-BS eine Messkampagne mit grösstenteils aus der Schweiz stammenden Mineralwässer durch. In 7 der 30 Proben konnten Spuren von ^{226}Ra nachgewiesen werden. Der höchste Wert lag bei 53 ± 22 mBq/L in einem Mineralwasser aus der Schweiz. In keiner der 30 Proben konnte ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{224}Ra oder ^{3}H nachgewiesen werden. Die Gesamtdosis überschritt in keiner Wasserprobe den Richtwert von 0.1 mSv/Jahr.

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 rund 200 importierte Lebensmittel geprüft.

Die höchste Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs bei 26 vom KL-BS untersuchten, meist importierten Wildproben wurde mit 22.6 ± 1.5 Bq/kg in einem Gamsragout aus Slowenien nachgewiesen. Der Höchstwert gemäss Tschernobyl-Verordnung von 600 Bq/kg wurde deutlich unterschritten. ^{90}Sr konnte in diesen Proben nicht nachgewiesen werden.

20 Algenprodukte wurden im Kanton Basel-Stadt erhoben. Die Proben stammten aus China (6), Südkorea (5), Taiwan (3) und je 2 mal aus Deutschland, Frankreich und Portugal. Die künstlichen Radionuklide ^{134}Cs, ^{137}Cs und ^{90}Sr konnten in keiner Probe nachgewiesen werden.

15 Verkaufseinheiten Zitrusfrüchte wurden ebenfalls im Kanton Basel-Stadt erhoben. In keiner der Proben konnte ^{134}Cs oder ^{137}Cs detektiert werden.

Die KL BE und ZH analysierten 45 Proben von importierten Pilzen. Die höchste Aktivitätskonzentration erreichten mit 183 Bq/kg Frischgewicht ^{137}Cs Eierschwämme aus Litauen. Weitere Eierschwämme aus dem gleichen Ursprungsland enthielten deutlich weniger bis gar kein ^{137}Cs. Der Medianwert aller Proben betrug 1 Bq/kg.

Grenzwertüberschreitungen sind bei den importierten Lebensmitteln im Berichtsjahr 2023 nicht aufgetreten.

Bewertung der künstlichen Radionuklide

Der Der Grenzwert für ^{137}Cs der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg) wurde 2023 von 22 Wildschweinproben (Maximum 4’832 Bq/kg) aus der Schweiz überschritten. Bezogen auf die Gesamtzahl untersuchter Proben machen diese Grenzwertüberschreitungen mit 3% 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 (95 Bq/kg Frischgewicht) und importierten Pilzproben (183 Bq/kg) auf. Ebenfalls erwartet war die gemessenen Spuren von ^{137}Cs in einer Milchprobe aus dem Tessin (14 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.

Natürliche Radionuklide in der Nahrung

Natürliche Radionuklide aus den Zerfallsreihen von Uran und Thorium kommen in allen Lebensmitteln vor. Typische Aktivitätskonzentrationen («weltweiter Durchschnitt») sind in der Tabelle 2a aufgeführt. Auffallend sind vor allem erhöhte Werte für ^{210}Po in Meeresfischen und Meeresfrüchten sowie die hohen Aktivitätskonzentrationen der beiden Radium-Isotope in Paranüssen. Der durchschnittliche jährliche Verzehr der verschiedenen Lebensmittelgruppen ist in Tabelle 2a ebenfalls aufgeführt. Für die Ermittlung der Strahlendosis muss die Aktivitätskonzentration im Lebensmittel (Bq/kg), der jährliche Konsum (kg/Jahr) sowie die Radiotoxizität des Radionuklids berücksichtigt werden.

Tabelle 2a:
Durchschnittliche Aktivitätskonzentrationen von natürlichen Radionukliden in verschiedenen Lebensmittelgrupppen.

Lebensmittelgruppe	Verzehr (kg/Jahr)	Aktivitätskonzentrationen der natürlichen Radionuklide (Bq/kg)							
		^{210}Pb	^{210}Po	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	^{230}Th	^{232}Th	^{238}U
Getreide	66 A	0.15 D	0.14 D	0.12 D	0.12 D	0.003 L,M	0.01 C,X	0.003 C,X	0.02 C,X
Früchte	58 B	0.14 D	0.12 D	0.08 D	0.11 D	0.0005 L,N	0.0005 L,N	0.0005 L,N	0.003 L,N
Wurzelgemüse + Kartoffeln	37 B	0.07 D	0.04 D	0.11 D	0.31 D	0.0005 L,N	0.0005 L,N	0.0005 L,N	0.003 L,N
Andere Gemüse	53 B	0.13 D	0.12 D	0.11 D	0.12 D	0.015 L,O	0.02 L,O	0.015 L,O	0.02 L,O
Konsummilch	51 C	0.06 D	0.07 D	0.05 D	0.04 D	0.0003 L,P	0.001 L,P	0.0003 L,P	0.001 L,P
Milchprodukte	69 C	0.15 D,X	0.15 D	0.08 D	0.14 D	0.0003 L,P	0.0005 L,P	0.0003 L,P	0.001 L,P
Fleisch	45 C	0.15 D	0.10 D	0.04 D	0.09 D	0.001 L,Q	0.002 L,Q	0.001 L,Q	0.002 L,Q
Innereien	0.7 C	0.52 D	0.72 D	0.04 D,J	0.09 D,J	0.001 L,Q	0.002 L,Q	0.001 L,Q	0.002 L,Q
Eier	11 A	0.09 D	0.07 D	0.11 D	0.09 D	0.001 L,Q	0.002 L,Q	0.001 L,Q	0.002 L,Q
Süsswasserfisch	1.8 C	0.23 D	0.99 D	0.48 D	0.84 D	0.1 L,R	0.01 L,R	0.01 L,R	0.03 L,R
Meerfisch	7.5 C	0.20 D	1.94 D	0.27 D	1.75 D	0.1 L,R	0.01 L,R	0.01 L,R	0.03 L,R
Krustentiere	1.3 C	0.14 D	7.60 D,E,F	0.06 D	0.40 D	0.1 L,R	0.01 L,R	0.01 L,R	0.03 L,R
Weichtiere: Muscheln	0.4 C	1.99 D	32.7 D,F	0.16 D	0.17 D				
Weichtiere: Tintenfisch	0.2 C	0.20 D,H	1.90 D,F	0.27 D,H	1.75 D,H				
Andere: Pilze (Champignons)	3.4 C	0.32 D	0.58 D	0.30 D	0.26 D				
Andere: Pilze (Boletaceae)	0.6 C	9.70 D,Y	0.25 D,Y	0.30 D	0.26 D				
Andere: Kräuter	1.0 A	0.57 D	0.88 D	0.33 D	0.18 D				
Andere: Zucker und Honig	36 A	0.11 D	0.23 D	0.05 D	0.19 D				
Andere: Nüsse	4.4 A	0.13 D	0.10 D	0.23 D	0.53 D				
Andere: Paranuss	0.03 A	4.70 G	4.70 G	33 I	34 I	12 G		17 G	1.4 G
Andere: Olivenöl	1.83 A			< 0.27 K	< 0.39 K				

e_{ing} (Sv/Bq)		6.9E-07	1.2E-06	2.8E-07	6.9E-07	7.2E-08	2.1E-07	2.3E-07	9.5E-08 S
Effektive Jahresdosis (mSv)	Summe: 0.22	0.044	0.114	0.012	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000
		20%	51%	5%	23%	0%	0%	0%	0%

A "Angenäherter Verzehr"; Benzi Schmid C, 2023. Nahrungsmittelbilanz für die Schweiz: Überblick zum angenäherten Verzehr und zu dessen Entwicklung in den vergangenen acht Jahren. Schweizer Ernährungsbulletin. doi: 10.24444/blv-2023-0111

B "Angenäherter Verzehr" (Referenz Fussnote A) korrigiert für "food waste" gemäss Angaben Bafu

C menuCH: Food consumption data from the First Swiss National Nutrition Survey menuCH 2014-15, Matthes K., Floris J., Bender N., Staub K., 2021.

D IAEA 2023. Exposure due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 1: Technical Material. Safety Reports Series No. 114, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2023.

E Mittelwert aus Unterkategorien

F ^{210}Po Aktivitätskonzentrationen sind mit einem Faktor 0.81 für den Zerfall während der Aufbewahrung korrigiert.

G Angaben BfS (www.bfs.de)

H Werte für Meeresfische

I Messungen BAG/IRA

J Werte für Fleisch

K Guillén (2020)

L UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources: Report to the General Assembly, Scientific Annexe B. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York, 2010.

M Referenzwert für 'Getreide'

N Referenzwert für 'Wurzelgemüse und Früchte'

O Referenzwert für 'Blattgemüse'

P Referenzwert für 'Milch und Milchprodukte'

Q Referenzwert für 'Fleischprodukte'

R Referenzwert für 'Fischprodukte'

S Dosiskoeffizient beinhaltet ^{238}U, ^{234}U und ^{235}U in natürlichem Isotopenverhältnis.

X Wert von ^{210}Po eingesetzt. Begründung: Der IAEA-Wert für ^{210}Pb ist aus Tabelle II-1 "not included in statistical analyses". Mit diesem Wert wäre eine Anreicherung in Milchprodukten verglichen mit Milch ist mehr als doppelt so hoch wie für die anderen Radionuklide. Ein Gleichgewicht zwischen ^{210}Pb und ^{210}Po ist realistischer.

Y IAEA 2023, geometrisches Mittel, Tabelle 22, birch bolete

Z IAEA 2023, arithmetisches Mittel, Tabelle 21

Tabelle 2b:
Effektive jährliche Dosis pro Radionuklid und Lebensmittelkategorie.

Lebensmittelgruppe	Verzehr (kg/Jahr)	Effektive jährliche Dosis pro Nuklid und Kategorie (mSv)								Summe pro Lebensmittel (mSv, %)	
		^{210}Pb	^{210}Po	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	^{230}Th	^{232}Th	^{238}U		
Getreide	66	0.007	0.011	0.002	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026	12%
Früchte	58	0.006	0.008	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	9%
Wurzelgemüse + Kartoffeln	37	0.002	0.002	0.001	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	6%
Andere Gemüse	53	0.005	0.008	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	8%
Konsummilch	51	0.002	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	4%
Milchprodukte	69	0.007	0.012	0.002	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028	12%
Fleisch	45	0.005	0.005	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	6%
Innereien	0.7	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0%
Eier	11	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	1%
Süsswasserfisch	1.8	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	2%
Meerfisch	7.5	0.001	0.017	0.001	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028	13%
Krustentiere	1.3	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	5%
Weichtiere: Muscheln	0.4	0.001	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	7%
Weichtiere: Tintenfisch	0.2	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0%
Andere: Pilze (Champignons)	3.4	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	2%
Andere: Pilze (Boletaceae)	0.6	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	2%
Andere: Kräuter	1.0	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	1%
Andere: Zucker und Honig	36	0.003	0.010	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	8%
Andere: Nüsse	4.4	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	1%
Andere: Paranuss	0.03	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	1%
										0.22 mSv total	

Die Radiotoxizität wird als Dosiskoeffizient ausgedrückt (Sv/Bq). Die Dosiskoeffizienten (e_{ing}) stehen in Tabelle 2a unten. Das Produkt aus diesen drei Zahlen (mal Tausend) ergibt die jährliche Dosis (mSv) für jede Lebensmittelgruppe und jedes Radionuklid. Die so errechneten Dosisbeiträge pro Radionuklid sind in Tabelle 2a, unterste Zeile, sowie pro Lebensmittel in Tabelle 2b, letzte Spalten, aufgelistet. Die geschätzte durchschnittliche jährliche effektive Dosis für Erwachsene in der Schweiz durch natürliche Radionuklide in der Nahrung beträgt 0.22 mSv.

Aufgeschlüsselt nach Radionukliden ist für den grössten Beitrag zu dieser Dosis mit knapp über 50% das ^{210}Po verantwortlich. Nahrungsmittel aus dem Meer (Meerfisch, Meeresfrüchte) tragen hier besonders viel bei. Die Nummern 2 und 3 der natürlichen Radionuklide, gemessen am Beitrag zur Ingestionsdosis, sind ^{210}Pb und ^{228}Ra mit einem Beitrag von jeweils um die 20%. Die Dosisbeiträge dieser Radionuklide kommen aus ganz unterschiedlichen Lebensmittelgruppen. Auch noch nennenswert ist ein Dosisbeitrag von rund 5% durch ^{226}Ra, während die Thorium-Isotope und Uran in der Nahrung keinen wesentlichen Beitrag zur Strahlendosis liefern.

Betrachten wir die Dosisbeiträge pro Nahrungsmittelgruppe, fallen drei Gruppen mit einem Beitrag über 10% auf (12% - 13%). Es sind dies einerseits zwei Gruppen mit einem hohen Verzehr (Getreide und Milchprodukte) und andererseits der Meerfisch mit einem mittleren Verzehr aber erhöhter Aktivitätskonzentrationen.

Unterschiede in der individuellen Strahlenbelastung durch natürliche Radioaktivität in der Nahrung: Meeresfrüchte und Paranüsse

Die jährliche Strahlendosis, die eine Person durch natürliche Radioaktivität in der Nahrung erhält, hängt stark vom individuellen Ernährungsverhalten ab und kann deutlich vom Durchschnitt von 0.22 mSv abweichen. Die Dosis erhöht sich, wenn überdurchschnittliche Mengen von Lebensmitteln mit erhöhter natürlicher Radioaktivität konsumiert werden.

Zwei besonders betroffene Lebensmittel sind Muscheln (hohe Konzentrationen von ^{210}Po) und Paranüsse (hohe Konzentrationen von ^{228}Ra und ^{226}Ra). In der Studie menuCH 2014 - 2015 [1] wurden neben

den Mittelwerten des Verzehrs, auch Perzentile ermittelt. Für Muscheln zum Beispiel beträgt der Mittelwert für den Verzehr 0.4 kg/Jahr und der 99te Perzentil liegt mit 11.5 kg/Jahr, rund 29 mal höher. Für das eine Prozent der Schweizer Bevölkerung, mit einem Verzehr von Muscheln gleich oder über dem 99ten Perzentil, erhöht sich die jährliche Strahlendosis durch natürliche Radionuklide in der Nahrung um 0.45 mSv oder mehr. Die Strahlendosis durch natürliche Radionuklide in Nahrungsmitteln insgesamt beträgt also für diese Personen 0.7 mSv oder mehr. Für die französische Bevölkerung hat das IRSN [2] eine jährliche Strahlendosis durch Meeresfrüchte von 0.13 mSv für einen durchschnittlichen Konsum und von 2.1 mSv für Personen mit einem starken Konsum errechnet!

Bei Grundnahrungsmitteln sind die individuellen Unterschiede naturgemäss kleiner. Für Getreide und Getreideprodukte beispielsweise ist der 99te Perzentil knapp dreimal so hoch wie der Mittelwert. Die jährliche Dosis durch natürliche Radionuklide in diesen Nahrungsmitteln schwankt damit zwischen 0.026 mSv im Mittel und 0.073 mSv für einen starken Verzehr.

Ein besonderer Fall sind die Paranüsse mit bekannt hohen Aktivitätskonzentrationen der Radiumisotope. Diese hohe Radioaktivität ist auf eine Eigenheit des Paranussbaumes zurückzuführen. Der Baum wächst auf stark verwitterten Böden in tropischen Regenwäldern und reichert durch ein weitverzweigtes Wurzelsystem besonders viele Radiumisotope an. Bei anderen Nussarten ist dieses Phänomen nicht bekannt. Der durchschnittliche Verzehr von Paranüssen ist in der Schweiz mit 30 g pro Jahr gering und entspricht einer Jahresdosis von 0.001 mSv. Einzelne Personen essen aber deutlich mehr Paranüsse. Im Rahmen der Pilotphase der Schweizer Gesundheitsstudie wurden rund hundert Personen mit vegetarischer oder veganer Ernährung nach dem Verzehr von Paranüssen gefragt [3]. Den höchsten Verzehr hatten drei Personen mit einer Portion (30 g) Paranüsse täglich. Das deutsche Bundesamt für Strahlenschutz BfS hat sich vertieft mit der Strahlendosis durch Paranüsse befasst [4]. Für einen hohen Konsum von 2 Paranüssen täglich (8 g) rechnet das BfS mit einer jährlichen Strahlendosis von 0.16 mSv für Erwachsene. Für Kleinkinder (immer noch bei 2 Paranüssen täglich!) wäre die Dosis rund 1 mSv. Das BfS empfiehlt daher für die allgemeine Bevölkerung Paranüsse nicht übermässig zu verzehren und für Schwangere und Kinder ganz darauf zu verzichten. Diese Empfehlung entspricht dem im Strahlenschutz verankerten Prinzip der Optimierung, wonach jede Strahlenbelastung so tief wie vernünftigerweise möglich gehalten werden soll.

Während bei einer Kontamination von Lebensmitteln mit künstlicher Radioaktivität Massnahmen in jedem Falle angezeigt sind, ist die Beurteilung der natürlichen Radioaktivität in Lebensmitteln komplexer. Es sind insbesondere auch gesundheitsfördernde Eigenschaften der Nahrungsmittel mitzuberücksichtigen. Meeresfrüchte, beispielsweise, sind ein wichtiger Bestandteil der mediterranen Ernährungsweise, die bekannterweise eine der gesündesten ist. Hier scheinen die gesundheitsfördernden Eigenschaften die etwas erhöhte natürliche Radioaktivität mehr als wettzumachen. Auch Paranüsse enthalten für die Gesundheit wertvolle Nährstoffe, speziell das essentielle Spurenelement Selen. Ein moderater Konsum von Paranüssen kann zu einer ausreichenden Selenversorgung beitragen [5] und ist von der Menge der aufgenommenen natürlichen Radioaktivität her tolerierbar. Von einem stärkeren Verzehr (2 Paranüsse pro Tag oder mehr) ist eher abzuraten, insbesondere für Frauen während der Schwangerschaft und der Stillzeit, einmal aufgrund der erhöhten Aufnahme von natürlichen Radionukliden mit der Nahrung, aber auch durch eine mögliche Überversorgung mit Selen, die sich negativ auf die Gesundheit auswirken kann.

Referenz

[1] Nationale Ernährungserhebung menuCH.
https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/lebensmittel-und-ernaehrung/ernaehrung/menuCH.html

[2] IRSN, Exposition de la population française aux rayonnements ionisants, bilan 2014-2019. N° du rapport : IRSN /2021-00108.
https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiques_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_Rapport%20EXPOP_def.pdf

[3] Morand Bourqui R, Nusslé SG, von Goetz N, Veys-Takeuchi C, Zuppinger C, Boulez Y, et al. (2023) Towards a Swiss health study with human biomonitoring: Learnings from the pilot phase about participation and design. PLoS ONE 18(7): e0289181.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289181

[4] BfS, Natürliche Radioaktivität in Paranüssen.
https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/lebensmittel/paranuesse/paranuesse.html

[5] Fragnière Rime C. (2023) Selen: Status der Schweizer Bevölkerung und Einfluss einer vegetarischen und veganen Ernährung. Schweizer Ernährungsbulletin.
https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/lebensmittel-und-ernaehrung/ernaehrung/schweizer-ernaehrungsbulletin/schweizer-ernaehrungsbulletin-2023.html

Radioactivité dans le corps humain

6

Radioaktivität im Menschen

• Wirbelknochen
• Vertèbres
2023

6.1
Mesures de ^{90}Sr, ^{210}Po et ^{226}Ra dans les vertèbres

R. Cusnir, P.-A. Pittet, P. Froidevaux, C. Pilloud, A. Bonnin, 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 ainsi que pour évaluer la contamination de la chaîne alimentaire. En 2023, la collecte des vertèbres dans les instituts de pathologie a été poursuivie, permettant l'analyse du ^{90}Sr dans dix-huit échantillons de vertèbres prélevés dans les cantons de Vaud et du Tessin, ainsi que du ^{210}Po dans dix échantillons et du ^{226}Ra dans quatre échantillons du canton de Vaud, conformément au plan de mesures de l'OFSP.

Les niveaux d'activité en ^{90}Sr mesurés dans les vertèbres restent très faibles et ne dépassent pas 12 mBq g^{-1} Ca. Les activités en ^{210}Po varient entre 7.9 et 28.0 mBq g^{-1} Ca, tandis que celles en ^{226}Ra se situent entre 1.2 et 3.8 mBq g^{-1} Ca et sont proches des valeurs obtenues les années précédentes avec une moyenne à 2.0 mBq g^{-1} Ca.

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 les métabolismes du calcium, 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.

En 2023, la collecte d'échantillons de vertèbres s'est poursuivie dans les instituts de pathologie du Tessin et de Lausanne, permettant de déterminer l'activité en ^{90}Sr dans dix échantillons tessinois et huit vaudois. Les activités en ^{210}Po (10 mesures) et en ^{226}Ra (4 mesures) ont été déterminées dans les échantillons prélevés à Lausanne.

Méthodes

Les méthodes d'analyses du ^{90}Sr et du ^{210}Po peuvent être trouvées dans les références [1] et [2]. La méthode d'analyse du ^{226}Ra est décrite en détail dans la référence [3]. Les concentrations en ^{90}Sr, ^{210}Po et ^{226}Ra déterminées dans les os sont rapportées en 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.

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 4 du chapitre 1.1). En 2023, l'activité moyenne en ^{90}Sr pour dix-huit échantillons de vertèbres humaines en Suisse s'est établie à 7.3 ± 2.2 mBq g^{-1} Ca. Depuis 2015, cette valeur moyenne annuelle est inférieure à 10 mBq g^{-1} 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 se situe actuellement autour d'une centaine, pour une moyenne à 26 mBq g^{-1} Ca et un écart-type à 20 mBq g^{-1} Ca. L'incorporation de ^{210}Pb/^{210}Po est variable selon les personnes et dépend de plusieurs facteurs, dont les habitudes en matière de tabagisme et d'alimentation, ainsi que l'exposition au ^{222}Rn. Dans le métabolisme humain, c'est le plomb qui cible

Tableau 1:

Activités en ^{90}Sr, ^{210}Po et ^{226}Ra, normalisées au calcium, dans les vertèbres de personnes décédées en Suisse en 2023. Incertitudes pour u(95%).

Lieu décès	^{90}Sr (mBq/g Ca)	^{210}Po (mBq/g Ca)	^{226}Ra (mBq/g Ca)
S. Vittore	6.4 ± 1.7		
Locarno	9.3 ± 2.3		
Gudo	6.8 ± 1.9		
Osco	11.8 ± 3.1		
Origlio	8.4 ± 2.2		
Paradiso	4.0 ± 1.9		
Balerna	9.7 ± 2.3		
Porza	9.2 ± 2.5		
Contra	6.7 ± 1.6		
Comologno	9.3 ± 2.2		
Lausanne	6.0 ± 1.9	13.9 ± 1.1	
	5.5 ± 1.7	9.4 ± 0.8	
	5.1 ± 1.5		1.2 ± 0.1
	4.2 ± 1.6	18.7 ± 1.5	
	6.8 ± 1.9	11.9 ± 1.0	3.8 ± 0.3
	6.9 ± 2.0	7.9 ± 0.7	
		8.0 ± 0.7	
	9.8 ± 2.4	14.2 ± 1.4 17.2 ± 1.7	1.4 ± 0.2
	5.0 ± 1.5	15.4 ± 1.2	
		28.0 ± 2.2	1.4 ± 0.2
	7.3 ± 2.2 (n=18)	**14.5 ± 6.0 (n=10)**	

préférentiellement la masse osseuse [4]. 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. Cette donnée nous sera d'importance pour la modélisation de l'incorporation de ^{210}Pb et ^{210}Po par inhalation des produits de combustion du tabac contenant ces deux radioéléments, dans le cadre d'un projet de l'OFSP liant radioactivité et tabagisme. Les résultats de mesures de ^{210}Pb et ^{210}Po dans le tabac et de leurs transferts dans la fumée sont reportés dans le chapitre 2.3.

Suite à la découverte d'un nombre significatif de bâtiments contaminés par l'utilisation de peinture contenant du ^{226}Ra dans le cadre d'activités horlogères, l'OFSP a lancé un programme d'assainissement de ces biens-fonds. Il est devenu crucial d'établir une moyenne d'activité en ^{226}Ra dans les os humains de la population suisse.

Profitant 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 2023, les activités mesurées étaient parfaitement cohérentes avec les mesures précédentes et n'ont pas indiqué d'exposition au ^{226}Ra autre que par des sources naturelles.

Conclusions

Les mesures de radioactivité effectuées sur les vertèbres humaines en 2023 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] 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.
[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] 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}Th/^{225}Ra or ^{226}Ra. Anal. Chim. Acta, 2018,1031, 178-184.
[4] Legett, RW. An age-specific kinetic model for lead metabolism in human. Env. Health Perspect. 1993, 101, 598-616.

Mesures de nucléides spéciaux

7

Messung von Spezialnukliden

• Carbone-14
• Krypton-85
• Argom-37
• Plutonium
• Américium
• Kohlenstoff-14
• Krypton-85
• Argon-37
• Plutonium
• Americium
2023

7.1
Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37

Th. Stocker, R. Purtschert und T. Wagner
Abt. Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut Universität Bern, Sidlerstrasse 5, Bern
S. Szidat
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), des Paul Scherrer Instituts und an verschiedenen Standorten der Stadt Basel wurden 2023 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 2023) durchgeführt wurden. Aus diesen Messungen resultierte für 2023 der $\Delta^{14}C$-Referenzwert -10 ± 3‰.

Die 83 auf ^{14}C untersuchten Standorte unterscheiden sich um -20‰ (Basel Stadt, Standort W-42 beim Badischen Bahnhof) bis maximal +273‰ (Paul Scherrer Institut, Standort Picknickplatz) von diesem Referenzwert. Im Raum Basel lag der Netto-Höchstwert bei 4 ‰ (Standort W-04). Zum Vergleich: Ein zusätzlicher ^{14}C-Gehalt von 100 Promille in Lebensmitteln führt zu einer zusätzlichen Jahresdosis von 1 µSv. Da der gemessene Anstieg sehr lokal begrenzt ist, sind die zusätzlichen Dosen durch die Aufnahme lokaler Lebensmittel für die umliegende Bevölkerung minimal.

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 $^{14}CO_2$ in der Atmosphäre freigesetzt (so genannter Bomben-Peak). Der ^{14}C-Gehalt von atmosphärischem CO_2 nahm seitdem durch Aufnahme von $^{14}CO_2$ durch die Ozeane und Verbrennung fossiler, d. h. ^{14}C-freier, Brennstoffe weltweit wieder ab. Mittlerweile hat dieser Gehalt den als Basis für die Radiocarbondatierung definierten Standardwert für das Jahr 1950 unterschritten:

$^{14}A_0$ = (13.56 ± 0.07) dpm/gC = (0.226 ± 0.001) Bq/gC *(1)*

Auf lokaler Ebene lässt sich eine als «Suess»- oder «Industrie»-Effekt bekannte Verdünnung des atmosphärischen $^{14}CO_2$ nachweisen. Der von terrestrischen Pflanzen durch Assimilation aufgenommene Kohlenstoff spiegelt in seinem ^{14}C-Gehalt im Wesentlichen den zeitlichen Verlauf der atmosphärischen $^{14}CO_2$-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 $^{14}CO_2$.

Die für diesen Bericht gemessenen ^{14}C-Werte werden mit dem Radiocarbonstandard $^{14}A_0$ verglichen:

$$\Delta^{14}C_{Probe} = (^{14}A_{Probe} / {}^{14}A_0 - 1) \cdot 1'000\ [‰] \quad (2)$$

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 $^{14}A_0$ verglichen (Figur 1). Aus den resultierenden $\Delta^{14}C$-Werten wurde für die Zeit der Hauptprobenahmen 2023 ein Referenzwert für Laub in ungestörter Umgebung definiert. Als Basis hierzu dienten die im Mai, August und Oktober gesammelten Blätter.

$$\Delta^{14}C_{Ref,\ 2023} = -10 \pm 3\ [‰] \quad (3)$$

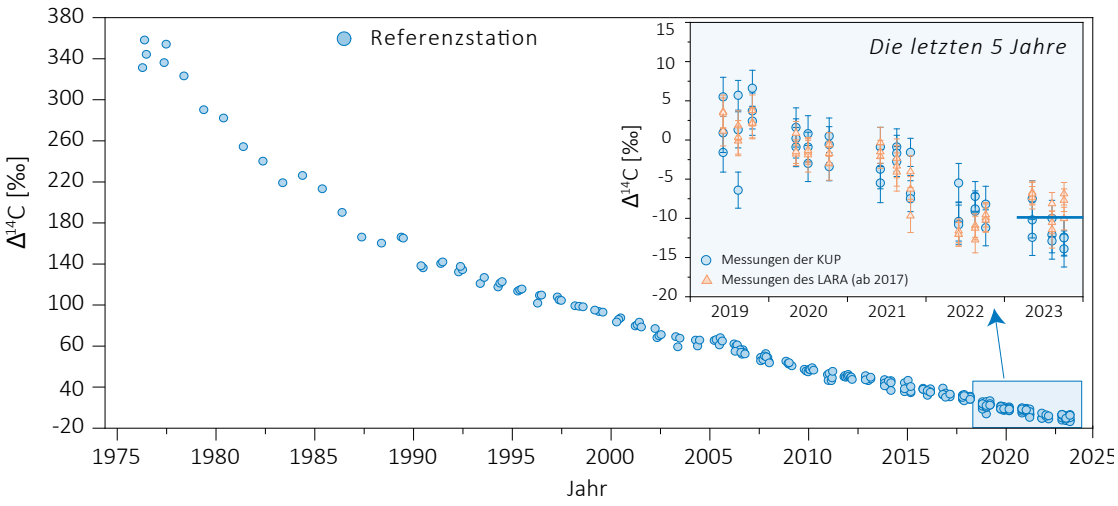
Die Differenz

$$\text{Netto } \Delta^{14}C = \Delta^{14}C_{Probe} - \Delta^{14}C_{Ref,\ 2023} \quad (4)$$

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

Tabelle 1:
Messwerte 2023 und Koordinaten der Referenzstationen für Laubmessungen

Ort	Labor	$\Delta^{14}C$ [‰]			Koordinaten	[m.ü.M.]	Baumart/Standort
		Mai	Aug.	Okt.			
Taanwald	KUP LARA	- 12 - 7	- 12 - 11	- 12 - 10	601'320 / 186'150	938	Rotbuchen im Wald
Belpberg	KUP LARA	- 10 - 7	- 10 - 8	- 13 - 7	606'096 / 190'600	825	Rotbuchen auf Krete
Ballenbühl	KUP LARA	- 8 - 7	- 14 - 10	- 14 - 8	612'550 / 192'800	852	2 Linden, freistehend



Figur 1:
$\Delta^{14}C$-Konzentrationen in Buchen- und Lindenblättern von den Referenzstationen. Die blaue 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 Blattkohle[1]
- *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 2023 gegenüber dem Vorjahr stabil geblieben. Mit -10 ± 3‰ (gerundeter Mittelwert aller in Tabelle 1 dargestellten Messergebnisse) liegt der Referenzwert auf demselben Niveau wie 2022.

^{14}C im Umfeld der Schweizer Kernkraftwerke

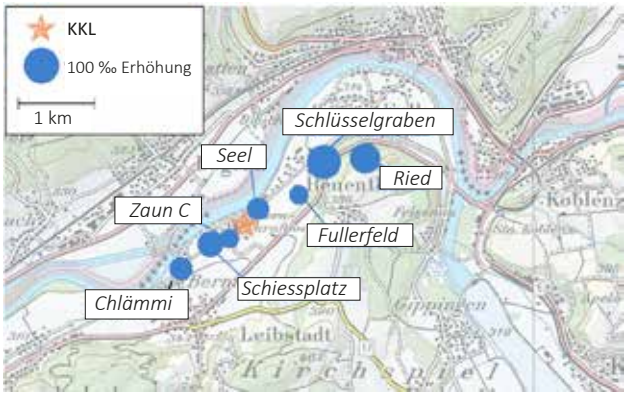
Gemäss Jahresrückblick des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI [1] wurden die Schweizer Kernkraftwerke im Jahr 2023 sicher betrieben. Insgesamt traten 24 meldepflichtige Vorkommnisse auf, was im Schwankungsbereich der Vorjahre liegt.

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.

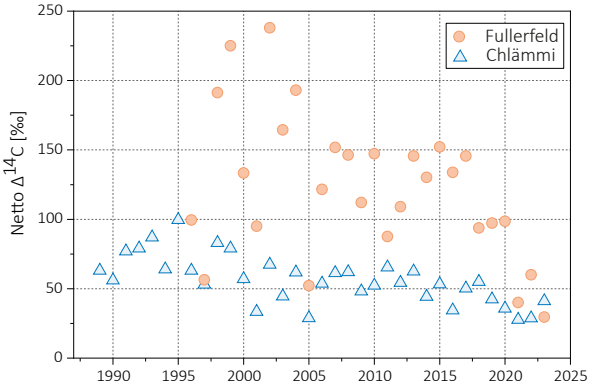
Die Laubprobenahmen im Umfeld der noch im Leistungsbetrieb befindlichen Kernkraftwerke erfolgten im Allgemeinen während oder nach der jeweiligen Jahresrevision, um auch mögliche ^{14}C-Abgaben während des Revisionsstillstands erfassen zu können. Eine Ausnahme bildet das Kernkraftwerk Leibstadt (siehe 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).

Kernkraftwerk Leibstadt

Im Umfeld des Kernkraftwerks Leibstadt (KKL) wurden im Jahr 2023 zwei Probenahmen durchgeführt: die erste am 26. April vor der Jahresrevision, die vom 1. bis 31. Mai 2023 terminiert war, und eine zweite am 14. 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 ergab sich in ca. 1.5 km Distanz vom KKL in nordöstlicher Richtung am Standort Schlüsselgraben (Figur 2). In südwestlicher Richtung wies der Standort Schiessplatz die höchsten Werte auf.

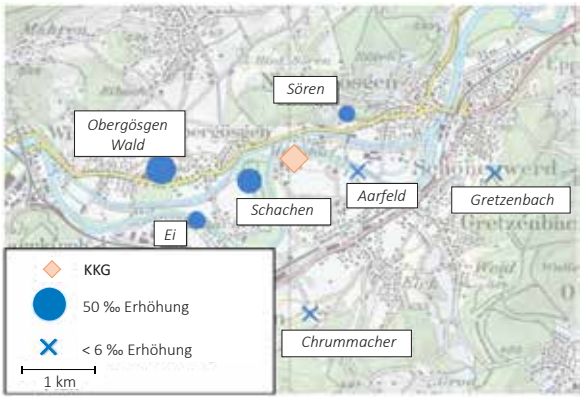


Figur 2:
Netto Δ^{14}C-Messwerte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Leibstadt (KKL) im Jahr 2023. Revisionsabschaltung: 01.05.2023 bis 31.05.2023. Probenahme: 14.09.2023. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



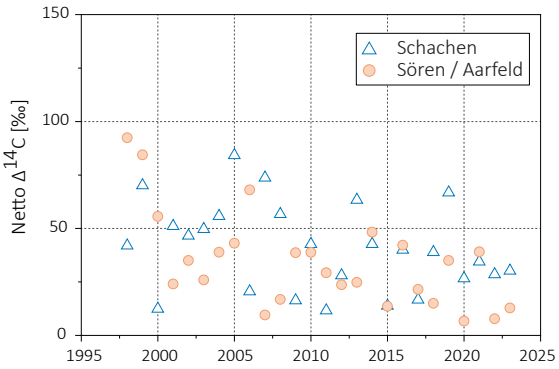
Figur 3:
Netto Δ^{14}C-Höchstwerte nordöstlich (●) und südwestlich (△) des Kernkraftwerkes Leibstadt. Der Standort Fullerfeld wird seit 1996, derjenige von Chlämmi seit 1989 beprobt (Standorte: siehe Figur 2). Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.

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

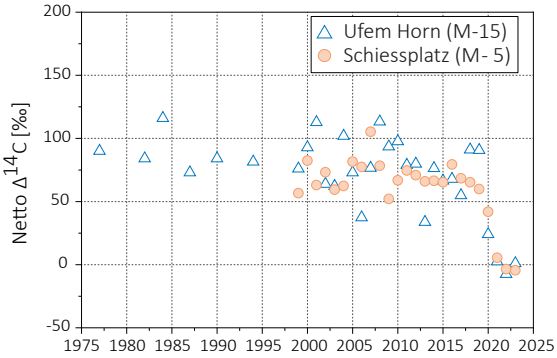


Figur 4:
Örtliche Verteilung der Netto Δ^{14}C-Werte in der Umgebung des Druckwasserreaktors Gösgen (KKG). Revisionsabschaltung: 27.05.2023 bis 27.06.2023. Probenahme: 26.06.2023. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.

Figur 6:
Netto Δ^{14}C-Werte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Mühleberg (KKM) im Jahr 2023. Probenahme: 07.09.2023. Mit Ausnahme des Standorts Ufem Horn wurde an keinem Standort eine Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen festgestellt.



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



Figur 7:
Netto Δ^{14}C-Höchstwerte östlich (●) und westlich (△) des Kernkraftwerkes Mühleberg seit Messgebinn. 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 betrug im Allgemeinen nur wenige Promille, nur am Standort Fullerfeld lagen die Messergebnisse der ersten Probenahme deutlich über den Werten der zweiten Probenahme.

Figur 3 zeigt die gemessenen Netto Δ^{14}C-Höchstwerte der Standorte Fullerfeld und Chlämmi seit Messbeginn. Es sind dies die beiden Standorte mit den traditionell höchsten Werten in der jeweiligen Windrichtung. 2023 wurden die Höchstwerte jedoch an zwei anderen Stellen gemessen: der höchste Messwert nordöstlich des KKL betrug 91‰ (Standort Schlüsselgraben), in südwestlicher Richtung wurde 2023 am Standort Schiessplatz mit 54‰ der höchste Wert gemessen. Der grösste Netto Δ^{14}C-Wert seit Messbeginn beträgt 238‰ und stammt vom Standort Fullerfeld (2002).

Kernkraftwerk Gösgen

In Figur 4 sind die Resultate der am 26. Juni 2023 gesammelten Blattproben in der Umgebung des Kernkraftwerks Gösgen (KKG) dargestellt. Der höchste ^{14}C-Messwert westlich vom KKG resultierte mit einer Erhöhung von 43‰ am Standort Obergösgen Wald, in östlicher Richtung mit 13‰ am Standort Sören.

In Figur 5 sind die z. T. seit Messbeginn ermittelten höchsten Netto Δ^{14}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

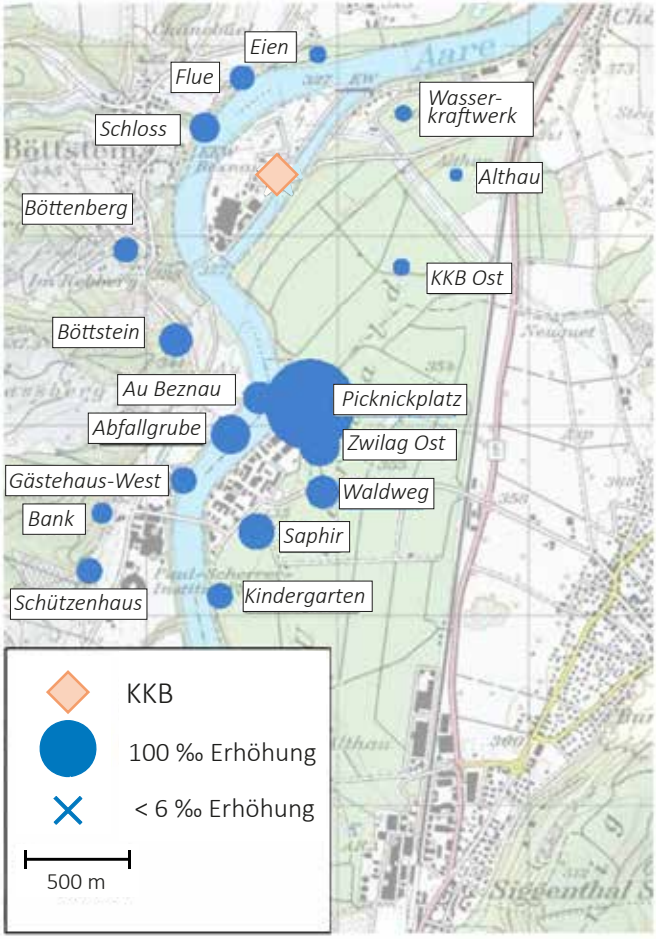
Die Beprobung des mittlerweile ausser Betrieb genommenen Kernkraftwerks Mühleberg (KKM) wurde auch im Jahr 2023 fortgesetzt. Der ^{14}C-Gehalt aller beprobten Standorte lag im Jahr 2023 wie bereits im Vorjahr unter dem der Referenzstationen. Lediglich der Standort Ufem Horn (M-5) wies eine sehr geringe Erhöhung um 0.1‰ auf. Der abrupte Abfall der Messwerte nach der Stilllegung des KKM zeigt deutlich die Zuverlässigkeit der Überwachungsmethode basierend auf dem ^{14}C-Gehalt von Blättern in der zu überwachenden Umgebung.

In Figur 6 sind die Ergebnisse der Probenahme dargestellt. Sämtliche Messwerte mit Ausnahme des Standorts Ufem Horn liegen im negativen Bereich, d. h. es wurden praktisch keine Erhöhungen des ^{14}C-Gehalts gemessen.

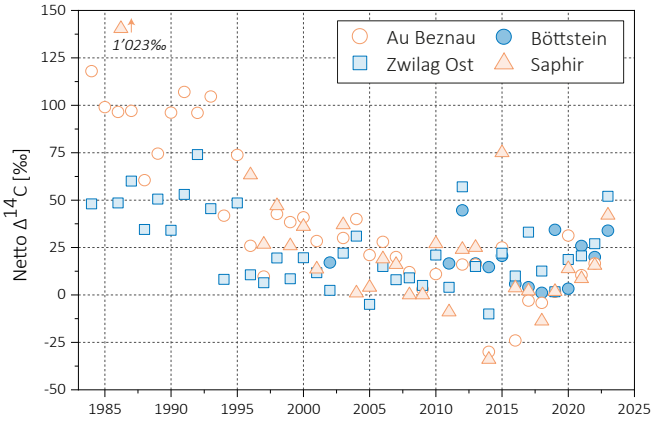
Paul Scherrer Institut, Zentrales Zwischenlager Würenlingen, Kernkraftwerk Beznau

Auch im Jahr 2023 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 2023 tendenziell über den Werten des Vorjahrs: sämtliche beprobten Standorte wiesen Erhöhungen von mehr als 6‰ gegenüber den unbelasteten Referenzstandorten auf. Die weitaus grösste Erhöhung (273‰) wurde am Standort Picknickplatz gemessen.

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



Figur 8:
Netto Δ^{14}C-Werte in der Umgebung des Paul Scherrer Instituts (PSI), des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen (ZWILAG) und des Kernkraftwerks Beznau (KKB) im Jahr 2023. Revisionsabschaltung KKB I: 16.05.2023 bis 29.05.2023, KKB II: 04.08.2023 bis 12.09.2023. Probenahme: 14.09.2023. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 9:
Netto Δ^{14}C-Höchstwerte östlich (■ ▲) und westlich (● ○) des PSI/ZWILAG sowie des Kernkraftwerkes Beznau seit Messbeginn. Standorte: siehe Figur 8. Messungen bis 2016: KUP (Standort Böttstein und PSI). Messungen 2017 bis 2019: LARA (Standort Böttstein und PSI). Im Jahr 2023 wurde der höchste Wert jedoch nicht an einem dieser Standorte, sondern mit 273‰ am Standort Picknickplatz gemessen. Messungen ab 2020: LARA.

Kehrichtverbrennungsanlagen

KVA Bern

In Blättern von Bäumen, die am 07. September 2023 an vier Probenahmestellen im Umfeld der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) Bern Forsthaus gesammelt wurden, konnte keine erhöhte ^{14}C Konzentration festgestellt werden. Sämtliche Werte lagen unter dem Referenzwert von 10 ‰, zwei Stationen lagen bei 15 ‰. Im Gegensatz zu Blättern, die im Umfeld der Kernkraftwerke gesammelt wurden, findet im 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 Treibstof-

fen, 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

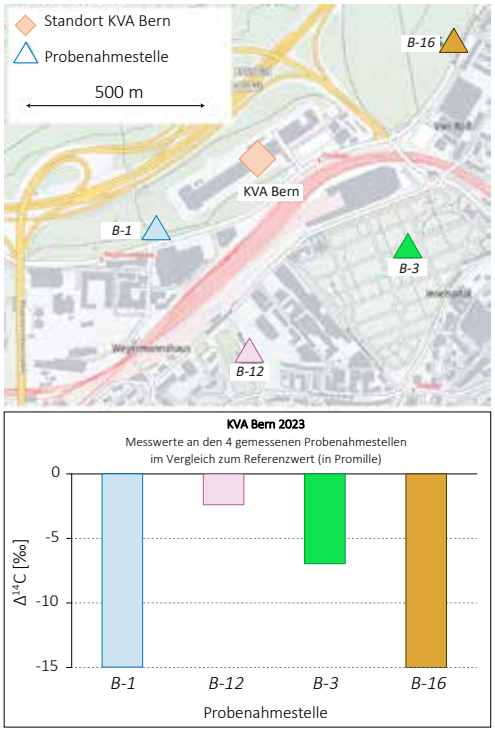
Am 24. August 2023 wurden fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Lausanne beprobt. Es wurden keine Erhöhungen der ^{14}C Konzentration festgestellt. Sämtliche Werte lagen unter dem Referenzwert.

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

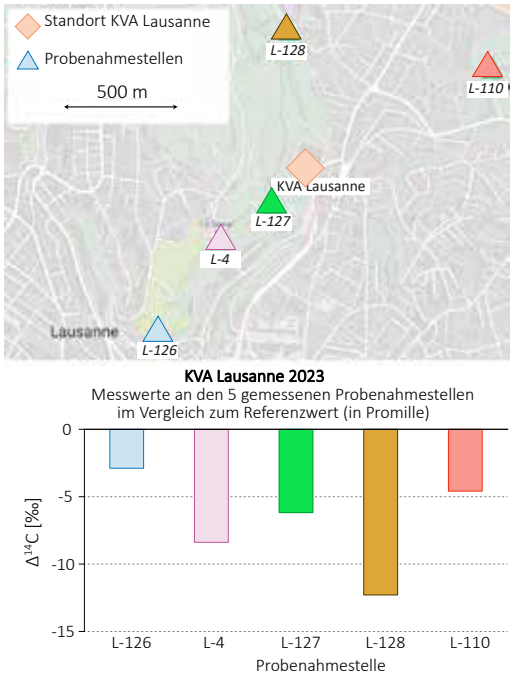
KVA Zürich Hagenholz

In Blättern von Bäumen, die am 26. Juni 2023 an fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Zürich Hagenholz gesammelt wurden, konnte keine erhöhte ^{14}C Konzentration festgestellt werden.

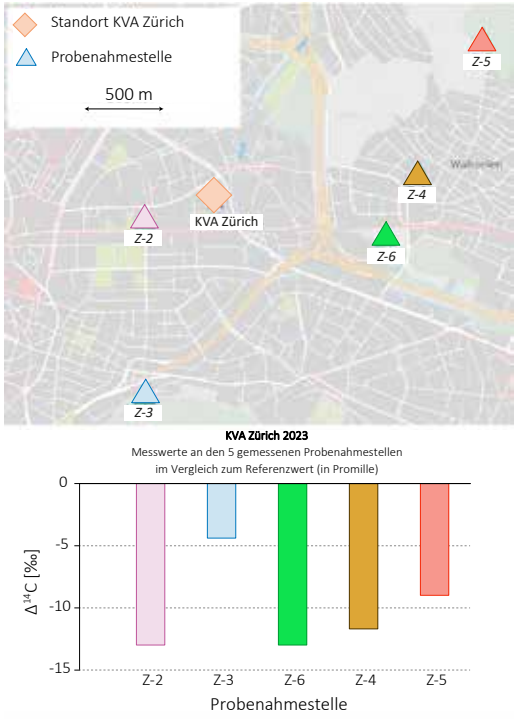
In Figur 10c sind oben die fünf Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen dargestellt.



Figur 10a :
Probenahmestellen und $\Delta^{14}C$-Messwerte bei der KVA Bern. Messungen : LARA.



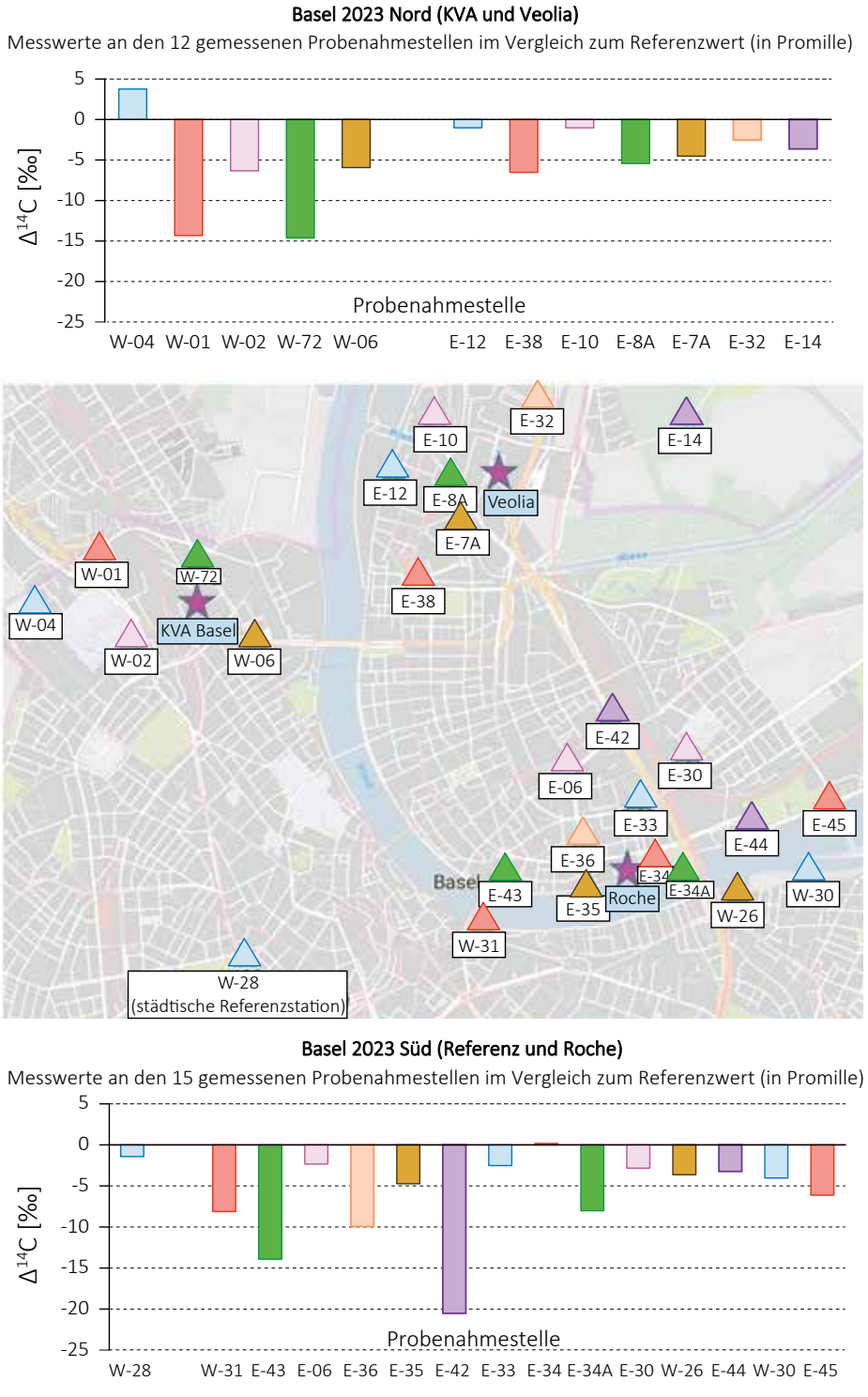
Figur 10b :
Probenahmestellen und $\Delta^{14}C$-Messwerte bei der KVA Lausanne. Messungen : KUP.



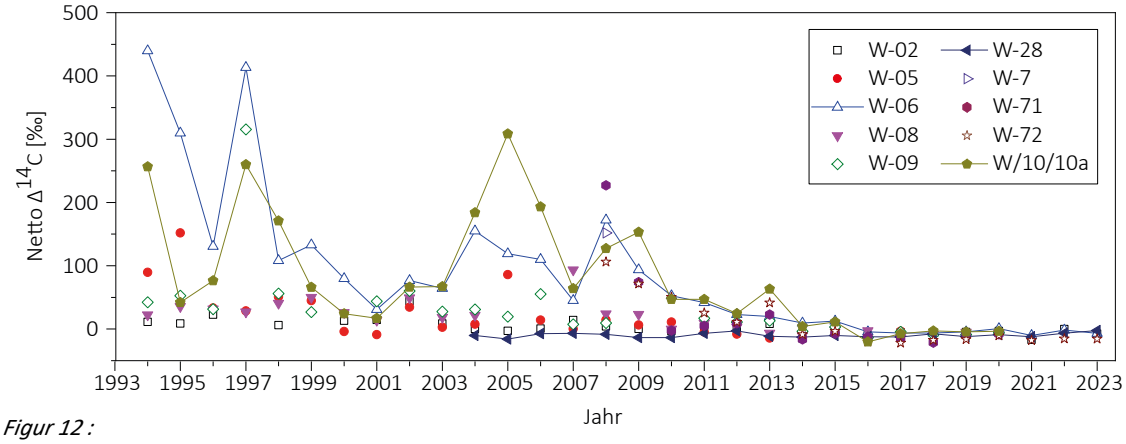
Figur 10c :
Probenahmestellen und $\Delta^{14}C$-Messwerte bei der KVA Zürich. Messungen : KUP.

Messungen in der Region Basel-Stadt

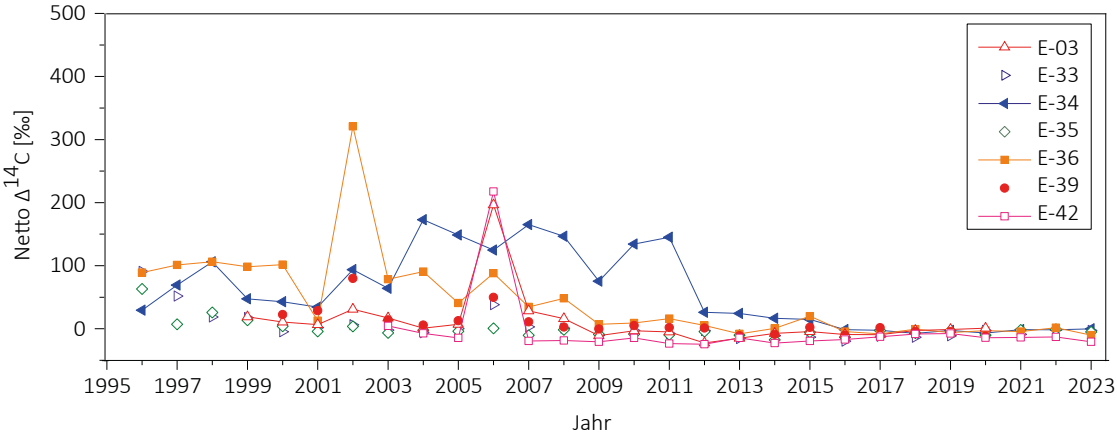
Im Jahr 2023 wurden in Basel zwei Laubprobenahmen durchgeführt. Im Rahmen der ersten Probenahme am 8. Juni wurden hauptsächlich die Standorte im Südosten des Stadtgebietes um das Areal der Firma F. Hoffmann-La Roche sowie die Standorte um das Areal der von der



Figur 11 :
Netto $\Delta^{14}C$-Messwerte für Blattproben aus dem Raum Basel. Die Balkendiagramme stellen die Erhöhung bzw. Reduzierung der Messwerte gegenüber den unbelasteten ländlichen Referenzstationen dar.



Figur 12 :
Zeitreihe der Netto Δ^{14}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 Δ^{14}C-Wert eingetragen.



Figur 13 :
Zeitreihe der Netto Δ^{14}C-Werte östlich des Rheins. Liegen von einem Standort mehrere Messungen vor, so ist der höchste Netto Δ^{14}C-Wert eingetragen.

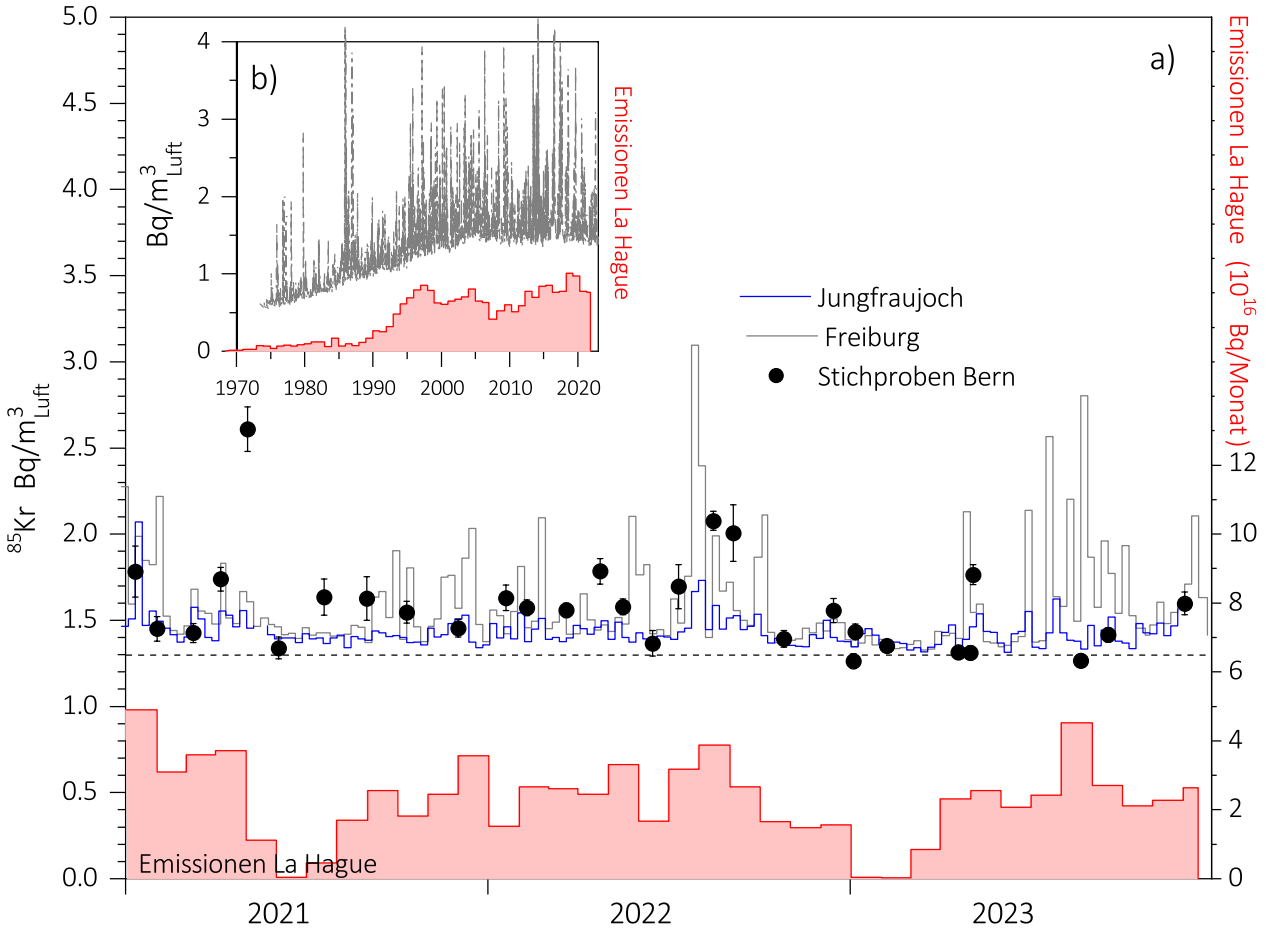
Firma Veolia betriebenen regionalen Sondermüllverwertungsanlage (RSMVA) beprobt. Die zweite, etwas umfangreichere Probenahme fand am 23. August statt und umfasste zusätzlich zu den Standorten der ersten Probenahme auch Standorte um die KVA Basel im Westen der Stadt.

An praktisch allen Standorten wurde aufgrund des weiter oben erwähnten Suess-Effekts eine Verdünnung der $^{14}CO_2$-Konzentration relativ zu den unbelasteten Referenzstationen festgestellt, häufig um 10‰ oder mehr (Figur 11). Auch im Umkreis der KVA Basel sowie im deutschen Grenzgebiet östlich des Veolia-Verbrennungsofens wurden keine bzw. nur geringe Erhöhungen registriert. Der höchste Wert stammt vom Standort W-04 Rehab auf dem Areal der Universitären Psychiatrischen Kliniken in der Nähe der Grenze nach Frankreich, wo es anscheinend zu keinerlei Absenkung der ^{14}C Konzentration aufgrund des Suess-Effekts gekommen ist.

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



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] .*

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.

Edelgas-Radionuklide

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. ^{85}Kr, freigesetzt bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstäben, konnte sich wegen der vergleichsweise langen Halbwertszeit von 10.74 Jahren und den lange Zeit zunehmenden Emissionsraten über die letzten 50 Jahre in der Atmosphäre anreichern. Zurzeit verharrt die Aktivitätskonzentration von ^{85}Kr auf konstantem Niveau. Die aktuellen Konzentrationen von ^{37}Ar sind praktisch nicht von künstlichen Quellen beeinflusst. Lokal erhöhte Werte könnten aber auf nukleare Aktivitäten hinweisen. Keines der beiden Isotope verursacht eine signifikante Erhöhung der jährlichen Strahlendosis.

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 ^{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 ~0.2 µBq/m$^3_{\text{Luft}}$. Im Gegensatz dazu stammt das derzeitige ^{85}Kr in der Atmosphäre hauptsächlich aus der Wiederaufar-

beitung 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 Bq/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] (Fig. 14). 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 grössere Entfernung zur Quelle in La Hague führen zu Abweichungen zwischen den Stationen Bern und Freiburg, wobei das Aktivitätsniveau jedoch ähnlich ist.

Im Januar und Februar 2023 sanken die Wiederaufbereitungsaktivitäten und damit die Emissionen aus La Hague um zwei Grössenordnungen (Figur 14a). Folglich gab es eine 15%ige Reduzierung der jährlichen Gesamtemissionen im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Jahren (Figur 14b). Diese Reduzierung ist deutlich an den gemessenen ^{85}Kr-Aktivitätskonzentrationen in Freiburg i.Br. und JFJ erkennbar, wo das Fehlen von Spitzen und eine Annäherung der Werte an beiden Stationen an eine Basisaktivitätskonzentration von etwa 1.3 Bq/m$^3_{\text{Luft}}$ beobachtet werden kann (gestrichelte Linie in Figur 14). Es ist bemerkenswert, dass dieser Basiswert niedriger ist als in den letzten Jahren, als ein Wert von 1.4 Bq/m$^3_{\text{Luft}}$ gemessen wurde. Die generelle Stabilisierung oder sogar Abnahme des Basiswerts ist auch im Langzeitverlauf von Freiburg i. Br ersichtlich und stellt möglicherweise einen Rückgang der globalen Wiederaufbereitungsaktivitäten dar. Auch die Messwerte in Bern weisen auf geringere Basiswerte im Jahr 2023 hin. Im Frühling und Sommer 2023 nahmen die Emissionen in La Hague wieder zu, begleitet von einer Zunahme der Häufigkeit und Amplitude der Aktivitätsspitzen, die an den beiden Überwachungsstationen gemessen wurden. Unsere Daten unterstreichen, dass die Beobachtungen am JFJ hauptsächlich mit Emissionen aus La Hague verbunden sind und in viel geringerem Maße von anderen potenziellen Quellen wie nahegelegenen Kernkraftwerken stammen. Die durch den ^{85}Kr Untergrundpegel verursachte jährliche effektive Dosis beträgt ca. 11 nSv/Jahr ($8 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq/m^3 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 wird in der Atmosphäre durch die Spallationsreaktion ^{40}Ar(n,4n)^{37}Ar produziert. Eine Stichprobenmessung an Bern-Luft vom 04.07.2023 ergab einen Wert <2 mBq/m$^3_{\text{Luft}}$, was konsistent mit dem erwarteten natürlichen Bereich von 0.5 - 2 mBq/m$^3_{\text{Luft}}$ für die Troposphäre ist. Die ^{37}Ar-Aktivitätskonzentration in der Atmosphäre ist damit 1'000 Mal kleiner als die von ^{85}Kr und deshalb für die jährliche Strahlenbelastung nicht relevant.

Referenzen

[1] https://www.ensi.ch/de/2024/01/25/bilanz-2023-sicherheitsanforderungen-an-den-betrieb-der-kernanlagen-eingehalten/, besucht am 15. März 2024

[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

7.2
Mesures de plutonium et d'américium dans l'environnement

P. Froidevaux, F. Barraud, 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 et d'eau de surface. 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 mesurable au-dessus de la limite de détection de la méthode, mais l'américium est parfois mesurable, avec une activité proche de 1 mBq/kg. Dans les sols, l'activité en $^{239+240}$Pu est située entre 110 mBq/kg et 600 mBq/kg alors que l'activité en ^{241}Am est présente dans un rapport ^{241}Am/$^{239+240}$Pu de 0.44 ± 0.05. L'activité en Pu des eaux de rivières prélevées en aval des centrales nucléaires ne dépasse pas 2.0 mBq/m^3, soit dans l'ensemble des valeurs très proches de celles mesurées les années précédentes. Sous mandat de l'OFSP, l'IRA analyse Pu et Am dans l'environnement en Suisse depuis 25 ans. L'analyse détaillée des données en Pu dans les sols de 1997 à 2023 montre un contraste entre les sols de plaine (proximité des centrales nucléaires du plateau suisse) et les sols de montagne; la période biologique du Pu dans les sols de montagne est estimée à 10 ans alors qu'elle est d'environ 20 ans pour les sites de plaine.

Introduction

Le plutonium et l'américium sont des éléments radioactifs de la série des actinides. Tous les actinides sont biotoxiques et leurs isotopes les plus abondants émettent une particule alpha mutagène α ($^2_4$He). Ces radioéléments persistent dans l'environnement en raison de leur longue demi-vie, représentant une préoccupation particulière lorsqu'ils contaminent le sol et l'eau. Actuellement, on observe, au niveau mondial et local, une contamination persistante des sols, des sédiments et des eaux à la suite de rejets dans l'environnement dus aux retombées des essais d'armes nucléaires des années soixante, de ruptures de confinement du réacteur à la suite d'accidents (Tchernobyl, Fukushima), et de rejets, autorisés ou non autorisés, de l'industrie nucléaire. Il est essentiel pour bien interpréter les données de surveillance de bien comprendre le comportement de Pu et Am dans les sols et les eaux naturelles.

Dans un programme de surveillance nationale de la radioactivité, on recherche ces radioéléments dans différents compartiments de l'environnement, car la mesure de Pu et Am est très sensible (par ex: quelques mBq/kg dans le sol). Les rapports isotopiques qui signent la présence de la déposition atmosphérique des retombées des essais nucléaires des année soixante sont bien connus: environ 0.03 pour ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu et environ 0.44 actuellement pour ^{241}Am/$^{239+240}$Pu. On notera que le rapport ^{241}Am/$^{239+240}$Pu est évolutif car ^{241}Am est issu de la désintégration de ^{240}Pu, également présent comme contaminant; au début de nos mesures, ce rapport était proche de 0.38. La comparaison des rapports isotopiques mesurés dans l'environnement avec ces rapports de référence pour les essais nucléaires fournit un bon indicateur de contamination potentielle de l'environnement par l'industrie nucléaire. En Suisse, ces mesures, coordonnées par l'OFSP, se réalisent depuis 25 ans.

Dans ce travail, nous avons déterminé l'activité en Pu et Am de différents compartiments de l'environnement représentés par le sol, les sédiments de rivières, l'air, l'eau de rivière ainsi que par les poissons. 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. Pour commémorer les 25 ans de ces mesures, nous avons focalisé notre analyse sur l'évolution de la contaminations des sols de 1998 à 2023, pour certains sites à proximités des centrales nucléaires, pour lesquels nous avons une série complète de mesures, et deux sites de montagne.

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 [1]. De légères modifications ont été testées 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 jusqu'à quatre résultats d'analyses. On constate aussi qu'il est nécessaire d'obtenir des rendements de séparation chimique supérieurs à 65% afin de pouvoir quantifier le ^{238}Pu, présent en très faible quantité dans nos sols (0.03 x $^{239+240}$Pu).

Résultats et discussion

Le tableau 1 présente les résultats obtenus dans la 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}Pu/$^{239+240}$Pu et du rapport isotopique ^{241}Am/$^{239+240}$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 2023, ces rapports sont de 0.028 ± 0.004 (n=13) pour ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu et de 0.44 ± 0.05 (n=23) pour ^{241}Am/$^{239+240}$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}Pu/$^{239+240}$Pu et ^{241}Am/$^{239+240}$Pu supérieurs à 1.

Afin d'avoir une vision plus large des résultats obtenus depuis 1997, date du début des mesures de Pu et Am à l'IRA, nous avons reporté les activités obtenues pour 4 sites de plaine (centrales nucléaires) et deux sites de montagne pour lesquels nous avons des séries plus ou moins complètes d'analyses, ces sites de prélèvement étant toujours présents sur le plan annuel de prélèvement. Les résultats sont présentés dans la figure 1.

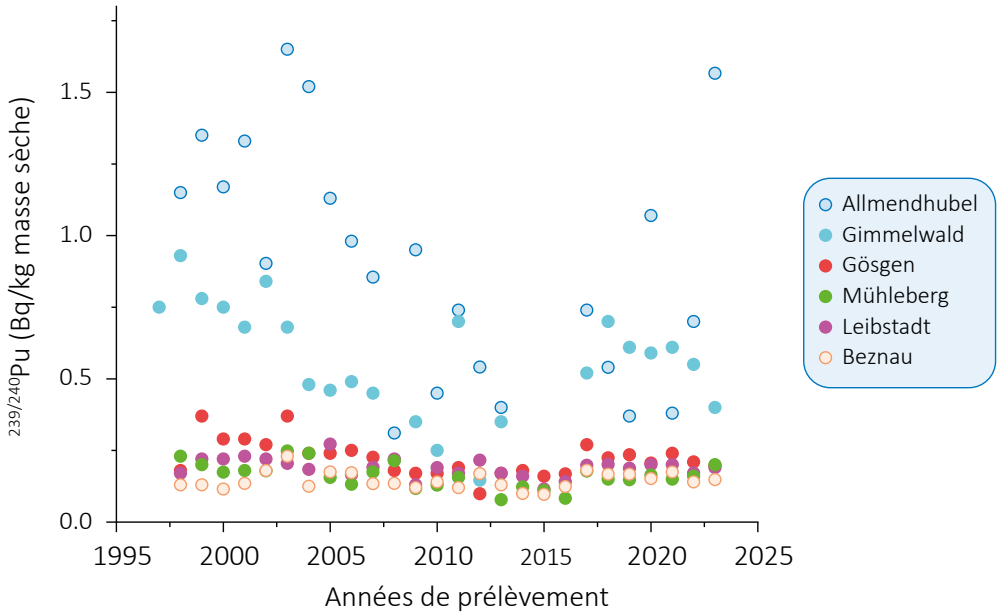


Figure 1 :
Activité en $^{239+240}$Pu (Bq/kg MS) des sols (0-5 cm) prélevés entre 1997 et 2023 à Mühleberg, Beznau, Gösgen, Leibstadt, Gimmelwald et Allmendhubel.

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 2023 (incertitudes à 95%).

Lieu	$^{239+240}$Pu Bq/kg MS	^{238}Pu Bq/kg MS	^{241}Am Bq/kg MS	^{241}Am/ $^{239+240}$Pu	^{238}Pu/ $^{239+240}$Pu
Arenenberg	0.110 ± 0.023 0.125 ± 0.010	0.0031 ± 0.0013	0.044 ± 0.005 0.052 ± 0.007	0.40 ± 0.09 0.41 ± 0.07	0.025 ± 0.011
Beznau	0.138 ± 0.012 0.159 ± 0.012	0.0041 ± 0.0018 0.0042 ± 0.0016	0.064 ± 0.006 0.076 ± 0.006 0.063 ± 0.006	0.46 ± 0.06 0.48 ± 0.05	0.029 ± 0.013 0.026 ± 0.011
Cadenazzo	0.113 ± 0.018 0.130 ± 0.013	0.0049 ± 0.0022	0.057 ± 0.006 0.061 ± 0.009	0.50 ± 0.09 0.47 ± 0.09	0.038 ± 0.018
Däniken (Gösgen)	0.185 ± 0.023 0.208 ± 0.014	0.0049 ± 0.0017	0.079 ± 0.006 0.095 ± 0.007	0.43 ± 0.06 0.46 ± 0.05	0.024 ± 0.009
Güttingen	0.173 ± 0.030 0.168 ± 0.013	0.0038 ± 0.0016	0.082 ± 0.006 0.081 ± 0.010	0.47 ± 0.09 0.48 ± 0.07	0.023 ± 0.010
Leibstadt	0.185 ± 0.020 0.195 ± 0.018	0.0065 ± 0.0026	0.076 ± 0.008 0.083 ± 0.009	0.41 ± 0.17 0.43 ± 0.06	0.034 ± 0.018
Meyrin	0.117 ± 0.014 0.106 ± 0.015		0.064 ± 0.007 0.047 ± 0.005	0.55 ± 0.09 0.44 ± 0.08	
Mühleberg	0.211 ± 0.059 0.190 ± 0.013	0.0044 ± 0.0016	0.061 ± 0.006 0.083 ± 0.006 0.072 ± 0.006	0.29 ± 0.09 0.44 ± 0.04	0.023 ± 0.009
Posieux	0.199 ± 0.053 0.195 ± 0.015	0.0052 ± 0.0020	0.078 ± 0.007 0.083 ± 0.006 0.072 ± 0.006	0.39 ± 0.11 0.42 ± 0.04	0.027 ± 0.010
Stabio	0.549 ± 0.034 0.597 ± 0.033	0.0164 ± 0.0036 0.0182 ± 0.0035	0.262 ± 0.014 0.288 ± 0.022	0.48 ± 0.04 0.48 ± 0.05	0.030 ± 0.006 0.030 ± 0.007
Villigen-PSI	0.131 ± 0.026 0.148 ± 0.009	0.0045 ± 0.0014	0.065 ± 0.006 0.061 ± 0.005	0.49 ± 0.11	0.030 ± 0.010
Würenlingen-ZWILAag	0.148 ± 0.026 0.171 ± 0.011	0.051 ± 0.0016	0.073 ± 0.007 0.079 ± 0.006 0.078 ± 0.006	0.49 ± 0.10 0.46 ± 0.05	0.030 ± 0.009
			moyenne	**0.44 ± 0.05 (n=23)**	**0.028 ± 0.004 (n=13)**

On constate que les sols de plaine présentent des activités très inférieures aux deux sites de montagne, confirmant ce qui a été précédemment relevé pour le ^{90}Sr dans d'autres études réalisées à l'IRA, soit que la déposition atmosphérique des essais nucléaires est plus importante en montagne qu'en plaine. Les activités sont aussi plus variables et il n'est pas évident de percevoir une tendance continue, même si l'activité a significativement décru dans les sites de montagne. Un agrandissement focalisé sur les sites de plaine montre également cette tendance (figure 2).

Tout comme dans la figure 1, on observe toutefois un décrochage (vers le haut) des valeurs à partir de 2017, qui semble indiquer un changement dans la localisation des lieux de prélèvement. En effet, sur le plateau suisse, il est difficile de prélever systématiquement au même endroit durant 25 ans, notamment à cause de l'urbanisation galopante. Pour les sites de montagne, le prélèvement a été interrompu plusieurs années, avant de reprendre et on peut conclure que l'emplacement des sites originaux a été perdu. Toutefois, lorsque l'on moyenne l'activité des quatre sites de plaine, on observe de manière significative une décroissance de l'activité en fonction des années de prélèvement (figure 3). A partir de la pente calculée à la figure 3, on détermine une période biologique (disparition de Pu dans les 5 premiers centimètres de sol) de 19 ± 5 ans. Le même exercice réalisé sur les deux sites de montagne produit une période de 10 ans pour Allmendhubel et de 9 ans pour Gimmelwald. En absence de détail sur la nature des sols, des horizons de sol, et de la profondeur totale de la couche de sol, il est difficile de fournir une explication exacte de ces différences de périodes biologiques entre la plaine et la montagne. On peut toutefois rappeler que l'abrasion des sols par le vent (resuspension), ainsi que la vitesse accrue d'érosion des sols de montagne par rapport aux sols de plaine vont participer à cet effet.

S'il n'y a pas d'émission accidentelle de radioactivité dans l'atmosphère, l'activité en Pu et Am des filtres à air reflète la remise en suspension de particules de sol par abrasion par le vent. Les résultats pour quatre stations de prélèvement à haut volume sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2:
Activités (nBq/m³) en $^{239+240}$Pu dans les filtres à air collectés sur différents sites en Suisse en 2023. Incertitudes à 95 %.

Lieu	Volume m³	$^{239+240}$Pu nBq/m³	^{238}Pu nBq/m³	^{241}Am nBq/m³	^{241}Am/ $^{239+240}$Pu
Klingnau	5'466'395	0.87 ± 0.10	0.091 ± 0.028	0.42 ± 0.04	0.48 ± 0.07
Posieux	5'238'703	1.48 ± 0.13	0.099 ± 0.027	0.65 ± 0.06	0.44 ± 0.05
Liebefeld, semestre 1	3'765'665	0.84 ± 0.11	< 0.07	0.45 ± 0.05	0.53 ± 0.09
Liebefeld, semestre 2	3'765'665	1.41 ± 0.11	0.047 ± 0.019	0.67 ± 0.06	0.47 ± 0.06
Meyrin	4'937'019	1.42 ± 0.15	< 0.08	0.64 ± 0.06	0.45 ± 0.06
				Moyenne	**R= 0.47 ± 0.04**

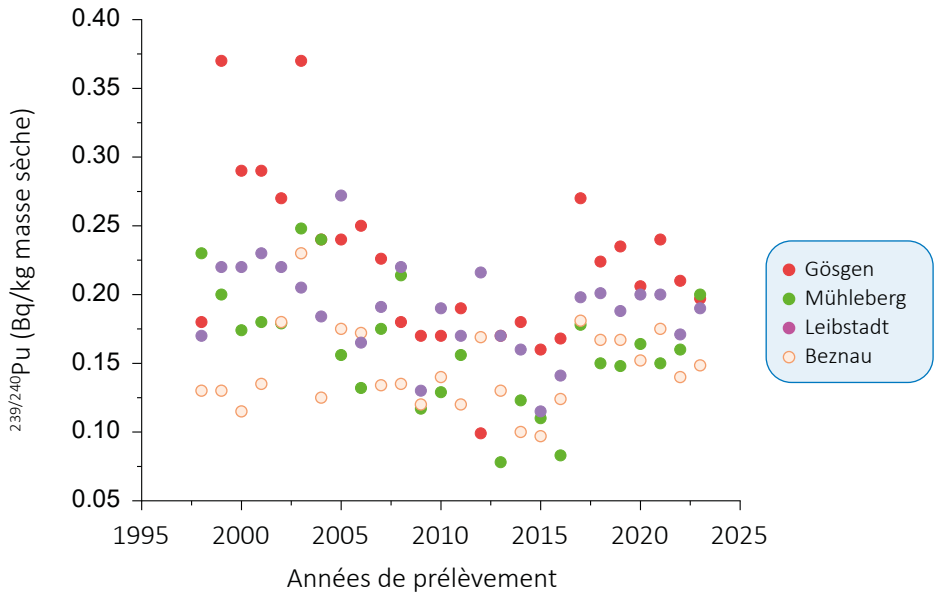


Figure 2 :
Activité en $^{239+240}$Pu (Bq/kg MS) des sols (0-5 cm) prélevés entre 1998 et 2023 à Mühleberg, Beznau, Gösgen, Leibstadt.

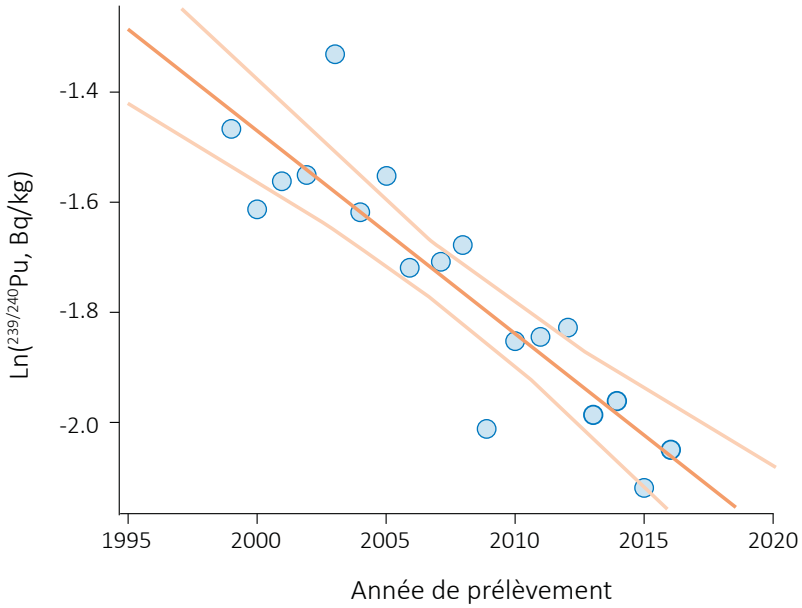


Figure 3 :
Evolution de l'activité moyenne annuelle en $^{239+240}$Pu (Bq/kg MS) pour les quatre sites de plaine entre 1999 et 2016.

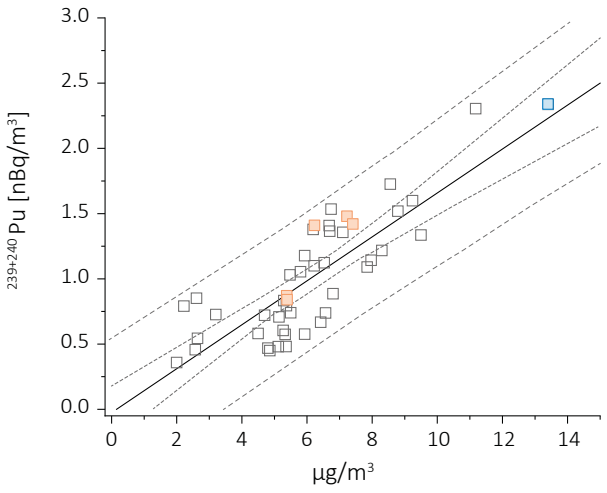


Figure 4 :
Activités en $^{239+240}$Pu (nBq/m^3) des filtres à air 2023 (carrés orange) en fonction de la masse de particules de sol récoltée après calcination des filtres. En bleu : tempête du Sahara de 2021.

Les résultats montrent que l'activité maximale mesurée ne dépasse pas 1.5 nBq/m^3, un résultat similaire aux années précédentes. La figure 4 présente les résultats d'activité en Pu en fonction de la masse de particules obtenues après calcination des filtres. Cette masse de particules représente en fait la masse de particules de sol ressuspendu par abrasion éolienne. On constate une forte corrélation entre la masse de particules présentes dans l'air et l'activité en Pu mesurée. Les activités des filtres à air de 2023 s'intègrent parfaitement dans les mesures des années précédentes.

Les activités des eaux de surface (eaux de rivière) et eaux de pluie sont présentées dans le tableau 3. Lorsque les activités sont quantifiables, les incertitudes atteignent souvent 30 - 50%, car les activités ne dépassent pas 2 mBq/m^3, ce qui est réjouissant. Pu et Am sont quantifiés dans les eaux de pluie; toutefois il s'agit de l'entrainement de particules en suspension dans l'air dans les collecteurs par les précipitations (lessivage de l'air) et les volumes collectés sur l'année sont nettement supérieurs (~ 850 - 1'400 L) à ceux des prélèvements ponctuels (~ 150 - 350 L). Si le rapport isotopique ^{241}Am/$^{239+240}$Pu dévie légèrement en faveur de Am par rapport au sol, il ne dépasse pas 1 et, compte tenu des incertitudes sur ce rapport approchant 50%, on peut conclure qu'il n'y a pas de fractionnement significatif des deux radioéléments. Ainsi, bien que l'eau prélevée soit filtrée à 0.45 µm (exception: Chancy), les activités mesurées sont probablement dues à la charge en particules de sol lessivé. 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 (diffusion in thin film) serait en mesure de donner des indications précises à ce sujet [2-4].

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 [3].

Les résultats des mesures effectuées sur différents échantillons de l'environnement aquatique collectés en aval des centrales nucléaires sont présentés dans le tableau 4. $^{239+240}$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}Am/$^{239+240}$Pu proche de celui des sols (voir tableau 1).

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 mBq/kg. Pour tous les échantillons aquatiques, ^{238}Pu est également resté en dessous des limites de détection.

Tableau 3:
Activités en $^{239+240}$Pu et ^{241}Am (mBq/m^3) des eaux collectées en Suisse durant l'année 2023. (Incertitudes à 95%).

Type	Lieu	Volume [L]	$^{239+240}$Pu mBq/m^3	^{238}Pu mBq/m^3	^{241}Am mBq/m^3	^{241}Am/ $^{239+240}$Pu
Eau de rivière	Rhône, Chancy	181	1.83 ± 0.54	< 0.8	1.11 ± 0.37	0.61 ± 0.27
	Aar (Hagneck)	360	0.73 ± 0.23	0.33 ± 0.15	< 0.4	0.47 ± 0.24
	Aar (Klingnau)	295	0.92 ± 0.33	< 0.7	1.01 ± 0.32	1.10 ± 0.52
	Rhin (Pratteln)	370	1.91 ± 0.39	< 0.4	0.51 ± 0.17	0.27 ± 0.11
Eau de pluie	Posieux	1'057	0.89 ± 0.15	< 0.14	0.38 ± 0.08	0.42 ± 0.12
	Mühleberg	870	1.17 ± 0.20	< 0.18	0.72 ± 0.13	0.61 ± 0.15
	Leibstadt	1'429	0.66 ± 0.12	< 0.11	0.44 ± 0.08	0.66 ± 0.16

Tableau 4:
Activités (mBq/kg Matières Séches - MS) en plutonium et américium de différents échantillons aquatiques prélevés en 2023 en aval des centrales nucléaires suisses (Incertitudes à 95%).

Type	Lieu	MS analysée [g.ms]	$^{239+240}$Pu mBq/kg MS	^{241}Am mBq/kg MS	^{241}Am/ $^{239+240}$Pu
Sédiments	Aar (Hagneck)	51	26.5 ± 4.2	10.5 ± 2.0	0.39 ± 0.10
	Aar (Klingnau)	52	40.1 ± 4.7	21.4 ± 3.2	0.53 ± 0.10
	Rhin (Pratteln)	52	46.5 ± 5.4	16.1 ± 3.0	0.35 ± 0.07
Poissons	Aar (Mühleberg)	136	< 1.4	< 0.8	-
	Aar (Däniken)	73	< 6.8	< 1.6	-
	Aar (Beznau)	37	< 5.9	< 3.6	-
	Rhin (Leibstadt)	124	< 4.3	1.3 ± 0.5	-
	Rhin (Leibstadt)	128	< 4.8	1.5 ± 0.5	-
	Rhin (Dogern)	148	< 4.0	1.2 ± 0.5	-

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 MS pour le Pu et 95 mBq/kg masse sèche (MS) pour l'Am. Le site du Tessin (Stabio) présente des activités plus élevées, jusqu'à 550 mBq/kg MS en Pu et 290 mBq/kg MS en Am.

Ces radioéléments sont bien fixés dans le sol et leur présence résulte des retombées des essais nucléaires atmosphériques des années soixante. En conséquence, les activités en Pu et Am des filtres à air n'ont pas dépassé 1.5 nBq/m^3 en $^{239+240}$Pu et 0.7 nBq/m^3 en ^{241}Am. L'analyse des activités mesurées depuis 2014 sur certains sites du plateau suisse montre que l'activité dans les filtres à air est corrélée à la masse de particules présente sur les filtres. Les activités des eaux de surface sont similaires aux années précédentes et n'ont pas dépassé 2.0 mBq/m^3 en $^{239+240}$Pu. Les mesures confirment qu'il est nécessaire de collecter plus de 200 L d'eau pour fournir des résultats en dessus de la limite de détection de la mesure par spectrométrie alpha.

Les mesures dans les sédiments en aval des centrales nucléaires n'ont pas montré de marquage propre aux rejets des centrales nucléaires; l'activité provient également des retombées des essais nucléaires. Les activités dans les poissons sont restées en dessous des limites de détection, à l'exception de ^{241}Am qui a été quantifié dans trois échantillons à une activité proche de 1 - 1.5 mBq/kg MS.

Dans l'ensemble, tous ces 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. L'analyse détaillée de certains sites pour lesquels nous possédons des mesures en Pu et Am depuis 25 ans a permis de déterminer la période biologique du Pu dans les 5 premiers centimètres de sol; les résultats montrent une différence significative de celle-ci puisque les sites de montagne ont une période biologique deux fois plus courte que les sites de plaine (10 ans versus 20 ans). L'érosion accélérée des sols de montagne par rapport aux sols de plaine en est probablement la raison la plus importante.

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 relâchements ponctuels.

Remerciements
Nous remercions l'OFSP et l'EAWAG pour le prélèvement des échantillons.

Références
[1] Luisier et al. J. Radioanal. Nucl. Chem. 2009, 281,425–432.
[2] Chaplin et al. Water Research, 2022, 221, 118838.
[3] Chaplin et al. ACS EST Water, 2022, 2, 1688-1696.
[4] 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*

2023

8.1
Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

R. Habegger, A. Leupin, J. Löhle
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Fortluft lagen im Jahr 2023 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 2023

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 2023. 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 27 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 168 Proben eigene gammaspektrometrische 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

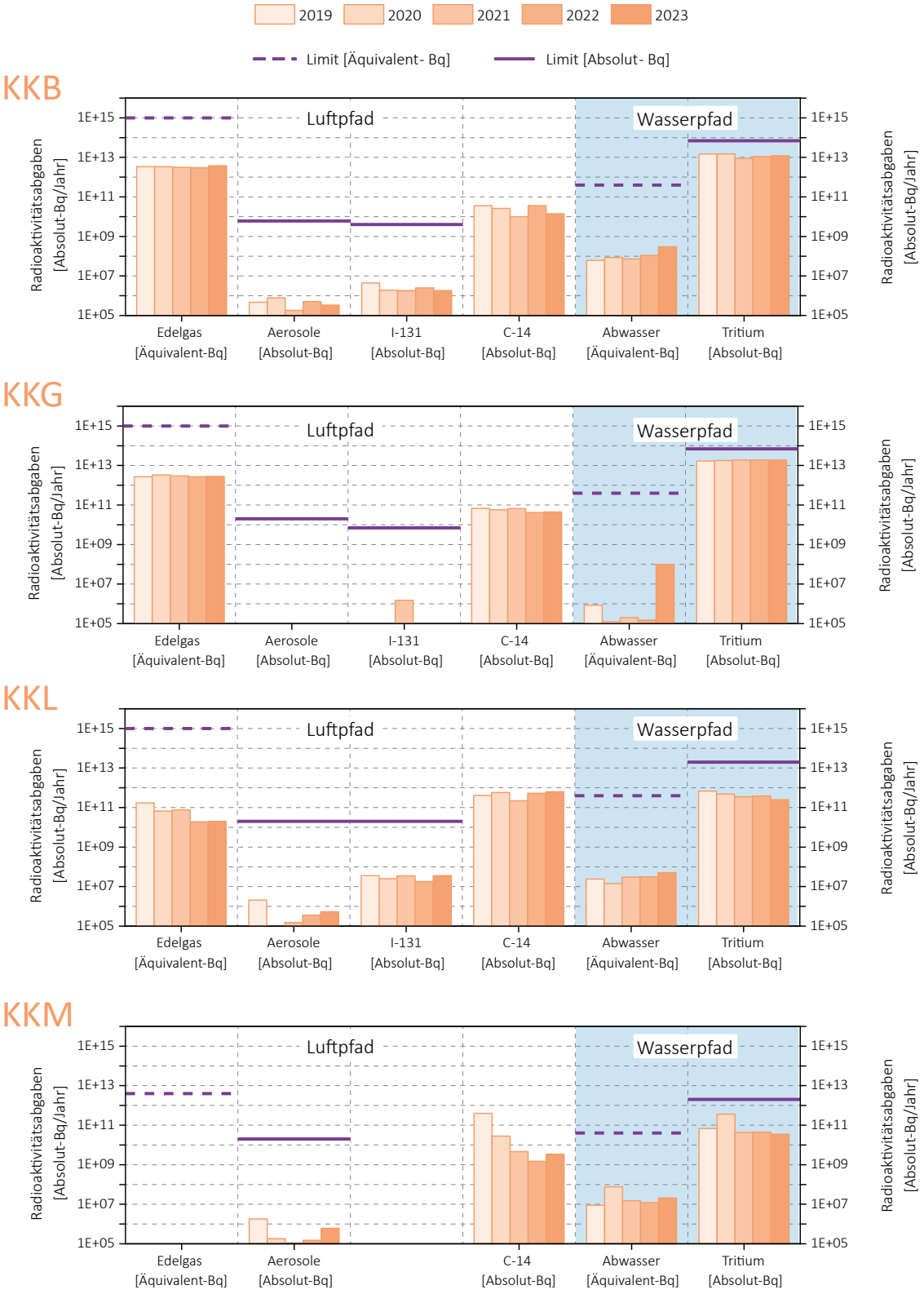


Fig 1.a :
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2019 bis 2023) im Vergleich mit den Jahresabgabelimiten.

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 und das KKM bilanzieren die Edelgase dagegen nuklidspezifisch mittels Gamma-Spektrometriemessungen. Die nuklidspezifischen Messungen liegen häufig unterhalb der Nachweisgrenze.

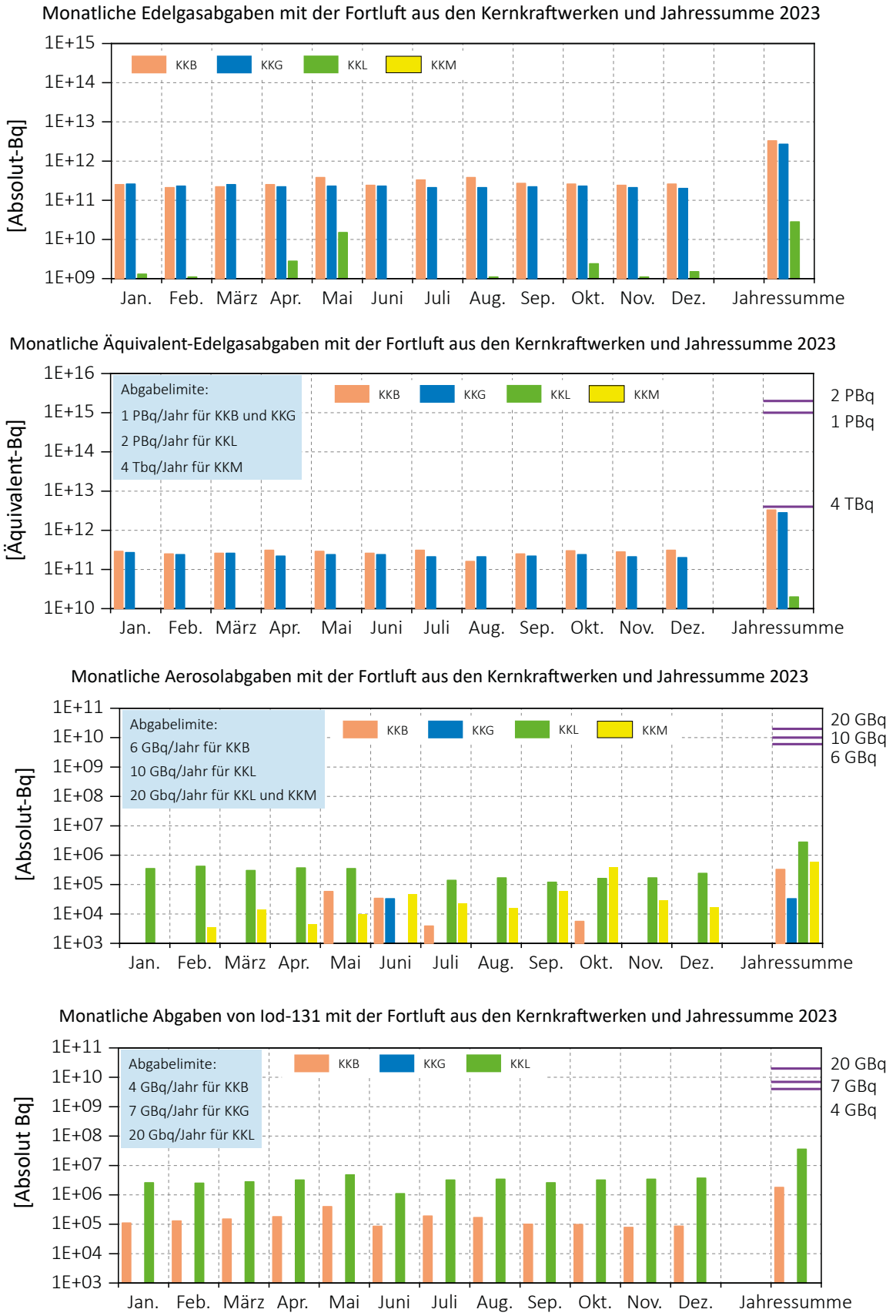
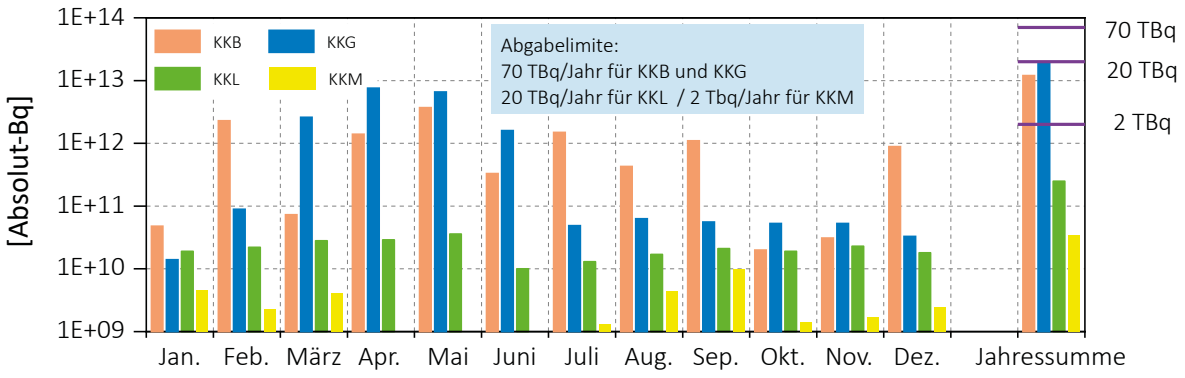
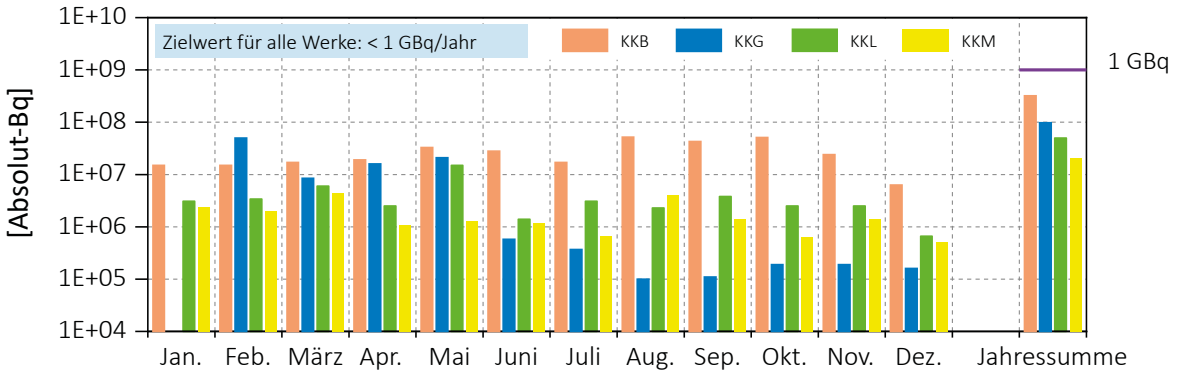


Fig 1.b (Teil 1):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2023 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.

Monatliche Abgaben von Tritium mit dem Abwasser aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2023



Monatliche Abgaben der übrigen Nuklide mit dem Abwasser aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2023



Monatliche Äquivalentabgaben der übrigen Nuklide mit dem Abwasser aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2023

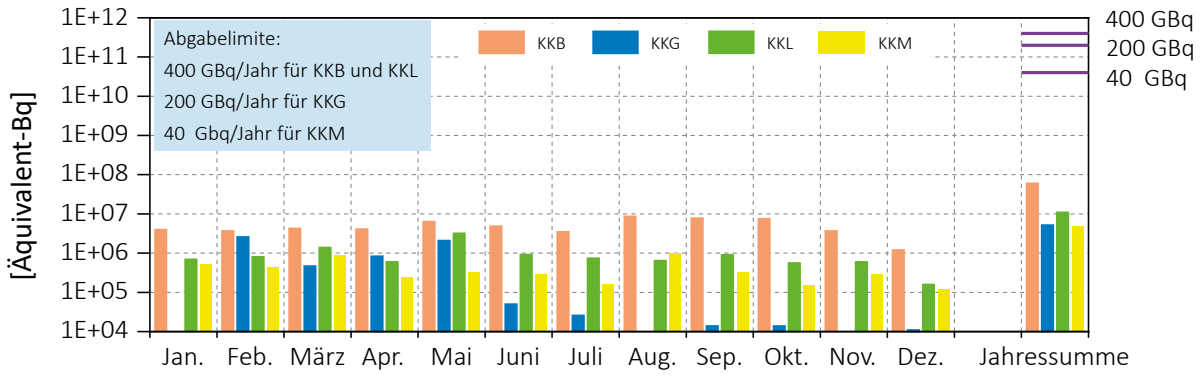
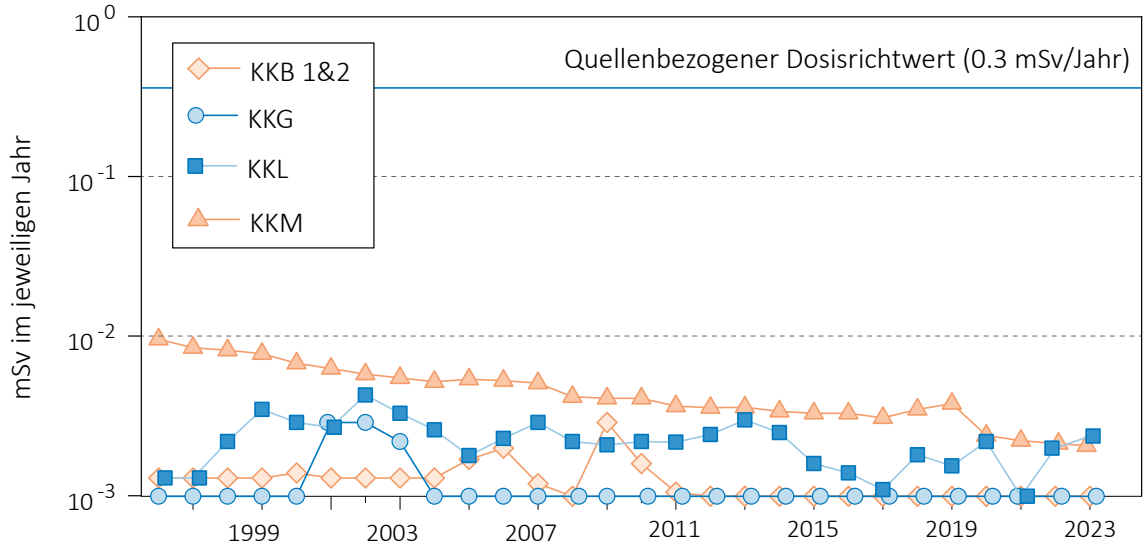


Fig 1.b (Teil 2):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2023 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.



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 2023	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01. - 16.05.; 01.06. - 31.12. Revisionsstillstand: 17.05.- 30.06.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01. - 04.08.; 12.09. -31.12. Revisionsstillstand: 05.08. - 11.09.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01. - 27.05.; 25.06. - 31.12. Revisionsstillstand: 28.05. - 24.06.	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 01.01. - 12.06.; 10.07. - 31.12. Revisionsstillstand: 13.06. -09.07.	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019 Brennstofffreiheit ab September 2023	Siedewasserreaktor	- MW

Figur 3:
Betrieb der Kernanlagen 2023.

für tritiumhaltiges Wasser bei den Abgaben erkennbar. Solche 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 0.005 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betrugen somit im Jahr 2023 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 weniger als 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 durchgeführten 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 Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Die für das Jahr 2023 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 2023 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]		
			Messsung	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 3'870 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$3.0 \cdot 10^{8}$	$6.3 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10^{11}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$1.2 \cdot 10^{13}$	-	$7 \cdot 10^{13}$	17 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	$3.2 \cdot 10^{12}$	$3.2 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	0.4 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	$3.4 \cdot 10^{5}$	-	$6 \cdot 10^{9}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ^{131}I	$1.8 \cdot 10^{6}$	$3.8 \cdot 10^{6}$	$4 \cdot 10^{9}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$1.4 \cdot 10^{10}$	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Dosis total						**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
KKG	Abwasser 7'741 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$9.8 \cdot 10^{7}$	$5.2 \cdot 10^{6}$	$2 \cdot 10^{11}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$1.9 \cdot 10^{13}$	-	$7 \cdot 10^{13}$	27 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	$< 2.7 \cdot 10^{12}$	$< 2.8 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	< 0.3%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	$3.3 \cdot 10^{4}$	-	$1 \cdot 10^{10}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ^{131}I	-	-	$7 \cdot 10^{9}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$4.5 \cdot 10^{10}$	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Dosis total						**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
KKL	Abwasser 12'273 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$5.0 \cdot 10^{7}$	$1.1 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10^{11}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$2.5 \cdot 10^{11}$	-	$2 \cdot 10^{13}$	1.3 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	$2.8 \cdot 10^{10}$	$2.0 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{15}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	$5.3 \cdot 10^{5}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ^{131}I	$3.9 \cdot 10^{7}$	$3.9 \cdot 10^{7}$	$2 \cdot 10^{10}$	0.2%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$6.3 \cdot 10^{11}$	-	-	-	0.0024	0.0031	0.0053
	Dosis total						**0.0024**	**0.0032**	**0.0053**
KKM	Abwasser 1'747 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$2.1 \cdot 10^{7}$	$4.8 \cdot 10^{6}$	$4. \cdot 10^{10}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$3.5 \cdot 10^{10}$	$3.5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{12}$	1.8%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	-	-	$4 \cdot 10^{12}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	$6.0 \cdot 10^{5}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	< 0.1%	0.0021	0.0020	0.0020
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$3.4 \cdot 10^{9}$	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Dosis total						**0.0021**	**0.0020**	**0.0020**
ZZL	Abwasser 517 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$3.4 \cdot 10^{8}$	$9.2 \cdot 10^{7}$	$2 \cdot 10^{11}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$1.1 \cdot 10^{10}$	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	β–/γ-Aerosole	$3.3 \cdot 10^{5}$	-	$1 \cdot 10^{9}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		α-Aerosole	$1.2 \cdot 10^{4}$	-	$3 \cdot 10^{7}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$1.4 \cdot 10^{10}$	-	$1 \cdot 10^{12}$	1.4%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$8.1 \cdot 10^{9}$	-	$1 \cdot 10^{14}$	< 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 2023 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	$1.1 \cdot 10^{7}$	-	-	-	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	-	-	-	-	-
Tritium als HTO	$6.2 \cdot 10^{9}$	-	-	-	$1.6 \cdot 10^{10}$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$3.6 \cdot 10^{6}$	-	-	$5.8 \cdot 10^{8}$	$1.2 \cdot 10^{7}$
Jahresdosis[3] [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 Fortluftanla-gen	C-Labor	Abwasser 996 m³	Fortluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser[1,2] [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	$2.6 \cdot 10^{7}$	-	$1.2 \cdot 10^{6}$
Tritium	-	-	$2.6 \cdot 10^{10}$	-	-
Abgaben über die Fortluft[2,4] [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$8.2 \cdot 10^{13}$	-	-	$8.2 \cdot 10^{13}$	$3.4 \cdot 10^{14}$
β/γ-Aerosole, ohne Iod	$4.4 \cdot 10^{9}$	-	-	$4.4 \cdot 10^{9}$	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	$6.3 \cdot 10^{7}$	-	-	$6.3 \cdot 10^{7}$	-
Tritium als HTO	$2.3 \cdot 10^{12}$	-	-	$2.3 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	$6.0 \cdot 10^{8}$	-
Jahresdosis[3] [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	0.0032	< 0.00015	< 0.00015	0.004	
Kind 10 Jahre	0.0033	< 0.00015	< 0.00015	0.004	
Kleinkinder	0.0033	< 0.00015	< 0.00015	0.004	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert[4]	2.1 %	< 0.1%	< 0.1%	< 3.0%	

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2023:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{3}H	$1.2\cdot10^{13}$	$1.9\cdot10^{13}$	$2.5\cdot10^{11}$	$3.5\cdot10^{10}$	$2.6\cdot10^{10}$	$1.1\cdot10^{10}$
^{7}Be					$7.7\cdot10^{5}$	
^{22}Na					$4.0\cdot10^{5}$	$3.6\cdot10^{6}$
^{24}Na	$1.2\cdot10^{6}$					
^{35}S					$8.2\cdot10^{6}$	
^{54}Mn	$3.6\cdot10^{6}$		$3.1\cdot10^{6}$	$8.2\cdot10^{5}$	$3.9\cdot10^{4}$	$6.9\cdot10^{5}$
^{57}Co					$4.0\cdot10^{3}$	
^{58}Co	$1.2\cdot10^{7}$					
^{60}Co	$6.0\cdot10^{7}$	$4.7\cdot10^{4}$	$4.7\cdot10^{7}$	$1.8\cdot10^{7}$	$5.6\cdot10^{5}$	$5.6\cdot10^{6}$
^{65}Zn	$5.1\cdot10^{7}$					
^{67}Cu					$1.5\cdot10^{6}$	
^{67}Ga					$1.4\cdot10^{6}$	
^{88}Zr					$1.1\cdot10^{4}$	
^{89}Sr	$4.7\cdot10^{5}$			$1.0\cdot10^{6}$		
^{90}Sr/^{90}Y	$6.1\cdot10^{5}$			$2.3\cdot10^{4}$		
^{95}Zr	$1.8\cdot10^{5}$					
^{95}Nb	$9.4\cdot10^{4}$					
^{99m}Tc	$2.6\cdot10^{5}$	$3.6\cdot10^{5}$				
^{103}Ru	$2.5\cdot10^{5}$					
^{110m}Ag	$1.2\cdot10^{7}$					
^{111}In					$5.1\cdot10^{4}$	
^{113}Sn	$1.1\cdot10^{5}$					
^{122}Sb	$9.1\cdot10^{5}$					
^{124}Sb	$5.4\cdot10^{7}$				$3.0\cdot10^{3}$	$8.7\cdot10^{3}$
^{125}Sb	$2.5\cdot10^{7}$					$4.7\cdot10^{6}$
^{123m}Te	$1.8\cdot10^{7}$	$1.9\cdot10^{6}$				
^{125m}Te		$9.6\cdot10^{7}$				
^{129m}Te	$8.9\cdot10^{6}$					
^{132}Te	$5.2\cdot10^{6}$	$1.0\cdot10^{5}$				
^{131}I	$4.2\cdot10^{6}$					
^{133}I	$3.8\cdot10^{5}$					
^{134}Cs	$5.6\cdot10^{5}$					$1.3\cdot10^{6}$
^{137}Cs	$6.9\cdot10^{7}$			$8.8\cdot10^{5}$	$1.5\cdot10^{6}$	$3.2\cdot10^{8}$
^{140}La	$6.5\cdot10^{4}$					
^{155}Tb					$6.3\cdot10^{4}$	
^{161}Tb					$5.0\cdot10^{6}$	
^{177}Lu					$6.9\cdot10^{6}$	
^{207}Bi					$2.1\cdot10^{3}$	
α-Strahler	***)**	**$3.9\cdot10^{5}$**	**$5.8\cdot10^{5}$**	**$2.7\cdot10^{4}$**		***)**
$^{234/238}$U					$4.3\cdot10^{3}$	
$^{239/240}$Pu	$5.3\cdot10^{3}$				$4.3\cdot10^{3}$	$4.4\cdot10^{3}$
^{238}Pu/^{241}Am	$3.2\cdot10^{4}$				$4.3\cdot10^{3}$	
^{242}Cm	$8.1\cdot10^{3}$					
$^{243/244}$Cm	$2.3\cdot10^{4}$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2022 bis und mit dem 3. Quartal 2023

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Fortluft, Edelgase und Iod 2023:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase. Edelgase						
Tritium	$8.5 \cdot 10^{11}$	$5.4 \cdot 10^{11}$	$5.6 \cdot 10^{11}$	$5.3 \cdot 10^{9}$	$2.3 \cdot 10^{12}$	$8.1 \cdot 10^{9}$
^{14}C (CO_2)	$1.4 \cdot 10^{10}$	$4.5 \cdot 10^{10}$	$6.3 \cdot 10^{11}$	$3.4 \cdot 10^{9}$	$6.0 \cdot 10^{8}$	$1.4 \cdot 10^{10}$
^{11}C					$1.2 \cdot 10^{13}$	
^{13}N					$1.3 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$5.3 \cdot 10^{13}$	
^{18}F					$3.9 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne						
^{41}Ar					$3.3 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr						
^{85m}Kr	$1.2 \cdot 10^{11}$					
^{88}Kr	$2.0 \cdot 10^{11}$					
^{133}Xe	$1.5 \cdot 10^{12}$		$9.7 \cdot 10^{9}$			
^{135}Xe	$1.4 \cdot 10^{12}$		$1.6 \cdot 10^{10}$			
^{135m}Xe			$2.3 \cdot 10^{9}$			
^{137}Xe						
EG-Aequiv.						
EG: β-total		$< 2.7 \cdot 10^{12}$				
Andere						
Iod						
^{123}I					$1.2 \cdot 10^{5}$	
^{124}I					$2.5 \cdot 10^{5}$	
^{125}I					$6.2 \cdot 10^{7}$	
^{126}I					$4.2 \cdot 10^{5}$	
^{131}I	$1.8 \cdot 10^{6}$		$3.9 \cdot 10^{7}$			
^{133}I	$1.1 \cdot 10^{7}$					

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Fortluft, Aerosole 2023:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{7}Be					$6.4 \cdot 10^{5}$	
^{24}Na					$1.4 \cdot 10^{8}$	
^{54}Mn						
^{57}Co						
^{60}Co	$4.7 \cdot 10^{4}$		$3.6 \cdot 10^{4}$	$4.7 \cdot 10^{5}$	$8.4 \cdot 10^{4}$	$1.9 \cdot 10^{3}$
^{65}Zn						
^{77}Br					$2.7 \cdot 10^{6}$	
^{80m}Br					$4.5 \cdot 10^{6}$	
^{82}Br					$9.4 \cdot 10^{8}$	
^{89}Sr						
^{90}Sr						
^{95}Zr	$8.2 \cdot 10^{3}$					
^{95}Nb	$1.8 \cdot 10^{3}$					
^{99m}Tc					$1.1 \cdot 10^{7}$	
^{103}Ru	$4.5 \cdot 10^{4}$					
^{106}Ru						
^{123m}Te						
^{121}Te					$6.9 \cdot 10^{4}$	
^{137}Cs				$1.4 \cdot 10^{5}$		$8.8 \cdot 10^{3}$
^{140}Ba			$3.0 \cdot 10^{5}$			
^{140}La			$2.0 \cdot 10^{5}$			
^{144}Ce		$3.3 \cdot 10^{4}$				
^{181}Re					$4.1 \cdot 10^{7}$	
^{182}Re					$1.1 \cdot 10^{9}$	
^{183}Re					$7.5 \cdot 10^{6}$	
^{182}Os					$3.0 \cdot 10^{8}$	
^{183}Os					$3.2 \cdot 10^{8}$	
^{183m}Os					$1.5 \cdot 10^{7}$	
^{185}Os					$2.5 \cdot 10^{7}$	
^{191}Os	$2.3 \cdot 10^{5}$					
^{191}Pt					$3.4 \cdot 10^{6}$	
^{192}Au					$2.6 \cdot 10^{8}$	
^{193}Au					$6.3 \cdot 10^{7}$	
^{194}Au					$5.8 \cdot 10^{5}$	
^{195}Au						$6.6 \cdot 10^{3}$
^{193m}Hg					$1.7 \cdot 10^{7}$	
^{194}Hg					$5.8 \cdot 10^{5}$	$9.8 \cdot 10^{3}$
^{195m}Hg					$1.7 \cdot 10^{8}$	
^{197}Hg					$7.5 \cdot 10^{8}$	
^{197m}Hg					$2.0 \cdot 10^{8}$	
^{203}Hg					$1.3 \cdot 10^{7}$	
Nicht spezifizierte						$3.1 \cdot 10^{5}$
α-Aerosole	**$2.8 \cdot 10^{3}$**	**$5.7 \cdot 10^{4}$**	**$1.5 \cdot 10^{5}$**	**$7.4 \cdot 10^{3}$**		**$1.2 \cdot 10^{4}$**

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 ^{131}I 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 ^{131}Iod-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 Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

Die Ortsdosis, respektive die Ortsdosisleistung 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 2023

Die Ortsdosisleistung ist im Nahbereich (beispielsweise am Arealzaun) des Siedewasserreaktors 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 wurden bei den vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.18 µSv/h ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von etwa 0.02 mSv pro Woche. Die von KKL quartalsweise ausgewerteten EDIS am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.02 mSv. Am Zaun des KKM wurden bei den vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen 0.08 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.31 µSv/h ermittelt. Auf eine Woche hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von etwa 0.039 mSv resultieren. Die vom KKM quartalsweise ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.016 mSv. Am Zaun des PSI wurden bei vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.11 µSv/h ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.009 mSv pro Woche. Die vom PSI quartalsweise ausgewerteten TLD am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.007 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 Ortsdosisleistung 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 Dosisleistungs-überwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle
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 im ENSI automatisch angezeigt werden.

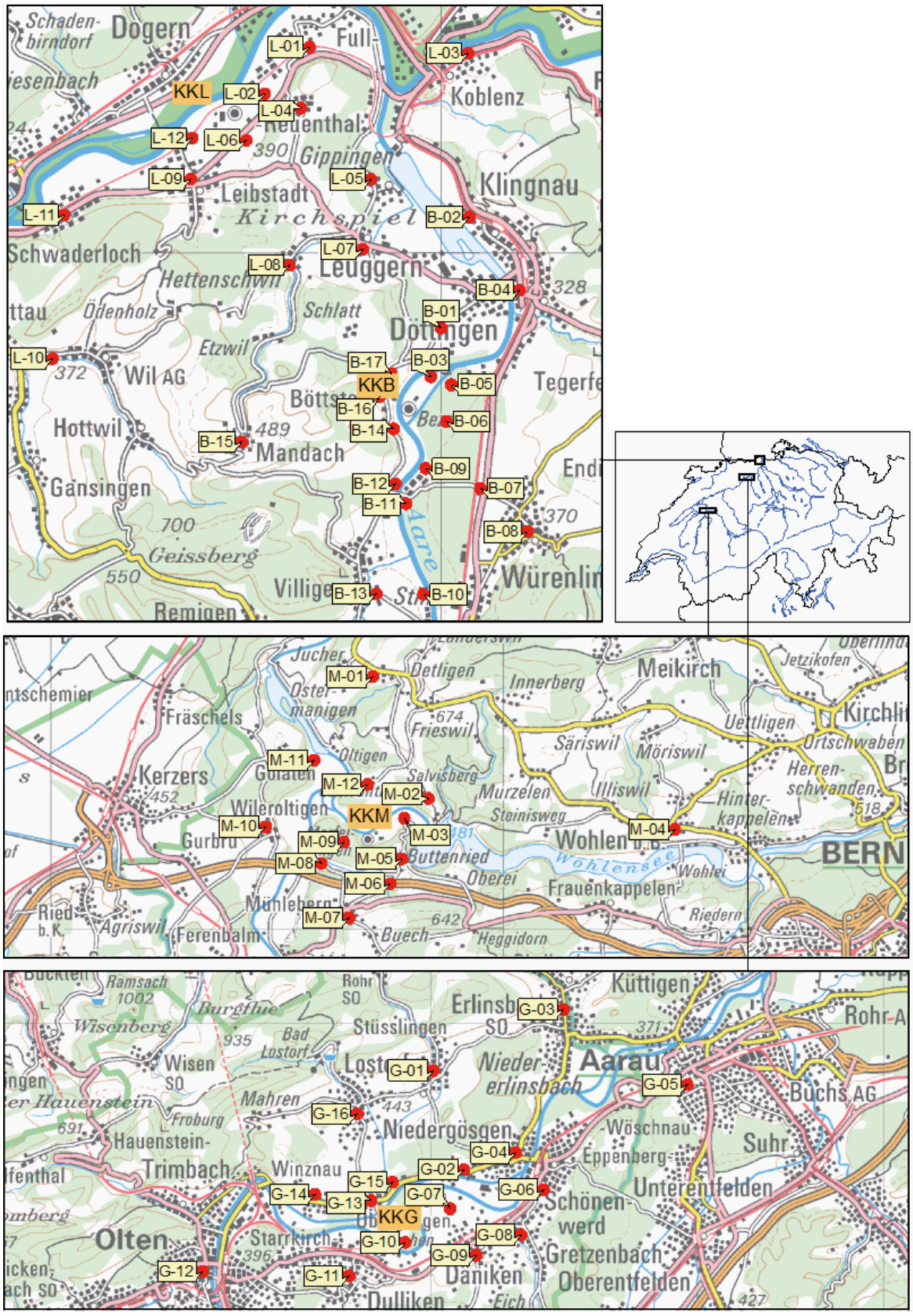
Die Messwerte im Jahr 2023 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

Übersicht

Das **MADUK**-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von **An**lage**pa**rametern (**ANPA**) und Kamin**emi**ssionswerten (**EMI**) aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 in den operationellen 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 im ENSI automatisch gemeldet werden. Bei einem Störfall unterstützt MADUK/ANPA die Notfallorganisation bei der Beurteilung des Anlagenzustandes (ANPA- und EMI-Daten), bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch der Dosisleistungsdaten 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 www.ensi.ch/de/messwerte-radioaktivitat/ sind alle seit 1994 archivierten Tages-, Stunden- und Zehnminutenmittelwerte der MADUK Stationen abrufbar.



Figur 1 :
Die vier Messringe von MADUK. Kartendaten PK200 © Bundesamt für Landestopografie.

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahr 2023 wurden die Erfassungsrechner für die ANPA-/EMI-Daten in den Kernkraftwerken KKB, KKG und KKL ersetzt. Zudem wurden die Netzwerkanbindungen auf Glasfaser migriert, um die Ausfallsicherheit im Falle eines Stromnetzausfalls zu erhöhen. Ab September 2023 befanden sich nach dem Abtransport ins ZWILAG keine Brennelemente mehr auf dem Werksareal von KKM. Für die Beurteilung der in der Stilllegungsphase 2 noch möglichen Störfälle sind die ANPA- und EMI-Daten nicht mehr relevant. Deshalb wurde die Übertragung der entsprechenden Daten von KKM Ende September eingestellt und die Geräte in der Folge zurückgebaut. Die MADUK-Messsonden beim KKM sind weiterhin in Betrieb.

Systemverfügbarkeit und Störungen

Die Systemverfügbarkeit ist bei MADUK von besonderer Bedeutung, da das System eine kontinuierliche Überwachung gewährleisten muss, die auch von der Öffentlichkeit wahrgenommen wird. Mit der Kenngrösse «Systemverfügbarkeit» wird die Einsatztauglichkeit des Gesamtsystems MADUK beurteilt: Systemstörungen, die zu wesentlichen Nutzungseinschränkungen des Systems geführt haben, erfasst das ENSI als Ausfallzeit in Stunden.

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Störungen mit permanentem Datenverlust an den MADUK-Messstationen.

Die Messstationen liefen auch im Jahr 2023 grösstenteils zuverlässig. Aufgrund von Qualitätsproblemen beim Hochdosiszählrohr befanden sich 2023 zehn Messsonden in der Reparatur. Dies führte im dritten Quartal zu Engpässen beim Reservematerial, aber glücklicherweise nicht zu längeren Ausfällen von Messstationen. Mit dem Eintreffen der reparierten Sonden anfangs Dezember entspannte sich die Situation wieder. Am 11. Oktober ab ca. 11:00 Uhr lieferte die Messstation L-03 um rund 10 % erhöhte Messwerte. Dies fiel bei der täglichen Routineprüfung der Daten ab 12. Oktober auf. Die Detailprüfung der Sondendaten zeigte zudem, dass die Sonde zum entsprechenden Zeitpunkt ein Schock-Ereignis aufgezeichnet hat. Am 13. Oktober wurde die Situation vor Ort überprüft, wobei festgestellt wurde, dass die Sonde umgefahren worden war und am Boden lag. Die Befestigungsschrauben waren ausgerissen. Die Sonde wurde beim ENSI repariert und geprüft und anschliessend wieder bei der Station L-03 montiert. Der Schadenverursacher konnte nicht festgestellt werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.8 % (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet).

Tabelle 1:
Auflistung der Störungen bei den MADUK-Messstationen mit permanentem Datenverlust.

Station	Störungs-dauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
M-10	43.3	43.3	Defekte Messsonde
L-03	143.0	143.0	Messsonde umgefahren
G-02	6.4	6.4	Defekte Messsonde

Tabelle 2:
Auflistung der Schwellwertüberschreitungen durch die Nettodosisleistung im Jahr 2023.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
13.05.2023 18:50	M-04	0.3	52	140
23.05.2023 02:10	L-03	0.2	51	151
24.08.2023 19:00	G-12	0.3	54	148
28.08.2023 15:10	G-03	0.2	52	203
28.08.2023 15:00	G-07	0.5	58	196

Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.9 %.

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 2023 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 2023 erfolgten die Messungen an den MADUK-Standorten der Messringe des KKB und des KKM. Bei allen Messungen konnten keine Immissionen der Kernanlagen nachgewiesen werden.

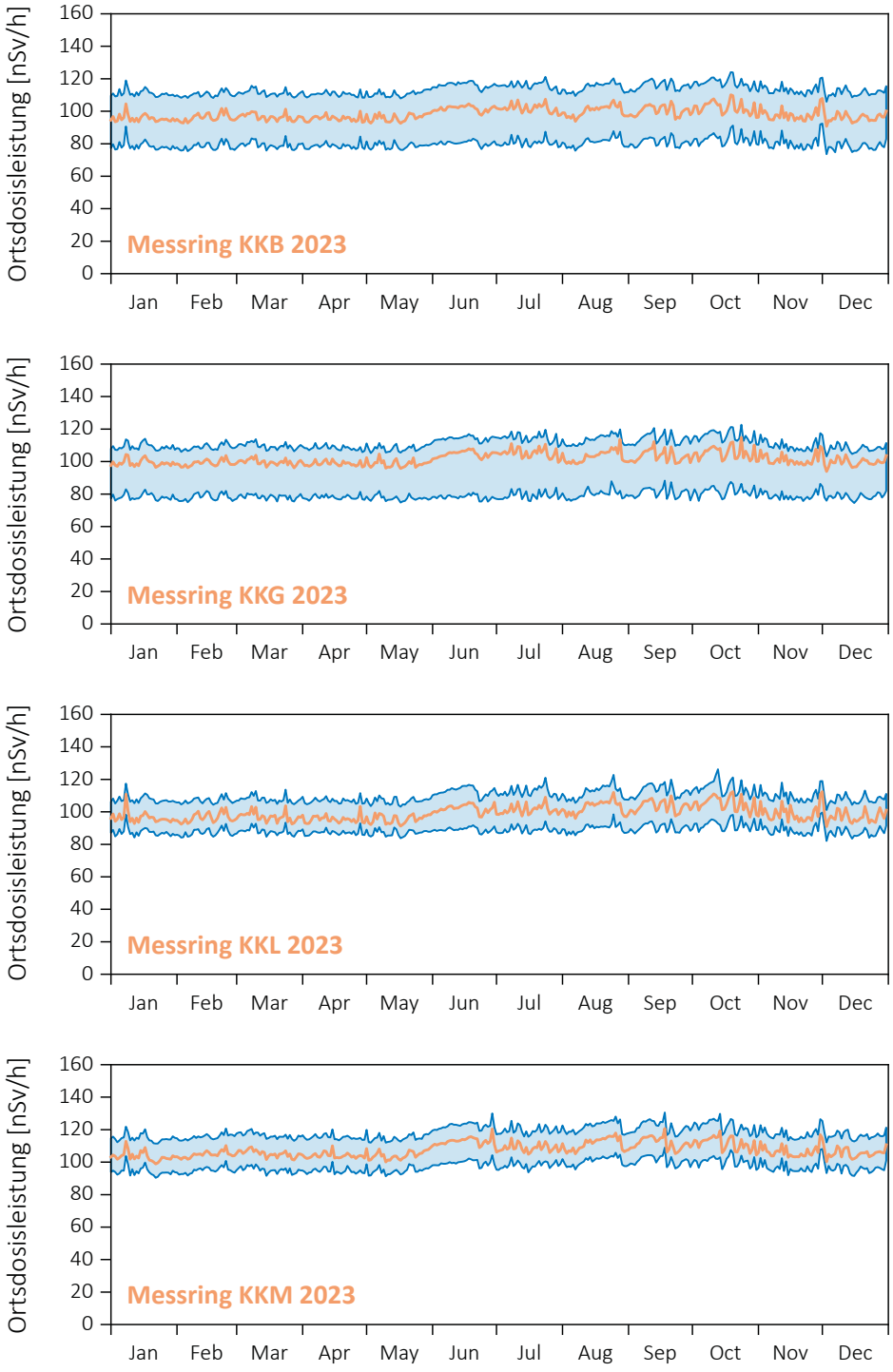
Messergebnisse

Im Jahr 2023 verzeichneten die Messstationen insgesamt fünf Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h (Tabelle 2). Alle Erhöhungen waren

aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen.

Das ENSI stellte keine erhöhten Ortsdosisleistungswerte fest, die auf Abgaben der KKW zurückzuführen waren.

Die Figur 2 zeigt die Maxima, die Minima und die Medianwerte der Tagesmittelwerte der jeweiligen Messringe im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke.



Figur 2:
Maxima, Minima und Medianwerte der Tagesmittelwerte der Sonden der Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2023.

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 Würenlingen) 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 ^{7}Be, ^{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, $^{239+240}$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 - 41 Bq/kg für das Jahr 2023. 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 $^{239+240}$Pu sind ähnlich signifikant, zumal diese Radionuklide schon sehr viel früher (Beginn der 1960er Jahre) als Fallout der A-Bombentest in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf 1 - 4 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}$Pu von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.1 - 0.5 Bq/kg im Jahr 2023.

Die Isotopenverhältnisse von ^{241}Am/$^{239+240}$Pu betrugen im Mittel 0.50 in 2023 - bei einem erwarteten Wert von 0.35. Dies entspricht den langjährigen Erfahrungen. Für das Isotopenpaar ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu konnte das Verhältnis von erwartet 0.03 nur teilweise bestätigt werden, aufgrund von allgemein tiefen Messwerten in der Nähe der Nachweisgrenzen.

Einleitung

Das Zwischenlager (Zwilag AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erbaut und anschliessend 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. ^{7}Be), terrestrischer (^{40}K sowie Radionuklide aus den U– und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am, ^{244}Cm und ^{131}I) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von oberirdischen Kernwaffentests der 60er Jahre und der Chernobyl-Reaktorunfall 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, so dass 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 sodann von der festen Phase über Filtration getrennt.

Diese Leach-Lösung wird auf eine DGA-Säule gegeben und somit die Actinoiden auf der Säule vorkonzentriert. 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 8M HNO_3 Lösung hochkonzentriert. Nach Zugabe von H_2O_2 (Oxidationsmittel) und Erhitzen liegt das Plutonium vorwiegend als Pu^{4+} vor. Die auf Raumtemperatur abgekühle Lösung wird über eine Anionenaustauscher-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 durch Reduktion von Pu^{4+} zu Pu^{3+} mit einer HI/HCl-Lösung eluiert. 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-salzsauren $NaNO_2$ Lösung. Da Am in sehr geringer Konzentration vorliegt, ist ein weiterer Purifikationsschritt, 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 mittels 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.

Staubfangplatten

Die 4 Staubfangplatten, eine pro Himmelsrichtung, befinden sich entlang der Umzäunung des Zwilag-Areals. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden jeweils 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 Niederschlagssammler beim Zwilag-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10 ml dieser Wasserproben werden für die Tritium-Messung verwendet und grossvolumige Monatsmischproben (ideal 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 Nachweisgrenzen von 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, $^{239+240}$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 2023 konnte ^{238}Pu nur noch in einzelnen Proben knapp über der Nachweisgrenze gemessen werden. Die Nachweisgrenzen liegen im Bereich von 0.01 Bq/kg. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}$Pu liegen derzeit zwischen 0.06 und 0.5 Bq/kg. Die Messwerte streuten ebenfalls etwas stärker, aber um denselben Mittelwert verglichen mit dem Vorjahr. Die Aktivitätskonzentrationen von ^{241}Am bewegten sich zwischen 0.03 und 0.2 Bq/kg. Der Wertebereich für das Spaltprodukt ^{90}Sr lag 2023

Figur 1 :
Probensammler für Flusswasserproben der Zwilag, des KKB und PSI. Foto: Patricia Kramer.

höher im Vergleich zu den letzten Jahren. Die Resultate für ^{137}Cs (8 - 30 Bq/kg, im Mittel 17 Bq/kg) liegen auf dem Niveau 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 vereinzelt abgeschätzt werden, da die Messwerte für ^{238}Pu bereits auf sehr tiefem Niveau lagen. Die bestimmten Isotopenverhältnisse von ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu lagen im Bereich des langjährigen Erfahrungswertes von 0.03. Für das andere charakteristische Isotopenverhältnis zwischen ^{241}Am/$^{239+240}$Pu wurde ein Mittelwert von 0.5 bestimmt (erwartet 0.35, innerhalb der Messunsicherheiten). Dieses Ergebnis stützt die Annahme, dass die gemessenen Werte für die Actionide den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests, zuzuschreiben sind [2,3]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten fünf Jahre.

In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 17 - 32 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 320 und 430 Bq/kg gemessen. Ebenfalls eingetragen sind die aus der Gamma-Spektrometrie ermittelten Werte für ^{226}Ra (als Mass für natürlich vorkommendes, primordiales ^{238}U) und ^{228}Ra (als Mass für ^{232}Th). 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. 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 Probennahmen lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unterhalb der Nachweisgrenzen von 0.3 Bq/m^2, bzw. 0.4 Bq/m^2. Anhand des in der oberen Atmosphäre durch Sonnenpartikel produzierten ^{7}Be lassen sich die mittleren Jahreszeitverläufe abbilden.

Tabelle 1:
Anthropogene Fallout-Isotope in Bodenproben aus der Umgebung der Zwilag (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am, ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra, ^{228}Ra) im Verlauf der letzten fünf Jahre (2019-2023). Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2019	2020	2021	2022	2023
^{90}Sr	< 1 - 3	< 1 - 2	1.3 - 3.5	<1 - 2	< 2.6- 4.1
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs (1)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	5 - 40	10 - 40	7 - 60	8 - 30	9 - 41
^{238}Pu	< 0.005- 0.03	< 0.005- 0.03	0.02 - 0.06	< 0.01	< 0.01
$^{239+240}$Pu	0.1- 0.8	0.05 - 0.5	0.2 - 1.0	0.2 - 0.4	0.06- 0.5
^{241}Am	0.05 - 0.3	0.02 - 0.3	0.02 - 0.4	0.05 - 0.3	0.03 - 0.2
^{226}Ra	15 - 30	20 - 30	19 - 30	25 - 35	17- 32
^{228}Ra	17 - 30	20 - 40	15 - 40	20 - 40	22- 35

(1) Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte ab 2015 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 nicht mehr nachgewiesen werden, da bereits über 30 Jahre (mehr als 10 Halbwertzeiten) vergangen sind.

Auch die Flächenaktivitäten auf den Staubfangplatten von ^{7}Be schwankten zwischen ca. 5 - 25 Bq/m^2 im Winter und stiegen im Sommerhalbjahr 2022 lediglich bis auf 61 Bq/m^2 an. Damit wurden die Maximalwerte von 100 Bq/m^2 aus 2021 nicht mehr erreicht.

Bei den Regenwasserproben wurden ^{3}H-Aktivitäts-Konzentrationen von < 2 - 16 Bq/l nachgewiesen, wobei im Sommerhalbjahr die ^{3}H-Aktivität unter der Nachweisgrenze von 2.4 Bq/l lag. Mit der Gammaspektrometrie konnten seit 1997 erwartungsgemäss noch nie anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs oder ^{131}I nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze dieser Radionuklide liegt anhand des ausgewerteten Leitnuklids ^{137}Cs jeweils bei 0.04 Bq/l.

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] UNSCAER (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.

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 (^{3}H 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, $^{239+240}Pu$ et ^{241}Am) ainsi que de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs).

Introduction

Dans le but de préserver la santé de l'homme et l'environnement au voisinage des centrales nucléaires, l'OFSP poursuit depuis de nombreuses années un programme spéci- fique de prélèvements d'échantillons et de mesures de la radioactivité. Celui-ci commence au terme source, par des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, l'IFSN et l'OFSP sur divers échantillons en phase de rejet (filtres à aérosols, à iode, eaux de rejet). Les exploitants sont par ailleurs tenus de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois aux autorités.

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 de surveillance, coordonné par l'OFSP, englobe non seulement les propres mesures de l'Office mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut de radiophysique (mesures alpha et bêta), du laboratoire de Spiez (^{90}Sr dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aéroradiométrie etc.), 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. L'OFSP se doit ensuite de procéder 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 immissions 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.

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

Les immissions des centrales nucléaires étant parfois difficilement mesurables dans l'environnement, l'estimation de la dose au public repose avant tout sur les calculs effectués à partir des émissions des ins- tallations. En effet, les niveaux de radioactivité à la source permettent une détection plus aisée et plus exhaustive des radionucléides rejetés. 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 ra- dioactivité 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 aspects peuvent être pris en compte: l'un radioécologique 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 prescrites 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 2023

Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le 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 2023 (voir Chap. 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. Par contre, les rejets de substances radioactives dans les cours d'eau sont toujours comparables à ceux déclarés au cours des dernières années d'exploitation. On notera que toutes les centrales ont respecté la valeur cible de 1 GBq pour les rejets liquides en 2023.

La figure 1 présente les doses calculées pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires suisses entre 1981 et 2023. 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 (voir directive pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

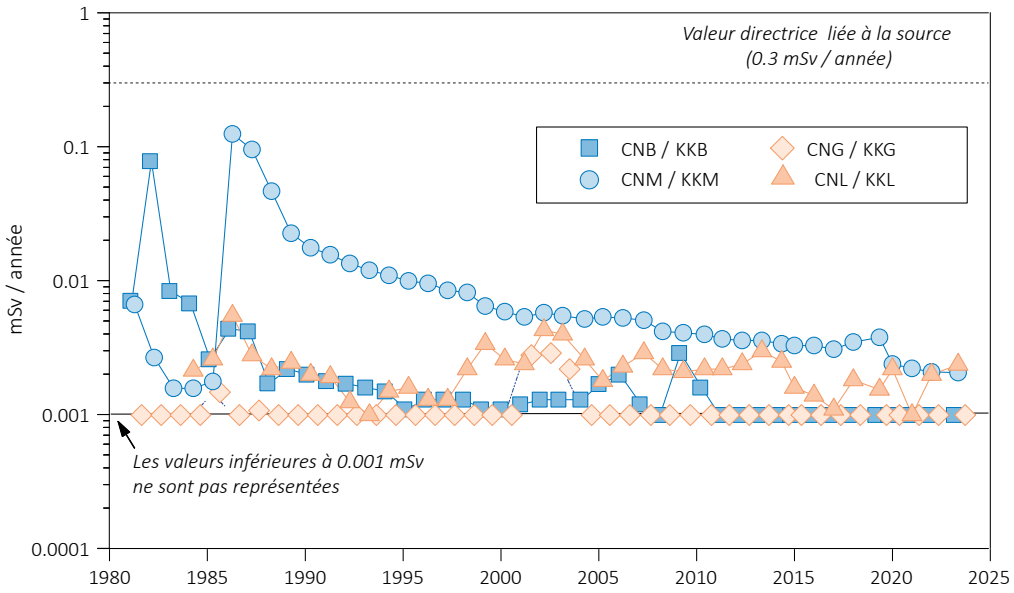


Figure 1:
Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2023 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnemment direct compris) est représentée à titre de comparaison.

L'augmentation significative de 1986 au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg 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 2023 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 au maximum 0.005 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, 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 0.02 mSv par semaine en 2023. Ce rayonnement résulte de la désintégration radioactive du ^{16}N, à courte demi-vie, 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 entrainer 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 0.016 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 0.31 µSv/h. En extrapolant cette valeur instantanée maximale sur une semaine, il en résulterait une dose ambiante hebdomadaire supplémentaire par rapport au fond naturel d'environ 0.039 mSv.

Aucune valeur plus élevée n'a en revanche pu être mesurée à la clôture des centrales nucléaires de Beznau et Gösgen.

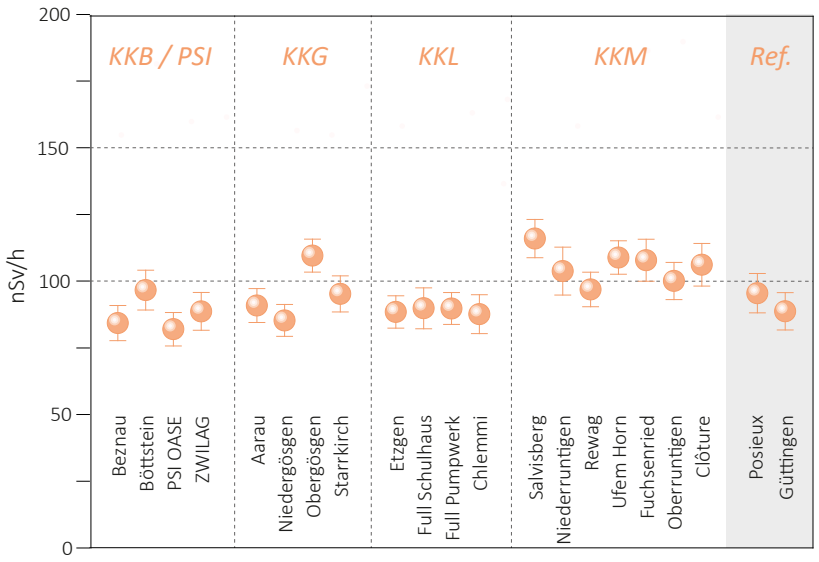


Figure 2:
Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectués en 2023 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).*

A la clôture du PSI, l'évaluation des TLD ainsi que les contrôles ponctuels de l'IFSN ont mis en évidence des élévations de la dose ambiante pouvant atteindre respectivement au maximum 0.007 à 0.009 mSv par semaine (après soustraction du bruit de fond naturel).

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 Güttingen, situées hors de leur influence. Depuis le début des travaux de démantèlement, ces mesures ont toutefois parfois mis en évidence la présence de ^{60}Co à la clôture de la centrale de Mühleberg confirmant les résultats des mesures réalisées par la CNM et l'IFSN. On notera toutefois que les valeurs de débit de dose légèrement plus élevées mesurées sur les autres sites de mesure du voisinage de la centrale de Mühleberg sont dues à une concentration généralement plus élevée en ^{40}K (naturel) dans les sols de cette région (cf. Figure 3).

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.

Les doses de neutrons relevées autour du PSI-West au cours du 1er trimestre 2023 étaient presque partout inférieures à la limite de détection. Il en va de même aux trois points situés autour de SwissFEL. Ceci était attendu puisque les installations étaient à

l'arrêt. Le reste de l'année, les doses des neutrons étaient faibles ou inférieures à la limite de détection dans la majorité des points autour du PSI West, avec quelques valeurs plus élevées (valeur maximale de 0.128 mSv/trimestre au 4ème trimestre) comparables à celles enregistrées au cours des années précédentes. Notons que les équivalents de dose ambiants 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 partout au niveau de l'irradiation naturelle d'environ 0.2 mSv par trimestre.

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.

Depuis 2019, 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 propre surveillance de ses immissions est par ailleurs toujours en fonction. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a été mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2023 (voir aussi chapitre 4.2). Les activités du ^{137}Cs sont ainsi restées inférieures à la limite de détection d'env. 3 - 5 mBq/m^3 (pour une mesure de 12h).

Le collecteur à grand débit (HVS) situé à Klingnau, à quelques km seulement du PSI, peut également permettre la mesure d'éventuelles traces de radioactivité émise dans cette région. La limite de détection pour le ^{137}Cs de ce dispositif très sensible est de l'ordre de 0.2 - 0.4 µBq/m^3 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, sont remises en suspension dans l'air. Le ^{137}Cs peut ainsi être décelé sur les filtres aérosols des collecteurs HVS. Avec une concentration maximale de ^{137}Cs de 0.7 +/- 0.2 µBq/m^3 mesurée en février 2023, 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 Güttingen (valeur maximale de 1.1 +/- 0.3 µBq/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 2023. Ce radionucléide de courte demi-vie peut quant à lui être produit dans les accélérateurs de particules du PSI et n'a pas été décelé dans les filtres HVS de la station de référence de Güttingen. La concentration maximale mesurée en décembre s'élève à 140 ± 40 µBq/m^3; elle ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immission dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/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 généralement restées inférieures aux limites de détection, mise à part pour le ^{137}Cs où quelques valeurs légèrement supérieures à la limite de détection ont été enregistrées (valeur maximale de 0.9 +/- 0.6 mBq/l à Mühleberg en juin). La limite de détection pour un radionucléide donné dépend en particulier de la quantité de précipitations et s'est échelonnée, pour le ^{137}Cs, entre 0.2 et 2.0 mBq/l.

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. Les concentrations de tritium mesurées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires, du PSI et du ZWILAG sont généralement restées proches de la limite de détection de l'ordre de 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs légèrement plus élevées au voisinage du PSI, du ZWILAG et de Beznau (jusqu'à 32 Bq/l au voisinage du PSI).

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2023.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)
Niederruntingen * (environs KKM)	< 2.0 - 2.2	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 .0 - 2.3	-
Full (environs KKL) *	< 2 .0 - 3.0	-
Beznau (environs KKB) **	< 1.8 - 18.1	3.8
PSI **	< 1.8 - 32.0	3.5
ZWILAG **	< 2.2 - 16.1	-

* mesures OFSP / ** mesures PSI

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 2023 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 91 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt ainsi que de 253 pour mille au voisinage du PSI. Il s'agit d'une valeur significativement plus élevées que celles mesurées au cours des années précédentes.

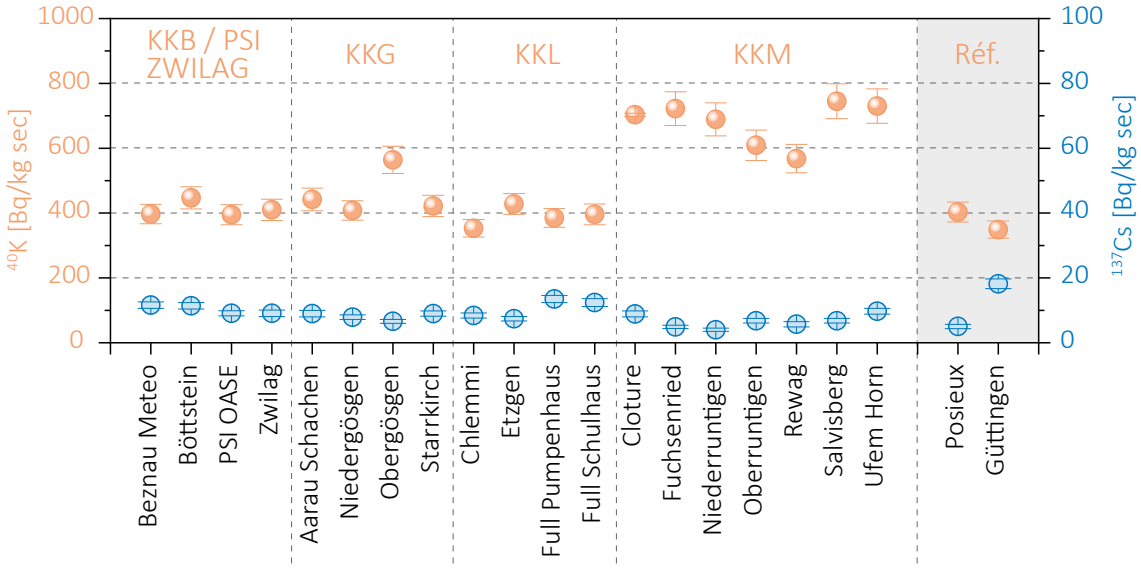


Figure 3:
^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2023 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

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 minimes.

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 2023 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 2023. Afin de caractériser les sites du point de vue des contributions individuelles à l'exposition externe du public, l'OFSP procède depuis les années 80 à des mesures par spectrométrie gamma in situ. Les résultats correspondants (voir chapitre 3.1) confirment les résultats précédents, à savoir qu'hormis à proximité immédiate (clôture) de ces installations, les valeurs enregistrées aux environs des installations nucléaires ne se distinguent pas de celles mesurées sur les sites de référence.

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 décelé 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 2023.

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.

A noter qu'en 2023, les rejets d'effluents radioactifs liquides (hors tritium) par la centrale nucléaire de Mühleberg ont été comparables à ceux des années 2017 - 2019, alors que la centrale était encore en exploitation. Elles sont restées inférieures à la valeur cible de 1 GBq/an. Les rejets de tritium dans les effluents liquides sont en revanche en diminution.

La figure 4 montre que de manière générale, les concentrations mensuelles en ^{3}H enregistrées en 2023 dans les eaux de l'Aar et du Rhin sont restées inférieures ou proches de la limite de détection de 2 Bq/l, à l'exception de la période février à mai. En plus des rejets plus importants de tritium effectués par la centrale nucléaire de Gösgen en avril et mai, comme chaque année, avant sa période de révision (voir chapitre 8.1), la centrale nucléaire de Beznau a également rejeté des quantités plus élevées de tritium dans l'Aar en février et mai. Les rejets de ces deux installations ont entrainé de légères augmentations des concentrations de tritium dans l'Aar ainsi que, dans une moindre mesure, dans le Rhin. Seuls les rejets de la centrale de Gösgen étant mesurables dans les eaux de l'Aar prélevés à Brugg, des concentrations plus élevées y ont été relevées essentiellement en avril et mai (jusqu'à 10.4 Bq/l en avril); la station de collecte d'échantillons d'eaux de l'Aar de Klingnau étant situé en aval de KKB, elle enregistre à la fois les rejets de la centrale de Gösgen (de manière diluée) et ceux de Beznau. Les concentrations ont d'abord augmenté en février (4.9 Bq/l, suite aux rejets de KKB), puis à nouveau de façon plus importante en avril-mai avec une concentration maximale de 7.2 Bq/l en avril, suite aux rejets de KKG. La concentration de tritium enregistrée dans cette station en mai était augmentée suite aux rejets combinés de KKG et KKB, avant de retrouver des niveaux inférieurs aux limites de détection en juillet. 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 maximale de tritium enregistrées à Weil am Rhein a ainsi atteint 3.9 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) dissouts dans l'eau, mais sont présents sous forme particulaire (corrosion) dans les effluents liquides. Des traces de ^{60}Co ont été mesurées dans un seul échantillon de sédiments prélevés en aval des centrales nucléaires (station de Pratteln), en 2023; de faibles activités de ^{54}Mn ont par contre été décelées plus régulièrement dans les sédiments prélevés aussi bien à Hagneck, Klingnau et Pratteln.

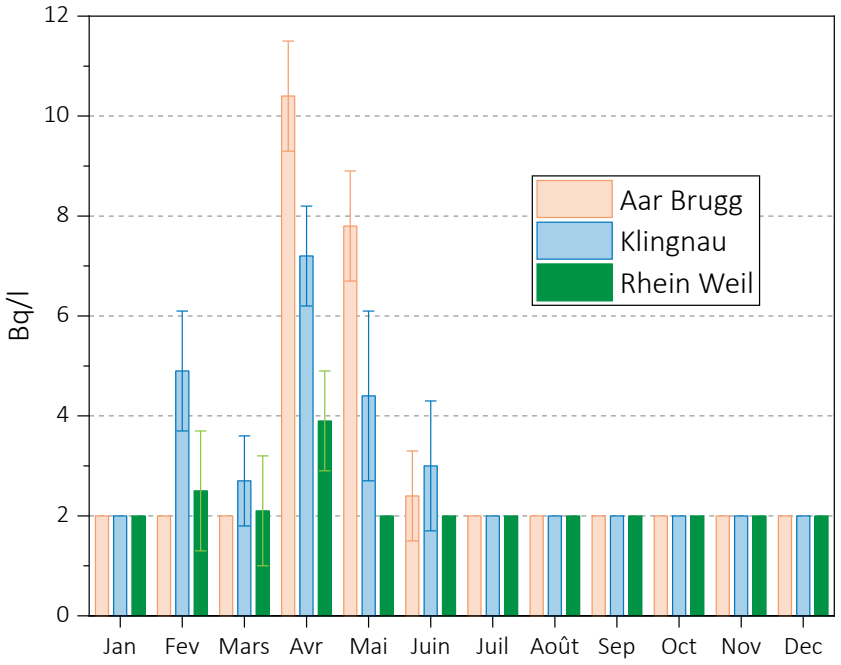


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et à klingnau/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2023.

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 en atmosphère.

Notons encore que les analyses des $^{239+240}$Pu et ^{241}Am effectuées par l'IRA dans les échantillons annuels de sédiments ont montré un rapport d'activité ^{241}Am/ $^{239+240}$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 2023 dans le canal d'Hagneck, dans le Lac de Bienne, dans l'Aar à Erlinsbach et Beznau, ainsi que dans le Rhin, près d'Augst, n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle. Aucune activité quantifiable au-dessus de la limite de détection n'a par ailleurs été mesurées pour $^{239+240}$Pu, mais l'américium est parfois mesurable, avec une activité proche de 1 mBq/kg. Ce très faible niveau d'activité ne peut être décelé que si la masse disponible pour l'analyse est suffisante.

Comme chaque année, des échantillons de plantes aquatiques ont également été prélevés en 2023 dans l'Aar, en amont de la station de Hagneck, à Küttigen, en amont du barrage de Klingnau et dans le Rhin à Möhlin. Les activités de tous les radionucléides gamma d'origine artificielle, à l'exception du ^{137}Cs (1.79 - 3.23 Bq/kg) sont restées inférieures aux limites de détection. 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 (^{3}H) 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 caverne des machines.

En 2023, 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 2023. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co, ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 0.5 Bq/l.

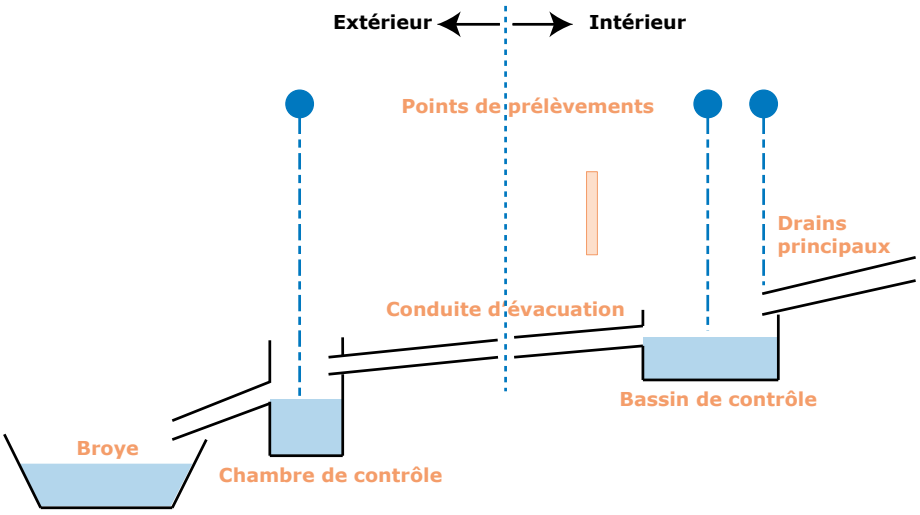


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^{3}H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2023 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 3.2 ± 0.7 Bq/l et 3.0 ± 0.7 Bq/l respectivement. Mis à part le phénomène de résurgence 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 10 mBq/l n'a été mise en évidence en 2023.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2023.

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 tous les 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 ou encore du ^{3}H et des produits d'activation (^{60}Co, ^{54}Mn), issus des effluents liquides, dans les eaux, resp. les sédiments, de l'Aar et du Rhin témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations pendant l'année sous revue.

Même si des 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 pour répondre aux différents objectifs à la fois 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 2023, comme pour les années précédentes, les résultats du programme de surveillance du CERN et les calculs de dose pour les groupes de référence 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 0.005 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 d'une nappe phréatique 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

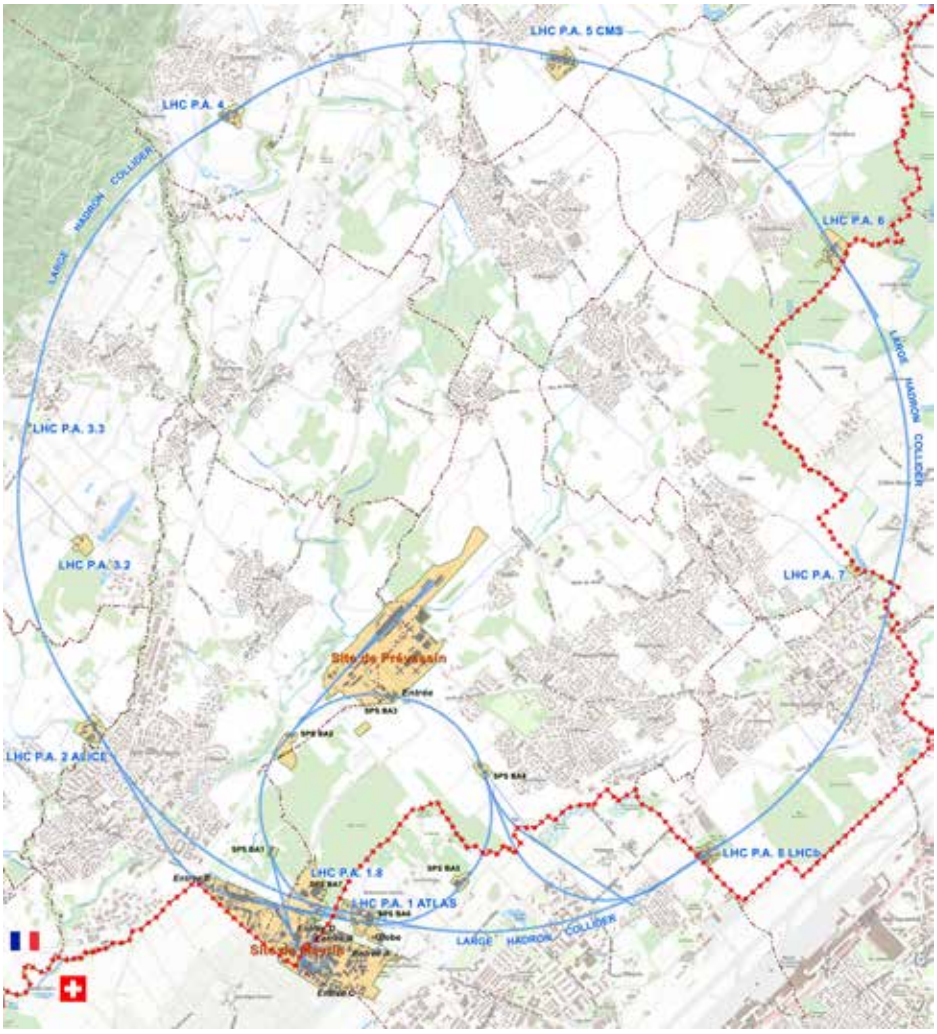


Figure 1:
Implantation des sites du CERN.

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 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 récurent, 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 composants des tunnels, des machines, des cibles et des détecteurs sont sensiblement marqués 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 composants précités. 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).

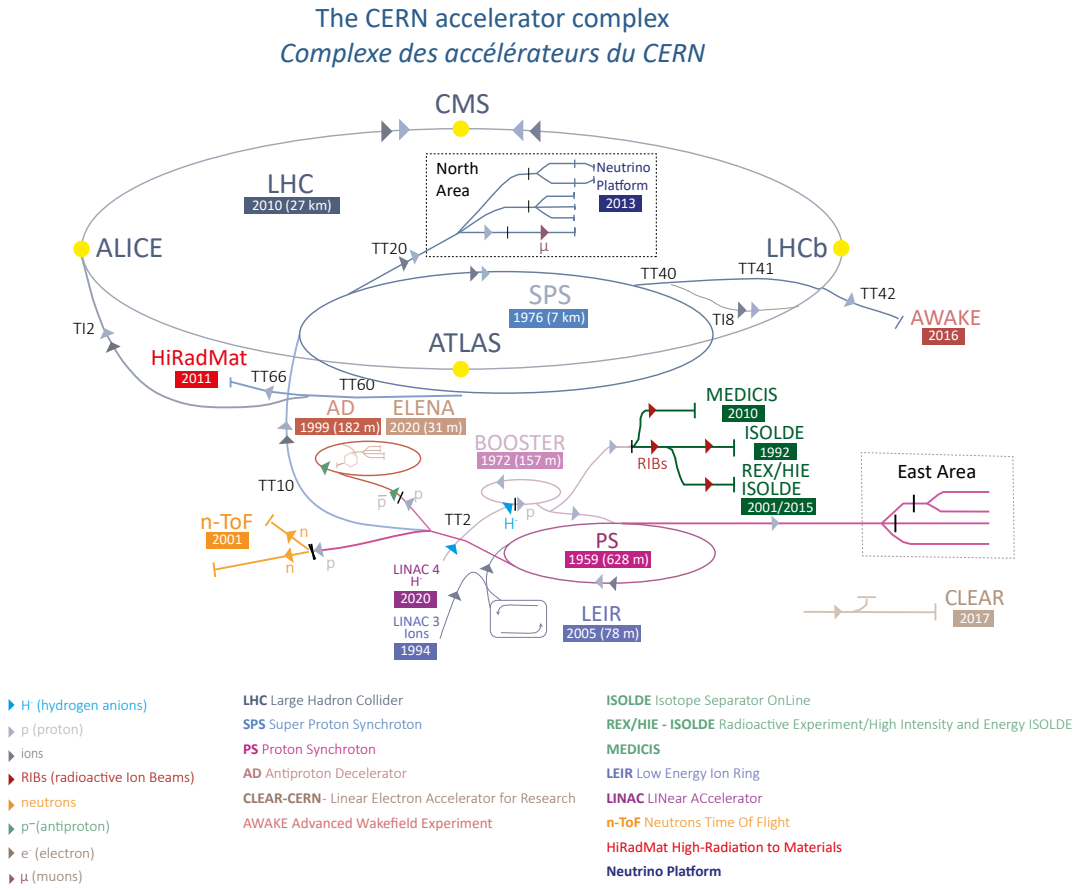


Figure 2:
Le complexe des accélérateurs du CERN.

Evolution du rapport

Contrairement aux années précédentes, le présent rapport inclut également les résultats du programme de surveillance des sites et des cours d'eau situés en France voisine. Cette extension fait suite à l'homologation en 2023 des méthodes d'évaluation de l'impact du CERN, obtenue dans le cadre d'accords tripartites relatifs à la radioprotection et à la sûreté, conclus entre la France, la Suisse et le CERN [2]. L'homologation a ainsi validé l'approche d'un traitement uniforme des installations, sans distinction de leur localisation frontalière.

Programme de surveillance

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnementale, 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 prédits par des calculs. Chaque 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 2023, 36 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 2023, 41 stations étaient en opération. De manière similaire, les points de rejet des eaux claires qui sont déversées dans les eaux de surfaces (rivières) sont équipés de stations de surveillance de l'eau (15 stations en 2023); 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 en laboratoire. Deux stations contrôlent indépendamment les eaux de refroidissement et d'infiltration du SPS et du LHC.

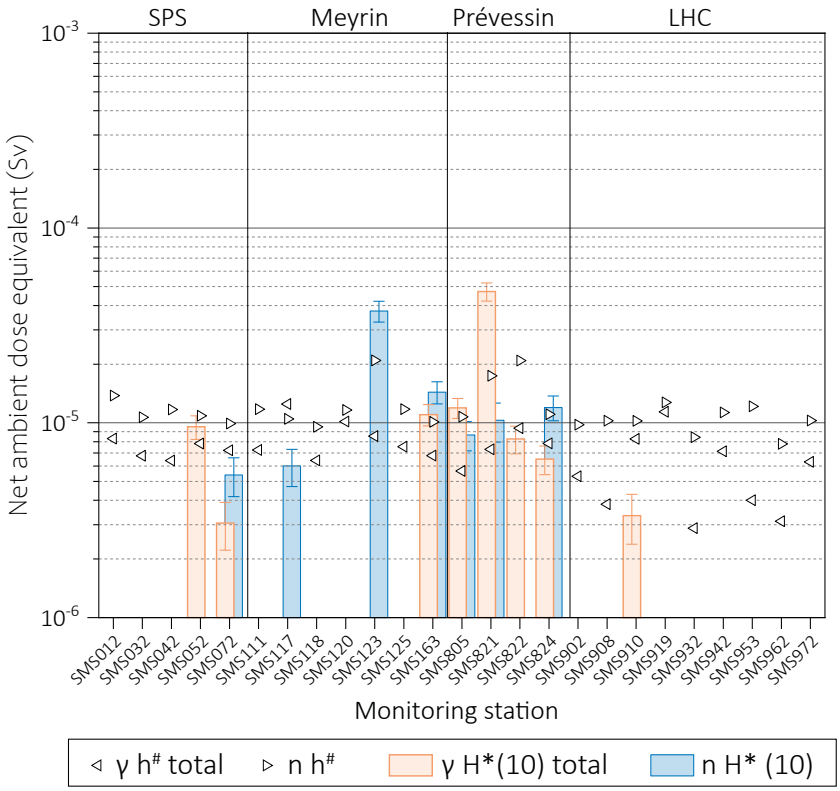


Figure 3:
Equivalents de dose ambiants nets gamma (γ) total et neutron (n) enregistrées par les moniteurs de rayonnement diffusé situés en clôtures (CERN, 2023). Les limites de détection h#, représentées par des triangles horizontaux, supposent une probabilité inférieure à 0.001 d'une décision incorrecte affirmant que l'équivalent de dose ambiante 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 dose efficace reçue par les membres du public a été calculée à partir des équivalents de dose ambiants mesurés aux barrières du site [3]. 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 [4, 5], basés sur les directives [6, 7]. Les modèles utilisés par le CERN, approuvés par les autorités, ne diffèrent que peu de ceux proposés par les directives, tandis qu'ils prennent en compte les spécificités de ses installations.

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 corréler 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 (23 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 2023

Après la période d'arrêt technique et à partir de février 2023, le CERN a graduellement redémarré l'opération de toutes ses installations.

Malheureusement, à cause d'une fuite d'hélium vers le vide d'isolation de quelques aimants, l'opération du LHC a dû être arrêtée à partir de mi-juillet pour une période d'environ deux mois. Une fois redémarré et jusqu'à fin octobre, le LHC a effectué des collisions d'ions lourds.

En réponse à la crise énergétique européenne et en signe de responsabilité sociale, le CERN a pris la décision volontaire d'avancer l'arrêt technique de ses installations à la mi-novembre, réduisant ainsi l'opération de ses installations d'environ 20%. Cette mesure proactive s'inscrit dans le cadre des efforts du CERN pour contribuer aux mesures d'économie d'énergie en Europe.

Tableau 1: Rejets dans l'air en 2023. 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				
		Gas de demie-vies courtes	^{7}Be	β total	^{3}H	Iode
Meyrin		**4.3E+13**	**6.4E+07**	**3.4E+06**	**3.8E+10**	**4.9E+08**
Meyrin site						
	PS-SPS TT10	9.4E+11	3.2E+06	1.2E+05	2.5E+09	< LD
	Water Evaporators	< LD	< LD	< LD	6.7E+09	< LD
	MEDICIS	5.0E+10	< LD	4.2E+03	9.8E+09	4.5E+06
	ISOLDE	1.6E+13	< LD	1.6E+06	5.1E+09	4.8E+08
	n-TOF	4.2E+12	4.4E+05	1.3E+04	2.6E+09	1.1E+06
	PS-SPS TT60	4.9E+09	5.7E+04	3.1E+03	3.1E+08	< LD
	BOOSTER	1.7E+11	2.0E+07	4.6E+05	7.2E+08	< LD
	PS STACK 1/4	4.5E+11	< LD	< LD	7.8E+08	< LD
	PS STACK 2/4	2.8E+11	< LD	< LD	1.1E+09	< LD
	PS STACK 3/4	2.4E+11	< LD	< LD	8.6E+08	< LD
	PS STACK 4/4	9.8E+10	< LD	< LD	7.1E+08	< LD
	EA IRRAD/CHARM	3.9E+12	4.0E+07	1.2E+06	1.0E+08	< LD
	AD TARGET AREA	9.7E+12	< LD	5.5E+03	4.2E+08	< LD
	EA PRIMARY AREA	8.6E+11	< LD	< LD	1.7E+08	< LD
SPS BA5						
	SPS RING SECTORS 4-5/6-5	4.2E+12	< LD	1.0E+04	2.1E+09	< LD
SPS BA7						
	HIRADMAT	< LD	< LD	1.6E+02	4.2E+09	< LD
	SPS-LHC TI2	4.1E+10	< LD	< LD	< LD	< LD
LHC PA1						
	LHC MACHINE SECTORS 8-1/2-1	2.3E+12	< LD	< LD	1.2E+08	< LD
	LHC ATLAS STACK 3/4	1.5E+08	< LD	< LD	< LD	< LD
	LHC ATLAS STACK 4/4	2.3E+09	< LD	< LD	< LD	< LD
Prévessin		**6.3E+12**	**1.1E+07**	**1.8E+06**	**2.9E+10**	**< LD**
	SPS RING SECTORS 2-3/4-3	1.4E+10	3.9E+05	5.1E+03	3.8E+09	< LD
	SPS-NA TT20	6.3E+12	5.5E+06	3.0E+05	1.9E+09	< LD
	NA TCC2/TDC2	3.1E+09	5.2E+06	1.5E+06	2.2E+10	< LD
	NA TCC8	2.1E+10	4.3E+04	2.3E+03	4.7E+08	< LD
	NA ECN3	1.0E+10	< LD	< LD	< LD	< LD
SPS BA4		< LD	< LD	< LD	**9.00E+09**	< LD
	AWAKE	< LD	< LD	< LD	8.3E+09	< LD
	SPS-LHC TI8	< LD	< LD	< LD	6.8E+08	< LD
LHC PA3	LHC MACHINE SECTORS 2-3/4-3	5.0E+10	< LD	< LD	< LD	< LD
LHC PA5		**1.6E+12**	**1.0E+05**	**1.6E+04**	**7.8E+08**	**< LD**
	LHC MACHINE SECTORS 4-5/6-5	1.6E+12	1.0E+05	1.6E+04	7.8E+08	< LD
	LHC CMS STACK 3/3	1.6E+08	< LD	< LD	< LD	< LD
LHC PA7	LHC MACHINE SECTORS 6-7/8-7	**1.1E+12**	**2.4E+06**	**< LD**	**6.7E+08**	**< LD**

Rayonnement diffusé

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. Une petite fraction des neutrons produits par ces installations diffuse à travers les blindages, monte en altitude et interagit 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 du débit d'équivalent de dose ambiant en clôtures.

Les doses 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 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.

La Figure 3 présente les équivalents de dose ambient nets intégrés à l'année par les moniteurs de rayonnement diffusé localisés aux barrières des sites.

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 totale (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.

Tableau 2:

Rejets dans les cours d'eau en 2023 (aucun ^{22}Na détecté).

Cours d'eau récepteur	Rejets (Bq)		
	^{11}C	^{24}Na	^{3}H
Nant d'Avril	1.4E+10	< LD	3.9E+09
Lion	< LD	8.1E+07	1.5E+10
Nant de la Rebatière	< LD	< LD	3.0E+07
Marquet	< LD	< LD	3.3E+07
Nant	< LD	< LD	8.2E+08

Réseau d'eaux usées	Rejets (Bq)		
	^{11}C	^{24}Na	^{3}H
Site de Prévessin	n.m	n.m	2.7E+07

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 : (a) le tritium sous forme aqueuse (HTO), (b) le ^{22}Na, (c) les rejets d'émetteurs de positrons de demi-vie courte (^{11}C, ^{13}N, $^{14,\ 15}$O) et (d) le ^{24}Na d'une demi-vie de 15 heures. Le Tableau 2 présente les rejets de 2023, 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'eaux usées. Les traces de tritium mesurées proviennent des diffusions à travers les échangeurs de chaleur.

Tableau 3:

Concentrations maximales mesurées dans l'air sur le site de Meyrin (immissions). Le terme gaz fait référence aux formes physicochimiques de l'iode qui ne sont pas piégées sur les filtres en fibre de verre. Seules les stations EAS123, EAS163 et EAS164 sont équipées de filtres à charbon actif. Les stations EAS123 et EAS163 sont également équipées de piégeurs passifs de tritium. L'iode gazeux et la vapeur d'eau tritiée ne sont pas échantillonnés (n. e.) aux autres stations. La fraction de la limite d'immission est donnée à titre indicatif et est surévaluée, car, pour chaque radioisotope, les concentrations maximales ont été mesurées à une période donnée, mais sont considérées comme ayant été représentative de toute l'année.

Monitoring station	^{3}H (Bq·m^{-3})	^{125}I gas (Bq·m^{-3})	^{126}I gas (Bq·m^{-3})	^{131}I gas (Bq·m^{-3})	% Li
EAS123	$(6.2 \pm 1.8) \times 10^{-2}$	< DL	$(2.3 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	$(5.4 \pm 1.6) \times 10^{-4}$	0.12 %
EAS163	$(4.7 \pm 2.2) \times 10^{-2}$	$(8.1 \pm 6.0) \times 10^{-5}$	$(2.3 \pm 1.0) \times 10^{-4}$	$(1.3 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	0.24 %
EAS164	n. e.	< DL	< DL	$(1.2 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	0.02 %

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^{-1})	% Li	Code échantillon bryophyte	^{54}Mn (Bq·kg^{-1} masse sèche)
Lion (F)	15.09.2023	RWLI5	7 ± 1	0.04 %	RMLI5	13 ± 3
Lion (F)	15.09.2023	RWLI7	3 ± 1	0.02 %		
Marquet (Affluent, F)	15.09.2023	RWMA2	4 ± 1	0.03 %		

Surveillance des immissions

Les rejets atmosphériques des installations du site de Meyrin ont conduit aux concentrations locales maximales présentées dans le Tableau 3. 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 du Lion (F), de l'Allondon (F/CH) et du Nant(F) (Tableau 4). Pour le Lion, les radioéléments proviennent de la Zone Nord de Prévessin. Le marquage dans le Lion provient des rejets de l'eau industrielle des installations de la Zone Nord (infiltrations). Comme pour les années précédentes, les quantités de ^{54}Mn rejetées dans le Lion sont si faibles qu'elles ne sont pas mesurables au point de rejet. Ce radioélément s'accumule néanmoins dans les bryophytes (les mousses aquatiques) qui agissent comme bioaccumulateurs. Les bryophytes en question (RMLI5) sont prélevées à quelques dizaines de mètres du point de rejet. Les traces de tritium mesurées dans l'affluent du Marquet proviennent des faibles volumes d'eau provenant de la condensation et des infiltrations dans le tunnel du LHC, qui se situe dans la molasse imperméable.

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 sodium-22 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. L'eau prélevée au niveau d'un point localisé hors site, en aval des points mentionnés dans le Tableau 5, n'a pour sa part jamais contenu de traces mesurables de radioéléments (GWPI09).

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.

Tableau 5:

Concentrations mesurées dans une nappe phréatique profonde s'écoulant sous certaines installations de la Zone Nord du site de Prévessin. L'eau s'écoule dans des graviers 40 m sous le site du CERN et n'est pas accessible au public. Conséquemment, une comparaison directe avec la limite d'immission est une approche conservatrice.

Code	Date échantillonnage	^{3}H (Bq·L^{-1})	^{22}Na (Bq·L^{-1})	% Li
GWPI05	25.05.2023	19 ± 2	< DL	0.1%
GWPI07	25.05.2023	31 ± 2	0.6 ± 0.2	1.1%

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du public a été calculée à partir des équivalents de dose ambiants mesurés aux barrières des sites [3] et des activités rejetées dans l'air et dans l'eau, en utilisant des modèles [4, 5] basés sur les directives [6, 7]. La dose efficace était au maximum de 0.005 mSv, pour des membres du public travaillant à proximité immédiate des clôtures du site de Meyrin du CERN.

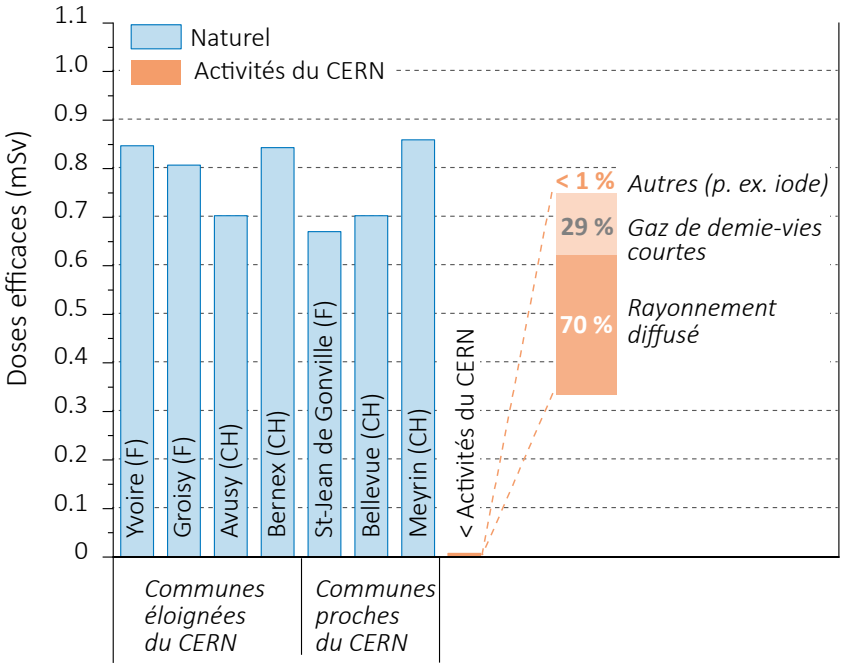


Figure 4:
Contribution à la dose annuelle des activités du CERN, comparée aux variations des doses naturelles induites par le rayonnement externe, dans des communes françaises et suisses.

Conclusions

- Les résultats du programme de surveillance effectué par le CERN, combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, pour l'année 2023 et à comme pour les années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur limite de 0.3 mSv/a 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 0.005 mSv avec la dose efficace annuelle mesurée en plusieurs localités proches et éloignées des sites CERN. Les fractions présentées, avec 70 % de contribution à la dose par le rayonnement diffusé, sont uniquement valides pour les membres du public les plus exposés. Pour les membres du public moins exposés, ces fractions peuvent varier.

Références

[1] Code de Sécurité F Rev., Radioprotection CERN (2006) EDMS# 335729

[2] 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).

[3] Evaluation of doses from stray radiation in the environment of CERN (2022) EDMS# 2386315

[4] Models for assessing the dosimetric impact of releases of radioactive substances from CERN facilities to the environment – Air (2022) EDMS# 2010420

[5] Models for assessing the dosimetric impact of releases of radioactive substances from CERN facilities to the environment- Watercourses (2022) EDMS# 2010454

[6] 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).

[7] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).

[8] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (version 2022), Annexe 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 2023 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 (12 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}H dans le vin).

On notera qu'après la période d'arrêt technique et à partir de février 2023, le CERN a graduellement redémarré l'opération de toutes ses installations. Le LHC a dû être arrêté à partir de mi-juillet pour une période d'environ deux mois et l'arrêt technique de 2023 a débuté à la mi-novembre 2023.

Mesures de l'exposition ambiante

Douze sites ont été surveillés en 2023 par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP. Cinq d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français) et 6 sur le parcours du LHC et 1 site de référence situé dans un voisinage plus éloigné. 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. Au premier trimestre 2023, les doses des neutrons étaient, en tous les points, inférieures à la limite de détection et les doses des photons sont restées faibles, de l'ordre de l'irradiation naturelle (soit environ 0.2 mSv par trimestre). Ceci était attendu puisque les installations du CERN étaient à l'arrêt.

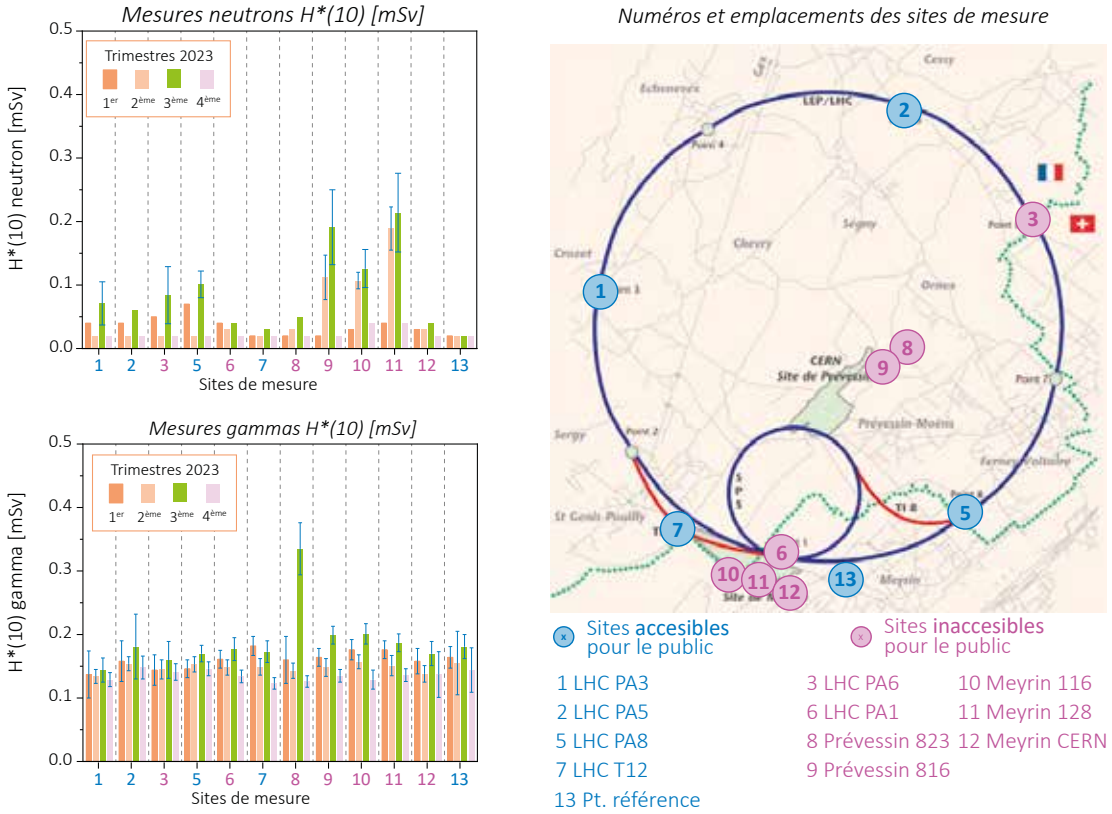


Figure 1:
Relevé trimestriel de l'équivalent de dose ambiant H(10) en mSv sur différents sites de mesure au CERN pour les neutrons et les gammas en 2023.*

Au 2ème, mais surtout au 3ème trimestre, des doses neutrons mesurables ont été relevées en de nombreux points, comme près du synchrotron à protons à Meyrin (valeurs comprises entre 0.1 et 0.21 mSv par trimestre pour les points 10 et 11) ainsi qu'au point 9 à Prévessin (0.19 mSv par trimestre). Pour ce site, la dose était nettement inférieure à celle mesurée en 2022. Les valeurs de dose pour les neutrons mesurées en 2023 à proximité du synchrotron à protons sont similaires à celles enregistrées les années précédentes. Les doses des photons enregistrées pendant les 2ème et 3ème trimestres correspondent presque partout à l'irradiation naturelle.

Au 4ème trimestre, toutes les doses neutrons étaient à nouveau inférieures à la limite de détection de l'ordre de 0.02 à 0.04 mSv par trimestre, et toutes les doses photons correspondaient à l'irradiation naturelle du fait que les installations étaient à nouveau à l'arrêt depuis le mois de novembre.

Les résultats des mesures des équivalents de dose ambiants des neutrons et des photons effectuées par l'IRA en 2023 n'ont donc mis en évidence aucune valeur inhabituelle.

Notons encore que depuis le 4ème trimestre 2023, le point no 5 n'est plus situé dans un endroit accessible au public. Le périmètre du CERN a été étendu et il est situé à un mètre environ à l'intérieur de la clôture. On peut cependant considérer que ce point est toujours représentatif d'une zone où le public peut se trouver.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 2) en septembre 2023, 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 81 et 109 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 89.4 ± 1.1 nSv/h; moyenne des sites distants 94 ± 9 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 2023. 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

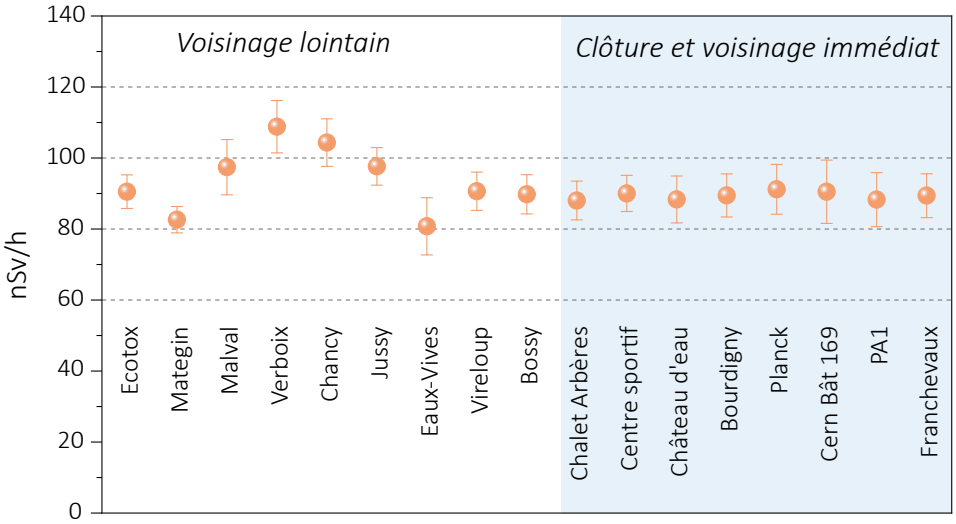


Figure 2:
Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectuées par l'OFSP en 2023 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1m au-dessus du sol.*

inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 3 à 5 mBq/m^3 pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2023. Le moniteur d'iode également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l'^{131}I gazeux n'a révélé aucune valeur supérieure à la limite de détection de l'ordre de 50 mBq/m^3.

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 ^{7}Be et ^{210}Pb (fig. 3). Le cas du ^{7}Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production/émissions par les installations du CERN, en particulier le PS Booster, voir Chap. 8.6).

Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ^{7}Be mesurées en 2023 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Tableau 1 :
Concentrations du ^{7}Be mesurées en 2023 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 - 7.4	3.3 ± 1.5
Posieux/FR	1.3 - 8.5	3.6 ± 1.7
Klingnau/AG	1.1 - 7.5	3.3 ± 1.5
Güttingen/TG	1.0 - 6.4	3.3 ± 1.5
Cadenazzo/TI	1.2 - 7.2	3.6 ± 1.4

Des traces de ^{22}Na, également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre < 0.2 et 1.2 µBq/m^3).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs (valeur maximale de 0.6 ± 0.2 µBq/m^3 en février) provenant des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont été détectées à plusieurs reprises, comme partout en Suisse. La remise en suspension dans l'air des particules de sol qui contiennent le ^{137}Cs est plus importante par temps sec, raison pour laquelle les concentrations hivernales sont souvent plus élevées.

De faibles concentrations d'isotopes d'iode (^{126}I et plus fréquemment d' ^{131}I: 0.6 à 16.5 µBq/m^3) ainsi que quelques traces de ^{24}Na (31 - 96 µBq/m^3) ont également été décelées dans les filtres aérosols en 2023.

Ces radioisotopes de courte demi-vie (15h pour le ^{24}Na, 8 jours pour le ^{131}I et 13 jours pour le ^{126}I) 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; sinon c'est essentiellement l'^{131}I qui est détecté. Même si la concentration d'^{131}I mesurée sur les filtres aérosols ne représente qu'une fraction de la concentration totale d'^{131}I 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

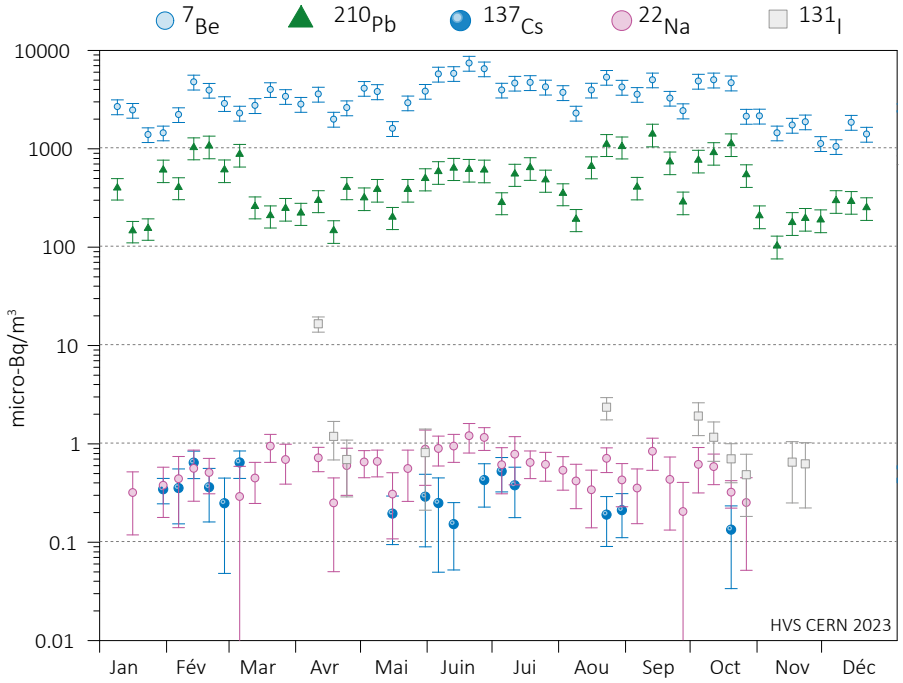


Figure 3 :
Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2023.

faible. En effet, sur la base des mesures effectuées par le CERN, la concentration d'^{131}I gazeux peut être estimée à environ 50 à 100 fois celle de l'^{131}I particulaire (valeur maximale enregistrée par le CERN de l'ordre de 1 mBq/m^3 pour ^{131}I gazeux); la concentration totale maximale d'^{131}I dans l'air était donc d'environ 0.1% 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 de l'ordre du milli-Becquerel (limite de détection de l'ordre de 50 mBq/m^3); ces moniteurs sont en effet avant tout 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.

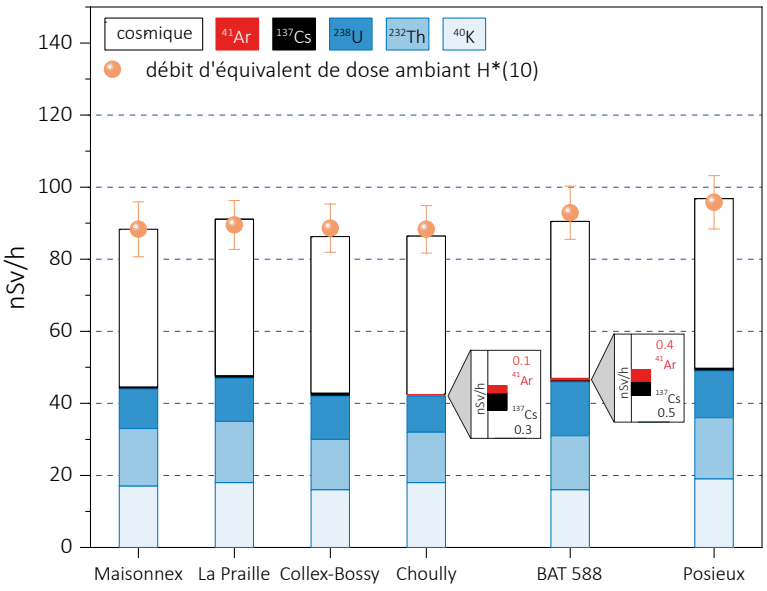


Figure 4 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2023. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre 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 dans 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). Toutefois, les spectres enregistrés au point de mesure situé à l'intérieur de la clôture du centre de recherche (BAT 588) ainsi qu'à Choully s'en distinguent légèrement. En effet, 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 pu être enregistrées dans l'air sur ces deux sites. La contribution supplémentaire à l'exposition ambiante due à ce radionucléide est minime (0.1 nSv/h à Choully et 0.4 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 radionucléides 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

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle mesurable en 2023. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

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 23 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 23 novembre 2022 et le 20 novembre 2023, avec un temps d'intégration de 14.7 ± 2.6 jours par échantillon. A noter que certaines périodes (23.11.- 08.12.22, 09.04.- 18.04.23, 02.07- 05.07.23, 24.08 - 19.09.23, 11.11 - 20.11.23) ne sont pas couvertes à la suite de pannes de l'échantillonneur et une crue exceptionnelle en novembre 2023.

Les échantillons d'eau sont acidifiés pour éviter toute 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 existant dans la rivière.

Dans les échantillons d'eau brute, outre les radioisotopes géogènes, le ^{7}Be 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 0.24 Bq/l. Les plus fortes activités spécifiques de ^{7}Be (0.64 ± 0.13 Bq/l) ont été mesurées en avril et en juillet 2023. Le ^{22}Na n'a été détecté dans aucun échantillon au cours de l'année sous revue.

Le ^{137}Cs, 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 de 0.005 ± 0.001 Bq/l.

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 m^3/période) par l'activité spécifique du radionucléide.

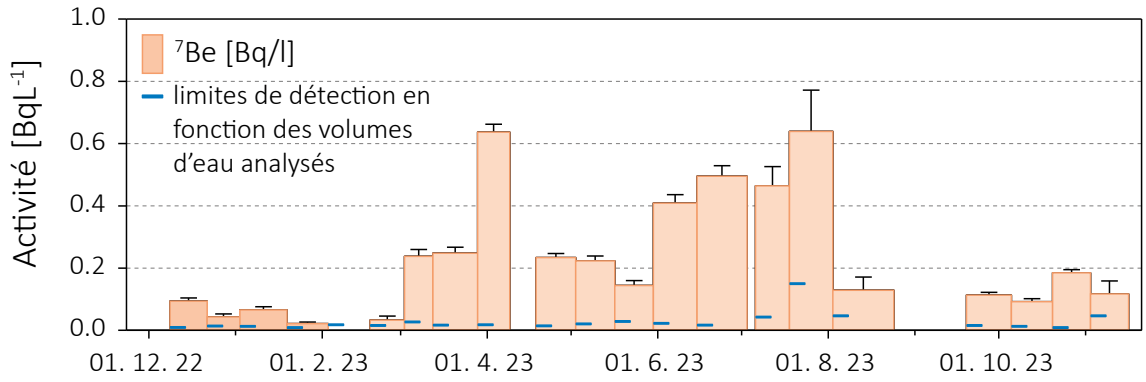


Figure 5 :
Activité du ^{7}Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'avril entre novembre 2022 et novembre 2023.

Le flux de ^{7}Be s'écoulant dans le Nant d'Avril au point de mesure pour la période 2022- 2023 peut ainsi être estimé à 1'674 MBq/an au minimum et 2'146 MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent dans la moyenne des années précédentes (figure 6). Un test de Mann-Kendall montre qu'il n'y a pas d'évolution temporelle significative (p-value > 0.05) des flux de ^{7}Be au cours des 24 dernières années.

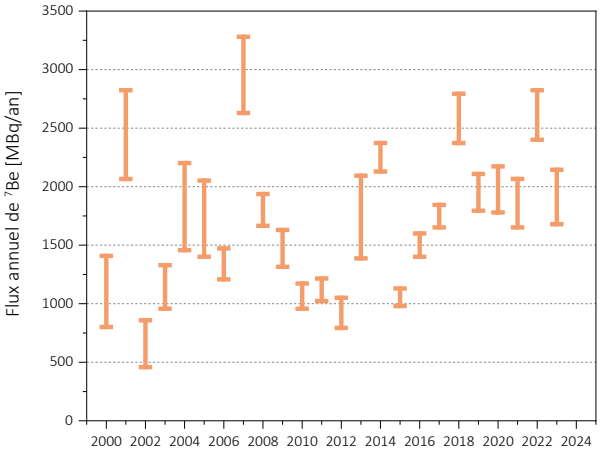


Figure 6 :
Estimation des flux annuels minimums et maximums de ^{7}Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^{7}Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons avec des activités spécifiques variant respectivement entre 289 et 1'835 Bq/kg (moyenne de 985 Bq/kg), et entre 4.1 et 7.3 Bq/kg. Ces résultats se situent dans la moyenne des valeurs mesurées les années précédentes.

Aucun autre radioisotope mesuré par le passé (^{60}Co, ^{57}Co, ^{54}Mn) n'a été détecté dans les sédiments au cours de la période de mesure.

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 21 septembre au 25 octobre 2023. Des bryophytes de l'espèce Rhynchostegium riparioides ont été prélevées entre le 19 septembre et le 25 octobre 2023. En raison de l'absence de bryophytes sur le point PA8, aucune mesure n'a pu être effectuée pour ce type d'échantillon sur ce site en 2023. Notons que le LHC a redémarré à pleine puissance au printemps 2023 pour le Run 3 et était en activité pendant la période des prélèvements.

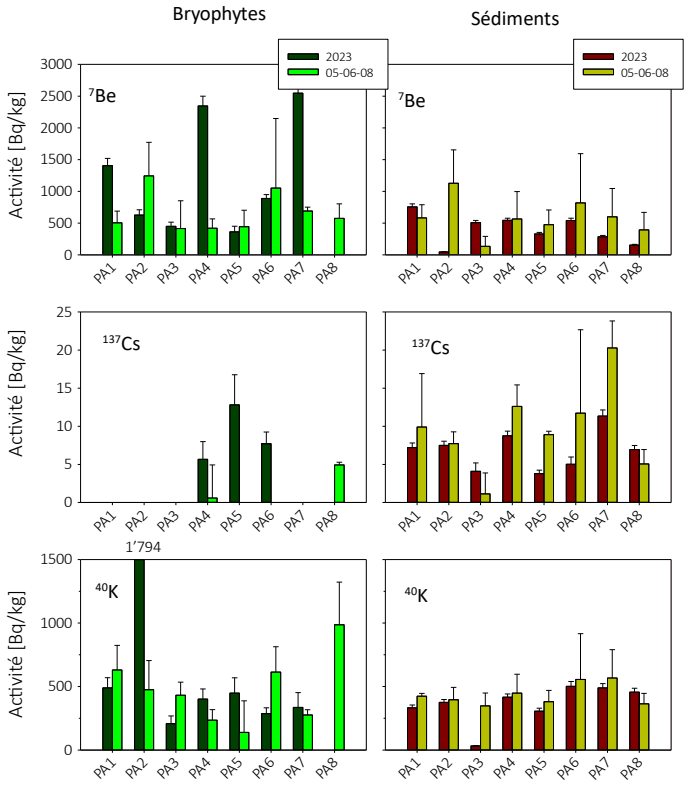


Figure 7 :
Activités des radioisotopes dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8, voir figure 2). Les valeurs 05-06-08 correspondent aux moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008, avant la mise en service du LHC. Il n'y avait pas de bryophytes au point PA8 en 2023.

Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux points de rejet du LHC se sont échelonnées entre 45.8 et 758 Bq/kg pour le ^{7}Be et entre 3.8 et 11.4 Bq/kg pour le ^{137}Cs. La faible activité en ^{7}Be observée au point PA2 (45.8 Bq/kg) est probablement due au fait que l'échantillon a été prélevé sur le lit de la rivière (et non par le piège à sédiment) et reflète ainsi un âge moyen des sédiments plus vieux (le ^{7}Be a eu le temps de décroître) que les particules en suspension habituellement collectées.

Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^{7}Be variant entre 363 et 2'537 Bq/kg; trois échantillons de bryophytes ont présenté une activité en ^{137}Cs supérieure à la limite de détection, la valeur maximale s'élevant à 12.8 Bq/kg.

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 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 2023.

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 2023, 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*

- *Emissionen der Betriebe*
- *Emissionen der Spitäler*
- *Überwachung in der Umgebung von Industrien*
- *Radionuklide in Kläranlagen*
- *Aktionsplan Radium*

2023

9.1
Emissionen der Betriebe

Flavia Danini Fischer
Suva, Abteilung Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz,
Bereich Chemie, Physik & Ergonomie/Strahlenschutz, Luzern

Zusammenfassung

Der Einkauf 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 ^{3}H 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 (^{3}H, ^{14}C)
- Kalibrierquellen (^{90}Sr, ^{147}Pm, ^{204}Tl).
- Tritiumgaslichtquellen (^{3}H)

Tabelle 1 :
Einkauf radioaktiver Stoffe 2013 - 2023.

	Isotope	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	Einheit
Produktionsbetriebe	^{3}H	3.44	10.3	12.3	12.11	11.26	12.75	7.31	10.54	5.74	4.07	7.53	PBq
	^{14}C	0	0.37	0.19	0.26	0.26	0	0	0.07	0	0.74	0.58	TBq
	^{147}Pm	0.05	0.01	0	0.07	0	0	0	0	0	0	13.03	TBq
Forschungsbetriebe	^{3}H	0.20	7.6	0.1	7.4	0.2	7.6	7.6	3.8	7.6	0.2	11.4	TBq
	^{14}C	18.9	31.7	10.4	51.1	35.4	21.3	17.1	41.3	53.9	158.9	76.0	GBq
	^{32}P	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.9	0.5	0.9	0.9	1.4	GBq
	^{35}S	0	0	0.2	0	0	0	1.4	1.4	2.4	2.4	3.7	GBq
	^{51}Cr	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.1	0	0	GBq
	^{125}I	0.1	0.2	0.1	0	0.2	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	14.1	GBq
Analytische Laboratorien	^{125}I	0.26	0.06	0.05	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	GBq

Forschungsbetriebe (Total 29 Betriebe)

Es sind dies Unternehmungen der chemischen Industrie, die unter anderem Stoffwechseluntersuchungen mit radioaktiv markierten Stoffen durchführen.

Medizinisch analytische Laboratorien (Total 3 Betriebe)

Für Hormonbestimmungen werden sogenannte Radioimmunoassay Kits (Ria-Kits) mit ^{125}I eingesetzt.

In Tabelle 1 sind bei der Sparte der Produktionsbetriebe auch die für den Handel eingekauften radioaktiven Stoffe aufgeführt (^{147}Pm).

Resultate

Im Berichtsjahr 2023 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 erhörten Jahresumsatz von Tritium zu erklären. 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 2023 (GBq).

	Abgaben an die Abluft (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	^{3}H	^{14}C	^{3}H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	62.5 (org.) 0 (Gas)	2.9	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 2023 (GBq).

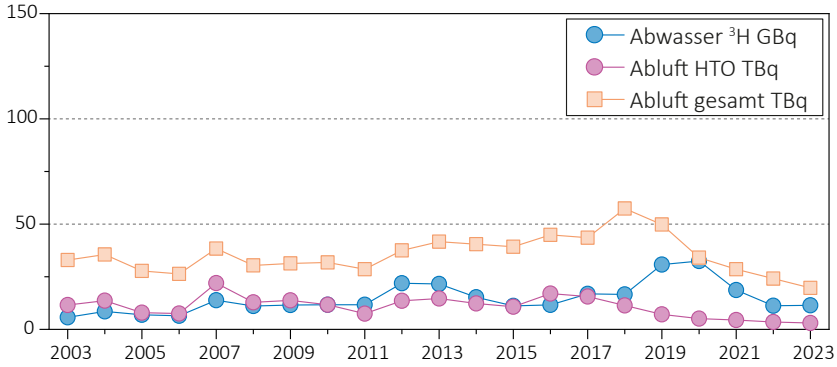
	Abgaben an das Abwasser (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	^{3}H	^{14}C	^{3}H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	5.42	0.12	80	40
Novartis Pharma AG	0.37	0.02	300	30

Tabelle 3 :
Verbrennung in einem Ofen mit Zustimmung des BAG gemäss StSV, Art. 116 während des Jahres 2023 (GBq).

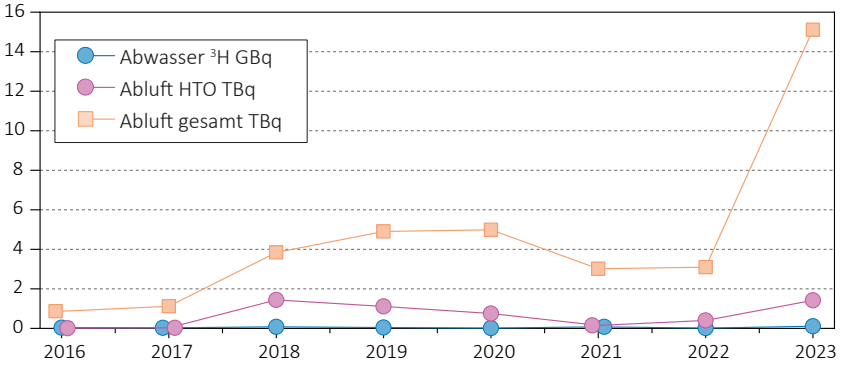
	^{3}H (GBq)	^{14}C (GBq)
Veolia Basel	478.16	108.68
KVA St. Gallen	499.56	0
ES Dottikon	0.37	1.59
Energie Wasser Bern	3.40	0.01
Renergia Perlen	0	0
ZAB Bazenheid	309.81	0

Tabelle 4 :
Jahresabgabelimiten der Produktionsbetriebe.

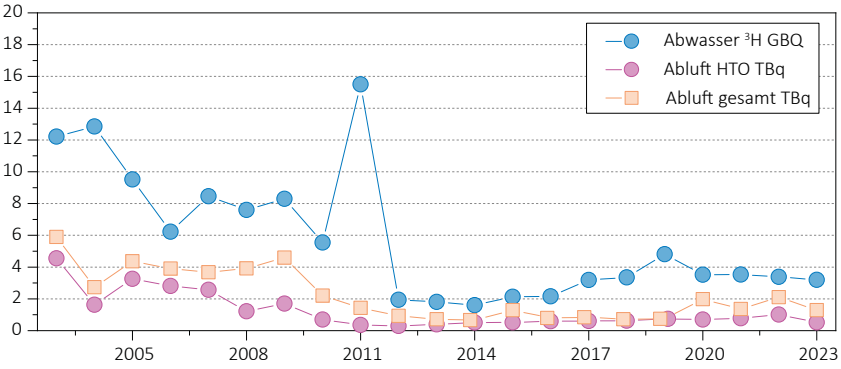
	Abwasser	Abluft	
	^{3}H	^{3}H (HT)	^{3}H (HTO)
MB-Microtec AG, Niederwangen / BE	40 GBq	370 TBq	37 TBq
Smolsys AG, Root / LU	1.3 GBq	40 TBq	4 TBq
RC-Tritec AG, Teufen / AR	20 GBq	7.5 TBq	7.5 TBq



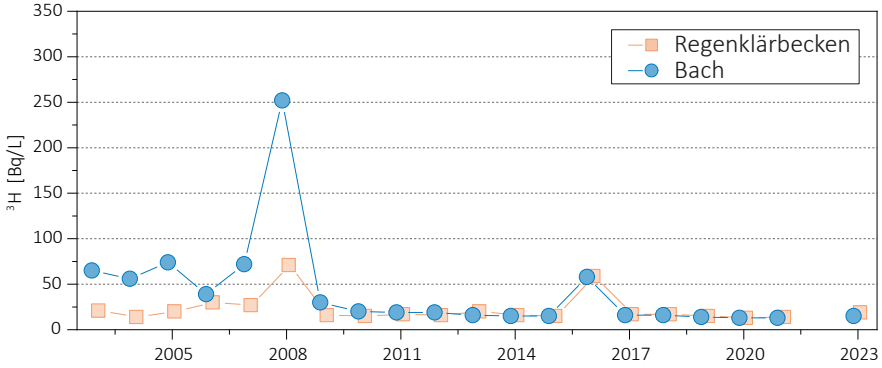
Figur 1a :
Mb-microtec AG, Niederwangen/BE: Jahreswerte der Emissionen. Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



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. Strittt, R. Stroude
Sektion Forschungsanlagen und Nuklearmedizin, BAG, Bern

Zusammenfassung

Die therapeutischen Anwendungen von ^{177}Lu, ^{90}Y und ^{131}I haben im Berichtsjahr 2023 gegenüber dem Vorjahr leicht zugenommen, während bei ^{223}Ra und ^{166}Ho geringere Aktivitäten zu verzeichnen sind. Die Abgabe von Radionukliden an die Umwelt aus der stationären Behandlung von Patienten mit ^{177}Lu und ^{131}I ist trotzdem rückläufig, da die Rückhaltekapazität der Abklinganlagen in einzelnen Spitälern erhöht wurde. Die Abgabe von diagnostisch verwendeten Radionukliden wie Technetium 99m (^{99m}Tc) oder Fluor 18 (^{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 kontaminierter Abwässer an die Umwelt der Aufsichtsbehörde BAG jährlich zu melden. Die gemeldeten Daten werden durch das BAG ausgewertet und können zur Festlegung von Aufsichtsschwerpunkten verwendet werden.

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 µSv/h in einem Abstand von 1 m 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 Abgabelimite 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 und Schmerzlinderung in Gelenke appliziert. Die Applikation für diese Radionuklide erfolgt in der Regel ambulant, so dass die Patienten nach der therapeutischen Behandlung aus dem Spital entlassen werden können.

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 Immissionsgrenzwerte für Gewässer (IGGw) 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 Einhaltung 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 (^{177}Lu), wird dieser Anteil in ^{131}I Äquivalente umgerechnet und in die Abgabeaktivität mit einbezogen. Die Spitäler sind verpflichtet, die Abgaben radioaktiver Abwässer 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. Das Universitätsspital Basel hat 2023 zwei zusätzliche Abwassertanks in Betrieb genommen und konnte die Abgaben radioaktiver Abwässer damit um rund 25% verringern.

*T**abelle 1:** Applikationen radioaktiver Stoffe zu therapeutischen Zwecken 2023 in GBq.*

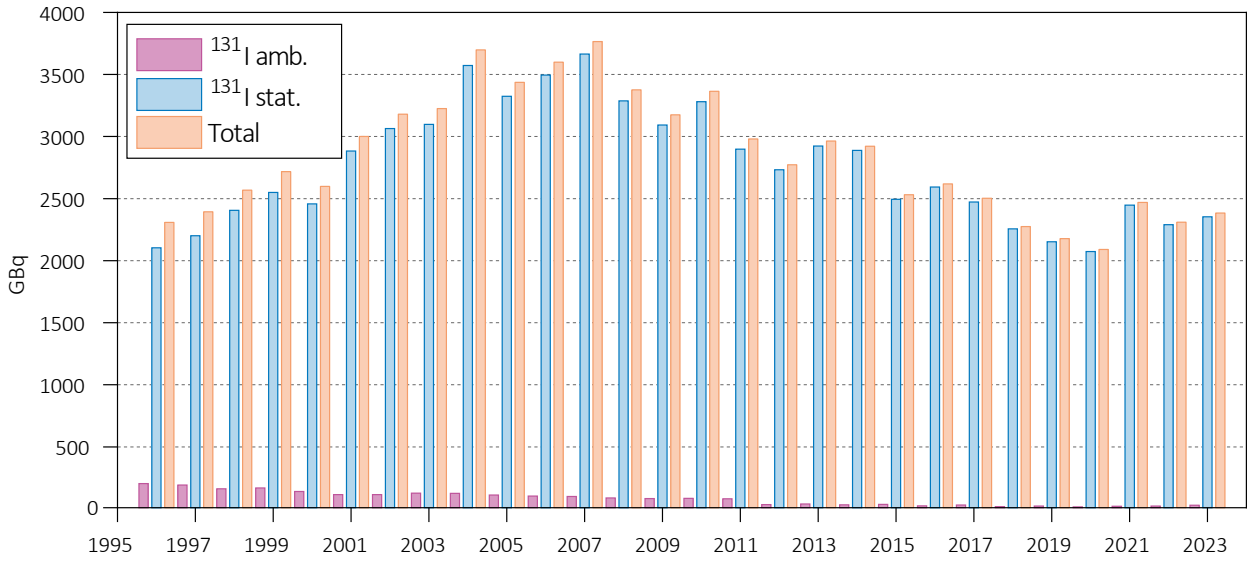
Spital	^{131}I amb.	^{131}I stat.	^{131}I Total GBq	^{177}Lu GBq	^{186}Re GBq	^{169}Er GBq	^{90}Y GBq	^{223}Ra GBq	^{166}Ho GBq
Kantonsspital Aarau AG	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.020	0.0
Kantonsspital Baden AG	0.0	58.1	58.1	541.5	0.0	0.0	27.3	0.000	0.0
Hirslanden Klinik Linde, Biel	0.8	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0
Insel Gruppe AG, Bern	0.0	299.1	299.1	1790.8	0.1	0.1	46.6	0.287	0.0
Kantonsspital Baselland, Bruderholz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.000	0.0
St. Claraspital AG, Basel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.000	0.0
Universitätsspital Basel	0.0	287.0	287.0	2813.1	0.2	0.0	10.1	0.029	65.2
HFR Hôpital cantonal Fribourg	0.0	102.0	102.0	0.0	0.3	0.0	0.8	0.035	0.0
Hôpitaux universitaires Genève HUG	0.0	185.6	185.6	0.0	0.1	0.0	90.8	0.045	0.0
HUG, Hôpital Beau-Séjour	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.000	0.0
Stiftung Kantonsspital Graubünden	0.2	41.3	41.4	51.8	0.0	0.0	3.0	0.000	0.0
Hirslanden Klinik St. Anna, Luzern	0.0	112.5	112.5	1470.0	0.0	0.0	36.6	0.039	0.0
Luzerner Kantonsspital, Luzern	0.0	158.1	158.1	615.9	0.0	0.0	25.1	0.071	0.0
RHNe Site de La Chaux-de-Fonds	3.6	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0
Kantonsspital St.Gallen	1.0	200.1	201.1	1205.0	0.0	0.0	1.5	0.000	0.0
Spital Thurgau AG KS Münsterlingen	0.0	46.6	46.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0
Fondation La Source, Lausanne	2.6	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0
CHUV Vaudois, Lausanne	9.0	96.7	105.6	1952.9	0.1	0.0	174.5	0.012	0.0
HVS Site Sion	0.0	33.7	33.7	0.0	0.0	0.0	24.7	0.000	0.0
Klinik Hirslanden AG, Zürich	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	216.7	0.023	0.0
Universitätsspital Zürich	11.6	232.3	243.9	673.4	0.3	0.3	69.4	0.000	0.0
Kantonsspital Winterthur	0.0	204.4	204.4	0.0	0.0	0.0	45.5	0.037	0.0
Clinique de Genolier, Genolier	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	0.000	0.0
Centre Imagerie Nord VD, Yverdon	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0
Engeriedspital, Bern	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.014	0.0
Stadtspital Triemli, Zürich	1.0	166.4	167.4	214.6	0.0	0.0	4.4	0.080	17.4
Hôpital Riviera-Chablais, Vaud-Valais	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8	0.000	0.0
soH AG Bürgerspital Solothurn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.023	0.0
Hirslanden Salem-Spital, Bern	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.000	0.0
EOC, medicina nucleare Lugano	0.4	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.7	0.000	0.0
EOC, medicina nucleare Bellinzona	0.0	129.8	129.8	436.6	0.0	0.0	30.2	0.080	0.0
Kantonsspital Baselland, Liestal	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.014	0.0
Schilddrüsen-Praxis Zürich	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0
Gesamte Schweiz 2023	30.5	2'353.6	2'384.0	11'765.6	1.4	0.5	837.4	0.809	82.6

Tabelle 2a:
Abgabe von ^{131}I aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2023 in MBq.

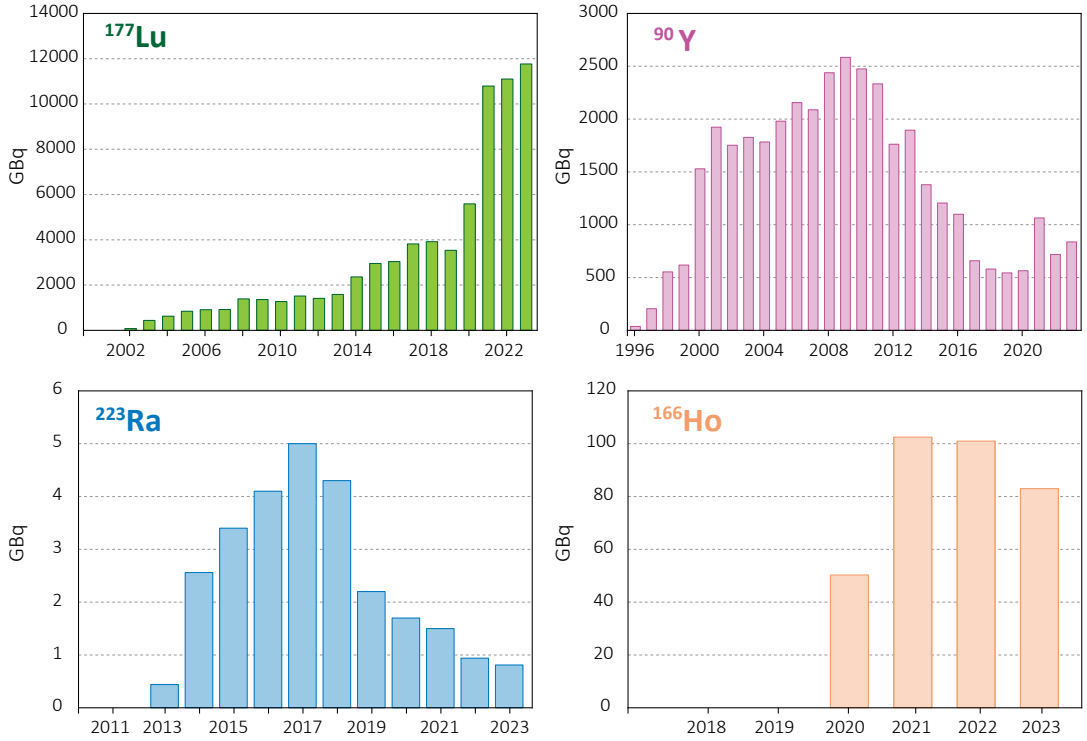
Abgabe MBq/Monat Nuklearmedizin	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Total 2023
Luzerner Kantonsspital	6.7	0.0	44.5	0.0	13.3	16.6	0.0	13.8	0.0	0.0	7.3	11.3	113.5
Hirslanden Klinik St. Anna	2.2	1.5	16.0	11.0	15.7	7.7	12.4	0.0	3.2	6.8	2.0	4.8	83.3
Hôp, Genève HUG	0.0	2.1	0.0	13.8	3.3	14.2	0.0	77.2	6.3	0.0	0.0	11.3	128.1
HVS Site Sion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.0	0.0	0.7
Insel Gruppe AG	14.0	28.0	90.0	54.0	65.0	68.0	17.0	21.0	0.0	54.0	13.0	23.0	447.0
Kantonsspital Baden AG	31.5	0.0	30.0	0.0	11.5	8.3	5.6	0.0	3.7	3.6	12.8	6.7	113.6
Kantonsspital St.Gallen	413.0	4.5	18.4	7.1	0.8	13.8	27.0	94.0	12.7	26.0	0.0	1.7	618.8
Universitätsspital Basel	111.0	89.0	350.0	230.6	222.0	128.1	104.0	241.0	143.0	162.5	153.0	119.5	2053.7
Universitätsspital Zürich	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.3	0.0	11.0	0.0	5.4	71.7
Ente Ospedaliero Cant. (EOC)	1.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.2
HFR Hôpital cant. Fribourg	2.5	0.0	0.1	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.1	0.0	14.6	0.0	18.3
Kantonsspital Winterthur	4.4	1.8	10.4	30.2	33.3	1.6	25.9	18.8	27.1	0.0	77.0	49.1	279.7
Stadtspital Triemli	3.0	1.7	1.6	2.4	2.0	2.0	2.3	1.2	2.3	0.2	1.7	1.6	22.0
CHUV	0.0	11.9	64.5	0.0	8.5	4.8	17.9	5.2	4.2	7.5	6.0	3.6	134.1
Stiftung Kant. Graubünden	0.0	0.2	0.0	0.0	1.5	1.3	0.0	21.4	11.4	9.1	21.9	0.0	66.8
												Gesamte Schweiz 2023 MBq	4'152.6

Tabelle 2b:
Abgabe von ^{177}Lu aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2023 in MBq.

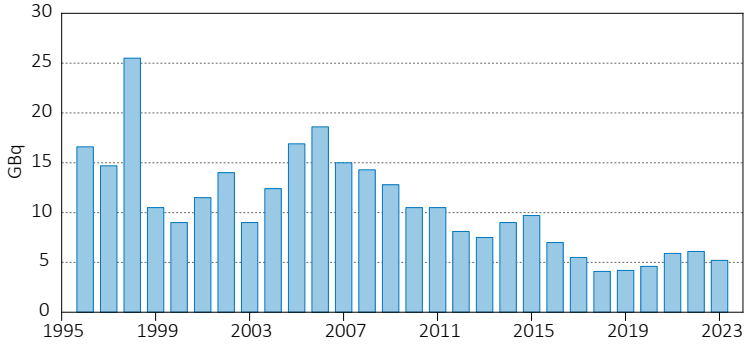
Abgabe MBq/Monat Nuklearmedizin	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Total 2023
Luzerner Kantonsspital	19.3	0.0	153.8	0.0	24.5	43.2	0.0	43.8	0.0	0.0	13.9	18.1	316.6
Hirslanden Klinik St. Anna	7.3	33.0	44.0	1.6	21.3	48.0	39.4	0.0	4.0	18.0	18.0	6.0	240.6
Hôp, Genève HUG	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
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	19.0	70.0	244.0	209.0	317.0	109.0	56.0	13.0	0.0	107.0	25.0	20.0	1189.0
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	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Universitätsspital Basel	3331.8	4732.7	1548.4	2834.1	4244.2	3755.8	2594.5	9792.6	6041.5	4626.7	3345.6	935.5	47783.4
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)	28.8	24.5	3.4	3.9	40.0	13.9	0.0	3.6	19.9	53.3	17.5	0.0	208.8
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	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
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	0.0	47.5	70.5	0.0	21.7	6.7	32.9	19.2	15.9	73.7	10.4	26.2	324.8
Stiftung Kant. Graubünden	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.1	32.0	23.9	0.0	80.1
												Gesamte Schweiz 2023 MBq	50'143.3



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
M. Brennwald, P Rünzi
Eawag, Dübendorf

Résumé

Les résultats de la surveillance effectuée en 2023 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 2023 se situent toutefois dans la fourchette basse de celles enregistrées au cours des 15 dernières années.

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 a été poursuivie comme par le passé. Quelques concentrations anormalement élevées de tritium ont pu être décelées en 2023, notamment dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Bâle, en raison de l'incinération de déchets contenant de grandes quantités de tritium éliminés de manière non conforme. Cet événement n'a toutefois pas présenté de danger pour la santé de la population. Comme ce fut le cas dans le passé lors d'événements similaires dans les usines d'incinération, une enquête a été ouverte. Il s'avère malheureusement très difficile de retrouver l'origine de déchets éliminés de manière non conforme avec les déchets conventionnels.

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 particulière, mise en place par la SUVA (autorité de surveillance pour les industries) et l'OFSP. Ces programmes spécifiques commencent au terme source, par la surveillance des rejets: les exploitants sont en effet 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 des immissions de ces entreprises, à savoir des concentrations radioactives effectivement présentes dans l'environnement dans leur voisinage.

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 déchets. 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 (iode-131 (^{131}I), 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'ait été accidentellement ou intentionnellement éliminé par le circuit des ordures conventionnelles.

Si les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) sont aujourd'hui légalement tenues de contrôler, selon une procédure adéquate, l'éventuelle présence d'émetteurs gamma dans les déchets avant leur incinération, l'installation de portiques de détection à l'entrée de ces usines n'empêche pas l'incinération accidentelle de tritium, un émetteur bêta pur indétectable par ces portiques. Des mesures du tritium sont ainsi réalisées dans les eaux de lavage des fumées des UIOM de grandes agglomérations.

Voisinage des entreprises utilisatrices de Tritium ^{3}H

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/AR, à Root/Lu ainsi qu'en 4 endroits distincts à Niederwangen/BE. La concentration en tritium des échantillons de précipitations sont analysées tous les 15 jours.

Les résultats 2023 sont résumés dans le tableau 1. A titre de comparaison, notons que les concentrations mensuelles de tritium mesurées dans les précipitations de la station de référence de Posieux, assez éloignée de toute usine manipulant du tritium, sont généralement inférieures ou proches de la limite de détection de 2 Bq/l.

Comme par le passé, la surveillance mise en œuvre au voisinage des entreprises utilisatrices de tritium en 2023 a montré que les concentrations de tritium dans l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) étaient significativement plus élevées que la normale à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier de mb Microtec à Niederwangen.

Les niveaux de tritium mesurés dans les échantillons bimensuels de précipitations prélevés en 2023 à proximité immédiate de cette entreprise se sont échelonnés entre 40 et 857 Bq/l (voir figure 1). La figure 2, qui présente les valeurs moyennes et médianes des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations collectées à la station Firma (voisinage immédiat de l'entreprise) ainsi qu'à Köniz au cours des 15 dernières années, montre toutefois que les concentrations de tritium mesurées en 2023 se situent dans la gamme inférieure des valeurs enregistrées depuis 2008. La concentration maximale de tritium mesurée en 2023 dans les précipitations à la station Firma ne représente ainsi que 4.3 % 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.

A Niederwangen, l'activité du ^{3}H dans l'humidité de l'air est également mesurée deux fois par mois (Fig. 1). Une nouvelle méthode d'échantillonnage a été mise en place pour la surveillance du tritium dans l'humidité de l'air depuis 2020, l'ancien barboteur a ainsi été définitivement remplacé par un piégeur passif (filtre moléculaire). Les valeurs obtenues en 2023 se sont échelonnées entre 0.5 et 32 Bq/m^3 avec une valeur moyenne de 7.7 Bq/m^3;

Tableau 1 :
Tritium dans les précipitations au voisinage des entreprises utilisatrices de ^{3}H en 2023.

Lieu	Valeur min/ max (Bq/l)	Mediane / moyenne (Bq/l)
Root / LU ~ 250 m SO Smolsys (23/26*)	<5.0 - 82	16 / 22
Teufen/AR ~ 65 m E Firma RCT (23/26*)	12 - 119	29 / 35
Niederwangen/BE (21/26*)		
Bauernhaus ~ 100 m SO de l'entreprise	9 - 213	36 / 55
Garage ~ 200 m O de l'entreprise	9 - 297	25 / 45
Gemeinde Köniz ~ 330 m N de l'entreprise	7 - 96	23 / 30
Firma Schär ~ 260 m NE de l'entreprise	41 - 857	216 / 245

** la quantité d'échantillons prélevés en 2023 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.*

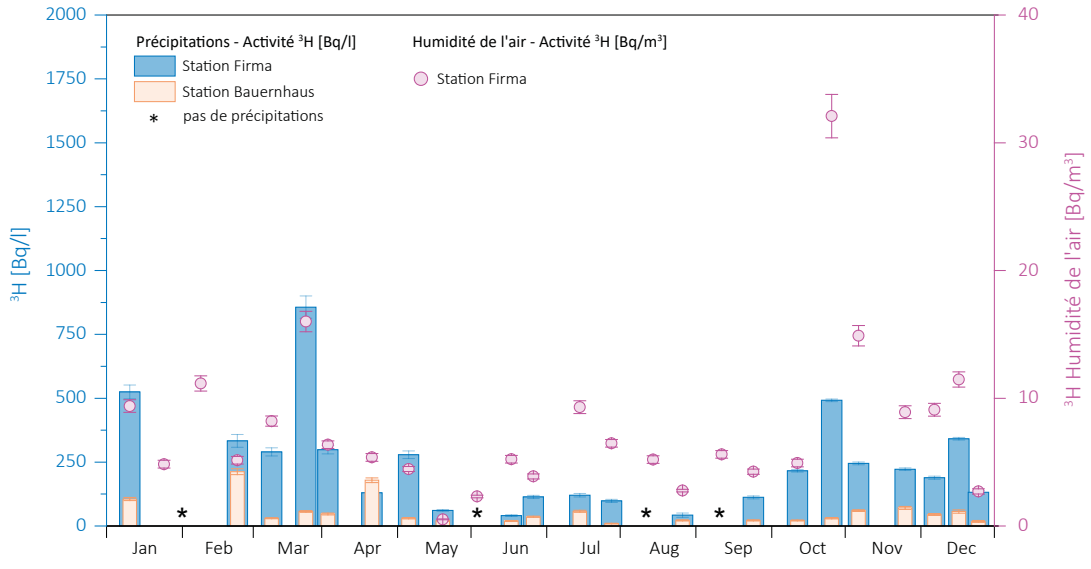


Figure 1 :
Concentrations de tritium [Bq/l] enregistrées en 2023 dans les précipitations des stations de collecte «Bauernhaus» (située à 100 m au sud de l'entreprise) et «Firma» (située à 260 m au nord est de l'entreprise) et concentration de tritium dans l'humidité de l'air [Bq/m³] à la station de «Firma».

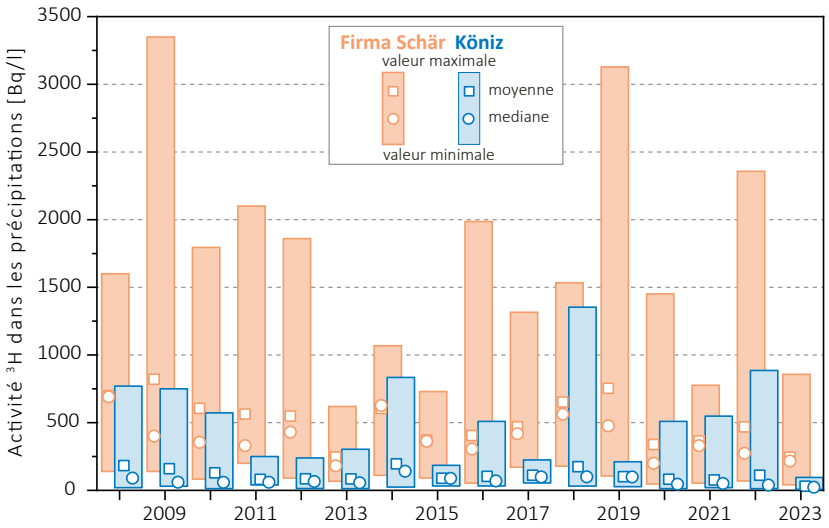


Figure 2 :
Valeurs moyennes et médianes annuelles des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations aux stations de Firma et Köniz à Niederwangen entre 2008 et 2023.

à l'exception d'une valeur plus élevée de l'humidité de l'air, enregistrée entre le 23.10 et le 03.11.2023, et une valeur nettement plus basse en mars, les résultats des mesures du tritium dans l'humidité de l'air sont généralement compatibles avec les concentrations enregistrées dans les précipitations.

Rappelons que les concentrations de tritium mesurées dans l'environnement (précipitation et humidité de l'air) ne dépendent pas seulement des quantités de tritium rejetées dans l'atmosphère, mais également de la dispersion des rejets dans l'environnement, et donc des conditions météorologiques (direction des vents, quantité de précipitations, etc). Des variations locales importantes peuvent ainsi être observées. Pour illustrer ce phénomène, un projet de cartographie des concentrations de tritium dans l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise mb Microtec a été initié en septembre 2022 pour une durée de 6 mois. Les résultats de cette étude sont présentés dans le chapitre 9.5 du présent rapport.

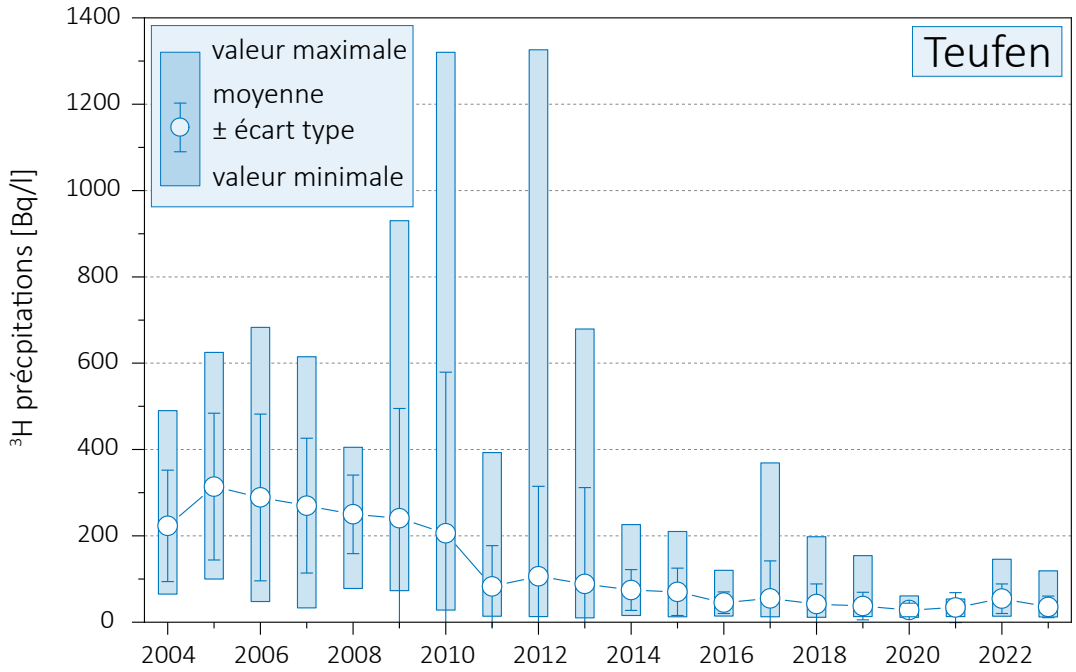


Figure 3a :
Suivi des concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] de Teufen/AR de 2004 à 2023.

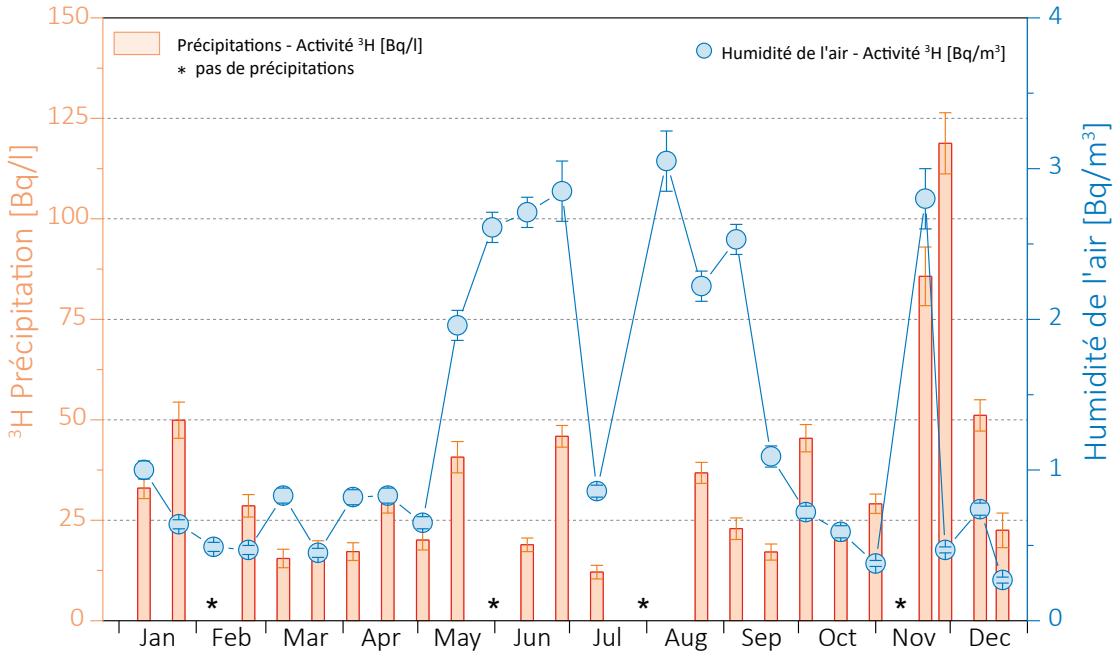


Figure 3b :
Concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] et dans l'humidité de l'air [Bq/m^3] de Teufen/AR en 2023

Les mesures du tritium effectuées dans les distillats des 12 échantillons de fruits et légumes (pommes, poire, pruneaux, rhubarbe et légumes du jardin) prélevés fin août 2023 par le canton de Berne à proximité de l'entreprise se sont échelonnées entre 9 et 119 Bq/l, avec une valeur médiane de 30 Bq/l. Dans les distillats des 3 échantillons de lait frais, les concentrations en tritium étaient de l'ordre de 10 Bq/l (7.6 - 10.6 Bq/l). Ces valeurs se situent également dans la fourchette basse des valeurs enregistrées au cours des 15 dernières années.

La figure 3a montre le suivi des concentrations de ^{3}H 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 12 dernières années. Les valeurs 2023 étaient à nouveau très basses, avec toutefois une

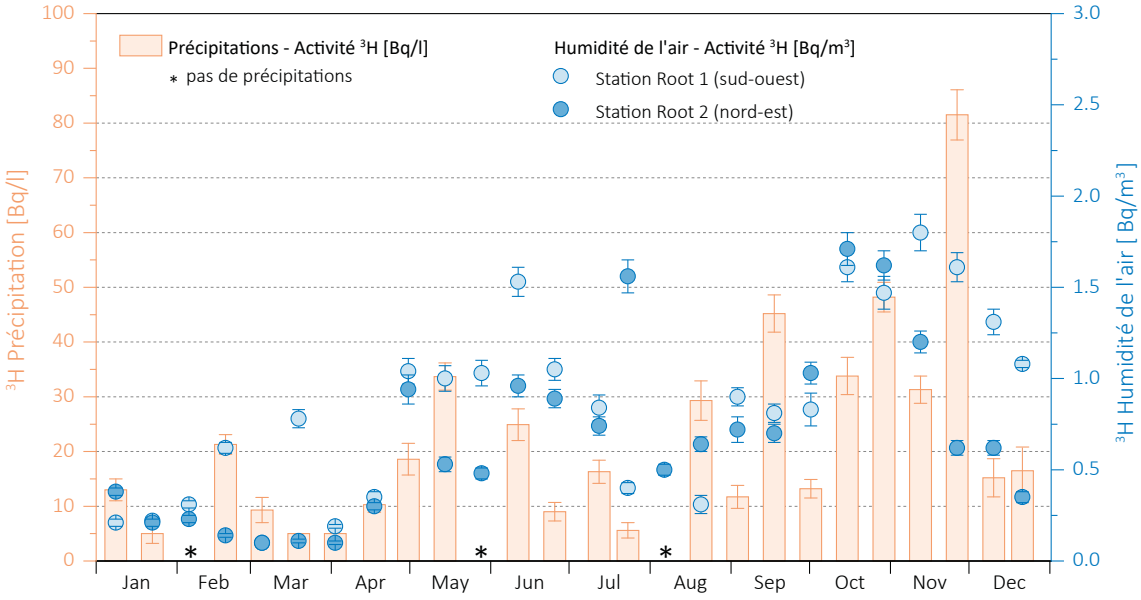


Figure 4 :
Concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] et dans l'humidité de l'air [Bq/m³] de ROOT/LU en 2023

légère augmentation de mi-novembre à mi-décembre. Un piégeur passif à filtre moléculaire pour la mesure du ^{3}H dans l'humidité de l'air a également été installé au voisinage de l'entreprise fin 2020. Les résultats des mesures 2023 sont représentées sur la figure 3b. Avec une valeur moyenne de 1.3 Bq/m^{3}, les concentrations du tritium dans l'humidité de l'air sont le plus souvent restées faibles, avec quelques valeurs plus élevées pendant l'été.

En octobre 2021, l'OFSP et la SUVA ont également initié un programme de surveillance du tritium au voisinage de l'entreprise Smolsys, située à Root/LU, qui dispose également d'une autorisation de rejet de tritium dans l'environnement. Elle comprend la mesure du tritium dans les précipitations (1 station) et l'humidité de l'air (2 stations). Les résultats de la seconde année complète de surveillance sont illustrés sur la figure 4. Avec des concentrations de ^{3}H s'échelonnant entre < 5 et 81 Bq/l dans les précipitations et entre < 0.1 et 1.8 Bq/m^{3} dans l'humidité de l'air, on constate une augmentation par rapport aux valeurs mesurées en 2022 (première année complète de surveillance). Cette tendance à l'augmentation au cours de la seconde moitié de l'année 2023 s'observe sur la figure 4 et est corrélée avec l'augmentation des émissions de l'entreprise.

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

Plusieurs laboratoires analysent 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 ^{3}H ou de ^{131}I dans l'environnement. Les résultats de ces mesures sont résumés dans le tableau 2 pour l'année 2023.

Eaux des stations d'épuration

Comme en 2022, des concentrations plus élevées de tritium 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 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. La concentration hebdomadaire maximale de ^{3}H dans l'eau de la STEP de Bâle enregistrée en 2023 a atteint 325 Bq/l au cours de la semaine 20 (15 au 21 mai) et elle est à mettre en relation avec l'incération, le 14.05.2023, par l'usine Véolia de déchets contenant du tritium issus de l'entreprise RC Tritec (Teufen). Mis à part ces quelques valeurs

Tableau 2 :
Tritium (^{3}H) et ^{131}I dans les eaux de rejet des usines d'incinération et des stations d'épuration (STEP) en 2023.

Ville	Laboratoire	Isotope	n.	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)	Moyenne (Bq/l)
STEP Bâle	KL-BS	^{131}I	52	< 0.05 / 1.0	< 0.1	-
		^{3}H	52	< 4.0 / 325	< 4	-
Incinération Bâle		^{131}I	51	0.06 / 3.6	0.4	0.6
		^{3}H	51	7.0 / 25'852	97	651
STEP Berne	Labor Spiez	^{131}I	53	< 0.1 / 0.2	< 0.1	-
	URA/OFSP	^{3}H	12	< 5.0 / 18	< 5	-
STEP Bienne	URA/OFSP	^{3}H	53	< 5.0 / 16	< 5	
STEP La Chaux-de-Fonds	URA/OFSP	^{3}H	51	< 5.0 / 32	5.7	-
STEP Lausanne	IRA	^{131}I	53	< 0.3 / < 1.7	<0.5	-
		^{3}H	12	< 2.0 / 2.0	< 2	
Incinération Zürich	EAWAG	^{131}I	12	< 0.9 / 54	8.4	-
	URA/OFSP	^{3}H	12	74/ 1670	398	435
STEP Zürich	EAWAG	^{131}I	50	< 0.1 / < 0 .9	-	-
	URA/OFSP	^{3}H	12	< 5.0	< 5.0	

Tableau 3 :
Concentrations de ^{226}Ra dans les eaux de percolation de décharges en 2023.

Type d'échantillon	Lieu	Date	Remarque	^{226}Ra (mBq/l]
décharges, eaux de percolation	Teuftal (BE)	6.12.2023	non-filtré pour ^{226}Ra	12.3 ± 1.3
	Türliacher (BE)	29.11.2023	non-filtré pour ^{226}Ra	4.6 ± 0.7
	Valle della Motta (TI)	29.11.2023	non-filtré pour ^{226}Ra	5.8 ± 0.8
	Lufingen (ZH)	29.11.2023	non-filtré pour ^{226}Ra	32.6 ± 2.8
	Elbisgraben (BL)	5.7.2023		< LD (gamma)

plus élevées, les concentrations de tritium dans la STEP sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 4 Bq/l.

Les concentrations de tritium observées à la STEP de la région de La Chaux-de-Fonds sont restées faibles en 2023, le plus souvent proches de la limite de détection de 5 Bq/l, confirmant les résultats observés au cours des dernières années. En effet, après la nette diminution observée jusqu'en 2008, en corrélation avec la très forte baisse de l'utilisation du ^{3}H dans les ateliers de posage de la région et l'arrêt complet de cette activité en 2008, les concentrations de tritium dans les eaux de la STEP de la Chaux-de-Fonds se sont stabilisées à des niveaux très bas.

A la STEP de 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 2023, avec sporadiquement des valeurs supérieures à 10 Bq/l (valeur maximale de 16 Bq/l). Il en va de même pour les échantillons mensuels d'eaux de la STEP de Berne.

Les concentrations mensuelles de tritium enregistrées dans les eaux de la STEP de Werdhözli à Zürich, sont restées inférieures à 5 Bq/l. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a par ailleurs être décelé dans les échantillons hebdomadaires d'eaux prélevés et mesurés par l'EAWAG. Les résultats sont similaires à la STEP de Lausanne, avec quelques traces sporadiques de ^{131}I (concentration maximale de 1.7 Bq/l).

Eaux de lavage des fumées des usines d'incinération

Le laboratoire cantonal de Bâle Ville a mesuré un niveau anormalement élevé de tritium (environ 26 kBq/l) dans un échantillon hebdomadaire d'eaux de lavage des fumées de l'UIOM de Bâle, collecté entre les 06 et le 12 juin 2023. Selon l'estimation de l'OFSP, l'activité totale de tritium incinérée s'élève à 32 GBq, soit plus de 100 fois la limite d'autorisation fixée à 0.3 GBq pour le tritium, représentant ainsi une infraction à l'ORaP.

Bien que cet incident n'ait pas eu de conséquences pour la santé de la population, il n'est malheureusement pas un fait isolé. Le caractère récurrent du phénomène avait déjà conduit l'OFSP a déposé une plainte auprès du ministère public de la confédération en 2020 pour élimination non conforme de déchets radioactifs. Comme lors des précédents incidents de ce type, Fedpol a donc à nouveau été alertée à la suite de l'incident de 2023, mais il est très difficile de retrouver l'origine de tels déchets après incinération. De plus amples informations sur cet événement radiologique sont disponibles sur le site internet de l'OFSP (https://tinyurl.com/2np3xase).

En 2023 l'EAWAG a poursuivi les mesures des émetteurs gamma dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz à Zürich. Les concentrations d' ^{131}I mesurées dans ces échantillons se sont échelonnées entre <0.9 et 54 Bq/l . Aucun autre émetteur gamma n'y a été décelé. La mesure des émetteurs gamma dans les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération vont être arrêtées car l'obligation d'installer des portiques de contrôle à l'entrée de ces installations garantit qu'aucun déchet contenant des niveaux élevés de radioactivité gamma ne puisse y être incinéré.

La SUVA mesure quant à elle le tritium dans les échantillons hebdomadaires d'eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Berne. En 2023, les valeurs se sont échelonnées entre 130 et 12'900 Bq/l. Les valeurs mesurées dans les eaux de lavage n'ont pas présenté de corrélation avec les activités de tritium déclarées et livrées de manière légale par les entreprises ayant une autorisation de manipulation.

Incinération de déchets faiblement radioactifs (combinaisons de travail) provenant de Mühleberg

Les FMB (BKW) ont déposé en été 2023 une demande pour incinérer des combinaisons de travail contaminées (principalement avec du ^{60}Co et du ^{137}Cs) provenant de la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM). L'ENSI a autorisé ce « rejet dans l'environnement » au sens de l'ORaP (art. 111-116) et l'OFSP a ensuite donné son accord pour une incinération d'essai (projet pilote) à condition qu'un programme de mesures approfondi, comprenant aussi bien une surveillance de la source (échantillons prélevés dans l'usine d'incinération) que de l'environnement (air) soit mis en place. Pour ce faire, deux collecteurs d'aérosols ont été installés par la section URA/OFSP sur deux sites à proximité de l'UIOM (2 directions principales des vents) et ils ont été mis en fonction quelques jours avant le début de l'incinération. Outre le canton (AWA), l'Office de l'environnement de la ville de Berne a également été informé du projet pilote.

L'incinération pilote a eu lieu le 8.11.23 (10:00h) à l'UIOM de Berne. Les résultats complets des mesures effectuées dans les cendres et échantillons prélevés à l'UIOM (cendres, scories et eaux de lavage des fumées) ainsi que dans l'environnement ont été discutés lors d'une séance FMB/IFSN/OFSP/OED fin novembre et étaient conformes aux attentes : le ^{60}Co a été détecté dans les scories et la teneur en ^{137}Cs dans les cendres, les eaux usées et les filtres à air (voir tableau 4) était soit comparable aux valeurs usuellement mesurées, soit inférieure à la limite de détection.

Tableau 4 :
Résultats des analyses des filtres à aérosols « Digitel ». Les valeurs mesurées pour les radionucléides naturels ^{7}Be et ^{210}Pb se situent dans la gamme attendue. Aucun radionucléide artificiel n'a été détecté.

Emplacement	Période de collecte	Volume (m³)	Activité ± incertitude élargie en [µBq/m³]			
			^{60}Co	^{137}Cs	^{7}Be	^{210}Pb
Hochschulzentrum vonRoll	08.11.23 03:13h - 09.11.23 15:13h	2'265	< 7.0	< 7.3	2'922 ± 558	292 ± 88
(650 m à l'est de l'UIOM)	09.11.23 15:13h - 11.11.23 03:13 h	2'286	< 16.3	< 13.6	2'536 ± 500	< 227
Tech. Zentr. ewb Holligen	08.11.23 02:44h - 09.11.23 14:44h	2'266	< 5.7	< 6.4	2'726 ± 517	347 ± 110
(950 m au sud-ouest de l'UIOM)	09.11.23 14:44h - 11.11.23 02:44h	2'290	< 10.3	< 8.9	2'399 ± 465	185 ± 91

Surveillance des décharges

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.

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. Cette surveillance est réalisée en mesurant le ^{226}Ra dans les eaux de percolation et/ou les eaux souterraines. Si les concentrations de radium sont inférieures la limite d'immission dans les eaux de percolation de la décharge, le respect des limites de dose fixées dans la législation est garanti (voir la directive de l'OFSP «Mise en décharge de déchets radioactifs de faible activité»). La limite d'immission pour le ^{226}Ra dans les eaux est fixée à 580 mBq/l. Les résultats de la surveillance montrent que les concentrations de ^{226}Ra dans les eaux de percolation des décharges dans lesquelles des déchets contenant du ^{226}Ra ont été déposés ces dernières années sont faibles (voir tableau 3) et bien inférieures à la valeur limite d'immission (< 6%). Les échantillons ont été pour la plupart mesurés sans filtrage ce qui constitue une approche conservative. Une comparaison des échantillons non filtrés et filtrés montre qu'une grande partie du ^{226}Ra est présente sous forme dissoute et pourrait donc être potentiellement lessivée.

En raison de la faible limite de détection requise (de l'ordre de 1 mBq/l) et des difficultés liées à la matrice même des échantillons d'eaux de percolation des décharges, ni la spectrométrie gamma ni la méthode «Disque MnO_2 - adaptée à l'eau potable» ne conviennent pour l'analyse. Les échantillons ont donc été analysés avec une méthode mise au point par l'Institut de Radiophysique (IRA) à Lausanne. Cette méthode comprend l'ajout du traceur ^{229}Th(^{225}Ra) suivi par une séparation chimique, une électrodéposition sur disque d'argent de la fraction Ra et la mesure par spectrométrie alpha sur détecteur PIPS. Les résultats des mesures réalisées par l'IRA à l'aide de cette méthode sont résumés dans le tableau 3.

Conclusions

Les résultats des mesures effectuées en 2023 à proximité 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 valeurs enregistrées en 2023 se situent toutefois 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.

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, hormis celles mesurées en juin 2023 dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Bâle-Ville, indiquant qu'un ou plusieurs objets contenant du tritium avec une activité non négligeable (estimée à 32 GBq) avaient été incinérés pendant cette période. Même si cet événement n'a pas représenté de danger pour l'environnement et la santé de la population, une enquête a été ouverte pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs dans les ordures conventionnelles a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle. Ce genre d'événements a déjà été observé par le passé, mais il est extrêmement difficile de retrouver l'origine des déchets éliminés de manière non conforme, une fois qu'ils ont été brûlés.

La surveillance de la radioactivité dans les eaux de percolation des décharges dans lesquelles ont été déposés des déchets contenant de faibles quantités de radium (issus du plan d'action radium) a montré que les concentrations de radium dans les eaux étaient faibles.

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 ^{99m}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 Ergebnisse aus der ARA Giubiasco (Bellinzona). 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 ^{99m}Tc und ^{18}F/^{68}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 grösstenteils bereits im Zulauf der ARAs eingehalten. Einzige Ausnahme war ein Wochenmittel von ^{131}I im Dezember 2023 : Im Zulauf der ARA war der Immissionsgrenzwert überschritten, jedoch nicht im massgeblichen «öffentlich zugänglichen Gewässer» bei der Einleitung des gereinigten Abwassers in den Fluss. Die markantesten Erhöhungen der Dosisleistung entstehen nach Regenereignissen durch das Einschwemmen von Radonfolgeprodukten ins Abwasser.

Gammaemittierende Radionuklide in der Medizin

Viele der in der Medizin eingesetzte Radionuklide können gammaspektrometrisch gemessen werden. Tabelle 1 zeigt eine Liste der in dieser Arbeit nachgewiesenen Radionuklide.

Kontinuierliche Messungen mit NaI-Sonden

NaI-Gammaspektrometrie-Sonden sind gut geeignet um Radionuklide aus der Medizin in Wasser mit empfindlicher Nachweisgrenze kontinuierlich zu überwachen. 2023 war eine NaI-Sonde im Zulauf der ARA von Giubiasco (Bellinzona) im Einsatz. An der ARA Giubiasco sind 53’000 Einwohner angeschlossen.

Die Radioaktivitätssonde ist in einem Becken mit genügend Wassertiefe (>1m Wasser auf allen Seiten) zwischen Rechen/Sandfang und Vorklärbecken installiert. Die eingesetzte Sonde vom Typ SARA Water (Scienta Envinet GmbH) misst mit einem

3-Zoll NaI(Tl)-Kristall im Energiebereich zwischen ca. 40 keV und 2'700 keV. Die Sonde nimmt 10-Minuten Spektren auf, wertet diese aus und übermittelt die Ergebnisse an eine Datenzentrale. Die Nachführung der Energiekalibrierung beruht auf dem ^{40}K-Peak von in der Sonde eingebautem KCl. Aus den 10 Minuten-Spektren werden Stundenspektren gerechnet und ausgewertet.

Für diese Arbeit wurden die 10-Minuten-Spektren 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 Stundenwerte liegen bei rund 0.5 Bq/l für ^{18}F, ^{99m}Tc, ^{123}I und ^{214}Bi, bei 1 - 5 Bq/l für ^{111}In und ^{131}I und bei 8 Bq/l für ^{177}Lu.

Lutetium-177 (^{177}Lu), ^{131}I, ^{123}I und ^{111}In

Das in der Radiotherapie eingesetzte ^{131}I hat einen tiefen Immissionsgrenzwert für Gewässer (6.7 Bq/l) und wird in deshalb in den Spitälern in Abklingtanks gelagert. Nach der Entlassung von Patienten kann aber am Wohnort immer noch ein kleiner Teil der Radionuklide in das Abwasser ausgeschieden werden. In der ARA Bellinzona war ^{131}I vor regelmässig zu messen. Die Nachweisgrenze bei den hier ausgewerteten 10-Minuten Messungen liegt für ^{131}I bei ungefähr 5 Bq/l. Die höchste gemessene 10-Minuten-Konzentration betrug knapp 100 Bq/l. Das höchste Wochenmittel von ca. 18 Bq/l konnte in der Woche vom 15.-22. Dezember festgestellt werden (Abbildung 1). In dieser Woche war im Zulauf der ARA der Immissionsgrenzwert überschritten, selbst unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Kalibrierung der Sonde und des Einflusses von nicht untersuchten Standortfaktoren, wie zum Beispiel mögliche Schlammablagerungen in der Nähe der Sonde. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Grenzwert von 7 Bq/l bei der Einleitung in den Vorfluter, das heisst in das gemäss Strahlenschutzverordnung massgebende «öffentlich zugängliche Gewässer», durch Verdünnung und Entfernung von Jod mit dem Klärschlamm, klar eingehalten war. Proben aus der Flusswassermessstation 6 km unterhalb der ARA Bellinzona zeigten im Dezember kein messbares ^{131}I.

Gemessen an der eingesetzten Aktivität ist in der Schweiz ^{177}Lu das meistverwendete Isotop für die Radiotherapie. Verglichen mit ^{131}I ist es weniger radiotoxisch. ^{177}Lu wird im Spital vor der Abgabe in die Kanalisation wie ^{131}I in Abklingtanks gelagert. In der ARA war es neunmal im Abstand von 1-2 Monaten jeweils für einige Tage nachweisbar. Die höchste gemessene 10-Minuten-Konzentration betrug rund 270 Bq/l. Das höchste Wochenmittel lag bei 22 Bq/l und damit deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 308 Bq/l.

Indium-111 (^{111}In) war Mitte Januar und Mitte Februar für jeweils ca. eine Woche im Zulauf der ARA nachweisbar. Die höchste gemessene 10-Minuten-Konzentration und das höchste Wochenmittel betrugen 29 Bq/l und 5 Bq/l, beides Werte weit unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 705 Bq/l (siehe auch Tabelle 1). Ein 10-Minuten Spektrum mit ^{111}In ist in Figur 2 gezeigt. Die Zeitpunkte des Auftretens

Tabelle 1 :
Radionuklide aus der Medizin, die bei den Messungen mit NaI-Sonden in den Abwasserreinigungsanlagen nachgewiesen wurden.

Radionuklid	Halbwertszeit[1]	Gammaenergie (Emissionswahrscheinlichkeit)[2]	Jährliche Anwendung Schweiz	IG_{Gw} [Bq/l][3]
^{18}F	1.8 h	511 keV (194 %)	ca. 17 TBq (PET)	4'000 ([4])
^{68}Ga	1.13 h	511 keV (178 %)	ca. 1 TBq (PET)	1'791 ([4])
^{99m}Tc	6.0 h	140.5 keV (89 %)	ca. 30 TBq (SPECT)	9'230
^{111}In	2.8 d	171 keV (91 %) 245 keV (94 %)	ca. 12 GBq (SPECT)	705 ([4])
^{123}I	13.2 h	159 keV (83 %)	ca. 0.3 TBq (SPECT)	632 ([4])
^{131}I	8.0 d	364.5 keV (81 %)	ca. 2 TBq (Therapie)	7
^{177}Lu	6.6 d	208 keV (10 %) 113 keV (6.2 %)	ca. 4 TBq (Therapie)	308 ([4])

[1] *h: Stunden; d: Tage.*
[2] *Bei den Überwachungsmessungen nachgewiesene Gamma-Peaks.*
[3] *Immissionsgrenzwerte für Gewässer (StSV Anhang 7).*
[4] *Wert mit Dosisfaktoren für Kleinkinder, Kinder und Erwachsene aus ICRP 119 gerechnet.*

dieses Radionuklids im Abwasser fallen mit Terminen zusammen, an denen im Regionalspital Bellinzona Diagnostik mit ^{111}In durchgeführt wurden. Dieser Eingriff findet ambulant statt und das Radionuklid gelangt vom Wohnort der Patienten via die Kanalisation in die ARA. Bei einer weiteren Anwendung von ^{111}In im Oktober wurde in der ARA kein Signal registriert: Die betroffenen Patienten wohnen offenbar nicht im Einzugsgebiet der ARA. Ein einziges Mal, Ende Mai 2023, war ^{123}I nachweisbar. Die höchste 10-Minuten Konzentration lag mit 25 Bq/l deutlich unter dem IGw (632 Bq/l).

Technetium-99m (^{99m}Tc) und PET Radionuklide

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 ARAs regelmässig nachgewiesen werden. Typischerweise am frühen Nachmittag ist die Konzentration erhöht, vornehmlich am Montag. Selbst die höchsten 10-Minuten Spitzen sind deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes, der damit im Wochenmittel immer klar eingehalten ist.

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 der 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.

Dosisleistung im Wasser

Die NaI-Sonden errechnen aus dem gemessenen Spektrum auch Dosisleistung (ODL) in nSv/h. Hier tragen vor allem ^{99m}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.

Verglichen mit den üblichen ODL-Werten in der Luft im Freien von durchschnittlich 100 - 150 nSv sind die Werte im Abwasser tief.

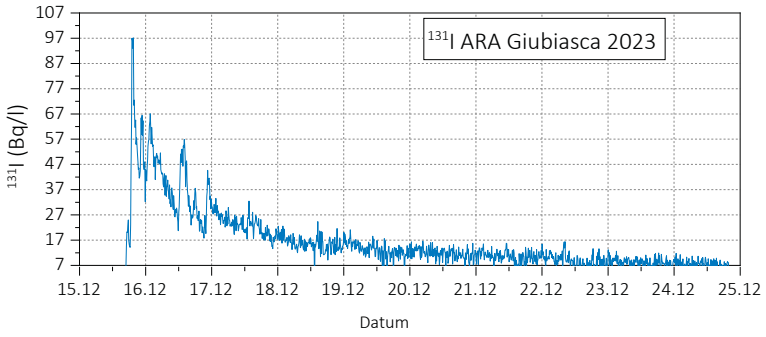


Abbildung 1 :
Zeitverlauf der ^{131}I 10-Minuten Konzentrationen zwischen dem 15. und 25 Dezember 2023 im Zulauf zur ARA Giubiasco.

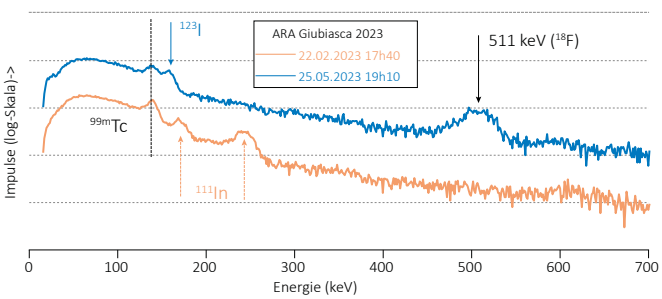


Abbildung 2 :
10-Minuten Spektren der Messungen im Zulauf zur ARA Giubiasco

9.5
Variations spatiales des concentrations de tritium dans l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise mb Microtec/Niederwangen

A. Gurtner, P. Steinmann et S. Estier
Section Radioactivité de l'environnement URA / OFSP Berne

Résumé

Les concentrations du tritium dans l'humidité de l'air (en Bq/m^3) ont été mesurées dans l'environnement proche (0.24 à 5 km) et distant (max. 60 km) de l'entreprise utilisatrice de tritium mb Microtec à Niederwangen afin d'étudier la dispersion du tritium dans l'environnement. Comme attendu, ces résultats montrent que les concentrations de tritium chutent rapidement à mesure que l'on s'éloigne du point d'émission. Le marquage reste toutefois significatif jusqu'à une distance de 3 km, en particulier dans la direction principale des vents (axe SO-NE). Le long de l'axe SE-NO en revanche, les concentrations de tritium sont déjà très faibles à moins de 1 km du point d'émission.

Introduction

En Suisse, certaines entreprises industrielles utilisent toujours du tritium 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 mesurer leurs émissions et de les communiquer à la SUVA, l'autorité de surveillance dans ce domaine. L'OFSP met également en œuvre un programme de surveillance spécifique pour contrôler les immissions aux environs de ces entreprises. Le programme de surveillance comprend généralement des mesures du tritium dans les précipitations. Au voisinage de mb microtec à Niederwangen/BE, la surveillance inclut également, depuis de nombreuses années, l'analyse du tritium dans l'humidité de l'air.

Les concentrations de tritium mesurées en un point de l'environnement dépendent bien entendu des quantités de tritium émises dans l'environnement, mais également de sa dispersion (dilution) dans l'air après le rejet. De plus, la formation de précipitations diminue la concentration. Ainsi, on s'attend à ce que les concentrations de tritium dans l'air diminue rapidement avec la distance. Par ailleurs, cette diminution n'est pas homogène dans toutes les directions mais sera influencée par la vitesse et la direction des vents. Ainsi si les conditions météorologiques fluctuent, les concentrations de tritium mesurées en un point fixe de l'environnement ne seront pas forcément en corrélation avec les quantités de tritium émise dans l'environnement au cours de la période.

Ainsi, pour avoir une image précise, de la situation, il est nécessaire de mesurer les concentrations de

tritium dans différents points de l'environnement pour pouvoir établir une cartographie des concentrations, qui en moyenne, seront représentatives des émissions.

Notons encore que si la surveillance du tritium dans les précipitations apporte des informations intéressantes au niveau des tendances annuelles, elle n'est pas seulement tributaire des conditions citées précédemment (vitesse et orientation des vents), mais avant tout des quantités de précipitations (!). Les périodes de sécheresse, de plus en plus longues ou fréquentes ces dernières années ont ainsi conduit à des lacunes dans les résultats de la surveillance, avec de longues périodes sans résultats de mesure. A ce titre, la mesure du tritium dans l'humidité de l'air est un paramètre plus fiable pour réaliser la surveillance des immissions.

Toutefois, jusqu'en 2020 la surveillance de l'humidité dans l'air était réalisée à l'aide de barboteurs et la logistique associée a souvent posé problème (instruments endommagés, volés, etc.) raison pour laquelle la surveillance n'avait lieu que sur un site. Une nouvelle méthode d'échantillonnage, à l'aide d'un piégeur moléculaire passif (voir matériel et méthode de prélèvement) a alors été mise en place. Ce système étant simple et peu couteux, la surveillance de l'humidité de l'air a été étendue au voisinage de toutes les entreprises utilisatrices de tritium.

Les emplacements des sites de surveillance sont déterminés sur la base de la direction principale des vents; toutefois pour mieux visualiser la dispersion du tritium dans l'air dans l'environnement une étude a été mise en place.

Matériel et méthode de prélèvement

L'humidité de l'air a été collectée au moyen de piégeurs passif PA3. Ce dispositif permet de piéger de manière passive le tritium atmosphérique (HTO) représentatif du milieu surveillé.

Ces piégeurs sont constitués d'une cartouche tronconique accueillant un tamis moléculaire (matériau adsorbant) qui prélève l'humidité de l'air sur toute la durée de l'exposition. Sa géométrie et la taille des ouvertures ont été étudiées pour favoriser le transport des molécules de l'air vers le dispositif de piégeage grâce à la propriété de diffusivité moléculaire des gaz de manière linéaire et sans effet de saturation.

Le principe de la technologie PA3 permet ainsi des prélèvements du tritium atmosphérique (HTO) en faible concentration sans effet de dilution, aussi bien qu'en cas de rejets à fortes activités.

A la fin de la période de collecte les ouvertures sont fermées et les piégeurs sont ramenés au laboratoire. Ensuite, ils sont traités sur un banc de désorption : la cartouche y est chauffée et l'eau capturée par le tamis moléculaire va ainsi désorber la vapeur. Cette vapeur d'eau est ensuite condensée et piégée sous forme liquide par un piège froid (effet Peltier). L'ensemble de l'aéraulique est maintenu à un vide d'environ 100 mbar afin de confiner et maintenir l'échantillon tritié dans une verrerie de laboratoire. La mesure de l'activité du tritium dans l'échantillon est effectuée par scintillation liquide.

Pour chaque site examiné, l'humidité relative de l'air (rH en %) et la température [°C) ont été enregistrées à l'aide d'un stick EL-USB-2 RH/TEMP Data logger. Ceci permet de calculer la concentration de tritium dans l'humidité de l'air en Bq/m^3 à partir des concentrations de tritium mesurées en Bq/l dans l'échantillon d'eau désorbée.

Sites de prélèvements

L'étude s'est déroulée sur une période de 5 mois et demi, du 7 septembre 2022 au 21 février 2023. Au cours de cette période, 25 piégeurs ont été installés le long des différents axes des vents en partant du point Firma Schär pour une durée de prélèvement de 15 jours chacun.

Pour étudier la dispersion à plus large échelle, des piégeurs ont également été installés du 14.10.22 au 3.11.2022 en 5 points dénommés « longue distance », de 9.9 km à 62 km du point source.

- Série 1 : 7.9.22 au 26.9.22, direction nord-est (NE), 5 piégeurs
- Série 2 : 6.12.22 au 19.12.22, direction sud-ouest (SO), 5 piégeurs
- Série 3 : 9.1.23 au 23.1.23, direction nord-ouest (NO), 5 piégeurs
- Série 4 : 7.2.23 au 21.2.23, direction sud-est (SE), 5 piégeurs
- Série distante : 14.10.22 au 3.11.22, 5 piégeurs

Les emplacements des piégeurs pour les différentes séries sont représentés sur les figures 1 (environnement proche – séries 1 à 4) et 2 (série 5, longue distance). Parallèlement à chaque série installée, un piégeur PA3 était en place au point Firma Schär distant de 240 mètres direction nord-est. Dans le cas de la série distante, une valeur moyenne incluant les résultats de deux périodes couvrant la durée de cette série est donné dans les résultats.

Résultats de mesure

Les résultats des mesures sont détaillés dans le tableau 1 et représentés de manière synthétique sur la figure 1 pour les 4 séries de mesure réalisées dans un environnement proche (< 5 km) ; les résultats des mesures à plus grande distance sont représentés sur la figure 2. La distance du piégeur par rapport au point d'émission (entreprise mb microtec) est également indiquée.

Les figures 4 et 5 montrent des cartographies de la concentration du tritium dans l'air (Bq/m^3) réalisées avec l'ensemble des données récoltées au cours de la période de l'étude (5 mois et demi). Les différentes concentrations mesurées n'ont pas été mesurées au cours de la même période et ne sont pas représentatives des valeurs moyennes mesurées en ces endroits pendant la durée de l'étude, mais elles illustrent bien le phénomène de dispersion, prioritairement dans la direction NE (direction principale des vents).

Tableau 1 :
Concentrations de tritium dans l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise mb Microtec/Niederwangen. Incertitudes : valeur de mesure ± 2 sigma (incertitude de la mesure LSC) + 5 % (incertitude liée à la préparation) (Tricarb 2300 TR)

Prélèvement	Direction	Coordonnées		Distance [km]	Activité [Bq/m^3]	Incertitude [Bq/m^3]
7.02.23- 21.02.23	SE 0	595010	196871	0.24	11.16	0.15
	SE 1	595609	196690	0.75	2.47	0.06
	SE 2	597429	195583	2.80	0.18	0.02
	SE 3	597674	196134	2.87	0.15	0.02
	SE 4	598684	195893	3.90	0.07	0.01
	SE 5	598973	196687	4.11	0.08	0.01
6.12.22 – 19.12.22	SO 0	595010	196871	0.24	6.87	0.17
	SO 1	594282	196061	0.85	1.03	0.02
	SO 2	593948	195082	1.84	0.57	0.02
	SO 3	596807	198410	3.18	0.55	0.02
	SO 4	592961	192800	4.32	0.22	0.01
	SO 5	592019	191731	5.71	0.22	0.01
07.09.22 – 26.09.22	NE 0	595010	196871	0.24	6.93	0.10
	NE 1	595504	197347	0.92	3.03	0.12
	NE 2	596393	197985	2.02	1.80	0.05
	NE 3	596807	198410	2.62	1.07	0.04
	NE 4	597915	199487	4.20	0.73	0.02
	NE 5	598521	200174	5.10	0.80	0.03
09.01.23 – 23.01.23	NO 0	595010	196871	0.24	9.39	0.11
	NO 1	594717	197289	0.60	0.13	0.01
	NO 2	593529	198291	2.07	0.34	0.02
	NO 3	593263	198986	3.38	0.07	0.01
	NO 4	591848	199465	4.02	0.04	0.01
	NO 5	591663	200372	4.89	0.05	0.01
14.10.22 – 03.11.22	L 0	595010	196871	0.24	8.20	0.12
	L 2	604666	197275	9.9	0.20	0.04
	L 3	604724	192917	10.4	0.19	0.03
	L 4	574457	185047	22.8	0.16	0.02
	L 1	562698	205582	33.3	0.13	0.03
	L 5	641797	155219	62.0	0.17	0.01

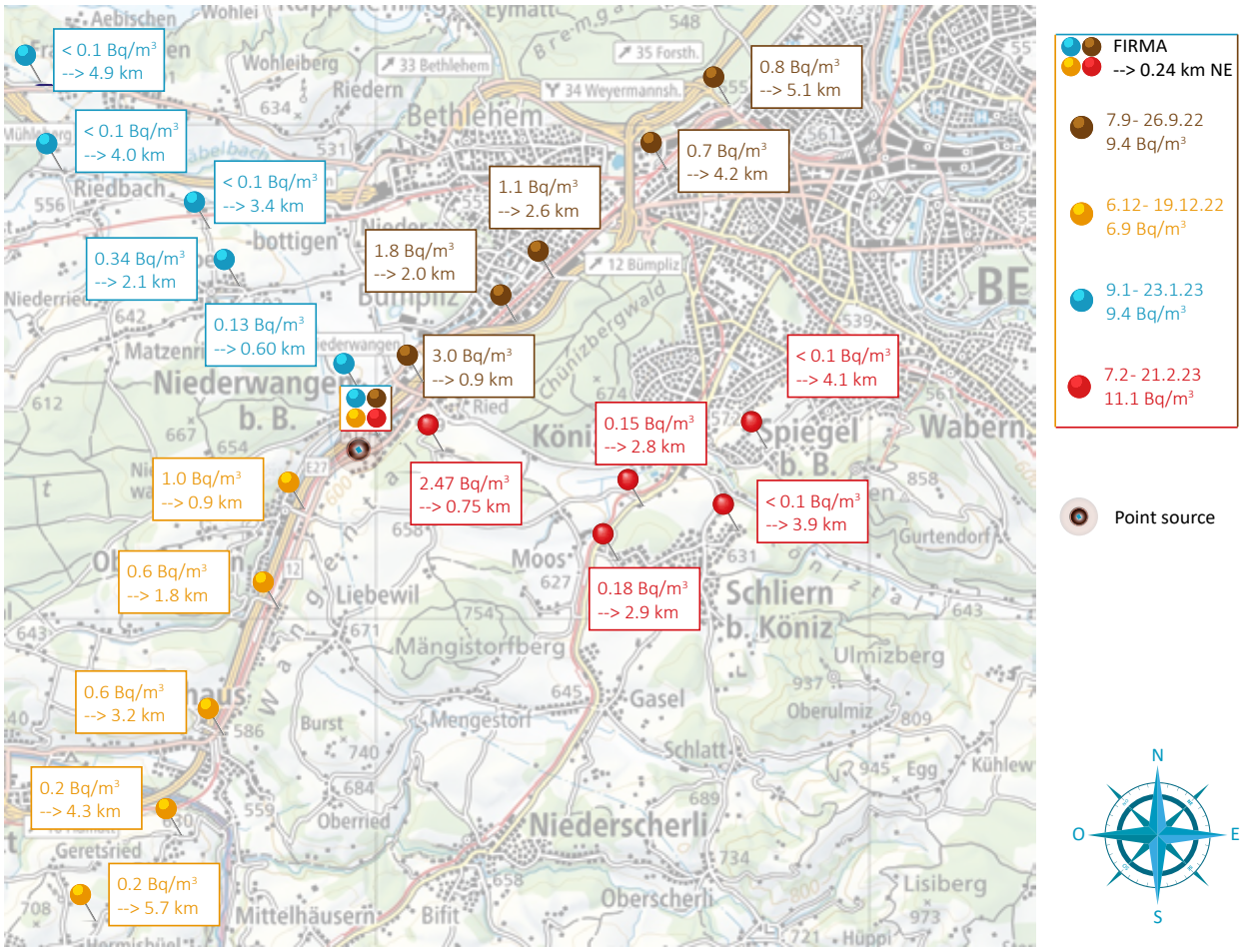


Figure 1 :
Emplacements et concentrations du ^3H en Bq/m³ dans l'air – environnement proche (< 5 km); la distance de chaque piégeur par rapport au point d'émission est également indiquée. Remarque: ces séries de mesure ont été réalisées entre le 7.9.22 et le 21.2.23. La valeur indiquée au point Firma correspond aux différentes périodes de prélèvement. La valeur moyenne pour toutes les périodes analysées est de: 9.2 ± 1.7 Bq/m³.

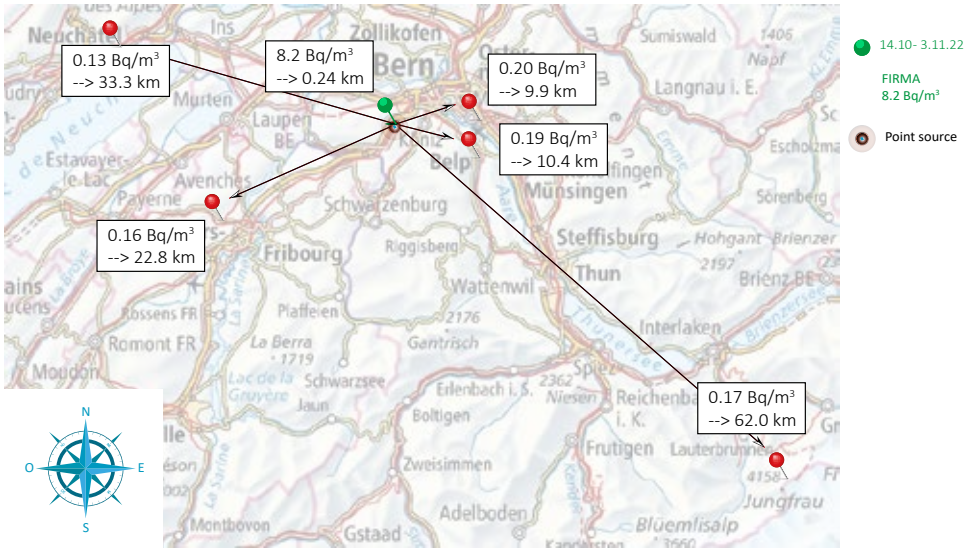


Figure 2 :
Emplacements et concentrations du ^3H en Bq/m³ dans l'air – environnement lointain (10 km <> 60 km), la distance de chaque piégeur par rapport au point d'émission est également indiquée. Remarque: cette série de mesure a été réalisée entre le 14.10.22 et le 3.11.22. La valeur indiquée au point Firma correspond à la moyenne de cette période: 8.2 ± 0.12 Bq/m³.

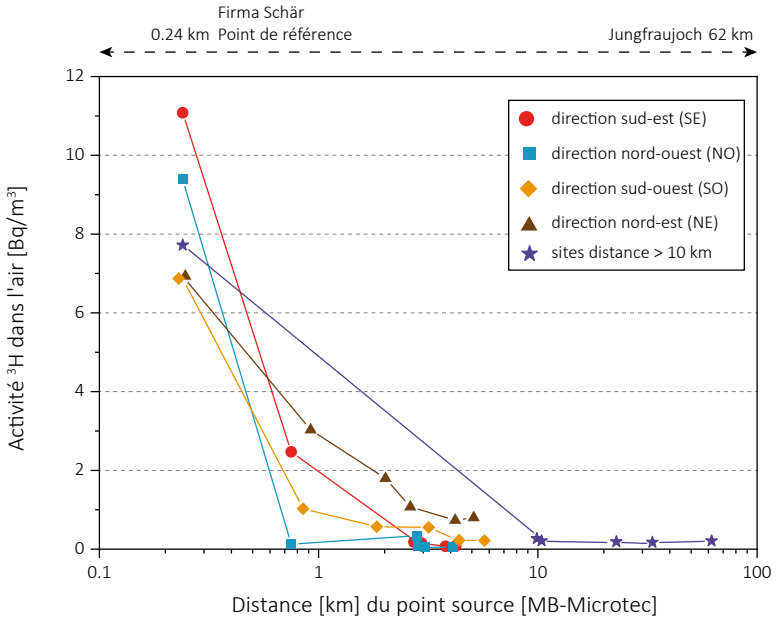


Figure 3 :
Suivi de l'activité ^{3}H en Bq/m^3 dans l'air en fonction de la distance au point d'émmission en km.

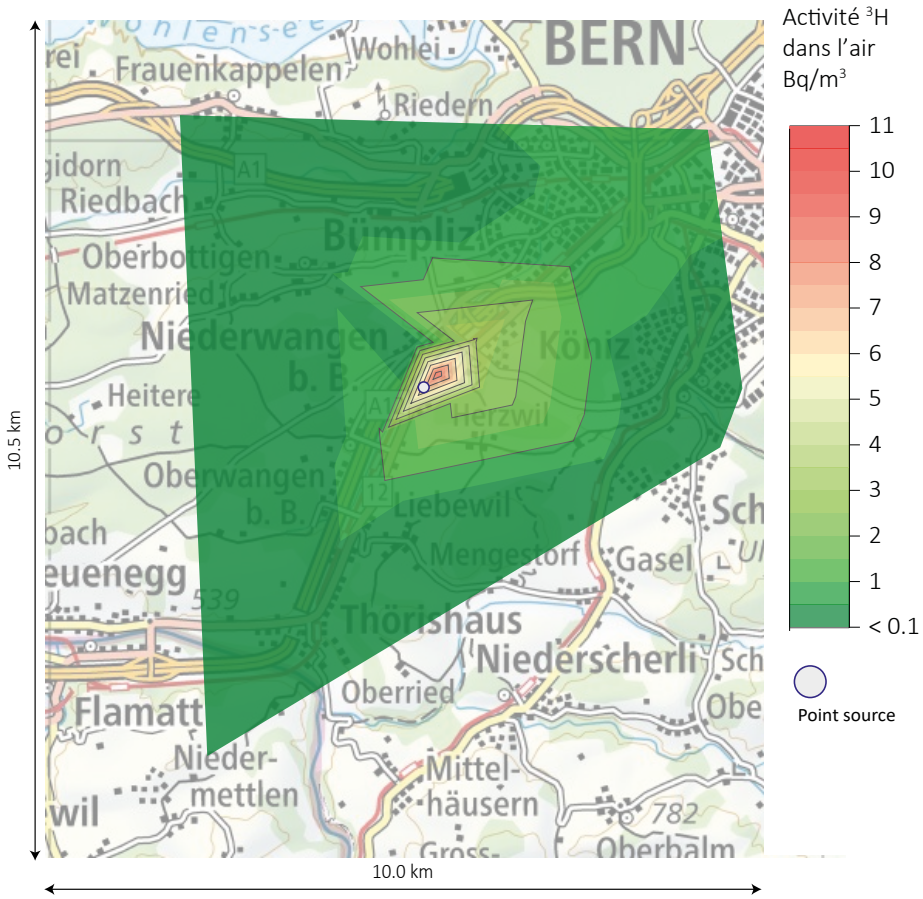


Figure 4 :
Mapping de l'activité ^{3}H en Bq/m^3 dans l'air sur une zone d'environ 50 km^2. N.B cette représentation sous forme de mapping inclut les résultats de toutes les périodes observées (7.9.22 au 21.2.23).

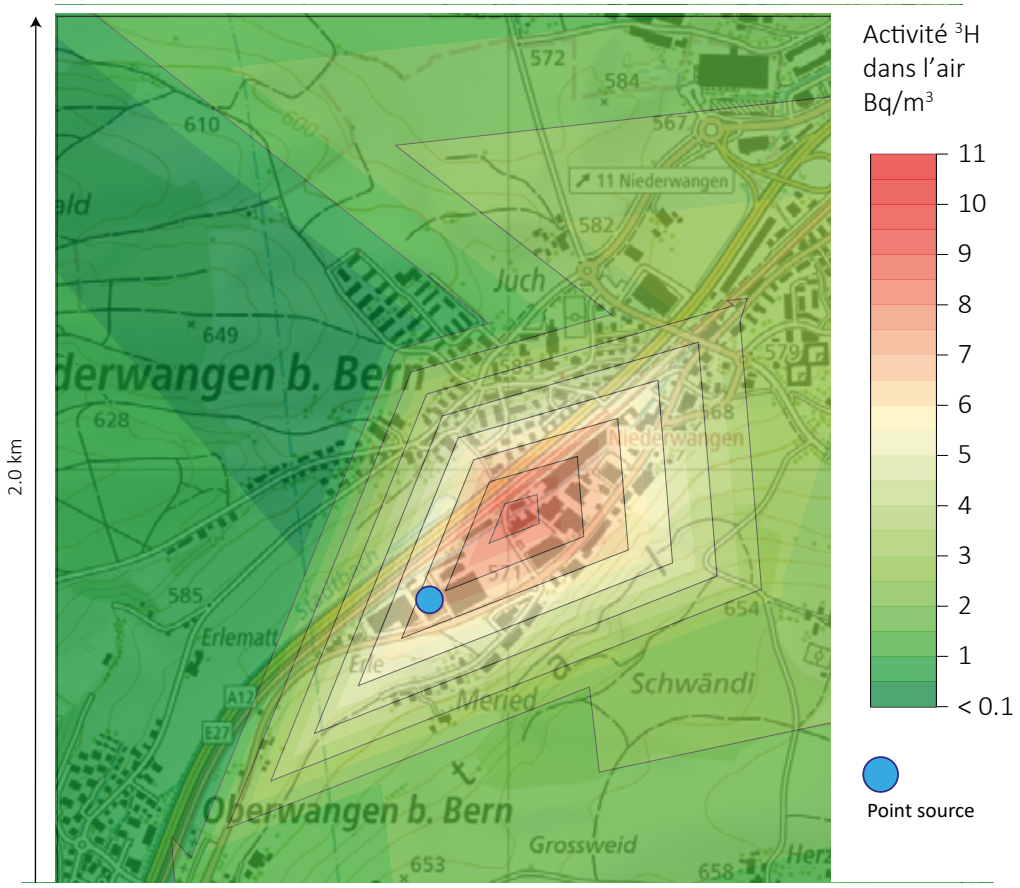


Figure 5:
Mapping de l'activité ^{3}H en Bq/m³ dans l'air sur une zone d'environ 3.2 km². N.B Cette représentation sous forme de mapping inclut les résultats de toutes les périodes observées (7.9.22 au 21.2.23).

Conclusion

Les piégeurs passifs PA3 du tritium sous forme de vapeur d'eau sont très sensibles, permettant d'évaluer des valeurs de concentrations extrêmement faibles. Les résultats obtenus dans cette étude ont été cohérents avec les attentes: les concentrations étaient plus élevées sous les vents dominants et ont diminué avec la distance. Bien que les concentrations mesurées soient restées bien en deçà des limites légales - 2'000 Bq/m³ de HTO, correspondant à une dose de 0.3 mSv/an - , le marquage de l'environnement par les activités industrielles était facilement mesurable grâce à la sensibilité de cette technique de mesure.

Pour des mesures visant à vérifier que les limites réglementaires ne sont pas dépassées, l'exercice a confirmé qu'il était suffisant de se concentrer sur les axes des vents dominants. En revanche, pour des études de dispersion détaillées, il est nécessaire de multiplier les mesures dans toutes les directions pour obtenir une cartographie précise de la dispersion du tritium, impliquant un nombre important de piégeurs déployés en parallèles. Considérant la dépose et la collecte d'échantillons, les mesures d'humidité dans l'air ambiant et les activités en laboratoire impliquant désorption et mesures par scintillation liquide, l'exercice s'avère exigeant en ressources.

9.6
Plan d'action Radium 2015-2023

M. Palacios, E. Christen, G. Di Tommaso, S. Estier, T. Flury, C. Stalder, D. Storch
Risques radiologiques, Division Radioprotection, Berne

Résumé

Le Plan d'action radium 2015 - 2023 vise à régler le problème des héritages radiologiques liés à l'application de peinture luminescente au radium dans l'industrie horlogère jusque dans les années 1960. L'année 2023 a été marquée par la clôture de l'ensemble des diagnostics et des assainissements dans les anciens ateliers de posage du radium, l'occasion ici de dresser un bilan final de ces travaux. Par ailleurs, l'OFSP a élaboré une directive pour concrétiser les mesures de radioprotection à mettre en œuvre en cas d'ouverture d'une ancienne décharge susceptible de contenir des déchets au radium, en collaboration avec la Suva, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et les cantons concernés.

Diagnostic et assainissement des anciens ateliers de posage du radium

Le plan d'action a pour objectif d'identifier les biens-fonds dans lesquels de la peinture au radium était manipulée ainsi que de procéder à leur assainissement en cas de dépassement du niveau de référence fixé à 1 millisievert (mSv) par an pour les occupants selon l'article 148 de l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP). Pour les jardins, un assainissement s'avère nécessaire si la concentration de radium dans le sol dépasse le seuil de 1'000 becquerels par kilogramme (Bq/kg) fixé dans le plan d'action.

Les recherches historiques ont permis de dresser un inventaire d'environ 1'100 biens-fonds principalement situés dans l'Arc jurassien, dans lesquels d'anciens ateliers de posage de peinture au radium étaient implantés (voir Recherches historiques (admin.ch) [1]). L'inventaire est constitué à 60% de petites entreprises et d'ateliers à domicile et à 40% de fabriques horlogères. Près de 80% de ces biens-fonds sont actuellement alloués à des fins d'habitation. Au total, 1'093 biens-fonds ont fait l'objet d'un diagnostic du radium, dont plus de 50 en 2023 (voir tableau 1). Ainsi, l'OFSP a examiné la quasi-totalité des biens-fonds de l'inventaire. Seuls les propriétaires de sept biens-fonds ont refusé le diagnostic ou n'ont jamais réagi aux courriers de l'OFSP. Les diagnostics ont révélé une nécessité d'assainissement dans 163 des 1'093 biens-fonds examinés (soit 93 locaux intérieurs et 109 jardins), portant ainsi la fraction des biens-fonds à assainir à 15%. Dans ces 93 locaux, les doses efficaces calculées pour les occupants étaient comprises entre 1 et 20 mSv/an selon les cas. Les concentrations maximales de radium mesurées dans les échantillons de sol prélevés dans les 109 jardins à assainir étaient en moyenne de 26'500 Bq/kg. Dans un cas, elles avoisinaient les 670'000 Bq/kg.

Tableau 1 :
Résultats globaux des diagnostics et des assainissements dans les anciens ateliers de posage du radium.

Les résultats globaux montrent que la plupart des diagnostics et des assainissements dans des anciens ateliers de posage du radium ont été effectués dans les cantons de BE, NE et SO, mais que d'autres cantons, tels que BL, GE, VD et ZH, sont aussi concernés.

Canton	Nombre de biens-fonds examinés	Nombre de biens-fonds assainis
BL	15	3
BS	1	0
BE	326 (205)*	62 (42)
GE	38	2
JU	29	0
LU	4	0
NE	452 (356)**	57 (49)**
SG	1	0
SH	1	1
SO	184	34
TI	8	0
VD	25	1
ZH	9	1
Total	1'093	161

** 326 biens-fonds examinés dont 205 à Bienne*
62 biens-fonds assainis dont 42 à à Bienne
*** 452 biens-fonds examinés dont 356 à La Chaux-de-Fonds*
57 biens-fonds assainis dont 49 à La Chaux-de-Fonds

Tous les biens-fonds contaminés ont pu être assainis à deux exceptions près: il s'agit d'une part d'un refus d'un propriétaire et d'autre part d'un assainissement d'un site industriel fortement contaminé au radium et chimiquement, dont la complexité nécessite un projet dédié en dehors du plan d'action. Les travaux de décontamination sont mis en œuvre par des entreprises spécialisées sur mandat de l'OFSP (voir figure 1). La présence de pollutions mixtes (chimique et radiologique) a été constatée dans près de 20% des jardins à assainir. L'OFSP a coordonné au cas par cas l'assainissement de ces parcelles avec les cantons concernés (ainsi qu'avec l'OFEV et la Suva pour les cas complexes). De plus, l'OFSP a mis en place des collaborations avec le Laboratoire de Spiez et l'entreprise Econetta pour l'analyse de polluants chimiques sur les échantillons contaminés au radium.

Figure 1 :
Assainissement lié au radium dans une habitation.

Environ 4'400 m³ de déchets inertes issus d'assainissement ont été éliminés en décharge conformément à l'article 114 ORaP, le critère d'activité spécifique de 10'000 Bq/kg pour le ^{226}Ra étant respecté (voir figure 2). De plus, plus de 250 m³ de déchets combustibles ont été éliminés en usine d'incinération conformément à l'article 116 ORaP, qui fixe une activité hebdomadaire maximale de 2 MBq pour le ^{226}Ra. Enfin, près de 7 m³ de déchets avec une activité supérieure aux valeurs susmentionnées ont été conditionnés comme déchets radioactifs et acheminés sous contrôle de l'OFSP au Dépôt intermédiaire fédéral. Une campagne de décontamination de déchets spéciaux, principalement métalliques, a par ailleurs été lancée en automne 2023 en collaboration avec une entre-

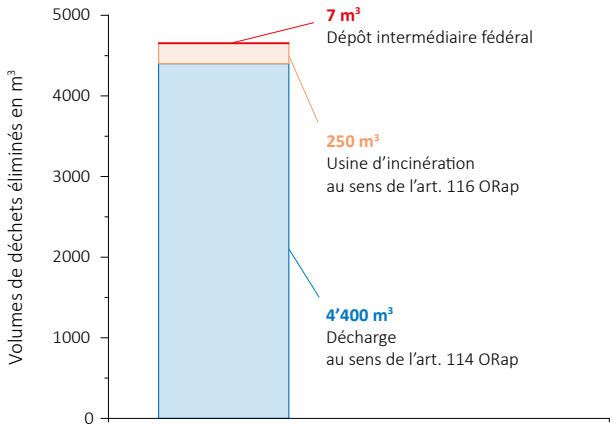


Figure 2 :
Volumes de déchets éliminés dans le cadre du Plan d'action radium entre 2015 et 2023

prise de décontamination. Les déchets spéciaux sont décontaminés mécaniquement dans une cabine de sablage, puis contrôlés dans une chambre de mesure avant leur élimination.

Anciennes décharges susceptibles de contenir des déchets au radium

Le plan d'action a d'une part pour objectif de recenser les anciennes décharges susceptibles de contenir des déchets contaminés au radium et d'autre part, de définir des mesures de radioprotection appropriées, en particulier pour les travailleurs et l'environnement (voir figure 3). Dans ce cadre, l'OFSP a élaboré une méthode pour identifier les anciennes décharges concernées et définir les actions requises en fonction de trois niveaux de risque. Les résultats de ces travaux, menés en collaboration avec l'OFEV, la Suva et les cantons, sont détaillés dans un rapport technique, disponible sous Héritages au radium dans des décharges (admin.ch) [2]. Les cantons principalement concernés (Berne, Genève, Jura, Neuchâtel et Soleure) ont procédé à la classification de leurs anciennes décharges selon le processus défini. Plus de 250 anciennes décharges ont ainsi été identifiées comme nécessitant des mesures de radioprotection des travailleurs et de l'environnement lors de futurs travaux d'excavation. L'OFSP a élaboré une directive pour concrétiser les mesures de radioprotection à mettre en œuvre en cas d'ouverture d'une décharge susceptible de contenir des déchets au radium. La Suva, l'OFEV et les cantons concernés ont été consultés en 2023. La directive sera publiée en 2024.

Figure 3 :
Surveillance radiologique lors de travaux d'excavation dans une ancienne décharge susceptible de contenir des déchets au radium.

Clôture du Plan d'action radium 2015-2023

En été 2023, l'OFSP a mandaté l'entreprise EBP Schweiz AG pour une évaluation externe du plan d'action. Cette étude inclut des interviews d'acteurs clef du plan d'action et une enquête en ligne auprès des personnes directement concernées par des assainissements, ainsi que des responsables cantonaux et communaux. Sur la base de ces résultats, l'OFSP élaborera en collaboration avec l'OFEV un rapport final à l'intention du Conseil fédéral jusqu'à fin 2024.

Liens:

[1] Recherches historiques (admin.ch)

[2] Héritages au radium dans des décharges (admin.ch)

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

2023

10
Plan d'action sur le radon 2021 – 2030

F. Barazza, E. Christen, M. Palacios, D. Storch
Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Résumé

Dans le cadre du Plan d'action sur le radon 2021 - 2030 [1], l'OFSP a poursuivi les projets et revu les exigences posées aux services de mesure du radon et aux consultants en radon. Cette démarche était nécessaire car cinq ans se sont écoulés depuis l'entrée en vigueur de l'ordonnance sur la radioprotection révisée en 2018. Il a donc fallu renouveler l'agrément de nombreux services de mesure et vérifier si les consultants en radon avaient suivi les formations continues requises.

État d'avancement des travaux des quatre orientations générales

Parc immobilier

L'un des principaux objectifs de l'orientation générale « parc immobilier » consiste à mettre à disposition une plateforme numérique pour soutenir les autorités d'exécution. Il s'agit d'ajouter des informations à la base de données du radon et d'en améliorer la convivialité pour en faire un portail qui propose de nouvelles fonctionnalités. Le projet en question intitulé « Portail du radon 3.0 », a été lancé cette année avec le mandat d'initialisation. Une étude préliminaire doit permettre de définir les exigences et la base nécessaire.

L'OFSP sera présent au salon Swissbau du 16 au 19 janvier 2024 à Bâle, pour traiter de la question du radon, avec un stand d'information et deux événements. Les travaux de préparation ont démarré en 2023. Ce salon attire principalement des personnes issues du secteur de la construction. Les deux événements porteront donc sur les techniques constructives de protection contre le radon ainsi que sur le thème « Énergie et santé » (voir figure 1).

En collaboration avec l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), l'OFSP a lancé un appel d'offres pour la création d'un service « Énergie et santé » dans le cadre d'une procédure OMC. Pour des raisons formelles, il n'a malheureusement pas été possible d'attribuer le marché à l'un des candidats intéressés, certaines exigences du cahier des charges s'étant révélées trop restrictives et strictes. Il s'agit à présent de retravailler les documents de l'appel d'offres et de relancer la procédure.

Figure 1 :
L'OFSP a préparé deux événements sur le thème du radon pour le salon Swissbau 2024 : « Radon dans les bâtiments » ainsi que « Énergie et santé »

Risque sanitaire

Le radon dans les écoles et les jardins d'enfants a fait l'objet de plusieurs parutions et articles dans les médias en 2023. Le risque potentiel pour la santé des enfants suscite bien évidemment l'intérêt du grand public. L'OFSP a donc abordé ce thème lors d'un atelier organisé à l'occasion de la plateforme de coordination annuelle avec les cantons. Des campagnes de mesure sont en cours (ou déjà terminées) dans les écoles et les jardins d'enfants de la plupart des cantons (voir figure 2 sur le nombre de mesures du radon réalisées dans les écoles et les jardins d'enfants entre 2012 et 2023).

Les expériences des cantons concernant la collaboration avec les communes et les autorités scolaires concernées sont très positives. En cas de dépassement du niveau de référence de 300 Bq/m^3, l'assainissement lié au radon est toujours planifié très rapidement, puis implémenté dans les 1 à 10 ans selon l'urgence du cas. Il peut toutefois être difficile pour les cantons d'obtenir des retours concernant le succès des assainissements entrepris, car un suivi approprié est laborieux et chronophage. A noter par ailleurs que le développement prévu d'un outil de prédiction a dû être reporté.

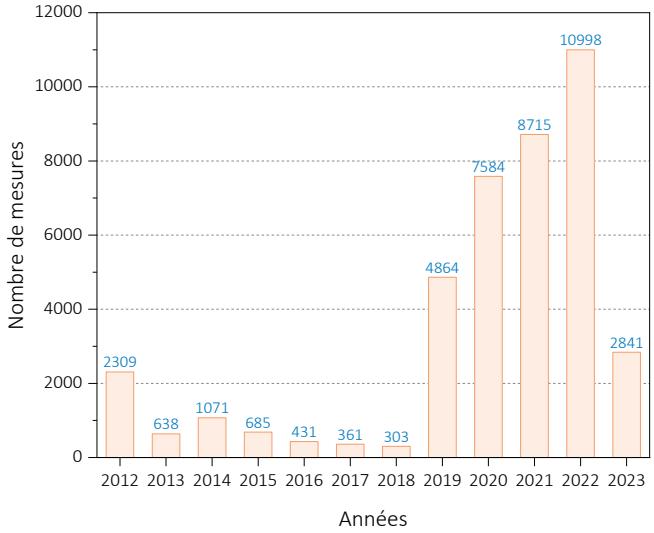


Figure 2 :
Nombre de mesures du radon dans les écoles et les jardins d'enfants depuis 2012 (état : 1er août 2023)

Compétence en matière de radon

L'OFSP a poursuivi le développement de sa plateforme numérique d'apprentissage en collaboration avec les services régionaux sur le radon (Haute école spécialisée du Nord-Ouest de la Suisse à Muttenz, Haute école d'ingénierie et d'architecture à Fribourg et Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana à Mendrisio). Le module de formation «Protection contre le radon dans la construction» a été actualisé et étendu, notamment à la physique du bâtiment. Le volume d'apprentissage ayant augmenté en conséquence, les participants seront informés des contenus pertinents pour l'examen lors de futures formations, afin qu'ils puissent s'y préparer au mieux.

Depuis la révision de l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP), entrée en vigueur en 2018, les services de mesure du radon sont agréés pour une durée de cinq ans. Les agréments de la plupart d'entre eux ont donc dû être renouvelés en 2023. L'OFSP en a profité pour adapter les exigences en accord avec les cantons. Afin de simplifier le système, l'OFSP a décidé d'abandonner les compétences de mesure qui définissaient jusqu'ici les lieux où les services étaient habilités à mesurer (logements, écoles et jardins d'enfants, postes de travail ou postes de travail exposés au radon), représentant ainsi un pas important vers l'objectif « radon par un seul prestataire ». Pour atteindre un niveau de compétences uniforme, l'OFSP a organisé une formation continue obligatoire pour tous les services de mesure dont l'agrément avait expiré. Ce cours sera également proposé dans les années à venir. Tous les services agréés doivent en outre employer au moins un consultant ou une consultante en radon, ce qui est déjà le cas pour la plupart d'entre eux. Sur les 93 services de mesure du radon disposant actuellement d'un agrément, 79 ont demandé de figurer sur la liste officielle, disponible sous Mesurer la concentration en radon (admin.ch) [2]. Depuis 2018 également, les consultants en radon qui souhaitent figurer sur la liste officielle publiée sous Conseil par des spécialistes en radon (admin.ch) [3], doivent suivre 8 heures de formation continue au moins tous les 5 ans. Après vérification, l'OFSP a constaté que de nombreux consultants n'avaient pas remplis cette exigence ; la plupart d'entre eux a toutefois comblé cette lacune au cours de l'année sous revue. On compte actuellement 205 consultants en radon sur la liste officielle.

Protection des travailleurs

En 2023, l'accent a été mis sur les travaux préparatoires visant à développer un protocole pour les mesures de radon liées à la personne dans le cadre professionnel, particulièrement adapté pour le personnel mobile. Une étude de petite envergure, menée par la Suva en collaboration avec l'Institut fédéral de métrologie (METAS), a examiné la réactivité des dosimètres passifs, afin de savoir s'ils mesuraient correctement de fortes concentrations de radon sur de courtes périodes, comme c'est souvent le cas dans les réservoirs d'eaux. Seuls quelques dosimètres ont abouti à un résultat correct, le niveau de de référence du radon étant généralement surestimé.

À point nommé pour le changement de système relatif aux services de mesure agréés, l'OFSP a ajouté la possibilité de saisir des mesures aux postes de travail exposés au radon dans la base de données du radon. On retrouve donc le protocole de mesure associé dans la base de données, permettant d'obtenir une estimation automatique de la dose annuelle d'un employé « standard ».

Perspective

Des indicateurs doivent être définis pour aider à évaluer l'atteinte des objectifs du plan d'action, en vue de la rédaction d'un rapport intermédiaire à l'intention du Conseil fédéral en 2025. De tels indicateurs sont également discutés dans le cadre de groupes de travail dirigés par les organisations internationales afin d›évaluer la mise en œuvre des plans d›action nationaux. Une conférence nationale sur le radon et la qualité de l›air intérieur sera organisée en 2025 par un petit groupe de travail, intégrant notamment la Ligue suisse contre le cancer.

Référence:

[1] Plan d'action sur le radon 2021-2030

[2] Mesurer la concentration en radon (admin.ch)

[3] Conseil par des spécialistes en radon (admin.ch)

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*

2023

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	F. Bochud, M. Straub, P. Froidevaux, P.A. Pittet, F. Barraud, C. Ruslan
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 Umweltphysik, 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 Gräubernstrasse 12, 4410 Liestal
BS	**P. Hübner, A. Pregler**	Kantonales Laboratorium Kannenfeldstr. 2, Postfach, 4012 Basel
FR	**X. Guilaume**	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 Steinhausen
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-Aerosolsammer 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 $\mu Bq/m^3$ bzw. 0.1 $\mu Bq/m^3$ 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 Tritiumbestimmung; 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 Grossverteiler	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 Milchzähnen
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	URA (BAG), IRA und LABOR SPIEZ
	Aeroradiometrie	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	PSI, IRA
	automatische Dosiswarnnetze	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).

$$H_T = \Sigma_R \, w_R \cdot D_{T,R}$$

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 wT gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben.

$$E = \Sigma_T \, w_T \, H_T = \Sigma_T \, w_T \, \Sigma_R \, w_R \, D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ = 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.

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.

Internet-Adresse für die Begriffsbestimmungen der StSV: http://www.admin.ch/ch/d/sr/814_501/app1.html

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);

$H_T = \Sigma_R \, w_R \cdot D_{T,R}$

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

$E = \Sigma_T \, w_T \, H_T = \Sigma_T \, w_T \, \Sigma_R \, w_R \, D_{T,R}$

$D_{T,R}$ = 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 E_{50}
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.

Adresse Internet des définitions de l'ORaP : http://www.admin.ch/ch/f/rs/814_501/app1.html

Impressum

@ Bundesamt für Gesundheit (BAG)
Herausgeber : Bundesamt für Gesundheit
Layout: André Gurtner, URA
Illustrationen Titel- und Innenseiten: erstellt mithilfe von AI Image editor / freepik.com
Publikationszeitpunkt : Juli 2024

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 Image Editor / freepik.com
Date de publication : Juillet 2024

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, Téléfax +41 (0)58 462 83 83
Courriel :str@bag.admin.ch, www.bag.admin.ch/ura-rapports, www.radenviro.ch