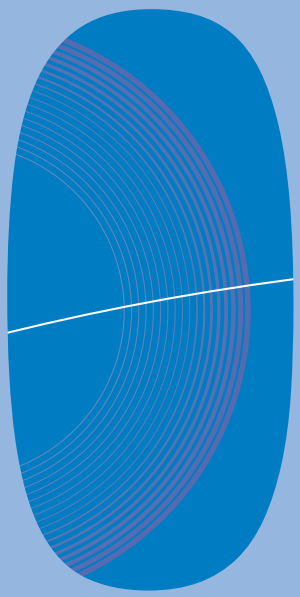
2022



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



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

2022

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 2022.

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 2022 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

2022

Sommaire

1 Surveillance de l'environnement : Résumé 10

2 Exposition de la population suisse aux rayonnements ionisants..... 41

Réévaluation de la dose due aux rayons cosmiques..... 46

3 Rayonnement externe 53

Mesures in situ & exposition externe..... 54
Réseau NADAM..... 59
Mesures d'aéroradiométrie..... 69

4 Environnement 75

Aérosols et précipitations..... 76
URAnet Aero..... 80
Surveillance de la radioactivité de l'air avec des avions militaires..... 86
Systèmes aquatiques..... 89
URAnet Aqua..... 94
Tritium monitoring..... 96
Sols et Herbes... 100

5 Radioactivité dans les denrées alimentaires 104

6 Radioactivité dans le corps humain..... 112

^{90}Sr, ^{210}Po et ^{226}Ra dans les vertèbres et ^{90}Sr dans les dents de lait.....114

7 Mesures de nucléides spéciaux 118

Carbone-14, Krypton-85, Argon-37..... 120
Plutonium et Américium..... 130

8 Surveillance des installations nucléaires 138

Emissions et Immissions..... 140
Dose ambiante et débit de dose ambiante..... 151
MADUK..... 152
ZWILAG..... 156
Installations nucléaires et environnement..... 159
CERN - rejets et environnement..... 167
CERN - mesures OFSP..... 173

9 Industries et hôpitaux 180

Emissions des industries..... 182
Emissions des hôpitaux..... 185
Industries, stations épuration, usines incinération..... 189
Radionucléides médicaux..... 196
Plan d'action radium 2015-2023..... 200

10 Plan d'action Radon 202

11 Annexes 208

2022

Inhaltverzeichnis

1 Umweltüberwachung : Zusammenfassung 22

2 Strahlenexposition der Bevölkerung 36

Neuabschätzung der Dosis durch kosmische Strahlung..... 46

3 Externe Strahlung 53

In situ Messungen..... 54
Netzwerk NADAM..... 59
Aeroradiometrische Messungen..... 69

4 Umwelt 75

Aerosol und Niederschlag..... 76
URAnet Aero..... 80
Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen..... 86
Aquatische System..... 89
URAnet Aqua..... 94
Tritium-Monitoring..... 96
Boden und Gras... 100

5 Radioaktivität in Lebensmittel 104

6 Radioaktivität im Menschen 112

^{90}Sr, ^{210}Po et ^{226}Ra in den Wirbeln und ^{90}Sr in den Milchzähnen.....114

7 Messung von Spezialnukliden 118

Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37..... 120
Plutonium und Americium..... 130

8 Überwachung der Kernanlagen 138

Emissionen und Immissionen..... 140
Ortsdosis und Ortsdosisleistung..... 151
MADUK..... 152
ZWILAG.... 156
Nukleare Anlagen und Umwelt..... 159
CERN - Emissionen und Umwelt..... 167
CERN - BAG-Messungen..... 173

9 Industrien und Spitäler 180

Emissionen der Betriebe..... 182
Emissionen der Spitäler..... 185
Industrien, Kläranlagen, Verbrennungsanlagen..... 189
Radionukliden aus der Medizin..... 196
Aktionsplan Radium 2015-2023..... 200

10 Aktionsplan Radon 202

11 Anhänge 208

Surveillance Environnement Résumé



Umwelt Überwachung Zusammenfassung

- Tâches et programme de mesure
- Résultats de la surveillance 2022
- Evaluation

- Auftrag und Messprogramm
- Ergebnisse der Umweltüberwachung 2022
- Beurteilung

2022

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 dé-

bit 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 remplace l'ancien réseau RADAIR, mis en service après l'accident de Tchernobyl devenu obsolète. 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.

Le réseau URAnet aero est capable de détecter des niveaux de radioactivité largement plus faibles que son prédécesseur : limite de détection de l'ordre de 3 à 7 milli-becquerels par mètre cube (mBq/m^3) pour le césium-137 (^{137}Cs) sur une mesure de 12 heures. Une telle sensibilité rend possible la détection automatique 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 dédié à la surveillance des eaux de l'Aar et du Rhin (URAnet aqua), qui comprend cinq sondes aquatiques, est opérationnel depuis 2015.

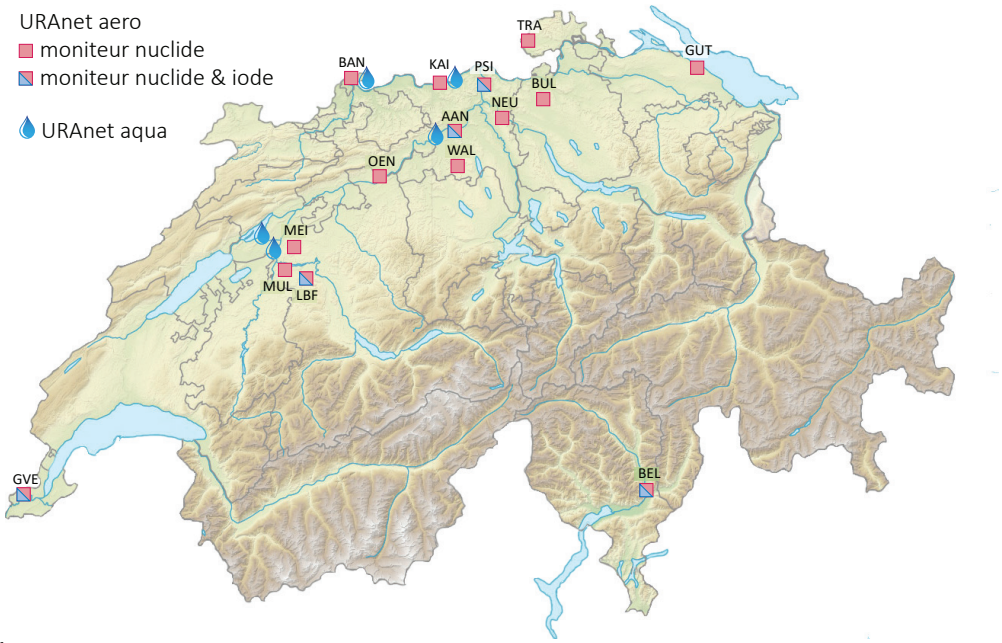


Figure 1:
Réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air (URAnet aero) et dans les cours d'eau (URAnet aqua).

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, plus sensible et mesurant les concentrations individuelles des différents radionucléides (gamma) présents dans l'air, devrait être opérationnelle d'ici fin 2024. Elle sera raccordée au réseau SwissMetNet de MétéoSuisse comme les autres stations du réseau URAnet, garantissant un accès permanent aux résultats de mesure. Les vols à haute altitude effectués depuis plus de 50 ans avec des avions militaires de l'armée suisse seront, quant à eux, interrompus après la mise à l'arrêt des avions de chasse Tiger. En effet, l'adaptation des appareils de collecte sur les avions F/A-18 coûterait environ 10 millions de francs, un investissement jugé disproportionné par le Conseil fédéral. L'expérience a montré que, pour évaluer le risque sanitaire de la population, la plus-value de ces vols de collecte est généralement limitée par rapport aux mesures effectuées à une altitude plus basse, comme au Jungfraujoch. Une coopération internationale reste toutefois à envisager concernant les analyses scientifiques pour lesquelles les mesures réalisées par des avions à haute altitude se révèlent utiles.

Résultats de la surveillance 2022

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 2022 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 ou le ^{210}Pb. A noter que les plus fortes concentrations du ^{7}Be dans l'air ont été enregistrées au mois de mars. La très faible pluviométrie observée durant ce mois pourrait en être la cause, car la pluie, par effet de lessivage, contribue à réduire les concentrations de ^{7}Be dans l'air. Hormis les radionucléides d'origine naturelle, d'infimes concentrations de radioactivité artificielle, en particulier de ^{137}Cs, 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 en Suisse après l'accident de Tchernobyl et qui est encore présent dans les 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 2022, des traces de ^{137}Cs ont également été décelées dans les précipitations, 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 au cours de l'année 2022, marquée par un manque persistant de pluviométrie, en est probablement la cause. Dans les rivières en revanche des traces de ^{137}Cs sont observées chaque année et proviennent de l'érosion des sols.

La teneur en tritium d'origine naturelle est généralement inférieure à 2 Bq/l dans les précipitations et les eaux

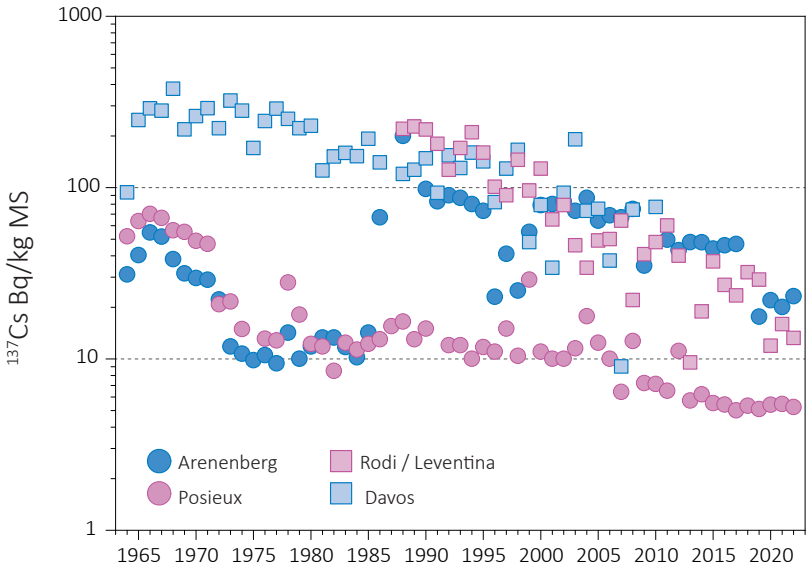


Figure 2:
^{137}Cs (en Bq/kg de matière sèche) dans les échantillons de sol de différentes stations de Suisse (1964 - 2022).

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 2) et le ^{90}Sr sont toujours légèrement supérieures à celles du Plateau. Quant aux émetteurs alpha artificiels, comme le ^{239}Pu, le ^{240}Pu et l' ^{241}Am, il n'en subsiste que d'infimes traces dans le sol.

Dans l'herbe et les denrées alimentaires d'origine végétale, c'est aussi le ^{40}K naturel qui domine. Les radionucléides artificiels comme le ^{137}Cs ou le ^{90}Sr (voir figure 3), qui sont absorbés par les plantes à travers leurs racines, ne sont décelables dans l'herbe que sous forme de traces. Leur répartition régionale est similaire à celle enregistrée pour le sol.

Dans le lait de vache, 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 2022 a présenté une activité en ^{137}Cs >1 Bq/l ; la teneur en ^{137}Cs s'élevait à 16 Bq/l dans cet échantillon provenant des Centovalli était toutefois nettement inférieure à la valeur maximale de 600 Bq/kg admise pour le ^{137}Cs selon l'Ordonnance Tchernobyl. Ces traces de ^{137}Cs proviennent essentiellement des retombées de 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, 36 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 2022, avec une valeur maximale de 0.26 Bq/l et une valeur médiane de 0.014 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.

Aucune trace de ^{137}Cs n'a par ailleurs été décelée dans les 18 échantillons de céréales et les 50 échantillons de fruits et légumes indigènes analysés en 2022 (limites de détection typiquement de 0.4 Bq/kg). Les valeurs de ^{90}Sr mesurées dans les céréales, situées entre 0.03 et 0.24 Bq/kg avec une moyenne de 0.09 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 2022, 1'019 sangliers ont ainsi fait l'objet d'une mesure de tri, réalisée sur place à l'aide d'un instrument dosimétrique. Vingt-quatre animaux, soit env. 2% des cas, dépassaient la valeur maximale

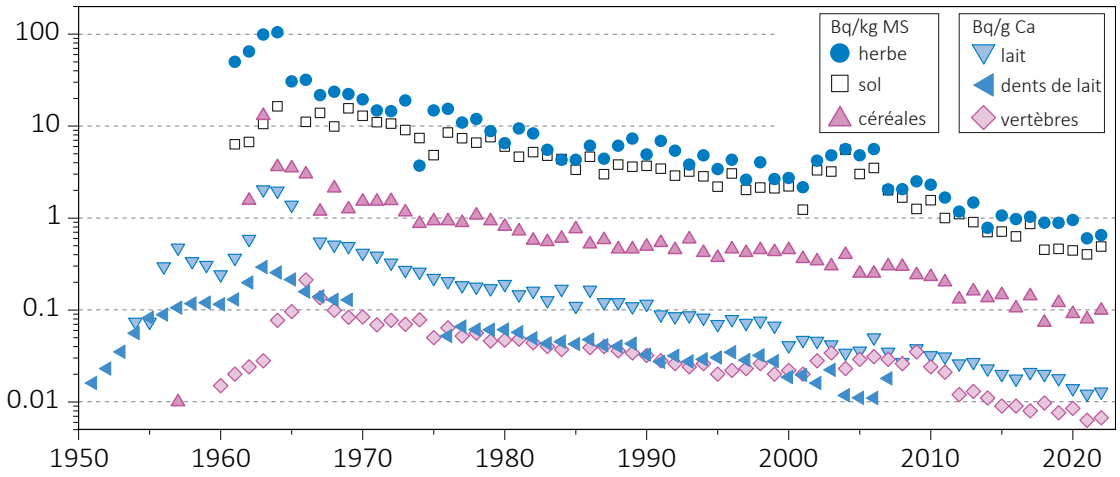


Figure 3:
^{90}Sr (strontium-90) dans divers échantillons prélevés entre 1950 et 2022.

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 1'368 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 137Cs dans leur viande.

Les concentrations de ^{137}Cs mesurées par le canton de Berne dans 16 échantillons de viande de gibier en provenance de Suisse sont restées faibles, avec une valeur maximale de 6 Bq/kg.

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 203 échantillons de champignons indigènes analysés en 2022 par les cantons des Grisons, de Zurich et de Bâle-Ville. La valeur maximale enregistrée s'est élevée à 173 Bq/kg (masse fraîche), et la valeur moyenne à 14 Bq/kg. Les dix échantillons avec les teneurs les plus élevées de ^{137}Cs provenaient pour moitié des cantons des Grisons et de Zurich.

Dans les autres denrées alimentaires indigènes analysées par les laboratoires cantonaux (fromages, yaourts, fruits et légumes), les concentrations de ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 0.3 Bq/kg).

Suite à l'accident de Fukushima-Daichi, la Suisse comme l'Union Européenne, a 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. En 2022, seuls 4 échantillons de denrées alimentaires (algues et herbes marines) en provenance du Japon ont encore été analysés. Aucun n'a présenté de trace de radionucléide d'origine artificielle.

Comme chaque année, les laboratoires cantonaux (BE, BS, GR, TI et ZH) ont effectué des analyses sur des denrées alimentaires importées: 217 échantillons ont ainsi été analysés par spectrométrie gamma en 2022. Dans environ 13% de ces échantillons, des concentrations de ^{137}Cs supérieures à 10 Bq/kg (masse fraîche) ont été mesurées. Parmi les 70 échantillons de champignons importés et analysés, un échantillon de bolet bai d'origine inconnue a présenté la valeur mesurée la plus élevée pour le ^{137}Cs (235 Bq/kg); la valeur moyenne de tous les échantillons de champignons était de 21 Bq/kg. Les 16 échantillons prélevés sur de la viande de gibier importée ont généralement indiqué un marquage au ^{137}Cs; seuls trois échantillons de viande de sanglier étaient toutefois supérieurs à 10 Bq/kg, avec un maximum de 240 Bq/kg pour un spécimen provenant d'Allemagne. Dans les autres échantillons (légumes, noix, poisson, café, fruits et autres), la teneur en ^{137}Cs est restée inférieure à 10 Bq/kg, à l'exception de 4 échantillons de myrtilles avec 15 - 183 Bq/kg. Dans 10 de ces échantillons, le canton de Bâle-Ville a également analysé le ^{90}Sr, révélant une seule valeur supérieure à 1 Bq/kg (1.7 Bq/kg dans une boisson fraîche à base de myrtilles). Aucun dépassement de la valeur maximale pour le ^{137}Cs n'a ainsi été enregistré en Suisse dans les denrées alimentaires importées en 2022.

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 2022.

Rappelons que 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 (CNM) est entré en vigueur, seules certaines limites de rejet ont pour l'heure été adaptées. La surveillance de la radioactivité dans l'environnement se poursuit, quant à elle, comme en régime d'exploitation.

Les résultats 2022 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 du ^{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 à Mühleberg, la contribution de l' ^{16}N disparaît, les travaux de démantèlement, tels que ceux qui ont lieu à la CNM, 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 moyenne (calculée sur la base des valeurs trimestrielles mesurées) de la dose ambiante de 0.011 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, par rapport à la station de référence, de 59 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt). A titre indicatif, notons qu'une activité supplémentaire de 100 pour mille de ^{14}C dans les denrées alimentaires induit une dose annuelle supplémentaire de l'ordre de 1 micro-Sv. Le seul autre radionucléide provenant des rejets atmosphériques occasionnellement détecté est le tritium mesuré dans les précipitations, avec des activités très faibles.

Les rejets d'effluents radioactifs liquides par la CNM en 2022 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 de ^{54}Mn ou de ^{60}Co 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 2022, des traces de ^{54}Mn et de ^{60}Co ont ainsi été sporadiquement mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés dans l'Aar (Hagneck et Klingnau) et le Rhin (Pratteln). Les activités mesurées sont très faibles et ne présentent pas de risque sanitaire; elles témoignent de l'efficacité des programmes de surveillance mis en œuvre.

Le ^{137}Cs présent dans les échantillons d'eau et de sédiments de l'Aar et du Rhin, provient quant à lui essentiellement de la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes atomiques des années 60.

Les résultats des mesures de $^{239+240}$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 du tritium dans l'Aar et le Rhin sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l à l'exception de la période avril-mai, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation dans l'Aar (env. 12 Bq/l dans l'Aar à Brugg en avril) et dans une moindre mesure dans le Rhin, en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant la période de révision.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval des centrales nucléaires suisses en 2022 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle. Si des traces d'^{241}Am ont pu être décelées dans un poisson prélevé dans le Rhin, c'est que la masse disponible pour la mesure était beaucoup plus grande que celle des autres échantillons (plus la masse de l'échantillon mesuré est importante, plus la sensibilité de la mesure est élevée). Aucun radionucléide d'origine artificielle n'a été détecté dans les échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Schönenwerd, Böttstein et Hardwald (Muttenz).

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.

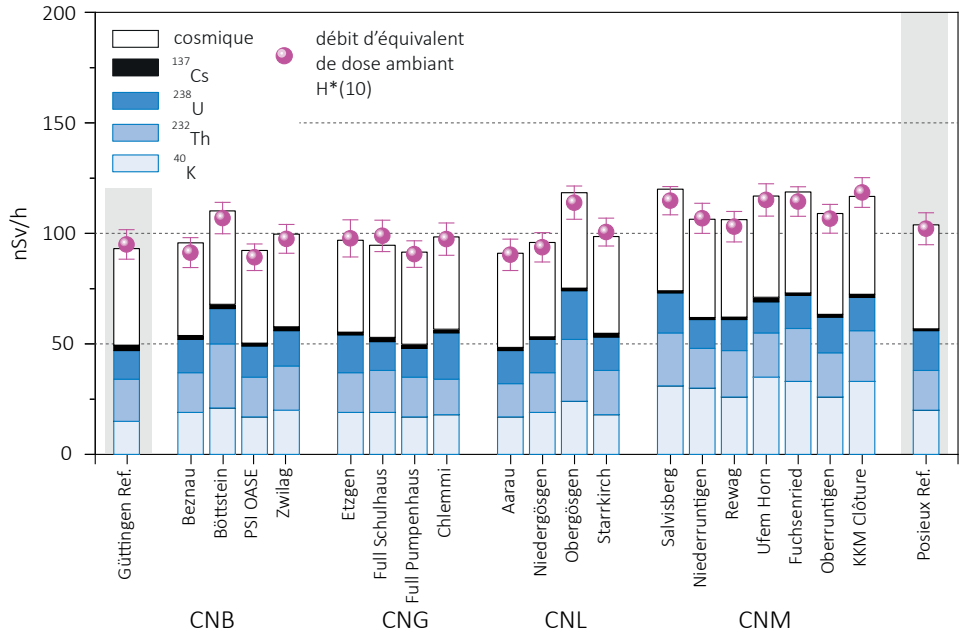


Figure 4:
Contributions individuelles à l'exposition ambiante (H(10)) attribuables aux différents radionucléides présents sur les sites examinés par l'OFSP en 2022 au voisinage des centrales nucléaires suisses ainsi qu'aux sites de référence de Güttingen et Posieux (grisé). Ces contributions ont été 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.*

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

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) 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 2022. Après plusieurs mois de remise en service à une intensité de faisceau relativement faible, le LHC a été pleinement opérationnel à partir du 2ème trimestre 2022.

Le bilan et le contrôle des émissions de ses propres installations effectués par le CERN en 2022, 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 0.004 mSv. Le programme indépendant de surveillance des immissions mis en œuvre par l'OFSP, en collaboration avec le département F.-A. Forel, au voisinage du centre de recherche a confirmé que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement était très faible.

Si des traces des radionucléides de courte demi-vie produits par les installations du CERN, comme les isotopes d'iode (^{134}I, ^{126}I, ^{131}I), ont sporadiquement pu être décelées dans l'air au voisinage du centre de recherche en 2022, leurs concentrations ne représentaient que d'infimes fractions des limites d'immissions dans l'air définies dans l'ORaP. Ainsi, la concentration maximale d'^{131}I (15 µBq/m^3) enregistrée en 2022 atteint seulement 0.002% de la valeur limite d'immission dans l'air pour ce radionucléide.

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

La dose d'irradiation supplémentaire reçue par la population vivant au voisinage du PSI/ZWILAG ne doit pas excé-

der 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 2022 une dose supplémentaire inférieure à 0.008 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, 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 2022, 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.

En 2022, comme par le passé, les résultats de cette surveillance ont montré un marquage significatif de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) par le tritium, à proximité immédiate de ces entreprises, notamment à Niederwangen. Les différentes améliorations techniques engagées depuis 2020 par l'entreprise mb microtec, située dans cette commune, lui ont toutefois permis de réduire ses émissions, se traduisant par une forte diminution des concentrations de tritium enregistrées dans les précipitations en 2020 et 2021. Les niveaux de tritium mesurés dans les échantillons de précipitation prélevés en 2022 à proximité de l'entreprise étaient similaires à ceux de 2020-2021, à quelques exceptions près. En effet, une concentration de près de 2'400 Bq/l a été mesurée fin janvier dans l'échantillon prélevé à proximité immédiate de l'entreprise (station Firma); cette valeur est trois fois supérieure à la valeur maximale enregistrée en 2021, probablement en raison de conditions météorologiques particulières. Les concentrations de tritium mesurées dans l'environnement (précipitations) dépendent ainsi non seulement des quantités de tritium rejetées dans l'atmosphère (émissions), mais également de la direction des vents et des quantités de précipitations.

Les augmentations significatives, mesurées en novembre 2022 dans les quatre stations de surveillance (entre 2 et 4 fois supérieures aux valeurs maximales de 2021 de chacune des stations de surveillance), résultent quant à elle d'une hausse des émissions liée au conditionnement de produits défectueux dans l'entreprise; ces émissions sont toutefois restées bien inférieures aux limites de rejet autorisées. 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 2022 par le canton de Berne à proximité de l'entreprise se sont échelonnées entre 5 et 50 Bq/l et étaient significativement inférieures à celles 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 2022, avec toutefois une légère augmentation en novembre (valeur maximale de 146 Bq/l). La valeur médiane de 45 Bq/l est comparable à celles enregistrées au cours des années précédentes.

En automne 2021, l'OFSP a par ailleurs initié un programme de surveillance du tritium en collaboration avec la Suva dans les précipitations et l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise Smolsys, située à Root/LU, cette dernière disposant d'une autorisation de rejet de tritium dans l'environnement. Les valeurs de tritium enregistrées au voisinage de cette entreprise au cours de cette première année de surveillance sont restées très basses, aussi bien dans les précipitations (valeur maximale de l'ordre de 17 Bq/l) que dans l'humidité de l'air.

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

Héritages radiologiques

En avril 2022, le Conseil fédéral a approuvé la prolongation du plan d'action radium jusqu'à fin 2023, afin de combler le retard accumulé durant la pandémie de COVID-19. Ainsi, les plus de 1'000 biens-

fonds identifiés comme potentiellement affectés par une contamination au radium, utilisé par l'industrie horlogère jusque dans les années 1960, pourront être examinés et, le cas échéant, assainis d'ici fin 2023. L'état d'avancement des travaux du plan d'action est présenté dans ce chapitre.

Projet sectoriel «Bâtiments»
Au 31 décembre 2022, 1'010 biens-fonds regroupant plus de 5'700 appartements (ou objets commerciaux) avaient déjà fait l'objet d'un diagnostic du radium. En cas de dépassement de la dose efficace de 1 mSv par an pour les occupants, un assainissement s'avère 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.

Parmi les 1'010 biens-fonds examinés, 151 (soit environ 15%) doivent être assainis, ce qui représente 90 appartements (ou objets commerciaux) et 100 jardins. Les travaux d'assainissement sont terminés ou en cours dans 138 biens-fonds. Dans les 90 appartements (ou objets commerciaux) ayant fait l'objet d'une décision d'assainissement, les doses estimées se situent entre 1 et 2 mSv/an dans 46, entre 2 et 5 mSv/an dans 29, entre 5 et 10 mSv/an dans 9, entre 10 et 15 mSv/an dans 5 et entre 15 et 20 mSv/an dans 1 appartement.

Les valeurs maximales de radium mesurées dans des échantillons de terre prélevés dans les 100 jardins à assainir s'élèvent en moyenne à env. 30'000 Bq/kg. Dans un cas, elles avoisinent ponctuellement les 668'200 Bq/kg.

La présence de pollutions mixtes (chimique et radiologique) a par ailleurs été constatée dans près de 20% des espaces extérieurs à assainir. L'OFSP coordonne au cas par cas l'assainissement de ces parcelles avec les cantons concernés, ainsi qu'avec l'Office fédéral de l'environnement (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 ARCADIS pour l'analyse de polluants chimiques sur les échantillons contaminés au ^{226}Ra.

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 prépare actuellement une directive visant à concrétiser la mise en œuvre à long terme des processus de surveillance et à clarifier les responsabilités. Il est prévu de publier cette directive en 2023, après consultation des principales parties prenantes.

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 être isolés dans des chambres spéciales pendant les premières 48 heures au moins suivant 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.

D'autres radionucléides comme l' ^{90}Y, mais surtout le ^{177}Lu (demi-vie d'env. 7 jours) sont également utilisés pour des applications diagnostiques et thérapeutiques. Ce dernier, utilisé pour le traitement des cancers de la prostate, est aujourd'hui le radionucléide le plus largement appliqué en médecine nucléaire. Après la forte augmentation de l'activité totale de ^{177}Lu appliquée en Suisse en 2021 (doublement par rapport à 2020), son utilisation en 2022 n'a que très légèrement augmenté (11.1 TBq en 2022 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 0.24 TBq d'équivalent ^{131}I (à comparer aux 2.3 TBq d' ^{131}I appliqués en Suisse en 2022).

La baisse considérable des applications thérapeutiques avec ^{90}Y constatée en 2022 par rapport à l'année précédente est due notamment à des déclarations de ventes erronées et principalement à des raisons liées à la pandémie.

L'utilisation du ^{223}Ra (premières applications en 2013) a, quant à elle, nettement diminué depuis 2017 et est aujourd'hui très faible par rapport à celle d'autres radionucléides.

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 2022 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, ^{177}Lu et ^{223}Ra sont régulièrement mis en évidence dans les particules en suspension prélevées dans le Rhin à Weil am Rhein.

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

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

L'OFSP coordonne également un programme spécifique de prélèvements et de mesures de la radioactivité (émetteurs gamma et ^{3}H) des eaux des STEP ainsi que des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération des déchets. 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, des mesures en continu ont par ailleurs été réalisées en 2022 à l'aide d'une sonde automatique de mesure dans les eaux des STEP de Bellinzona. Etant donné les délais entre le prélèvement et l'analyse, ces radionucléides ne peuvent généralement pas être détectés par le programme usuel de mesures en laboratoire. Les nucléides ^{131}I, ^{177}Lu et ^{111}In n'apparaissent que sporadiquement et à de faibles concentrations dans l'environnement, car ils sont retenus dans les réservoirs de décroissance des hôpitaux jusqu'à ce que la plupart soient désintégrés. Les nucléides à vie très courte ^{99m}Tc et ^{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 de tous les radionucléides ont été en grande partie respectées en moyenne hebdomadaire à l'entrée des STEP. La seule exception a été constatée en juin pour l'^{131}I: la valeur moyenne hebdomadaire pour ce radionucléide a légèrement dépassé la valeur limite d'immission à l'entrée de la STEP, mais pas dans les «eaux accessibles au public» déterminantes lors du déversement des eaux usées épurées dans la rivière.

Les mesures 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.

Toujours dans le cadre de la surveillance des eaux des STEP, le Laboratoire cantonal de Bâle-Ville a mesuré des valeurs inhabituellement élevées de tritium dans les échantillons hebdomadaires d'eaux de la STEP de Bâle entre le 28 novembre et le 10 décembre 2022. La concentration de tritium a atteint 200 Bq/l pour l'échantillon de la semaine du 5 décembre. Cette valeur est 100 fois inférieure à la limite d'immission pour le tritium dans les eaux accessibles au public. Toutefois, les concentrations étant généralement voisines de la limite de détection de 4-5 Bq/l, l'OFSP a mené des investigations pour en déterminer l'origine et a constaté que cette augmentation était due au rejet d'eaux de lavage des fumées de l'usine de traitements des déchets spéciaux Veolia, suite à l'incinération de déchets contenant du tritium. Cette usine dispose d'un accord de l'OFSP pour incinérer jusqu'à 100 GBq de tritium par semaine. Dans le cas en question, il s'avère qu'elle a incinéré des déchets contentant du tritium le 29 novembre et le 5 décembre 2022. En temps normal, les eaux de lavage de l'entreprise Veolia ne sont pas mélangées aux eaux de la STEP, mais arrivent directement à sa sortie pour être ensuite déversées dans le Rhin. Comme le veut la procédure, le système d'évacuation des eaux de lavage a toutefois commuté automatiquement vers la STEP industrielle, puis la STEP communale, en raison de paramètres physico-chimiques anormaux détectés les 1er et 7 décembre 2022. C'est pourquoi une partie de l'activité incinérée a été déversée dans la STEP. Même si ces valeurs sont inhabituelles, elles n'ont pas représenté de risque pour le personnel de la STEP et l'environnement.

La surveillance des usines d'incinération vise à s'assurer, autant que possible, qu'aucun déchet radioactif ne soit accidentellement ou intentionnellement éliminé par le circuit des ordures conventionnelles. A noter que de nombreuses usines d'incinération sont équipées de portique de détection (émetteurs gamma) pour prévenir toute incinération de déchets contaminés par des substances radioactives.

Avec l'entrée en vigueur de la nouvelle ORaP en 2018, les usines d'incinération sont tenues de contrôler, selon une procédure adéquate, l'éventuelle présence d'émetteurs gamma dans les déchets avant leur incinération. Si l'installation systématique de portiques de détection permet de couvrir ces exigences, elle n'empêche pas l'incinération accidentelle de ^{3}H, un émetteur bêta pur qui ne peut être décelé par ces portiques. Des mesures du tritium sont ainsi réalisées dans les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération de grandes agglomérations.

L'OFSP a mesuré un niveau anormalement élevé de tritium (environ 130 kBq/l) dans un échantillon d'eaux de lavage des fumées de l'UIOM de Hagenholz/ZH, collecté entre les 12 janvier et 9 février 2022. Selon l'estimation de l'OFSP, l'activité totale de tritium incinérée s'élève à 370 GBq, soit plus de 1'000 fois la limite d'autorisation fixée à 0.3 GBq pour l'eau tritiée, représentant ainsi une infraction à l'ORaP. Les mesures effectuées par l'OFSP dans l'environnement n'ont toutefois pas révélé d'augmentation significative de la concentration de tritium, confirmant ainsi l'absence de danger pour le public. Une enquête est actuellement en cours pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs dans les ordures conventionnelles a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle.

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

Toujours selon l'art.114, l'OFSP doit mettre en œuvre une surveillance des décharges dans lesquelles de tels déchets ont été stockés définitivement, pour assurer le respect des limites de doses efficaces autorisées. Cette surveillance est réalisée en mesurant le ^{226}Ra dans les eaux de percolation et/ou les eaux souterraines. Pour garantir le respect des limites de dose prescrites par la législation, il est nécessaire que la limite d'immission dans les eaux soit respectée dans les eaux de percolation de la décharge (voir « Directives art. 114 »). La limite d'immission pour le ^{226}Ra dans les eaux est fixée à 580 mBq/l. Les résultats des mesures effectuées en 2022 ont confirmé que les concentrations de ^{226}Ra dans les eaux de percolation des décharges dans lesquelles des déchets contenant du ^{226}Ra ont été éliminés ces dernières années sont faibles et bien inférieures à la valeur limite d'immission.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 9.3 et 9.4.

Radioactivité assimilée par le corps humain

L'assimilation de radionucléides par l'intermédiaire de la nourriture peut être recensée 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 aux hôpitaux universitaires genevois pendant près de 40 ans, il est possible de déterminer les activités du ^{40}K présent naturellement dans le corps humain : celles-ci s'élèvent en moyenne à environ 56 Bq/kg chez les femmes et à 71 Bq/kg chez les hommes. La teneur en ^{90}Sr dans les vertèbres et les dents de lait n'est plus aujourd'hui que de l'ordre de la dizaine de mBq/g de calcium (figure 3). Le strontium est assimilé par le corps humain comme le calcium dans les os et les dents. Les vertèbres sont choisies comme indicateur de la contamination du squelette, car ce sont des os particulièrement spongieux, échangeant rapidement le calcium avec le plasma sanguin. Le prélèvement de vertèbres sur des personnes décédées dans l'année en cours permet de déterminer le niveau de contamination de la chaîne alimentaire en ^{90}Sr. Quant à la formation des dents de lait, elle débute, dans les mois précédant la naissance et se poursuit durant la période d'allaitement. La mesure du strontium s'effectue lorsque la dent de lait tombe d'elle-même. Elle donne une indication rétroactive de la contamination de la chaîne alimentaire de la mère à l'époque de la naissance de l'enfant. Les valeurs de strontium mesurées dans les dents de lait (figure 3) sont donc répertoriées en fonction de l'année de naissance de l'enfant. Ceci explique que les courbes relatives aux dents de lait et au lait montrent une évolution pratiquement parallèle. Notons que le programme de mesure de ^{90}Sr dans les dents de lait touche probablement à sa fin : les activités sont aujourd'hui très basses (< 10 mBq/g 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.

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 2022 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 plus de 35 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 2022 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. La réduction globale des émissions de tritium dans l'environnement par l'entreprise concernée depuis deux ans a toutefois conduit à une forte baisse des niveaux de tritium enregistrés en 2022 dans les denrées alimentaires par rapport aux années précédentes. Quant aux rejets d'effluents radioactifs liquides par les hôpitaux, la surveillance a montré que les limites d'immission sont très généralement respectées déjà à l'entrée des stations d'épuration des grandes villes.

La surveillance de la radioactivité dans les eaux des stations d'épuration, les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération ainsi que les eaux de percolation des décharges n'a pas révélé de valeur susceptible de représenter un risque pour la santé des professionnels qui y travaillent ou pour l'environnement. Toutefois, quelques concentrations anormalement élevées de tritium ont pu être décelées en 2022, notamment dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz/ZH, en raison de l'incinération de déchets contenant de grandes quantités de tritium éliminés illégalement, ou dans une moindre mesure dans les eaux de la STEP de Bâle. 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.

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 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

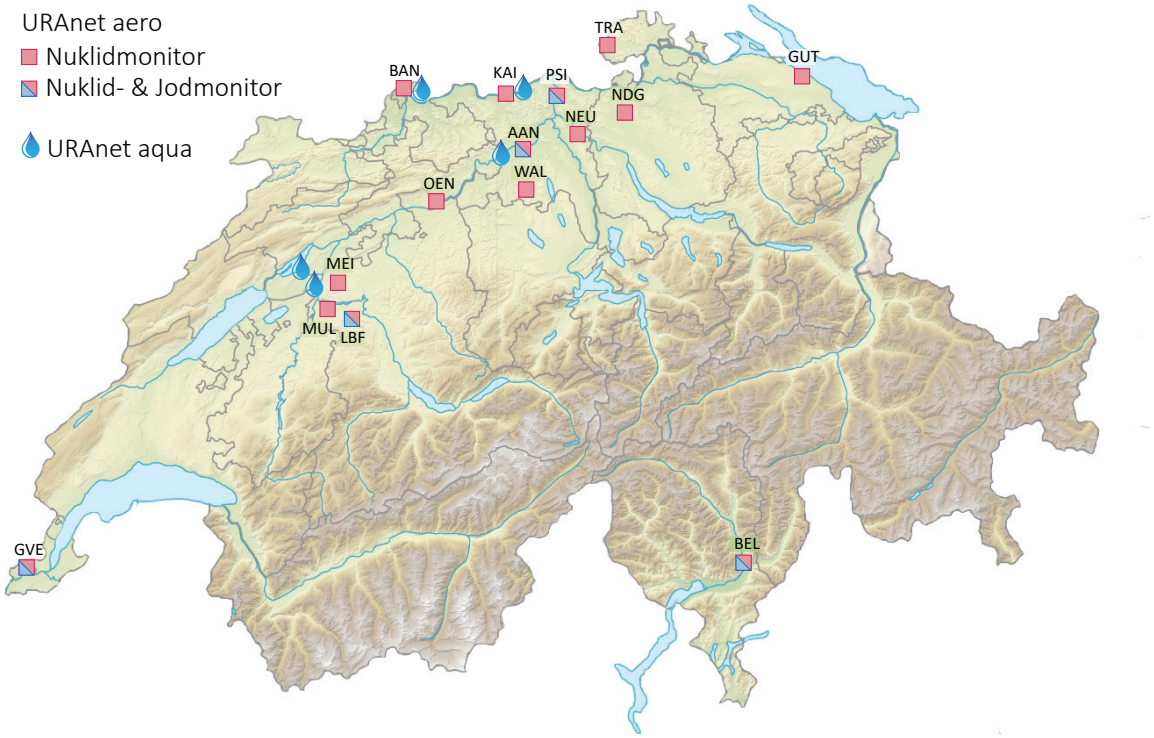
Luft und URAnet «aqua» für die Überwachung des Flusswassers. Zusätzlich zu den automatischen Messungen werden von Aerosolen, Niederschlägen und Flusswasser kontinuierlich Proben für empfindliche Messungen im Labor entnommen. Die Überwachung von Sedimenten, Erdproben, Gras, Milch und Lebensmitteln (inklusive Importe) erfolgt stichprobenweise. Die Daten werden in einer nationalen Datenbank beim BAG erfasst. Die Messresultate der automatischen Messnetze sowie ein Grossteil der Ergebnisse der Labormessungen sind auf www.radenviro.ch abrufbar. 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 Messnetz zur Überwachung der Radioaktivität in der Luft (URAnet aero) ist seit September 2018 in Betrieb. Es ersetzt das frühere RADAIR Messnetz, das nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl aufgebaut wurde. Das neue Messnetz ermöglicht die Identifikation und Quantifizierung der einzelnen in der Luft vorhandenen Radionuklide (Gammaemitter) und alarmiert, wenn vordefinierte Warnschwellen überschritten sind. Es umfasst, über das ganze Land verteilt, 15 Messsonden (siehe Figur 1). Das Messnetz deckt alle geographischen Regionen ab, ist aber im Einflussbereich der Kernkraftwerke und dort insbesondere in stark besiedeltem Gebiet verdichtet.

Das URAnet-Messnetz ist bezüglich Empfindlichkeit deutlich besser als sein Vorgänger: für eine 12-Stunden Messung erreicht es eine Nachweisgrenze von 3 bis 7 Milli-Becquerel pro Kubikmeter Luft (mBq/m^3) für Cäsium-137 (^{137}Cs). Diese hohe Empfindlichkeit erlaubt es sehr geringe Konzentrationen von Radioaktivität in der Luft rasch zu erkennen, auch wenn diese noch keine Gefahr für die Gesundheit darstellen, und ermöglicht so, die Abschätzung der Strahlendosis für die Bevölkerung zu verbessern.

Der Teil «Flusswasser» von URAnet (URAnet aqua) ist mit fünf Sonden in der Aare und im Rhein seit November 2015 in Betrieb.



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

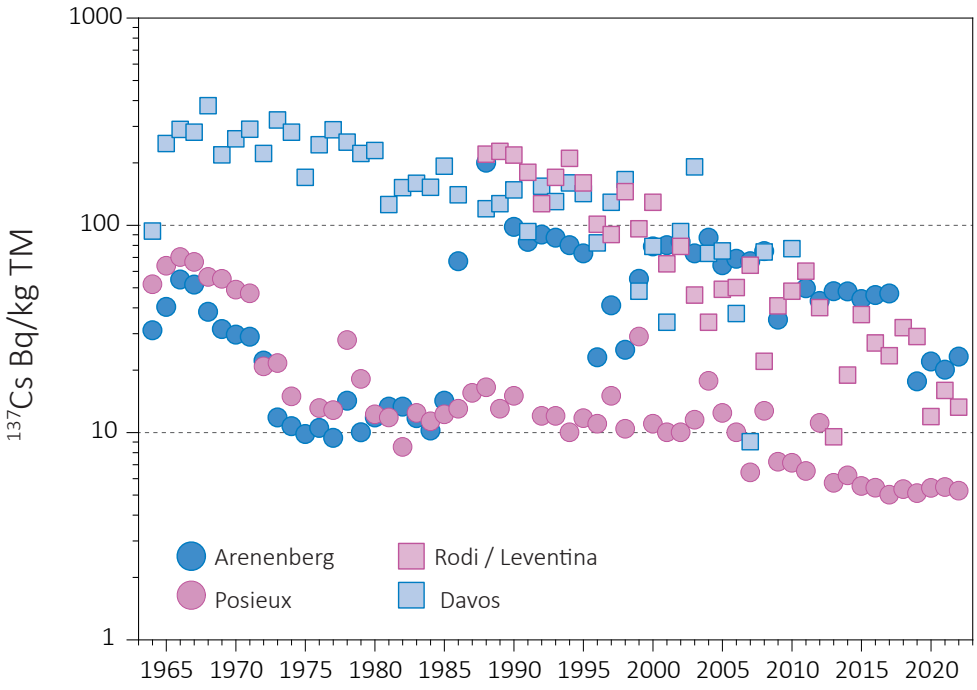
Modernisierung der Probenahme und Messung von Höhenluft

Die Messstation für Luftradioaktivität 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, die empfindlicher ist und fortlaufend die Konzentrationen einzelner (Gamma-) Radionuklide in der Luft misst, soll bis Ende 2024 betriebsbereit sein. Sie wird wie die anderen URAnet-Stationen in das SwissMetNet-Netzwerk von MeteoSchweiz integriert sein. So ist ein permanenter Zugang zu den Messergebnissen gewährleistet. Ein weiteres Mittel zur Messung von Höhenluft ist seit über 50 Jahren die Probenahme mit Militärflugzeugen der Schweizer Armee in rund 10 km Höhe. Diese Flüge werden nach der Stilllegung der Tiger-Kampfjets eingestellt. Eine Fortsetzung der Messungen mit F/A-18-Flugzeuge erforderte kostspielige Anpassungen der Flugzeige (rund 10 Millionen Franken); eine Investition, die der Bundesrat als unverhältnismässig erachtet. Die Erfahrung hat gezeigt, dass für eine Beurteilung des Gesundheitsrisikos der Bevölkerung der Mehrwert solcher Probenahmeflüge im Vergleich zu Messungen in geringerer Höhe, wie etwa auf dem Jungfraujoch, in der Regel begrenzt ist. Die Probenahme mit Flugzeugen in grosser Höhe ist vor allem für wissenschaftliche Fragestellungen interessant. Um auch künftig über entsprechende Resultate zu verfügen soll eine internationale Zusammenarbeit angestrebt werden.

Ergebnisse der Umweltüberwachung 2022

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

Die Resultate 2022 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 Luftmessungen mit Hochvolumen-Aerosolfiltern (für online-Resultate siehe www.radenviro.ch) zeigen im Wesentlichen natürliche Radionuklide wie das kosmogene ^{7}Be oder ^{210}Pb. Die höchsten Konzentrationen von ^{7}Be in der Luft wurden im März gemessen. Dies ist wohl auf die fehlenden Niederschläge in diesem Monat zurückzuführen, da der Regen durch Auswaschung von Aerosolpartikeln die ^{7}Be-Konzentration in der Luft herabsetzt. Abgesehen von natürlichen Radionukliden werden dank der eingesetzten, sehr empfindlichen Messmethoden regelmässig auch winzige Konzentrationen künstlicher Radioaktivität, insbesondere von Cäsium-137 (^{137}Cs), auf den Aerosolfiltern nachgewiesen. Diese Spuren werden häufiger bei trockenem Wetter festgestellt, wenn das nach dem Unfall von Tschernobyl in der Schweiz abgelagerte und immer noch im Boden vorhandene ^{137}Cs wieder in der Luft aufgewirbelt wird, sowie im Winter, wenn durch diesen Unfall kontaminiertes Holz zum Heizen verbrannt wird.



Figur 2:
^{137}Cs (Bq/kg Trockenmasse) in Bodenproben verschiedener Stationen der Schweiz (1964 - 2022).

Spuren von ^{137}Cs wurden 2022 auch im Niederschlag nachgewiesen. Andere künstliche Radionuklide sind in Niederschlagsproben hingegen nie aufgetaucht. Dasselbe gilt für Flüsse. Im Niederschlag ist die Beobachtung von ^{137}Cs eher ungewöhnlich und ist 2022 wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass in diesem Jahr mit anhaltendem Niederschlagsmangel Staub mit ^{137}Cs-haltigen Bodenpartikeln vermehrt wieder in die Luft gelangten. In den Flüssen hingegen werden durch die Bodenerosion verursachten Spuren von ^{137}Cs jedes Jahr beobachtet.

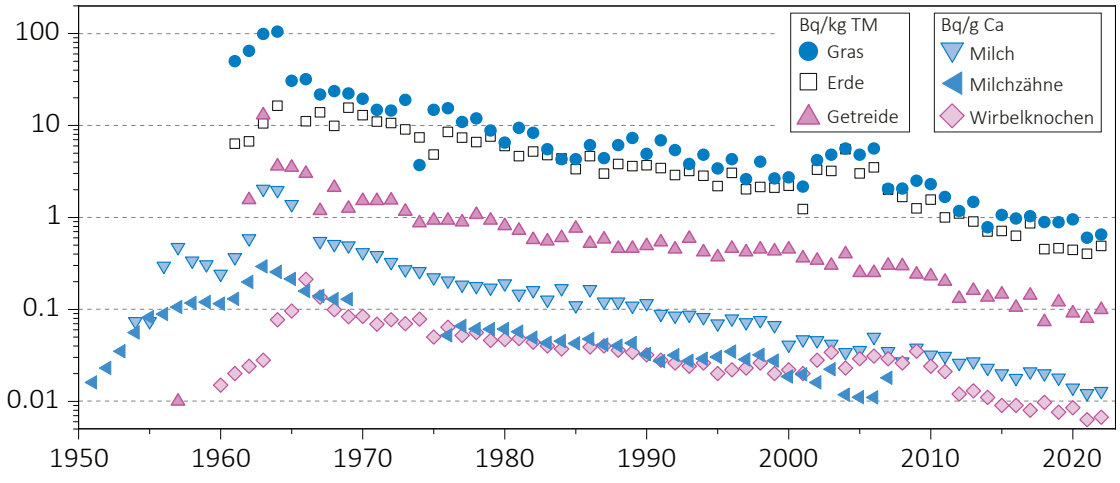
Die Konzentration von natürlichem Tritium ist im Niederschlag und im Flusswasser im Allgemeinen unter 2 Bq/l. Eintrag von künstlichem Tritium durch Einleitungen aus Kernkraftwerken und bestimmten Industrien wird manchmal im Niederschlag in der Nähe oder im Flusswasser flussabwärts dieser Betriebe festgestellt (siehe entsprechende Abschnitte zu diesen Betrieben).

Im Boden dominieren die natürlichen Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen sowie das Kalium-40 (^{40}K). Künstliche Radioisotope im Boden stammen vom «Fallout», d.h. Ablagerungen von Radioaktivität, nach den oberirdischen Kernwaffenversuchen in den frühen 60er Jahren (besonders ^{90}Sr, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Am et ^{137}Cs) und dem Tschernobyl-Reaktorunfall (vorwiegend ^{137}Cs). Aufgrund der regionalen Unterschiede in diesen Ablagerungen sind ^{137}Cs und ^{90}Sr Konzentrationen in den Alpen und den südlichen Tälern immer noch etwas höher als im Mittelland (siehe Figuren 2 und 3). Künstliche Alphastrahler wie ^{239}Pu und ^{240}Pu sowie ^{241}Am treten im Erdboden nur in sehr geringen Spuren auf.

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

In Kuhmilch lag der ^{137}Cs-Gehalt in der Regel unter der Nachweisgrenze von 1 Bq/l oder tiefer. Nur eine der 150 im Jahr 2022 untersuchten Milchproben wies eine ^{137}Cs-Aktivität von > 1 Bq/l auf: In dieser Milchprobe aus dem Centovalli betrug der ^{137}Cs-Gehalt 16 Bq/l und lag damit deutlich unter dem Höchstwert für ^{137}Cs aus der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg). Diese Spuren von ^{137}Cs sind hauptsächlich auf den Fallout aus dem Tschernobyl-Unfall zurückzuführen. In der Schweiz waren die Regionen südlich der Alpen, insbesondere das Tessin, 1986 am stärksten vom radioaktiven Fallout betroffen, was erklärt, warum ^{137}Cs auch 36 Jahre nach dem Unfall in einigen Proben immer noch in höheren Konzentrationen gemessen werden kann. Die vom Kantonalen Laboratorium BS, dem IRA in Lausanne und dem Labor Spiez gemessenen ^{90}Sr-Konzentrationen in 62 Milchproben waren 2022 sehr tief, mit einem maximalen Wert von 0.26 Bq/l und einem Medianwert von 0.014 Bq/l. Das in der Schweiz gemessene ^{90}Sr stammt aus dem Fallout der Atombombentests in den 1960er Jahren, wobei die höher gelegenen Regionen, die mehr Niederschläge erhalten, stärker betroffen waren als das Tiefland.

In den 18 Getreideproben und 50 einheimischen Obst- und Gemüseproben, die 2022 analysiert wurden, wurden keine Spuren von ^{137}Cs gefunden (Nach-



Figur 3:
^{90}Sr (Strontium-90) in verschiedenen, zwischen 1950 und 2022 entnommenen Proben (logarithmische Skala).

weisgrenzen typischerweise 0.4 Bq/kg). Die im Getreide gemessenen ^{90}Sr-Werte waren ebenfalls sehr niedrig und lagen zwischen 0.03 und 0.24 Bq/kg mit einem Mittelwert von 0.09 Bq/kg.

Der Kanton Tessin setzte die systematische Überwachung der im Kanton erlegten Wildschweine fort, die 2013 in Zusammenarbeit mit dem BAG eingeführt wurde. 2022 wurde die Dosisleistung von 1`019 Wildschweine vor Ort mit einem Handmessgerät kontrolliert. Vierundzwanzig Tiere, also ca. 2% der Fälle, überschritten den Höchstwert aus der Tschernobyl-Verordnung von 600 Bq/kg für $^{137}$Cs. Nachmessungen im Labor zeigten einen $^{137}$Cs-Höchstwert von 1`368 Bq/kg. Die betroffenen Wildschweine wurden vom Kantonstierarzt konfisziert. 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.

Die in 16 Fleischproben von Wild aus der Schweiz vom Kantonslabor Bern gemessenen ^{137}Cs-Konzentrationen blieben mit einem Höchstwert von 6 Bq/kg niedrig.

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 203 Proben einheimischer Pilze überschritten, die 2022 von den Kantonen Graubünden, Zürich und Basel-Stadt analysiert wurden. Der höchste verzeichnete Wert betrug 173 Bq/kg (Frischmasse), der Durchschnittswert 14 Bq/kg. Die zehn Proben mit den höchsten ^{137}Cs-Gehalten stammten je zur Hälfte aus den Kantonen Graubünden und Zürich.

In den anderen einheimischen Lebensmitteln, die von den kantonalen Laboratorien analysiert wurden (Käse, Joghurt, Früchte und Gemüse), lagen die ^{137}Cs-Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze (in der Grössenordnung von 0.3 Bq/kg).

Nach dem Reaktorunfall in Fukushima-Daiichi hat 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. Im Jahr 2022 wurden nur 4 Proben aus Japan analysiert (Algen und Seegras). Keine dieser Proben zeigte eine Kontamination mit künstlichen Radionukliden.

Lebensmittelimporte aus anderen Ländern wurden, wie jedes Jahr, von den Kantonalen Laboratorien (BE, BS, GR, TI, ZH) ebenfalls analysiert. Im Berichtsjahr waren es 217 Proben, die gammaspektrometrisch analysiert wurden. In etwa 13% dieser Proben wurden ^{137}Cs-Konzentrationen von mehr als 10 Bq/kg Frischmasse gemessen. Unter den 70 importierten Pilzproben wies ein Steinpilz unbekannter Herkunft den höchsten Messwert für ^{137}Cs auf (235 Bq/kg). Der Durchschnittswert aller Pilzproben lag bei 21 Bq/kg. Bei 16 Proben von importiertem Wildfleisch lagen drei Wildschweinproben über 10 Bq/kg, mit einem Höchstwert von 240 Bq/kg bei einem Exemplar aus Deutschland. In den übrigen Proben (Gemüse, Nüsse, Fisch, Kaffee, Obst und andere) lag der ^{137}Cs-Gehalt meist unter 10 Bq/kg. Eine Ausnahme waren 4 Heidelbeerproben mit 15 - 183 Bq/kg. In 10 dieser Proben analysierte der Kanton BS auch ^{90}Sr, was nur einen einzigen Wert über 1 Bq/kg ergab (1.7 Bq/kg in einem frischen Heidelbeergetränk).

Somit wurde 2022 in der Schweiz keine Überschreitung des Höchstwertes für ^{137}Cs in importierten Lebensmitteln registriert.

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 2022 haben bestätigt, dass die Betreiber die gesetzlichen Grenzwerte einhalten.

Das Kernkraftwerk Mühleberg 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. Mit der Stilllegung ist ein neues Reglement für die Abgaben von radioaktiven Stoffen sowie die Überwachung der Radioaktivität und der Direktstrahlung in der Umgebung des Kernkraftwerks Mühleberg in Kraft. Darin wurden bisher nur bestimmte Grenzwerte für die Abgaben angepasst. Die Überwachung der Radioaktivität in der Umgebung wird wie im Betriebsregime fortgesetzt.

Die Ergebnisse der Überwachung der Kernanlagen 2022 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 ^{16}N. Darüber hinaus können die Abfalllager zu einer Erhöhung der Ortsdosis am Zaun beitragen. Mit der Stilllegung des KKW Mühleberg ist dort die Strahlung durch ^{16}N verschwunden. Jedoch führen die Stilllegungsarbeiten selber zu kurzzeitig erhöhten Strahlendosen am Zaun. Die Auswertung der am Zaun des KKM angebrachten TLD-Dosimeter ergab eine durchschnittliche Erhöhung der Umgebungsdosis von 0.011 mSv pro Woche (berechnet auf Basis der gemessenen Quartalswerte, 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 2022 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 59 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 2022 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 von ^{54}Mn oder ^{60}Co 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 2022 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 Atombombenversuche der 60er Jahre).

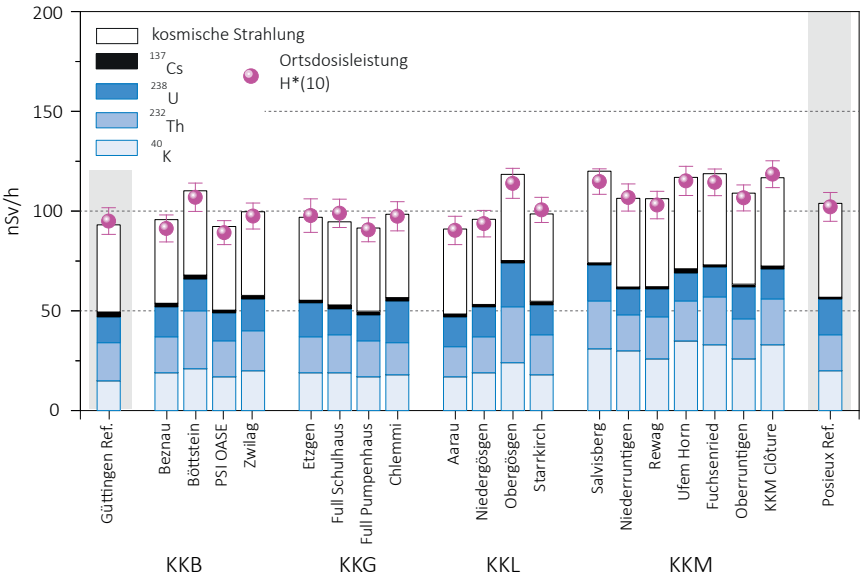
Die vom IRA durchgeführten $^{239+240}$Pu und ^{241}Am Messungen an verschiedenen, stromabwärts der Kernkraftwerke entnommenen Proben der aquatischen Umwelt (Wasser aus Aare und Rhein, Wasserpflanzen, Sedimente) ergaben keinen Hinweis auf einen möglichen Einfluss durch Abgaben der Kernkraftwerke, vielmehr 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 (ca. 12 Bq/l in der Aare bei Brugg im April) und in etwas geringerem Ausmass im Rhein. Die Ursache ist die Abgabe von Tritium-haltigem Abwasser durch das KKW Gösgen vor der Revision.

Analysen von Fischen aus der Aare und dem Rhein flussabwärts der Schweizer Kernkraftwerke ergaben 2022 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 4 zeigt ergaben die Umweltmessungen in der Umgebung der Kernkraftwerke, mit Ausnahme der erwähnten Beispiele, keine Unterschiede



Figur 4:
Beiträge zur Ortsdosis (H(10)) durch die verschiedenen Radionuklide, die vom BAG 2022 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.*

gegenüber Orten ausserhalb deren Einflussbereichs. Die natürliche Radioaktivität dominiert demnach, und die messbaren Kontaminationen sind vorwiegend eine Folge der Kernwaffenversuche in den 60er-Jahren und des Reaktorunfalls in Tschernobyl (^{137}Cs).

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 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

Alle Anlagen des CERN waren 2022 in Betrieb. Nach einer mehrmonatigen Wiederinbetriebnahme bei relativ niedriger Strahlintensität war der LHC ab dem 2. Quartal 2022 voll in Betrieb. Die vom CERN im Jahr 2022 durchgeführte Bilanzierung und Überwachung der Emissionen aus seinen Anlagen zusammen mit den Dosisberechnungen für die Bevölkerung (Referenzgruppen) hat gezeigt, dass die Organisation den in ihren Reglementen festgelegten Grenzwert von 0.3 mSv/Jahr eingehalten hat. Die maximale effektive Dosis für die Schweizer Öffentlichkeit blieb unter 0.004 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. Zwar konnten in der Luft in der Umgebung des Forschungszentrums im Jahr 2022 sporadisch Spuren der von den CERN-Anlagen produzierten Radionuklide mit kurzer Halbwertszeit, wie die Jod-Isotope ^{124}I, ^{126}I und ^{131}I, nachgewiesen werden, ihre Konzentrationen betrugen jedoch nur einen winzigen Bruchteil der in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Immissionsgrenzwerte für die Luft. Als Beispiel: die 2022 festgestellte maximale ^{131}I-Konzentration von 15 micro-Bq/m^3 macht nur 0.002 % des Immisionsgrenzwertes für die Luft aus. 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 2021 zu einer zusätzlichen Dosis für Anwohner von weniger als 0.008 mSv führten. Die Ab-

gabe von kurzlebigen Edelgasen aus den 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 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 2022 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 den vorangegangenen Jahren zeigten die Resultate der Überwachung 2022 einen signifikanten Einfluss der Tritium-Emissionen auf Umweltproben (Niederschlag und Nahrungsmittel) aus der unmittelbaren Umgebung dieser Industriebetriebe, besonders bei Niederwangen. Die verschiedenen technischen Verbesserungen, die das dort ansässige Unternehmen mb microtec seit 2020 vorgenommen hatte, führten zu einer Verringerung der Emissionen, was sich in einem starken Rückgang der 2020 und 2021 im Niederschlag gemessenen Tritiumkonzentrationen widerspiegelte. 2022 waren die Messwerte in der Nähe des Unternehmens meist ähnlich hoch wie in den Jahren 2020-2021. Mit wenigen Ausnahmen: Ende Januar wurden in unmittelbarer Nähe des Unternehmens (Station Firma) eine Konzentration von fast 2´400 Bq/l gemessen, dreimal so viel wie der 2021 gemessene Höchstwert. Das ist wahrscheinlich auf besondere Wetterbedingungen zurückzuführen. Die im Niederschlag gemessenen Tritiumkonzentrationen hängen nämlich nicht nur von der in die Atmosphäre freigesetzten Tritiummengen ab (Emissionen), sondern auch von der Windrichtung und den Niederschlagsmengen. Der andere signifikante Anstieg (November 2022) ist auf erhöhte Emissionen im Zusammenhang mit der Verpackung fehlerhafter Produkte im Unternehmen zurückzuführen. Damals wurde an allen vier Überwachungsstationen das 2- bis 4-fache der jeweiligen Höchstwerte für 2021 gemessen. Diese Emissionen lagen immer noch weit unter den Emissionsgrenzwerten. Die Tritiumkonzentrationen in Destillaten von Milchproben sowie Obst- und Gemüseproben (Äpfel, Birnen, Pflaumen, Rhabarber usw.), die Ende August 2022 vom Kanton Bern in der Nähe des Unternehmens entnommen wurden, lagen zwischen 5 und 50 Bq/l und waren damit signifikant niedriger als in den Vorjahren.

Die Tritiumkonzentrationen in den wöchentlichen Regenproben von Teufen/AR in der Umgebung der Firma RC Tritec blieben 2022 tief, mit einer kleinen Erhöhung im November (Maximum 146 Bq/l). Der Medianwert der Messungen von 2022 von 45 Bq/l ist vergleichbar mit den in den Vorjahren gemessenen Werten.

Im Herbst 2021 initiierte das BAG zudem in Zusammenarbeit mit der Suva ein Programm zur Überwachung von Tritium im Niederschlag und in der Luftfeuchtigkeit in der Umgebung des Unternehmens Smolsys in Root/LU, da dieses über eine Bewilligung zur Abgabe von Tritium in die Umwelt verfügt. Die Tritiumwerte in der Umgebung dieses Unternehmens blieben im ersten Jahr der Überwachung sehr niedrig, sowohl im Niederschlag (Höchstwert in von rund 17 Bq/l) als auch in der Luftfeuchtigkeit.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 5, 9.1 und 9.3.

Radium-Altlasten

Im April 2022 hat der Bundesrat die Verlängerung des Aktionsplans Radium bis Ende 2023 beschlossen, damit die während der Covid-19-Pandemie entstandene Verzögerung aufgeholt werden kann. So können die über 1´000 identifizierten Liegenschaften, die möglicherweise aufgrund der Verwendung von Radium in der Uhrenindustrie bis in die 1960er-Jahre kontaminiert sind, untersucht und gegebenenfalls bis Ende 2023 saniert werden. In diesem Abschnitt wird der Stand der Arbeiten dargestellt.

Teilprojekt «Gebäude»

Stand 31. Dezember 2022 wurden bei 1´010 Liegenschaften mit mehr als 5´700 Wohnungen oder Geschäftsräumen eine Radiumdiagnostik durchgeführt. Wird die effektive Dosis von 1 mSv pro Jahr für die Bewohnerinnen und Bewohner überschritten, ist eine Sanierung notwendig. Für den Aussenbereich gilt ein Schwellenwert von 1´000 Bq/kg für die Konzentration von ^{226}Ra in der Erde. Von den 1´010

untersuchten Liegenschaften sind 151 sanierungsbedürftig (90 Wohnungen und 100 Gärten). Der Anteil der sanierungsbedürftigen Liegenschaften liegt damit bei etwa 15%.

Bei 138 Liegenschaften sind die Sanierungsarbeiten abgeschlossen oder im Gange. In den 90 Wohnungen (oder Gewerbeobjekten), für die eine Sanierungsverfügung vorliegt, liegen die geschätzten Dosen in 46 Wohnungen zwischen 1 und 2 mSv/Jahr, in 29 Wohnungen zwischen 2 und 5 mSv/Jahr, in 9 Wohnungen zwischen 5 und 10 mSv/Jahr, in 5 Wohnungen zwischen 10 und 15 mSv/Jahr und in 1 Wohnung zwischen 15 und 20 mSv/Jahr.

Die Höchstwerte für Radium, die in den Bodenproben aus den 100 zu sanierenden Gärten gemessen wurden, betrugen im Durchschnitt rund 30´000 Bq/kg. In einem Fall wurden punktuell sogar 668´200 Bq/kg gemessen.

In rund 20% der zu sanierenden Aussenflächen wurden zudem Mischbelastungen (chemisch und radiologisch) festgestellt. Das BAG koordiniert die Sanierung dieser Grundstücke im Einzelfall mit den betroffenen Kantonen und in komplexen zusätzlich mit dem Bundesamt für Umwelt Bafu und der Suva. Darüber hinaus hat das BAG eine Zusammenarbeit mit dem Labor Spiez und der Firma ARCADIS zur Analyse chemischer Schadstoffe in den mit ^{226}Ra kontaminierten Proben aufgebaut.

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. Das BAG bereitet derzeit eine Richtlinie zur Umsetzung der langfristigen Überwachung und zur Klärung der Verantwortlichkeiten vor. Es ist geplant, die Richtlinie nach Konsultation der wichtigsten Interessengruppen 2023 zu veröffentlichen.

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). Iodtherapie-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 mindestens während den ersten 48 Stunden 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.

Andere Radionuklide wie ^{90}Y, aber vor allem ^{177}Lu (Halbwertszeit ca. 7 Tage) werden ebenfalls für diagnostische und therapeutische Anwendungen genutzt. Letzteres wird zur Behandlung von Prostatakrebs eingesetzt und ist heute das häufigste in der Nuklearmedizin angewendete Radionuklid. Nach dem starken Anstieg der in der Schweiz angewendeten Gesamtaktivität von ^{177}Lu im Jahr (Verdoppelung im Vergleich zm Vorjahr), stieg diese 2022 nur geringfügig an (11.1 TBq im Jahr 2022 gegenüber 10.8 TBq im Jahr 2021). Um die Radiotoxizität zu berücksichtigen rechnet man die ^{177}Lu-Aktivität in ^{131}I- Äquivalente um;. Dies ergibt für ^{177}Lu 0.24 TBq Iod-Äquivalente, gegenüber 2.3 TBq für das eigentliche ^{131}I.

Der für 2022 festgestellte starke Rückgang der therapeutischen Anwendungen mit ^{90}Y im Vergleich zum Vorjahr ist teilweise auf fehlerhafte Verkaufsmeldungen und zum grossen Teil auf Gründe im Zusammenhang mit der Pandemie zurückzuführen.

Die Verwendung von ^{223}Ra (erste Anwendungen im Jahr 2013) ist seit 2017 deutlich zurückgegangen und ist heute im Vergleich zu anderen Radionukliden sehr gering.

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 2022 ebenfalls durchgeführt. Es ist anzumerken, dass diese Radionuklide zwar selten in Flusswasser nachgewiesen werden, Spuren davon jedoch in Sedimenten gefunden werden können. So werden 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, wurden 2022 zudem kontinuierliche Messungen mit einer automatischen Messsonde im Wasser der ARAs von Bellinzona durchgeführt. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung zwischen Probenahme und Messung können die kurzlebigen Radionuklide in Labormessungen selten nachgewiesen werden. Im Zulauf zur ARA treten die Nuklide ^{131}I, ^{177}Lu und ^{111}In nur sporadisch und in tiefen Konzentrationen auf, da sie in den Spitälern in Abklingtanks zurückgehalten werden, bis der Grossteil zerfallen ist. Die sehr kurzlebigen Nuklide ^{99m}Tc und ^{18}F/^{68}Ga erfordern keine Rückhaltung im Spital und sind dementsprechend regelmässig nachweisbar. Die Messungen zeigen, dass die Immissionsgrenzwerte für alle Radionuklide im Wochenmittel beim Zulauf der ARA fast immer eingehalten wurden. Die einzige Ausnahme wurde im Juni für ^{131}I festgestellt: Der Wochenmittelwert für dieses Radionuklid überschritt den Immissionsgrenzwert am Eingang der ARA leicht. Da ein Teil des ^{131}I im Klärschlamm zurückgehalten wird und das geklärte Wasser im Vorfluter rasch stark verdünnt wird kann eine Grenzwertüberschreitung im ausschlaggebenden «öffentlich zugänglichen Gewässern», das heisst im Fluss, trotzdem ausgeschlossen werden. 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.

Ebenfalls im Rahmen der Überwachung des Wassers der ARAs hat das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt in den wöchentlichen Wasserproben der ARA Basel zwischen dem 28. November und dem 10. Dezember 2022 ungewöhnlich hohe Tritium-Werte gemessen. Die Tritiumkonzentration erreichte in der Probe der Woche vom 5. Dezember 200 Bq/l. Dieser Wert liegt zwar 100 Mal unter dem Immissionsgrenzwert, da die Konzentrationen jedoch üblicherweise in der Nähe der Nachweisgrenze von 4-5 Bq/l liegen, hat das BAG Untersuchungen durchgeführt. Der Anstieg ist auf die Einleitung von Rauchgaswaschwasser aus der Sondermüllverbrennungsanlage Veolia nach Verbrennung von tritiumhaltigen Abfällen zurückzuführen. Die Firma Veolia verfügt über eine Genehmigung des BAG, bis zu 100 GBq Tritium pro Woche zu verbrennen. Tatsächlich wurden am 29. November und am 5. Dezember 2022 tritiumhaltiger Abfall verbrannt. Normalerweise wird das Waschwasser der Firma Veolia nicht durch die ARA geleitet, sondern gelangt direkt in deren Auslauf und dann in den Rhein. Weil am 1. und 7. Dezember 2022 anormale physikalisch-chemische Parameter festgestellt wurden leitete das System das Waschwasser jedoch automatisch auf die industrielle ARA und anschliessend auf die kommunale ARA um, wie es für diesen Fall vorgesehen ist. Aus diesem Grund wurde ein Teil der verbrannten Aktivität in die ARA geleitet. Auch wenn diese Werte ungewöhnlich sind, stellten sie keine Gefahr für das ARA-Personal und die Umwelt dar.

Die Überwachung von Kehrichtverwertungsanlagen (KVAs) will möglichst sicherzustellen, dass kein radioaktiver Abfall versehentlich oder absichtlich mit dem Siedlungsabfall entsorgt wird. Viele KVAs sind bereits heute mit Portaldetektoren (Gammadetektoren) ausgestattet, um die Verbrennung von radioaktiv kontaminierten Abfällen zu verhindern. Mit dem Inkrafttreten der neuen StSV im Jahr 2018 sind die KVAs dazu verpflichtet mit einem geeigneten Verfahren die angelieferten Abfälle auf das Vorhandensein von Gammastrahlern zu prüfen. Die systematische Installation von Portalmonitoren deckt diese Anforderung ab, verhindert jedoch nicht die versehentliche Verbrennung von Tritium, einem reinen Betastrahler, der von diesen Portalen nicht detektiert werden kann. Deshalb werden Tritiummessungen im Rauchgaswaschwasser von grossen KVAs in durchgeführt.

Das BAG hat in einer zwischen dem 12. Januar und dem 9. Februar 2022 genommenen Rauchgaswaschwassers-Probe der KVA Hagenholz/ZH einen ungewöhnlich hohen Tritiumgehalt (ca. 130 kBq/l) gemessen. Gemäss Schätzung des BAG betrug die gesamte verbrannte Tritiumaktivität 370 GBq, was mehr als dem 1´000-fachen des bewilligten Höchstwertes von 0.3 GBq für Tritium entspricht und somit einen Verstoss gegen die StSV darstellt. Die vom BAG durchgeführten Umweltmessungen ergaben jedoch keinen Anstieg der Tritiumkonzentration und bestätigten somit, dass keine Gefahr für die Öffentlichkeit besteht. Derzeit wird untersucht, ob die Entsorgung des radioaktiven Abfalls im konventionellen Müll fahrlässig oder absichtlich erfolgte.

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 Depo-

nie»). Der Immissionsgrenzwert für ^{226}Ra in Gewässern ist auf 580 mBq/l festgelegt. Die Ergebnisse der Messungen im Jahr 2022 bestätigten, dass die ^{226}Ra-Konzentrationen im Sickerwasser von Deponien, in denen in den letzten Jahren ^{226}Ra-haltige Abfälle abgelagert wurden, niedrig sind und weit unter dem Immissionsgrenzwert liegen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.3.

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

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 6.1.

Beurteilung

In der Schweiz blieben 2022 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 35 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 Tritium auf die Umwelt (Regen und Lebensmittel), insbesondere in Niederwangen. Die Reduzierung der Tritium-Abgaben in die Umwelt durch das betroffene Unternehmen in den letzten zwei Jahren führte jedoch dazu, dass dort die 2022 in Lebensmitteln registrierten Tritiumwerte im Vergleich zu den Vorjahren stark zurückgingen. 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 2022 einige ungewöhnlich hohe Tritiumkonzentrationen festgestellt werden, insbesondere im Rauchgaswaschwasser der Verbrennungsanlage

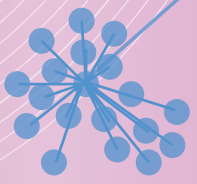
Hagenholz/ZH aufgrund der Verbrennung von illegal entsorgten Abfällen, die grosse Mengen Tritium enthielten, oder in geringerem Masse im Wasser der ARA Basel. Wie schon in der Vergangenheit bei ähnlichen Vorfällen in Verbrennungsanlagen wurde eine Untersuchung eingeleitet. Leider erweist es sich als sehr schwierig, die Herkunft von Abfällen, die nicht vorschriftsmässig 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.

Exposition de la population aux rayonnements ionisants

2

Strahlen-exposition der Bevölkerung



- Catégorie
- Origines
- Population générale
- Patients

- Kategorien
- Ursachen
- Allgemeine Bevölkerung
- Patienten

2022

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 perma nent 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. 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.

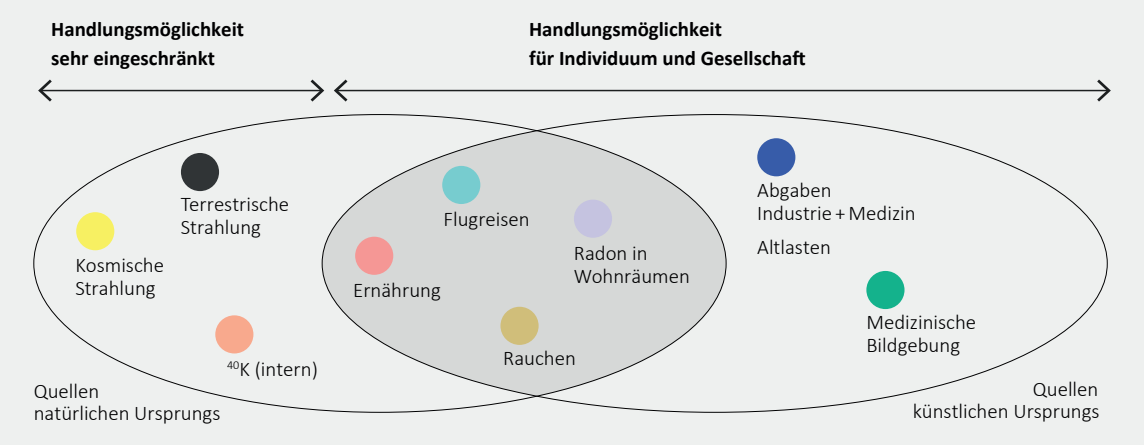


Abbildung 1 :
Die wichtigen Beiträge zur Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung, aufgeteilt nach Möglichkeiten der Einflussnahme durch die einzelne Person oder die Gesellschaft. Unterschieden wird zudem zwischen Quellen natürlichen Ursprungs und künstlichen Ursprungs, wobei die Exposition durch 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, auf die von diesen verursachte Belastung zu reagirej.

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 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 bisherige Wert von 0.38 mSv pro Jahr. Ausführlich wird die neue Abschätzung in Kapitel 2.3 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 beein- flusst 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 durchschnittliche 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. Bislang wurde dieser spezifische Beitrag bei der Dosisauswertung für die Schweizer Bevölkerung mangels ausreichender Daten nicht berücksichtigt. Der Verzehr von Fisch und Meeresfrüchten ist in der Schweiz zwar rund dreimal tiefer als in Frankreich, trotzdem darf dieser zusätzliche Dosisbeitrag nicht vernachlässigt werden. Zurzeit ist sowohl auf internationaler Ebene (UNSCEAR) als auch für die Schweiz (BAG) eine Neubeurteilung im Gang. 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.

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 Fisch und Meeresfrüchten) rund 0.35 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/m^3 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 0.26 mSv pro Jahr. Im Jahr 2016 rauchten 25.3 % der Schweizer Bevölkerung über 15 Jahre gelegentlich (1.2 Zigaretten/Tag) oder täglich (13.6 Zigaretten/Tag). Das entspricht im Durchschnitt 2.5 Zigaretten pro Tag und Einwohner/in und somit einer durchschnittlichen effektiven Dosis von 0.03 mSv/Jahr pro Einwohner/ in über 15 Jahre wegen Rauchens.

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, Forschungszentren und Spitäler sowie gegenüber von künstlichen Radio-

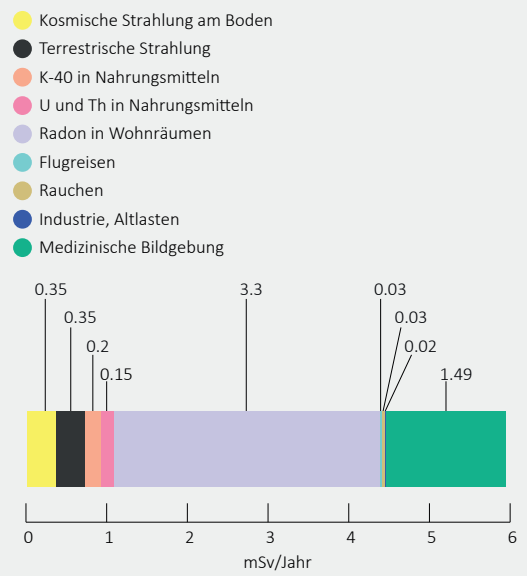


Abbildung 2 :
Durchschnittliche Beiträge zur effektiven Dosis pro Jahr und Einwohner/in der Schweiz in mSv.

nukliden 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 Bevöl-

[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

kerung gezielt Prioritäten zu setzen. Auch ist so 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).

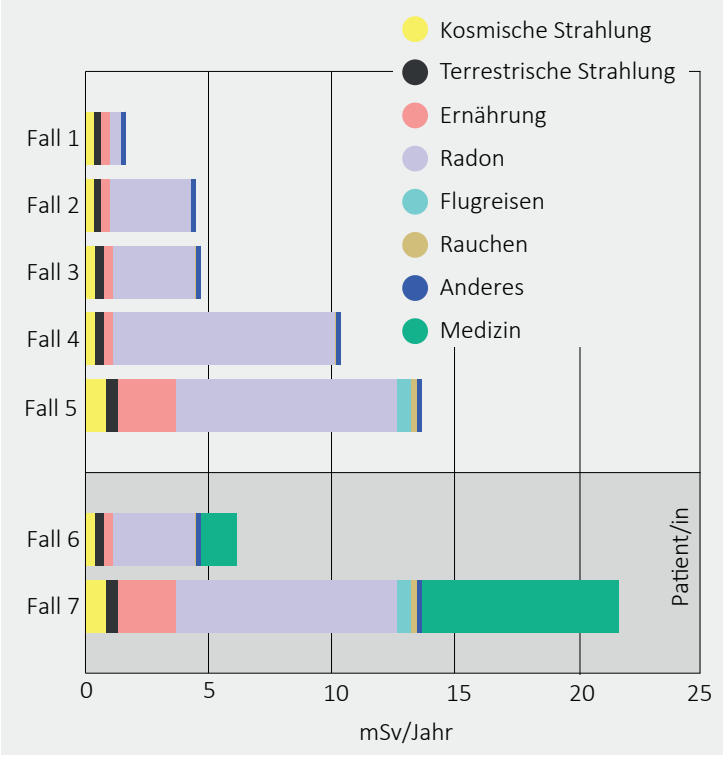


Abbildung 3:
Standardisierte Expositionsszenarien der Bevölkerung mit Angabe der Jahresdosis in mSv.

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

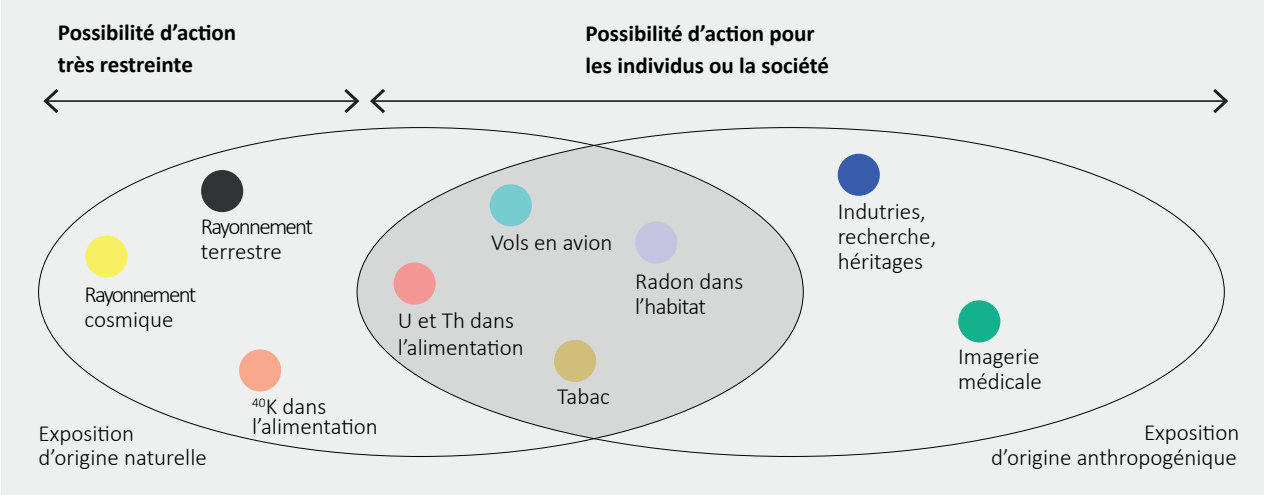


Figure 1 :
Les contributions importantes à l'exposition aux rayonnements de la population générale. Ovale gauche : exposition d'origine naturelle. Ovale droit : exposition d'origine anthropogénique. Zone de chevauchement (fond sombre) : la source de rayonnement est d'origine naturelle, mais l'exposition 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, 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. 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. Jusqu'à présent, cette contribution spécifique n'a pas été considérée pour l'évaluation des doses reçues par la population suisse, faute de données suffisantes. Même si la consommation de poissons et de fruits de mer des Suisses est environ trois fois inférieure à celle des français, cette contribution supplémentaire ne peut pas être négligée. Une réévaluation est actuellement en cours tant au niveau international (UNSCEAR) que pour la Suisse (OFSP). 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.

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 des poissons et des fruits de mer) est d'environ 0.35 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 radio¬nucléides 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 0.26 mSv/an. En 2016, 25.3% de la population suisse de plus de 15 ans fumait de manière occasionnelle (1.2 cigarettes/jour) ou quotidienne (13.6 cigarettes /jour), ce qui représente une moyenne de 2.5 cigarettes par jour et par habitant, et donc une dose efficace moyenne de 0.03 mSv/an par habitant de plus de 15 ans due au tabagisme.

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

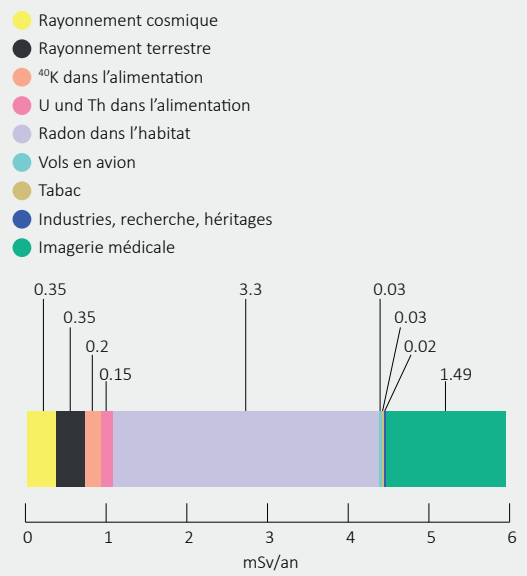


Figure 2 :
Contributions moyennes à la dose efficace (en mSv) par année et par habitant en Suisse.

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.

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

[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*

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.

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).

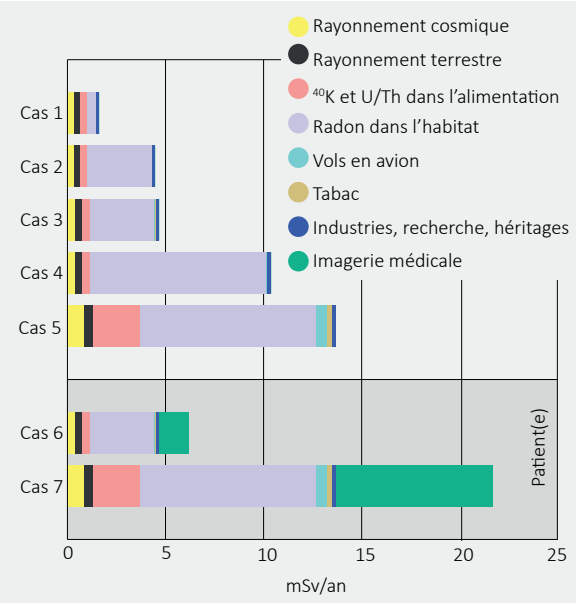


Figure 3 :
Variabilité de l'exposition de la population suisse: dose efficace d'un individu en mSv/an pour 7 scénarios standardisés.

2.3
Neuabschätzung der Dosis durch kosmische Strahlung

P. Steinmann, S. Estier
Sektion Umweltradioaktivität URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die durchschnittliche Dosis durch kosmische Strahlung am Boden mit Berücksichtigung der Abschirmung bei Aufenthalt in Gebäuden beträgt für die Schweiz im Mittel rund 0.35 mSv pro Jahr. Diesen Wert schätzt das BAG basierend auf einem modernen Modell (EXPACS 4.1; Sato, 2016).

Strahlenbelastung durch kosmische Strahlung

Die Abbildung 1 zeigt schematisch die Vorgänge beim Auftreffen von kosmischer Strahlung auf die Erde, soweit sie für die Strahlendosis wichtig sind. Ihren Ursprung hat die kosmische Strahlung zu einem grossen Teil im Zentrum der Milchstrasse (galaktische kosmische Strahlung, GCR in der Abbildung). Die geladenen Partikel dieser Strahlung, meist handelt es sich um Protonen, werden vom Erdmagnetfeld (EMF) partiell abgelenkt. Das Erdmagnetfeld wiederum hängt von der Sonnenaktivität ab (in der Abbildung mit 'S' bezeichnet). Bei hoher Sonnenaktivität, d.h. in Perioden mit vielen Sonnenflecken, schirmt das Erdmagnetfeld die kosmische Strahlung effizienter ab. Deshalb schwankt die Intensität der kosmischen Strahlung am Boden im 11-Jahres-Zyklus der Sonnenaktivität. Diejenigen der kosmischen Partikel, die die Atmosphäre erreichen, lösen dort eine sogenannten Partikelschauer aus. Dabei entsteht eine Vielzahl von neuen Teilchen: Neutronen, Myonen, weitere Protonen, Photonen, Elektronen und andere (siehe Abbildung 1). Durch die Wechselwirkung mit Luftteilchen wird die kosmische Strahlung in der Atmosphäre laufend abgeschwächt. Die daraus resultierende Höhenabhängigkeit und der Beitrag der verschiedenen Teilchen zur effektiven Strahlendosis sind in Abbildung 2 veranschaulicht. Myonen haben eine grosse Reichweite und tragen deshalb auch in tiefen

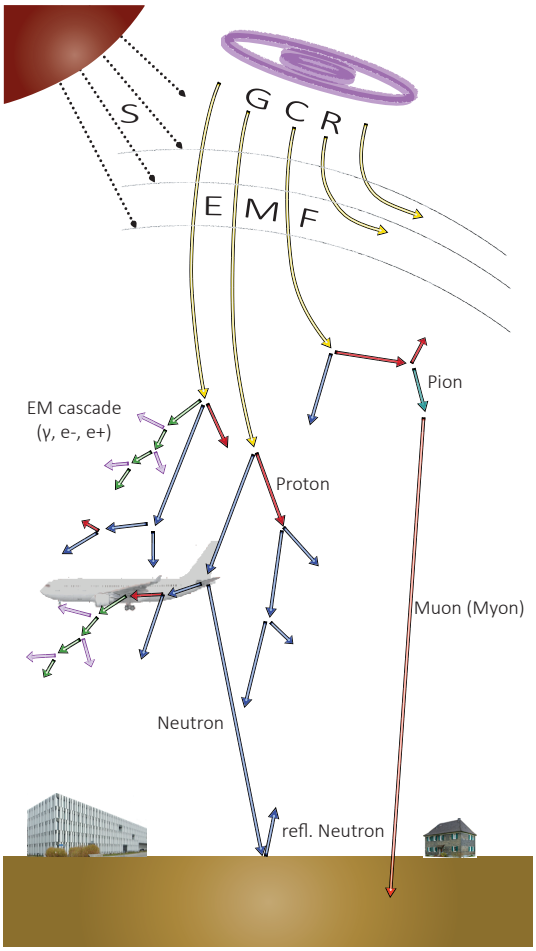


Abbildung 1 :
Schematische Darstellung des Auftreffens der kosmischen Strahlung auf das Erdmagnetfeld und die Atmosphäre. GCR: galaktische kosmische Strahlung; EMF: Erdmagnetfeld; S: Sonnenaktivität; 'EM cascade': elektromagnetische Teilchenschauer; 'refl. Neutron' am Boden reflektierte Neutronen. Abgeändert nach einer Darstellung der JAEA (https://phits.jaea.go.jp/expacs/; Zugriff Mai 2023).

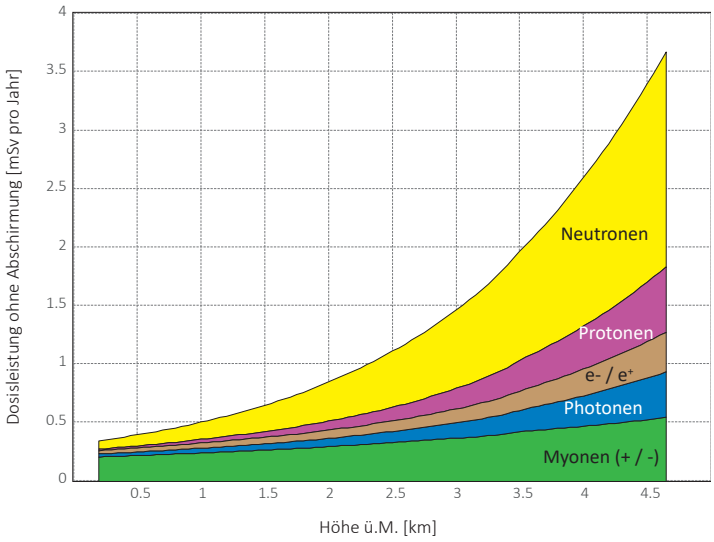


Abbildung 2 :
Beitrag der durch die kosmische Strahlung erzeugten ionisierenden Teilchen zur Strahlendosis in Abhängigkeit der Höhe über Meer. In tiefer gelegenen Gebieten dominieren die Myonen, in grösserer Höhe sind die Neutronen am wichtigsten. «e⁻ / e⁺» steht für Elektronen und Positronen. Bei Protonen ist auch ein kleiner Beitrag von Heliumlonen und schwereren Ionen eingeschlossen. Berechnungen: EXPACS 4.10 (Sato, 2015 und 2016); 46.8° N, 8.2° E; Sonnenaktivität ('W value'): 50; 'water fraction: 0.2.

Höhenlagen zur Strahlendosis bei. Im Gegensatz dazu werden die Neutronen durch die Luft relativ gut abgeschirmt und sind vor allem in grosser Höhe ein wichtiger Faktor für die Strahlendosis. Neutronen, die bis an den Boden gelangen, werden dort teilweise reflektiert. Dabei spielt die Bodenfeuchtigkeit eine grosse Rolle, da die Neutronenstrahlung von den Wasserstoffatomen besonders stark gedämpft werden. Die in Abb. 2 gezeigte Strahlendosis gilt bei ständigem Aufenthalt im Freien. Eine realistische Abschätzung muss natürlich berücksichtigen, dass wir uns überwiegend in Gebäuden aufhalten und dass dort die kosmische Strahlung wegen der Abschirmung durch die Baumaterialien schwächer ist. Auch hier gilt der Unterschied zwischen den Teilchen: Während sich Myonen nur schwer abhalten lassen, ist die Abschirmung für Neutronen wirksamer.

Das EXPACS-Modell

EXPACS ist ein in Japan entwickeltes Monte-Carlo-Modell zur Berechnung der durch die kosmische Strahlung ausgelösten Partikelschauer in der Atmosphäre (EXPACS 4.1; Sato, 2015 und 2016). Anhand der berechneten Strahlungsintensitäten der verschiedenen in Abbildung 1 dargestellten Teilchen ermittelt das Modell die von der kosmischen Strahlung verursachte Strahlendosis (effektive Dosis). Als Input-Parameter für die Berechnung der Dosisleistung an einem bestimmten Punkt verlangt EXPACS die geographischen Koordinaten, die Höhe über Meer, die Bodenfeuchtigkeit und die Stärke der an der Atmosphäre einkommenden kosmischen Strahlung. Das Modell berechnet daraus die Beiträge zur Dosisleistung der einzelnen Komponenten, wie sie in Abb. 2 in Abhängigkeit der Höhe dargestellt sind.

Die Sensitivität des Modelles gegenüber den berücksichtigten Parametern untersucht die Tabelle 1. Als Schwankungsbreiten sind jeweils die für die Schweiz relevanten Wertebereiche angenommen. Die Tabelle zeigt folgendes:

- Am wichtigsten ist der Einfluss der Höhe über Meer. Als Minimal- und Maximalwert sind der 1. und der 99. Perzentil der «Höhenverteilung» der Bevölkerung angegeben (es wohnen 98% der Bevölkerung in einer Höhe zwischen 240 m und 1'364 m). Für Personen die in noch höher gelegenen Gebieten wohnen, ist die Abweichung der Strahlendosis vom Mittelwert natürlich noch höher, als die in der Tabelle angegebenen 52%.
- Schwankungen von etwa 10% sind durch die schon erwähnten Änderungen der Stärke der kosmischen Strahlung im Verlauf eines Sonnenzyklus zu erwarten. Die in der Tabelle angegebenen Daten entsprechen Tagen mit einer maximalen, beziehungsweise minimalen Anzahl Sonnenflecken. ‹W value› steht für Wolf-Zahl und ist ein Mass für die Anzahl Sonnenflecken. Bei vielen Sonnenflecken ist die Sonnenaktivität gross und die Ablenkung der kosmischen Strahlung stärker (kleinere Dosis). Eine Zeitreihe der Anzahl Sonnenflecken ist zum Beispiel auf https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression publiziert. Messungen der zeitlichen Änderung der kosmischen Strahlung werden unter anderem auf dem Jungfraujoch durchgeführt (cosray.unibe.ch).
- Einen Unterschied in der Strahlendosis von wenigen Prozenten bewirkt der Wassergehalt des Bodens, der typischerweise zwischen 10 und 40 Volumenprozent variiert (d.h. 'water fraction' = 0.1 bis 0.4; Referenz Jiang et al., 2023).
- Längen- und Breitengrad haben für ein kleines Land wie die Schweiz erwartungsgemäss wenig Einfluss.

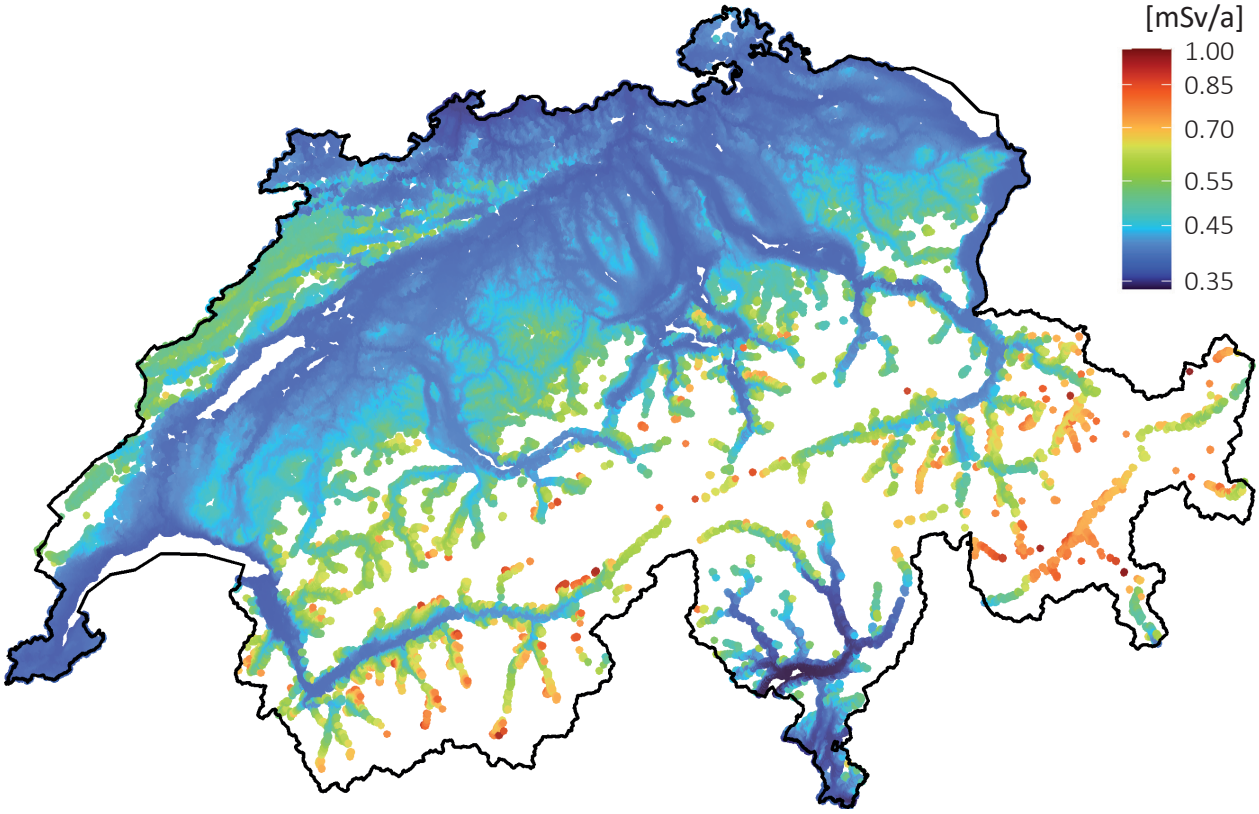


Abbildung 3 :
Verteilung der jährlichen Dosis durch kosmische Strahlung ohne Berücksichtigung der Abschirmung durch Gebäude in der Schweiz in mSv. Dargestellt sind alle ständig bewohnten Gebiete. (Karte: Guillaume Würsch)

Tabelle 1:
Sensitivität der mit EXPACS 4.10 berechneten Dosis ohne Berücksichtigung der Abschirmung durch Gebäude. Ausgangswerte (fettgedruckt) und Variationsbereich der untersuchten Parameter sind passend für die Schweiz gewählt. Jede Zeile zeigt den Einfluss bei der Änderung eines einzelnen Parameters. Leere Zellen bedeuten, dass der Ausgangswert verwendet wurde.

Höhe ü.M.	Sonnenaktivität (W-value)	Wassergehalt	Breite	Länge	mSv pro Jahr	Abweichung
518	**50 (27.12.2015)**	**0.2**	**46.8**	**8.2**	**0.4**	
240					0.349	- 12.3 %
1´364					0.582	+ 52.0 %
	130 (22.02.1990)				0.351	- 11.2 %
	23 (15.02.2011)				0.404	+ 2.1 %
		0.1			0.401	+ 1.4 %
		0.4			0.390	- 1.4 %
			45.8		0.393	- 0.6 %
			47.8		0.398	+ 0.5 %
				5.9	0.396	+ 0.1 %
				10.5	0.395	- 0.1 %

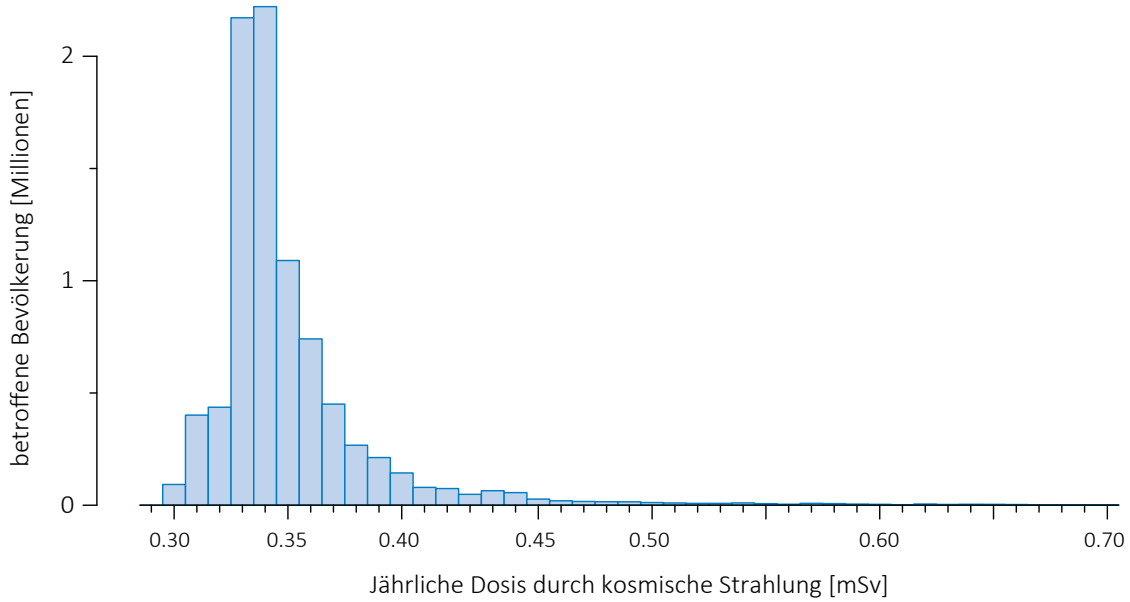


Abbildung 4 :
Histogramm der Anteile der Bevölkerung pro Dosisklasse der kosmischen Strahlung mit Berücksichtigung der Abschirmung in Gebäuden. Die Klassenbreite ist 0.01 mSv. Für die Abschirmung durch die Gebäudehüllen wurde ein Wert von SF_c = 0.85 berücksichtigt, für die Aufenthalt in Gebäuden ein Wert von O_i = 0.8. Jährliche Dosen von mehr als 0.70 mSv erhalten nur rund 0.1 Promille der Bevölkerung.

Strahlendosis ohne Abschirmung durch Gebäude

Für die hier vorgestellte Abschätzung berechneten wir mit dem EXPACS-Modell die gesamte Dosisleistung der kosmischen Strahlung ohne Berücksichtigung der Abschirmung durch Gebäude in einem Raster von 200 m × 200 m. Die nötigen geografischen Koordinaten und Höhenangaben stammen aus dem Höhenmodell DHM 25 / 200 m von Swisstopo (DHM25 / 200m - swisstopo (admin.ch)).

Für die Bodenfeuchtigkeit und die einkommende kosmische Strahlung wurden Durchschnittswerte verwendet ('W value'=50 für die kosmische Strahlung und 'Water fraction' = 0.2 für die Feuchtigkeit). Die so erhaltene Karte der jährlichen effektiven Dosis durch kosmische Strahlung «ohne Abschirmung» ist in Abbildung 3 gezeigt. Diese Resultate wurden anschliessend mit der Bevölkerungsverteilung «verrechnet». Dazu multiplizierten wir für jeden 200 m × 200 m Quadranten die Dosisleistung mit der Anzahl der dort wohnhaften Personen. Für die Bevölkerungsstatistik verwendeten wir die «STATPOP 2020»-Daten vom Bundesamt für Statistik (Statistik der Bevölkerung und Haushalte (STATPOP), Geodaten 2020 | Publikation | Bundesamt für Statistik (admin.ch)). Diese im 100 × 100 m Rasters vorhandenen Bevölkerungsdaten erforderten eine Aggregierung auf den 200 × 200 m Raster der Topographie. Die für die Schweiz so berechnete durchschnittliche Jahresdosis ohne Berücksichtigung der Abschirmung durch Gebäude, d.h. bei 100% Aufenthalt im Freien, beträgt 0.40 mSv.

Anmerkung: Das EXPACS-Modell orientiert sich an der US Standard-Atmosphäre 1976. Streng genommen müsste die Höhe eines Punktes also aus dem durchschnittlichen Luftdruck abgeleitet werden. Für die Schweiz ist diese Höhe rund 30 m tiefer als die verwendete Höhe. Die errechnete Dosis ist daher Grössenordnung 0.005 mSv/Jahr zu hoch.

Jahresdosis mit Berücksichtigung der Abschirmung durch Gebäude

Ein realistischerer Wert der jährlichen effektiven Dosis durch kosmische Strahlung (E_c), der auch die Abschirmung bei Aufenthalt in Gebäuden berücksichtigt, ergibt sich mit folgender Formel (UNSCEAR, 2008):

$$E_c = \dot{E}_{c,out} \left[(1 - O_{in}) + SF_c \cdot O_{in} \right]$$

wobei $\dot{E}_{c,out}$ die Dosisleistung durch kosmische Strahlung im Freien, O_{in} der zeitliche Anteil des Aufenthalts in Gebäuden, $1\text{-}O_{in}$ folglich der Aufenthalt im Freien und SF_c die Abschirmung der kosmischen Strahlung

durch die Gebäudehülle ist. Für die durchschnittliche Aufenthaltsdauer in Gebäuden übernehmen wir den von UNSCEAR 2008 vorgeschlagen Wert von 80% der Zeit (O_{in} = 0.8). Die Abschirmung SF_c wurde von UNSCEAR 2000 ebenfalls mit 0.8 beziffert. Sato (2016) geht aber von einem geringeren Abschirmungseffekt durch die Baumaterialien aus (besonders für Myonen) und verwendet als globalen Durchschnitt SF_c = 0.91. Wir wählen hier für die Schweiz mit SF_c = 0.85 einen etwas tieferen Wert (bessere Abschirmung) als Sato. Der erste Grund dafür ist, dass die bewohnten Gebiete der Schweiz eher etwas höher gelegen sind, als im globalen Durchschnitt. Das ist wichtig, weil mit zunehmender Höhe der Dosisbeitrag durch Neutronen grösser wird und diese werden effizienter abgeschirmt, als die in tiefen Lagen massgeblichen Myonen. Der zweite Grund ist, dass die Bauweise in der Schweiz im globalen Vergleich wohl eher als massiv einzuschätzen ist, also auch hier eine etwas bessere Abschirmung. Durch diese Wahl von O_{in} und SF_c erhalten wir für die Schweiz eine durchschnittliche jährliche effektive Strahlendosis von 0.35 mSv durch kosmische Strahlung am Boden.

Es ist klar, dass die beiden Parametern O_{in} und S_{Fc} nur grob geschätzt werden können und die berechnete Dosis dementsprechend mit einer Unsicherheit verbunden ist. Der mögliche Bereich der durchschnittlichen jährlichen Dosis durch kosmische Strahlung nach Berücksichtigung der Abschirmung durch Gebäude liegt zwischen 0.33 mSv und 0.37 mSv, wie die nachfolgende Tabelle zeigt:

Aufenthalt in Gebäuden, O_i	Abschirmung durch Gebäude, SF_c	jährliche Dosis nach Abschirmung E_c
0.85	0.80	0.33 mSv
0.80	0.85	**0.35 mSv**
0.80	0.91	0.37 mSv

Der tiefere Wert von 0.33 mSv pro Jahr ergibt sich bei Annahme einer längeren Aufenthaltzeit in Gebäuden: O_{in} = 0.85. Das bedeutet, dass sich eine Person 3.6 Stunden am Tag im Freien aufhält und entspricht dem Wert, den Folly et al. (2022) bei einer Studie mit Kindern aus der Schweiz ermittelt haben. Gleichzeitig wird, in Übereinstimmung mit UNSCEAR (2008) eine starke Abschirmung durch die Gebäudehüllen angenommen (S_{Fc} = 0.8). Der höhere Wert von 0.37 mSv pro Jahr resultiert mit einer längeren Aufenthaltszeit im Freien (O_{in} = 0.80) und einer schlechteren Abschirmung durch Gebäude (S_{Fc} = 0.91). Der längere Aufenthalt im Freien (4.8 Stunden pro Tag) entspricht der bisherigen Abschätzung von UNSCEAR (2008); die geringere Abschirmung ist jene, die Sato (2016) für Japan gewählt hat.

Natürlich erhalten nicht alle Menschen die gleiche Dosis durch kosmische Strahlung. Wegen der erwähnten starken Höhenabhängigkeit, erhalten vor allem Bevölkerungsgruppen in höher gelegenen Wohnorten eine grössere Dosis als der Durchschnitt. Die Verteilung der kosmischen Strahlendosis auf die Bevölkerung ist in Abbildung 4 dargestellt. Aus dieser Verteilung ergibt sich ein Median-Wert von 0.34 mSv pro Jahr. Der 95. Perzentil liegt bei 0.42 mSv pro Jahr, das heisst, 95% Prozent erhalten eine Dosis unterhalb von 0.42 mSv pro Jahr. Rund 1´400 Personen in der Schweiz haben einen Wohnort der höher gelegen ist als 1´900 m. Diese Personen erhalten eine jährliche kosmische Strahlendosis von über 0.7 mSv. Der Maximalwert (bei ganz wenigen Personen) dürfte im Bereich von 1 mSv pro Jahr liegen. Allerdings ist es aber wahrscheinlich, dass sich diese Menschen zeitweise in tiefer gelegenen Gegenden aufhalten und damit die erwähnten Maximaldosen seltene Ausnahmen sein dürften.

Verdankung: Munehiko Kowatari und Christophe Murith danken wir für wertvolle Diskussionen.

Literatur

Folly, C.L., et al., 2022. Measurements and determinants of children's exposure to background gamma radiation in Switzerland. J. Rad. Res., 1-10; doi: 10.1093/jrr/rrac006

Jiang, Y. et al., 2023. Water 2023, 15(8), 1500; doi:10.3390/w15081500

Sato, T., 2015. Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EXPACS. PLoS ONE 10(12): e0144679. doi:10.1371/journal.pone.0144679

Sato, T., 2016. Evaluation of World Population-Weighted Effective Dose due to Cosmic Ray Exposure. Sci. Rep. 6, 33932; doi: 10.1038/srep33932.

UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Annex B- Exposures of the public and workers from various sources of radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

Rayonnement externe



Externe Strahlung

- Mesures in situ
- Réseau NADAM
- Mesures d’aéroradiométrie

- In situ Messungen
- Netzwerk NADAM
- Aeroradiometrische Messungen

2022

3.1
Mesures in situ & exposition externe

S. Estier, A. Gurtner
Section Radioactivité de l'environnement, URA, Office fédéral de la santé publique OFSP, Berne

Résumé

Pour l'année 2022, les campagnes de mesures de spectrométrie gamma in situ ont porté essentiellement sur le voisinage des centrales nucléaires et des centres de recherche (PSI et CERN) ainsi que sur le suivi de la contamination rémanente en ^{137}Cs issue des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. Cette contamination reste plus importante au Tessin et dans le nord-est de la Suisse par rapport au Plateau suisse, mais malgré cela, les résultats de spectrométrie in situ 2022 n'ont signalé aucune valeur susceptible de représenter un risque pour la santé du public.

Introduction

En Suisse, le suivi permanent de l'exposition ambiante repose sur les réseaux NADAM (échelle nationale) et MADUK (voisinage des installations nucléaires). L'objectif de ces réseaux est de signaler, 24h sur 24h, des augmentations anormales de l'exposition ambiante. Ces mesures, comme celles des dosimètres à thermoluminescence, recensent l'exposition ambiante globale sans permettre d'en distinguer les composantes individuelles. Les mesures de spectrométrie gamma effectuées en laboratoire sur des échantillons s'orientent, quant à elles, avant tout sur la mise en évidence de traces de radionucléides. Les résultats ont alors un caractère très ponctuel et ne renseignent pas sur l'exposition ambiante.

Pour combler cette lacune, les laboratoires mobiles de l'OFSP (Section URA, Berne), de l'IFSN (Brugg), du Laboratoire de Spiez et de l'IRA (Lausanne) misent sur la spectrométrie gamma directe sur site (in situ). Cette méthode possède 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 informe ainsi de manière sensible et réaliste 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

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

d'équivalent de dose ambiant H*(10) utilisés par notre laboratoire 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, 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.

Sites examinés en 2022

En 2022, les mesures de spectrométrie gamma in situ ont été réalisées au voisinage des centrales nucléaires de Beznau (CNB), Gösgen (CNG), Leibstadt (CNL) et Mühleberg (CNM), des centres de recherche (PSI, CERN), du site d'entreposage temporaire de déchets radioactifs (ZWILAG) ainsi qu'au Tessin, région de Suisse la plus touchée par les retombées de l'accident de Tchernobyl, conformément au programme de surveillance habituel.

Les trois sites de référence (Posieux/FR, Güttingen/TG et Cadenazzo/TI) pour la surveillance de la radioactivité dans l'environnement en Suisse ont également été examinés en 2022. Les emplacements d'Arenenberg/TG et de Coglio/TI complètent la liste des sites visités en 2022. Cette méthode a également été utilisée dans le cadre de l'exercice GNU 2022 et pour des mesures à l'intérieur de divers bâtiments qui feront l'objet d'une publication à venir.

Résultats in situ 2022

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 2022. 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 2022, le seul émetteur gamma d'origine artificielle mis en évidence sur l'ensemble des sites est le ^{137}Cs.

Les résultats des mesures effectuées au voisinage des centrales nucléaires, du PSI et du ZWILAG (figure 1) sont semblables à ceux enregistrés sur les sites de référence, situés hors influence de ces installations, comme Güttingen ou Posieux.

Pour la centrale nucléaire de Mühleberg, officiellement mise hors service en septembre 2020, les mesures in situ ont été réalisées en 2022 sur les sept sites examinés dans le cadre du programme complémentaires «Point zéro Démantèlement KKM

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

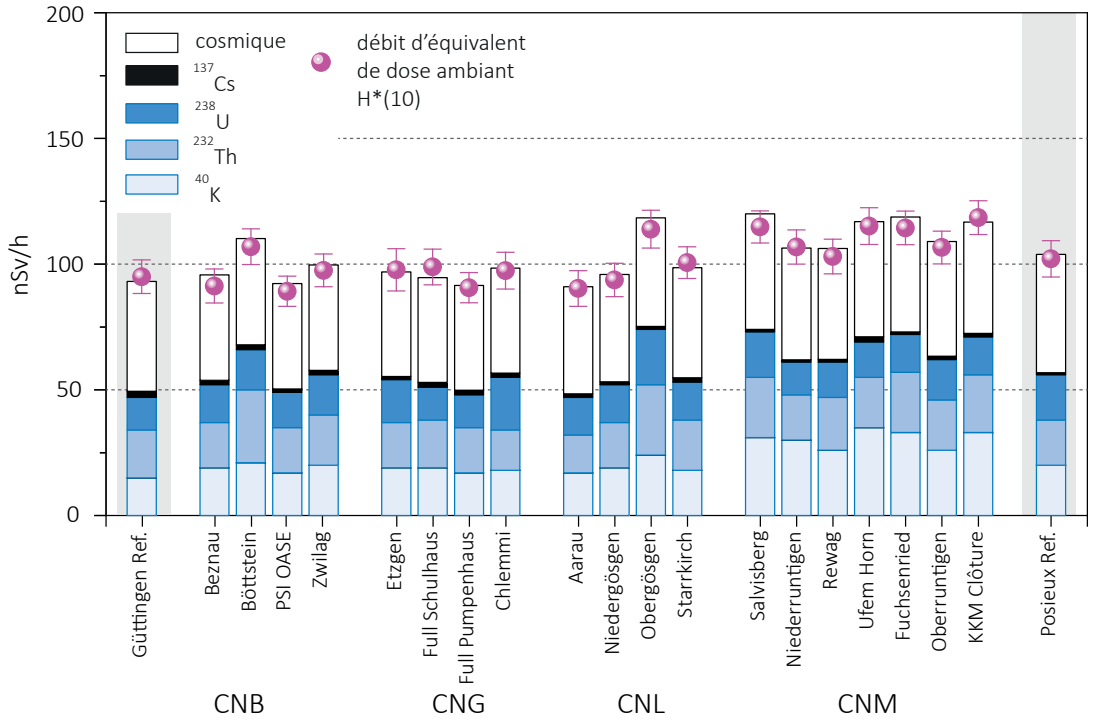


Figure 1 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage des centrales nucléaires suisses en 2022 ainsi qu'aux points de référence de Güttingen/TG et Posieux/FR (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre d'ionisation est également représentée.*

2017-2019» (figure 3) dont le rapport établi conjointement par l'IFSN et l'OFSP, Démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg: Mesures Point Zéro 2017-2019 [4] 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.

Les valeurs de débit de dose enregistrées lors des mesures in situ au voisinage de la CNM en 2022 étaient 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 3).

On constate sur la figure 3 que les valeurs de ^{40}K mesurées en 2022 sont généralement plus élevées que celles enregistrées au cours des années précédentes. Ceci est dû à la grande sécheresse de l'été 2022. En effet, en l'absence d'humidité dans le sol, sa densité est plus faible que la valeur standard utilisée pour calculer la réponse du détecteur (étalonnage en efficacité). Aucune correction de l'auto-

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*

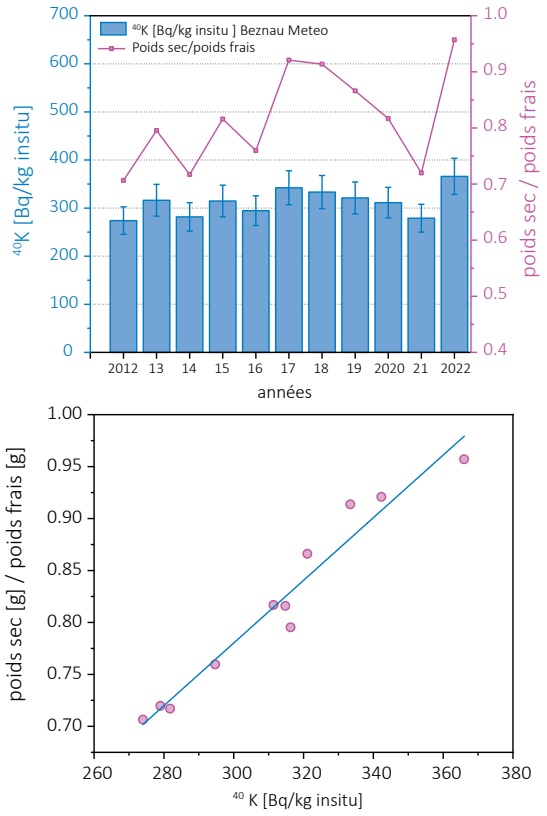


Figure 2 :
Mise en corrélation de la concentration du ^{40}K de 2012 à 2022 avec le rapport poids sec sur poids frais des prélèvements de sol. Mesures et prélèvements effectuées à la station Beznau Meteo.

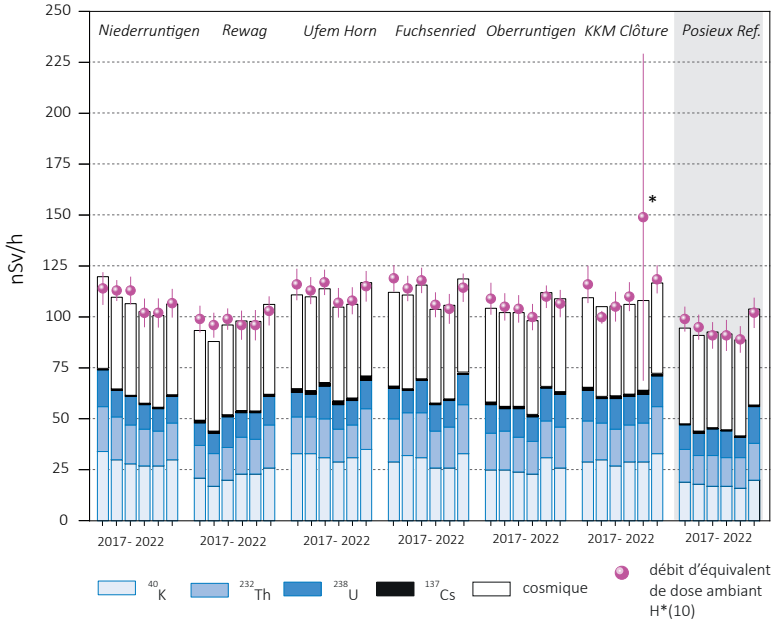


Figure 3 :
Suivi 2017-2022 des contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg ainsi qu'au point de référence de Posieux/FR (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 4 :

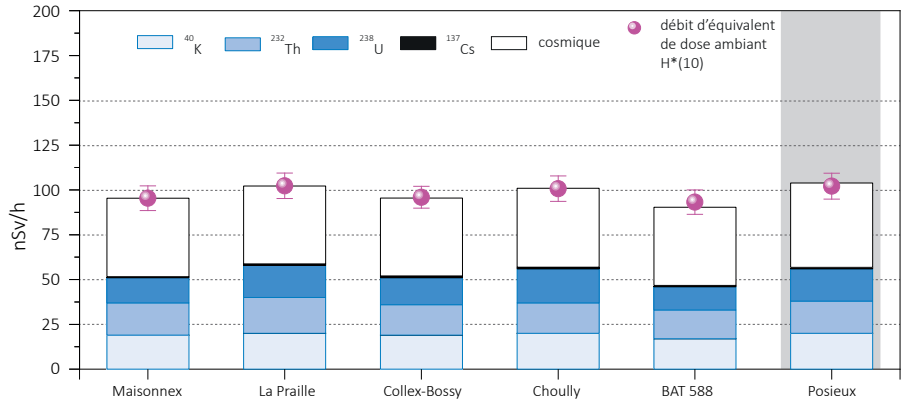


Figure 5 :

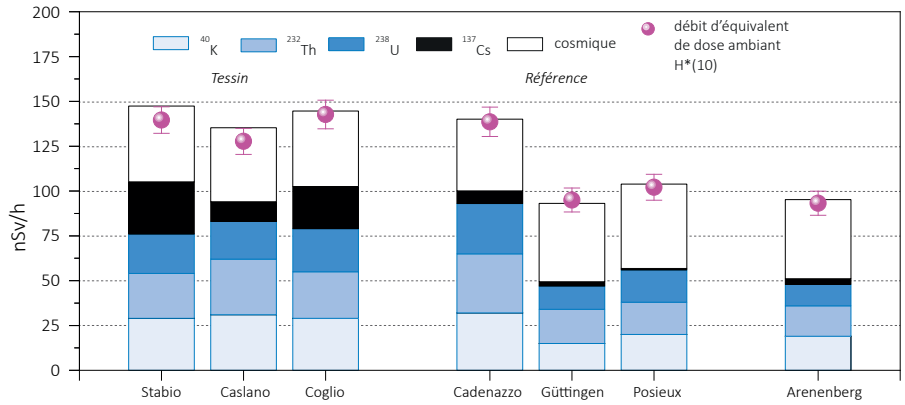


Figure 4 & 5 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2022 au voisinage du CERN (fig 3), au Tessin, à Arenenberg ainsi que sur les 3 sites de référence (fig 4). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre d'ionisation est également représentée.*

absorption pour tenir compte de la variation de la densité n'ayant été appliquée, les valeurs d'activité seront surestimées. La figure 2 montre bien la corrélation entre le rapport poids sec/poids frais du sol, prélevé à l'endroit de la mesure in situ, avec l'activité de ^{40}K évaluée par spectrométrie in situ. Plus le sol est sec, plus ce rapport est élevé (proche de 1) et plus l'activité calculée du ^{40}K l'est également. L'été 2021 ayant été particulièrement pluvieux, le phénomène inverse s'est produit et les valeurs de ^{40}K étaient alors sous-estimées.

La figure 4 montre les résultats des mesures in situ réalisées au voisinage du CERN en 2022. Ces résultats ne se distinguent pas de ceux enregistrés sur le site de référence de Posieux. Ni l' ^{41}Ar dans l'air, ni le ^{22}Na dans le sol n'ont été décelé lors de la campagne in situ 2022.

Au Tessin, comme le montre la figure 5, 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 varient de façon importante d'un site à l'autre au sein du canton, il s'avère donc difficile de définir une valeur de référence unique pour la contamination du sol en ^{137}Cs au Tessin. Ces variations s'expliquent d'une part par les différences de dépositions initiales, directement proportionnelles aux précipitations lors du passage du nuage radioactif post-Tchernobyl, et en fonction de l'altitude pour les contributions des essais atomiques des années 50 et 60, et d'autre part par les différences de nature et de traitement des sols depuis 1986 (travaux, sols retournés ou non, etc.).

Au Nord-Est de la Suisse (Güttingen, Arenenberg), les retombées de ^{137}Cs dues à l'accident de Tchernobyl ont été plus importantes que sur le reste du plateau suisse, mais sont restées nettement plus faibles qu'au sud des Alpes.

Notons encore que pour l'ensemble des sites examinés, les différences entre reconstruction in situ et mesures par chambre d'ionisation sont restées inférieures à 10 %, confirmant ainsi la fiabilité de la méthode.

Conclusions

Les mesures de spectrométrie gamma in situ réalisées par l'OFSP en 2022 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, elle 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 NAZ, Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS,
Guisanplatz 1B, 3003 Bern

Zusammenfassung

Um die externe radioaktive Strahlung in der Schweiz permanent grossräumig überwachen zu können, betreibt die Nationale Alarmzentrale NAZ 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 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 Vaduz (FL) als Beispiel herangezogen, um die Charakteristik der erhobenen Daten und deren Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen zu illustrieren.

Im Jahr 2022 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 die Nationale Alarmzentrale (NAZ) 365 Tage pro Jahr rund um die Uhr erreichbar und bereit, im Bedarfsfall in den Einsatz zu gehen. 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 NAZ im Bereich «Erhöhte Radioaktivität» sind besonders umfangreich. Als zentrales Element der Bewältigung eines radiologischen oder nuklearen Ereignisses wird die Probenahme- und Messorganisation des Bundes durch die NAZ koordiniert und eingesetzt. Sie ermöglicht der 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 NAZ alarmiert, und der Messwert muss durch Fachpersonen der 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 NAZ (KAMU NAZ) mit einer Kontrollmessung vor Ort beauftragt werden. So kann die 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 NAZ zur Beurteilung der radiologischen Situation im Normalzustand und im Ereignisfall. Zudem werden sie mit den Behörden mehrerer Nachbarstaaten geteilt.

Es werden auch ODL-Stunden- und Tagesmittelwerte berechnet und zweimal täglich auf der Internetseite der NAZ (www.naz.ch/de/aktuell/messwerte.html) publiziert. Damit stehen der Öffentlichkeit die Ortsdosisleistungs-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, verfügt die NAZ insgesamt über 110 für den ortsfesten Betrieb vorgesehenen NADAM-Sonden.

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 der NAZ übermitteln. Diese Sonden sind im Labor Spiez stationiert. Die NAZ kann entsprechende Equipen aufbieten und veranlassen, dass mit diesen Sonden bei Bedarf innert weniger Stunden das NADAM-Netz ergänzt bzw. verdichtet wird. Derartige Ergänzungen wurden im Jahr 2022 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 Beeinträchtigungen der terrestrischen Kommunikationsnetze gerechnet werden muss.

Da der Hersteller der bisherigen Sonden angekündigt hatte, die technische Unterstützung in den nächsten Jahren einzustellen, und um die Kompatibilität der mobilen Kommunikationseinheiten mit aktuellen Mobilfunkstandards zu gewährleisten, wurden im Rahmen des Werterhalts-Projektes NADAM 2020 in den Jahren 2020 bis 2022 alle NADAM-Sonden sukzessive durch neue Sonden des Typs Gamma Tracer XL2-2 des Herstellers Bertin GmbH ersetzt.

Im MADUK-Netz in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen setzt das ENSI baugleiche Sonden ein, die aus denselben Gründen ebenfalls ersetzt werden mussten. Die Evaluation und Beschaffung der neuen Sonden wurde daher mit dem ENSI gemeinsam durchgeführt. Ende 2021 waren noch 10 NADAM-Sonden des alten Typs im Einsatz. Mit dem Ersatz der Sonden in La Dôle, Stabio und Villars-Tiercelin wurde das Projekt NADAM 2020 im August 2022 abgeschlossen.

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 1089 m.ü.M. am Talgrund im Bergell, wo im Jahr 2022 mit 197 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 2022 mit 178 nSv/h zum zweithöchsten Jahresmittelwert der NADAM-Stationen.

Der Messwertebereich, der die Minima und Maxima der letzten Jahre sicher einschliesst, wird bei der NAZ als Erfahrungsbereich einer bestimmten Station 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 (= 1000 nSv) 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 auf der NAZ-Homepage 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 auf einer Station 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.

Eine einzige NADAM-Station liegt ausserhalb des Schweizer Staatsgebietes, was dadurch ermöglicht wird, dass MeteoSchweiz auch im Nachbarland Liechtenstein eine Messstation betreibt, im Süden des Hauptortes Vaduz. Als Beispiel, um den Einfluss der Witterungsbedingungen zu diskutieren, wird in diesem Bericht weiter unten der Verlauf der Ortsdosisleistung auf dieser Station 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).

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.

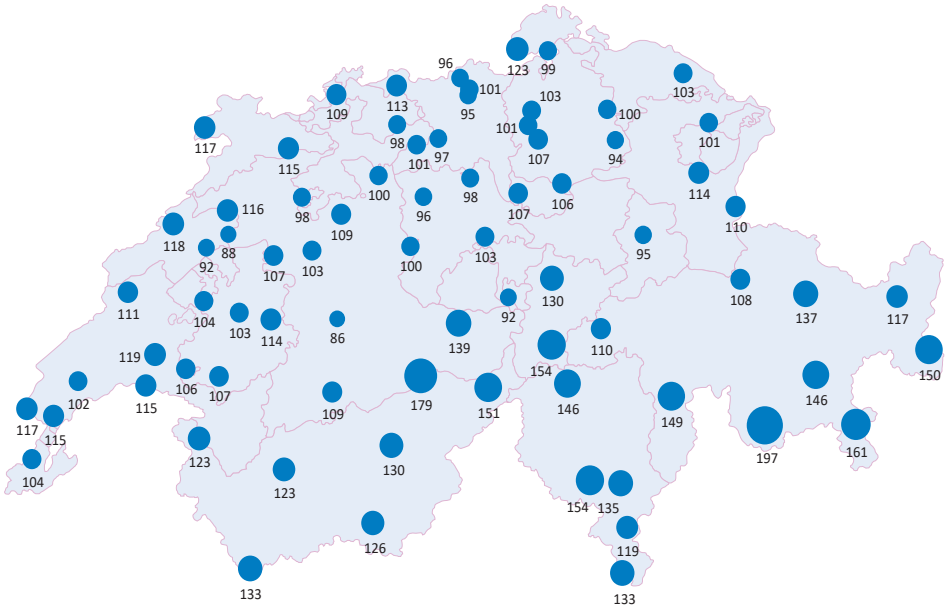
Die ODL-Jahresmittelwerte und die Messwertebereiche aller Stationen, die sich aus den Maxima und Minima der 10 min-Werte ergeben, sind in Figur 2 dargestellt. Mit Ausnahme des ODL-Maximums in Genf, das weiter unten diskutiert wird, entsprechen die Werte den langjährigen Erfahrungen, mit Mittelwerten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

Auch im Jahr 2022 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.

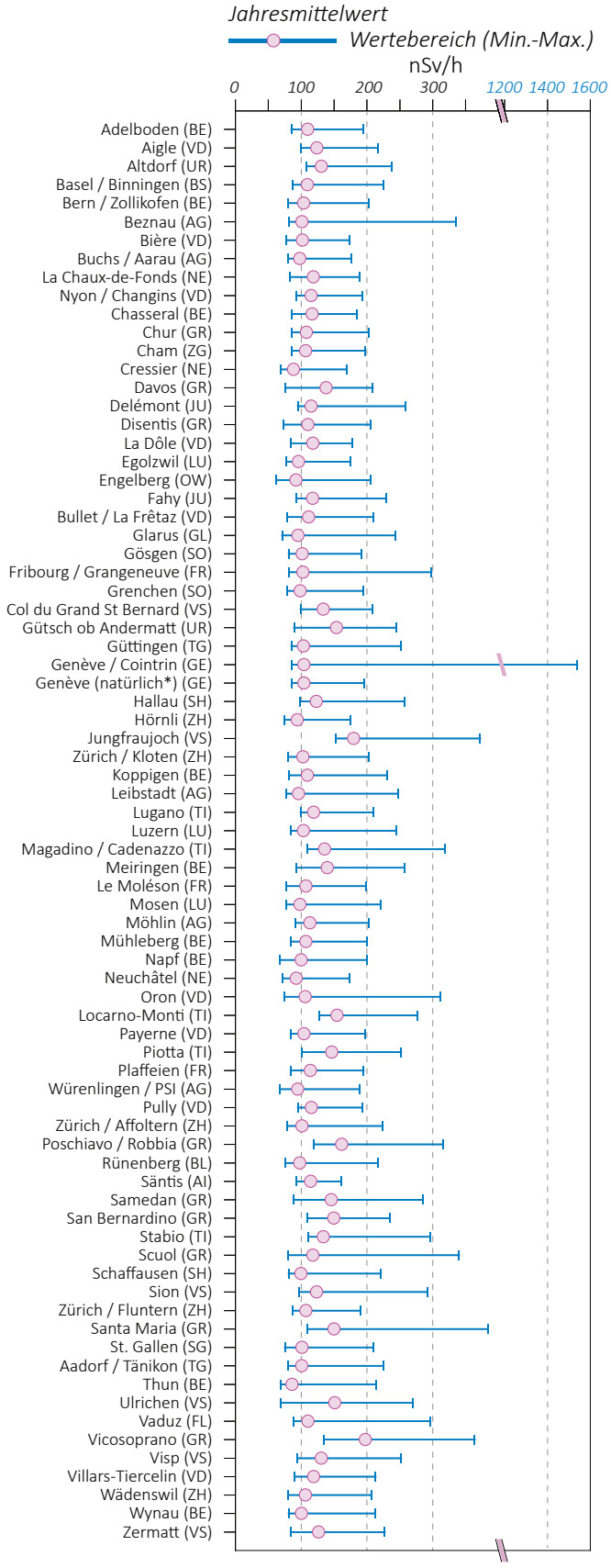
Tiefere ODL-Werte ergeben sich, wenn nur reduzierte Strahlung die Sonde erreicht. Dies kann der Fall sein, wenn nach starken Niederschlägen in der Luft befindliche Partikel ausgewaschen und im Boden versickert oder abgeflossen sind und anschliessend die mit Wasser gesättigten obersten Bodenschichten 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.

Erhöhte Radioaktivität in Genf

Wie schon im Jahr zuvor wurden auch im Jahr 2022 wieder Schweissnahtprüfungen in der Nähe der Sonde in Genf-Cointrin durchgeführt (siehe BAG-Bericht «Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2021»), was für einige Stunden ODL-Werte von bis zu 1540 nSv/h zur Folge hatte. Im Unterschied zum Vorjahr lag die Ortsdosisleistung diesmal nicht nur ausserhalb des Erfahrungsbereiches, sondern auch über der Alarmschwelle, weshalb das NAZ-Pikett alarmiert wurde. Der Fachbereich Radioaktivität der NAZ konnte so umgehend den Sachverhalt untersuchen und die Ursache mit Hilfe der Kantonalen Messunterstützung (KAMU) in Genf eruieren.



Figur 1:
Karte mit den Jahresmittelwerten 2022 aller NADAM-Sonden in Nanosievert pro Stunde, basierend auf den 10 min-Werten. Der Jahresmittelwert der Ortsdosisleistung variiert je nach Standort zwischen 86 nSv/h in Thun und 197 nSv/h in Vicosoprano (GR).



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 2022. *Das Maximum des Wertebereiches «Genève / Cointrin» ergab sich aufgrund von in der Nähe stattfindenden Schweissnahtprüfungen. Der Wertebereich «Genève (natürlich*)» umfasst nur die natürliche Radioaktivität ohne die durch die Schweissnahtprüfungen bedingten erhöhten Werte.*

Obwohl die genannten Werte nicht aufgrund natürlicher Strahlung zustande kamen, wurden sie dennoch korrekt am Standort als Ortsdosisleistung detektiert und führten daher zum in Figur 2 gezeigten Maximum der Station Genf-Cointrin. Der höchste in Genf-Cointrin gemessene 10 min-Mittelwert des Jahres 2022, der nicht einem Sondentest oder der erwähnten Schweissnahtprüfung zugeordnet werden kann, wurde mit 196 nSv/h am 17.08.2022 gemessen, kurz nachdem Niederschlag gefallen war (Wertebereich «Genève (natürlich*)» in Figur 2).

Detaillierte Betrachtung der NADAM-Station Vaduz

Figur 3 zeigt den Verlauf der ODL-10 min-Mittelwerte in Nanosievert pro Stunde (nSv/h) am Standort Vaduz FL über das ganze Jahr 2022. Ebenfalls aufgetragen und auf der rechten y-Achse skaliert ist die Niederschlagsmenge in Millimetern pro 10 Minuten (mm/10 min). Der ODL-Jahresmittelwert liegt bei 110 nSv/h, sehr wenig über dem häufigsten Wert von 108 nSv/h. Dazu sind Spikes bis zu einem Maximalwert von 296 nSv/h zu erkennen.

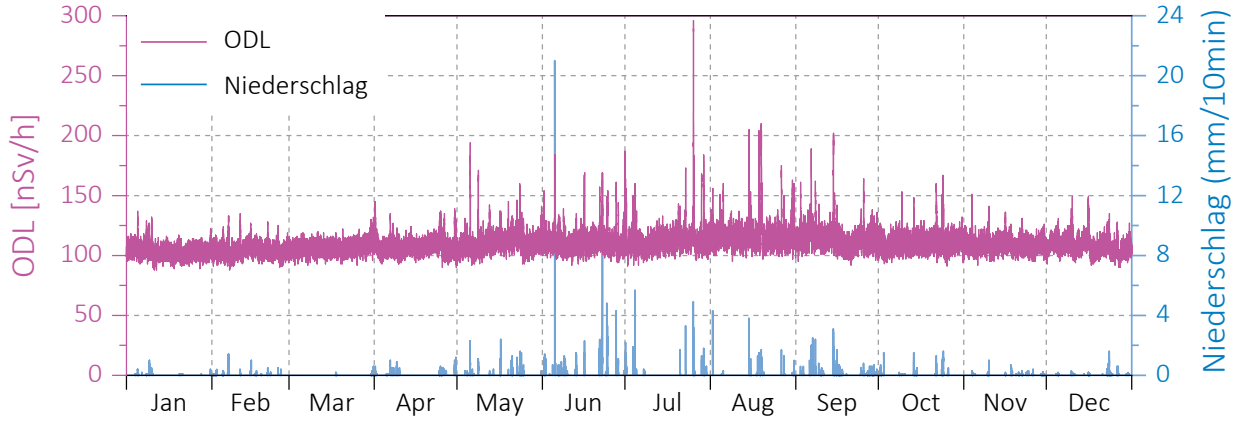
Die ODL-Spikes über 150 nSv/h korrelieren eindeutig mit Niederschlag. Der in der Datenbank der NAZ dokumentierte Erfahrungsbereich für Vaduz reicht von 50 bis 220 nSv/h. Am 25.07.2022 von 20:20 bis 21:50 Uhr UTC respektive 22:20 bis 23:50 Uhr MESZ wurde der obere Schwellenwert dieses Erfahrungsbereiches, jedoch kein Alarmwert überschritten. Somit konnten diese ungewöhnlich hohen ODL-Werte durch den Fachbereich Radioaktivität der NAZ am Folgetag beurteilt und in der Datenbank als plausibel markiert werden, da zeitgleich mit den erhöhten ODL-Werten bis zu 4.9 mm/10 min Niederschlag registriert wurde.

Beim Betrachten der ODL- und Niederschlagskurven über das ganze Jahr lässt sich erkennen, dass im Sommerhalbjahr mehr Niederschläge stattgefunden haben und entsprechend auch mehr Spikes kurzzeitig erhöhte Radioaktivitätswerte anzeigen als in den kälteren Monaten des Jahres. Die Wetterstation in Vaduz erfasst keine Daten zu Schneefall und zur aktuellen Schneedecke. Der Umstand, dass die ODL-Werte das ganze Jahr über sehr gleichmässig um den Jahresmittelwert herum verteilt liegen, lässt vermuten, dass nie eine dicke Schneeschicht über längere Zeit einen signifikanten Teil des terrestrischen Strahlungsanteils abgeschirmt hat.

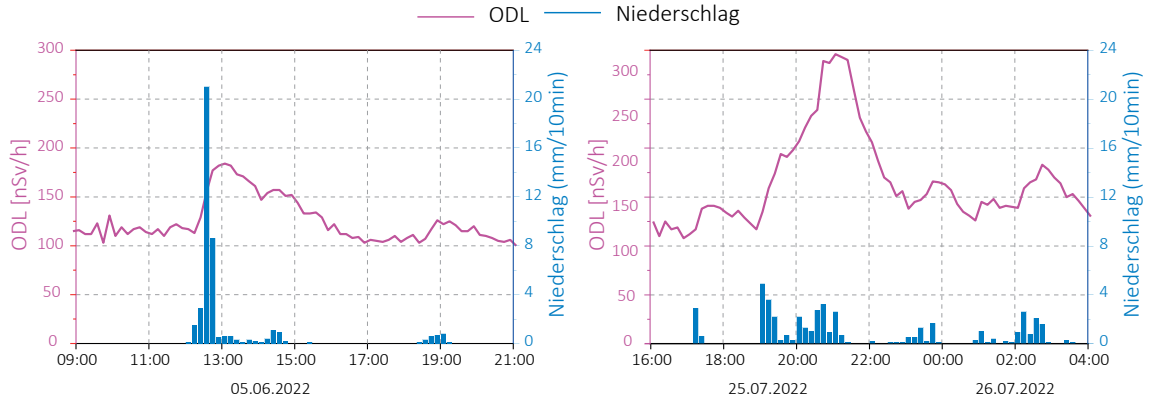
Bei genauer Betrachtung lassen sich am 10. und am 17.12.2022 zwei kleine Wellen im ODL-Signal erahnen. Tatsächlich wurde an diesen Tagen in der zwei Kilometer entfernten Station in Sevelen SG etwas Schneefall gemessen. Es liegt somit nahe, dass diese Schwankungen dadurch entstanden sind, dass zunächst schneeförmiger Niederschlag einen leichten Anstieg der ODL und die anschliessende Abschirmung durch den am Boden liegenden Schnee eine geringfügige Reduktion der terrestrischen Strahlung zur Folge hatte, bevor die ODL innert weniger Tage wieder zu den gewohnten Werten anstieg.

Der ODL-Spike, der sich am 05.06.2022 aufgrund heftigen Niederschlags von bis zu 21 mm/10 min ergab, und derjenige, der am Abend des 25.07.2022 zum ODL-Jahresmaximum der Station Vaduz führte, sind in Figur 4 detailliert dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Höhe der gemessenen ODL-Spikes nicht mit der Niederschlagsmenge korreliert, da der kurzfristige ODL-Anstieg primär davon abhängt, wie viele partikelgetragene Radionuklide (v.a. Zerfallsprodukte von ^{222}Rn) sich gerade in der Atmosphäre befinden, wenn der Niederschlag einsetzt und die Deposition der Partikel am Boden in Sondennähe bewirkt.

So fiel der ODL-Anstieg während und nach dem heftigsten Niederschlag des Jahres vergleichsweise moderat aus, nämlich von etwa 110 auf 184 nSv/h. Hingegen war der Anstieg bei mässigem Niederschlag am Abend nach einem trockenen warmen Sommertag sehr ausgeprägt.



Figur 3:
Verlauf der 10 min-ODL-Werte (violett, auf der linken y-Achse skaliert) und 10 min-Niederschlagswerte (blau, rechte y-Achse) am Standort Vaduz FL über das Jahr 2022. Die ODL-Spikes jeweils bei einsetzendem Niederschlag sind gut zu erkennen. Die höchste 10 min-ODL von 296 nSv/h wurde am 25.07.2022 zwischen 21:00 und 21:10 UTC bei Niederschlag gemessen.



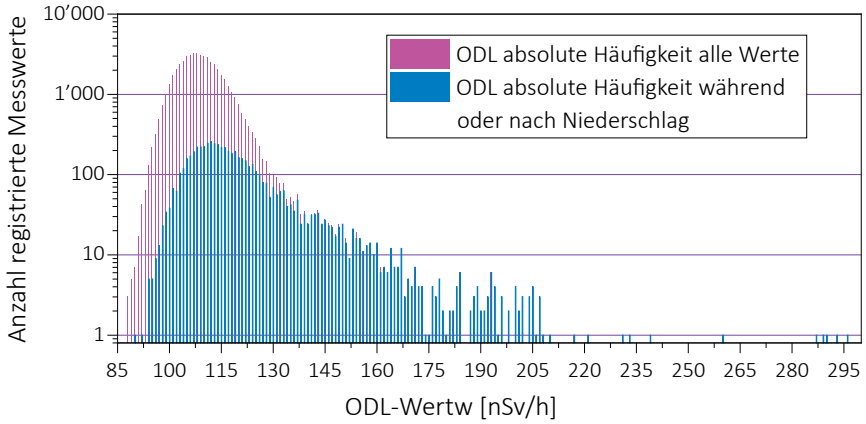
Figur 4:
Verlauf der 10 min-ODL-Werte und der Niederschlagsmenge am Standort Vaduz (FL) am 05.06.2022 und in der Nacht vom 25. auf den 26.07.2022. Der heftige Niederschlag von 21 mm/10 min am 05.06.2022 hatte einen deutlich geringeren Anstieg der ODL zur Folge als der moderate Niederschlag am Abend des 25.07.2022.

Die Häufigkeit aller am Standort Vaduz (FL) im Jahr 2022 erhobenen ODL-Messwerte ist logarithmisch skaliert in Figur 5 aufgetragen. Die Verteilung der Werte ist monomodal, es gibt also erwartungsgemäss keine weiteren Maxima von Werten, die unter anhaltend veränderten Bedingungen gemessen worden wären, z.B. aufgrund einer länger bestehenden Schneedecke oder einer langfristig in Sondennähe befindlichen Strahlenquelle. Der Wert von 108 nSv/h wurde insgesamt 3'255-mal und damit am häufigsten detektiert.

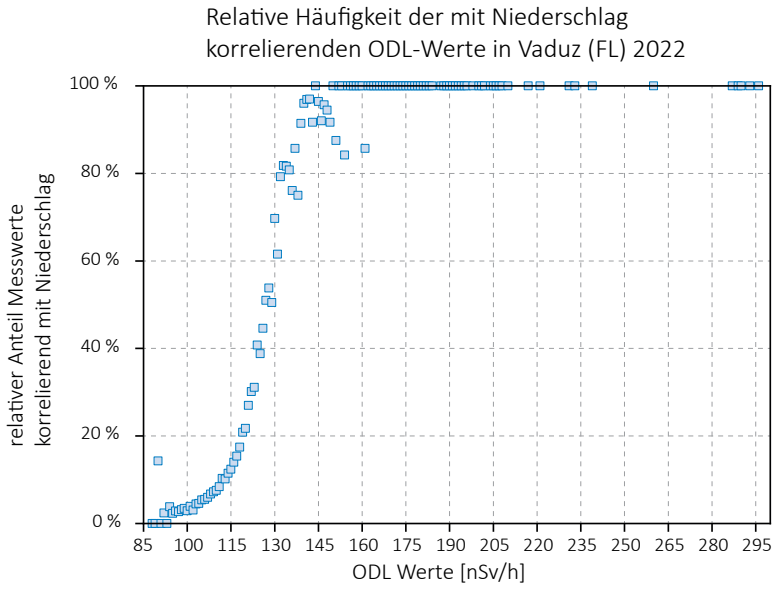
Die zweite dargestellte Datenreihe zeigt die ODL-Werte, welche aufgezeichnet wurden, wenn Niederschlag innerhalb der vorangehenden 50 Minuten oder der nachfolgenden 10 Minuten gefallen war. Der Anteil der oberhalb von 140 nSv/h gemessenen ODL-Werte ohne Bezug zu Niederschlag ist sehr gering und mit der logarithmischen Skalierung nicht visuell zu erkennen.

In Figur 6 ist die Korrelation der im Jahr 2022 in Vaduz gemessenen ODL-Werte mit Niederschlag dargestellt. In dieser Darstellung mit der linearen Skala sind oberhalb von 140 nSv/h noch einzelne 10 min-ODL-Werte ohne Niederschlag zu erkennen, die an regnerischen Tagen aufgezeichnet wurden, jedoch mit geringfügig grösserem zeitlichen Abstand zum Niederschlag vorher und nachher, als dass mit der angewendeten Formel (50 min nach dem letzten bis 10 min vor dem nächsten Niederschlag) der Bezug zum Niederschlag erfasst worden wäre.

Im Wertebereich um 110 nSv/h, nahe beim häufigsten Messwert und beim Jahresmittelwert, wurde nur ein geringer Anteil unter 10 % der Werte während oder kurz nach Niederschlag registriert. Zum ODL-Wert 90 nSv/h wurden insgesamt 7 Datenpunkte registriert, davon ein einziger 40 min nachdem am 10. Januar Niederschlag stattgefunden hatte. In der Folge ergibt sich wegen dieses einzelnen Messwertes eine berechnete relative Niederschlagskorrelation von 14.3 % für die ODL von 90 nSv/h.



Figur 5:
Verteilung der 10 min-ODL-Werte für die Station Vaduz (FL) im Jahr 2022, logarithmisch skaliert.
Violett: Alle Messwerte, blau: Messwerte, die zeitnah mit erfolgtem Niederschlag registriert wurden.



Figur 6:
Anteil der 10 min-ODL-Werte für die Station Vaduz (FL) im Jahr 2022, welche innerhalb von 10 min vor oder 50 min nach Niederschlag gemessen wurden. Für Werte oberhalb von 161 nSv/h liegt dieser Anteil bei 1.

Kennzahlen und Eckwerte zu den Messungen im NADAM-Netz im Jahr 2022

Für alle NADAM-Stationen sind für das Jahr 2022 die ODL-Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte in Tabelle 1 zusammengestellt. Verglichen mit anderen Jahren gibt es keine Auffälligkeiten. Die höchsten ODL-Jahresmittelwerte wurden, den langjährigen Erfahrungen entsprechend, auf den Stationen Jungfraujoch (VS) und Vicosoprano (GR) festgestellt.

Der Niederschlagseffekt, also der Umstand, dass bei einsetzendem Niederschlag eine höhere ODL auftritt, war im Jahr 2022 an den Standorten Fribourg / Grangeneuve (FR; niederschlagsbedingter Maximalwert liegt 191 % über dem Jahresmittelwert), Oron (VD; 194 %) und Beznau (AG; 232 %) am stärksten ausgeprägt. Die daraus resultierenden Höchstwerte sind auch in Figur 2 dargestellt, als Obergrenze der eingetragenen Messwertbereiche.

Die Verhältnisse dieser Maxima zu den Jahresmittelwerten an den jeweiligen Stationen liegen tendenziell höher als die entsprechenden Verhältnisse in den letzten Jahren. Eine mögliche Erklärung dafür ist der Sommer 2022 mit ausserordentlich langen trockenen Perioden, während denen sich mehr radioaktive Partikel in der Atmosphäre verteilen konnten, bevor Niederschlag einsetzte.

Am Standort Vaduz (FL) lagen 2022 der Jahresmittelwert und der häufigste Messwert bei 108 respektive 110 nSv/h, also sehr nahe beieinander, da keine besonderen Umstände die ODL über lange Zeit stark beeinflussten. Mittelwerte, die am Deutlichsten unter den häufigsten Messwerten lagen, wurden 2022 wie schon mehrfach in der Vergangenheit an den schneereichen Standorten Gütsch ob Andermatt (Jahresmittelwert 14.7% unter dem häufigsten Wert), Ulrichen (VS; 14.4 % tiefer) und Davos (GR; 7.8 % tiefer) ermittelt, also an den Standorten, die auch die tiefsten ODL-Minima relativ zum Jahresmittelwert aufweisen. Standorte mit deutlich über dem häufigsten Messwert liegenden Jahresmittelwert sind 2022 keine aufgefallen.

Erkenntnisse und Ausblick

Im Jahr 2022 wurden keine Werte gemessen, die auf eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung schliessen lassen. Wie bereits im Vorjahr wurden in einem einzigen Fall aufgrund des Einsatzes einer Strahlungsquelle in der Nähe eines Sondenstandortes erhöhte ODL-Werte gemessen. Obwohl dabei die Alarmschwelle von 1 µSv/h überschritten wurde, kann eine daraus entstehende Gefahr für die Bevölkerung oder die Umwelt ausgeschlossen werden. Die NADAM-Sonden sind stabil und zuverlässig, und mit den neuen Sonden 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 2022 keine grossen Auffälligkeiten.

Mit dem Ersatz der letzten zehn NADAM-Sonden durch das neue Modell GT XL2-2 von der Bertin GmbH ist das Projekt ‹Werterhalt NADAM 2020› abgeschlossen.

Tabelle 1: Teil 1

Jahresmittelwert, häufigster Wert, Minimum und Maximum der NADAM-Stationen

Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte für alle NADAM-Stationen im Jahr 2022

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	1'322	109.5	110	85	194
Aigle (AIG)	VD	09.09.09	07.10.21	382	123.4	122	100	217
Altdorf (ALT)	UR	28.10.09	11.10.21	439	130.2	129	108	238
Basel-Binningen (BAS)	BS	19.11.09	14.10.21	317	109.1	107	87	225
Bern-Zollikofen (BER)	BE	30.09.09	08.06.21	554	103.4	102	80	203
Beznau (BEZ)	AG	19.11.09	25.08.21	327	100.8	98	82	335
Bière (BIE)	VD	12.01.17	15.04.21	684	101.6	100	77	173
Buchs/Aarau (BUS)	AG	20.11.09	14.06.21	388	97.4	96	80	176
La Chaux-de-Fonds (CDF)	NE	17.09.09	13.09.21	1'018	118.3	119	83	189
Nyon-Changins (CGI)	VD	23.09.09	29.09.21	459	114.8	112	92	193
Chasseral (CHA)	BE	17.09.09	-	1'594	116.3	117	86	185
Chur (CHU)	GR	09.10.09	12.10.21	557	107.5	106	86	203
Cham (CHZ)	ZG	29.01.18	10.06.21	442	106.6	105	86	197
Cressier (CRM)	NE	03.11.16	01.10.20	431	87.9	87	69	169
Davos (DAV)	GR	08.10.09	02.06.21	1'589	137.4	149	76	209
Delémont (DEM)	JU	03.11.16	27.10.21	439	115.0	113	95	258
Disentis/Sedrun (DIS)	GR	28.10.09	21.09.21	1'197	110.0	111	73	206
La Dôle (DOL)	VD	23.09.09	-	1'670	117.3	119	84	178
Egolzwil (EGO)	LU	22.09.10	16.08.21	523	95.5	95	77	174
Engelberg (ENG)	OW	30.10.09	01.09.21	1'035	91.6	92	62	205
Fahy/Boncourt (FAH)	JU	14.10.09	31.05.21	597	117.2	115	92	229
Bullet/La Frêtaz (FRE)	VD	24.09.09	29.09.20	1206	111.0	112	79	210
Glarus (GLA)	GL	02.12.09	28.06.21	518	95.0	94	71	243
Gösgen (GOE)	SO	20.11.09	22.06.21	381	101.2	100	81	191
Fribourg-Posieux (GRA)	FR	13.01.17	18.05.21	646	102.6	102	82	298
Grenchen (GRE)	SO	06.12.10	30.03.21	431	98.3	97	79	194
Col du Gd-St-Bernard (GSB)	VS	09.09.09	30.09.20	2'491	133.4	141	99	208
Gütsch ob Andermatt (GUE)	UR	01.09.05	10.08.21	2'296	153.6	180	89	244
Güttingen (GUT)	TG	03.12.09	28.10.21	441	103.0	102	85	252
Genève (GVE)	GE	24.09.09	27.10.20	412	104.2	103	86	1'540
Genève (natürlich*)					103.8	103	86	196
Hallau (HLL)	SH	29.01.18	02.06.21	419	122.8	119	98	257
Hörnli (HOE)	ZH	12.11.09	08.09.21	1'133	93.8	92	74	175
Jungfraujoch (JUN)	VS	29.09.09	07.09.21	3'581	179.3	178	153	372
Kloten/Zürich (KLO)	ZH	24.11.09	11.11.21	427	102.5	100	80	203
Koppigen (KOP)	BE	13.01.17	27.10.21	484	109.0	107	82	230
Leibstadt (LEI)	AG	19.11.09	22.09.21	342	95.7	94	77	247
Lugano (LUG)	TI	21.10.09	15.12.21	273	118.7	118	99	210
Luzern (LUZ)	LU	05.11.09	29.06.21	455	103.3	102	84	244
Magadino-Cadenazzo (MAG)	TI	22.10.09	27.10.21	204	135.1	133	109	318
Meiringen (MER)	BE	06.10.11	12.10.21	590	139.4	139	92	257
Le Moléson (MLS)	FR	19.08.09	12.05.21	1'975	107.1	109	77	198

** Genève (natürlich): Der Maximalwert von 1'540 nSv/h In Genève / Cointrin wurde wie oben diskutiert während des Einsatzes einer Strahlungsquelle in der Nähe der NADAM-Station registriert. Um die natürliche Umgebungsradioaktivität abzubilden, wurde eine Zeile ergänzt, bei der die Werte aufgrund der künstlichen Radioaktivität aus der Messreihe nicht berücksichtigt sind. registriert.*

Tabelle 1: Teil 2

Jahresmittelwert, häufigster Wert, Minimum und Maximum der NADAM-Stationen

Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte für alle NADAM-Stationen im Jahr 2022

Station	Kanton	Datum Inbetriebnahme	Datum Sondenwechsel NADAM 2020	Höhe [m.ü.M]	Jahresmittelwert	Häufigster Wert [nSv/h	Minimum	Maximum
Mosen (MOA)	LU	19.01.18	13.08.21	452	97.9	96	78	221
Möhlin (MOE)	AG	09.09.10	09.06.21	341	112.9	110	91	202
Mühleberg (MUB)	BE	15.10.09	08.06.21	481	107.0	105	84	200
Napf (NAP)	BE	05.11.09	10.06.21	1'405	99.6	101	68	200
Neuchâtel (NEU)	NE	10.12.09	21.09.21	485	92.0	92	72	173
Oron (ORO)	VD	29.02.12	04.06.21	828	105.7	104	74	311
Locarno-Monti (OTL)	TI	22.10.09	22.11.21	368	154.2	153	128	276
Payerne (PAY)	VD	13.08.09	28.09.20	490	103.8	102	84	197
Piotta (PIO)	TI	29.10.09	-	990	146.1	154	101	252
Plaffeien (PLF)	FR	14.08.09	-	1'043	113.6	120	84	195
Paul Scherrer Institut (PSI)	AG	27.07.11	23.06.21	335	94.6	93	68	188
Pully (PUY)	VD	23.09.09	22.10.21	456	115.4	113	95	193
Zürich-Affoltern (REH)	ZH	13.11.09	26.04.21	444	101.0	99	79	224
Poschiavo-Robbia (ROB)	GR	07.10.09	11.11.21	1'079	161.4	152	119	316
Rünenberg (RUE)	BL	20.11.09	07.10.21	612	97.5	96	76	217
Säntis (SAE)	AI	11.11.09	20.10.21	2'503	114.1	112	93	161
Samedan (SAM)	GR	25.08.09	24.06.21	1'710	145.6	154	88	285
San Bernardino (SBE)	GR	29.10.09	06.07.21	1'640	149.3	153	109	235
Stabio (SBO)	TI	21.10.09	-	352	133.4	132	111	296
Scuol (SCU)	GR	27.08.09	10.06.21	1'305	117.3	119	80	340
Schaffhausen (SHA)	SH	04.12.09	26.08.21	439	99.2	99	81	221
Sion (SIO)	VS	10.09.09	10.11.21	482	123.1	123	97	292
Zürich-Fluntern (SMA)	ZH	24.11.09	04.11.21	557	107.0	105	87	190
Santa Maria (SMM)	GR	15.12.11	01.07.21	1'385	149.6	149	110	384
St. Gallen (STG)	SG	12.11.09	07.09.21	777	101.0	100	75	210
Aadorf/Tänikon (TAE)	TG	03.12.09	-	539	100.4	99	80	225
Thun (THU)	BE	29.01.18	15.10.21	570	85.8	85	69	214
Ulrichen (ULR)	VS	04.11.09	18.08.21	1'347	150.7	176	69	270
Vaduz (VAD)	FL	03.12.09	30.09.21	458	109.9	108	88	296
Vicosoprano (VIO)	GR	06.02.13	23.09.21	1'089	197.2	191	135	364
Visp (VIS)	VS	11.09.09	20.09.21	640	130.4	132	94	252
Villars-Tiercelin (VIT)	VD	29.01.18	-	859	118.8	120	90	213
Wädenswil (WAE)	ZH	02.12.09	-	487	106.1	104	80	207
Wynau (WYN)	BE	15.10.09	02.06.21	423	100.0	99	81	212
Zermatt (ZER)	VS	11.09.09	-	1'640	126.1	132	84	227

3.3 Aeroradiometrische Messungen

B. Bucher
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg
G. Butterweck
Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI
L. Rybach
Institut für Geophysik, ETH Zürich, Zürich
C. Poretti
Nationale Alarmzentrale, Guisanplatz 1B, Bern
St. Maillard
Kompetenzzentrum ABC-KAMIR, Spiez

Zusammenfassung

Bei den Messflügen im Juni und September 2022 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Beznau (KKB) und Leibstadt (KKL) sowie des Paul Scherrer Instituts (PSI) und der Zwischenlager AG (ZWILAG) abgedeckt. Zudem wurden die Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 östlich des KKB und KKL bis 50 km Distanz ergänzt. Die Ergebnisse bei den Kernkraftwerken lagen im Bereich der Ergebnisse aus früheren Jahren. Weitere Messflüge erfolgten in Graubünden (Stadt Chur, Hinterrhein, Misox, Calancatal), in der Westschweiz (Moudon; Orbe; Châtel-St.-Denis; Städte Vevey, Montreux und Villeneuve; Val de Travers), im Kanton Zürich (Zollikerberg) und im Kanton St. Gallen (Weisstannental). In diesen Arealen wurden Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse registriert. In einzelnen Gebieten konnten noch ^{137}Cs-Ablagerungen detektiert werden, welche von den Nuklearwaffentests und dem Tschernobyl-Ereignis stammen. Zusätzlich wurden über dem Neuenburgersee und dem Thunersee Höhenprofile zur Charakterisierung der neuen Messsysteme durchgeführt.

Einleitung

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

Im Jahre 1994 wurde die Aeroradiometrie in die Einsatzorganisation Radioaktivität des Bundes integriert. Als mögliche Einsatzfälle stehen KKW-Störfälle, Transport- und Industrieunfälle mit radioaktivem Material, Abstürze von Satelliten mit Nuklearreaktoren und «Dirty Bombs» im Vordergrund. Die jährlichen Messprogramme werden durch die Fachgruppe Aeroradiometrie zusammengestellt, die sich aus Mitgliedern der beteiligten Stellen zusammensetzt. Der Einsatz erfolgt zivil unter der Regie der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) und militärisch unter der Regie des Kompetenzzentrums ABC-KAMIR der Armee. Zum Training der ARM-Teams, bestehend aus Operatoren (Messspezialisten an Bord), Flugbesatzung und Bodenpersonal, werden jährlich von der NAZ und dem Kompetenzzentrum ABC-KAMIR der Armee Übungsmessflüge durchgeführt.

Im Jahre 2010 (Bucher et. al, 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%).

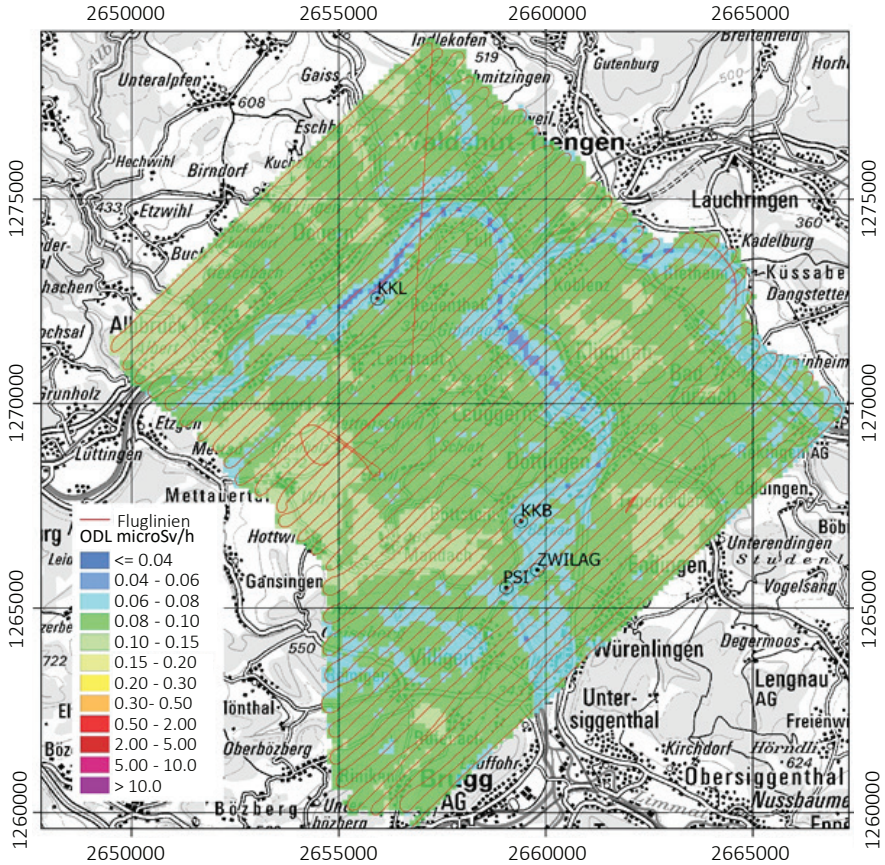
Mit den Messflügen 2018 erfolgte die Ablösung der alten Ausrüstung durch ein Messsystem der Firma Mirion, welches durch die RUAG im Super Puma Helikopter der Schweizer Luftwaffe integriert wurde. Dieses wurde in den vorangehenden Messübungen eingehend getestet und die Ergebnisse mit denen des alten Systems 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 durch die Lieferanten.

Messungen und Messresultate 2022

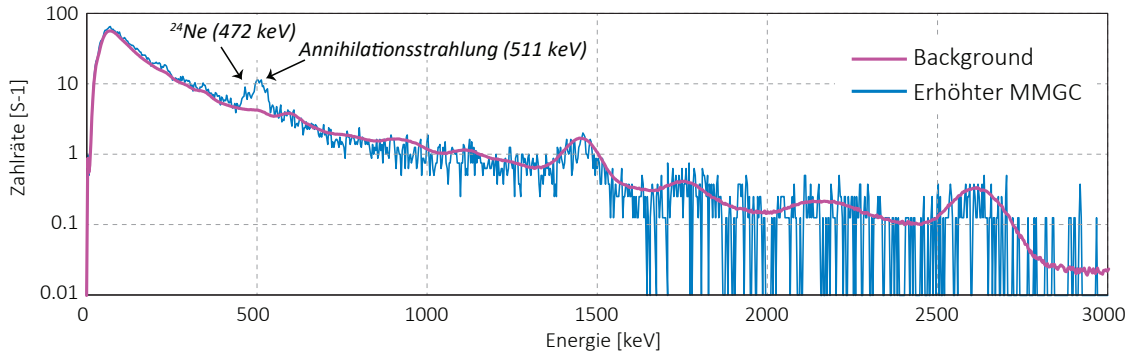
Bei den Messflügen im Juni und September 2022 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Beznau (KKB) und Leibstadt (KKL) sowie des Paul Scherrer Instituts (PSI) und der Zwischenlager AG (ZWILAG) abgedeckt. Zudem wurden die Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 östlich des KKB und KKL bis 50 km Distanz ergänzt. Weitere Messflüge erfolgten in Graubünden (Stadt Chur, Hinterrhein, Misox, Calancatal), in der Westschweiz (Moudon; Orbe; Châtel-St.-Denis; Städte Vevey, Montreux und Villeneuve; Val de Travers), im Kanton Zürich (Zollikerberg) und im Kanton St. Gallen (Weisstannental).

Die detaillierten Ergebnisse sämtlicher Messungen wurden im PSI-Bericht 23-01 im März 2023 publiziert (Butterweck et al., 2023). Dieser ist auch auf der Webseite der Fachgruppe Aeroradiometrie unter https://far.ensi.ch verfügbar.

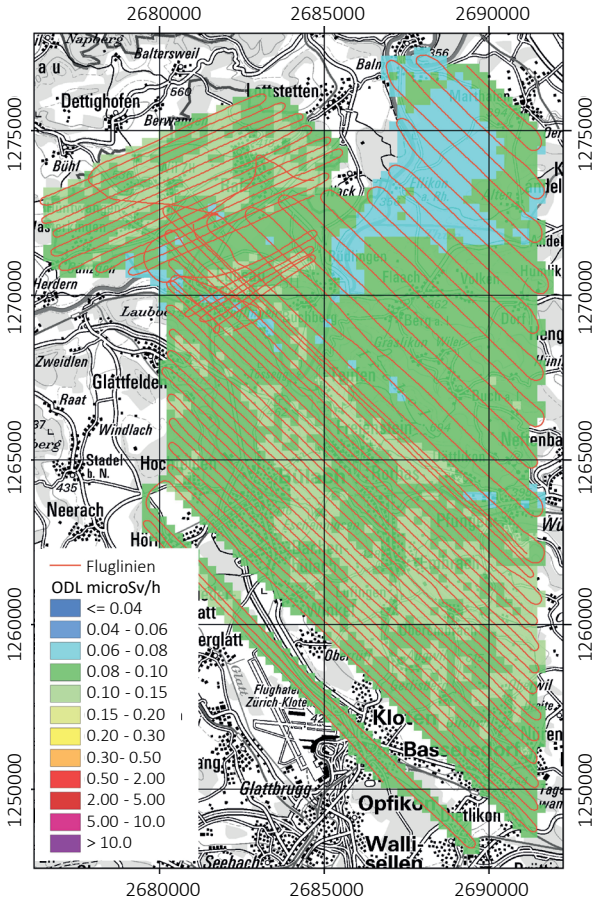
Die Messresultate im Gebiet von KKB, KKL, PSI und ZWILAG zeigten ein ähnliches Bild wie in vorangegangenen Messkampagnen (Figur 1). Im Gegensatz zu früheren Jahren konnte das KKL nicht detektiert werden, da das Kraftwerk zum Zeitpunkt der Messungen aufgrund der Jahresrevision ausser Betrieb war und deshalb das Aktivierungsprodukt ^{16}N, welches im Leistungsbetrieb bei Siedewasserreaktoren durch die Frischdampfleitung in die Turbinen im Maschinenhaus gelangt, nicht detektiert werden konnte. Auch in der Umgebung von KKB, PSI und ZWILAG sind in der Ortsdosisleistungskarte keine Auffäl-



Figur 1:
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2022 im Messgebiet KKB, KKL, PSI und ZWILAG. Kartendaten PK200 © swisstopo.*



Figur 2:
Gemittelte Spektren im Bereich des erhöhten MMGC-Verhältnisses östlich des PSI und in der weiteren Umgebung (Background).

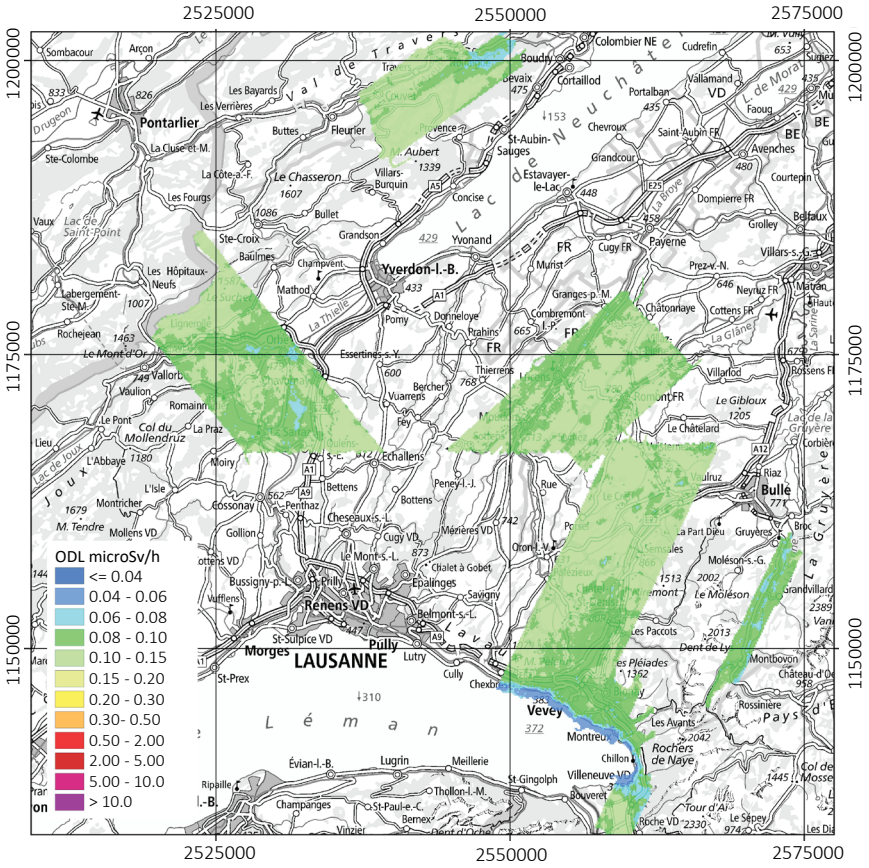


Figur 3:
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2022 für das Messgebiet ausserhalb der Notfallschutzzone 2 östlich von KKB/KKL. Kartendaten PK200 © swisstopo.*

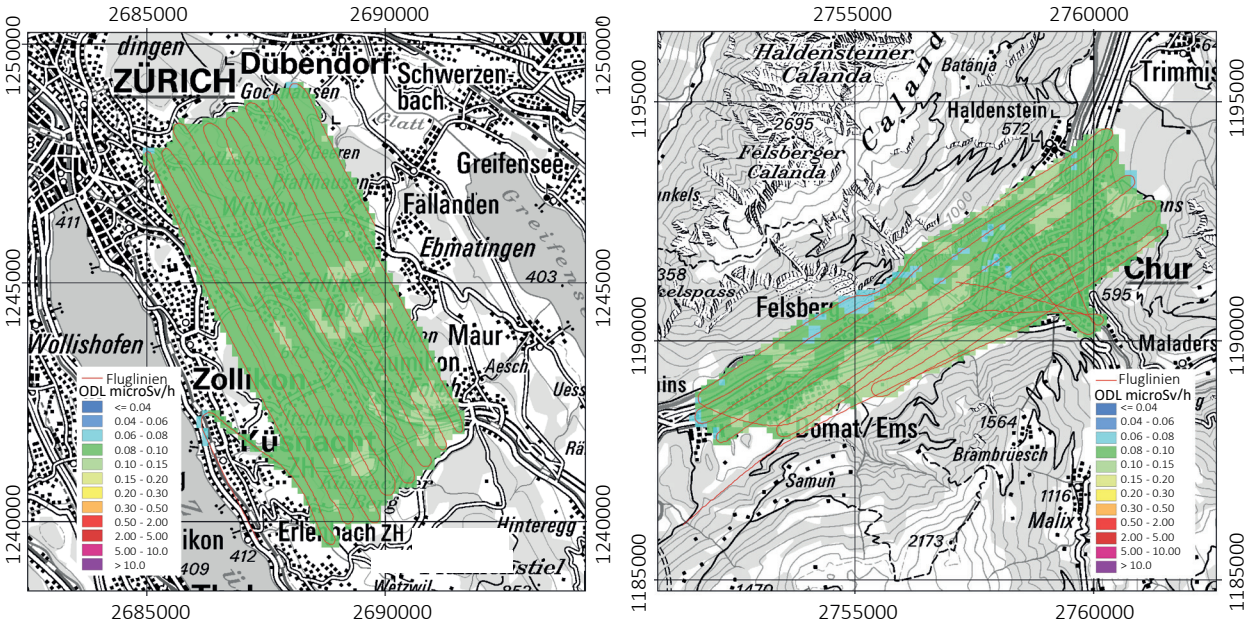
ligkeiten zu erkennen. Mit dem empfindlicheren MMGC-Verhältnis (Verhältnis der Zählrate im Energiebereich von 400-1´400 keV zur Zählrate im Energiebereich 1´400-3´000 keV) konnte östlich des PSI eine leichte Erhöhung festgestellt werden, die auf bewilligte betriebliche Abgaben des PSI zurückzuführen ist. Die entsprechenden Gammalinien konnten im Spektrum deutlich identifiziert werden (Figur 2). Mit Ausnahme dieser Erhöhung liegen die Messwerte im ganzen Messgebiet (Figur 1) im erwarteten Bereich. Unterschiede sind auf Einflüsse der Topographie wie Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen.

Die Ergebnisse der übrigen Messgebiete zeigten vor allem Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse auf und entsprechen den erwarteten Werten. In den Figuren 3, 4, 5 und 6 sind die Ortsdosisleistungskarten der Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 von KKB/KKL (Figur 3), in der Westschweiz (Figur 4), über dem Zollikerberg und Chur (Figur 5) und am Hinterrhein, Misox und Calancatal (Figur 6) dargestellt.

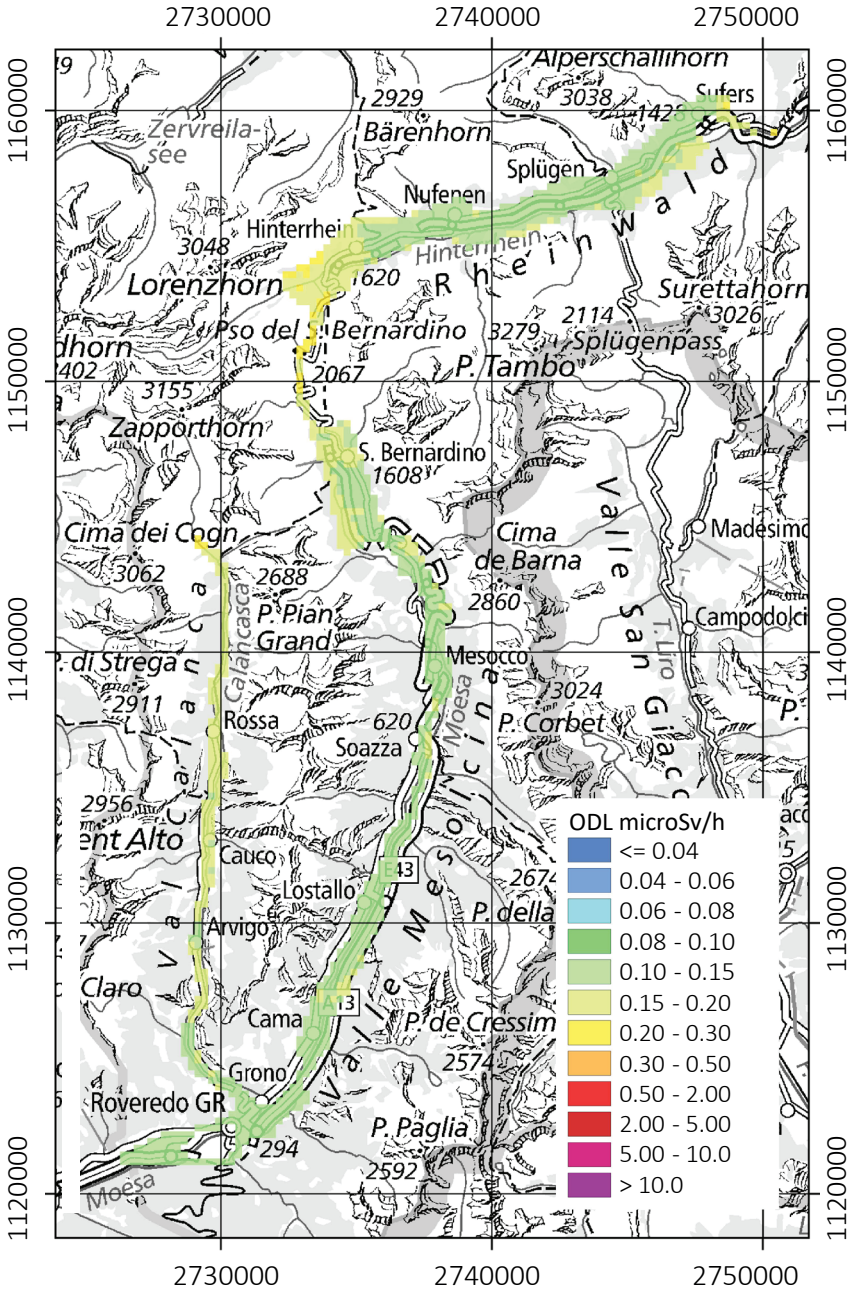
In den Messgebieten in Graubünden und in der Westschweiz konnten teilweise ^{137}Cs-Depositionen detektiert werden, die auf Fallout der Nuklearwaffentests und des Tschernobyl-Ereignisses zurückzuführen sind. Im Weisstannental wurde eine bekannte kleinräumige Urananomalie aeroradiometrisch vermessen. Es wurden keine signifikanten Erhöhungen gemessen.



Figur 4 :
Ortsdosisleistung 2022 H(10) in den Messgebieten der Westschweiz.*
Kartendaten PK500 © swisstopo.



Figur 5 :
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2022 für die Messgebiete Zollikerberg und Stadt Chur.*
Kartendaten PK200 © swisstopo.



Figur 6:
Ortsdosisleistung H(10) im Jahr 2022 im Messgebiet Hinterrhein, Misox und Calancatal. Kartendaten PK500 © swisstopo.*

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., 20232: Aeroradiometric Measurements in the Framework of the Swiss Exercise ARM22. PSI Bericht Nr. 23-01. March 2023. DOI: https://doi.org/10.55402/psi:51194.

Environnement



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

2022

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

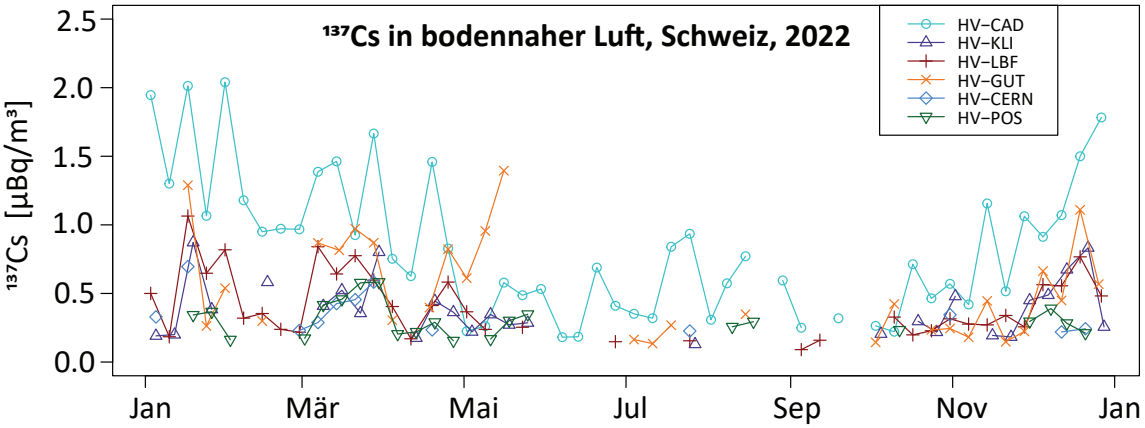
Zusammenfassung

Die Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag zeigte 2022 keine erhöhten Werte, welche die Gesundheit der Bevölkerung gefährdet hätten. In der Atmosphäre überwiegt die natürliche Radioaktivität deutlich. Dank der grossen Empfindlichkeit der verwendeten Messmethoden konnten trotzdem kleinste Spuren von künstlichen Radionukliden auf den Aerosolpartikeln nachgewiesen werden. Im Niederschlag wurden 2022 mit Ausnahme von Tritium und sporadischen Spuren von ^{137}Cs keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. Der trockene Monate März hat zu etwas höheren Konzentrationen von ^{7}Be und ^{137}Cs in der Luft geführt. 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 10% 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-Luftfiltern (High-Volume-Sampler, HVS) an 6 Stationen in der Schweiz (siehe Tabelle 1). Diese Geräte filtrieren fortlaufend, je nach Station, 80'000 m^3 bis 150'000 m^3 Aussenluft pro Woche. Die Stationsbetreuer oder -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: www.radenviro.ch, www.bag.admin.ch/hvs und map.geo.admin.ch («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 Entscheidungsgrundlage für die Behörden eine präzise Messung der tatsächlich vorhandenen Radioaktivität unverzichtbar ist. Neben den HVS-Filtern betreibt das BAG Mittelvolumen-Filter (MV), welche ein 10- bis 20-mal geringeres Luftvolumen filtrieren und damit entsprechend höhere Nachweisgrenzen haben. Die MV-Sammler sind zur Überwachung der Kernkraftwerke bei Gösgen, Leibstadt, Mühleberg und PSI/Beznau stationiert, wobei der letztgenannte vom PSI betrieben und gemessen wird. Ein weiterer MV-Sammler steht für die Überwachung der freien Atmosphäre in der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch. Die Filter der MV-Sammler werden wöchentlich gewechselt und als Monatsprobe (4 - 5 Filter) gammaspektrometrisch gemessen. Im 2022 hat das BAG zudem tägliche PM-10 Filter ausgemessen, die vom Stadtlabor in Bern zur Verfügung gestellt wurden.



Figur 1 :
^{137}Cs Konzentrationen in der Luft für das Jahr 2022.

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 310 gemessenen Hochvolumenfiltern zeigten 177 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/m^3. Etwas höhere Werte (bis knapp 2 µBq/m^3) wurden 2022 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 im Kanton Tessin nach Tschernobyl erklärt die meist etwas höheren Werte der Station Cadenazzo. Geringfügig höhere ^{137}Cs Konzentrationen (bis 1.5 µBq/m^3) wurden zudem in den relativ trockenen Monaten März und Mai (Klimabulletin Jahr 2022 – MeteoSchweiz) gemessen. Auch die höchsten gemessenen Werte sind mehr als eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert für ^{137}Cs von 8.5 Bq/m^3.

Das radioaktive Natriumisotop ^{24}Na mit einer Halbwertszeit von 15 Stunden kann sowohl natürliche als auch künstliche Quellen haben. Natürliches ^{24}Na wird wie das ^{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 Berichtsjahr insgesamt 7 Mal Spuren von ^{24}Na nachgewiesen werden (zwischen 30 und 118 µBq/m^3). Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{24}Na kann die Nachweisgrenze variieren und lag 2022 bei rund 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 ^{131}I tauchten 2022 in 16 HVS Filtern der Station beim CERN auf (Maximum 15 µBq/m^3). Ursache ist das Auswechseln von bestrahl-

Tabelle 1:
HVS-Stationen des BAG

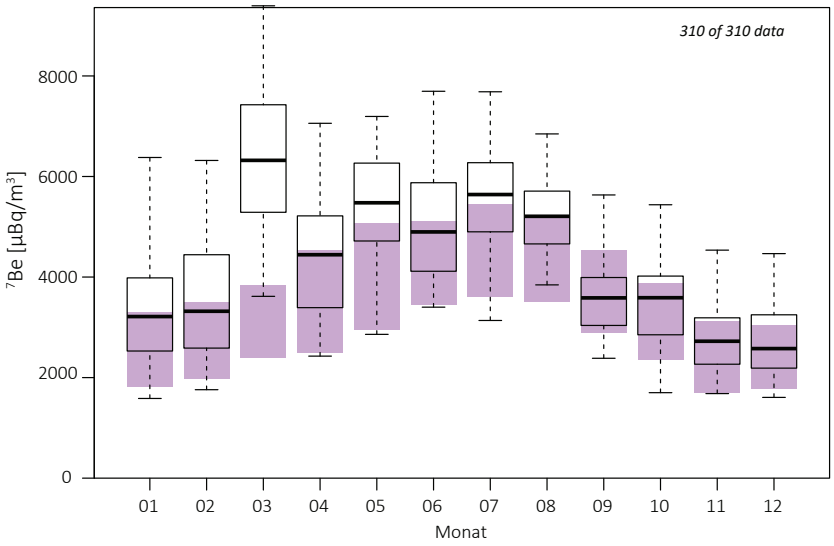
Station	H.ü.M.	Gemeinde	Umgebung	Bemerkung
CAD	203 m	Cadenazzo TI	Landwirtschaft	Referenzstation für die Alpensüdseite (Agroscope Forschungsstation)
CERN	428 m	Meyrin GE	Landwirtschaft, Stadtnähe, CERN	zur Erfassung eventueller Abgaben aus den CERN Beschleunigern
GUT	440 m	Güttingen TG	Landwirtschaft, 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 2022 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 2022	^{7}Be Referenz	^{7}Be 2022
5% - 95%-Perzentil	0.18 - 1.18	0.18 - 1.15	1.48 - 6.40	2.10 - 7.05
Min - Max	0.07 - 2.76	0.10 - 2.19	0.15 - 8.74	1.59 - 9.40
Mittelwert / Median	0.57 / 0.49	0.61 / 0.55	3.66 / 3.50	4.34 / 4.19
Anzahl Messwerte	*1'864*	*310*	*1'864*	*310*

ten Targets bei der Installation ISOLDE am CERN. Bei diesen Arbeiten können kleinste Mengen von Radioisotopen in die Umwelt gelangen. Neben ^{131}I waren bei drei Filtern auch ^{124}I und ^{126}I nachweisbar. Gesundheitlich sind diese Konzentrationen, eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert, nicht relevant. Plutonium-Isotope wurden 2022 an zwei Sammelproben von HVS-Filtern der Station Liebefeld bestimmt, eine Probe mit Filtern vom Winter (Okt. 2021 – März 2022) und eine Probe mit Filtern vom Sommer (April – Sept. 2022). Die Summe der Plutoniumisotope ^{239}Pu und ^{240}Pu ergab 1.1 ± 10% nBq/m^3 im Winter und 1.5 ± 10% nBq/m^3 im Sommer. Zusätzliche Proben von den Stationen CERN, Klingnau und Posieux ergaben für November 2021 bis September 2022 zwischen 1.1 und 1.6 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 sowie Umgebung Kernkraftwerke) 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 2022. 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 2022 auf den HVS Filtern gemessenen Radioisotope waren fast ausschliesslich natürlicher Herkunft. Vorherrschend waren das Radonfolgeprodukt ^{210}Pb (Halbwertszeit 21 Jahre) und ^{7}Be (Halbwertszeit 53 Tage), welches durch die kosmische Strahlung in hohen Schichten der Atmosphäre gebildet und deshalb auch kosmogen genannt wird. Neunzig Prozent der 2022 gemessenen ^{210}Pb-Konzentrationen lagen zwischen 0.18 und 1.15 mBq/m^3. Diese Werte liegen im Rahmen der Werte der Referenzperiode 2013 - 2018 (Tabelle 2). Auffallend ist (wie in den Vorjahren) dass die ^{210}Pb-Werte der Station Cadenazzo deutlich höher sind, als die Werte der Stationen nördlich der Alpen: im Durchschnitt 0.89 mBq/m^3 für Cadenazzo gegenüber 0.56 mBq/m^3 für die anderen 5 Stationen.

Bei ^{7}Be-Werte lagen 2022 neunzig Prozent der Werte zwischen 2.1 und 7.05 mBq/m^3 (Mittelwert = 4.3 mBq/m^3; Median = 4.2 mBq/m^3). Dies entspricht den Werten für ein Jahr mit starker kosmischer Strahlung und ist etwas über 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: Dabei gelangt ^{7}Be reiche Luft aus der obersten Troposphäre an den Boden. 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 2022 4% tiefer als 2020, dem Beginn des Sonnenzyklus 25. Die Sonnenaktivität hat in diesem Zyklus bereits merklich zugenommen und somit die kosmische Strahlung besser abgeschirmt. Der Vergleich der relativ trockenen und warmen Jahre 2020 und 2022 zeigt, dass der Rückgang 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 etwa demjenigen der langjährigen Monatsmittel, mit Ausnahme des Monats März (Figur 2). Im sehr trockenen, warmen und sonnigen März 2022 war fast doppelt so viel ^{7}Be in der Luft wie erwartet. Dazu könnte neben der Witterung auch der Stratosphären-Troposphäre Austausch beigetragen haben, der jeweils im Frühling statt-

findet und 2022 möglicherweise etwas ausgeprägter war. Dass die Messwerte 2022 in Figur 2 insgesamt etwas höher sind als die Referenzwerte, hat auch damit zu tun, dass die Referenzperiode den starken Sonnenzyklus 23 einschliesst (https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression). Dies drückt die Referenzwerte etwas nach unten.

Neben ^{7}Be war in kleinsten Spuren von meist weniger als 1 µBq/m^{3} das ebenfalls kosmogene ^{22}Na nachweisbar.

Als weiteres natürliches Radioisotop findet sich in den HVS Filtern auch ^{40}K. Die Konzentrationen lagen 2022 meist im typischen Bereich von 5 - 15 µBq/m^{3}. Wie oft tauchte der höchste ^{40}K Wert (38 µBq/m^{3}) zu Jahresbeginn bei der stadtnahen Station Liebefeld auf. Ursache dafür: die Feuerwerke (siehe auch https://www.radenviro.ch/feuerwerk).

Niederschlag

Messungen von Gammastrahlern

Im Berichtsjahr 2022 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 ähnlich wie im Vorjahr (^{7}Be: 0.1 - 3.2 Bq/l, Mittelwert 0.9 Bq/l; ^{210}Pb: 0.02 - 1.2 Bq/l, Mittelwert 0.1 Bq/l). Die Probe mit den höchsten Konzentrationen ist bei diesen Werten nicht berücksichtigt: Es handelt sich um die Probe vom März 2022 aus Davos. In diesem Monat gab es praktisch keinen Niederschlag, so dass mit einer kleinen Menge von Wasser sehr viel ^{7}Be und ^{210}Pb ausgewaschen wurde: 9.3 Bq/l (^{7}Be) und 3.0 Bq/l (^{210}Pb). Rechnen wir die Radionuklid-Aktivität als Depositionsfluss pro Quadratmeter und Tag (Bq/m^{2}/d) so sind die Davoser Märzwerte eher tief und liegt mit 0.3 Bq/m^{2}/d nahe beim 5. Perzentil. Der Bereich zwischen 5. bis 95. Perzentil, umfasst 90% aller Werte; für den ^{7}Be-Depositionsfluss 2022 ist dieser Bereich 0.4 - 5.8 Bq/m^{2}/d. Beim Depositionsfluss fällt eine andere Probe aus dem Rahmen: die Juni-Probe aus Cadenazzo mit rund 13 Bq/m^{2}/d. Der Juni war im 2022 der regenreichste Sommermonat. Das führte, zusammen mit der hohen ^{7}Be-Konzentration in der Luft, zum starken Auswaschen von ^{7}Be auf den Boden.

In 3 von 95 Niederschlagsproben lag ^{137}Cs knapp über 1 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 im Frühling und im Sommer teilweise knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l. Im Monat Juni konnten geringe Spuren von Tritium in allen genannten Stationen nachgewiesen werden mit dem «Jahreshöchstwert» von 4.8 ± 1.5 Bq/l bei Posieux. Ein Zusammenhang mit Abgaben aus den Industrien, wo hohe Werte eher im Winter auftauchen, kann nicht festgestellt werden (siehe Kapitel 9.3). Ein ähnliches Bild zeigte sich bei den Tritium-Messungen an Regenproben aus der Umgebung der Kernkraftwerke KKG, KKL und KKM. Bei diesen Stationen war der höchste gemessene Wert 4.0 ± 0.9 Bq/l. Bei den Sammelstationen PSI, KKB und Zwilag ergaben sich 2022 wie gewohnt etwas häufiger Werte über der Nachweisgrenze, mit Mittelwerten von 4.8, 5.3 beziehungsweise 2.8 Bq/l. Das höchste Monatsmittel trat bei der Station PSI auf (16.9 ± 1.7 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 2´042 Bq/l Tritium mit einem Mittelwert von 120 Bq/l. Die Höchstkonzentration entspricht rund 10%, der Mittelwert 0.6% 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.

4.2
URAnet aero

D. Lienhard, P. 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 2022 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 wurde in gewissen Fällen auch kosmogenes ^{7}Be nachgewiesen, mehrheitlich in jenen Phasen, bei denen auch die Ergebnisse der Hochvolumensammler erhöhte Werte für ^{7}Be gemessen haben.

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 Iod-Monitor, welche aus dem Vorgängermessnetz RADAIR in das Messnetz URAnet aero integriert wurden. Diese Iod-Monitore vermessen die ^{131}I Konzentrationen in der Gasphase der Umgebungsluft.

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 von URAnet aero Monitoren mit 16 bis 18 m^3/h viel tiefer liegt als derjenige von Hochvolumensammlern (ca. 500 m^3/h bei 1 Woche Sammelzeit, siehe Kapitel 4.1), liegen die Nachweisgrenzen der Aerosolmonitore höher, 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. In der ersten Jahreshälfte 2022 wurde der Iod-Monitor der Station Fribourg in die Station Aarau integriert. Abbildung 1 zeigt die Messstationen von URAnet aero 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 an die Sektion Umweltradioaktivität transferiert, von wo aus sie für die Analyse, Visualisierung und gegebenenfalls eine Alarmvalidierung verfügbar gemacht werden.

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

Messtechnik

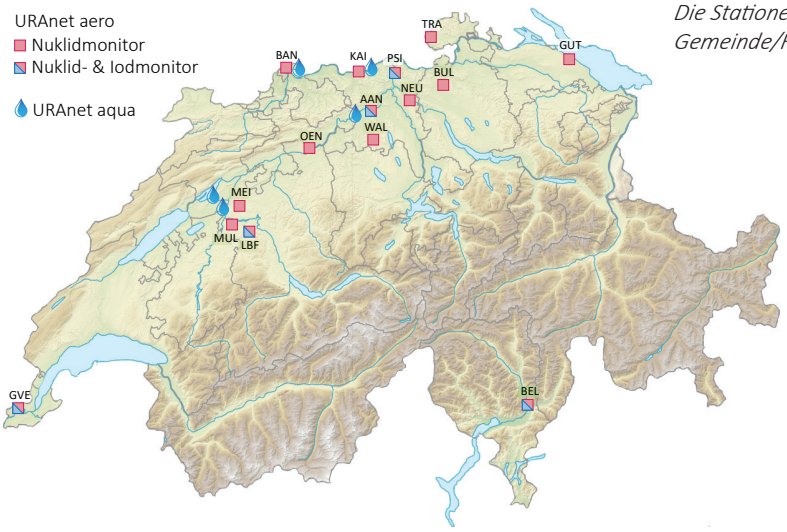
Aerosolsammler:

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

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

Nach jedem Filterbandvorschub beginnt die Pumpe mit dem Ansaugen von Aussenluft und der Detektor mit der kontinuierlichen Akquisition des Spektrums. 20 Minuten nach Filterbandvorschub und danach alle 5 Minuten wird das Spektrum neu ausgewertet und auf Grenzwertüberschreitungen geprüft, womit die Information der zeitlichen Entwicklung der Fläche des Peaks in der Auswertung abgespeichert ist.

Die Temperaturschwankungen der angesogenen Umgebungsluft während einer 12h-Bestaubungszeit führen auch beim Vorverstärker des Germaniumdetektors zu geringen Temperaturschwankungen. Dadurch kann sich die Energiekalibration während der Bestaubungszeit geringfügig verändern. Das Messsystem regelt die Energiekalibration anhand der Peaks der Radontöchter ^{214}Bi und ^{214}Pb und einer eingebauten schwachen ^{40}K Quelle automatisch nach. Auf die Halbwertsbreiten haben diese Modulationen keinen signifikanten Einfluss.



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.*

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

Diese Messgeräte des Herstellers Thermo Fisher wurden mit Germaniumdetektoren und elektrischen Kühleinheiten der Firma Ortec geliefert. Sowohl die Temperaturschwankungen der Umgebungsluft als auch im Messraum wirken sich auf die Temperatur des Germanium-Kristalls aus. Um eine optimale Funktionsfähigkeit zu garantieren, muss der Germanium-Kristall mit einem Vakuum vor den Temperaturschwankungen geschützt werden. Ein integriertes Molekularsieb und Getter-Material adsorbieren zwar einen Teil der Moleküle, die durch die Isolation des Detektors durchdringen und verlängern dadurch die Aufrechterhaltung des Vakuums. Trotzdem muss das Vakuum von Zeit zu Zeit erneuert werden. Die Erneuerung des Vakuums wird in den Labors der URA durchgeführt.

Im Jahr 2019 wurden die Aerosolmonitore durch die URA weiterentwickelt und sind nun auch kompatibel mit den Germaniumdetektoren der Firma Mirion. Aktuell sind 3 Stationen mit Detektoren der Firma Mirion ausgerüstet, welche bislang eine höhere Beständigkeit gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen aufweisen. Zusätzlich ist durch die intelligente Temperaturregulierung der Geräte von Mirion der Energieverbrauch deutlich kleiner, obwohl der Germanium-Kristall bei einer niedrigeren Temperatur gehalten wird.

^{131}I-Monitor:

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

Messresultate

Abbildung 2 zeigt das Spektrum der Messstation Basel am Ende der 12h-Bestaubungszeit am Mittag des 3. März 2022. Die Linien von ^{214}Pb und ^{214}Bi und deren Compton-Kontinuen dominieren das Spektrum und den Untergrund. Die Auswertungs-Software identifizierte 16 Linien von ^{214}Pb und 47 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 betragen 0.31(± 0.01) Bq/m^3 für ^{212}Pb, 0.30(± 0.01) 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 0.11(± 0.01) Bq/m^3.

Abbildung 3 zeigt den Jahresverlauf von ^{214}Pb, ^{212}Pb und den meteorologischen Parametern Windgeschwindigkeit und Niederschlag der beiden Stationen in Güttingen und Aarau. Windigere Verhältnisse und Auswaschung aus der Atmosphäre durch Niederschlag führen bei beiden Nukliden zu niedrigeren Tagesmittelwerten. In den kälteren Monaten zwischen November und Februar ist deutlich



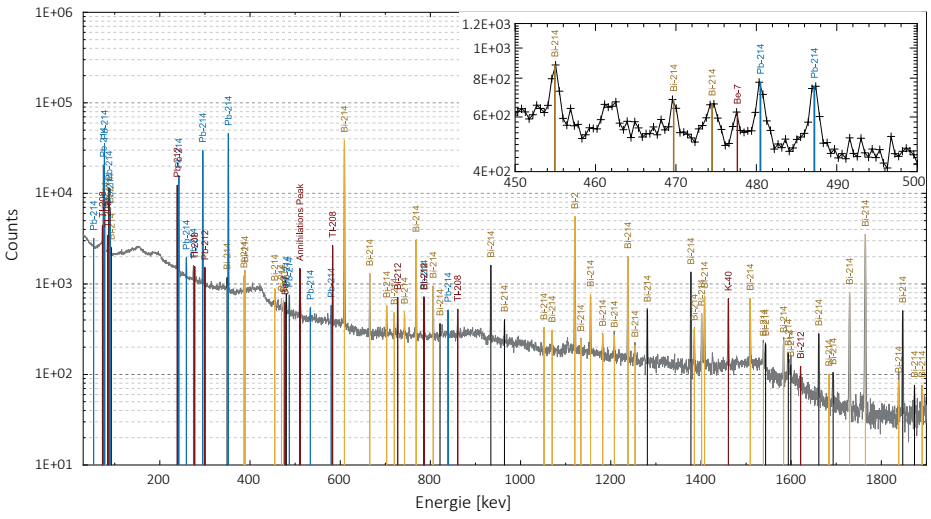


Abbildung 2 :
Spektrum der Messstation Basel vom 3. März 2022 um 12:00 Uhr. Die Linien von ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallskette sind gelb und blau markiert, alle anderen rot. Der Bereich um die Linie von ^{7}Be bei 477.6 keV mit den naheliegenden Nebenlinien von ^{214}Pb und ^{214}Bi ist vergrössert dargestellt. Diese Nebenlinien erschweren die Detektion von ^{7}Be.

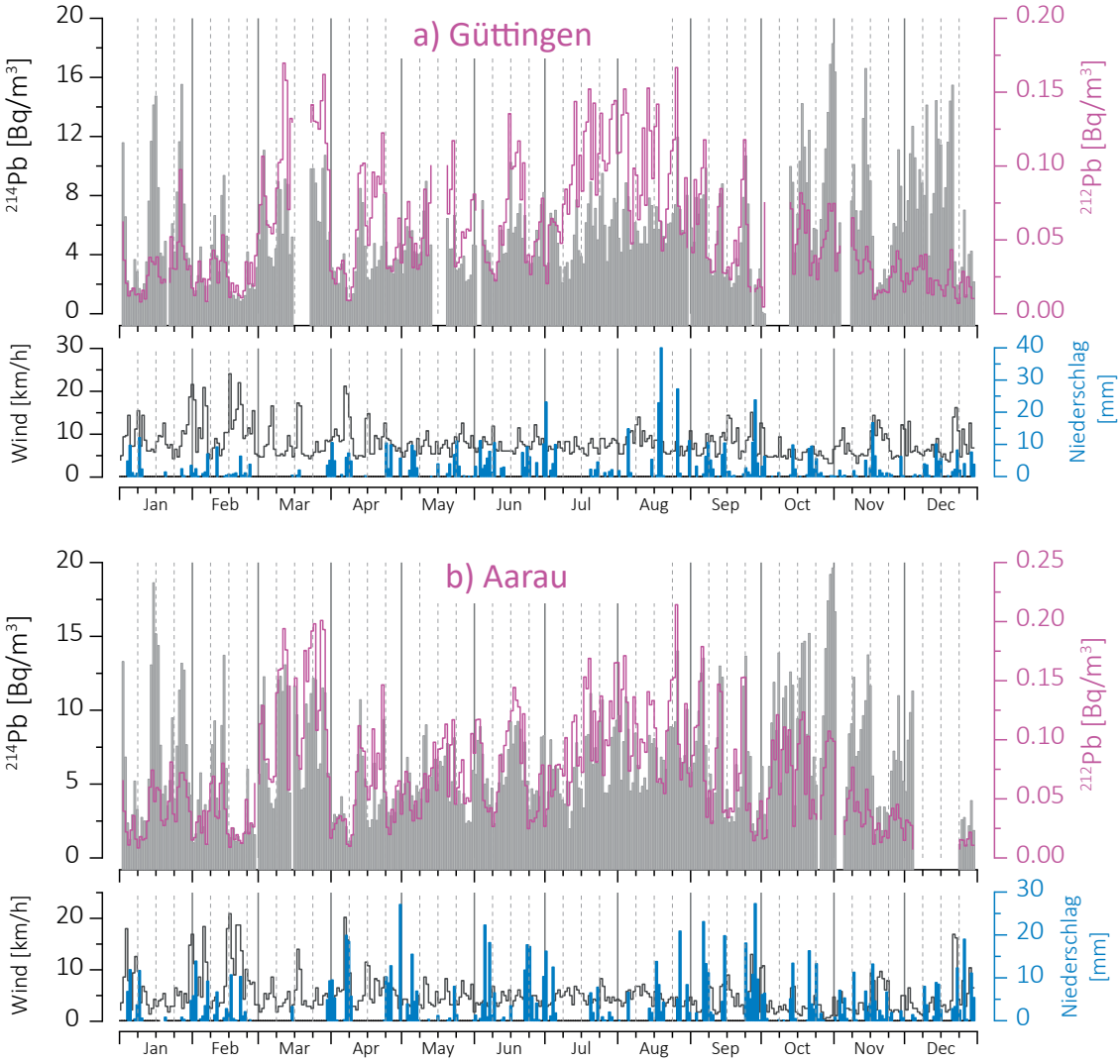


Abbildung 3 :
Zeitreihe der Tagesmittelwerte der ^{214}Pb und ^{212}Pb Aktivitätskonzentrationen der Stationen a) Güttingen und b) Aarau für das Jahr 2022, zusammen mit den Tagesmittelwerten der Windgeschwindigkeiten und der 24h-Niederschlagssumme.

weniger ^{212}Pb in der Umgebungsluft vorhanden, als dies aus der guten Korrelation zwischen ^{212}Pb und ^{214}Pb über die restlichen Monate vermutet werden könnte. Die Wind- oder Niederschlagsverhältnisse scheinen nur wenig Einfluss auf diesen Unterschied zwischen kälteren Monaten und dem Rest des Jahres zu haben. Die längeren Messunterbrüche in Güttingen im Oktober und in Aarau im Dezember hängen damit zusammen, dass die Detektoren ausgewechselt werden mussten, da sich das Vakuum zur Temperatur-Isolierung des Germanium-Kristalls verschlechterte und erneuert werden musste. Beide Stationen sind nun mit einem Detektor von Mirion ausgestattet.

Abbildung 4 zeigt die Werte der Monate November, Dezember, Januar und Februar als Kreuze und für die restlichen Monate als Kreise für die Stationen Güttingen, Trasadingen, Basel und Aarau. Bei allen vier abgebildeten Stationen bestätigt sich der oben beschriebene Trend für niedrigere ^{212}Pb Aktivitätskonzentrationen während den kälteren Monaten. Wir vermuten, dass dieser Trend mit den unterschiedlichen Halbwertszeiten der zwei verschiedenen Radon-Isotope aus der Thorium- und der Uran-Radium-Zerfallsreihe zusammenhängt. 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 Parameter und der Bodenbeschaffenheit.

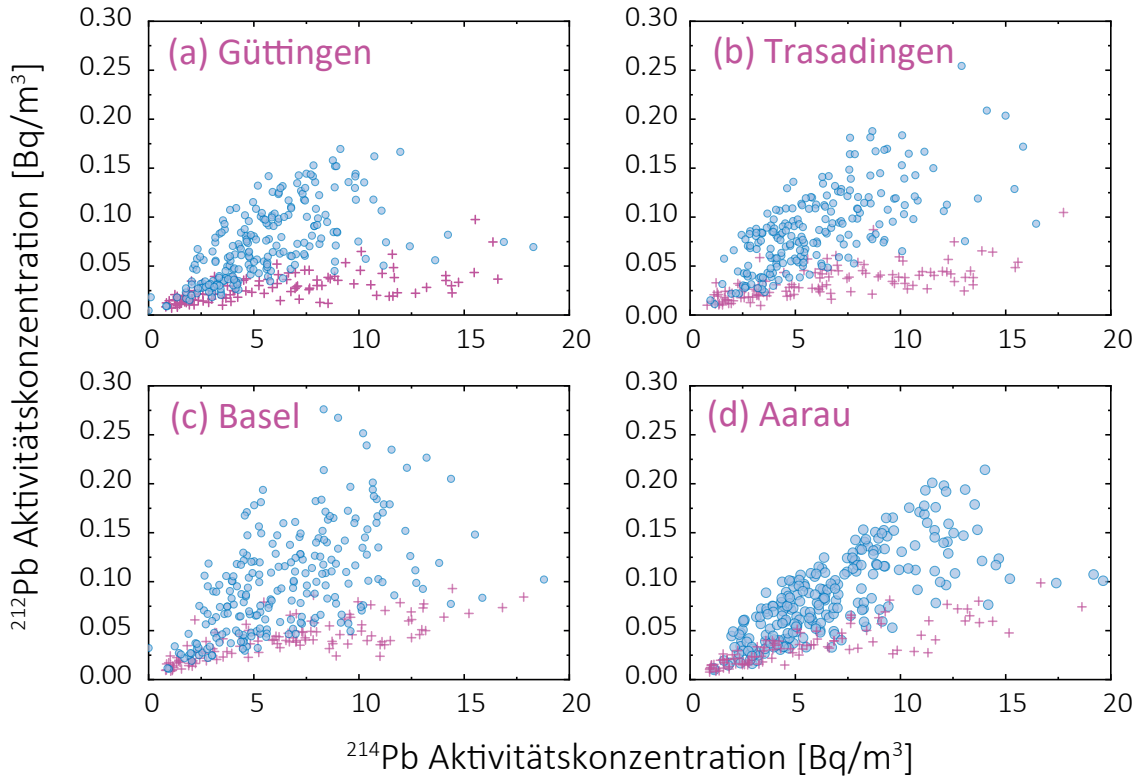


Abbildung 4 :
12h-Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ^{212}Pb als Funktion der Werte von ^{214}Pb auf den Stationen (a) Güttingen, (b) Trasadingen, (c) Basel und (d) Aarau. Die Kreuze stehen für die Wintermonate Januar, Februar, November und Dezember 2022, die Kreise für die übrigen Monate in diesem Jahr.

Der vergrösserte Ausschnitt in Abbildung 2 zeigt den Bereich 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 der Peak von ^{214}Pb bei 480.4 keV als auch der Peak von ^{214}Bi bei 474.4 keV den Nachweis erschweren. 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 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 zeigt die Anzahl ^{7}Be Detektionen der Stationen in Güttingen und am CERN am Ende der jeweiligen 12h-Bestaubungszeit als gleitende Summe über 7 Tage. Im Frühling und im Sommer konnte vermehrt Be-7 detektiert werden, im Winter jedoch weniger. Dieses Muster ist konsistent mit den Wochenmitteln der ^{7}Be Aktivitätskonzentrationen der Hochvolumensammlern der gleichen Stationen, welche in den Wintermonaten generell geringere ^{7}Be Aktivitätskonzentrationen gemessen haben und somit in dieser Periode auch der Nachweis von ^{7}Be durch den Aerosolmonitor schwieriger, d.h. unwahrscheinlicher, wird. Auf der Station am CERN ist eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Peaks in den ^{7}Be Aktivitätskonzentrationen der Hochvolumensammler und der Anzahl Detektionen durch den Aerosolmonitor erkennbar. Die zusätzliche Information aus den 12h-Messintervallen der Aerosolmonitore könnte zukünftig genutzt werden, um Perioden mit viel ^{7}Be zeitlich einzugrenzen und mit anderen Parametern in einen Zusammenhang zu bringen. Aufgrund der aktuellen Datenlage ist es jedoch schwierig, einen konkreten Rhythmus aus den Messungen dieser beiden Messmittel herauszulesen. Die Wochenmittelwerte durch die Hochvolumensammler sind wenig sensibel für kurzfristige Events mit hohen Aktivitätskonzentrationen; die Aerosolmonitore können hingegen eine längere Periode mit leicht erhöhten Aktivitätskonzentrationen gänzlich verpassen, falls die Radontöchter den Untergrund der Spektren zu sehr beeinflussen.

Die fünf Iod-Monitore der Stationen in Bellinzona, Genf, Fribourg, Liebefeld und PSI haben zu keinem Zeitpunkt im Jahr 2022 gasförmiges ^{131}I nachgewiesen. Die Absenz von ^{131}I in der Luft bestätigen auch die Histogramme der durchschnittlichen ^{131}I Konzentration gemessen auf den Stationen in Fribourg und Bellinzona in Abbildung 6, die eine Gausssche Glockenkurve mit einem Mittelwert von Null zeigen.

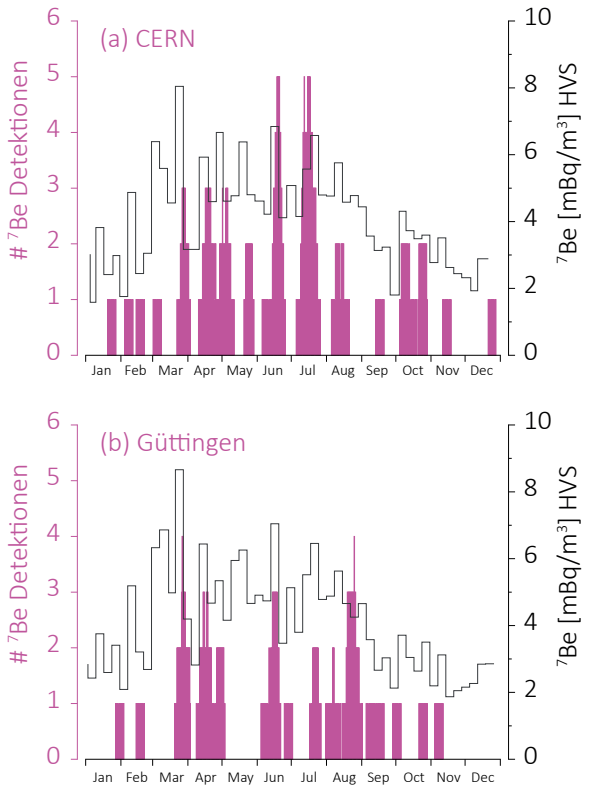


Abbildung 5 :
Gleitende 7-Tagessumme der Anzahl Detektionen durch den URAnet aero Monitor, verglichen mit dem Zeitverlauf der Wochenmittelwerte der ^{7}Be Aktivitätskonzentrationen des Hochvolumensammlers auf den Stationen in (a) CERN und (b) Güttingen.

Schlussfolgerung

Die 15 nuklidspezifischen Aerosolmonitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2022 zuverlässig Gamma-Spektren mit guter Auflösung erzeugt. Weder die Aerosolsammler noch die Iod-Monitore konnten 2022 künstliche Radionuklide feststellen. Die gute Justage und automatische Anpassung der Energiekalibration der Germanium-Detektoren erlaubt die Messung der Radontöchter ^{212}Pb, ^{212}Bi und ^{208}Tl aus der Thorium-Zerfallsreihe und teilweise auch von kosmogenem ^{7}Be trotz der in den Spektren dominanten Peaks von ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe. Die Zeitverläufe von ^{214}Pb und ^{212}Pb sind in den Wintermonaten entkoppelt, was wahrscheinlich mit der unterschiedlichen Halbwertszeit der Radon-Isotope aus den beiden Zerfallsreihen und der Bodenbeschaffenheit zusammenhängt. Die Detektionslimite der Aerosolmonitore für ^{7}Be reicht gerade aus, um in einigen Fällen die höheren Aktivitätskonzentrationen im Frühling und im Sommer nachzuweisen. Die Anzahl Detektionen pro Zeiteinheit folgt in etwa den mit den Hochvolumensammlern gemessenen Aktivitätskonzentrationen.

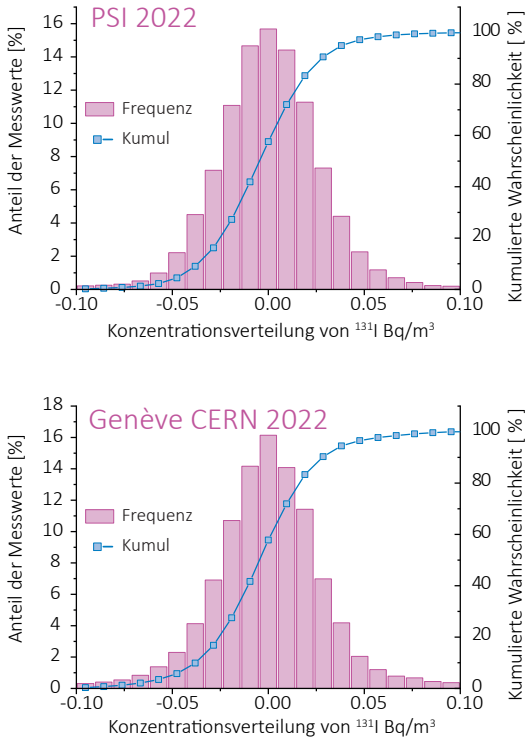


Abbildung 6 :
Histogramm der Durchschnittskonzentration von ^{131}I auf den Stationen PSI und CERN im Jahr 2022.

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 ab diesem Zeitpunkt eingesetzten Tiger-Flugzeuge über eine andere Aufhängevorrichtung verfügen. Zudem zeigte sich, dass die seit rund 30 Jahren eingesetzten Geräte einer Überholung bedurften. Mit dieser Erneuerung und Anpassung sowie der erneuten Flugzulassung wurde RUAG Aerospace (die Nachfolgerin der Flugzeugwerke Emmen) beauftragt. Seit 2004 sind die Geräte wieder einsatzbereit und flugerprobt.

Sammlung der Proben

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

Die Flughöhe kann vom Auftraggeber gewählt werden. Beispielsweise ist die Probenahme in der Stratosphäre erforderlich, wenn 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.



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

Messung der Proben

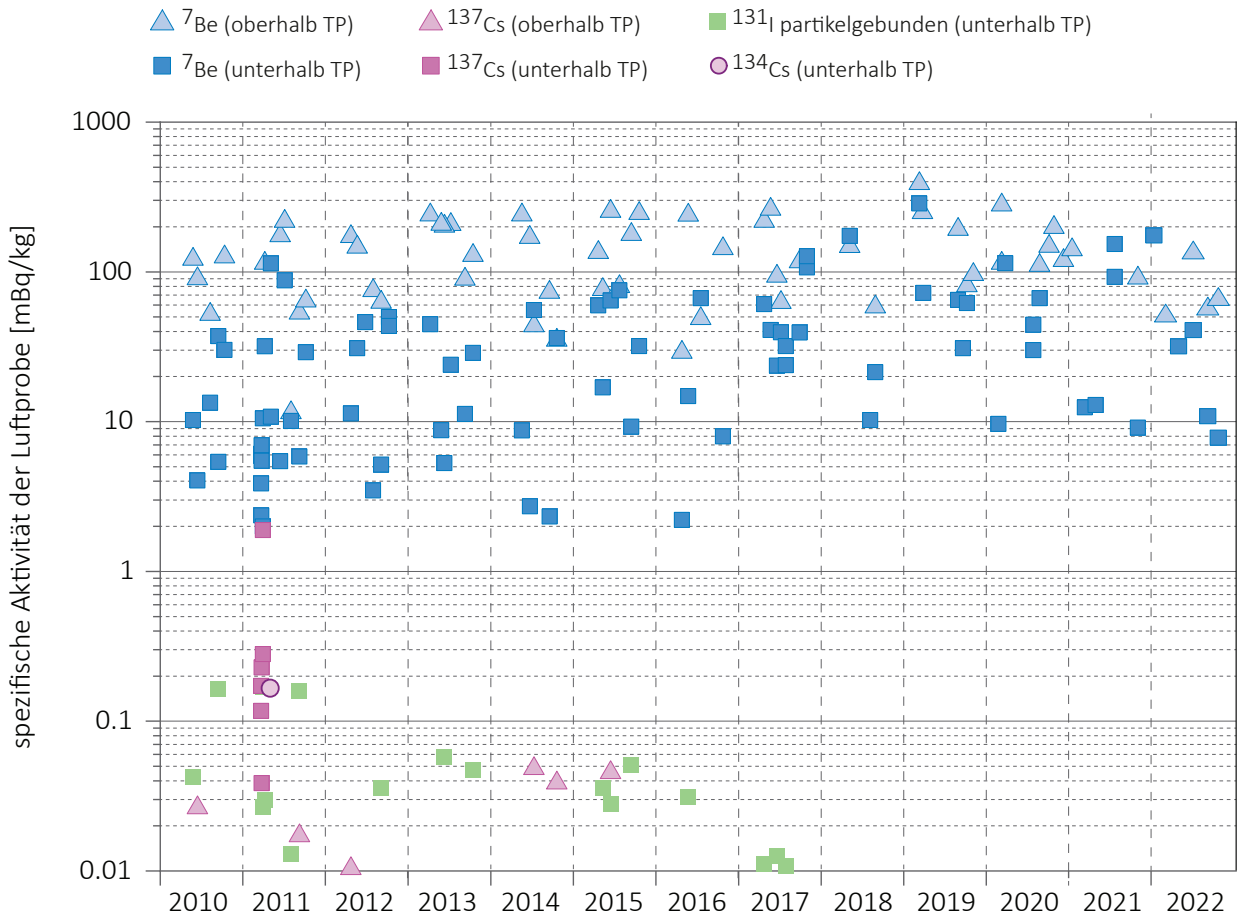
Die Messung erfolgt im Labor mittels hochauflösender Gammaspektrometrie, wobei nach 1-2 Tagen Messzeit für ^{137}Cs eine Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg Luft erreicht wird. Anschliessend können an den Filtern weitere Untersuchungen durchgeführt werden, z.B. mit radiochemischen oder massenspektrometrischen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

Über die letzten dreizehn Jahre liegt die durchschnittliche Konzentration des kosmogenen Radionuklids ^{7}Be oberhalb der Tropopause bei 126 mBq/kg. Bei den Messungen 1 km unterhalb der Tropopause liegt der Durchschnittswert bei 24 mBq/kg. Als Vergleich seien hier die Werte von P. Winiger [1] bis [4] erwähnt, die für ^{7}Be im Mittel bei 100 mBq/kg bzw. 20 mBq/kg liegen, jeweils 1'000 m über bzw. unter der Tropopause ermittelt.



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

Die ^{137}Cs-Werte lagen im Jahr 2022 alle unter der Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg. In Figur 3 deutlich sichtbar sind die nach dem Reaktorunfall Fukushima (Japan) gemessenen ^{131}I-Konzentrationen, welche jedoch infolge der Halbwertszeit von 8 Tagen schon kurze Zeit später nicht mehr messbar waren. Auch das Radionuklid ^{134}Cs konnte in den Jahren nach 2011 nicht mehr nachgewiesen werden.



Figur 3:
^{7}Be-, ^{134}Cs-, ^{137}Cs- und partikelgebundene ^{131}I- Messwerte in mBq/kg Luft in den Jahren 2010-2022.

Quellen:

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

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

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

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

4.4 Radioaktivität in aquatischen Systemen

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

Zusammenfassung

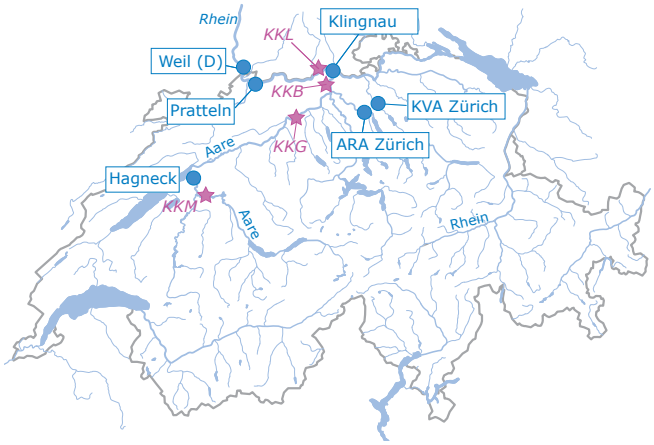
In den Wasserproben von Aare und Rhein wurden 2022 weder ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{134}Cs noch ^{137}Cs aus Abgaben der Kernkraftwerke Mühleberg, Gösgen, Beznau oder Leibstadt nachgewiesen. In den Schwebestoffproben von Aare und Rhein wurden vereinzelt ^{54}Mn und ^{60}Co, sowie in allen 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 Radionuklid-Immissionen der entsprechenden Betriebe zu überwachen.

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 über-



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

wacht, 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.

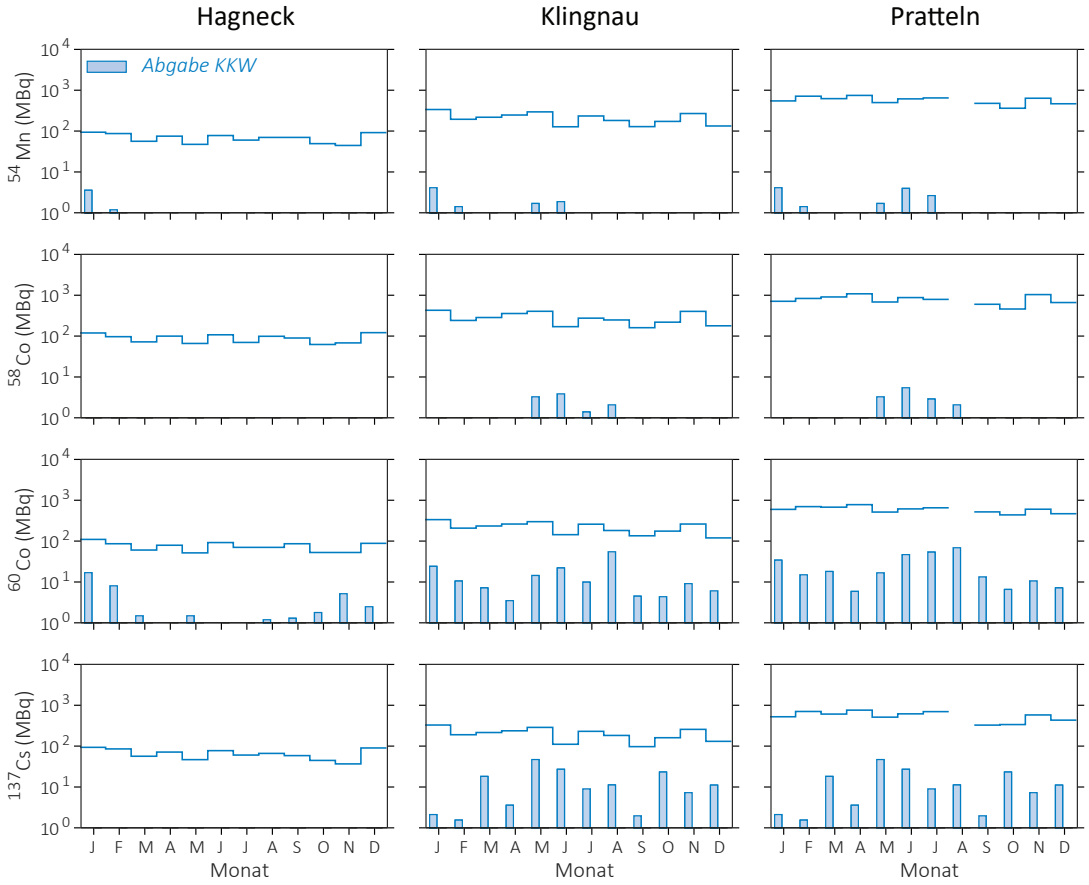
Ergebnisse

Wasserproben aus Aare und Rhein

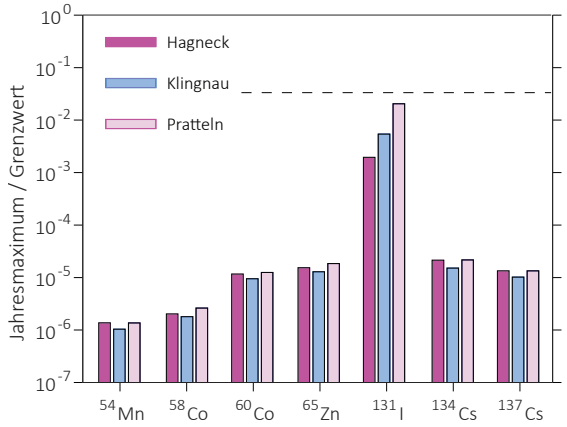
Die Wasserproben aus Aare und Rhein bei Hagneck, Klingnau und Pratteln werden als grossvolumige, monatliche Sammelproben entnommen. Entsprechend dem jeweiligen Abfluss werden pro Tag automatisch zwischen 20 und 80 Proben genommen, was monatliche Sammelproben zwischen 50 L und 200 L ergibt. Zur Bestimmung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



Figur 2 :
Vergleich der berechneten und gemessenen Frachten von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs an den drei Stationen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln. Die berechneten Frachten entsprechen den kumulierten bilanzierten Abgaben der flussaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte lagen immer unter der Nachweisgrenze (blaue Stufenlinie). Aufgrund einer technischen Störung konnte im August bei Pratteln keine Probe gewonnen werden.



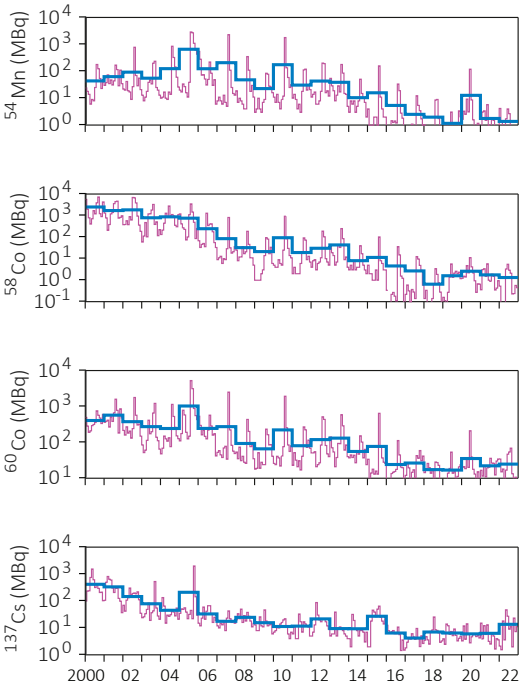
Figur 3 :
Maxima der normierten Konzentrationen von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{131}I, ^{134}Cs und ^{137}Cs im Wasser bei Hagneck, Klingnau und Pratteln (Jahresmaxima der Nachweisgrenzen), normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer gemäss StSV. Die gestrichelte Linie markiert die Untersuchungsschwelle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

Bei allen drei Stationen (Hagneck, Klingnau und Pratteln) wurde in den Wasserproben aus der Aare und dem Rhein über das ganze Jahr kein ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{134}Cs oder ^{137}Cs beobachtet. In früheren Jahren wurden vereinzelt Spuren dieser Nuklide nahe der Nachweisgrenze[1] 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 (siehe weiter unten).

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

Konzentrationsmaxima im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten

Figur 3 zeigt die jährlichen Maxima der Konzentrationen bzw. Nachweisgrenzen von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{131}I, ^{134}Cs und ^{137}Cs im Wasser. Die Konzentrationen wurden normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer (StSV). Die Konzentrationen liegen um mindestens zwei Grössenordnungen unterhalb der Immissionsgrenzewerte, mit Ausnahme einer Probe, in welcher die Nachweisgrenze um den Faktor 49 unterhalb des Immissionsgrenzwertes liegt.



Figur 4 :
Entwicklung der summierten Abgaben der Kernkraftwerke über Abwasser von 2000 - 2022. Die rote Linie zeigt die Abgaben pro Monat, die blaue jeweils das Jahresmittel.

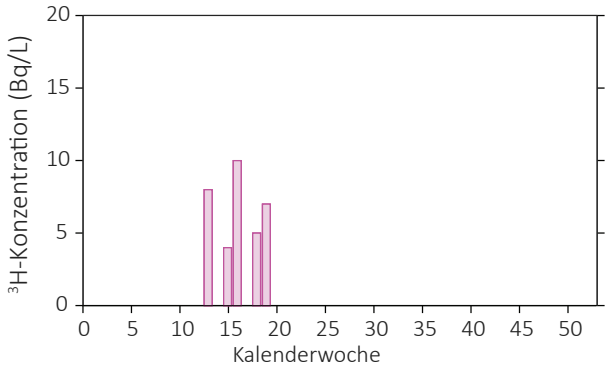
Langfristige Entwicklung der Radionuklidabgaben und Frachten in Aare und Rhein

Figur 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abgaben von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co und ^{137}Cs aller Kernkraftwerke während den Jahren 2000 - 2022. 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.

^{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 neu bei 4 Bq/l an-

1 Die «Nachweisgrenze» im nuklearphysikalischen Sinn bezeichnet die Grenze, ab welcher eine quantitative Bestimmung möglich ist (analog zu «Limit of Quantificaton», LOQ).



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

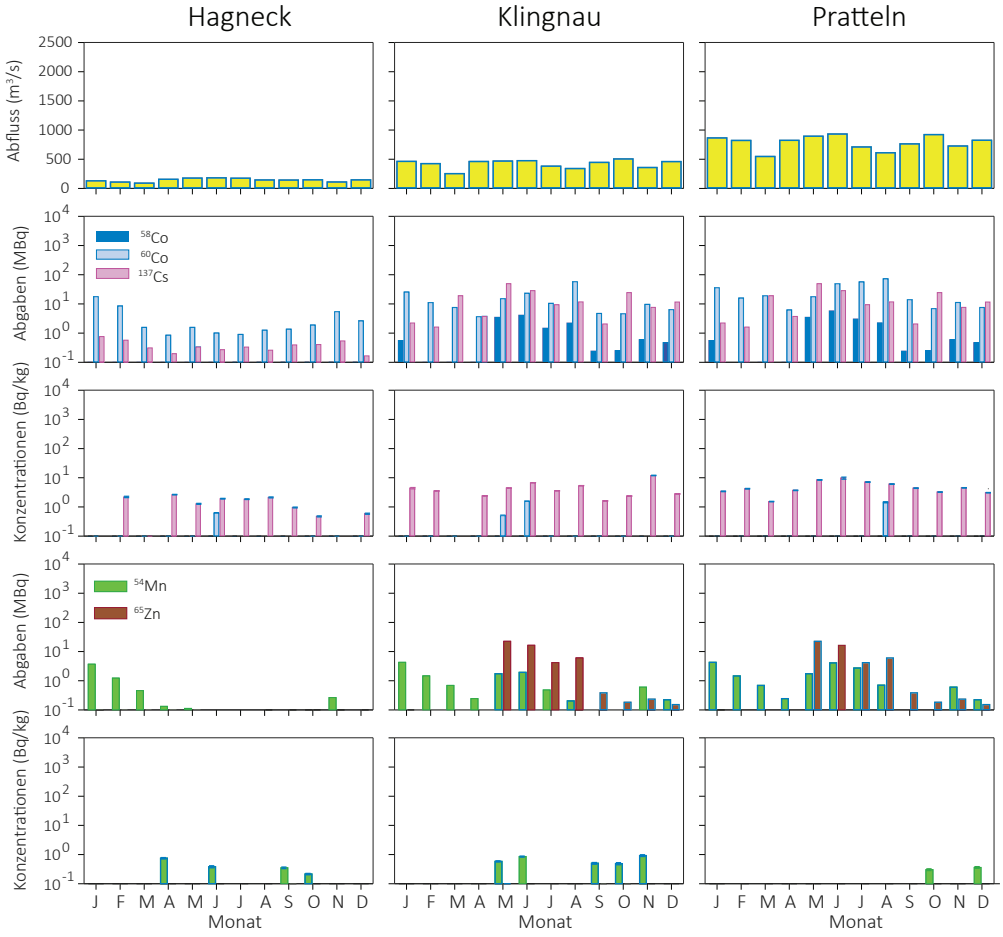
statt 2 Bq/l, wodurch der Anschein erweckt werden kann, es wäre seltener Tritium im Wasser vorhanden. Die ^{3}H-Aktivität des Rheinwassers ist in Figur 5 dargestellt.

Die ^{3}H-Konzentrationen betragen über das ganze Jahr < 10 Bq/L. Bei 90 % aller Proben liegen die ^{3}H-Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze von 4 Bq/L.

Schwebestoffe in Aare und Rhein

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

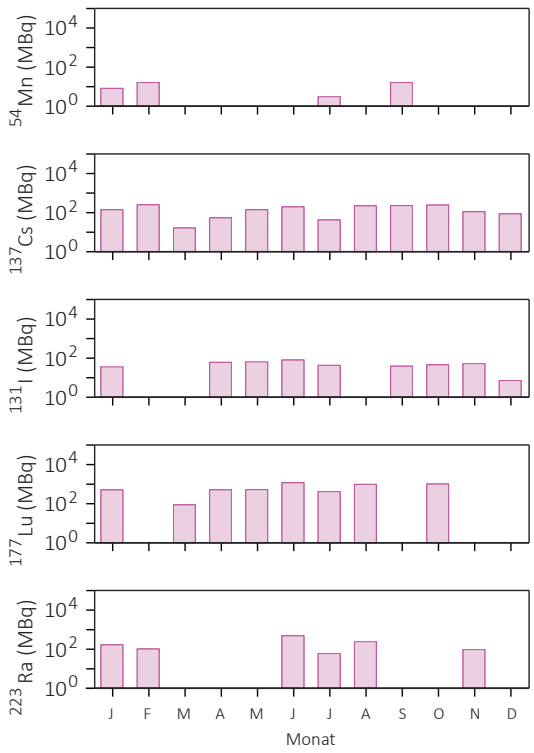


Figur 6 :
Spezifische Aktivitäten von ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn und ^{137}Cs in den monatlichen Partikelproben aus den Sedimentfallen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln im Vergleich mit dem Abfluss und den kumulierten bilanzierten Abgaben der stromaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte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

Die spezifischen ^{137}Cs-Aktivitäten der Partikelproben liegen bei allen drei Stationen bei maximal 12 Bq/kg, und zeigen keine generelle Korrelation mit den Abgaben aus den Kernkraftwerken (Figur 6). Die ^{137}Cs-Nachweise werden 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.

Die Radionuklidaktivitäten der Stichproben des AUE BS werden auf die monatlichen Radionuklidfrachten auf suspendierten Partikeln bei Weil am Rhein hochgerechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Hochrechnung auf der Annahme beruht, dass die über 1 - 4 Tage gesammelten Stichproben repräsentativ für den ganzen Monat sind, was aufgrund der diskontinuierlichen Abgaben der Kernkraftwerke nicht immer zutrifft.



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

Figur 7 zeigt die aus den Stichproben bei Weil am Rhein (D) abgeschätzten Frachten von ^{54}Mn und ^{137}Cs auf Schwebestoffen. ^{137}Cs wurde jeden Monat nachgewiesen, auch diese Ergebnisse werden wiederum primär auf die Remobilisierung von ^{137}Cs aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt. ^{54}Mn wurde in 4 Proben gemessen. ^{58}Co und ^{60}Co wurden nicht nachgewiesen. Zusätzlich zu den relativ langlebigen Radionukliden konnten in den Stichproben von Weil am Rhein (D) auch die kurzlebigen Radionuklide ^{131}I (Halbwertszeit: 8 Tage), ^{177}Lu (Halbwertszeit: 6.7 Tage) und ^{223}Ra (Halbwertszeit: 11.4 Tage) nachgewiesen werden (ebenfalls Figur 7), welche in der Nuklearmedizin eingesetzt werden.

Fische und Wasserpflanzen in Aare und Rhein

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

Fische: Im Jahr 2022 wurden Fische aus dem Bielersee (gefangen am 16.09.2022), Eppenberg-Wöschnau (02.11.2022), Beznau (19.09.2022) und aus dem Rhein bei Augst (22.08.2022) analysiert. In allen Fischproben wurden natürliche Radionuklide gefunden, z.B. ^{40}K (609 - 754 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 22.06.2022 wurden die Grundwasserströme bei Aarberg (Pumpwerk Römerstrasse II, in der Nähe der Überwachungsstation Hagneck), bei Böttstein (Pumpwerk Schulhaus, unterhalb des KKW Beznau), im Hardwald bei Muttenz (Grundwasserbrunnen 16 der Hardwasser AG) und bei Schönenwerd (Pumpwerk Aarefeld in Gretzenbach, neben dem KKW Gösgen) beprobt. Dabei werden die Radionuklide aus 150L Grundwasser analog zu den Flusswasserproben vor der Analyse angereichert und analysiert. Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen (Bestimmungsgrenzen 0.08 - 0.3 mBq/L).

4.5
URAnet aqua:
Automatisches Messnetz Flusswasser

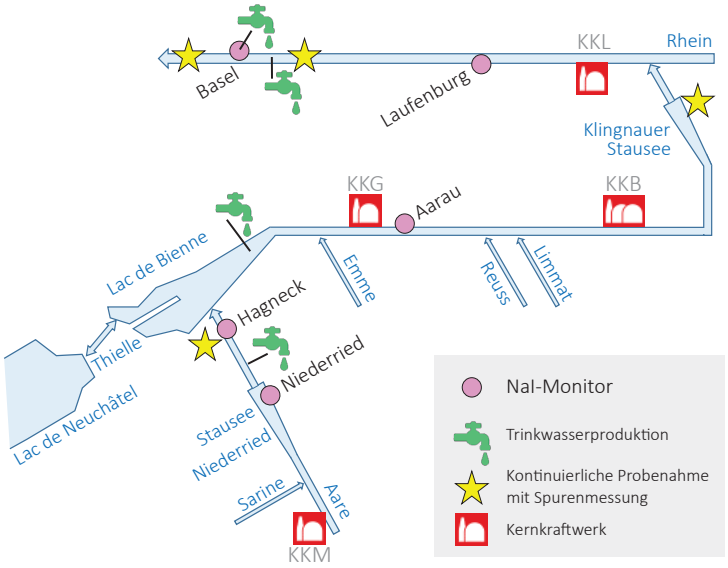
P. Steinmann, M. Müller, D. Lienhard, S. Estier
Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die fünf automatischen Natrium-Iodid-Sonden des Messnetzes URAnet aqua messen fortlaufend die Konzentration von Gammastrahlern in Aare und Rhein und übermitteln alle 10 Minuten einen Messwert. Künstliche Radionuklide konnten im Berichtsjahr im Flusswasser nicht nachgewiesen werden. Zwei Messsonden hatten 2022 längere Betriebsausfälle. Durch den lückenlosen Betrieb der Sonde bei Laufenburg (unterhalb aller Kernkraftwerke) und der Sonden bei Niederried und Hagneck (vor dem Bielersee) konnte aber die Vorgabe für die Mindestverfügbarkeit des Messnetzes eingehalten werden.

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 beiden Sonden bei Niederried und Hagneck messen zwischen dem KKW Mühleberg und dem Bielersee, welcher ein wichtiges Trinkwasserreservoir für die Stadt Biel ist. Um eine möglichst lückenlose Messung zu gewährleisten, bestehen in diesem Abschnitt zwei Messstandorte. Flussabwärts des Kernkraftwerks Gösgen sowie der beiden relativ nahe beieinander liegenden Standorte Beznau und Leibstadt sind zwei weitere Sonden installiert (Aarau und Laufenburg). Eine fünfte Sonde überwacht das von IWB für die Trink-



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

wasserversorgung der Stadt Basel aus dem Rhein entnommene Wasser. Unterhalb des letzten Kernkraftwerks messen damit auch zwei NaI-Sonden im Bereich der Trinkwasserentnahme. Die Aufgabe der neuen automatischen Messsonden ist es, starke Erhöhungen von Radioaktivität im Flusswasser rasch zu erkennen. Die tiefe Nachweisgrenze erlaubt es eine untere Meldeschwelle in Grössenordnung der Immissionsgrenzwerte für Gewässer aus der 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 Bundesamt für Gesundheit (BAG) am sowie die Nationale Alarmzentrale (NAZ) benachrichtigt. Das BAG verifiziert die Messwerte, 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. Die automatischen Messsonden sind komplementär zu den monatlichen Messungen der EAWAG (siehe Figur 1), welche mit einer mehr als tausendmal tieferen Nachweisgrenze auch geringste Abgaben der Kernkraftwerke erfassen können (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.

Verfügbarkeit der Messsonden und Messergebnisse 2022

Die Verfügbarkeit der Sonden, d.h. das Vorhandensein von 10-Minuten-Spektren, ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Generell ist die Verfügbarkeit 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. Zwei Sonden hatten längere Betriebsausfälle: Die Sonde bei Aarau hatte ab Februar vermehrt Lücken in der Datenübertragung und ist ab 21.2. ganz ausgefallen. Der Grund war ein Defekt im Verbindungskabel, der erst nach dem Austausch der Messsonde entdeckt wurde. Dadurch verzögerte sich die Wiederinbetriebnahme der Station Aarau bis Ende März. In Basel führte ein langer Unterbruch in der Stromversorgung des Gebäudes wo die Sonde installiert ist zu einer Messlücke vom 11. Oktober bis zum 2. November. In dieser Zeit wurde auch die Sonde ersetzt. Die Vorgabe für die Mindestverfügbarkeit des URAnet aqua Messnetzes ist so festgelegt, dass für die Stationspaare «Niederried-Hagneck», «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, Hagneck und Niederried ist dieses Kriterium für 2022 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.

Tabelle 1:
Verfügbarkeit (Uptime) der NaI-Wassersonden 2022

Station	Uptime	Inbetriebnahme
Niederried	99.9%	Juni 2014
Hagneck	99.9%	Juni 2015
Aarau	82.8%	Juni 2014
Laufenburg	99.9%	Januar 2015
Basel	93.6%	Juli 2013

Die NaI-Detektoren des URAnet aqua Messnetzes konnten 2022 keine künstlichen Radioisotope im Flusswasser nachweisen. Bei den Messwerten fallen vor allem Spitzen in der Dosisleistung auf, wenn nach starken Niederschlägen viele Radonfolgeprodukte ins Flusswasser gelangen. Das ist teilweise auch im Verlauf der Tagesmittelwerte auf radenviro.ch sichtbar.

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 2022 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 2022 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 2022 nach Art oder Entnahmeort der Probe

Art oder Entnahmeort der Probe	Anzahl
Aare Mühleberg Rewag	365
Niederschlag Niederwangen	25
Stadtbach Niederwangen	26
Niederschlag Physikalisches Institut	12
Rhein flussabwärts vom KKL	37
Standards/Nulleffekt/Vergleichsmessungen	104
	Total: 569

Probenahmen

Im Jahr 2022 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 2022 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

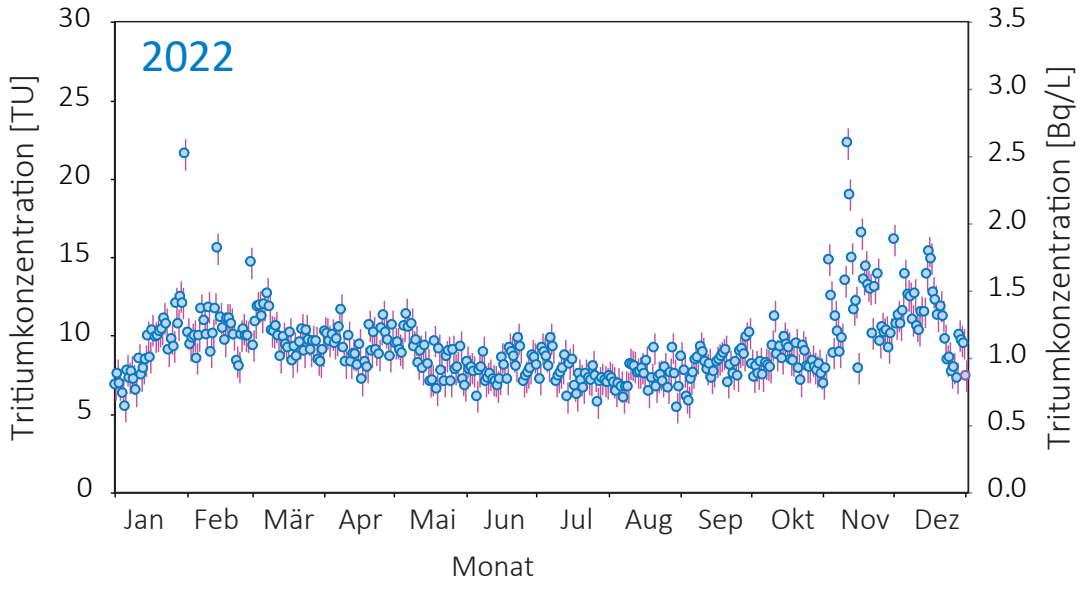
Messergebnisse Januar bis Dezember 2022

Standort Mühleberg Rewag (Aare)

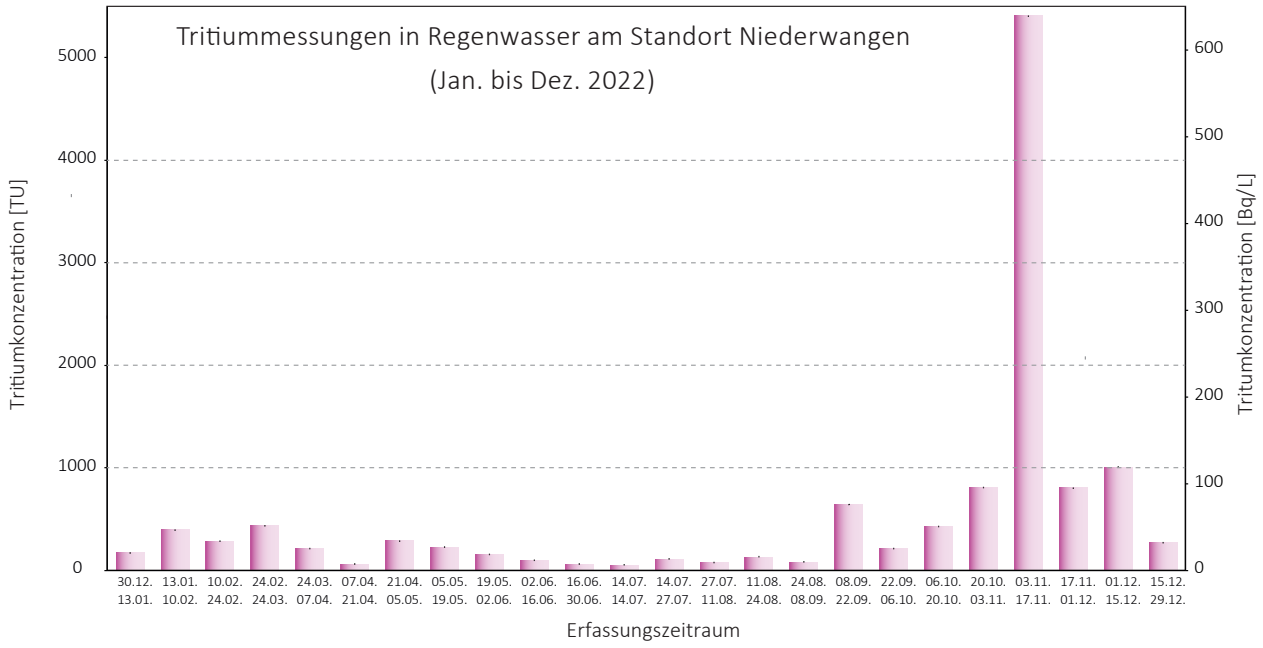
Die Tritium - Messwerte des Wassers vom Standort Mühleberg Rewag (Figur 1) bewegten sich grösstenteils relativ stabil in einem Band zwischen 5 und 15 TU (entsprechend 0.6 - 2 Bq/L). Erhöhte Werte traten im Januar/Februar sowie im November/Dezember auf. Im November 2022 wurden auch an anderen Standorten im Kanton Bern erhöhte Werte gemessen, insbesondere am Standort Niederwangen (siehe nächsten Abschnitt).

Standorte Niederwangen

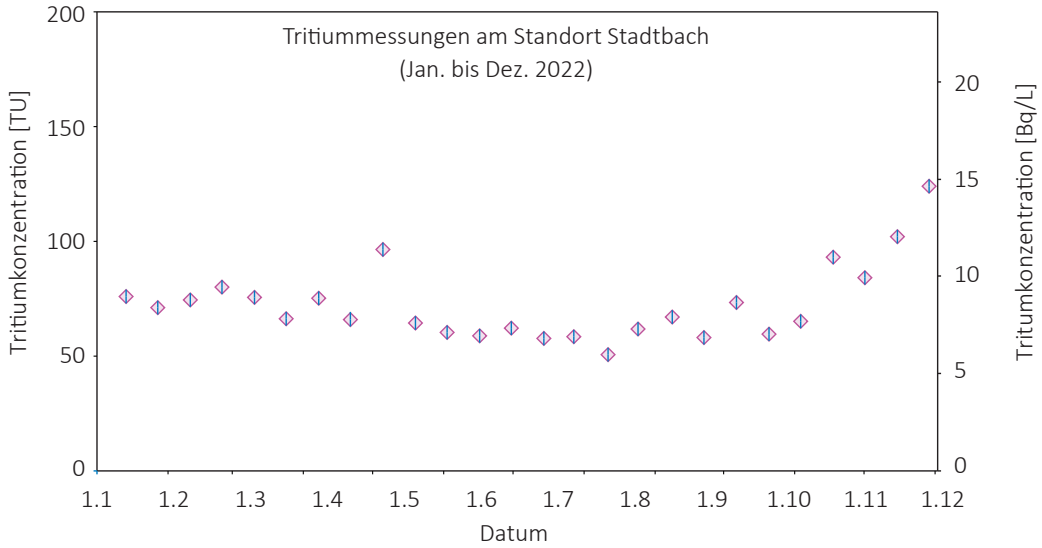
Im Raum Niederwangen wurden in der Nähe der Firma MB-Microtec 25 Messungen am lokalen Niederschlag durchgeführt (Figur 2). Der höchste Messwert der Schnee- oder Regenwasserproben lag bei über 5'000 TU (mehr als 600 Bq/L) und trat im November auf. Selbst dieser stark erhöhte Wert liegt unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 20`000 Bq/l. Die Umgebungsüberwachung von MB-Microtec und die erhöhten Werte im November werden ausführlicher in Kapitel 9.3 diskutiert.Seit Herbst 2020 wird in Niederwangen auch der Stadtbach wieder regelmässig alle zwei Wochen beprobt. Die Messwerte lagen im langjährigen Mittel, welches 106 TU beträgt (Figur 3). Gegen Ende des Jahres 2022 zeichnete sich ein leichter Anstieg der Messwerte ab, welcher (mit einer geringen Verzögerung) den Anstieg der Messwerte im Niederschlag von Niederwangen widerspiegelt.



Figur 1 :
Tritium-Messwerte im Wasser der Aare bei Mühleberg Rewag.



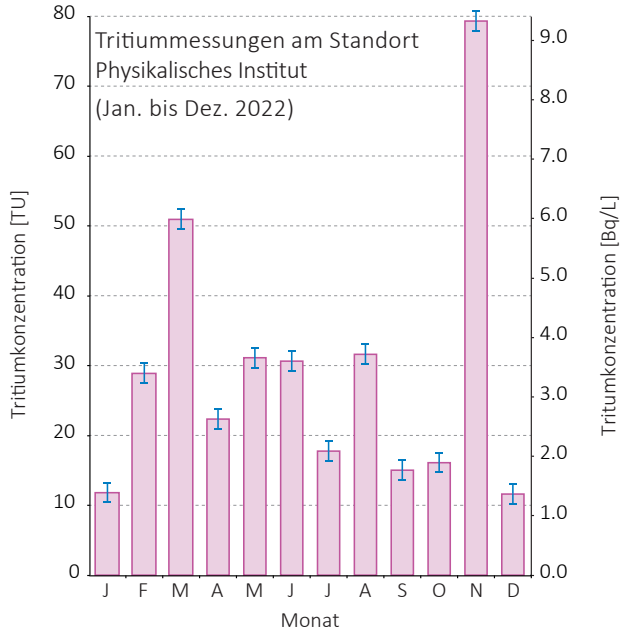
Figur 2 :
Tritium-Messwerte im Niederschlag von Niederwangen (Probenahmen in der Regel alle 2 Wochen).



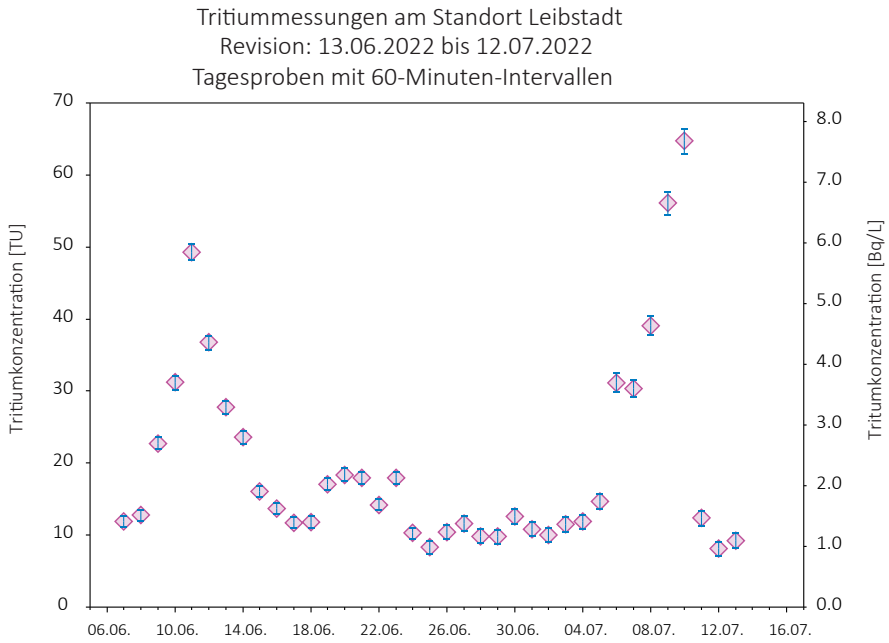
Figur 3 :
Tritium-Messwerte am Stadtbach Niederwangen (Stichproben alle 2 Wochen).

Standort Physikalisches Institut, Stadt Bern (Regenwasser)

Die Tritiumkonzentration im Niederschlag im Raum Bern ist generell höher als in der Aare und auch höher als in Niederschlägen andernorts in der Schweiz. Dies ist auf lokale gasförmige Emissionen zurückzuführen. Die im Jahr 2022 gemessenen Monatsproben wurden auf dem Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern gesammelt. Auch an diesem Standort traten die höchsten Messwerte mit 80 TU (9.4 Bq/L) im November 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: 13.06.2022 bis 11.07.2022.

Standort Leibstadt (Rhein)

Von Anfang Juni bis Mitte Juli 2022 wurde stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) wieder ein automatischer Probenehmer betrieben, um den Tritiumgehalt des Rheins vor, während und nach dem Revisionsstillstand zu ermitteln, welcher vom 13.06.2022 bis 11.07.2022 terminiert war. Es wurden Tagesproben mit einem Sampling-Intervall von je 60 Minuten entnommen.

Bei Revisionsbeginn zeichnete sich ein deutlicher Anstieg von ca. 10 TU auf ca. 50 TU ab (Figur 5). In den darauffolgenden Wochen gingen die Messwerte wieder auf Werte um 10 TU zurück. Gegen Ende der Revision trat jedoch ein zweiter Peak mit einem Höchstwert von ca. 65 TU (7.6 Bq/L) auf.

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 suite aux essais nucléaires des années soixante ainsi que lors de l'accident de Tchernobyl en 1986. Ces radioéléments sont les deux principaux produits de fission à durée de vie moyenne (environ 30 ans) et ont un comportement chimique proche de deux éléments impliqués dans les cycles vivants, le calcium (pour le strontium) et le potassium (pour le césium). Par exemple, le ^{90}Sr est facilement transféré du sol aux plantes, puis tout au long de la chaine alimentaire, et pourra finalement se trouver dans les tissus osseux [1] et les dents [2]. La mesure du ^{90}Sr dans des échantillons de sol, d'herbe, de céréale, de lait, de vertèbre et de dents de lait est effectuée en Suisse depuis les années soixante. La figure 3 du chapitre 1.1 illustre l'évolution des moyennes annuelles obtenues depuis plus de soixante ans pour chaque type d'échantillon correspondant à un compartiment de l'environnement. Après avoir atteint des valeurs maximales au milieu des années soixante, une décroissance 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 une valeur 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 0.4 à 0.6 Bq/kg sur le plateau suisse tandis que des valeurs supérieures à 1 Bq/kg peuvent être observées au Tessin ou sur les sites alpins. La même tendance est observée pour les actinides, avec des activités inférieures à 0.25 Bq/kg pour le plutonium et à 0.12 Bq/kg pour l'américium sur le plateau suisse, des valeurs plus élevées pour les sites en altitude, et une activité maximale relevée à Coglio 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.

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 (15 à 268 Bq/kg). Le passage du nuage de Tchernobyl a également touché le nord-est de la Suisse, les valeurs relevées à Arenenberg (23.2 Bq/kg) et Güttingen (12.7 Bq/kg) étant supérieures à celles obtenues sur les autres sites du plateaux suisse (5 à 11 Bq/kg). Toutes les activités mesurées sont toutefois restées dans les valeurs usuellement observées et en constante décroissance depuis l'accident de Tchernobyl ainsi qu'illustré par la figure 2 du chapitre 1.1. Pour le ^{60}Co et le ^{134}Cs, deux radioéléments produits artificiellement dans les réacteurs nucléaires, aucune activité supérieure à la limite de détection n'a été décelée. Enfin, c'est pour le ^{40}K, un des trois isotopes constituant le potassium naturel, que l'activité mesurée est la plus élevée.

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 (1.1 - 8.3 Bq/kg) et au Tessin (3 Bq/kg), tandis que pour les échantillons collectés sur le plateau, les activités en ^{90}Sr ne dépassent pas 1.5 Bq/kg. La même tendance est observée pour le ^{137}Cs, dont les activités les plus élevées sont mesurées au Tessin.

Conclusions

Les mesures de la radioactivité dans les sols et les herbes en Suisse en 2022 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.

Références

[1] Froidevaux, P. et al., Retention half times in the skeleton of plutonium and ^{90}Sr from above-ground nuclear tests: A retrospective study of the Swiss population. Chemosphere 2010, 80, 519

[2] Froidevaux, P.; Geering, J.-J.; Valley, J.-F. ^{90}Sr in deciduous teeth from 1950 to 2002: The Swiss experience. Sci. Total Environ. 2006, 367, 596

[3] Froidevaux, P. et al., Radionuclides in the Environment in Switzerland: A Retrospective Study of Transfer from Soil to the Human Body. Chimia 2020, 74, 984-988.

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

Tableau 1:
Activités en ^{40}K , ^{60}Co, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{90}Sr, Pu et Am dans des sols (0-5 cm) prélevés en Suisse en 2022 (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	406 ± 20	< 0.5	< 0.4	11.1 ± 0.7	0.55 ± 0.12	0.140 ± 0.020 m = 4 [3]	0.063 ± 0.007 m = 3 [3]
AG (KKB in-situ)	2	386 ± 28			9.5 ± 0.9			
AG (PSI)	1	400 ± 27	< 0.5	< 0.5	8.7 ± 0.7	0.44 ± 0.12	0.139 ± 0.018 m = 4 [3]	0.057 ± 0.007 m = 2 [3]
AG (PSI in-situ)	1	341 ± 35			6.8 ± 0.8			
AG (ZWILAG)	1	400 ± 30	< 0.5	< 0.4	9.1 ± 0.8	0.41 ± 0.12	0.161 ± 0.026 m = 4 [3]	0.068 ± 0.006 m = 3 [3]
AG (ZWILAG in-situ)	1	381 ± 39			8.9 ± 1.1			
AG (Vois. KKL)	4	410 ± 15	< 0.4	< 0.4	10.6 ± 0.5	0.48 ± 0.14	0.172 ± 0.022 m = 4 [3]	0.072 ± 0.007 m = 3 [3]
AG (KKL in-situ)	4	356 ± 18			8.5 ± 0.5			
AG/SO (Vois. KKG)	4	466 ± 17	< 0.5	< 0.4	9.8 ± 0.4	0.50 ± 0.14	0.215 ± 0.027 m = 4 [3]	0.102 ± 0.009 m = 2 [3]
AG/SO (KKG in-situ)	4	380 ± 20			7.2 ± 0.5			
BE (Voisinage KKM)	7	685 ± 19	< 0.5	< 0.4	8.1 ± 0.3	0.62 ± 0.15	0.169 ± 0.025 m = 4 [3]	0.077 ± 0.0015 m = 2 [3]
BE (KKM in-situ)	7	601 ± 23			6.6 ± 0.3			
BE (Mürren) [1]	1	500 ± 45	< 0.4	< 0.6	18.1 ± 2.3	4.30 ± 0.70	0.70 ± 0.02	0.39 ± 0.10
BE (Gimmelwald)	1	330 ± 28	< 0.2	< 0.2	13.7 ± 1.7	1.90 ± 0.70	0.55 ± 0.02	0.36 ± 0.06
BE (Fahrni) [2]	1	450 ± 38	< 0.2	< 0.3	11.4 ± 1.4	2.30 ± 0.40	0.47 ± 0.01	0.33 ± 0.17
BE (Diesse/Jura)	1	480 ± 40	< 0.2	< 0.3	12.7 ± 1.5	1.20 ± 0.20	0.46 ± 0.05	0.36 ± 0.10
BL (Sissach)	1	565 ± 30	< 0.2	< 0.2	16.2 ± 1.0	3.70 ± 0.80		
FR (Posieux)	1	404 ± 31	< 0.6	< 0.5	5.2 ± 0.6	0.52 ± 0.14	0.195 ± 0.032 m = 2 [3]	0.074 ± 0.009
FR (Posieux in-situ)	1	392 ± 40			4.3 ± 0.7			
GE (Vois. CERN)	5	434 ± 15	< 0.4	< 0.4	6.5 ± 0.3	0.39 ± 0.11	0.128 ± 0.013	0.045 ± 0.004
GE (CERN in-situ)	5	368 ± 15			4.0 ± 0.3			
TG (Arenenberg)	1	394 ± 30	< 0.4	< 0.4	23.2 ± 1.8	0.43 ± 0.13	0.206 ± 0.028 m = 2 [3]	0.089 ± 0.012
TG (Arenenberg in-situ)	1	366 ± 38			16.2 ± 1.8			
TG (Güttingen)	1	358 ± 28	< 0.4	< 0.4	12.7 ± 1.1	0.42 ± 0.10	0.130 ± 0.018 m = 2 [3]	0.054 ± 0.006
TG (Güttingen in-situ)	1	289 ± 30			12.3 ± 1.4			
TI (Centovalli)	1	525 ± 33	< 0.3	< 0.3	143.4 ± 8.5	16.50 ± 3.3		
TI (Prato Leventina)	1	580 ± 36	< 0.3	< 0.3	14.9 ± 1.1	6.80 ± 1.40		
TI (Sessa)	1	650 ± 38	< 0.1	< 1.0	29.1 ± 1.4	7.50 ± 1.50		
TI (Cadenazzo)	1	657 ± 49	< 0.6	< 0.5	35.3 ± 2.8	0.51 ± 0.14 0.59 ± 0.13	0.150 ± 0.019 m = 3 [3]	0.062 ± 0.007 m = 2 [3]
TI (Cadenazzo in-situ)	1	631 ± 64			36.9 ± 5.3			
Ti (Caslano)	1	625 ± 46	< 0.5	< 0.5	80.2 ± 6.1			
Ti (Caslano in-situ)	1	611 ± 62			57.5 ± 5.9			
TI (Coglio)	1	583 ± 43	< 0.6	< 0.6	222 ± 16.7	3.18 ± 0.83 4.07 ± 0.80	0.901 ± 0.103 m = 2 [3]	0.304 ± 0.016
TI (Coglio in situ)	1	573 ± 59			123 ± 12.4			
TI (Stabio)	1	607 ± 44	< 0.6	< 0.6	268 ± 20.1	1.43 ± 0.30	0.636 ± 0.042 m = 2 [3]	0.269 ± 0.015
TI (Stabio in-situ)	1	569 ± 58			151 ± 15.3			

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 2022 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	295 ± 16	777 ± 36	< 1.1	< 0.9	< 0.8	0.37 ± 0.09 [3] 0.70 ± 0.17 [4]
AG (PSI)	2	331 ± 24	640 ± 43	< 1.2	< 1.0	0.7 ± 0.4	0.56 ± 0.13 [3] 0.76 ± 0.19 [4]
AG (ZWILAG)	2	419 ± 31	826 ± 57	< 1.2	< 1.0	< 1.1	0.27 ± 0.07 [3] 1.13 ± 0.24 [4]
AG (Voisinage KKL)	8	314 ± 12	782 ± 26	< 0.8	< 0.6	1.7 ± 0.3	0.43 ± 0.12 [3] 1.51 ± 0.32 [4]
AG/SO (Voisinage KKG)	8	176 ± 7	847 ± 29	< 1.6	< 1.1	< 1.2	0.52 ± 0.13 [3] 0.78 ± 0.16 [4]
BE (Voisinage KKM)	8	310 ± 13	943 ± 34	< 1.1	< 0.9	< 0.9	0.31 ± 0.09 [3] 0.48 ± 0.11 [4]
BE (Lauterbrunnen)	1	39 ± 14	430 ± 38	< 0.4	< 0.3	1.1 ± 0.2	8.33 ± 1.34
BE (Mürren) [1]	1	288 ± 45	1'100 ± 93	< 0.4	< 0.3	< 0.3	4.66 ± 0.42
BE (Gimmelwald)	1	440 ± 63	600 ± 50	< 0.4	< 0.3	0.4 ± 0.1	3.12 ± 0.48
BE (Fahrni) [2]	2	327 ± 41	1'035 ± 63	< 0.4	< 0.3	0.4 ± 0.1	2.15 ± 0.14
BE (Diesse/Jura)	2	229 ± 25	1'500 ± 71	< 0.5	< 0.3	< 0.3	1.10 ± 0.10
BL (Sissach)	1	79 ± 5	646 ± 33	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.81 ± 0.16
FR (Posieux)	2	140 ± 13	965 ± 65	< 2.0	< 1.6	< 1.7	0.41 ± 0.09 [3]
GE (Voisinage CERN)	4	172 ± 9	695 ± 28	< 1.3	< 1.0	< 1.1	0.83 ± 0.17 [4] 1.02 ± 0.20 [4]
TG (Güttingen)	2	154 ± 13	954 ± 62	< 1.7	< 1.3	1.0 ± 0.8	0.31 ± 0.07 [3]
Ti (Centovalli)	1	249 ± 15	452 ± 27	< 0.2	< 0.2	40.0 ± 2.2	0.59 ± 0.12
TI (Prato Leventina)	1	311 ± 18	945 ± 51	< 0.2	< 0.2	0.6 ± 0.3	0.06 ± 0.01
TI (Sessa)	1	78 ± 7	687 ± 37	< 0.3	< 0.2	1.3 ± 0.4	0.32 ± 0.06
TI (Cadenazzo)	2	151 ± 12	877 ± 56	< 0.9	< 0.7	1.9 ± 0.4	2.97 ± 0.36 [3]
Ti (Stabio)	1	54 ± 11	381 ± 41	< 1.7	< 1.4	1.1 ± 1.0	1.80 ± 0.36 [5]

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

Radioactivité dans l'alimentation



Radioaktivität in Lebensmitteln

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

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

2022

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
M. Jermini, 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 2022 über 500 Lebensmittelproben aus der Schweiz (Spezialkampagnen für Wildschweine nicht mitgezählt) sowie 221 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 2 % 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. Aus Graubünden Zürich und dem Tessin wurden rund 200 Pilzproben untersucht, ohne eine Grenzwertüberschreitung festzustellen; das Maximum lag bei 173 Bq/kg ^{137}Cs (Frischgewicht). Bei den importierten Lebensmittel waren die festgestellten Konzentrationen künstlicher Radionuklide im allgemeinen sehr tief und ohne Grenzwertüberschreitungen. Auch hier zeigten die üblichen Verdächtigen Wildschwein, Pilz und Heidelbeere die höchsten ^{137}Cs-Konzentrationen (Maxima: 240 Bq/kg, 235 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 aus Japan (817.026.02). 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 ist die Festlegung von Höchstwerten für Cäsium-Isotope für Importe aus Japan seit dem Reaktorunfall in Fukushima in der BLV Verordnung 817.026.2.

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

2022 wurden rund 150 Milchproben gammaspektrometrisch analysiert. Für ^{137}Cs waren die meisten Werte tiefer als die Nachweisgrenze, die zwischen 0.02 Bq/l und 1 Bq/l lag. Ein einziger Messwert war grösser als 1 Bq/l. Er wurde bei einer Probe aus dem Centovalli festgestellt (16 Bq/l). Solche leicht erhöhten Werte in der Nähe des 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 2022 in keiner Milchprobe nachgewiesen werden (Nachweisgrenze : < 1 Bq/l oder tiefer).

Das KL BS, das IRA in Lausanne und das LABOR SPIEZ untersuchten insgesamt 62 Milchproben auf ^{90}Sr. Alle gemessenen Werte waren sehr tief mit einem Maximum von 0.26 Bq/l und einem Median von 0.014 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 50 Gemüse- und Obstproben aus der Schweiz konnte in keiner einzigen Spuren von ^{137}Cs erkannt 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 (< 0.6 Bq/kg ^{137}Cs) 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 0.03 und 0.24 Bq/kg mit einem Medianwert von 0.09 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. Acht Gemüseproben aus dem Kanton Waadt befanden sich in einem Bereich zwischen 0.01 und 0.23 Bq/kg ^{90}Sr.

Tritium (^{3}H) in Obst und Milch

Die genehmigten Abgaben an die Umwelt der Firma mbmicrotec 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 2022 ergaben Tritiumkonzentrationen (^{3}H) von 5- 50 Bq/l im Destillat (12 Proben; Mittelwert: 23 Bq/l). Die ebenfalls leicht erhöhte ^{3}H-Aktivität der Milch aus der Umgebung des genannten Betriebes (7.5- 12.7 Bq/l im Destillat von 3 Milchproben) ist auf die Aufnahme von ^{3}H aus lokalen Futtermitteln zurückzuführen.

In 8 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. Wir können aber festhalten, dass die gemessenen Werte alle unterhalb des für Trinkwasser geltenden Parameterwertes für Tritium von 100 Bq/l liegen.

^{137}Cs in Wildschweinen

Der Kanton Tessin hat die in Zusammenarbeit mit dem BAG eingeführten Triagemessungen an Wildschweinen mit einem empfindlichen Dosisleistungsmessgerät im Jahr 2023 weitergeführt. Tiere, bei denen die Triagemessung (Dosisleistung) vor Ort einen zu hohen Wert anzeigte, wurden konfisziert. Dies war bei 24 von 1`019 untersuchten Tieren der Fall. Das entspricht, ähnlich wie in den letzten Jahren, einer Quote von ca. 2%. Bei diesen Tieren liegt die ^{137}Cs Konzentration im Fleisch über dem Grenzwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg. Eine im Labor nachgemessene Stichprobe (Zunge) ergab den Wert von 1`368 Bq/kg ^{137}Cs.

Im Kanton Graubünden wurden zwei Wildschwein kontrolliert: eines mit 3, das andere mit 136 Bq/kg ^{137}Cs.

Andere Lebensmittel aus der Schweiz

In den 4 jährlich 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 Aktinide nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze schwankte dabei je nach zur Verfügung stehender Probemengen zwischen <1 mBq/kg Frischgewicht und <16 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 Graubünden, Zürich und Basel-Stadt haben insgesamt 203 Proben einheimischer Pilze untersucht: Mittelwert 14 Bq/kg (Frischgewicht) ^{137}Cs; Maximum 173 Bq/kg ^{137}Cs; Median 4 Bq/kg ^{137}Cs. Der Grenzwert von 600 Bq/kg aus der Tschernobylverordnung wurde somit nicht erreicht. Die zehn Proben mit den höchsten ^{137}Cs Konzentrationen stammten je zur Hälfte aus den Kantonen Graubünden und Zürich.

56 vom KL-BS untersuchte Proben von Milch und aus Milch hergestellten Produkte (Käse, Joghurt) waren überhaupt nicht mit ^{137}Cs kontaminiert (<0.5 Bq/kg). 33 Käseproben mussten zusätzlich eine ^{90}Sr Kontrolle bestehen: In einem Bündner Bergkäse betrug der Wert 1.5 Bq/kg. In fast allen anderen konnte ^{90}Sr zwar nachgewiesen werden, die Konzentration lag aber unter einem Bq/kg (Mittelwert: 0.5 Bq/kg ^{90}Sr).

Ebenfalls nicht kontaminiert (<1 Bq/kg ^{137}Cs) waren 34 Gemüseproben aus der Schweiz – gemessen vom KL-BE und vom IRA in Lausanne.

In 16 Proben von Wildfleisch mit Produktionsland Schweiz konnte das KL-BE nur Spuren von ^{137}Cs feststellen (Maximum 6 Bq/kg).

Des Weiteren führte das KL-BS eine Messkampagne mit 20 Wasserproben aus öffentlich zugänglichen Brunnen durch. ^{137}Cs konnten erwartungsgemäss nicht nachgewiesen werden. Die Aktivitätskonzentrationen von ^{210}Pb, ^{210}Po und ^{224}Ra lagen in allen Wasserproben unterhalb der Nachweisgrenzen. In drei Wasserproben konnten Spuren von ^{226}Ra nachgewiesen werden. Der Höchstwert lag bei 20 ± 3 mBq/l in einem Brunnen aus Riehen. Die Gesamtdosis überschritt in keiner Wasserprobe den Richtwert von 0.1 mSv/Jahr.

Proben aus Japan und andere 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 221 importierte Lebensmittel geprüft.

Für Proben aus Japan, besteht in der Schweiz- gleich wie in der Europäische Union- seit dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi ein Programm zur Kontrolle beim Import. Nachdem in den letzten Jahren nur noch vereinzelt Spuren von ^{137}Cs nachgewiesen werden konnten, wurden im Berichtsjahr nur 4 Stichproben (Algen und Seegrasproben) auf Radioaktivität untersucht ohne künstliche Radionuklide festzustellen. Untersuchungen des KL-BS von Fischerzeugnissen aus dem Pazifik ergaben keine zu beanstandenden Befunde betreffend Radioaktivität.

Von den Lebensmittelimporten aus anderen Ländern wurden 217 Proben gammaspektrometrisch untersucht. In 13% dieser Proben konnten ^{137}Cs Konzentrationen von mehr als 10 Bq/kg (Frischgewicht) erkannt werden. Von 70 importierten Pilzproben (gemessen von KL-ZH, KL-TI, KL-GR und KL-BS) lieferte ein Maronenröhrling unbekannter Herkunft den höchsten Messwert für ^{137}Cs (235 Bq/kg); der Mittelwert aller Pilzproben betrug 21 Bq/kg. In fünf dieser Proben könnte KL-BS maximal 0.5 Bq/kg ^{90}Sr nachweisen.

In der Hälfte von 10 Teeproben aus der Türkei konnte das KL-BS ^{90}Sr nachweisen: 6 - 22 Bq/kg getrockneter Tee. Bei Tee ist ein Zubereitungsfaktor von 50 zu berücksichtigen. Damit sind die Konzentrationen im fertigen Getränk alle unterhalb von 0.5 Bq/l. In 4 der 10 Proben konnte ^{210}Po mit einer maximalen Konzentration von 49 ± 6 Bq/kg getrockneter Tee festgestellt werden. Auch hier ist der Faktor 50 zu berücksichtigen.

Sechzehn Proben importiertes Fleisch (Wild; KL-BE/KL-GR) enthielten meist messbares ^{137}Cs; Werte von über 10 Bq/kg waren aber drei Wildschweinproben vorbehalten mit einem Maximum von 240 Bq/kg bei einem Exemplar aus Deutschland.

Bei rund 90 weiteren Proben (Gemüse, Nüsse, Fisch, Kaffee, Früchte und mehr) zeigte ^{137}Cs keine Werte über 10 Bq/kg an; Ausnahme: 4 Heidelbeerproben mit 15 - 183 Bq/kg. In 10 dieser Proben analysiert KL-BS auch ^{90}Sr, was einen einzigen Wert über 1 Bq/kg aufdeckte (1.7 Bq/kg in einem Heidelbeererfrischungsgetränk).

Grenzwertüberschreitungen sind bei den importierten Lebensmitteln im Berichtsjahr 2022 nicht aufgetreten.

Bewertung und Interpretation

Der Der Grenzwert für ^{137}Cs der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg) wurde 2022 von 24 Wildschweinproben (Maximum 1`368 Bq/kg) aus der Schweiz überschritten. Bezogen auf die Gesamtzahl untersuchter Proben machen diese Grenzwertüberschreitungen mit 2% 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.

Einheimische Pilze wurden 2022 in 203 Proben untersucht. Der Grenzwert wurde nicht überschritten. Das Maximum erreichte 173 Bq/kg (Frischgewicht). Wie erwartet wurden auch in importierten Pilzproben etwas erhöhte ^{137}Cs Werte gemessen (Maximum 235 Bq/kg Frischgewicht).

Ebenfalls erwartet war die leicht erhöhte Konzentration von ^{137}Cs in einer Milchprobe aus dem Tessin (16 Bq/l).

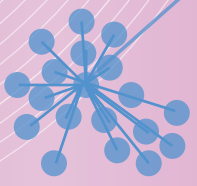
Bei allen anderen Lebensmitteln aus der Schweiz und bei den Importierten sind die Konzentrationen von künstlichen Radionukliden sehr tief und der Grenzwert für ^{137}Cs war eingehalten.

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 bei durchschnittlich rund 0.35 mSv. Davon stammen rund 0.2 mSv von ^{40}K, der Rest von Uran, Radium und Thorium und deren Folgeprodukten, insbesondere ^{210}Pb und ^{210}Po. Die beiden letztgenannten natürlichen Isotope könnten bei Personen mit überdurchschnittlichem Konsum von speziellen Lebensmitteln (vor allem Meeresfrüchte) zu einer zusätzlichen Dosis in der Grössenordnung von 0.1 mSv/a führen.

Radioactivité dans le corps humain

6

Radioaktivität im Menschen



- Vertèbres
- Dents de lait

- Wirbelknochen
- Milchzähne

2022

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

R. Cusnir, P.-A. Pittet, P. Froidevaux, C. Pilloud, A. Bonnin, M. Straub
Institut de radiophysique, CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

Résumé

La mesure de la radioactivité dans les vertèbres humaines et les dents de lait permet l'évaluation de l'atteinte à l'homme ainsi qu'une évaluation de la contamination de la chaine alimentaire. La collecte des vertèbres dans les instituts de pathologie a été poursuivie en 2022 et nous a permis d'analyser le ^{90}Sr dans six échantillons de vertèbres prélevés courant 2022 dans le canton de Vaud, ainsi que dans six échantillons prélevés dans le canton du Tessin. Le ^{210}Po a été mesuré dans six échantillons et le ^{226}Ra dans quatre échantillons en provenance du Tessin selon le plan de mesures de l'OFSP. La tendance à la diminution du nombre de dents de lait récoltées année après année ayant persisté en 2022, seulement deux échantillons du canton de Vaud ont pu être analysés.

Les activités en ^{90}Sr dans les vertèbres et les dents de lait mesurées dans ce travail sont très basses, en constante diminution par rapport aux années précédentes et ne dépassent pas 13 mBq g^{-1} Ca dans ces deux types d'échantillons. Les activités en ^{210}Po sont situées entre 9.0 et 28.2 mBq g^{-1} Ca. Les activités en ^{226}Ra sont situées entre 0.8 et 3.5 mBq g^{-1} Ca et sont proches des valeurs obtenues les années précédentes (moyenne à 1.8 mBq g^{-1} Ca).

Introduction

Le ^{90}Sr est un radionucléide produit lors de la fission de l'uranium et il est ainsi un indicateur de la fission nucléaire. La mesure du ^{90}Sr dans différents compartiments de l'environnement, de la chaine alimentaire et chez l'homme permet d'estimer le transfert de ce radionucléide issu d'événements radiologiques (explosions d'armes nucléaires ou accidents radiologiques) ainsi que d'estimer sa contribution à la dose de rayonnement reçue par la population suisse. L'IRA, sur mandat de l'OFSP, mesure depuis les années soixante le ^{90}Sr dans les vertèbres humaines prélevées lors d'autopsies. Ces mesures permettent l'évaluation de la contamination de la chaine alimentaire par ce radioélément car, par sa nature chimique similaire au calcium, il se transfère rapidement du sol à l'herbe, de l'herbe au lait et ainsi jusqu'à l'homme, dans lequel il cible la masse osseuse. Depuis une dizaine d'années, nous mesurons également le ^{210}Po, un produit issu de la chaine de désintégration de ^{238}U, élément radioactif présent naturellement dans le sol et dans les roches. La mesure de ^{210}Po dans les vertèbres permet l'évaluation de l'incorporation de ^{210}Pb, dont le métabolisme suit celui du calcium [1]. Le couple ^{210}Pb/^{210}Po est incorporé dans l'organisme humain par inhalation des produits de filiation du gaz ^{222}Rn présent dans l'air. L'inhalation de fumées du tabac peut par ailleurs apporter une contribution supplémentaire non négligeable. Une proportion importante de ^{210}Pb/^{210}Po est également incorporée par ingestion de nourriture, spécialement les fruits de mer.

La mesure de ^{226}Ra dans les os humains est réalisée dans le but de déterminer une valeur de référence pour la population suisse. Ce travail est effectué notamment en regard des contaminations potentielles liées aux héritages radiologiques de l'industrie horlogère. Comme le ^{90}Sr, ^{226}Ra, qui

est un élément alcalino-terreux similaire au calcium, se dépose également dans la masse osseuse, suivant les chemins métaboliques du calcium. Le but de ces mesures est d'obtenir une base de données de valeurs de ^{226}Ra dans les os humains pour la population suisse non exposée professionnellement à ce radioélément.

Les activités de collecte d'échantillons de vertèbres dans les instituts de pathologie du Tessin et de Lausanne ont pu être poursuivies en 2022. Nous avons ainsi pu déterminer l'activité en ^{90}Sr, qui nécessite au moins 5 g de cendres d'os, dans six cas prélevés au Tessin et six cas prélevés dans le canton de Vaud durant l'année 2022. Nous avons également mesuré le ^{210}Po dans six échantillons du canton de Tessin, ainsi que le ^{226}Ra dans quatre échantillons.

Méthodes

Les méthodes d'analyses du ^{90}Sr et du ^{210}Po peuvent être trouvées dans les références [2] et [3]. La méthode d'analyse du ^{226}Ra est décrite en détail dans la référence [4]. Les concentrations en ^{90}Sr, ^{210}Po et ^{226}Ra déterminées dans les os sont rapportées 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 n'ont pas montré de valeurs anormales (Tableau 1), et l'activité en ^{90}Sr continue de décroitre avec une période biologique d'environ 13 ans, depuis la fin des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère

Tableau 1:
^{90}Sr, ^{210}Po et ^{226}Ra (mBq/g Ca) dans les vertèbres de personnes décédées en Suisse en 2022. Incertitudes pour u (95%).

Lieu décès	^{90}Sr (mBq/g Ca)	^{210}Po (mBq/g Ca)	^{226}Ra (mBq/g Ca)
Viganello (TI)	5.0 ± 1.4	9.0 ± 0.8	0.8 ± 0.2
Lodrino (TI)	13.0 ± 3.0	27.2 ± 2.1	3.5 ± 0.2 3.7 ± 0.2*
Balerna (TI)	3.1 ± 1.0	11.1 ± 0.9	
Locarno (TI)	4.7 ± 1.5	12.8 ± 1.1	1.0 ± 0.2
Lodrino (TI)	7.7 ± 1.9	28.2 ± 2.2	1.7 ± 0.2
Sigirino (TI)	9.7 ± 2.3	13.5 ± 1.1	
Vaud	7.1 ± 1.9		
	9.4 ± 2.3		
	6.2 ± 1.7		
	5.8 ± 1.5		
	4.3 ± 1.3		
	4.8 ± 1.3		
	6.7 ± 2.8 (n=12)	**17.0 ± 8.4 (n=6)**	

** résultat répétition de l'analyse de l'échantillon*

Tableau 2:
^{90}Sr (mBq/g Ca) dans les dents de lait d'enfants nés dans le canton de Vaud entre 2008 et 2011, mesurées en 2022. Les dents de lait sont groupées pour former un échantillon d'au moins 5g de cendre après calcination (environ 10 dents). Incertitudes à 95% (k=2).

Naissance		^{90}Sr (mBq/g Ca)
Année	Lieu	
2008- 2011 a)	Vaud	9.1 ± 2.6
2010 [b)]	Vaud	7.7 ± 2.6

[a)] Mélange de dents extraites pour plusieurs enfants.
[b)] Dents extraites pendant l'enfance d'une seule personne, née en 2010 à Lausanne

des années soixante [5, 6]. En 2022, l'activité moyenne en ^{90}Sr déterminée sur 12 échantillons de vertèbres humaines en Suisse était de 6.7 ± 2.8 mBq g^{-1} Ca. Ces faibles valeurs se traduisent par une incertitude souvent supérieure à 30% dans la mesure de ^{90}Sr. Ce résultat indique qu'il n'y a pas eu d'apport supplémentaire significatif de ce radionucléide dans l'environnement en Suisse depuis ces événements, même si l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986 a temporairement légèrement augmenté ces valeurs en Suisse [6, 7].

Depuis plusieurs années nous analysons régulièrement l'activité en ^{210}Po des vertèbres humaines. Notre base de données contient actuellement environ 90 cas, pour une moyenne à 27 mBq g^{-1} Ca et un écart-type à 21 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 préférentiellement la masse osseuse [1]. On peut donc faire l'hypothèse que le ^{210}Pb et le ^{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 réalisé sur mandat de l'OFSP visant à évaluer les doses de rayonnement dues au tabagisme.

Le programme de mesure de ^{90}Sr dans les dents de lait touche probablement à sa fin, car il nous est de plus en plus difficile d'obtenir des tailles d'échantillons suffisantes pour des analyses au niveau d'activité actuelle (< 12 mBq g^{-1} Ca). Il faut en effet au minimum 10 dents de lait (5 g de cendres) d'enfants nés la même année au même endroit (Vaud, Zürich ou Tessin) pour être en mesure de quantifier l'activité en ^{90}Sr. Nous devons souvent rassembler les échantillons d'enfants nés sur une période de 1 à 4 ans pour avoir suffisamment de matériel. Ces résultats sont affectés à l'année médiane de la période concernée. Comme pour les vertèbres, on observe une diminution régulière de la radioactivité depuis la fin des essais nucléaires en atmosphère, également avec une période biologique d'environ 10 ans [7]. Une mesure des dents de lait d'une personne née en 1973 mesurée en 2021 était très importante car nous n'avons pas eu de valeur de référence pour cette date, le programme de mesure des dents de lait ayant été arrêté pour les dates de naissance comprises entre 1970 et 1976, puis repris après l'accident de Tchernobyl. La valeur obtenue de 67.8 mBq g^{-1} Ca s'insère parfaitement dans le continuum de la courbe décroissante d'activité, comme le montre la Figure 1.

À la suite de la découverte d'un nombre important de bâtiments contaminés au ^{226}Ra suite à l'utilisation de peinture luminescente au radium dans l'industrie horlogère jusque dans les années 60, l'OFSP a initié un programme d'assainissement des bâtiments concernés (Plan d'action Radium 2015-2023). Il est alors apparu important de pouvoir déterminer une valeur moyenne de l'activité en ^{226}Ra dans les os humains de la population suisse non exposée professionellement à ce radioélément. Nous avons saisi l'opportunité du programme de mesure de radioactivité dans les vertèbres humaines pour y inclure la mesure de ^{226}Ra. Nous n'avons pas observé de différence entre l'activité en ^{226}Ra contenue dans les vertèbres (os trabéculaire) et les fémurs ou les os de la mâchoire (os cortical), ce qui montre que le ^{226}Ra est introduit dans l'organisme comme

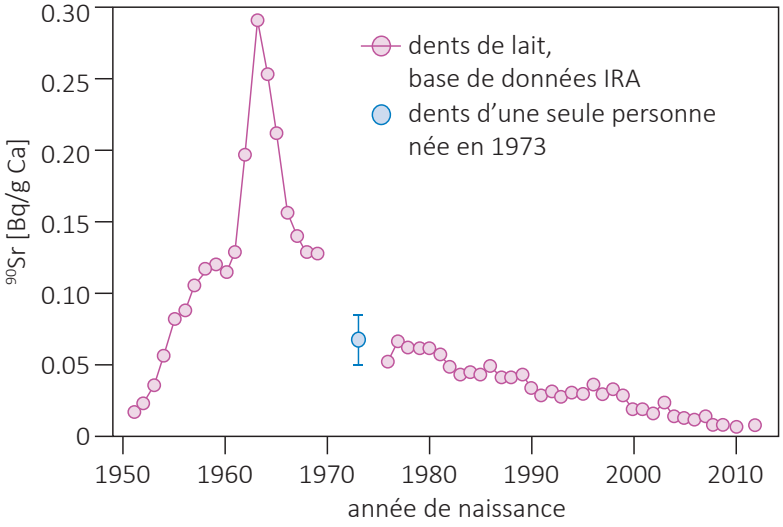


Figure 1 :
Activité en ^{90}Sr des dents de lait pour des enfants nés entre 1951 et 2012 (base de données IRA, points rouges) et pour une personne née en 1973 (cercle bleu).

élément alcalino-terreux similaire au calcium, probablement principalement par la nourriture (boisson comprise). En 2022, les activités mesurées (Tableau 1) étaient parfaitement incluses dans l'intervalle des mesures réalisées jusque-là et n'ont pas montré d'exposition au ^{226}Ra autre que par une source naturelle.

Conclusions

Les mesures de radioactivité dans les vertèbres humaines en 2022 n'ont pas montré d'exposition à des valeurs d'activité qui pourraient s'avérer problématiques en termes de dose reçue par le public en Suisse. Les activités en ^{226}Ra et ^{210}Po reflètent une exposition naturelle à ces radioéléments, principalement par ingestion. L'introduction 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 pouvant se révéler très utiles par la suite. Souvent, c'est le prélèvement d'échantillons qui s'avère le plus complexe lorsqu'il s'agit de l'humain. La disponibilité d'échantillons étant restreinte, il est important de pouvoir extraire un maximum d'informations à partir de ces échantillons.

La constitution de bases de données statistiquement représentatives de l'exposition naturelle de la population suisse à ces radioéléments doit permettre d'analyser et d'évaluer rapidement la situation en cas de situations exceptionnelles.

Remerciements

Nous remercions les médecins-dentistes ayant participé à la collecte des dents de lait et les instituts de pathologie de Locarno et de Lausanne pour la collecte des vertèbres.

Références

[1] Legett, RW. An age-specific kinetic model for lead metabolism in human. Env. Health Perspect. 1993, 101, 598-616.
[2] Schrag et al. Dating human skeletal remains using a radiometric method: Biogenic versus diagenetic ^{90}Sr and ^{210}Pb in vertebrae. Forensic Sci.Int. 2012, 220, 271–278.
[3] Froidevaux et al. Retention half times in the skeleton of plutonium and ^{90}Sr from above-ground nuclear tests: A retrospective study of the Swiss population. Chemosphere, 2010, 80, 519-524.
[4] Straub et al. Determination of ^{226}Ra at low levels in environmental, urine, and human bone samples and ^{223}Ra in bone biopsy using alpha-spectrometry and metrological traceability to ^{229}Th/^{225}Ra or ^{226}Ra. Anal. Chim. Acta, 2018,1031, 178-184.
[5] Froidevaux and Haldimann. Plutonium from Above-Ground Nuclear Tests in Milk Teeth: Investigation of Placental Transfer in Children Born between 1951 and 1995 in Switzerland. Env. Health Perspect. 2008, 116, 1731-1734.
[6] Froidevaux et al. Long-Term Effects of Exposure to Low-Levels of Radioactivity: a Retrospective Study of ^{239}Pu and ^{90}Sr from Nuclear Bomb Tests on the Swiss Population. In «Nuclear Power - Operation, Safety and Environment», book edited by Pavel Tsvetkov, ISBN 978-953-307-507-5, Published: September 6, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0. Chapter 14, Open Acces.
[7] Froidevaux et al. ^{90}Sr in deciduous teeth from 1950 to 2002: The Swiss experience. Sci. Total. Environ. 2006, 367, 596-605.

Mesures de nucléides spéciaux

7

Messung von Spezialnukliden

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

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

2022

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 2022 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 zwei bzw. drei Messungen (im Juni, August und Oktober 2022) durchgeführt wurden. Aus diesen Messungen resultierte für 2022 der $\Delta^{14}C$-Referenzwert -10 ± 3‰.

Die 83 auf ^{14}C untersuchten Standorte unterscheiden sich um -14‰ (W-72, Basel Brenntag) bis maximal +59‰ (Kernkraftwerk Leibstadt, Fullerfeld) von diesem Referenzwert. Im Raum Basel lag der Netto-Höchstwert bei 2‰ (E-14, Nonnenholz). Der Grossteil der übrigen Standorte in Basel wies Messwerte <0 ‰ auf. Selbst die Maximalwerte entsprechen einer zusätzlichen Strahlendosis für die Bevölkerung von nicht mehr als 1 µSv (1 µSv = 10^{-6} Sievert) in einem Jahr. Im Vergleich zur natürlichen Strahlenbelastung von ca. 4`500 µSv/a fallen die gemessenen geringfügigen Erhöhungen im Berichtsjahr nicht ins Gewicht.

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

Kohlenstoff-14 (^{14}C)

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

Referenzwert

Zwischen 1955 und 1966 wurden im Rahmen von Nuklearwaffentests grosse Mengen an $^{14}CO_2$ 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 geringfügig 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 2022 ein Referenzwert für Laub in ungestörter Umgebung definiert. Als Basis hierzu dienten die im Juni, August und Oktober gesammelten Blätter.

$$\Delta^{14}C_{Ref,\ 2022} = -10 \pm 3\ [‰] \quad (3)$$

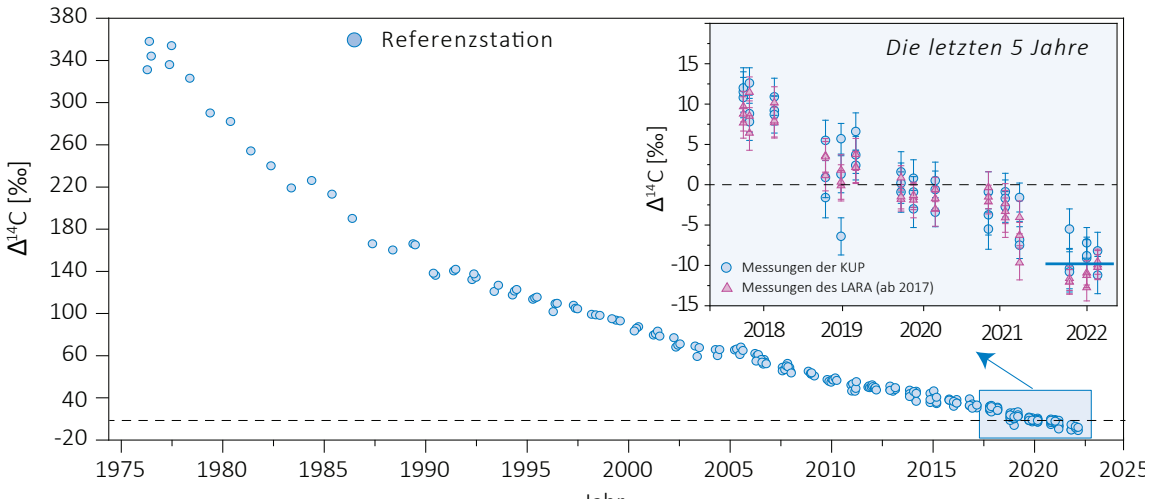
Die Differenz

$$\text{Netto } \Delta^{14}C = \Delta^{14}C_{Probe} - \Delta^{14}C_{Ref,\ 2022} \quad (4)$$

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

Tabelle 1:
Messwerte 2022 und Koordinaten der Referenzstationen für Laubmessungen

Ort	Labor	$\Delta^{14}C$ [‰]			Koordinaten	[m.ü.M.]	Baumart/Standort
		Juni	Aug.	Okt.			
Taanwald	KUP LARA	- 10 - 12	- 11 - 11	- 6 - 10	601'320 / 186'150	938	Rotbuchen im Wald
Belpberg	KUP LARA	- 9 - 12	- 9 - 11	- 7 - 10	606'096 / 190'600	825	Rotbuchen auf Krete
Ballenbühl	KUP LARA	- 11 - 12	- - 13	- 8 - 10	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: 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 2022 gegenüber dem Vorjahr erneut abgefallen. Mit -10 ± 3‰ (gerundeter Mittelwert aller in Tabelle 1 dargestellten Messergebnisse) liegt der Referenzwert um 6‰ unter dem Wert von 2021.

^{14}C im Umfeld der Schweizer Kernkraftwerke

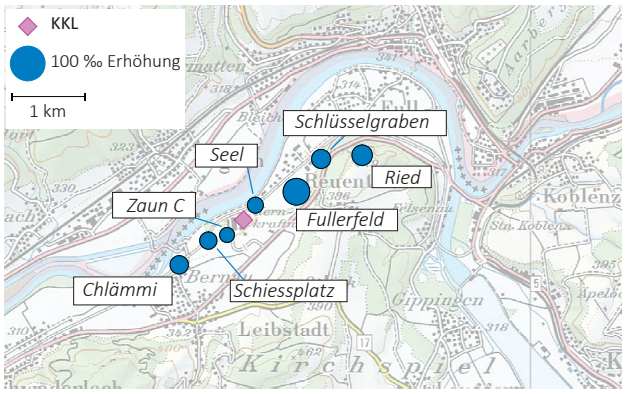
Gemäss Jahresrückblick des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI [1] wurden die Schweizer Kernkraftwerke im Jahr 2022 sicher betrieben. Insgesamt traten 30 meldepflichtige Vorkommnisse auf, was im Schwankungsbereich der Vorjahre liegt.

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.

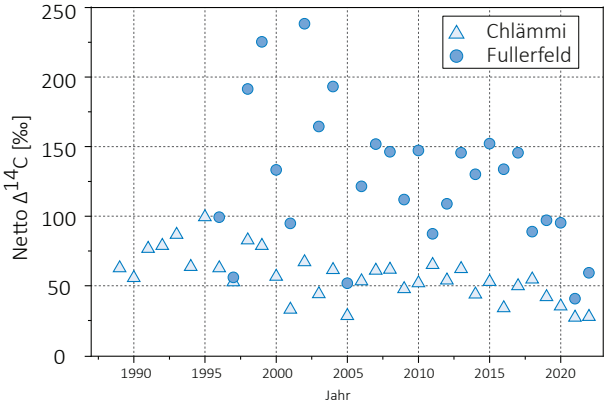
Die Laubprobenahmen im Umfeld der noch im Leistungsbetrieb befindlichen Kernkraftwerke erfolgten im Allgemeinen während oder nach der jeweiligen Jahresrevision, um auch mögliche ^{14}C-Abgaben während des Revisionsstillstands erfassen zu können. Eine Ausnahme bildet das Kernkraftwerk Leibstadt (siehe 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 2022 zwei Probenahmen durchgeführt: die erste am 8. Juni 2022 vor der Jahresrevision, die vom 13. Juni bis 11. Juli 2022 terminiert war, und eine zweite am 14. Juli 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 knapp 1 km Distanz vom KKL in nordöstlicher Richtung am Standort Fullerfeld (Figur 2). In südwestlicher Richtung wies der Standort Chlämmi die höchsten Werte auf.

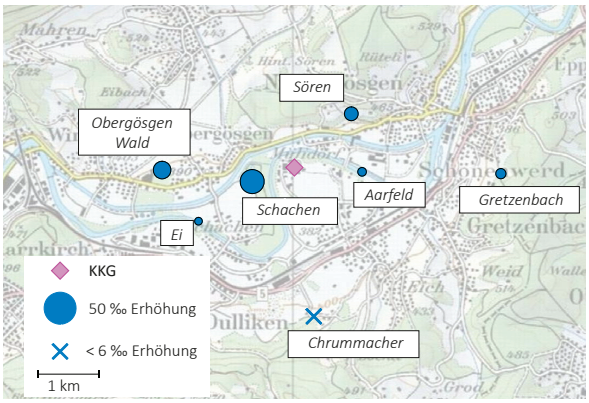


Figur 2:
Netto Δ^{14}C-Messwerte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Leibstadt (KKL) im Jahr 2022. Revisionsabschaltung: 13.06.2022 bis 11.07.2022. Probenahme: 14.07.22. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.

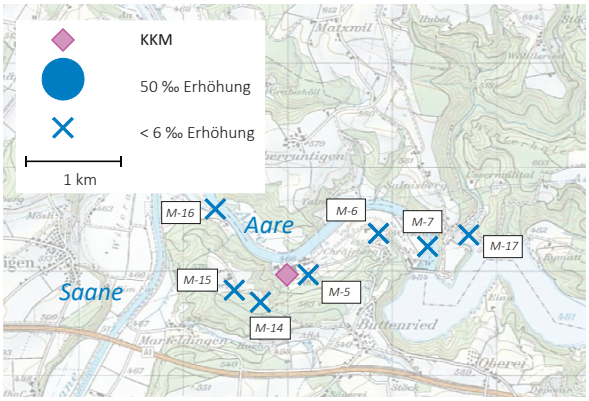


Figur 3:
Netto Δ^{14}C-Höchstwerte nordöstlich (●) und südwestlich (△) des Kernkraftwerkes Leibstadt. Der Standort Fullerfeld wird seit 1996, derjenige von Chlämmi seit 1989 beprobt (Standorte: siehe Figur 2). Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.

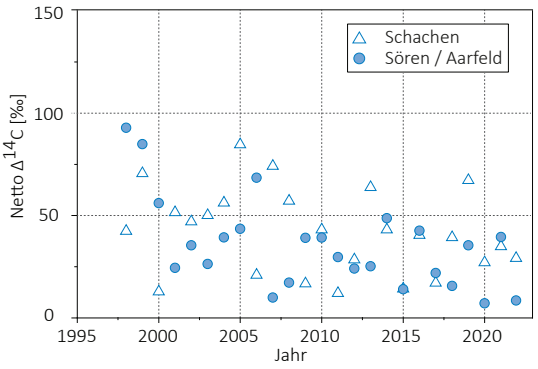
1 Die Probe wird im Stickstoffstrom pyrolysiert. Dabei können sich gewisse Kohlenstoffverbindungen verflüchtigen, die somit für die Analyse ihres ^{14}C-Gehaltes verloren sind.



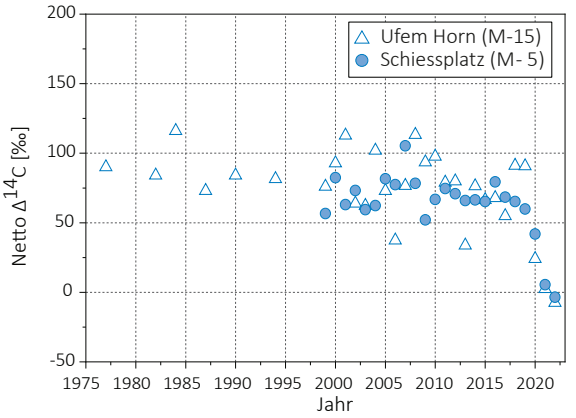
Figur 4:
Örtliche Verteilung der Netto Δ^{14}C-Werte in der Umgebung des Druckwasserreaktors Gösgen (KKG). Revisionsabschaltung: 21.05.2022 bis 27.06.2022. Probenahme: 27.06.2022. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 6:
Netto Δ^{14}C-Werte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Mühleberg (KKM) im Jahr 2022. Probenahme: 25.08.2022. An keinem Standort konnte eine Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen festgestellt werden.



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, allerdings lagen die Messergebnisse der ersten Probenahme tendenziell leicht 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. 2022 lag der höchste Messwert nordöstlich des KKL bei 59 ‰ (Standort Fullerfeld), In südwestlicher Richtung wurde 2022 am Standort Chlämmi mit 28‰ 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 27. Juni 2022 gesammelten Blattproben in der Umgebung des Kernkraftwerks Gösgen (KKG) dargestellt. Der höchste ^{14}C-Messwert westlich vom KKG resultierte mit einer Erhöhung von28‰ am Standort Schachen, in östlicher Richtung mit 9‰ 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 2022 fortgesetzt. Der ^{14}C-Gehalt aller beprobten Standorte lag im Jahr 2022 erstmals unter dem der Referenzstationen. 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.

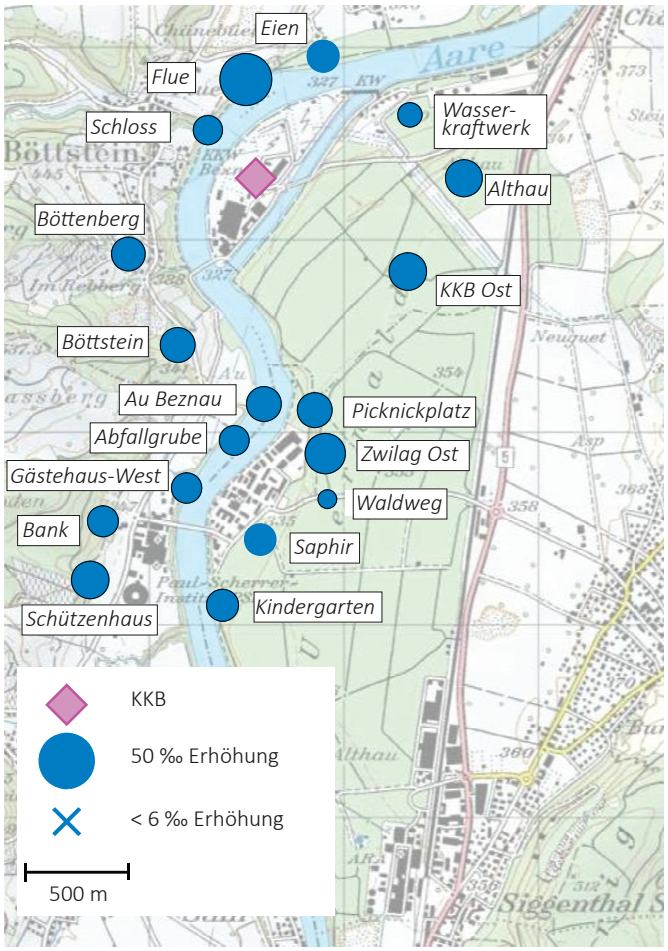
In Figur 6 sind die Ergebnisse der Probenahme dargestellt. Sämtliche Messwerte liegen im negativen Bereich, d. h. es wurden keinerlei Erhöhungen des ^{14}C-Gehalts gemessen..

In Figur 7 sind die seit Messbeginn jährlich gemessenen höchsten Netto Δ^{14}C-Werte aufgeführt. Die Messwerte aus dem Jahr 2022 liegen erstmals im leicht negativen Bereich.

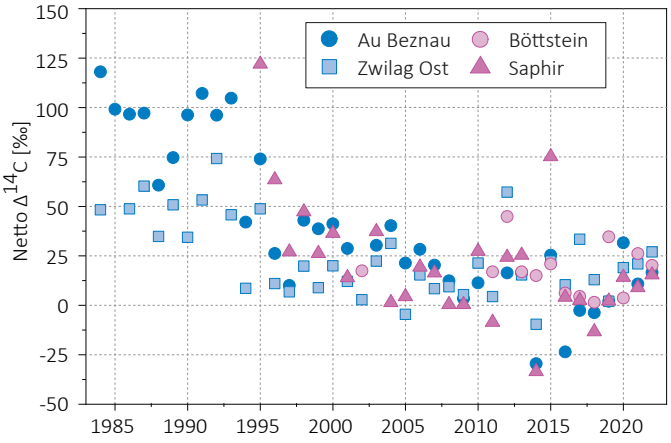
Paul Scherrer Institut, Zentrales Zwischenlager Würenlingen, Kernkraftwerk Beznau

Auch im Jahr 2022 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 2022 tendenziell etwas über den Werten des Vorjahrs: sämtliche beprobten Standorte wiesen Erhöhungen von mehr als 6‰ gegenüber den unbelasteten Referenzstandorten auf.

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 2022. Revisionsabschaltung KKB I: 29.04.2022 bis 17.06.2022, KKB II: 09.08.2022 bis 22.08.2022. Probenahme: 31.08.2022. 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). Messungen ab 2020: LARA.

Kehrichtverbrennungsanlagen

KVA Bern

In Blättern von Bäumen, die am 25. August 2022 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 ‰. 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 Treibstoffen, welche von den Bäumen aufgenommen werden (siehe «Suess»-Effekt weiter oben).

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

KVA Lausanne

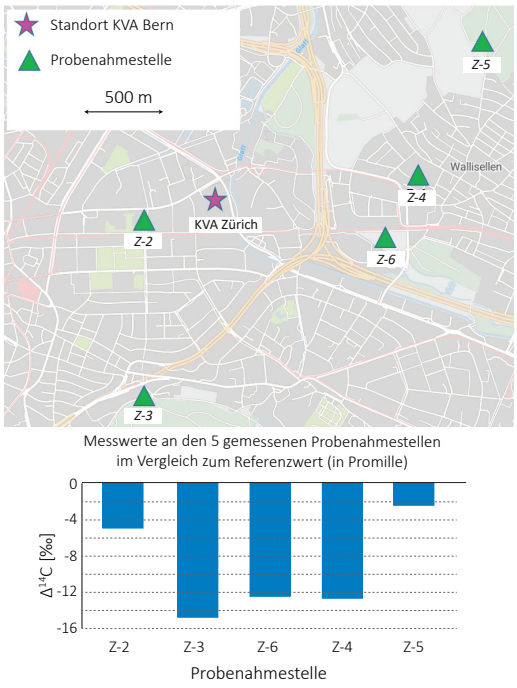
Am 18. August 2022 wurden fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Lausanne beprobt. Es wurden keine Erhöhungen der ^{14}C Konzentration festgestellt. Sämtliche Werte lagen unter dem Referenzwert.

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

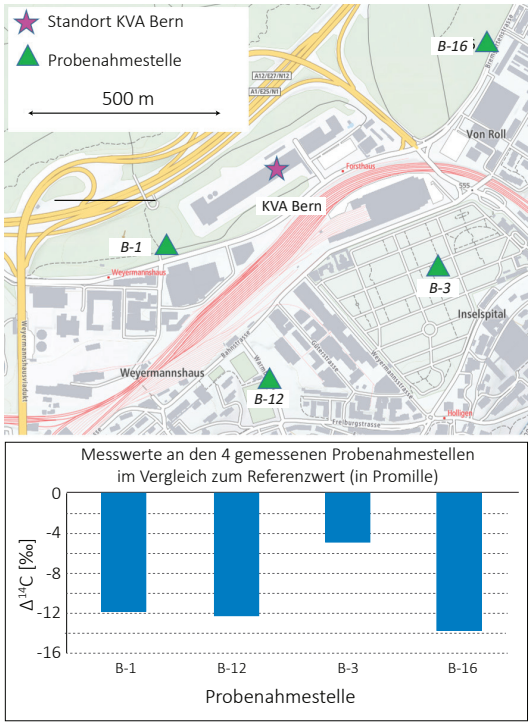
KVA Zürich Hagenholz

In Blättern von Bäumen, die am 27. Juni 2022 an fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Zürich Hagenholz gesammelt wurden, konnte keine erhöhte ^{14}C Konzentration festgestellt werden.

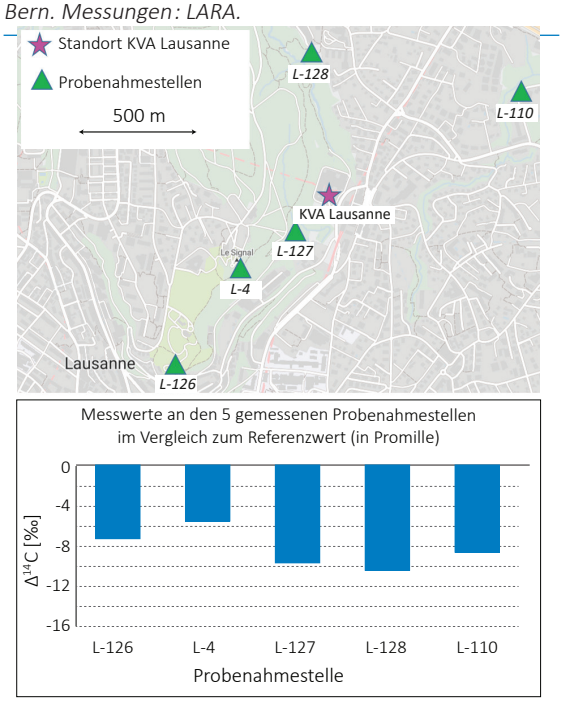
In Figur 10c sind oben die fünf Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen dargestellt



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



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

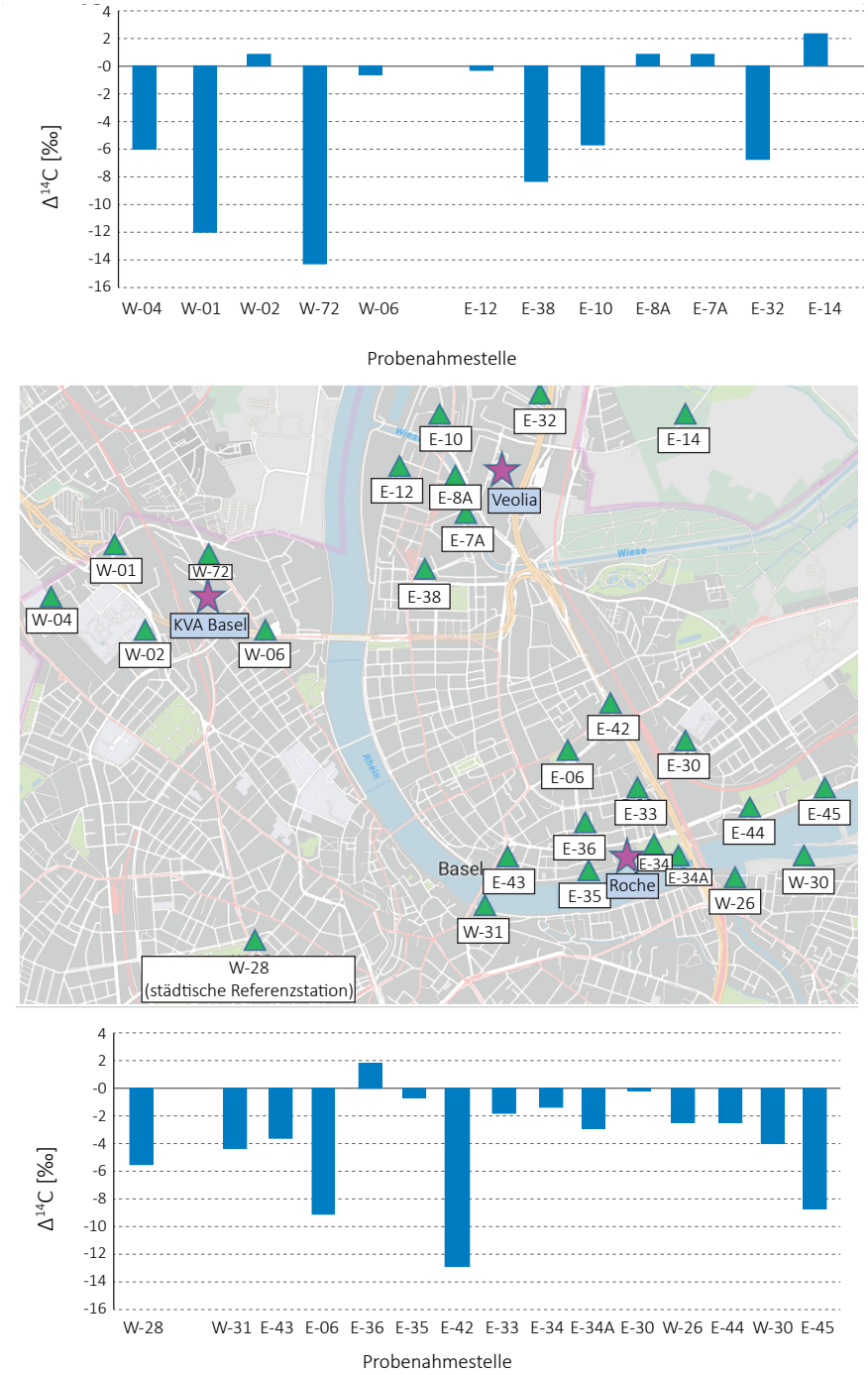


Figur 10b :
Probenahmestellen und $\Delta^{14}C$-Messwerte bei der KVA Lausanne. Messungen: KUP.

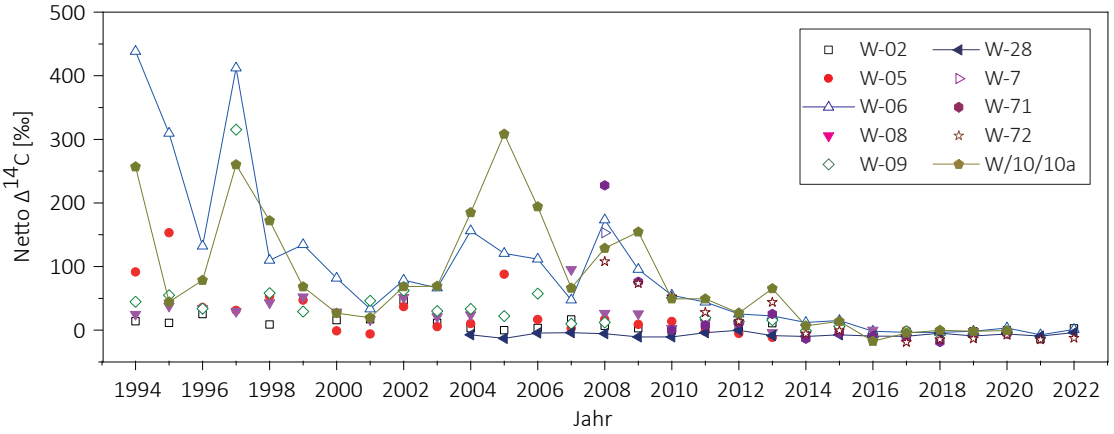
Messungen in der Region Basel-Stadt

Im Jahr 2022 wurden in Basel zwei Laubprobenahmen durchgeführt. Bei 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 Firma Veolia betriebenen regionalen Sondermüllverwertungsanlage (RSMVA) beprobt. Die zweite, etwas umfangreichere Probenahme fand am 1. September statt und umfasste zusätzlich zu den Standorten der ersten Probenahme auch Standorte um die KVA Basel im Westen der Stadt.

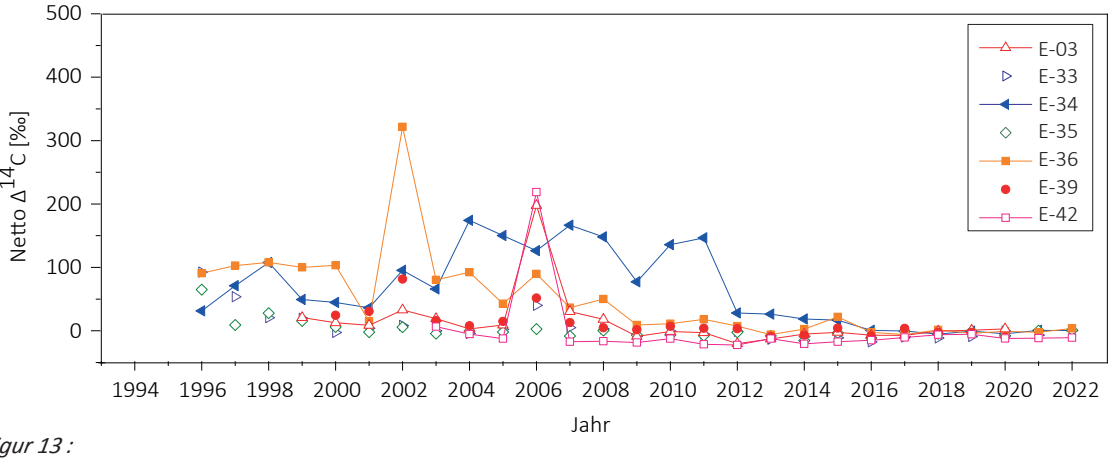
An praktisch allen Standorten wurde aufgrund des weiter oben erwähnten Suess-Effekts eine Verdünnung der $^{14}CO_2$-Konzentration relativ zu den unbelasteten Referenzstationen festgestellt, häufig um 10‰ oder mehr (Figur 11). Auch in der Nähe zur Grenze nach Frankreich nordwestlich der KVA Basel sowie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



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.

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 Absenkung gegenüber den unbelasteten ländlichen Referenzstationen. Liegen von einem Standort mehrere Messwerte vor, so ist in Figur 11 der jeweils höhere Wert dargestellt.

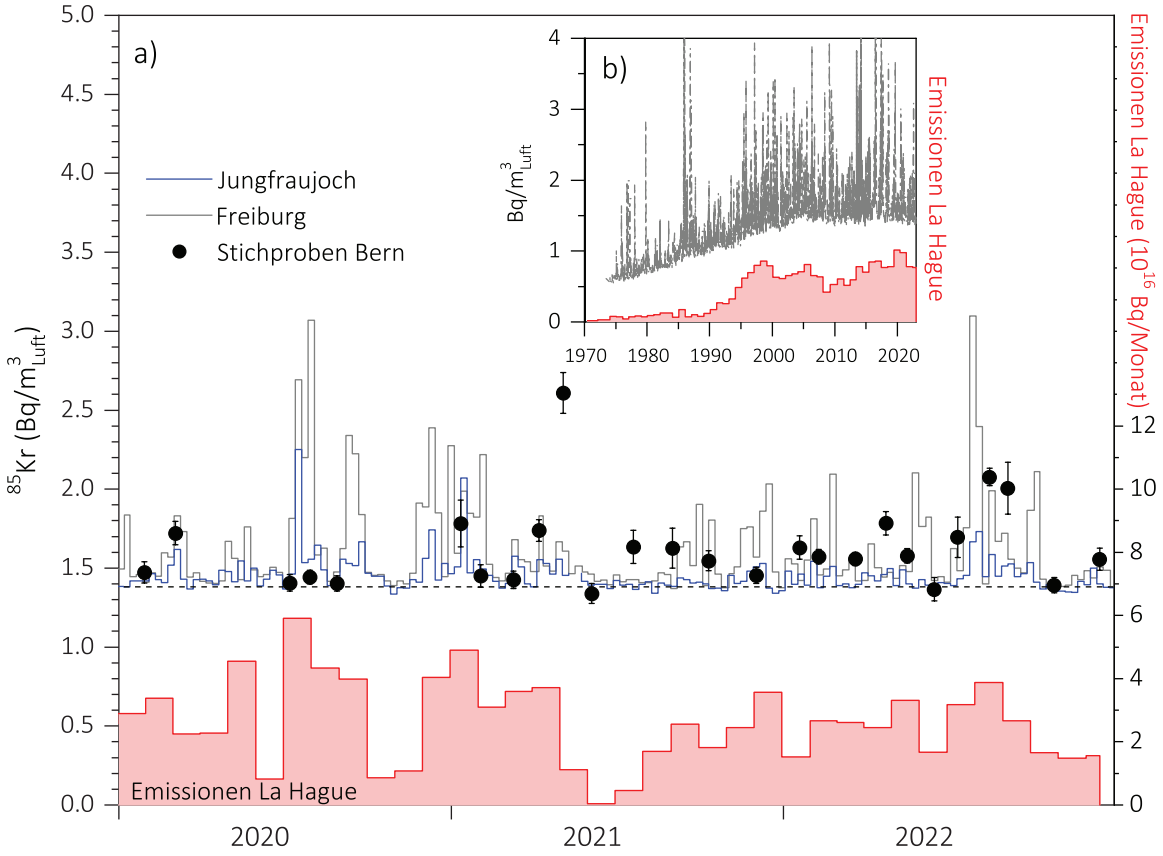
Die Figuren 12 und 13 zeigen die Messergebnisse seit Messbeginn an ausgewählten Standorten. Die Netto-Messwerte haben sich in den letzten Jahren auf einem sehr niedrigen Niveau stabilisiert.

Der Rückgang der ^{14}C-Werte gegenüber früheren Jahren ist darauf zurückzuführen, dass die Firma Novartis das benötigte ^{14}C zunehmend von externen Zulieferern bezieht. Im Falle der F. Hoffmann-La Roche AG ist der Rückgang mit durchschnittlich deutlich geringeren Anfangsaktivitäten bei den Synthesen zu erklären. Westlich des Rheins wurden die historischen Netto-Höchstwerte (beispielsweise Standort W-10A auf dem Areal der Firma Novartis) bereits seit einigen Jahren nicht mehr erreicht, sodass diese Standorte seit 2021 nicht mehr beprobt werden.

Auch die Standorte östlich des Rheins im Umfeld der Firma F. Hoffmann-La Roche AG sind weit von ihren Netto-Höchstwerten entfernt: der im Jahr 2002 gemessene Höchstwert von 320‰ am Standort E-36 wurde in den letzten Jahren deutlich unterschritten.

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 vergleichsweisen langen Halbwertszeit von 10.74 Jahren und die 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.



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).

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$^3_{Luft}$. Im Gegensatz dazu stammt das derzeitige ^{85}Kr in der Atmosphäre hauptsächlich aus der Wiederaufarbeitung von Brennstäben und wird lokal und zeitlich gepulst freigesetzt. Zurzeit ist die Aufbereitungsanlage in La Hague (F) die weltweit grösste Emissionsquelle (Figur 14a). Durch radioaktiven Zerfall nimmt das atmosphärische Inventar jährlich um 6.2% ab. Diese Reduktionsrate wurde lange Zeit von den globalen Freisetzungsraten von ^{85}Kr übertroffen, was zu einem Anstieg der atmosphärischen Basisaktivitätskonzentration führte (Figur 14b). In der letzten Dekade ist eine Stabilisierung bei einer Aktivitätskonzentration von 1.4 - 1.5 Bq/m$^3_{Luft}$ 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 Jahr 2022 erscheinen die Wiederaufbereitungsaktivitäten und Emissionen aus La Hague über das Jahr weniger variabel als in vorangehenden Jahren, die jährlichen

Gesamtemissionen sind jedoch vergleichbar, was zu einem stabilen Basiswert führt. Die höchsten Emissionen wurden im Sommer 2022 gemeldet, was sich auch in der deutlichen Spitze in Freiburg i.Br. manifestiert. Auf dem JFJ werden im gleichen Zeitraum nur marginal erhöhte Werte beobachtet. Diese Dämpfung der Emissionsspitzen am JFJ im Vergleich zu Freiburg erscheint ausgeprägter als in den Vorjahren, was möglicherweise auf eine stabilere planetare Grenzschicht während dieser Zeit zurückgeführt werden kann. Die durch den Krypton-85 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.

Der Anstieg der Emissionen Ende 2021 ist in Freiburg i.Br. viel deutlicher zu erkennen als in JFJ, wo die Spitzenwerte deutlich gedämpft sind. Dies steht im Gegensatz zu der Situation beispielsweise im Spätsommer 2020, als beide Stationen ein ähnliches Muster aufwiesen. Unsere Beobachtung spiegelt die stabilere planetarische Grenzschicht im Winter wider, die den Schadstofftransport in höhere Lagen verhindert. Für die Zukunft und im Hinblick auf ein sich änderndes Klima bietet der Vergleich der ^{85}Kr-Aktivitätskonzentrationen an beiden Stationen daher ein gewisses Potenzial zur Untersuchung von Veränderungen der Stabilität der atmosphärischen Luftsäule in den Schweizer Alpen.

Stichproben von Berner Luft, die über nur wenige Minuten gesammelt wurden, wurden zusätzlich am Physikalischen Institut der Universität Bern gemessen. Die Resultate bestätigen meist den Aktivitätsbereich und die zeitliche Abfolge, die in Freiburg oder auf dem Jungfraujoch beobachtet wurden. Auffallend ist der erhöhte Wert in Bern am 4. Mai 2021, der in dieser Magnitude in den Wochenproben von Freiburg oder dem JFJ nicht sichtbar ist. Zu dieser Zeit herrschten relativ tiefe Temperaturen und eine vorherrschende Windrichtung aus Westen. Es ist davon auszugehen, dass dadurch ^{85}Kr reiche Luftmassen von La Hague direkt nach Bern gelangten und nachgewiesen wurden. Möglicherweise wurde diese erhöhte Aktivität in den Wochenproben mit ^{85}Kr ärmeren Luftmassen verdünnt, was zu niedrigeren Aktivitätskonzentrationen in den Wochenproben führt. Andere, lokale Quellen wie beispielsweise ein AKW können allerdings nicht ganz ausgeschlossen werden. 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 gering in Relation zur Strahlenbelastung von etwa 1.1 mSv verursacht durch natürlich vorkommende Radonfolgeprodukte.

Argon-37 (^{37}Ar)

^{37}Ar wird in der Atmosphäre durch die Spallationsreaktion ^{40}Ar(n,4n)^{37}Ar produziert. Theoretische Abschätzungen der durch kosmische Strahlung erzeugten troposphärischen Gleichgewichtsaktivität liegen bei ca. 0.5 - 2 mBq/m^3_{Luft}, in guter Übereinstimmung mit den über die letzten 7 Jahre am häufigsten gemessen Werten. Die ^{37}Ar-Aktivitätskonzentration in der Atmosphäre ist damit 1`000 Mal kleiner als die von ^{85}Kr und ist deshalb für die jährliche Strahlenbelastung nicht relevant.

Referenzen

[1] https://www.ensi.ch/de/2022/01/18/bilanz-2021-sicherer-betrieb-der-schweizer-kernanlagen/, besucht am 15. März 2023

[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, A. Bonnin, M. Straub
Institut de radiophysique, CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

Résumé

Nous avons mesuré le plutonium (Pu) et l'américium (Am) dans des échantillons de sol, de sédiments, de filtres à air, de poissons, de plantes aquatiques, d'eau de surface et d'eau souterraine. 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 mesures des plantes aquatiques prélevées dans les rivières en aval des centrales nucléaires montrent que l'activité présente dans les plantes est probablement liée au dépôt sur les feuilles de particules de sédiments contenant Pu et Am. Les poissons n'ont pas présenté d'activité en Pu et Am mesurable au-dessus de la limite de détection de la méthode, à l'exception de ^{241}Am dans un prélèvement dans le Rhin à Dogern (0.9 ± 0.3 mBq/kg ms). L'activité en Pu des eaux de rivières prélevées en aval des centrales nucléaires ne dépasse pas 2.0 mBq/m^3, et est donc similaire aux valeurs mesurées les années précédentes. L'analyse détaillée des données en Pu et Am disponibles pour les filtres à air entre 2014 et 2022 montre que l'activité de l'air (en nBq/m^3) est proportionnelle à la masse de particules de sol présentes sur les filtres (en μg/m^3), dans un rapport isotopique ^{241}Am/$^{239+240}$Pu similaire à celui des sols, ce qui confirme que l'activité dans l'air provient uniquement de la resuspension de particules de sol, et qu'il n'y a pas eu de contamination aérienne supplémentaire durant cette période. En transformant l'activité des filtres à air de mBq/μg cendre en Bq/kg de masse sèche, on constate que l'activité moyenne en Pu (0.176 ± 0.060 Bq/kg) est très proche de celle des sols mesurés en plaine en Suisse en 2022 (0.167 ± 0.060 Bq/kg), ce qui confirme l'origine de la contamination comme provenant de resuspension de particules à partir des sols.

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 (^{4}He^{2+}). 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 suite à des 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). On possède ainsi un bon indicateur de contamination potentielle de l'environnement par l'industrie nucléaire.

Récemment, nous avons étendu la technique d'analyse d'ions métalliques (principalement métaux lourds) dans les eaux et les sédiments par diffusion dans des films (DGT) aux actinides (Pu, U et Am). Le but était d'obtenir

une technique permettant l'analyse de ces radioéléments dans l'eau par une méthode d'intégration dans le temps, ce qui évite, lors d'une surveillance de routine par pointage, de ne pas mesurer des pics de rejets. De plus, la technique DGT permet l'intégration et la mesure de la partie biodisponible des radioéléments, ce qui autorise une analyse plus complète de la mobilité et du transfert des radioéléments du sédiment ou de la phase aqueuse vers les organismes plus complexes (plantes aquatiques et biota, animaux supérieurs, etc.) [1, 2, 3]. On espère pouvoir intégrer cette technique dans un futur proche.

Le plutonium possède une chimie d'oxydoréduction complexe et existe sous des formes physico-chimiques variées dans l'environnement. En conséquence, déterminer son comportement géochimique (dont sa mobilité) et sa biodisponibilité représente un véritable défi. L'américium, existant uniquement sous forme de cation Am^{3+}, se comporte plutôt comme un cation Ln^{3+} et est fortement hydrolysé aux valeurs environnementales de pH (6-8). L'IRA, sur mandat de l'OFSP, mesure depuis plus de vingt ans ces deux radioéléments dans différents compartiments de l'environnement à proximité des centrales nucléaires suisses et dans certains sites de référence. L'image principale que l'on peut tirer de ces mesures est que la présence de Pu et Am dans ces échantillons est essentiellement due aux retombées des essais nucléaires atmosphériques des années soixante avec, parfois, la présence d'ultratraces de Pu et d'Am (parfois aussi ^{244}Cm) dont l'origine peut être attribuée aux rejets des centrales nucléaires ou à des événements particuliers, comme l'éruption du volcan Eyjafjallajökull en 2010, qui a entrainé du Pu encore présent dans la stratosphère, dû aux essais nucléaires, jusque dans les couches basses de l'atmosphère [4]. L'intégration des dépôts de Pu et Am dans le sol, dont l'origine sont les essais nucléaires, donne des rapports isotopiques de $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ de 0.030 ± 0.004 (n=21) et $^{241}Am/^{239+240}Pu$ de 0.42 ± 0.05 (n=21) pour l'année 2022 (voir ci-dessous). On verra au cours de ce travail que ces indicateurs de contamination sont parfaitement respectés pour les sols, avec quelques variations liées aux larges incertitudes et au fractionnement des éléments pour certains types d'échantillons (eaux, poissons, etc.).

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 souterraine et l'eau de rivière ainsi que les plantes aquatiques et 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. La compréhension des mécanismes de mobilité et de biodisponibilité du Pu et de l'Am est donc un prérequis indispensable à l'interprétation de ces données. Nous avons focalisé l'analyse des résultats 2022 sur les filtres à air, car l'air est le premier compartiment touché lors de rupture de confinement. Nous avons analysé les données obtenues depuis 2014 et l'introduction de collecteurs de grands volumes dans la surveillance de l'air en Suisse, pour obtenir une image plus précise de la contamination par Pu et Am de ces échantillons.

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 [5].

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 des mesures 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 2022, ces rapports sont de 0.030 ± 0.004 (n=21) pour $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ et de 0.42 ± 0.05 (n=21) pour $^{241}Am/^{239+240}Pu$. 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.

Nous avons répété certaines analyses afin d'évaluer la reproductibilité de la méthode d'analyse suite aux modifications apportées. Les résultats montrent que les valeurs indiquées pour $^{239+240}Pu$ sont très reproductibles entre les aliquotes de mesures de 50 g chacun. Tous les résultats se recoupent en tenant

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 2022 (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	0.205 ± 0.037 0.206 ± 0.015	0.0061 ± 0.0021	0.089 ± 0.012	0.432 ± 0.096	0.030 ± 0.010
Beznau	0.155 ± 0.014 0.141 ± 0.014 0.127 ± 0.016 0.137 ± 0.020	0.0051 ± 0.0022 0.0043 ± 0.0020	0.065 ± 0.006 0.064 ± 0.008 0.060 ± 0.007	0.422 ± 0.055 0.500 ± 0.090 0.432 ± 0.080	0.033 ± 0.014 0.030 ± 0.015
Cadenazzo	0.153 ± 0.018 0.147 ± 0.029 0.150 ± 0.015	0.0045 ± 0.0025	0.063 ± 0.007	0.413 ± 0.070	0.030 ± 0.014
Coglio	0.928 ± 0.127 0.874 ± 0.053	0.029 ± 0.010 0.029 ± 0.005	0.304 ± 0.016	0.328 ± 0.048	0.031 ± 0.012 0.034 ± 0.006
Däniken	0.202 ± 0.021 0.234 ± 0.035 0.216 ± 0.018 0.208 ± 0.014	0.0070 ± 0.0010 0.0055 ± 0.0023 0.0050 ± 0.0019	0.103 ± 0.009 0.104 ± 0.008	0.439 ± 0.076 0.483 ± 0.052	0.034 ± 0.005 0.025 ± 0.011 0.024 ± 0.009
Güttingen	0.125 ± 0.019 0.134 ± 0.013	0.0039 ± 0.0018	0.054 ± 0.006	0.428 ± 0.084	0.029 ± 0.014
Leibstadt	0.168 ± 0.020 0.179 ± 0.031 0.172 ± 0.017 0.168 ± 0.012	0.0067 ± 0.0031 0.0048 ± 0.0023 0.0046 ± 0.0017	0.074 ± 0.007 0.074 ± 0.007 0.067± 0.006	0.439 ± 0.064 0.416 ± 0.081 0.400± 0.047	0.0040 ± 0.019 0.028 ± 0.013 0.027 ± 0.010
Meyrin	0.128 ± 0.013	0.0042 ± 0.0022	0.045 ± 0.004	0.355 ± 0.049	0.032 ± 0.018
Mühleberg	0.155 ± 0.025 0.172 ± 0.025 0.173 ± 0.018 0.177 ± 0.019	0.0056 ± 0.0026	0.070 ± 0.007	0.393 ± 0.058	0.031 ± 0.015
Posieux	0.205 ± 0.039 0.186 ± 0.014	0.0047 ± 0.0018	0.074 ± 0.009	0.362 ± 0.082	0.025 ± 0.010
Stabio	0.634 ± 0.042 0.638 ± 0.043	0.0200 ± 0.0040 0.0220 ± 0.0050	0.268± 0.015	0.423 ± 0.037	0.032 ± 0.007 0.035 ± 0.008
Villigen-PSI	0.134 ± 0.021 0.135 ± 0.019 0.147 ± 0.015 0.154 ± 0.014	0.0047 ± 0.0021 0.0033 ± 0.0014	0.054 ± 0.006 0.060 ± 0.006	0.408 ± 0.077 0.4270 ± 0.054	0.032 ± 0.015 0.022 ± 0.011
Würenlingen	0.184 ± 0.027 0.163 ± 0.022 0.144 ± 0.015 0.154 ± 0.014	0.0043 ± 0.0020	0.068 ± 0.006 0.064 ± 0.006 0.071 ± 0.006	0.370 ± 0.062 0.390 ± 0.065 0.466 ± 0.059	0.028 ± 0.013
			moyenne	**0.42 ± 0.05 (n=21)**	**0.030 ± 0.004 (n=21)**

compte des incertitudes de mesures (k=2), ce qui tend aussi à démontrer que la méthode de préparation des échantillons, puis l'échantillonnage jusqu'à l'envoi à notre laboratoire permet le prélèvement d'aliquotes représentatifs. On constate également que l'activité en ^{238}Pu est très difficile à quantifier lorsque l'activité en $^{239+240}$Pu est proche ou inférieure à 100 mBq/kg, ce qui correspond à une activité en ^{238}Pu de seulement 2.8 mBq/kg de sol sec. De plus, il est nécessaire que tout le processus de séparation chimique, qui est complexe et comporte au moins 6 étapes sensibles, se déroule avec un rendement total supérieur à 65% pour être en mesure de quantifier ^{238}Pu pour des activités en $^{239+240}$Pu d'environ 200 mBq/kg sol sec. Néanmoins, nous avons pu déterminer ^{238}Pu au-dessus de la limite de détection pour 21 échantillons de sol et le rapport moyen est très proche de ce qui est attendu pour une contamination provenant uniquement des essais nucléaires des années soixante. Malgré une forte incertitude, ce rapport reste donc un excellent indicateur et nous maintiendrons la mesure de ^{238}Pu dans les sols comme objectif, nonobstant la difficulté de la mesure. Cette année, le nouveau site de prélèvement de Coglio, au Tessin, a présenté l'activité la plus élevée (0.928 Bq/kg m.s.).

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

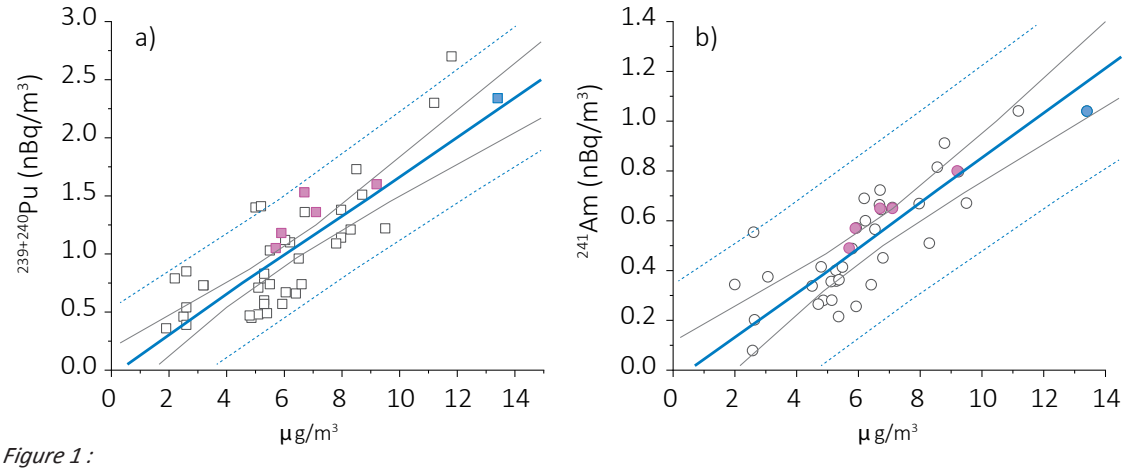


Figure 1 :
Activités (nBq/m³) en $^{239+240}$Pu (a) et en ^{241}Am (b) des filtres à air collectés en Suisse depuis 2014 en fonction de la masse de particules récoltées par les filtres (µg/m³). En rouge, les valeurs 2022 ; en bleu, la mesure de filtres à air suite à l'épisode de tempête de sable du Sahara de février 2021.

par le vent. Les résultats pour quatre stations de prélèvement à haut volume sont présentés dans le Tableau 2.

Les résultats montrent que l'activité maximale mesurée ne dépasse pas 1.6 nBq/m³, un résultat similaire aux années précédentes. La figure 1 présente les résultats d'activité en Pu et Am non plus en fonction du volume d'air prélevé, mais 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 ressuspendues par abrasion éolienne. On constate que tant pour le Pu que pour l'Am, les activités sont corrélées à la masse de particules.

Si l'on procède de la même manière mais en identifiant les sites par des couleurs différentes (Figure 2) on observe quelques caractéristiques très intéressantes; notamment, les résultats pour chacun des sites forment des «clusters» en fonction de la masse des particules et des activités associées. Ainsi, le site de Posieux (points rouges) représente clairement un site pour lequel la masse de particules collectées est systématiquement supérieure aux autres sites. En corollaire, les activités mesurées y sont systématiquement plus élevées. Par contraste, les sites de KKM et KKL présentent les masses de particules récoltées les plus basses, et donc les activités mesurées les plus basses également.

Le site de Liebefeld présente une caractéristique intéressante; pour ce site, on sépare les prélèvements de l'année en deux semestres qui sont ensuite analysés de manière indépendante. On constate que le prélèvement du semestre I a systématiquement moins de particules et moins d'activité que le semestre II. Ceci est probablement dû au fait que le semestre I correspond au prélèvement entre octobre et mars de l'année suivante, soit des périodes ou les sols sont plus humides et moins susceptibles d'être remis en suspension.

Enfin, lorsque l'on présente les activités en ^{241}Am en fonction de celles de $^{239+240}$Pu (Figure 3), on constate que les activités de ces deux radioéléments sont

Tableau 2:
Activités (nBq/m³) en plutonium et américium dans les filtres à air collectés sur différents sites en Suisse en 2022. Incertitudes à 95 %.

Lieu	Volume m³	$^{239+240}$Pu nBq/m³	^{238}Pu nBq/m³	^{241}Am nBq/m³	^{241}Am/ $^{239+240}$Pu	^{238}Pu / $^{239+240}$Pu
Klingnau	5'681'638	1.18 ± 0.10	0.044 ± 0.017	0.57 ± 0.05	0.48 ± 0.06	0.038 ± 0.015
Posieux	4'752'775	1.60 ± 0.13	0.058 ± 0.019	0.80 ± 0.06	0.50 ± 0.06	0.036 ± 0.012
Liebefeld, semestre 1	3'853'996	1.05 ± 0.10	0.039 ± 0.018	0.49 ± 0.05	0.46 ± 0.06	0.037 ± 0.017
Liebefeld, semestre 2	3'853'996	1.54 ± 0.14	0.047 ± 0.022	0.65 ± 0.06	0.42 ± 0.06	0.031 ± 0.014
Meyrin	4'734'681	1.36 ± 0.12	0.040 ± 0.018	0.65 ± 0.06	0.48 ± 0.06	0.029 ± 0.013
Moyenne					**R= 0.47 ± 0.03**	**R= 0.034 ± 0.004**

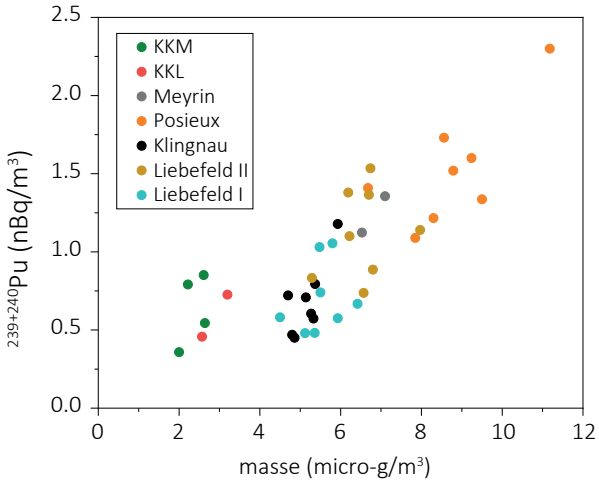


Figure 2 :
Activités (nBq/m³) en $^{239+241}$Pu en fonction de la masse de particules récoltées sur les filtres. A noter que les sites de KKM et KKL étaient munis de collecteurs de bas débit; les volumes collectés représentaient environ 1/8 des volumes haut débit, donc les incertitudes sont supérieures.

Tableau 3:
Activités en $^{239+240}$Pu et ^{241}Am (mBq/m³) des eaux collectées en Suisse durant l'année 2022. (Incertitudes à 95%).

Type	Lieu	Volume [L]	$^{239+240}$Pu mBq/m³	^{238}Pu mBq/m³	^{241}Am mBq/m³	^{241}Am/ $^{239+240}$Pu
Eau de rivière	Ruisseau, Meyrin	190	1.4 ± 0.5	< 0.1	< 0.3	-
	Aar (Hagneck)	310	0.8 ± 0.3	< 0.1	< 0.2	-
	Aar (Klingnau)	190	2.0 ± 0.6	< 0.2	< 1.3	-
	Rhin (Pratteln)	325	0.8 ± 0.3	< 0.1	0.5 ± 0.2	0.70 ± 0.34
Eau souterraine	Aarberg	155	< 0.5	< 0.5	< 0.7	-
	Däniken	160	< 0.5	< 0.5	< 0.9	-
	Döttingen	160	< 0.6	< 0.6	< 0.7	-
	Pratteln	160	< 0.6	< 0.6	< 0.6	-
Eau de pluie	Posieux	714	1.5 ± 0.3	< 0.07	0.69 ± 0.14	0.45 ± 0.13
	Mühleberg	779	1.3 ± 0.4	< 0.1	0.54 ± 0.12	0.43 ± 0.15
	Leibstadt	954	0.6 ± 0.2	< 0.4	0.28 ± 0.08	0.69 ± 0.29

Tableau 4:
Activités (mBq/kg Matières Séches - MS) en plutonium et américium de différents échantillons aquatiques prélevés en 2022 en aval des centrales nucléaires suisses (Incertitudes à 95%).

Type	Lieu	MS [g]	$^{239+240}$Pu mBq/kg MS	^{238}Pu mBq/kg MS	^{241}Am mBq/kg MS	^{241}Am/ $^{239+240}$Pu
Sédiments	Aar (Hagneck)	53	45.5 ± 5.8	< 1.5	18.3 ± 3.0	0.40 ± 0.08
	Aar (Klingnau)	54	62.6 ± 6.1	< 1.6	29.8 ± 3.6	0.47 ± 0.07
	Rhin (Pratteln)	55	106.0 ± 11.0	< 2.6	49.4 ± 5.6	0.47 ± 0.07
Plantes aquatiques	Aar (Hagneck)	49	44.0 ± 6.0	< 2.0	10.5 ± 2.4	0.24 ± 0.0.6
	Aar (Klingnau)	13	42.3 ± 13.8	< 5.0	7.1 ± 3.9	0.17 ± 0.10
	Rhin (Pratteln)	70	56.3 ± 5.5	< 2.0	22.3 ± 2.8	0.39 ± 0.06
Poissons	Aar (Mühleberg)	81	< 1.9	< 1.9	< 0.6	-
	Aar (Däniken)	51	< 3.0	< 3.0	< 11.0	-
	Aar (Beznau)	21	< 2.5	< 2.5	< 15.0	-
	Rhin (Leibstadt)	58	< 4.2	< 4.2	< 11.0	-
	Rhin (Dogern)	130	< 1.3	< 1.3	0.9 ± 0.3	-

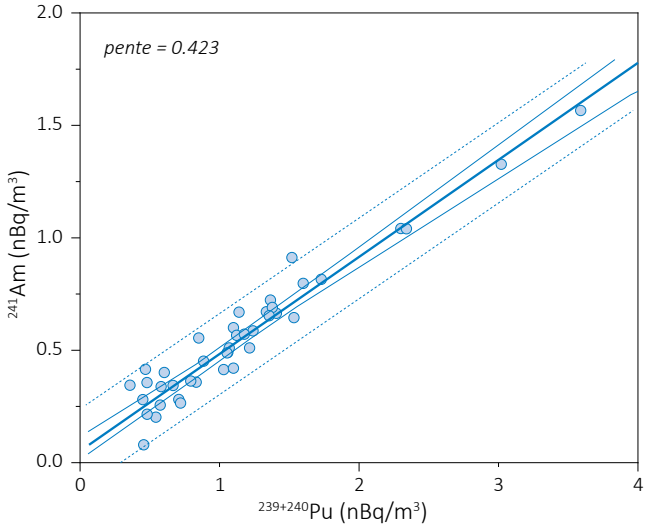


Figure 3 :
Activités (nBq/m³) en ^{241}Am en fonction de celles en $^{239+230}$Pu mesurées sur les filtres à air collectés entre 2014 et 2022.

fortement corrélées et que leur rapport est exactement celui déterminé pour les sols (représenté ici par la pente de la droite de régression). L'origine de l'activité des filtres à air est ainsi confirmée. Si l'activité de l'un ou de l'autre de ces radioéléments devait augmenter suite à un évènement radiologique indésirable, on serait ainsi en mesure de l'observer immédiatement par une déviation significative des tendances représentées dans les figures 1-3. Pour clore le chapitre sur les filtres à air, nous avons pris l'ensemble des données sur le Pu pour lequel la masse de particules collectée sur les filtres était connue (n=42) et divisé l'activité (nBq/m³) par la masse de particule (µg/m³). En utilisant un rapport de calcination de 0.95 pour les sols du plateau Suisse sur lequel se situe l'ensemble des collecteurs dont les filtres ont été analysés dans ce travail, on obtient une activité représentative de 0.176 ± 0.060 Bq/kg m.s pour les particules présentes sur les filtres à air. Cette activité est très proche de l'activité moyenne déterminée dans les sols pour le plateau suisse en 2022 (0.167 ± 0.060, n=31), confirmant la resuspension de sol comme l'origine de la contamination des filtres à air.

Les activités des eaux de surface (eaux de rivière), eaux de pluie et eaux souterraines sont présentées dans le tableau 3. On constate d'emblée qu'il est nécessaire de prélever au moins 200 L d'eau pour être en mesure de quantifier $^{239+240}$Pu par spectrométrie alpha. Lorsque les activités sont quantifiables, les incertitudes atteignent souvent 30-50%, car les activités ne dépassent pas 2 mBq/m³, ce qui est réjouissant. Comme les années précédentes, les eaux souterraines ne présentent pas d'activités quantifiables en Pu et en Am, pour un prélèvement de 160 L. 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 (~700-1'000 L) à ceux des prélèvements ponctuels (~150-300 L).

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.

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). Comme pour les sédiments, les activités en Pu et Am des plantes aquatiques sont restées proches de celles des années précédentes. Dans une étude récente, nous avons mis en évidence des variations significatives d'activités entre le Pu et l'Am dans les différents compartiments que comporte une plante aquatique : externe (co-précipitation de surface), externe à la cellule, interne à la cellule et résiduelle. Ainsi le Pu précipite en majorité sur la surface des plantes alors que l'on retrouve l'Am internalisé dans la structure de la plante, particulièrement dans la fraction dite résiduelle [2].

Ces comportements différenciés vont influencer le rapport isotopique $^{241}Am/^{239+240}Pu$ et un fractionnement peut être observé. Ce rapport n'est donc plus une indication fiable de contamination potentielle. Dans ce travail, les plantes aquatiques séchées sont analysées telles que reçues dans notre laboratoire et contiennent en apparence une contribution significative de phase particulaire déposée en surface. Il n'est donc pas possible de déterminer si l'activité mesurée provient d'un dépôt en surface des feuilles ou d'un transfert racinaire depuis le sédiment.

Dans les poissons, aucune activité quantifiable au-dessus de la limite de détection n'a été mesurée à l'exception de ^{241}Am dans un poisson du Rhin (Dogern) (0.9 ± 0.3 mBq/kg m.s.) dont la masse sèche disponible pour l'analyse était supérieure (130 g) aux autres prélèvements (20-80 g ms). Ce fait est en soit réjouissant car il signifie un environnement sain du point de vue de la radioactivité artificielle résiduelle. Pour tous les échantillons aquatiques, ^{238}Pu est resté en dessous des limites de détection.

Conclusions

Les mesures de Pu et Am effectuées dans ce travail ont montré la persistance, à un niveau d'activité très faible de Pu et Am dans les sols de Suisse. Sur le plateau suisse, ces activités ne dépassent pas 208 mBq/kg ms pour le Pu et 104 mBq/kg ms pour l'Am. Les sites du Tessin présentent des activités plus élevées, jusqu'à 928 mBq/kg ms en Pu et 304 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 1.60 nBq/m^3 en $^{239+240}Pu$ et 0.80 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 différents sites se regroupent en cluster de masse de particules et d'activité, avec Posieux montrant les masses de particules et les activités les plus élevées, alors que les sites de KKL et KKM ont les masses de particules et les activités mesurées les plus faibles. Le rapport isotopique moyen $^{241}Am/^{239+240}Pu$ de 0.42 (n=41) pointe sur la resuspension de particules de sol comme seule et unique source de la contamination des filtres à air.

Les activités des eaux de surface et des eaux souterraines 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 plantes aquatiques montrent une activité en Pu compatible avec le dépôt de particules de sédiments sur la surface des feuilles. Ces activités sont très similaires à celles déterminées durant cette dernière décennie sur ces mêmes échantillons. Les activités dans les poissons sont restées en dessous des limites de détection, à l'exception d'une valeur très faible de ^{241}Am (0.9 ± 0.3 mBq/kg ms). Pour ces échantillons également, il est nécessaire d'augmenter la quantité échantillonnée si l'on désire quantifier les activités en Pu et Am.

Dans l'ensemble, toutes ces mesures 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. Ce point est rassurant et montre que l'environnement en Suisse est actuellement sain 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.

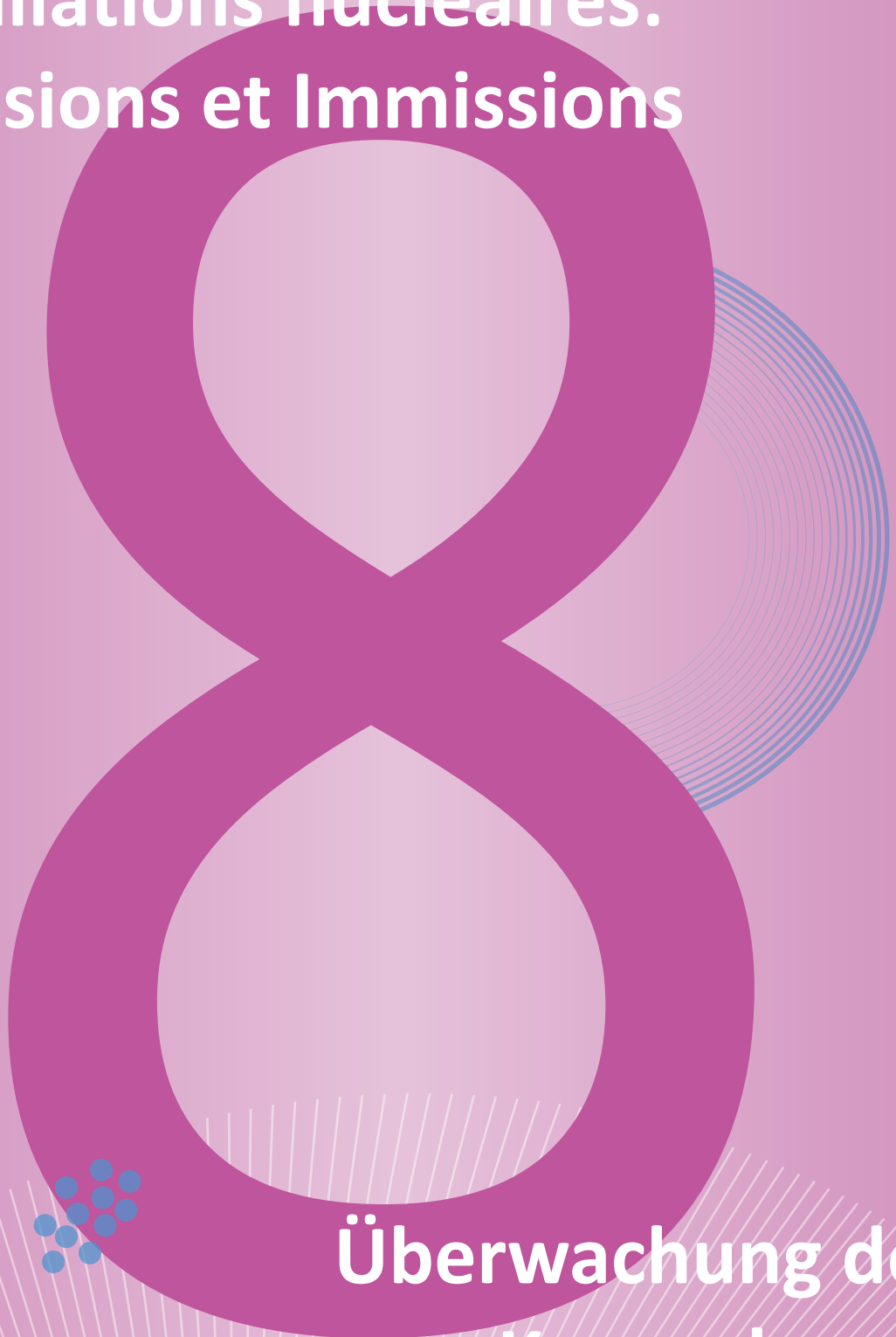
Remerciements

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

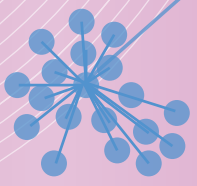
Références

[1] Chaplin et al. Water Research, 2022, 221, 118838.
[2] Chaplin et al. ACS EST Water, 2022, 2, 1688-1696.
[3] Chaplin et al. Analytical Chemistry, 2021, 93, 11937-11945.
[4] Corcho et al. Nature Communications, 2014, 5, article n° 3030.
[5] Luisier et al. J. Radioanal. Nucl. Chem. 2009, 281,425–432.

Surveillance des installations nucléaires: Emissions et Immissions



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

2022

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 2022 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 2022

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 2022. 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 166 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 für tritium-

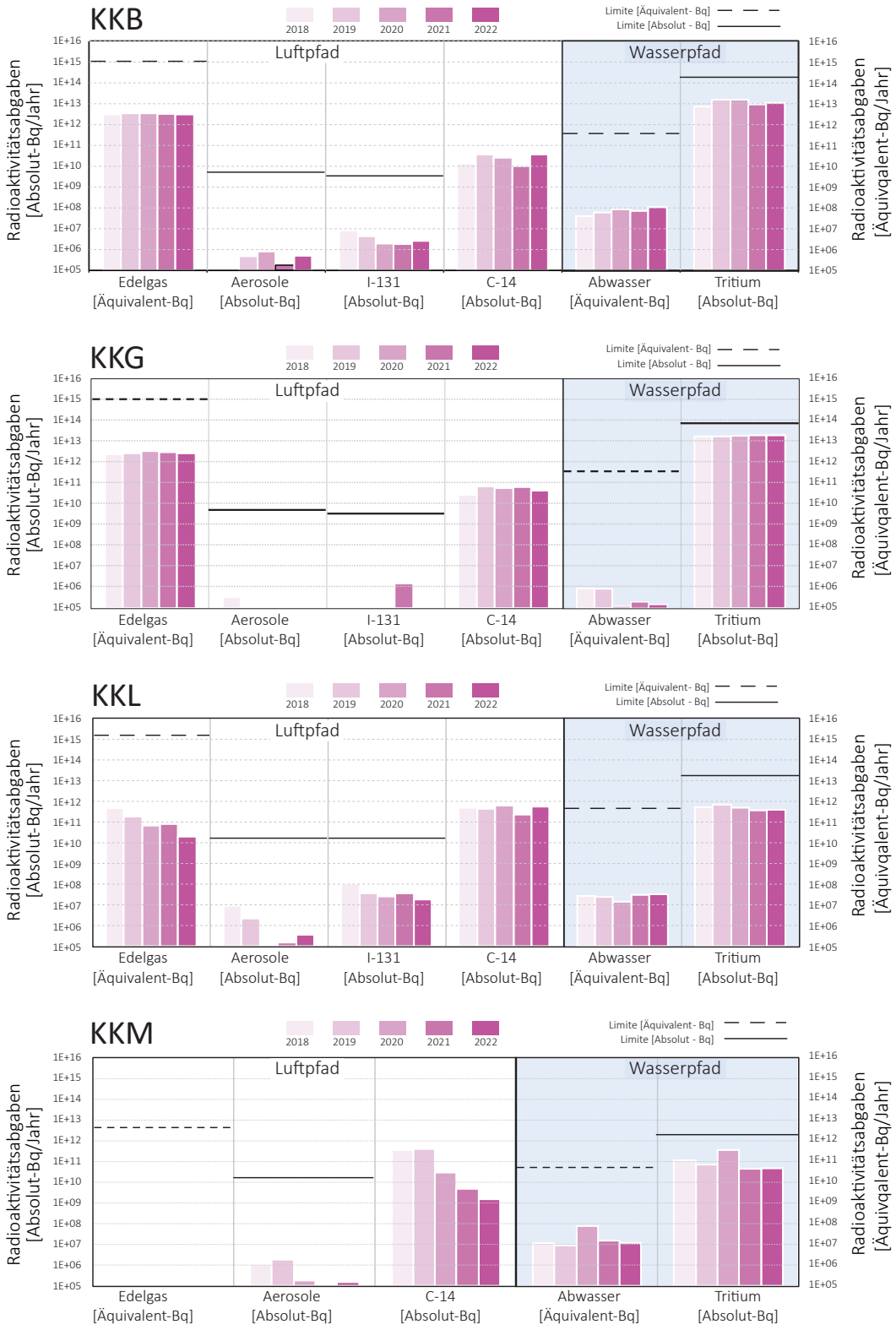
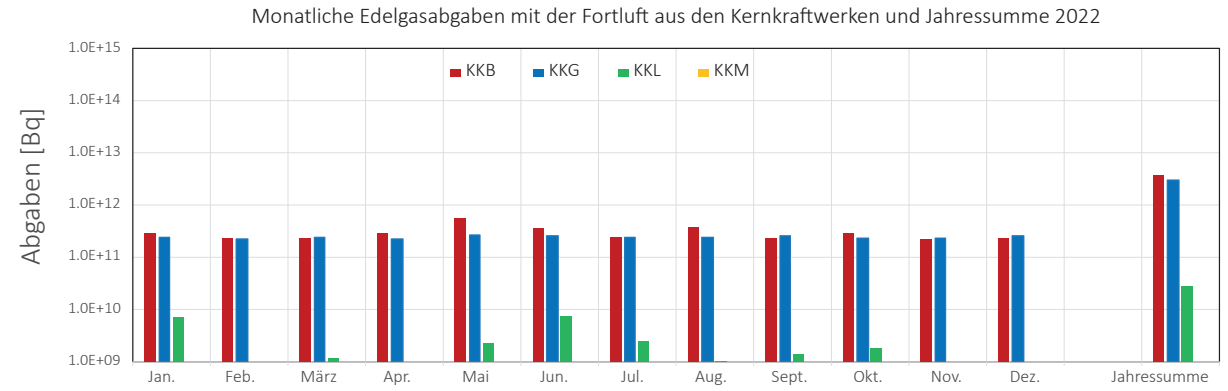
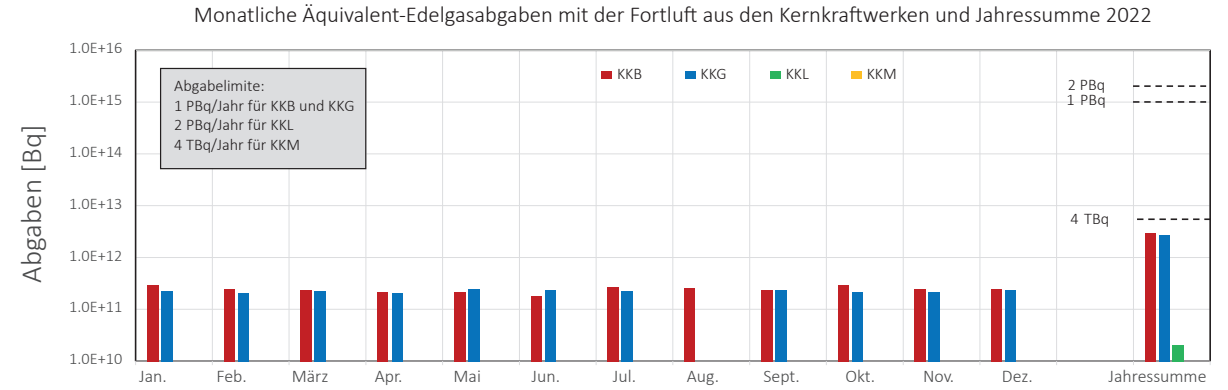
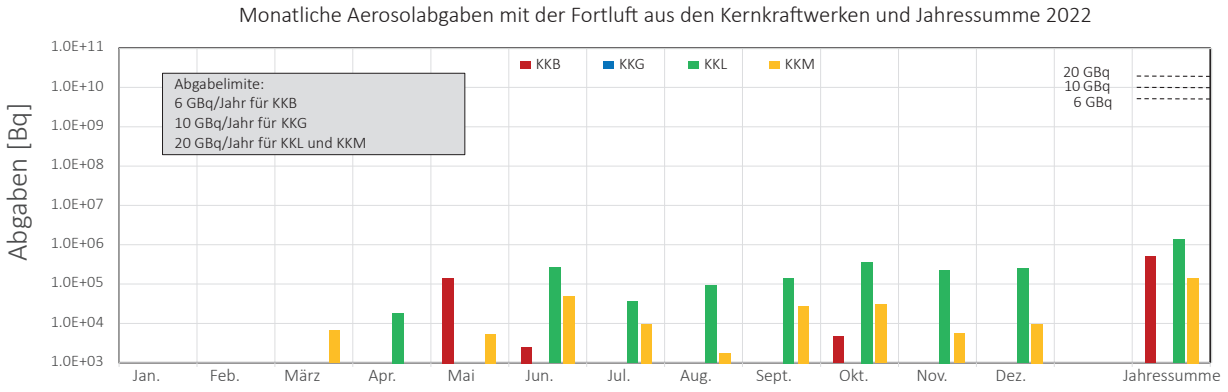


Fig 1.a :
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2018 bis 2022) im Vergleich mit den Jahresabgabelimiten.

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-Abgabe-äquivalente 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.







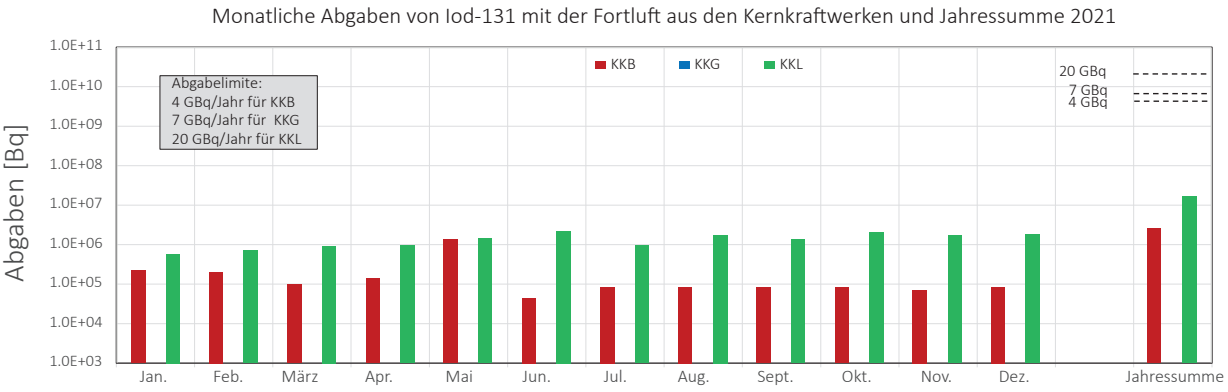
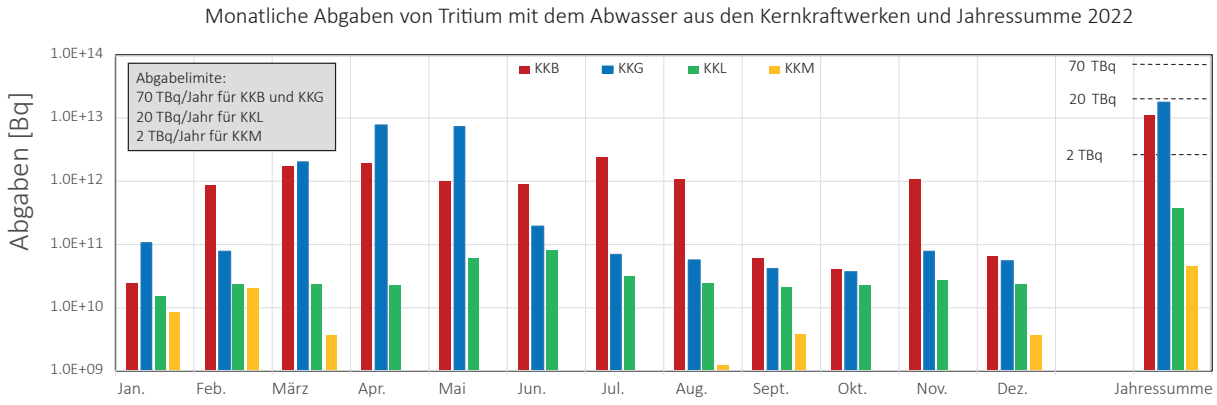
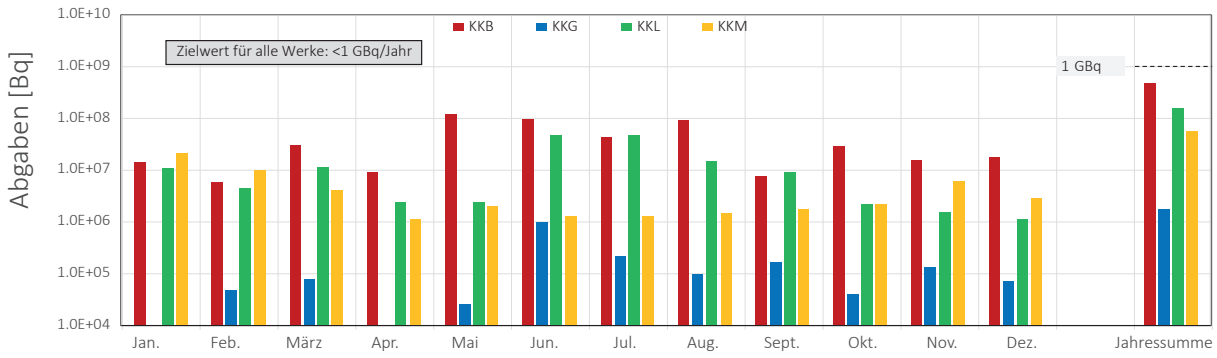


Fig 1.b (Teil 1):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2022 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.





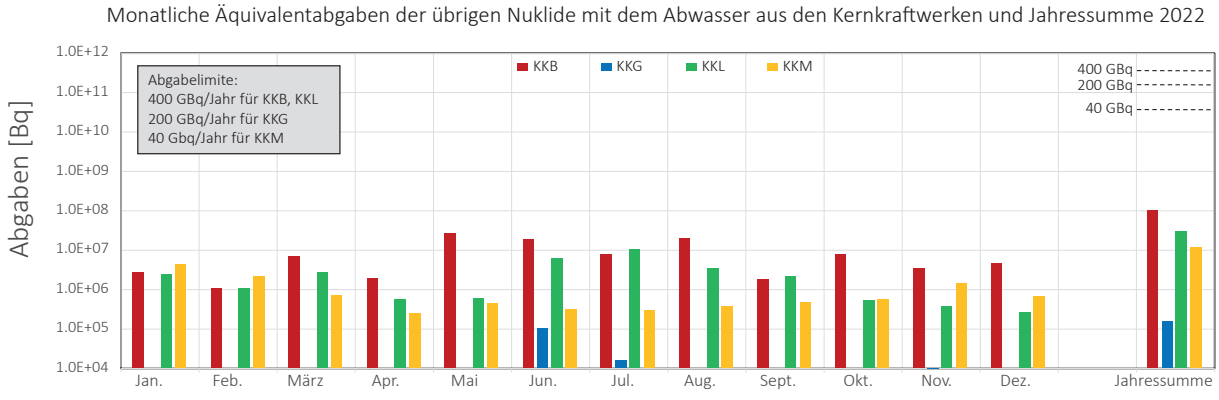
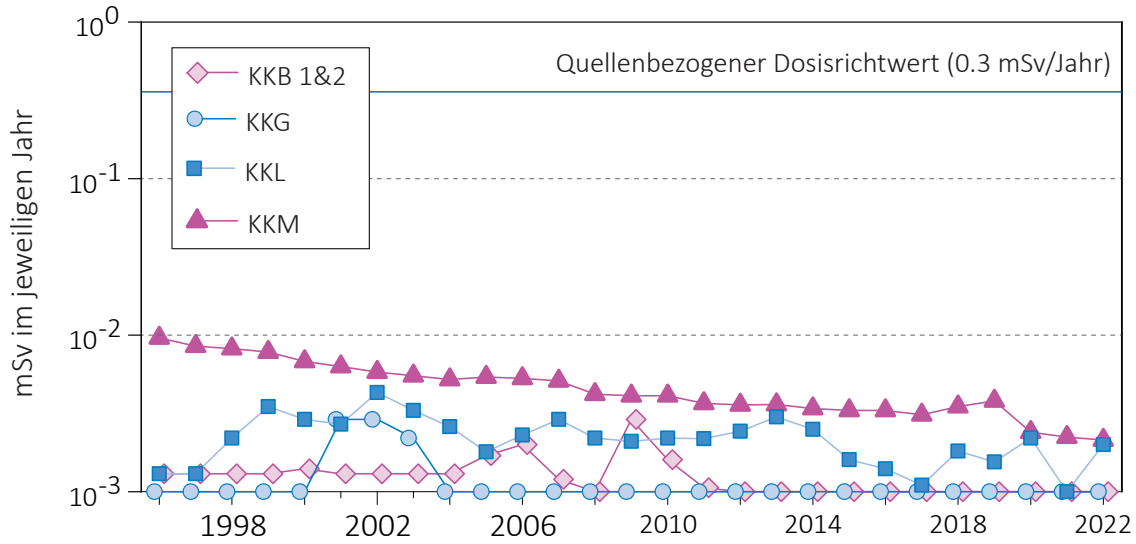


Fig 1.b (Teil 2):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2022 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.



Figur 2:
Berechnete Dosen für die meistbetroffenen Personen (Erwachsene) in der Umgebung der schweizerischen KKW, d.h. 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 2022	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01-28.04; 01.07-31.12 Revisionsstillstand: 29.04-30.06	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01-07.08; 23.08-31.12 Revisionsstillstand: 08.08-22.08	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01-20.05; 24.06-31.12 Revisionsstillstand: 21.05-23.06	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 1.1-13.05; 13.07-31.12 Revisionsstillstand: 14.05-12.07	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019	Siedewasserreaktor	373 MW

Figur 3:
Betrieb der Kernanlagen 2022.

haltiges 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 KKG weniger als 0.001 mSv, bei KKM und KKB etwa 0.002 mSv und bei KKL 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betrugen somit im Jahr 2022 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 0.008 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 2022 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 2022 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.	10j Kind	1j Kind
KKB1 + KKB2	Abwasser 4'200 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$4.8 \cdot 10^{8}$	$1.1 \cdot 10^{8}$	$4 \cdot 10^{11}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$1.1 \cdot 10^{13}$	-	$7 \cdot 10^{13}$	16 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	$3.2 \cdot 10^{12}$	$3.0 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	0.3%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	$5.1 \cdot 10^{5}$	-	$6 \cdot 10^{9}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ^{131}I	$2.5 \cdot 10^{6}$	$2.5 \cdot 10^{6}$	$4 \cdot 10^{9}$	< 0.1%	< 0.001	0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$3.6 \cdot 10^{10}$	-	-	-	< 0.001	0.0011	0.0017
	Dosis total						**< 0.001**	**0.0011**	**0.0018**
KKG	Abwasser 7'707 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$1.8 \cdot 10^{6}$	$1.5 \cdot 10^{5}$	$2 \cdot 10^{11}$	< 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	$< 2.6 \cdot 10^{12}$	$< 2.7 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	< 0.3%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	-	-	$1 \cdot 10^{10}$	< 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	$4.2 \cdot 10^{10}$	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Dosis total						**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
KKL	Abwasser 14'414 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$1.6 \cdot 10^{8}$	$3.1 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10^{11}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$3.8 \cdot 10^{11}$	-	$2 \cdot 10^{13}$	1.9 %	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	$2.5 \cdot 10^{10}$	$2.0 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{15}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	$3.6 \cdot 10^{5}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Iod: ^{131}I	$1.8 \cdot 10^{7}$	$1.8 \cdot 10^{7}$	$2 \cdot 10^{10}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$5.3 \cdot 10^{11}$	-	-	-	0.002	0.0026	0.0044
	Dosis total						**0.002**	**0.0027**	**0.0044**
KKM	Abwasser 2'867 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$5.5 \cdot 10^{7}$	$1.2 \cdot 10^{7}$	$4. \cdot 10^{10}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$4.5 \cdot 10^{10}$	$4.5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{12}$	2.3%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	Edelgase	-	-	$4 \cdot 10^{12}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Aerosole	$1.5 \cdot 10^{5}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	< 0.1%	0.0021	0.0021	0.0020
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$1.5 \cdot 10^{9}$	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Dosis total						**0.0021**	**0.0021**	**0.0020**
ZZL	Abwasser 622 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$6.0 \cdot 10^{8}$	$1.6 \cdot 10^{8}$	$2 \cdot 10^{11}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$3.0 \cdot 10^{10}$	-	-	-	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Fortluft	β–/γ-Aerosole	$3.5 \cdot 10^{5}$	-	$1 \cdot 10^{9}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		α-Aerosole	$1.1 \cdot 10^{4}$	-	$3 \cdot 10^{7}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$2.3 \cdot 10^{8}$	-	$1 \cdot 10^{12}$	< 0.1%	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		Tritium	$1.3 \cdot 10^{10}$	-	$1 \cdot 10^{14}$	< 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 2022 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungslabor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszwischenlager
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	$3.4 \cdot 10^{4}$	-	-	-	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	-	-	-	-	-
Tritium als HTO	$3.3 \cdot 10^{8}$	-	-	$7.8 \cdot 10^{9}$	$7.5 \cdot 10^{9}$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$1.3 \cdot 10^{7}$	-	-	-	-
Jahresdosis[3] [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Kind 10j	< 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 Fortluftanlagen	C-Labor	Abwasser 996 m^3	Fortluft	Aequivalentabgaben
Abgaben im Abwasser[1,2] [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	$3.1 \cdot 10^{7}$	-	$3.4 \cdot 10^{6}$
Tritium	-	-	$8.4 \cdot 10^{9}$	-	-
Abgaben über die Fortluft[2,4] [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$2.0 \cdot 10^{14}$	-	-	$2.0 \cdot 10^{14}$	$8.3 \cdot 10^{14}$
β/γ-Aerosole, ohne Iod	$3.9 \cdot 10^{9}$	-	-	$3.9 \cdot 10^{9}$	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	-	-	-	$7.2 \cdot 10^{7}$	-
Tritium als HTO	$2.1 \cdot 10^{12}$	-	-	$2.1 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	$1.3 \cdot 10^{7}$	-
Jahresdosis[3] [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	0.0076	< 0.00015	< 0.00015	0.008	
Kind 10j	0.0076	< 0.00015	< 0.00015	0.008	
Kleinkinder	0.0076	< 0.00015	< 0.00015	0.008	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert[4]	5.1 %	< 0.1%	< 0.1%	< 6.0%	

Tabelle 3a:
Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2022:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{3}H	$1.1 \cdot 10^{13}$	$1.9 \cdot 10^{13}$	$3.8 \cdot 10^{11}$	$4.5 \cdot 10^{10}$	$8.4 \cdot 10^{9}$	$3.0 \cdot 10^{10}$
^{22}Na					$6.6 \cdot 10^{4}$	$8.5 \cdot 10^{6}$
^{24}Na	$1.8 \cdot 10^{6}$					
^{51}Cr	$3.2 \cdot 10^{5}$		$1.8 \cdot 10^{7}$			
^{54}Mn	$5.7 \cdot 10^{6}$		$4.8 \cdot 10^{6}$	$5.9 \cdot 10^{6}$	$4.6 \cdot 10^{4}$	$7.6 \cdot 10^{5}$
^{57}Co					$1.6 \cdot 10^{3}$	
^{58}Co	$1.3 \cdot 10^{7}$		$3.1 \cdot 10^{6}$			$6.4 \cdot 10^{3}$
^{60}Co	$1.3 \cdot 10^{8}$	$1.2 \cdot 10^{5}$	$1.3 \cdot 10^{8}$	$4.3 \cdot 10^{7}$	$5.4 \cdot 10^{5}$	$9.4 \cdot 10^{6}$
^{65}Zn	$4.9 \cdot 10^{7}$					
^{67}Ga					$1.2 \cdot 10^{6}$	
^{89}Sr	$9.2 \cdot 10^{5}$			$1.9 \cdot 10^{6}$		
^{90}Sr/^{90}Y	$1.7 \cdot 10^{6}$			$8.2 \cdot 10^{4}$		$1.9 \cdot 10^{5}$
^{95}Zr	$5.6 \cdot 10^{4}$					
^{95}Nb	$5.6 \cdot 10^{4}$	$7.7 \cdot 10^{4}$				
^{99m}Tc	$2.5 \cdot 10^{4}$	$1.3 \cdot 10^{5}$				
^{103}Ru	$1.1 \cdot 10^{5}$					
^{110m}Ag	$3.2 \cdot 10^{6}$					
^{111}In					$9.0 \cdot 10^{4}$	
^{122}Sb	$2.8 \cdot 10^{6}$					
^{124}Sb	$6.3 \cdot 10^{7}$					$5.1 \cdot 10^{5}$
^{125}Sb	$2.3 \cdot 10^{7}$					$1.5 \cdot 10^{7}$
^{123m}Te	$1.5 \cdot 10^{7}$	$1.4 \cdot 10^{6}$				
^{125m}Te					$1.5 \cdot 10^{6}$	
^{129m}Te	$2.5 \cdot 10^{6}$					
^{132}Te	$3.7 \cdot 10^{6}$	$8.6 \cdot 10^{4}$				
^{131}I	$4.1 \cdot 10^{6}$					
^{133}I	$1.9 \cdot 10^{5}$					
^{134}Cs	$1.9 \cdot 10^{6}$				$1.6 \cdot 10^{4}$	$5.4 \cdot 10^{6}$
^{137}Cs	$1.6 \cdot 10^{8}$			$4.4 \cdot 10^{6}$	$9.0 \cdot 10^{6}$	$5.6 \cdot 10^{8}$
^{140}La	$3.8 \cdot 10^{4}$					
^{155}Tb					$1.7 \cdot 10^{5}$	
^{156}Tb					$1.2 \cdot 10^{4}$	
^{160}Tb					$1.4 \cdot 10^{4}$	
^{161}Tb					$9.9 \cdot 10^{6}$	
^{177}Lu					$8.4 \cdot 10^{6}$	
α-Strahler	*)	$1.5 \cdot 10^{5}$	$3.8 \cdot 10^{5}$	$1.9 \cdot 10^{4}$		*)
$^{234/238}$U						
$^{239/240}$Pu	$4.9 \cdot 10^{3}$					$2.7 \cdot 10^{3}$
^{238}Pu/^{241}Am	$2.5 \cdot 10^{4}$					$1.3 \cdot 10^{3}$
^{239}Np						
^{242}Cm	$1.3 \cdot 10^{4}$					
$^{243/244}$Cm	$3.0 \cdot 10^{4}$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2021 bis und mit dem 3. Quartal 2022

Tabelle 3b:
Abgaben der Kernanlagen mit der Fortluft, Edelgase und Iod 2022:
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	$5.7 \cdot 10^{11}$	$6.3 \cdot 10^{11}$	$4.1 \cdot 10^{11}$	$6.5 \cdot 10^{9}$	$2.1 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^{10}$
^{14}C (CO_2)	$3.6 \cdot 10^{10}$	$4.2 \cdot 10^{10}$	$5.3 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{9}$	$1.6 \cdot 10^{7}$	$2.3 \cdot 10^{8}$
^{11}C					$3.1 \cdot 10^{13}$	
^{13}N					$3.2 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$1.3 \cdot 10^{14}$	
^{18}F					$9.7 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne						
^{41}Ar			$3.1 \cdot 10^{8}$		$3.8 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr						
^{85m}Kr	$1.0 \cdot 10^{11}$					
^{88}Kr	$1.8 \cdot 10^{11}$					
^{133}Xe	$1.6 \cdot 10^{12}$		$6.4 \cdot 10^{9}$			
^{135}Xe	$1.3 \cdot 10^{12}$		$1.1 \cdot 10^{10}$			
^{135m}Xe			$7.4 \cdot 10^{8}$			
^{137}Xe			$6.6 \cdot 10^{9}$			
EG-Aequiv.						
EG: β-total		$< 2.6 \cdot 10^{12}$				
Andere						
Iod						
^{123}I					$5.5 \cdot 10^{6}$	
^{124}I						
^{125}I					$6.6 \cdot 10^{7}$	
^{126}I					$1.4 \cdot 10^{5}$	
^{131}I	$2.5 \cdot 10^{6}$		$1.8 \cdot 10^{7}$			
^{133}I	$1.0 \cdot 10^{7}$					

Tabelle 3c:
Abgaben der Kernanlagen mit der Fortluft, Aerosole 2022:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{7}Be					$1.6 \cdot 10^{6}$	
^{24}Na					$1.5 \cdot 10^{8}$	
^{54}Mn			$5.1 \cdot 10^{4}$			
^{57}Co						
^{60}Co	$1.7 \cdot 10^{4}$		$1.7 \cdot 10^{5}$	$1.6 \cdot 10^{4}$	$2.1 \cdot 10^{4}$	$2.3 \cdot 10^{3}$
^{65}Zn			$2.6 \cdot 10^{4}$			
^{77}Br					$1.9 \cdot 10^{6}$	
^{82}Br					$8.9 \cdot 10^{8}$	
^{89}Sr						
^{90}Sr						
^{95}Nb	$4.8 \cdot 10^{3}$					
^{103}Ru	$1.1 \cdot 10^{5}$					
^{106}Ru	$2.4 \cdot 10^{4}$					
^{123m}Te	$1.3 \cdot 10^{3}$					
^{121}Te					$6.5 \cdot 10^{4}$	
^{137}Cs				$1.3 \cdot 10^{5}$		$6.0 \cdot 10^{3}$
^{140}Ba			$6.9 \cdot 10^{4}$			
^{140}La			$4.3 \cdot 10^{4}$			
^{181}Re					$4.9 \cdot 10^{7}$	
^{182}Re					$9.2 \cdot 10^{8}$	
^{182m}Re					$3.2 \cdot 10^{5}$	
^{183}Re					$3.2 \cdot 10^{6}$	
^{182}Os					$2.7 \cdot 10^{8}$	
^{183}Os					$3.1 \cdot 10^{8}$	
^{185}Os					$2.5 \cdot 10^{7}$	
^{191}Os	$3.5 \cdot 10^{5}$					
^{192}Au					$1.1 \cdot 10^{8}$	
^{193}Au					$3.5 \cdot 10^{7}$	
^{194}Au					$2.7 \cdot 10^{6}$	
^{193m}Hg					$2.5 \cdot 10^{7}$	
^{194}Hg					$2.7 \cdot 10^{6}$	$2.7 \cdot 10^{3}$
^{195m}Hg					$1.5 \cdot 10^{8}$	
^{197}Hg					$7.1 \cdot 10^{8}$	
^{197m}Hg					$1.9 \cdot 10^{8}$	
^{203}Hg					$1.4 \cdot 10^{7}$	
Nicht spezifizierte						$3.4 \cdot 10^{5}$
α-Aerosole	$\mathbf{4.5 \cdot 10^{3}}$	$\mathbf{4.5 \cdot 10^{4}}$	$\mathbf{5.8 \cdot 10^{4}}$	$\mathbf{6.3 \cdot 10^{3}}$		$\mathbf{1.1 \cdot 10^{4}}$

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 2022

Die Ortsdosisleistung ist im Nahbereich (beispielsweise am Arealzaun) des Siedewasserreaktor in Leibstadt durch Direkt- und Streustrahlung aus dem Maschinenhaus erhöht. Diese Strahlung resultiert aus dem radioaktiven Zerfall des kurzlebigen Stickstoffnuklids ^{16}N, welches im Reaktor produziert und bei Siedewasserreaktoren mit dem Dampf in die Turbine im Maschinenhaus getragen wird. Weiter können Abfalllager zu einer erhöhten Ortsdosis am Zaun beitragen. Rückbauarbeiten, wie sie im KKM stattfinden, führen in der Regel zu temporären Erhöhungen der Ortsdosis am Zaun.

Beim KKB und KKG wurde am Zaun weder mittels TLD resp. EDIS noch bei den vierteljährlichen Messungen des ENSI eine signifikante Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt. Am Zaun des KKL 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 0.13 µSv/h ermittelt. Auf eine Woche hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von etwa 0.008 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 0.011 mSv. Am Zaun des PSI wurden bei vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.09 µSv/h ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.005 mSv pro Woche. Die vom PSI quartalsweise ausgewerteten TLD am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.006 mSv. Beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) konnte weder aus den stichprobenweise durchgeführten Dosisleistungsmessungen noch aufgrund der am Zaun positionierten TLD und Neutronendosimeter eine signifikante Erhöhung der 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**ern-kraftwerke) 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.

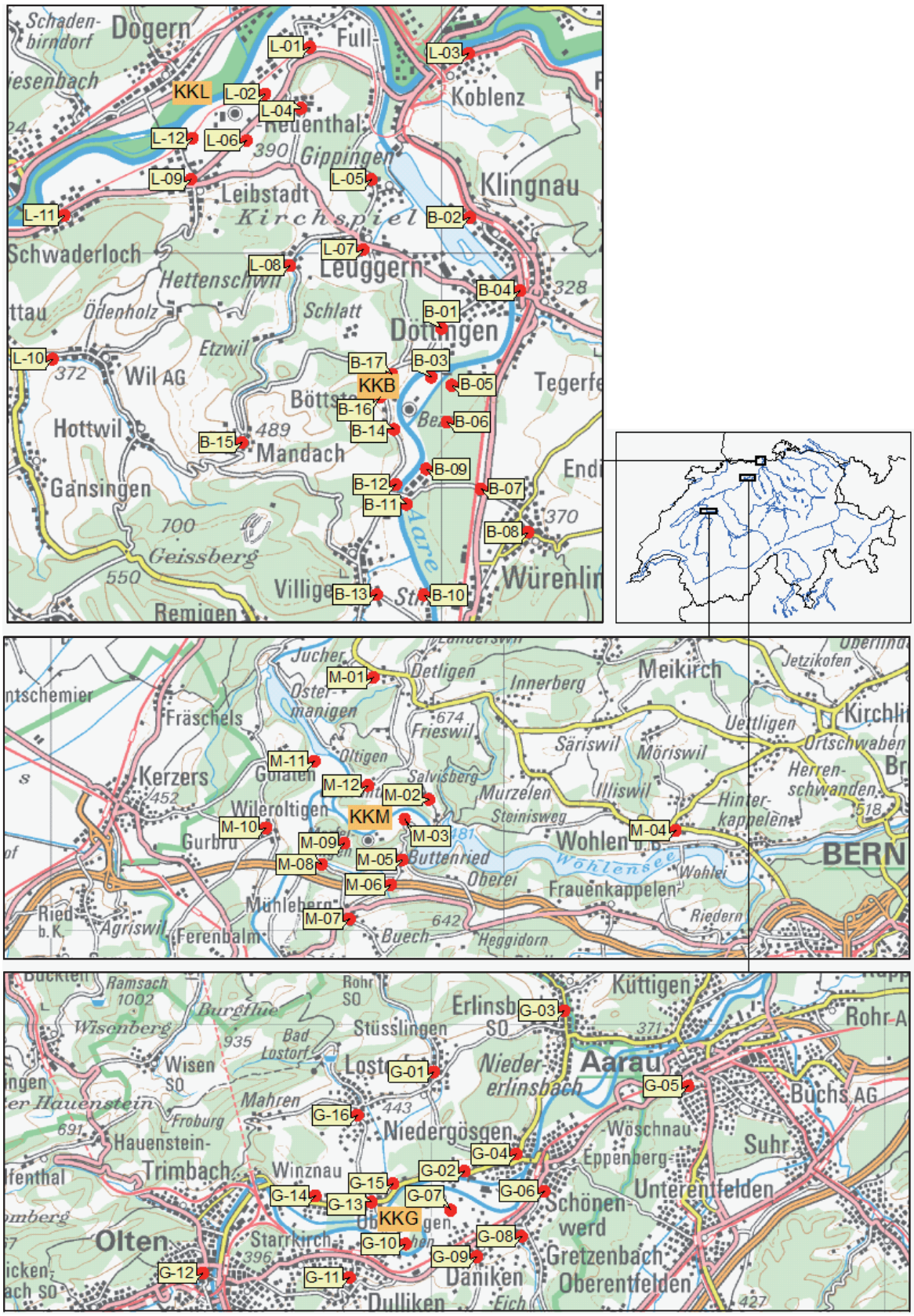
Die Messwerte im Jahr 2022 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

Übersicht

Das **MADUK**-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osis-leistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraft-werke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von **An**lage**pa**rametern (**ANPA**) und Kaminemissionswerten 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 die Notfallorganisation bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitäts-überwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 76 Messstationen zählen kann. Die Messsonden beider Messnetze 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 des MADUK-Netzes, 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 Darstellung B.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 und in den Kernkraftwerken 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 Rahmen des Werterhaltes des Messnetzes wurden seit 2020 die Messstationen auf einen neuen Sondentyp umgerüstet. Aufgrund von Qualitätsproblemen bei den Hochdosiszählrohren verzögerte sich der Abschluss des Projektes. Im Juli 2022 konnte der Umbau aller Stationen abgeschlossen werden.

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, werden als Ausfallzeit in Stunden erfasst.

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

Die Messstationen liefen auch im Jahr 2022 grösstenteils zuverlässig. Die Anzahl Kommunikationsunterbrüche gingen im Vergleich zum Vorjahr nochmals deutlich zurück. Dies war hauptsächlich auf den Einsatz des neuen Sondentyps mit redundanter Datenübertragung zurückzuführen.

Aufgrund von Bauarbeiten am Standort musste die Messsonde der Station B-08 für den Zeitraum vom 4. Januar 2022 11:40 Uhr bis 17. Oktober 2022 08:20 Uhr demontiert werden. Für diesen Zeitraum liegen keine Messdaten für diese Station vor.

Im Berichtsjahr lag die Systemverfügbarkeit bei 99.9 % (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 98.6% (Ausfall der Station B-08 mit 1.36% eingerechnet).

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.

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV), welche sich derzeit in Revision befindet, werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Nach Abschluss des Umbaus

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

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
G-05	61.7	61.7	Defekte Batterie
B-16	96.2	96.2	Blockierter Datenlogger
G-14	19.4	19.4	Blockierte Messsonde

Tabelle 2:
Auflistung der Schwellenwertüberschreitungen durch die Nettodosisleistung im Jahr 2022.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
05.05.2022 11:10	L-12	0.2	51	157
05.08.2022 20:40	M-04	0.3	54	156
05.08.2022 21:30	L-03	1.0	87	198
17.08.2022 22:00	G-07	0.2	53	196
19.08.2022 00:20	L-06	0.2	51	169
26.08.2022 16:40	M-04	1.7	143	248
26.08.2022 22:00	G-07	0.3	61	166
26.08.2022 23:00	L-06	0.7	69	226
26.08.2022 23:20	B-01	0.2	63	218
26.08.2022 23:50	L-05	0.2	62	200
26.08.2022 23:50	L-08	0.2	68	209
26.08.2022 23:00	L-10	1.2	85	261
27.08.2022 00:10	L-08	0.2	51	198
27.08.2022 00:40	G-07	0.2	52	187
30.08.2022 20:50	B-01	1.2	114	280
30.08.2022 20:50	B-03	1.5	143	313
30.08.2022 20:50	B-05	1.2	110	280
30.08.2022 21:00	B-06	0.7	62	216
30.08.2022 21:10	B-12	0.3	59	238
30.08.2022 20:50	B-14	1.0	107	274
30.08.2022 20:50	B-15	0.5	63	239
30.08.2022 20:50	B-16	1.0	98	270
30.08.2022 20:50	B-17	1.2	131	312
30.08.2022 21:40	G-03	0.5	54	207
30.08.2022 21:10	L-06	0.8	70	238
30.08.2022 20:40	L-08	0.8	112	265
30.08.2022 21:20	L-09	0.3	58	229
30.08.2022 21:10	L-12	0.2	58	203
15.09.2022 21:30	M-01	0.3	51	176
07.12.2022 23:30	L-12	0.2	1'028	1'128
10.12.2022 17:20	L-03	1.0	65	169
16.12.2022 05:50	G-07	0.3	50	155

der Messstationen auf den neuen Sondentyp erfolgte im 2022 eine Funktionsprüfung vor Ort. Bis auf eine bereits als defekt deklarierte Sonde erfüllten alle Messsonden die Kriterien.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden üblicherweise Messungen mittels In-Situ-Gammaspektrometrie bei den Messstationen durchgeführt. Im Jahre 2022 erfolgten die Messungen an den MADUK-Standorten der Messringe KKG und KKL. Bei allen Messungen konnten keine Immissionen der Kernanlagen nachgewiesen werden.

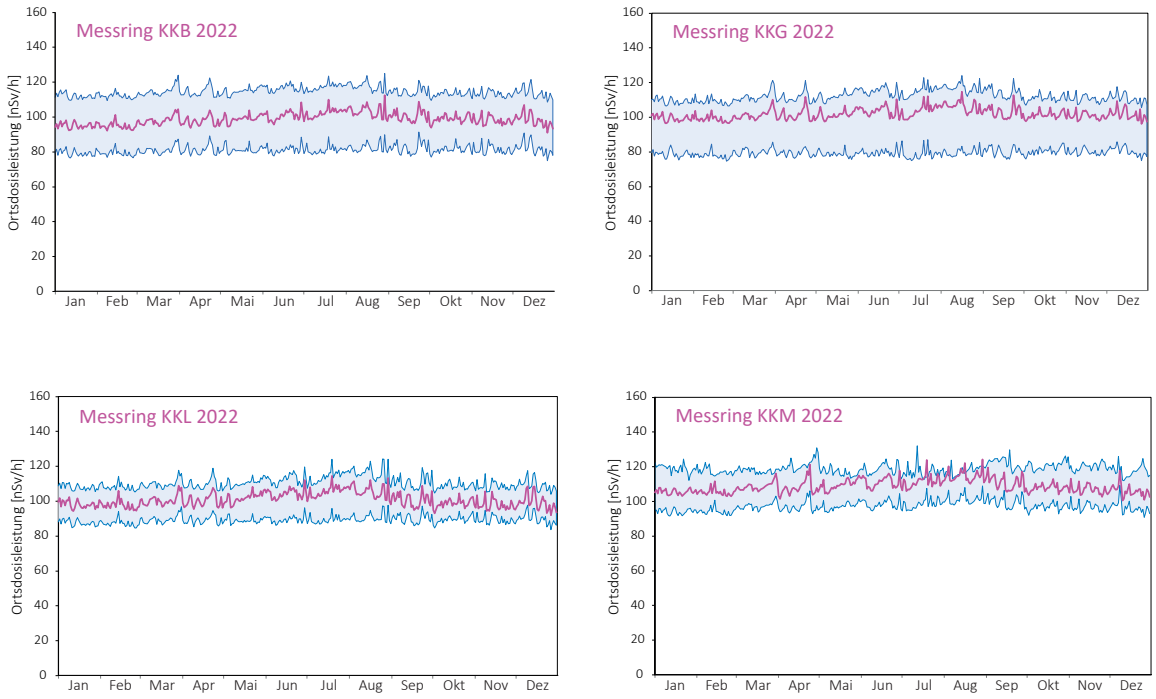
Messergebnisse

Im Jahr 2022 wurden insgesamt 32 Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h (Tabelle 2) verzeichnet, wovon 25 in der zweiten Augusthälfte auftraten. Bis auf eine Ausnahme waren alle aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen.

Bei der Station L-12 wurde am 7. Dezember um 23:30 Uhr eine Ortsdosisleistung von 1'128 nSv/h registriert. Die Prüfung der Zählraten des Niederdosis- und Hochdosiszählrohrs der entsprechenden Messsonde zeigten eine unplausible Erhöhung in der Zählrate des Niederdosiszählrohres. Am 8. Dezember wurde deshalb die Messsonde ersetzt.

Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

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 2022.

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). 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 8 - 30 Bq/kg für das Jahr 2022. 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 - 2 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}$Pu von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.2- 0.4 Bq/kg im Jahr 2022. Das Isotopenverhältnis für die Pu-Isotope konnte für dieses Jahr nur mehr abgeschätzt werden, da für ^{238}Pu Nachweisgrenzen resultierten. Die Isotopenverhältnisse von ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu (max. 0.05, erwartet 0.03) und ^{241}Am/$^{239+240}$Pu (0.48, erwartet 0.35) stimmen nach wie vor mit der Begründung überein, dass die gemessenen Werte für die Actinide den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 10 - 40 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.

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 dem 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 und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades wurden zusätzlich 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 zu und in einer 8 M HNO_3 Lösung auf konzentriert. Das Plutonium wird mittels Zugabe von H_2O_2 (Oxidationsmittel) unter Erhitzen in die vierwertige Form Pu^{4+} überführt. Die auf Raumtemperatur abgekühlte Lösung wird über eine Anionenaustauscher-Kolonne (Bio-Rad AG 1-X2, 100-200 mesh) gegeben und 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 Vaselineschicht von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen eingeschmolzen. 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 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 äusserst stabil und liegen auf sehr tiefem Niveau. Die Aktivitätskonzentrationen gewisser Nuklide lagen in verschiedenen Jahren teilweise tiefer als die Nachweisgrenze des verwendeten Messverfahrens. Für 2022 konnten bis auf ^{238}Pu alle Nuklide über der Nachweisgrenze gemessen werden. Während sich bei ^{238}Pu in den vorhergehenden Jahren Messwerte mit Nachweisgrenzen abwechselten, resultierten in 2022 nur Nachweisgrenzen. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}$Pu liegen derzeit zwischen 0.2 und 0.4 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.05 und 0.3 Bq/kg. Der Wertebereich für das Spaltprodukt ^{90}Sr lag 2022 wieder auf dem tiefen Niveau der Jahre 2018 bis 2020 und wieder tiefer als in 2021. Dies entspricht der Erwartung für ^{90}Sr, einem langsamen Abbau- und Zerfallstrend zu folgen. Die Resultate für ^{137}Cs (8 - 30

Bq/kg, im Mittel 17 Bq/kg) liegen leicht – jedoch nicht signifikant – niedriger als im langjährigen Mittel. Der Grund für die grundsätzlich höheren Aktivitätskonzentrationen ist der Beitrag von Fallout-Cäsium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall von 1986. Die Isotopenverhältnisse von $^{241}Am/^{239+240}Pu$ betrugen im Mittel 0.48 in 2022 (bei einem erwarteten Wert von 0.35) und für $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ kann aufgrund der Nachweisgrenzen für ^{238}Pu lediglich ein Maximalwert für das Verhältnis von ≤ 0.049 angebeben werden. Das Verhältnis selbst kann nicht mehr bestimmt werden. Aufgrund der Erfahrungswerte liegt dieses bei 0.03. Der Beitrag der anthropogenen Actinoide ist aufgrund des nach wie vor typischen Verhältnisses bzw. passendem Verhältnisgrenzwert kompatibel mit der Herkunft aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren [2,3]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten fünf Jahre. Ebenfalls eingetragen sind die 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. Anhand des in der oberen Atmosphäre durch Sonnenpartikel produzierten ^{7}Be lassen sich die mittleren Jahreszeitverläufe abbilden. Auch die Flächenaktivitäten auf den Staubfangplatten von ^{7}Be schwankten zwischen ca. 8 - 22 Bq/m^2 im Winter und stiegen im Sommerhalbjahr 2022 bis auf 70 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 - 7 Bq/l nachgewiesen, wobei im Sommerhalbjahr die ^{3}H-Aktivität unter der Nachweisgrenze von 1.8 Bq/l lag. Mit der Gammaspektrometrie konnten seit 1997 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.

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 (2018-2022). Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2018	2019	2020	2021	2022
^{90}Sr	<1 - 2.5	<1 - 3	<1 - 2	1.3 - 3.5	<1 - 2
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs (1)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	10 - 50	5 - 40	10 - 40	7 - 60	8 - 30
^{238}Pu	0.01- 0.03	< 0.005- 0.03	< 0.005- 0.03	0.02 - 0.06	< 0.01
$^{239+240}Pu$	0.2 - 0.8	0.1- 0.8	0.05 - 0.5	0.2 - 1.0	0.2 - 0.4
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.05 - 0.3	0.02 - 0.3	0.02 - 0.4	0.05 - 0.3
^{226}Ra	10 - 24	15 - 30	20 - 30	19 - 30	25 - 35
^{228}Ra	13 - 25	17 - 30	20 - 40	15 - 40	20 - 40

(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.



Figur 1 :
Regensammelanlage in der Nähe der Zwilag. Das Regenwasser wird über einen Trichter in einen Kanister geleitet. Der Sammler verfügt im Inneren über eine Isolation und eine kleine Heizung, die im Winter für Frostschutz sorgt. Fotos: Patricia Kramer.

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 longues années un programme spécifique 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 popula-

tion 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 installations. 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 radioactivité naturelle et artificielle.

La centrale nucléaire de Mühleberg, dont l'exploitation électrique a été arrêtée le 20 décembre 2019, a été mise définitivement hors service par le groupe BKW Energie SA le 15 septembre 2020. Cette étape marque le passage du régime de l'autorisation d'exploiter à la décision de désaffectation. Si à cette date, un nouveau règlement concernant le rejet de substances radioactives ainsi que la surveillance de la radioactivité et du rayonnement direct dans le voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est entré en vigueur, seules certaines limites de rejet ont pour l'heure été modifiées. La surveillance de la radioactivité dans l'environnement se poursuit quant à elle comme en régime d'exploitation.

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 2022

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 2022 (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 2022.

La figure 1 présente les doses calculées pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires suisses entre 1981 et 2022. 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).

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 voisi-

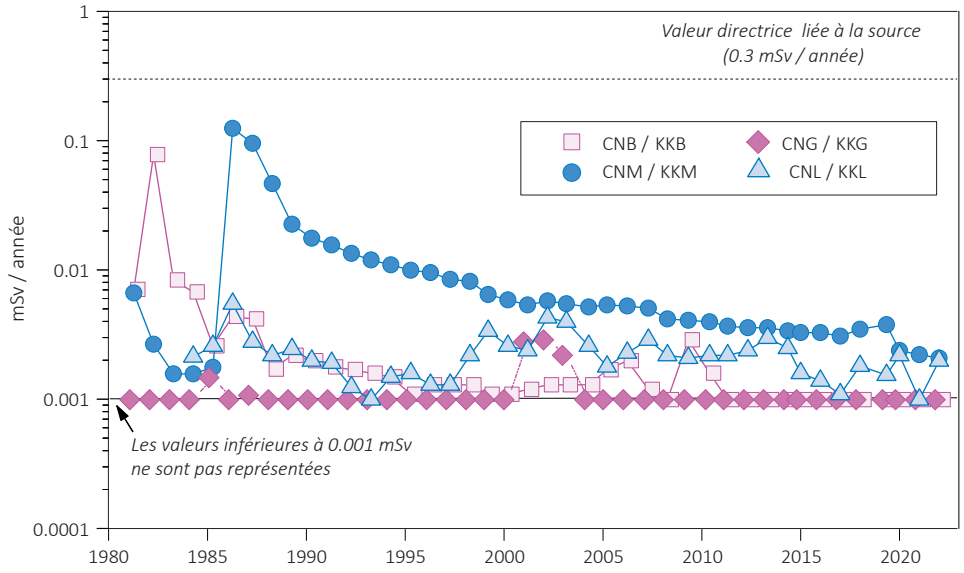


Figure 1:
Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2022 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnemment direct compris) est représentée à titre de comparaison.

nage des centrales nucléaires sur la base des émissions effectives, en tenant compte des rejets des années précédentes, se sont échelonnées en 2022 entre <0.001 mSv pour KKG et KKB et env. 0.002 mSv pour KKM et KKL. Dans le cas des petits enfants (< 1 an), ces doses atteignent env. 0.002 mSv par an au voisinage de KKB et 0.0044 mSv par an pour KKL. Pour ces deux installations, la contribution majeure à la dose provient des rejets atmosphériques de ^{14}C, alors qu'à Mühleberg, elle provient toujours de la contribution rémanente des résines rejetées en 1986.

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 2022. 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 0.011 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 0.13 µSv/h. En extrapolant cette valeur instantanée maximale sur une semaine, il en résulterait une dose supplémentaire par rapport au fond naturel d'environ 0.008 mSv, compatible avec les résultats obtenus à l'aide des TLD.

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

A la clôture du PSI, les contrôles ponctuels de l'IFSN ainsi que l'évaluation des TLD ont mis en évidence des élévations de la dose ambiante pouvant atteindre au maximum 0.005 à 0.006 mSv par semaine (après soustraction du bruit de fond naturel).

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 sti-

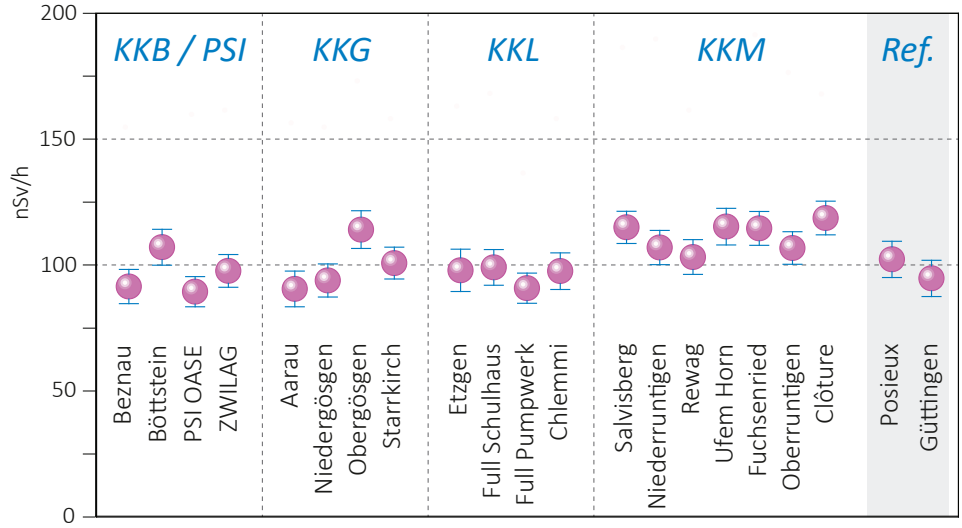


Figure 2:
Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectués en 2022 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).*

pule 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. Il est intéressant de remarquer que les valeurs de débit de dose légèrement plus élevées mesurées aux environs 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 2022 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 0.105 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 2022 (voir aussi chapitre 4.2). Les activités du ^{137}Cs sont ainsi restées inférieures à la limite de détection d'env. 3 à 6 mBq/m^3 (pour une mesure de 12h).

Le ^{137}Cs a par contre été régulièrement décelé dans les filtres aérosols des collecteurs à grand débit (HVS). La limite de détection pour le ^{137}Cs de ce dispositif très sensible, dédié à la mesure de traces, est de l'ordre de 0.2 - 0.3 µBq/m^3 pour un temps de collecte de 7 jours et une mesure en laboratoire de 48h. Le ^{137}Cs mesuré sur nos filtres provient principalement de la remise en suspension dans l'air de particules de sol contaminées par les retombées des essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl en 1986. Ainsi, les concentrations de ^{137}Cs mesurées à la station HVS de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer, ne se sont pas distinguées de celles enregistrées à la station de référence de Güttingen, située hors influence des installations nucléaires. Ainsi, la concentration maximale de ^{137}Cs, mesurée en janvier, a atteint 0.8 µBq/m^3 à Klingnau alors qu'elle était de 1.3 µBq/m3 à Güttingen à la même période.

Des traces de ^{24}Na, un radionucléide de courte demi-vie pouvant être produit dans les accélérateurs de particules du PSI, ont également été sporadiquement mesurées dans les filtres HVS de la station de Klingnau en juin, novembre et décembre. La concentration maximale mesurée s'élève à 118 ± 39 µBq/m^3 et 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 1.5 +/- 1.2 mBq/l à Mühleberg en mai). 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 et de Beznau (jusqu'à env. 17 Bq/l).

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C. Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2022 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 59 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Les doses supplémentaires qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales sont ainsi minimes (inférieures à 1 µSv par an). Notons que cette valeur figure parmi les plus basses enregistrées depuis le début du programme de mesure du ^{14}C au voisinage de la centrale de Leibstadt, il y a plus de 30 ans. Elle s'explique sans doute par l'arrêt prolongé de la centrale entre fin mai et début décembre 2021.

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2022.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)
Niederruntingen * (environs KKM)	< 2.0 - 4.0	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 .0 - 3.0	-
Full (environs KKL) *	< 2 .0 - 2.5	-
Beznau (environs KKB) **	< 1.7 - 16.9	4.4
PSI **	< 1.8 - 13.8	4.2
ZWILAG **	< 1.8 - 6.3	-

* mesures OFSP / ** mesures PSI

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 2022 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 2022. 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.

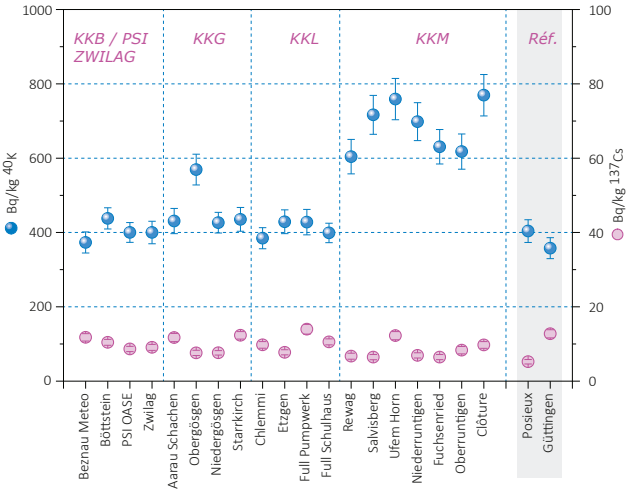


Figure 3:
^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2022 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

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 par la centrale de Beznau 1, il y a une dizaine d'années, la majeure partie des produits d'activation tels que le ^{54}Mn, le ^{58}Co et le ^{60}Co était rejetée dans les eaux fluviales par la centrale de Mühleberg. Mais, depuis 2016, les activités rejetées (hors tritium) par cette dernière ont à leur tour significativement baissé. Comme corollaire à cette diminution des rejets, aucune trace de ^{54}Mn ou des isotopes du cobalt n'a plus été mesurée dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln depuis 2016. A noter qu'en 2022, les rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de Mühleberg, en démantèlement, 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.

Le ^{137}Cs, lui, a été sporadiquement mesuré dans les échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin au cours des dernières années, mais n'a pas été décelé en 2022. Il est essentiellement dû à la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes nucléaires des années 60; il n'existe ainsi pas de corrélation, pour cet isotope, entre les activités rejetées par les centrales et les valeurs mesurées dans les eaux.

La figure 4 montre que de manière générale, les concentrations mensuelles en ^{3}H enregistrées en 2022 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 avril - mai . Comme chaque année à cette période, on constate en effet une légère augmentation des concentrations de tritium dans l'Aar à Brugg (jusqu'à

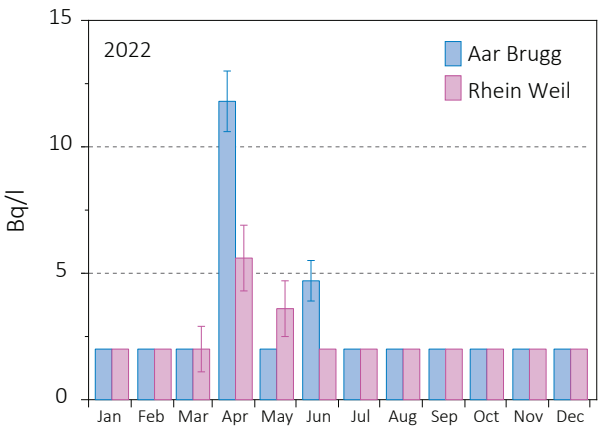


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2022.

11.8 Bq/l en avril) et à Klingnau (jusqu'à 8.6 Bq/l), ainsi que, dans une moindre mesure, dans le Rhin (jusqu'à 5.6 Bq/l à Weil am Rhein) en raison de rejets plus importants de tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant sa révision (voir chapitre 8.1).

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 à une ou deux reprises dans les sédiments prélevés à Hagneck, Klingnau et Pratteln en 2022; de faibles activités de ^{54}Mn ont été décelées plus régulièrement dans les sédiments prélevés dans les 3 stations.

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 dans le Lac de Bienne, l'Aar à Eppenberg-Wöschnau et Beznau, ainsi que dans le Rhin, près de Augst, en 2022 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 les actinides, à l'exception de ^{241}Am dans un poisson du Rhin (Dogern) (0.9 ± 0.3 mBq/kg m.s.). Cette activité est très basse et n'a pu être décelée qu'en raison du fait que la masse sèche (m.s.) disponible pour l'analyse (130 g) était supérieure à celle des autres prélèvements (20 - 80 g m.s.).

Comme chaque année, des échantillons de plantes aquatiques ont également été prélevés en 2022 dans l'Aar (Hagneck), dans le lac du barrage de Klingnau) ainsi que dans le Rhin (Möhlin). Les activités de tous les radionucléides gamma d'origine artificielle, à l'exception du ^{137}Cs (0.33 - 0.71 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 2022, 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 h 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 arti-

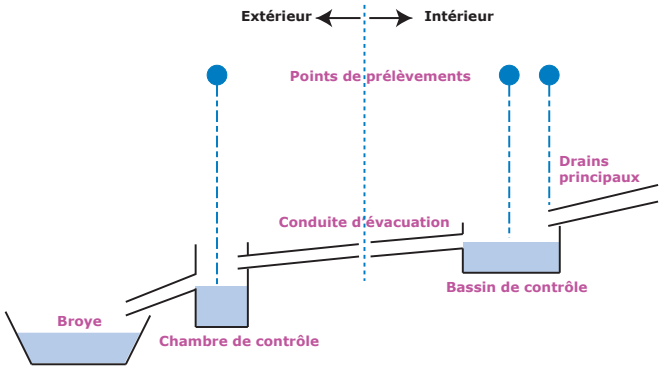


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

ficielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2022. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co, ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.2 à 0.4 Bq/l.

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 2022 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 3.9 ± 0.8 Bq/l et 3.9 ± 1.0 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 2022.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2022.

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

Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que, pour 2022, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose efficace maximale délivrée aux membres du public Suisse est demeurée inférieure à 0.004 mSv. Le contrôle des immissions n'a révélé que de faibles traces de radioéléments dans des échantillons prélevés dans les cours d'eau 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 glossaire relatif aux installations du CERN peut être trouvé en Figure 1.

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 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 manière à ce que seule une fraction infime des rayonnements traverse ces protections ; ce type de rayonnement est nommé rayonnement diffusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Conséquemment, le rayonnement diffusé, les effluents gazeux et liquides sont surveillés en continu.

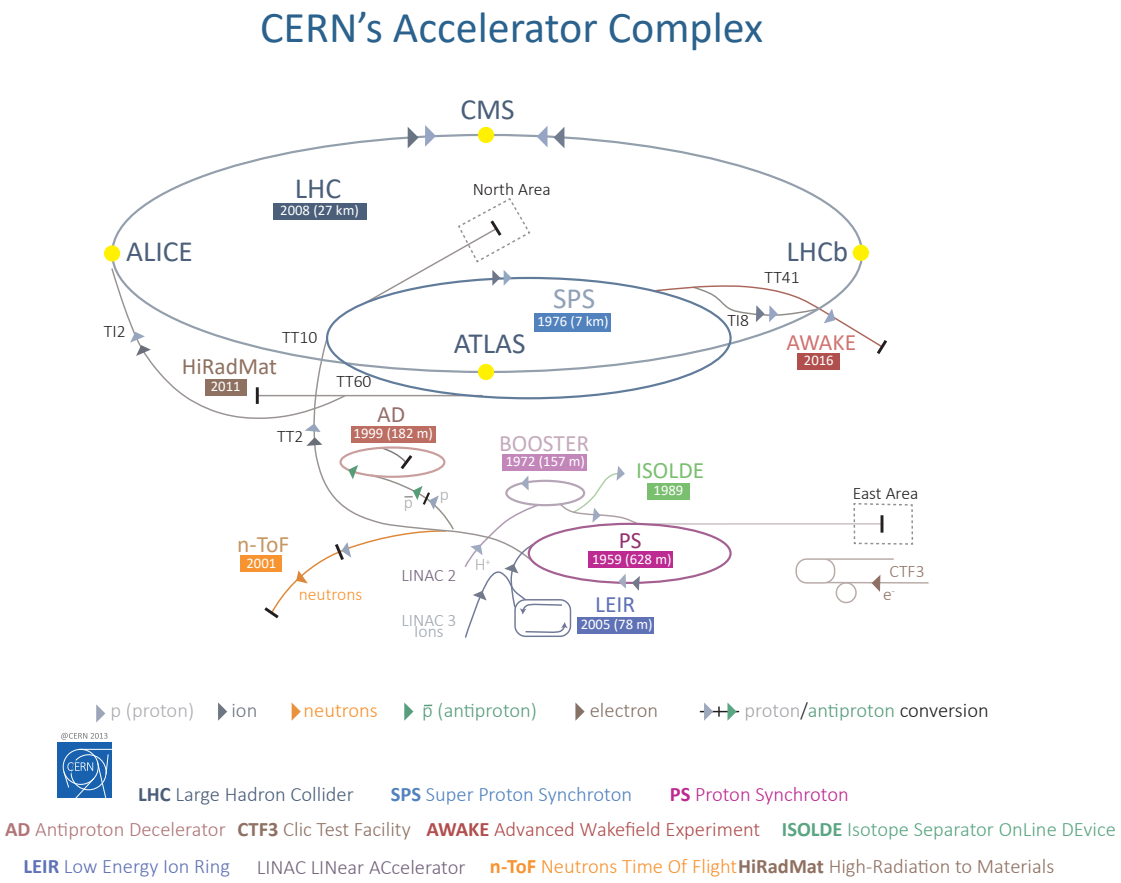


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN.

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 : https://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. Les installations ISOLDE et MEDICIS peuvent par ailleurs continuer d'émettre des petites quantités d'iode ou de gaz radioactifs. Ces derniers sont pompés des circuits sous vide puis provisoirement stockés dans des cuves en vue de leur décroissance avant rejet et seule une fraction des quantités initialement récoltées sont émises.

Programme de surveillance

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnemental, qui est élaboré en tenant compte des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance du rayonnement diffusé se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou 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 2022, 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

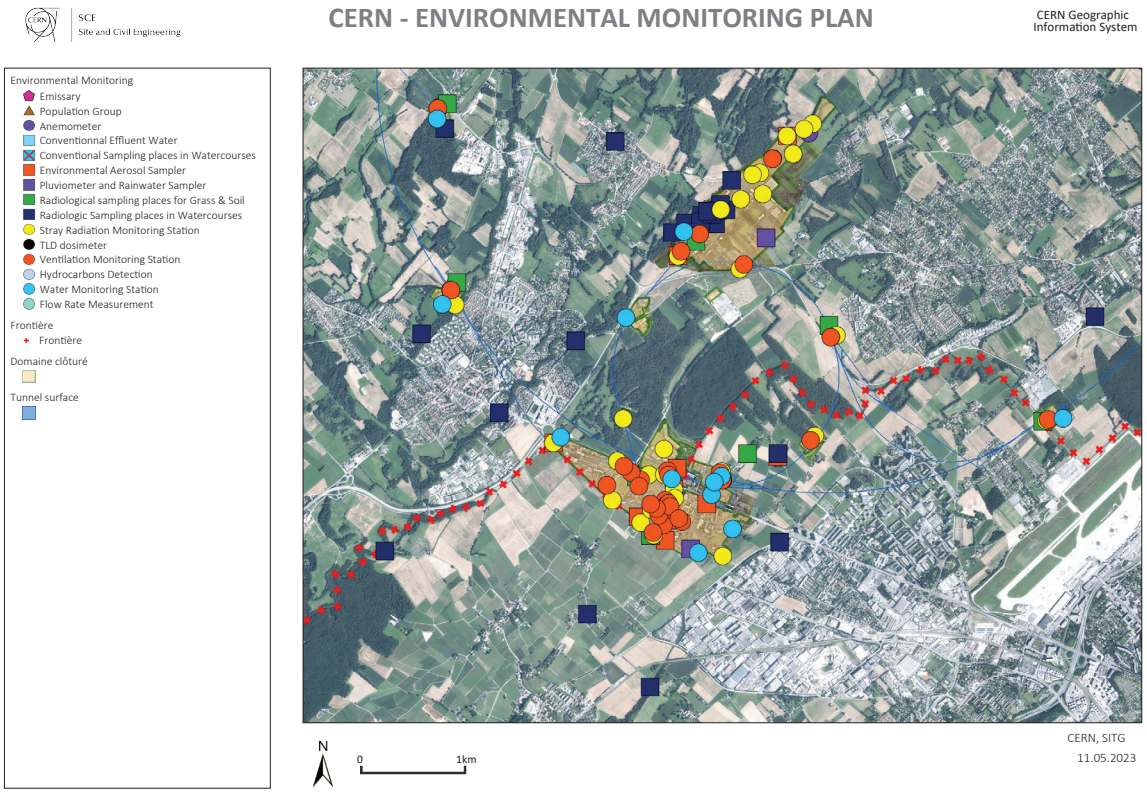


Figure 2:
Région frontalière franco-suisse: sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS) et d'une partie du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonnage du CERN qui concernent le territoire suisse et en partie le territoire français.

filtres périodiquement analysés en laboratoire. En 2022, 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 (14 stations en 2022); 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.

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]. Ces modèles, qui sont basés sur les directives [6, 7], ont été soumis aux autorités suisses et françaises pour approbation.

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 volatiles 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) 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.

Les positions des stations de surveillance des émissions et du rayonnement diffusé ainsi que les points de collecte des échantillons destinés à être mesurés en laboratoire dans le cadre de la surveillance des immissions sont présentés en Figure 2.

Résultats 2022

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2022

En 2022, toutes les installations du CERN étaient en fonctionnement. Après plusieurs mois de remise en service à une intensité de faisceau relativement faible, le LHC était de nouveau pleinement opérationnel. En juillet, des collisions à haute énergie ont été enregistrées à l'énergie inédite de 13.6 TeV.

Rayonnement diffusé

La principale source de rayonnement diffusé du site de Meyrin est le complexe du PS. Une petite fraction des neutrons produits dans les accélérateurs peut diffuser à travers le blindage, gagner en hauteur et interagir avec les composants de l'air. Une partie d'entre eux sont alors redirigés vers le sol. Ce phénomène dit du skyshine contribue à une faible hausse de l'équivalent du débit de dose ambiant en clôtures du site de Meyrin. Les doses gamma sont quant à elles induites par le rayonnement diffusé (muons) et les photons émis par les gaz de demi-vies courtes rejetés par les installations (voir ci-dessous). La Figure 3 présente les doses mesurées par les moniteurs de rayonnement diffusé.

Tableau 1: Rejets radioactifs dans l'air en 2022.

Origine du rejet	$^{11}C, ^{13}N, ^{14,15}O, ^{41}Ar$	^{7}Be aérosols	Bêta aérosols	Tritium	Iodes
	TBq	MBq	MBq	GBq	MBq
LINAC 4	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
PS BOOSTER	0.6	74.0	4.4	2.5	< LD
MEDICIS *	< LD	< LD	< LD	15.0	3.0
ISOLDE	11	< LD	2.7	7.1	1'240
Anneau principal PS	2.4	< LD	< LD	7.3	< LD
TT70 transfert PS-SPS	0.9	< LD	< LD	< LD	< LD
n-TOF	4.1	0.4	0.01	2.3	1.7
Zone est primaire	0.4	< LD	< LD	0.1	< LD
Zone est, IRRAD/CHARM	4.5	51	1.5	0.1	< LD
TT10 injection PS-SPS	3.2	29.0	0.9	3.1	< LD
Evaporation tritium	< LD	< LD	< LD	39.0	< LD
SPS BA5	4.5	0.3	< LD	1.0	< LD
HIRADMAT	0.01	< LD	< LD	3.2	< LD
LHC Machine Secteurs 2->1, 8->1	4.2	< LD	< LD	0.2	< LD

* Les réservoirs de gaz des installations ISOLDE et MEDICIS rejettent ponctuellement leur contenu, après décroissance, via la cheminée de rejet de l'installation MEDICIS.

Tableau 2: Rejets dans les cours d'eau en 2022.

Origine du rejet	Tritium	^{22}Na	$^{11}C, ^{13}N, ^{14,15}O, ^{41}Ar$	^{24}Na	Rejeté dans :
	GBq	MBq	GBq	GBq	
Site de Prévessin, SPS	32	< 0.01	< LD	0.2	Le Lion (F)
Site de Meyrin, Sud-est	0.01	< LD	< LD	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin, Sud-ouest	2.2	< LD	< LD	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin, Ouest	0.03	< LD	< LD	< LD	Le Lion (F)
Site SPS BA6 + site LHC PA1	0.2	< LD	15.0	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA5	< 0.01	< LD	< LD	< LD	Oudar (F)
Site LHC PA7	0.02	< LD	< LD	< LD	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS, rejet par le site du LHC PA8	0.6	< LD	< LD	< LD	Le Nant (F)

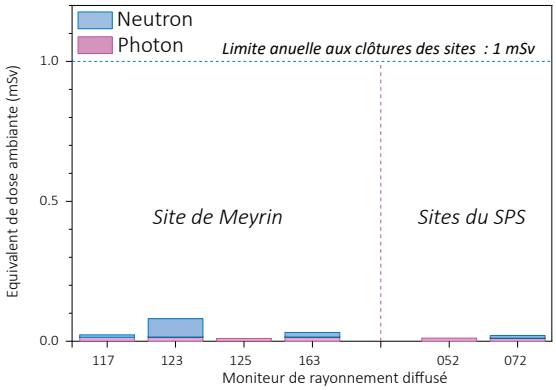


Figure 3:
Equivalents de dose ambiante annuels nets enregistrés par les moniteurs de rayonnement diffusé situés en clôtures (CERN, 2022).

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère qui concernent le territoire suisse 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 minime. 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.

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 2022, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés.

Surveillance des immissions

Les rejets atmosphériques des installations du site de Meyrin ont dérivé en des 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).

Les valeurs susmentionnées étaient bien inférieures aux limites applicables [2]. Le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN peut donc être considéré comme très faible.

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.

Station	^{3}H	^{124}I gaz	^{126}I gaz	^{131}I gaz	^{131}I aérosols
	Bq/m^3				
EAS074	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	$(1.1 \pm 0.9) \times 10^{-5}$
EAS122	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	$(2.0 \pm 1.4) \times 10^{-5}$
EAS123	(0.13 ± 0.08)	$(1.2 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(1.3 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(7.7 \pm 2.3) \times 10^{-4}$	$(1.4 \pm 1.1) \times 10^{-5}$
EAS163	(0.09 ± 0.02)	< LD	$(2.4 \pm 0.8) \times 10^{-4}$	$(5.1 \pm 1.5) \times 10^{-4}$	$(1.6 \pm 1.1) \times 10^{-5}$
EAS164	n.e.	< LD	< LD	$(7.7 \pm 3.7) \times 10^{-5}$	< LD

Tableau 4: Concentrations mesurées dans les échantillons prélevés ponctuellement dans les cours d'eau.

Cours d'eau	Date	Code eau rivière	^{3}H (Bq/l)	Code bryophytes	^{54}Mn (Bq/kg sec)
Lion (F)	23.09.2022	RWLI5	22 ± 2	RMLI5	8 ± 3
Lion (F)	22.09.2022	RWLI7	4 ± 1		
Allondon (F/CH)	22.09.2022	RWAL3	4 ± 1		
Nant (F)	22.09.2022	RWNT2	9 ± 1		

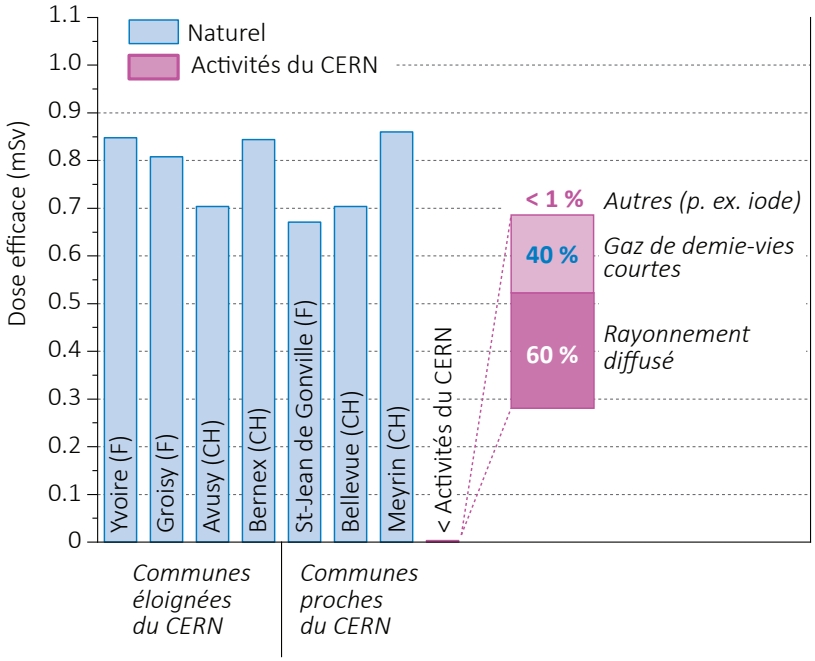


Figure 4:
Contribution à la dose efficace annuelle des activités du CERN sur le site CERN de Meyrin, comparée aux variations des doses externes naturelles dans des communes françaises et suisses.

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du public Suisse 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 est restée inférieure à 0.004 mSv

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 2022 et à l'instar des 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 bien inférieures aux limites d'immission applicables [2]. 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 0.004 mSv avec la dose efficace annuelle mesurée en plusieurs localités proches et éloignées des sites CERN.

Références

[1] Code F Rev., Radioprotection CERN (2006).

[2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2022), Annexe 3.

[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).

8.7 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 2022 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 que toutes les installations du CERN étaient en fonctionnement en 2022. Après plusieurs mois de remise en service à une intensité de faisceau relativement faible, le LHC a été pleinement opérationnel à partir du 2ème trimestre 2022.

Mesures de l'exposition ambiante

Douze sites ont été surveillés en 2022 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 2022, les équivalents de dose ambiants des neutrons et des photons relevés dans les emplacements autour du CERN sont restés faibles, de l'ordre de l'irradiation naturelle (0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons et environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas). Au 2ème,

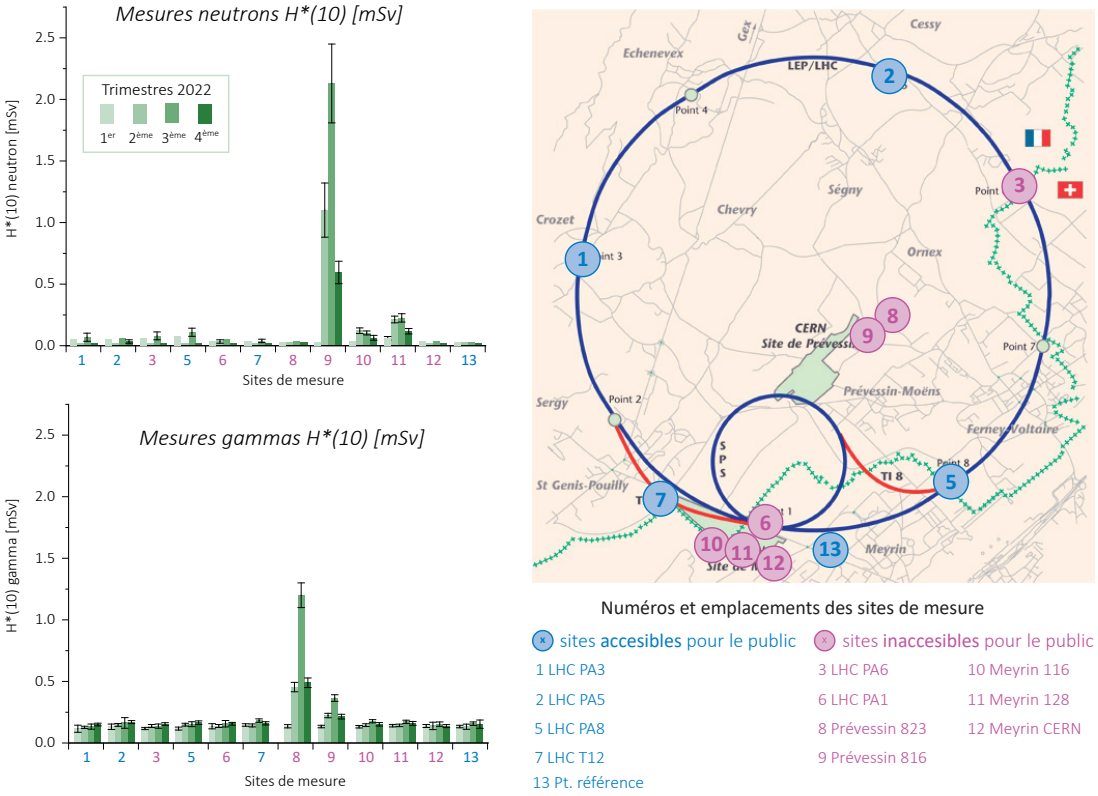


Figure 1:
Relevé trimestriel de l'équivalent de dose ambiant H(10) en mSv sur différents sites de mesure au CERN pour les neutrons et les gammas en 2022.*

mais surtout au 3ème trimestre, en revanche, 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 0.23 mSv par trimestre pour les points 10 et 11) et atteignant des valeurs particulièrement élevées à Prévessin (point 9), situé sur le territoire français (jusqu'à 2.1 mSv au 3ème trimestre). Au 4ème trimestre, les doses de neutrons ont bien diminué (facteur 2 à 3.5) et se sont situées à des niveaux déjà enregistrés par le passé. Ces résultats montrent que des valeurs plus élevées de dose de neutrons peuvent être enregistrées quand les installations sont en fonction, à proximité immédiate des expériences. Toutefois, ces dosimètres étant placés à l'intérieur du territoire clôturé du CERN, l'exposition de membres du public peut être exclue. Les données présentées sont par ailleurs issues d'un système dosimétrique simple, offrant une vue d'ensemble des niveaux de neutrons détectés. Les barres d'incertitude reflètent la dispersion des valeurs mesurées, et non la réponse en énergie du système, qui peut conduire à une surévaluation de la dose mesurée, typiquement d'un facteur 3 à 5.

En ce qui concerne les doses des photons, une valeur plus élevée (0.45 mSv) a également été observée au 2ème trimestre à Prévessin (mais au point 8). Cette valeur a encore significativement augmenté au 3ème trimestre pour atteindre 1.2 mSv. Au 4ème trimestre, la dose des photons au point 8 est à nouveau similaire à celle du 2ème semestre. Des doses des photons correspondant à 2 à 3 fois l'irradiation naturelle ont également été mesurée au point 9 à Prévessin au 3ème trimestre, au-dessus d'une ligne de transfert de faisceau. Le reste de l'année et dans toutes les autres stations, les doses des photons sont restées au niveau de l'irradiation naturelle.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 2) en septembre 2022, 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 84 et 105 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 99 ± 4 nSv/h; moyenne des sites distants 97 ± 6 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 2022. Les nouveaux moniteurs spectrométriques permettent de mesurer en continu les concentrations individuelles des différents émetteurs gamma présents dans l'air (aérosols) (voir cha-

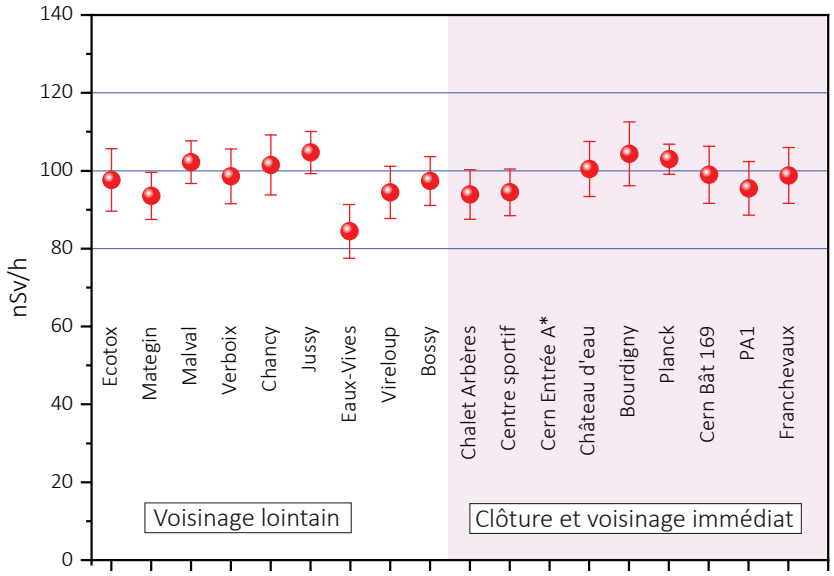


Figure 2:
Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectuées par l'OFSP en 2022 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol (* pas de mesure en 2022).*

pitre 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 inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 3 à 7 mBq/m^3 pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2022. Le moniteur d'iode gazeux 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 50 - 60 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 2022 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 2022 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)*	1.6 - 8.0	4.1 ± 1.5
Posieux/FR	2.1 - 9.0	4.5 ± 1.6
Klingnau/AG	1.7 - 8.4	3.9 ± 1.4
Güttingen/TG	1.9 - 8.7	4.1 ± 1.6
Cadenazzo/TI	1.6 - 7.6	4.7 ± 1.5

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 0.7 ± 0.2 µBq/m^3 en janvier) 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 (^{125}I, ^{126}I et plus fréquemment d'^{131}I: 0.5 à 15 µBq/m^3) ainsi que quelques traces de ^{24}Na (40 - 80 µBq/m^3) ont également été décelées dans les filtres aérosols en 2022.

Ces radioisotopes de courte demi-vie (15 h pour le ^{24}Na, 4 jours pour le ^{124}I, 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,

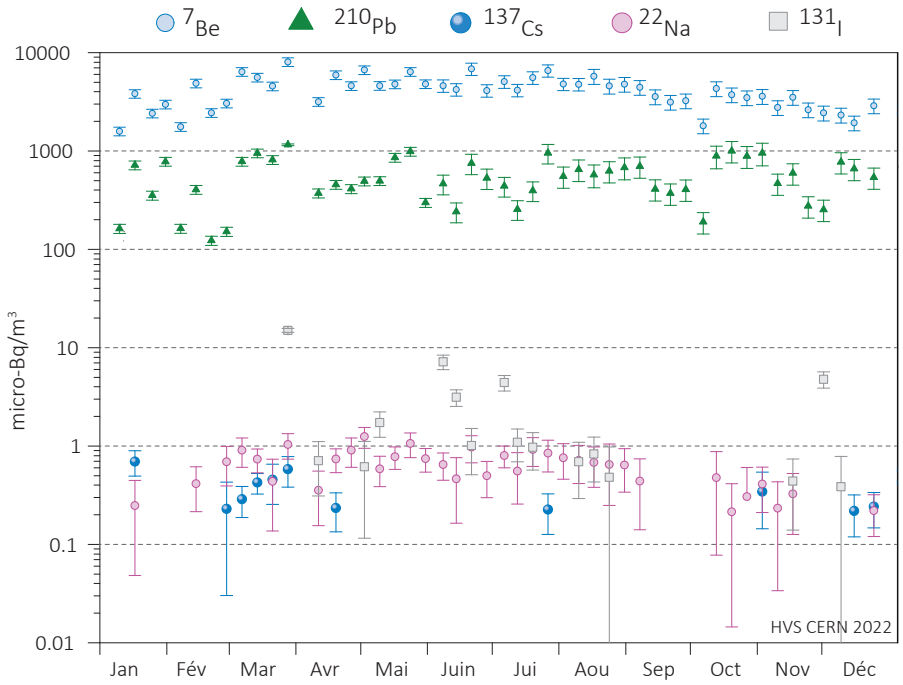


Figure 3 :
Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2022.

prédominante, n'est pas fixée sur les filtres, il est possible de conclure que l'impact radiologique de ces radionucléides sur la population avoisinante est resté très faible. En effet, sur la base des mesures effectuées par le CERN, la concentration d'^{131}I gazeux peut être estimée à environ 100 fois celle de l'^{131}I particulaire ; la concentration totale maximale d'iode dans l'air peut être évaluée à env. 2 mBq/m^3 (période du 21 au 28 mars 2022), soit environ 0.2 % de la limite d'immissions dans l'air pour l'iode 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 50 à 60 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.

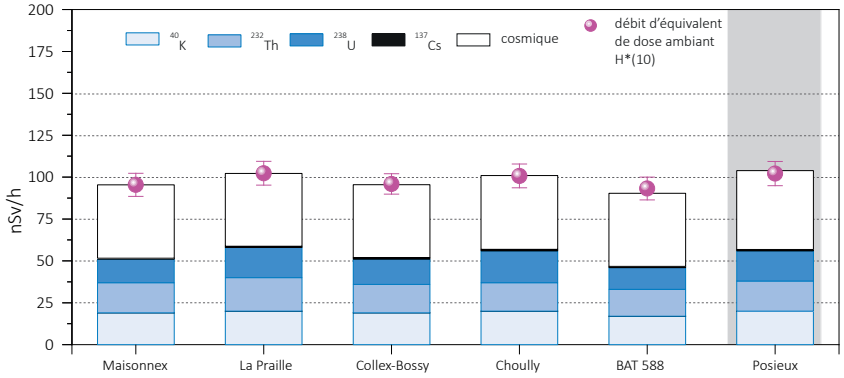


Figure 4 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2022. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre 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 similaires 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).

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 ce constat. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioéléments d'origine natu- relle, dont les concentrations prédominent, on y détecte encore les traces des injections artificielles des essais nu- cléaires 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 2022. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs inférieures ou voisines de 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 spécifique1[1].

26 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) dans le Nant d'Avril entre le 12 novembre 2021 et le 23 novembre 2022, avec un temps d'intégration de 13.7 ± 3 jours par échantillon. A noter que certaines périodes (26.11. - 01.12.21, 29.12.21 - 14.01.22; 18.02 - 25.02.22; 16.05 - 10.06.22; 22.08 - 01.09.22) ne sont pas couvertes à la suite de pannes de l'échantillonneur.

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 0.36 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ^{7}Be (1.78 ± 0.06 Bq/l) a été mesurée au mois de juin 2022. Le ^{22}Na n'a été détecté dans aucun échantillon au cours de l'année sous revue.

1 *J.-L- Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°23 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2021 - Novembre 2022; Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Janvier 2023).*

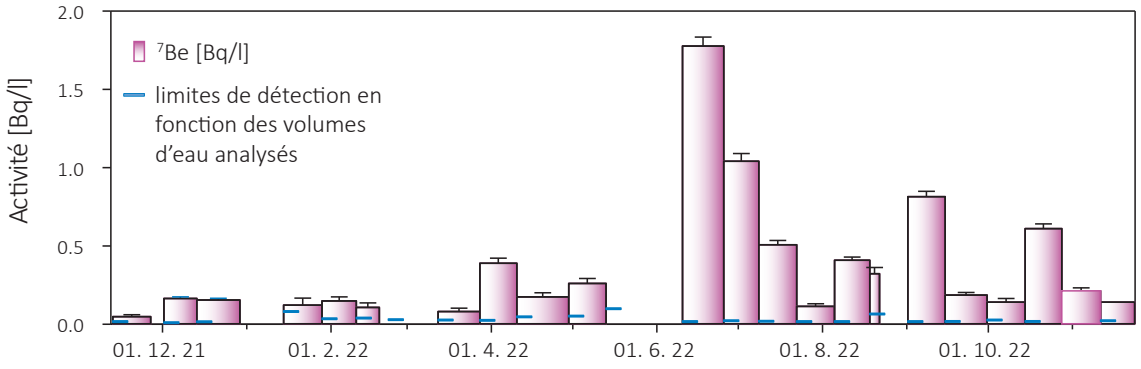


Figure 5:
Activité du ^{7}Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'avril entre novembre 2021 et novembre 2022.

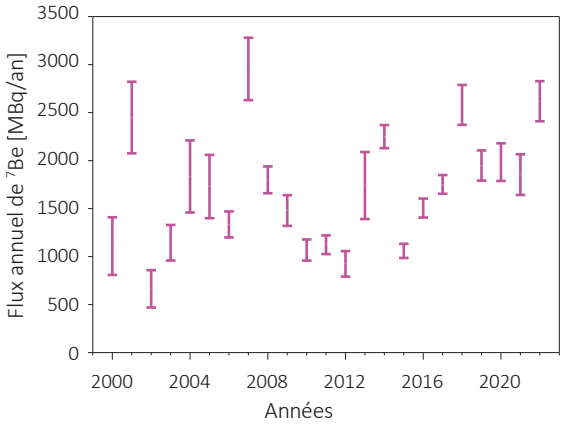


Figure 6 :
Estimation des flux annuels minimums et maximums de ^{7}Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

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 0.015 ± 0.002 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.

Le flux de ^{7}Be s'écoulant dans le Nant d'Avril au point de mesure pour la période 2021 - 2022 peut ainsi être estimé à 2'410 MBq/an au minimum et 2'829 MBq/an au maximum. Ces valeurs sont nettement supérieures à la moyenne des années précédentes, se situant parmi les quatre années les plus élevées (figure 6). Ceci s'explique notamment par le fait que le débit annuel moyen du Nant d'Avril en 2021- 2022 s'est élevé à 0.357 m^3/s, soit davantage que les années précédentes (moyenne de 0.25 m^3/s entre 2011 et 2020), essentiellement en raison des très hauts débits enregistrés en décembre 2021.

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 447 et 1'348 Bq/kg, et entre 3.8 et 9.2 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 27 septembre au 25 octobre 2022. Les pièges ont été emportés par une crue sur les points PA5 à PA8, sur lesquels de nouveaux pièges ont été exposés entre le 25 octobre et le 11 novembre 2022. Des bryophytes ont par ailleurs été prélevées le 27 septembre. En raison de l'absence de bryophytes sur les points PA7 et PA8, aucune mesure de bryophyte n'a pu être effectuée sur ces sites. Des algues filamenteuses sur le point PA8 ont été prélevées et analysées. Notons que le LHC a redémarré à pleine puissance au printemps 2022 pour le Run 3 et était en opération pendant la période de prélèvement.

Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux points de rejet du LHC se sont échelonnées entre 292 et 2'390 Bq/kg pour le ^{7}Be et entre 2.4 et 8.6 Bq/kg pour le ^{137}Cs. Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^{7}Be variant entre 459 et 1'657 Bq/kg; une seule valeur s'élevant à 6.3 Bq/kg a été mesurée pour le ^{137}Cs, les autres sites présentant des valeurs inférieures à la limite de détection.

La comparaison (figure 6) 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 peuvent pas mettre 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 pouvant provenir du CERN n'a été détectée dans les eaux du Nant d'Avril au cours de l'année sous revue, contrairement à l'année précédente. Les autres radioéléments parfois détectés dans le Nant d'Avril au cours des périodes de surveillance précédente, 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 2022.

Les valeurs plus élevées de débit de dose ambiante mesurées localement à Prévessin, à l'intérieur de la clôture sur territoire français, n'ont pas conduit à une exposition significative de la population car aucune personne n'y séjourne pendant de longues périodes.

Si des traces des radionucléides de courte demi-vie, produits par les installations du CERN, comme les isotopes d'iode, ont sporadiquement pu être décelées dans l'air au voisinage du CERN en 2022, elles témoignent essentiellement de la sensibilité des méthodes de mesures 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



Industrien
Spitäler

- Emissions des industries
- Emissions des hôpitaux
- Surveillance au voisininage 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

2022

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 2012 - 2022.

	Isotope	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	Einheit
Produktions betriebe	^{3}H	10.3	12.3	12.11	11.26	12.75	7.31	10.54	5.74	4.07	7.53	15.11	PBq
	^{14}C	0.37	0.19	0.26	0.26	0	0	0.07	0	0.74	0.58	0.19	TBq
	^{147}Pm	0.01	0	0.07	0	0	0	0	0	0	13.03	5.76	TBq
Forschungs-betriebe	^{3}H	7.6	0.1	7.4	0.2	7.6	7.6	3.8	7.6	0.2	11.4	18.8	TBq
	^{14}C	31.7	10.4	51.1	35.4	21.3	17.1	41.3	53.9	158.9	76.0	192.6	GBq
	^{32}P	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.9	0.5	0.9	0.9	1.4	1.0	GBq
	^{35}S	0	0.2	0	0	0	1.4	1.4	2.4	2.4	3.7	2.0	GBq
	^{51}Cr	0	0	0	0	0	0	0.3	0.1	0	0	0	GBq
	^{125}I	0.2	0.1	0	0.2	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	14.1	12.1	GBq
Analytische Laboratorien	^{125}I	0.06	0.05	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	GBq

Forschungsbetriebe (Total 36 Betriebe)

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

Medizinisch-analytische Laboratorien (Total 4 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 2022 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 ver-brannt 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 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 wird 2023 wieder fortgesetzt. In Tabelle 4 sind die bewilligten Jahresabgabelimiten der drei Produktionsbetriebe zusammengefasst.

Tabelle 2a :
Abgabe radioaktiver Stoffe an die Abluft während des Jahres 2022 (GBq).

	Abgaben an die Abluft (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	^{3}H	^{14}C	^{3}H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	61.056 (org.) 0 (Gas)	2.992	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 2022 (GBq).

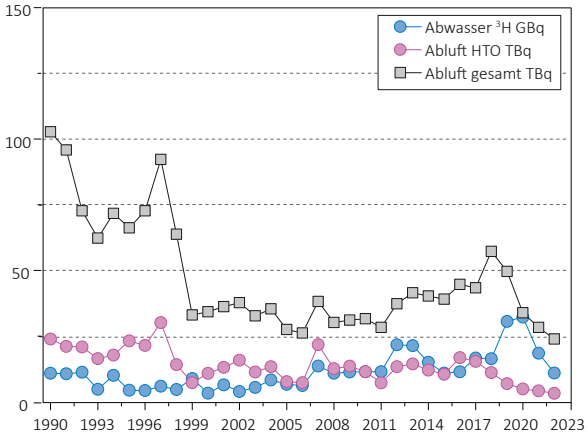
	Abgaben an das Abwasser (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	^{3}H	^{14}C	^{3}H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	1.361	0.114	80	40
Novartis Pharma AG	0.583	0.023	300	30

Tabelle 3 :
Verbrennung in einem Ofen mit Zustimmung des BAG gemäss StSV, Art. 116 während des Jahres 2022 (GBq).

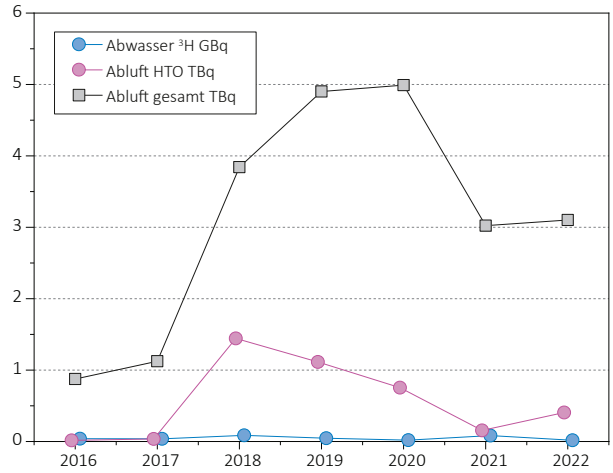
	^{3}H (GBq)	^{14}C (GBq)
Veolia Basel	421.7	86.1
KVA St. Gallen	439.3	0
KVS Dottikon	0	1.7
Energie Wasser Bern	10.6	13.9
Renergia Perlen	0	0.00069
ZAB Bazenheid	5.0	0

Tabelle 4 :
Jahresabgabelimiten der Produktionsbetriebe.

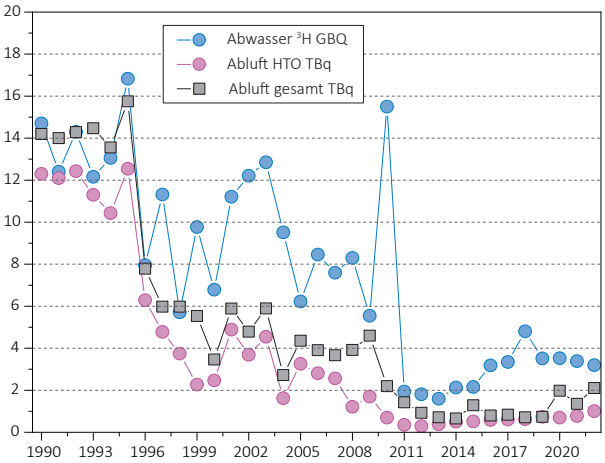
	Abwasser	Abluft	
	^{3}H	^{3}H (HT)	^{3}H (HTO)
MB-Microtec AG, Niederwangen / BE	40 GBq	370 TBq	37 TBq
Smolsys AG, Root / LU	1.3 GBq	40 TBq	4 TBq
RC-Tritec AG, Teufen / AR	20 GBq	7.5 TBq	7.5 TBq



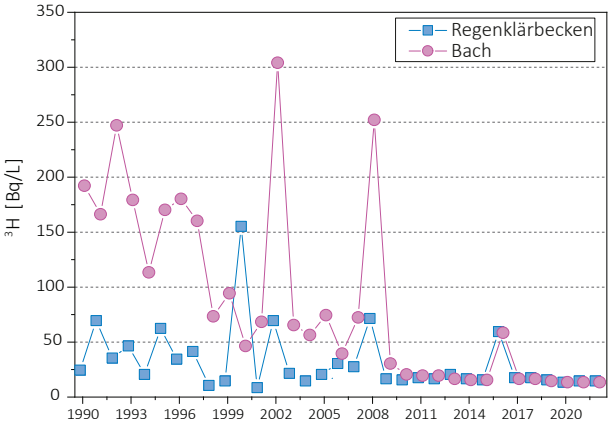
Figur 1a :
Mb-microtec AG, Niederwangen/BE: Jahreswerte der Emissionen. Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



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

Nach der starken Zunahme der therapeutischen Anwendungen mit ^{177}Lu und ^{90}Y im Jahre 2021 ist im Berichtsjahr 2022 nur noch eine leichte Erhöhung der ^{177}Lu Therapien feststellbar. Pandemiebedingte Verschiebungen von therapeutischen Anwendungen im Jahr 2020 führten zu einem erhöhten Umsatz von Radionukliden im Jahr 2021. Das ist erkennbar am besonders starken Anstieg von ^{177}Lu von 2020 zu 2021 und am Maximum von ^{131}I und ^{90}Y im Jahr 2021, wobei bei ^{90}Y vermutlich auch fehlerhafte Meldungen zum Wert von 2021 beitragen haben. Die Abgabe der zu diagnostischen Zwecken verwendeter Radionuklide wie Technetium 99m (^{99m}Tc) oder Fluor 18 (^{18}F) ans Abwasser unterliegt keiner systematischen Kontrolle, 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 applizieren 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 dienen später zur Festlegung von Aufsichtsschwerpunkten.

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 (neuroendokrine Tumore und PSMA) müssen Patienten bis zu ihrer Entlassung mindestens 48 Stunden hospitalisiert werden. Die Ausscheidungen der hospitalisierten Therapiepatienten werden in speziell dafür vorgesehenen Abwasserkontrollanlagen gesammelt und erst nach dem Abklingen unterhalb der bewilligten Abgabelimite an die Umwelt (Abwasser) abgegeben.

Andere Radionuklide wie zum Beispiel ^{90}Y, ^{166}Ho oder ^{223}Ra werden bei Patienten mit einer Tumorerkrankung zur Therapie verwendet sowie bei rheumatischen Erkrankungen zur Entzündungshemmung und Schmerzlinderung in Gelenke appliziert. Die Applikation erfolgt dabei 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

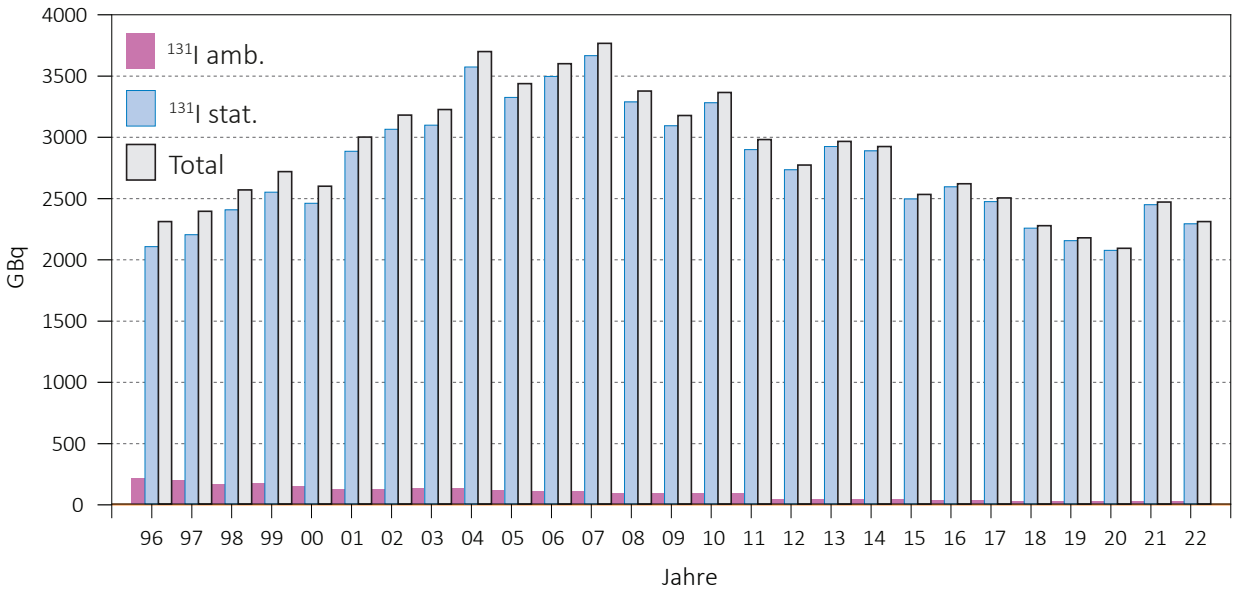
Gewässer (IGGw) nicht überschreiten. Die in der Praxis durch das BAG bewilligte Abgabelimite für ^{131}I beruht auf den Angaben bezüglich der gesamten Abwassermenge des jeweiligen Betriebs und der zusätzlichen Verdünnung in der Abwasserkläranlage. Die Einhaltung der oben erwähnten Abgabelimiten gewährleistet, dass die geltenden Immissionsgrenzwerte in öffentlichen Gewässern zu keiner Zeit überschritten werden. Werden andere Nuklide als ^{131}I über die Abwasserkontrollanlage 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 laufend organisatorische und technische Optimierungsmassnahmen vorzunehmen..

Tabelle 1:
Applikationen radioaktiver Stoffe zu therapeutischen Zwecken 2022 in MBq.

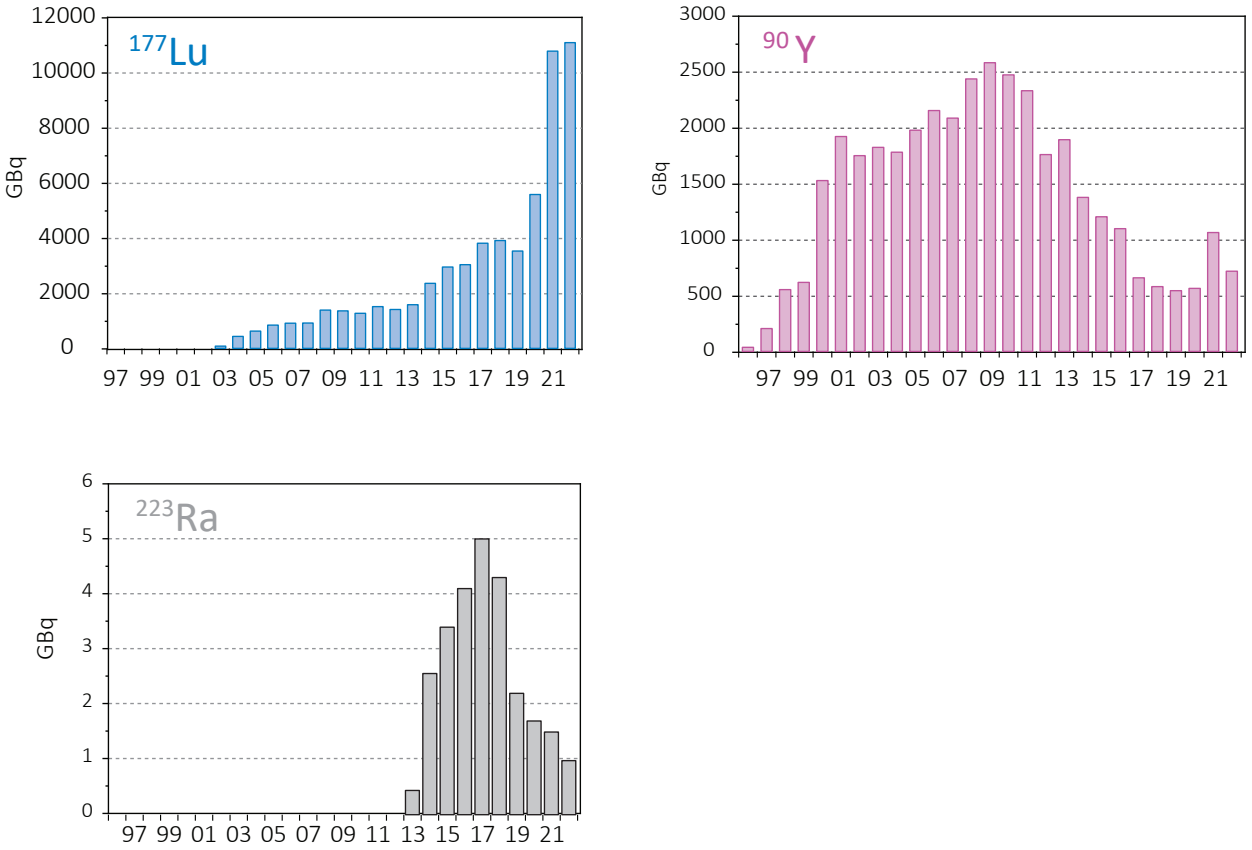
Spital	^{131}I amb.	^{131}I stat.	^{131}I Total	^{186}Re	^{169}Er	^{90}Y	^{177}Lu	^{223}Ra	^{166}Ho
Kantonsspital Aarau AG						5’200		39.1	
Kantonsspital Baden, Nuklearmedizin		60’600	60’600			4’090	413’000	20.0	
Hirslanden Klinik Linde AG	400		400						
Insel Gruppe AG		276’000	276’000	148	37.0	30’000	1’800’000	2.00	
Kantonsspital Baselland Liestal	200		200			2.07		26.5	
Kantonsspital Baselland Bruderholz						2.07			
St. Claraspital						12’400			
Universitätsspital Basel		270’000	270’000			1’490	3’090’000	58.6	91’500
HFR Fribourg		124’000	124’000	206		576		13.4	
Hopitaux Universitaires de Gèneve		174’000	174’000	72.0		55’100		47.3	
Hôpital de la Tour	200		200			168			
Kantonsspital Graubünden	3’540	50’900	54’500			2’960			
Hirslanden Klinik St. Anna		64’300	64’300	78.0		51’300	1’370’000	24.6	
Luzerner Kantonsspital AG		131’000	131’000			40’800	417’000	1.05	
Réseau hospitalier Neuchâtelois	2’120		2’120					22.9	
Kantonsspital St. Gallen	1’660	187’000	189’000	2.22	110	10’600	1’380’000		
Solothurner Spitäler AG						165		33.4	
Spital Thurgau AG Münsterlingen		47’900	47’900						
Ente Ospedaliero Cantonale	200	118’000	118’000	203	98.0	30’800	222’000	80.6	
Clinique de La Source	1’620		1’620					26.8	
Centre Hospitalier Universitaire	435	134’000	134’000	76.5		161’000	1’940’000	30.1	
Hôpital du Valais		44’600	44’600						
Klinik Hirslanden Zürich						210’000		55.0	
Universitätsspital Zürich	12’800	149’000	162’000	111	222	44’200	459’000	4.0	
Kantonsspital Winterthur		211’000	211’000			16’100		14.7	
Stadtspital Zürich Triemli		246’000	246’000			4’720		66.5	9’600
Schilddrüsen-Praxis Zürich	175		175						
Clinique de Genolier								3.46	
Hirslanden Salem Spital						574			
Hopital Riviera Chablais						35’800			
Imagerie Moleculaire Gèneve	102		102						
Lindenhofgruppe, Engeried								69.7	
Vetsuisse-Fakultät Universität Bern		2’380	2’380						
Gesamte Schweiz 2022	23’400	2’290’000	2’310’000	1’120	467	718’000	11’100’000	941	101’000

Tabelle 2:
Abgabe von ^{131}I Äquivalenten aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2022 in MBq.

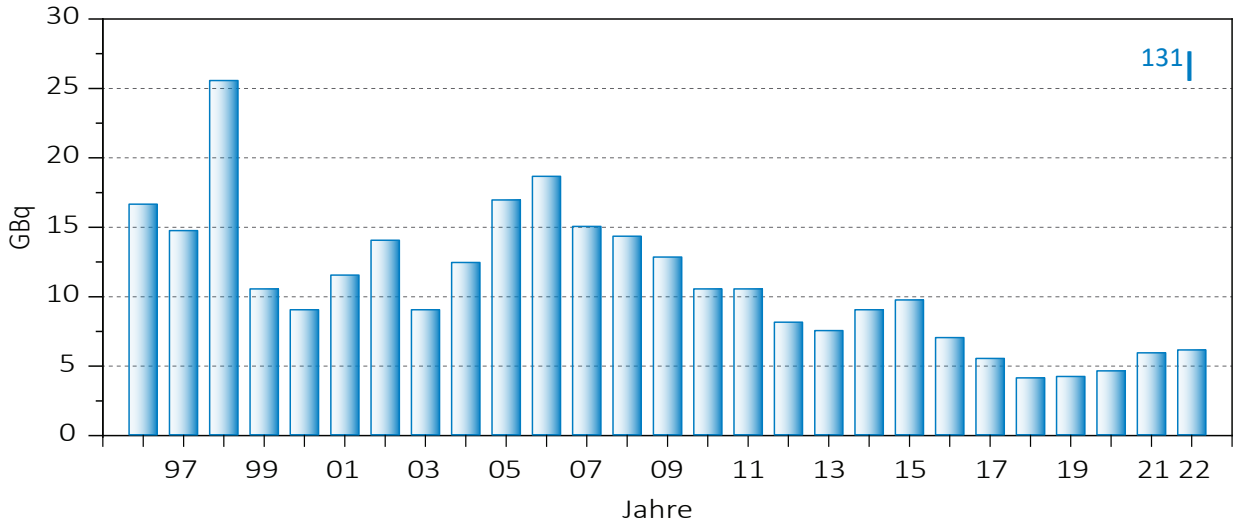
Abgabe MBq/ Monat Nuklearmedizin	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Total 2022
CHUV	6.7	14.3	0.9		15.6	8.8	24.8	2.5	6.4	3.9	46.6	34.6	165.1
Ente Ospedaliero Cantonale			0.2	0.5	0.6	1.5		0.6		0.1			3.4
HFR Fribourg	5.7		0.8	15.2		4.1	2.0	1.4		0.5			29.7
Hirslanden Klinik St. Anna	3.5	21.9	3.7		4.3	15.5	9.7	9.6		2.1	4.7	16.5	91.6
Hôpital du Valais		0.2	0.4	2.1		4.8	6.6	3.5				4.1	21.7
Hôp.Universitaires de Genève	8.8		606.7	29.6	40.0	0.3		67.8			0.2	5.9	759.3
Insel Gruppe AG	9.7	4.9		14.2	4.4	45.4	42.1	25.9	52.2	17.5	31.5	22.4	270.3
KSpt. Baden, Nuklearmedizin	36.5	13.8	22.3	22.3	35.4	14.9	18.7	23.1		5.2	16.2	16.9	225.3
Kantonsspital Graubünden	10.2			0.3			1.5				21.3		33.4
Kantonsspital St. Gallen	8.8	1.9	27.0	9.1	55.3	23.0	105.8	4.1	35.4	20.7	3.8	5.6	300.4
Kantonsspital Winterthur	1.5	3.0	2.5	17.3		8.8	14.3	3.9	2.9	11.6	8.5	6.8	81.1
Luzerner Kantonsspital AG	3.6			8.7		15.7		13.9	9.9	13.5	13.0	4.8	83.2
Spital Thurgau AG													
Stadtspital Zürich Triemli	1.4	2.1	3.0		1.8	0.8	2.1	2.5	2.3	0.9	2.3	2.1	21.3
Universitätsspital Basel	424.6	334.4	318.9	382.0	440.2	370.5	359.9	266.7	247.7	377.3	303.4	234.2	4'059.8
Universitätsspital Zürich		0.3	0.9			0.1				1.8			3.1
												Gesamte Schweiz 2022 MBq	6'148.8



Figur 1:
Umsatz 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 2022 au voisinage des entreprises utilisatrices de tritium ont montré, comme par le passé, un marquage significatif de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) par ce radionucléide, à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier à Niederwangen. La réduction globale des émissions de tritium dans l'environnement par l'entreprise concernée depuis 2 ans a toutefois conduit à une forte baisse des niveaux de tritium enregistrés en 2022 dans les denrées alimentaires prélevés à Niederwangen par rapport aux années précédentes.

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 2022, notamment dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz/ZH, en raison de l'incinération de déchets contenant de grandes quantités de tritium éliminés illégalement, ou dans une moindre mesure dans les eaux de la STEP de Bâle. Aucun de ces événements n'a toutefois 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. Les autorités de surveillance vérifient 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 essentiellement d'excréments 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 ainsi qu'en 4 endroits distincts à Niederwangen/BE. La concentration en tritium des échantillons provenant de ces stations est analysée tous les 15 jours.

Les résultats 2022 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 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 a révélé un marquage significatif de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier de mb Microtec à Niederwangen. Les différentes améliorations techniques engagées par cette entreprise depuis 2020 lui ont toutefois permis de réduire ses émissions, se traduisant par une forte diminution des concentrations de tritium enregistrées dans les précipitations en 2020 et 2021 (figure 2). Les niveaux de tritium mesurés dans les échantillons de précipitation prélevés en 2022 à proximité de l'entreprise ont confirmé cette tendance, hormis en novembre, où des valeurs significativement plus élevées ont été enregistrées dans les quatre stations de surveillance (entre 2 et 4 fois supérieures aux valeurs maximales de 2021 des différentes stations). La valeur la plus élevée (2'040 Bq/l) a été relevée dans l'échantillon prélevé à proximité immédiate de l'entreprise (station Firma; figure 1). Cette valeur correspond à 10% de la valeur limite d'immissions, fixée à 20'000 Bq/l pour ce radionucléide dans l'ORaP pour les eaux accessibles au public. Ces augmentations résultent d'une hausse des émissions de tritium par l'entreprise, liée au conditionnement de produits défectueux; ces rejets sont toutefois restés bien inférieurs aux limites autorisées. La valeur observée en novembre à la station de mesure de l'Université de Berne (voir figure 2 du chapitre 4.6), qui s'élève à 640 Bq/l, est comparable à celles enregistrées pendant cette période dans les stations Bauernhaus, Garage et Gemeinde Köniz de l'OFSP. Ces quatre stations sont plutôt situées sur les versants de la vallée de Wangen. La station Firma en revanche se trouve dans l'axe de la vallée, c'est pourquoi on y observe souvent des concentrations plus élevées.

Tableau 1 :
Tritium dans les précipitations au voisinage des entreprises utilisatrices de ^{3}H en 2022.

**En raison du manque de précipitation, il n'y a en effet pas eu d'échantillons entre le 01.03 et le 29.3 et entre le 11.04 et le 22.4.22. Ainsi 22 échantillons ont été prélevés aux stations de Bauernhaus et Garage en 2022. A Firma, l'échantillon du 21.11 au 06.12 a été détruit accidentellement par une entreprise de réparation du toit. 21 échantillons ont donc été analysés. Par ailleurs, la station de Köniz a été en rénovation entre le 15.08 et le 12.10.22 et seuls 18 échantillons ont donc pu être prélevés dans cette station.*

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Mediane/ moyenne (Bq/l)
Root / LU ~ 250 m SO Smolsys	<5.0- 17	8 / 7
Teufen/AR ~ 65 m E Firma RCT	14 - 146	45 / 55
Niederwangen/BE*		
Bauernhaus ~ 100 m SO de l'entreprise	14 - 822	42 / 86
Garage ~ 200 m O de l'entreprise	7.5 - 591	29 / 60
Gemeinde Köniz ~ 330 m N de l'entreprise	13 - 886	39 / 111
Firma Schär ~ 260 m NE de l'entreprise	69 - 2'357	273 / 469

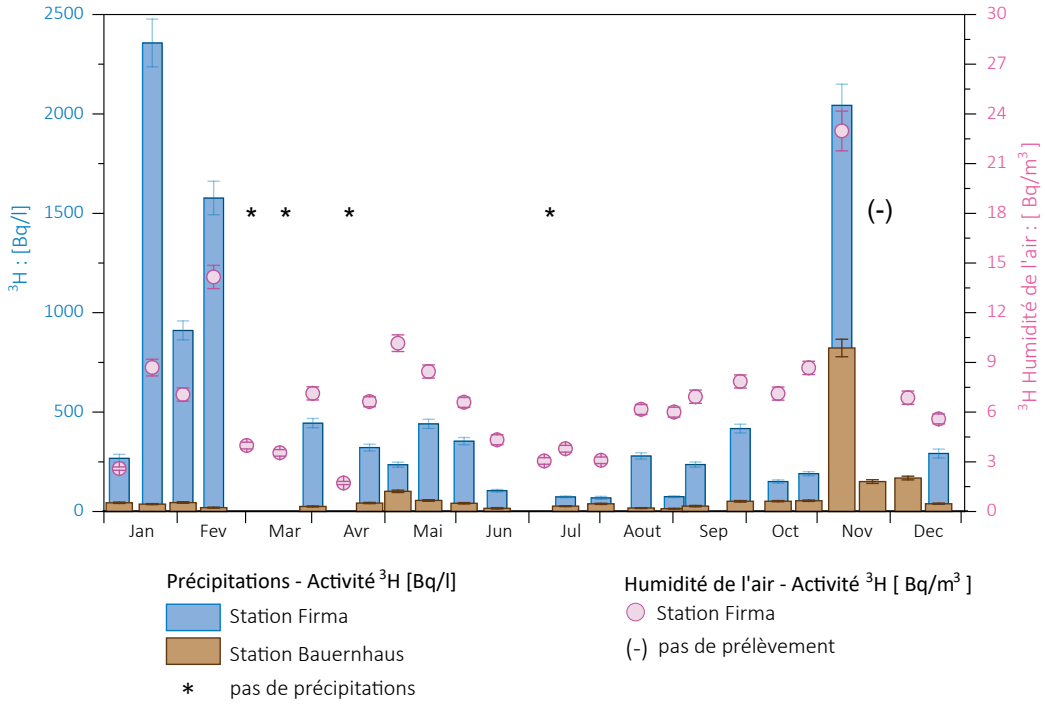


Figure 1 :
Concentrations de tritium [Bq/l] enregistrées en 2022 dans les précipitations des stations de collecte «Bauernhaus» (située à 100 m au sud de l'entreprise) et «Firma» (située à 260 m au nord-est de l'entreprise) et concentration de tritium dans l'humidité de l'air [Bq/m^3] à la station de «Firma».

Notons par ailleurs qu'une concentration de tritium de 2'400 Bq/l a été mesurée fin janvier dans l'échantillon prélevé à la station Firma. Elle est probablement due à des conditions météorologiques particulières, car les valeurs enregistrées au cours de la même période aux trois autres stations sont restées très faibles et les émissions déclarées par l'entreprise au niveau habituel. La quantité de précipitation prélevée localement était en effet particulièrement faible.

Les concentrations de tritium mesurées dans l'environnement (précipitations) dépendent en effet non seulement des quantités de tritium rejetées dans l'atmosphère (émissions), 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.

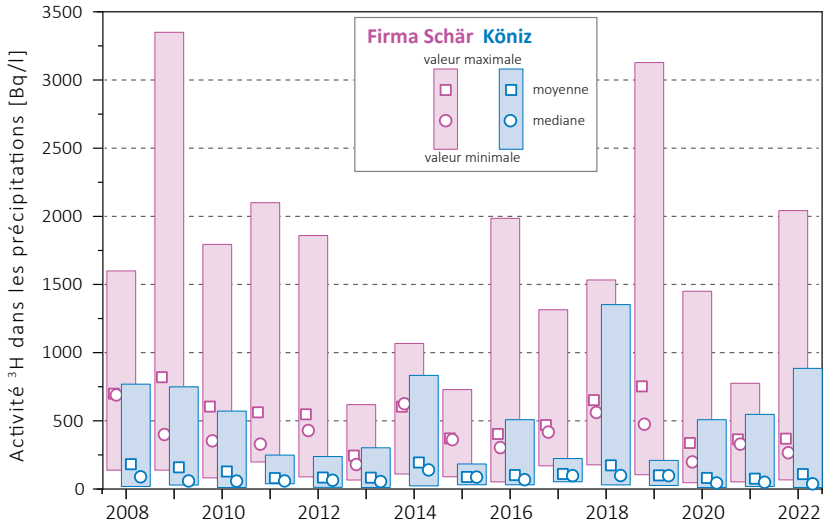


Figure 2 :
Valeurs moyennes et médianes annuelles des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations aux stations de Firma et Köniz à Niederwangen entre 2008 et 2022.

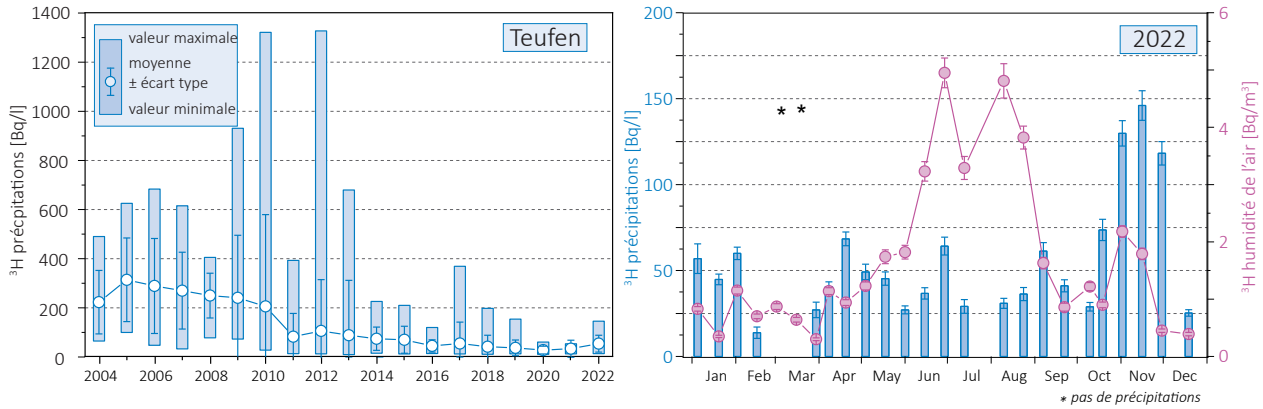


Figure 3 :
Concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] et dans l'humidité de l'air [Bq/m^3] de Teufen/AR de 2004 à 2022.

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 2022 se sont échelonnées entre 1.7 et 23 Bq/m^3 avec une valeur moyenne de 6.9 Bq/m^3; à l'exception de la valeur la plus élevée, enregistrée en novembre lorsque les émissions ont été plus importantes, ces résultats sont comparables à ceux de 2021.

Un projet de cartographie des concentrations de tritium dans l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise mb Microtec a par ailleurs été initié en 2022. Les résultats seront publiés dans le rapport 2023.

Les mesures du tritium effectuées dans les distillats des 12 échantillons de fruits et légumes (pommes, poires, pruneaux, rhubarbe et laitue) prélevés fin août 2022 par le canton de Berne à proximité de l'entreprise se sont échelonnées entre 5 et 50 Bq/l, avec une valeur médiane de 18.5 Bq/l. Dans les distillats des 3 échantillons de lait frais, les concentrations en tritium étaient de l'ordre de 10 Bq/l (7.5 - 12.7 Bq/l). Ces valeurs figurent parmi les plus faibles enregistrées depuis le début de la surveillance et reflètent la baisse des niveaux de tritium dans l'environnement depuis 2020. Ainsi, après l'augmentation des valeurs enregistrée dans les denrées alimentaires en 2017 (jusqu'à 660 Bq/l), et dans une moindre mesure en 2018 - 2019 (env. 330 - 370 Bq/l), les concentrations de tritium mesurées en 2022 dans les produits agricoles sont à nouveau similaires à celles enregistrées au cours de la période 2009 - 2015.

La figure 3 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 2022 sont généralement restées au niveau de celles des années précédentes, à savoir de l'ordre de 30 à 50 Bq/l, avec toutefois une légère augmentation en novembre. On constate généralement une bonne corrélation entre les concentrations annuelles moyennes de ^{3}H mesurées dans les précipitations et les émissions de tritium dans l'air par l'entreprise (voir Figure 1c, Chap. 9.1). 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 2022 sont représentées sur la figure 3b. Avec une valeur moyenne de 1.7 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 première année complète de surveillance ont montré un faible marquage de l'environnement, avec des concentrations de ^{3}H s'échelonnant entre < 5 et 17 Bq/l dans les précipitations et entre 0.1 et 2.2 Bq/m^3 dans l'humidité de l'air.

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 2022.

Tableau 2 :
Tritium (^{3}H) et ^{131}I dans les eaux de rejet des usines d'incinération et des stations d'épuration (STEP) en 2022.

Ville	Laboratoire	Isotope	n.	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)	Moyenne (Bq/l)
STEP Bâle	KL-BS	^{131}I	52	< 01 / 0.8	< 0.2	< 0.3
		^{3}H	52	< 4.0 / 202	< 4.0	11
Incinération Bâle		^{131}I	53	0.1 / 4.7	0.7	1.1
		^{3}H	53	7.0 / 16'505	125	511
STEP Berne	Labor Spiez	^{131}I	52	< 0.1 / 01	< 0.1	< 0.1
	URA/OFSP	^{3}H	12	< 5.0 / 13.3	< 9.0	6.3
STEP Bienne	URA/OFSP	^{3}H	51	< 5.0 / 32.0	< 5.0	5.0
STEP La Chaux-de-Fonds	URA/OFSP	^{3}H	50	< 5.0 / 52.0	8.6	13.5
STEP Lausanne	IRA	^{131}I	47	< 0.3 / < 2.4	< 0.5	< 0.5
		^{3}H	12	< 2.0 / 32	< 2.0	< 2.0
Incinération Zürich	EAWAG	^{131}I	12	0.8 / 67	13.7	21.7
	URA/OFSP	^{3}H	13	61 / 123'500	218.0	10'080
STEP Zürich	EAWAG	^{131}I	50	< 0.1 / < 3.1	< 0.1	< 0.2
	URA/OFSP	^{3}H	12	< 5.0	< 5.0	< 5.0

Eaux des stations d'épuration

Le laboratoire cantonal de Bâle-Ville a mesuré des valeurs inhabituellement élevées de tritium dans les échantillons hebdomadaires d'eaux de la STEP de Bâle entre fin novembre et début décembre. La concentration de tritium a ainsi atteint jusqu'à 202 Bq/l dans l'échantillon de la semaine du 5 décembre alors que les concentrations sont généralement voisines de la limite de détection de 4 - 5 Bq/l. Cette augmentation est due au rejet d'eaux de lavage des fumées de l'usine de traitements des déchets spéciaux Veolia, après l'incinération de déchets contenant du tritium. Cette usine dispose d'un accord de l'OFSP pour incinérer jusqu'à 100 GBq de tritium par semaine. Dans le cas en question, il s'avère qu'elle a incinéré environ 34 GBq de déchets contentant du tritium le 29 novembre, puis environ 96 GBq le 5 décembre. En temps normal, les eaux de lavage de l'entreprise Veolia ne sont pas mélangées aux eaux de la STEP, mais arrivent directement à sa sortie pour être ensuite déversées dans le Rhin. Comme le veut la procédure, le système d'évacuation des eaux de lavage a toutefois communiqué automatiquement avec la STEP industrielle, puis la STEP communale, en raison de paramètres physico-chimiques anormaux détectés les 1er et 7 décembre 2022. C'est pourquoi une partie de l'activité incinérée a été déversée dans la STEP. Même si ces valeurs sont inhabituelles, elles n'ont pas représenté de risque pour le personnel de la STEP et l'environnement.

Les concentrations de tritium observées à la STEP de la région de La Chaux-de-Fonds sont généralement restées faibles en 2022, avec quelques valeurs légèrement plus élevées (jusqu'à 52 Bq/l fin juillet). La figure 4 montre qu'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 généralement faibles.

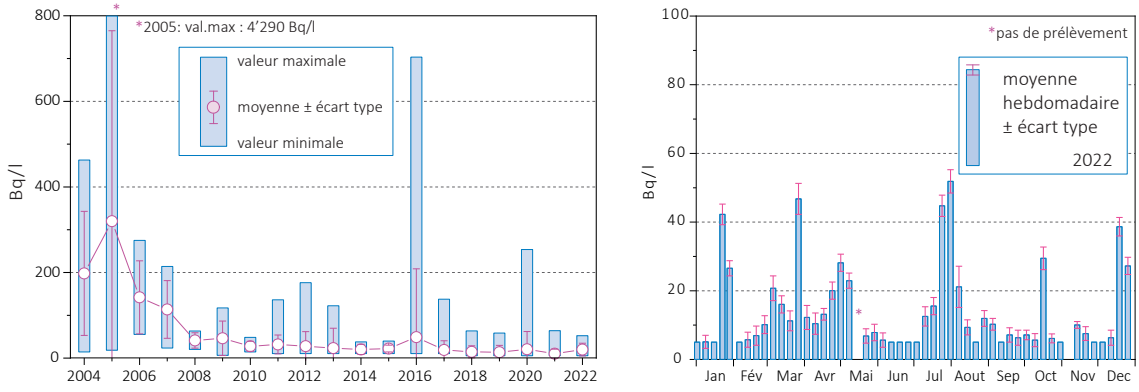


Figure 4 :
Concentrations du tritium mesurées dans les eaux de la station d'épuration de La Chaux-de- Fonds entre 2004 et 2022.

A la STEP de Bienne, les concentrations hebdomadaires de tritium pour l'année 2022 sont le plus souvent restées inférieures ou voisines de la limite de détection de 5 Bq/l, avec sporadiquement des valeurs supérieures à 10 Bq/l (valeur maximale de 32 Bq/l). Il en va de même pour les échantillons mensuels d'eaux de la STEP de Berne.

A la STEP de Werdhözli à Zürich, les concentrations mensuelles de tritium sont restées inférieures à 5 Bq/l. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a par ailleurs pu être décelé dans les échantillons hebdomadaires d'eaux prélevés et mesurés par l'EAWAG.

Eaux de lavage des fumées des usines d'incinération

L'OFSP a mesuré un niveau anormalement élevé de tritium (environ 130 kBq/l) dans un échantillon d'eaux de lavage des fumées de l'UIOM de Hagenholz/ZH, collecté entre les 12 janvier et 9 février 2022. Selon l'estimation de l'OFSP, l'activité totale de tritium incinérée s'élève à 370 GBq, soit plus de 1'000 fois la limite d'autorisation fixée à 0.3 GBq pour l'eau tritiée, représentant ainsi une infraction à l'ORaP. Les mesures effectuées par l'OFSP dans l'environnement n'ont pas révélé d'augmentation significative de la concentration de tritium. Cet événement n'a pas représenté de danger pour l'environnement et la santé de la population. Toutefois, une enquête est actuellement en cours pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs dans les ordures conventionnelles a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle.

Malheureusement ce genre d'événement n'est pas isolé. Par le passé, le laboratoire cantonal de Bâle-Ville, qui mesure depuis de nombreuses années le tritium dans les échantillons hebdomadaires d'eaux de lavage des fumées de l'usine de Valorisation Thermique des Déchets de Bâle (UVDT/IwB) a, à plusieurs reprises enregistrés des pics de concentration journalière de ^{3}H dépassant les 100'000 Bq/l. Pour des informations supplémentaires à ce sujet, consultez le chapitre 9.3 du rapport annuel 2021.

En 2022, les valeurs de tritium sont restées entre 7 et 16'505 Bq/l dans les échantillons hebdomadaires.

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 2022, les valeurs se sont échelonnées entre 150 et 32'900 Bq/l et n'ont pas présenté de corrélation avec les activités présentes dans les déchets contenant du tritium déclarées par les entreprises autorisées.

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 de 1994.

Toujours selon l'art.114, l'OFSP doit mettre en œuvre une surveillance des décharges dans lesquelles de tels déchets ont été stockés définitivement, pour assurer le respect des limites de doses efficaces autorisées. Cette surveillance est réalisée en mesurant le ^{226}Ra dans les eaux de percolation et/ou les eaux souterraines. Pour garantir le respect des limites de dose prescrites par la législation, il est nécessaire que la limite d'immission dans les eaux soit respectée dans les eaux de percolation de la décharge (voir «Directives Art.114 de l'ORaP»). 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. 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.

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

Type d'échantillon	Lieu	Date	Remarque	^{3}H (Bq/l)	^{222}Rn (Bq/l)	^{226}Ra (mBq/l)
décharges, eaux de percolation	Härkingen (SO)	25.10.22	non-filtré pour ^{226}Ra	-	< 3.0	10.6 ± 1.6
	Tüfentobel (SG)	06.10.22	non-filtré pour ^{226}Ra	-	-	3.6 ± 1.0
	Tavannes (BE)	25.10.22	non-filtré pour ^{226}Ra	-	< 3.0	5.6 ± 2.0
	Lufingen (ZH)	25.10.22 / 05.9.22		-	< 3.0	< 1'700 (gamma)
	Tambrig (ZH)	08.10.22		-	-	< 2'500 (gamma)
eaux souterraines	Pratteln (BL)	22.06.22	filtré < 0.45 µm	< 5.0	-	-
	Aarberg (BE)	23.06.22	filtré < 0.45 µm	< 5.0	-	-
	Böttstein (AG)	22.06.22	filtré < 0.45 µm	< 5.0	-	-
	Schönenwerd (SO)	22.06.22	filtré < 0.45 µm	< 5.0	-	-

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 2022 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. La réduction des émissions de tritium dans l'environnement par l'entreprise mb microtec depuis 2020, s'est toutefois traduite par une forte baisse des niveaux de ^{3}H mesurés dans les denrées alimentaires prélevées dans son voisinage en 2022 par rapport aux années précédentes. L'augmentation significative des valeurs enregistrées dans les précipitations de Niederwangen en novembre 2022, liée à des émissions plus importantes en raison du conditionnement de produits défectueux dans l'entreprise est restée ponctuelle.

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 ont révélé quelques valeurs anormalement élevées. Ce fut ainsi le cas dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz/ZH, entre le 12 janvier et le 9 février 2022, indiquant qu'un ou plusieurs objets contenant du tritium avec une activité non négligeable avaient été incinérés pendant cette période. Sur la base des résultats de mesure des eaux de lavages des fumées, l'activité totale de tritium incinérée a été estimée à 370 GBq env., soit plus de 1'000 fois la limite d'autorisation (LA HTO = 0.3 GBq) ce qui représente une violation de l'ordonnance sur la radioprotection. 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 dans d'autres usines d'incinération par le passé, mais il est extrêmement difficile de retrouver l'origine des déchets éliminés de manière non conforme.

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 Juni: Im Zulauf der ARA war der Immissionsgrenzwert leicht 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 waren 2022 in den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) von Giubiasco (Bellinzona, ganzes Jahr) und Bern (Januar-Februar) im Einsatz. An der ARA Giubiasco sind 53´000 Einwohner angeschlossen, an der ARA Bern 219´000 (Zahlen für 2017). Die Radioaktivitätssonden sind in Becken mit genügend Wassertiefe (>1m 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 ist vom Hersteller

kalibriert und wird jährlich mit einer ^{137}Cs-Quelle auf Konstanz geprüft. 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 Bq/l für ^{131}I und ^{111}In und bei 8 Bq/l für ^{177}Lu.

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

Lutetium-177 ist das in der Schweiz – gemessen an der eingesetzten Aktivität – meistverwendete Isotop für die Radiotherapie. Verglichen mit dem ebenfalls häufig eingesetzten ^{131}I ist es weniger radiotoxisch und kann deshalb in höheren Aktivitätskonzentrationen abgegeben werden. Da ^{177}Lu vor der Abgabe in die Kanalisation in Abklingtanks gelagert wird, ist es nur selten in der ARA nachweisbar. Zeitperioden mit nachweisbarem ^{177}Lu sind in Abbildung 1 mit einem Stern markiert. Der Mittelwert der Konzentration über die längste Periode mit regelmässig messbarem ^{177}Lu (16.-19. Juli) betrug rund 25 Bq/l und lag damit deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 307.7 Bq/l.

Das in der Radiotherapie eingesetzte ^{131}I hat einen tiefen Immissionsgrenzwert für Gewässer (6.7 Bq/l) und wird in deshalb in den Spitälern wie ^{177}Lu 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 allem Ende April/Anfang Mai, im Juni und Ende August zu messen (Abbildung 1, oben). Die Nachweisgrenze bei den hier ausgewerteten 10-Minuten Messungen liegt für ^{131}I bei ungefähr 5 Bq/l. Das höchste Wochenmittel mit ca. 13 Bq/l konnte in der Woche vom 6.-13. Juni festgestellt werden. In dieser Woche dürfte also im Zulauf der ARA der Immissionsgrenzwert überschritten worden sein, 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 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, eingehalten war. Proben aus der Flusswassermessstation 6 km unterhalb der ARA Bellinzona zeigten im Juni kein messbares ^{131}I.

Indium-111 war viermal für jeweils ca. eine Woche im Zulauf der ARA nachweisbar (Abbildung 1, oben), wobei die Konzentrationen im Wochenmittel deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes lagen (vergleiche Tabelle 1). Die Zeitpunkte des Auftretens 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

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.*

gelangt vom Wohnort der Patienten via die Kanalisation in die ARA. Bei zwei weiteren ^{111}In Diagnostiken im Spital wurde in der ARA kein Signal registriert: Die betroffenen Patienten wohnen offenbar nicht im Einzugsgebiet der ARA.

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. Die Zeitverläufe von ^{99m}Tc in der ARA Bellinzona ist in Abbildung 1 dargestellt. 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. Der Annihilationspeak wurde für die Abbildung 1 als ^{18}F ausgewertet, aufgrund dessen häufigeren Einsatzes und seiner längeren Halbwertszeit. Die PET-Nuklide kommen in den Spitälern regelmässig zum Einsatz und können in der ARA unter der Woche fast täglich nachgewiesen werden.

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 Abbildung 2 zeigt diese verschiedenen Beiträge für sieben Tage im April: Die Grundlinie der ODL liegt zwischen 15 und 20 nSv/h. Am 7. und am 8. April sorgen PET-Nuklide (bis ca. 20 Bq/l) für eine kurzzeitige Verdoppelung der ODL.

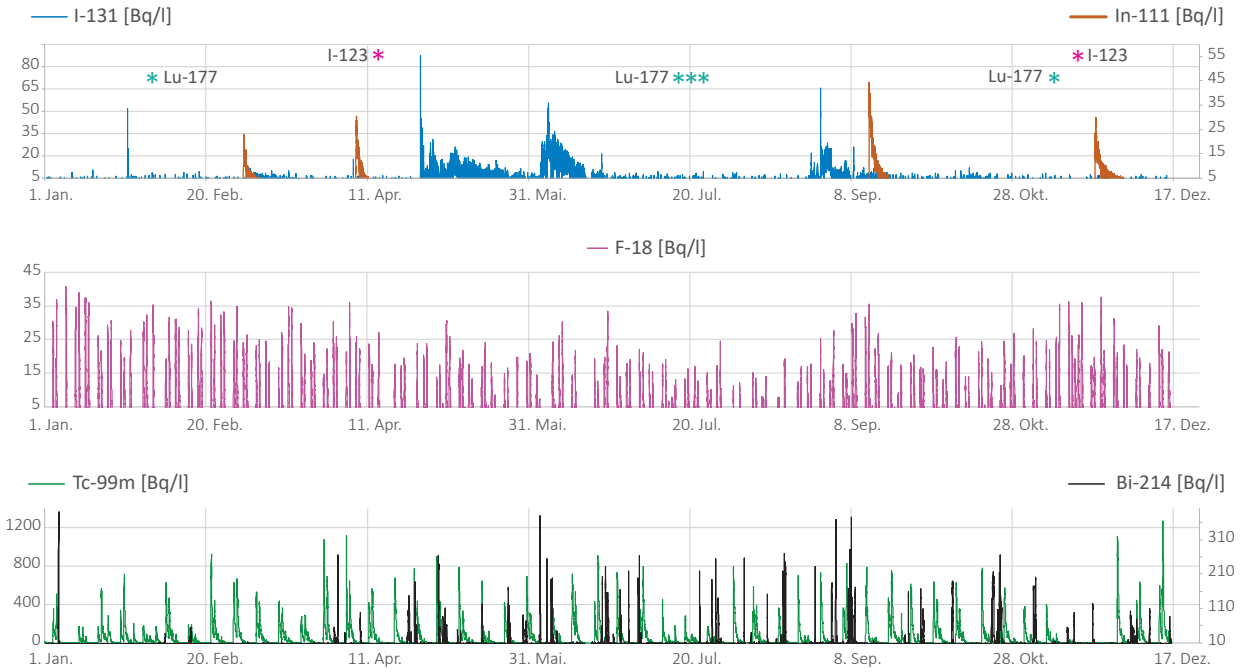


Abbildung 1 :
10-Minuten-Messwerte der Radioaktivität im Zulauf der ARA Giubiasco (Bellinzona) für das Jahr 2022. Die Angaben sind in Bq/l, ausgenommen für ^{177}Lu und ^{123}I, wo lediglich die Zeitperioden mit Nachweis mit einem Stern markiert sind.

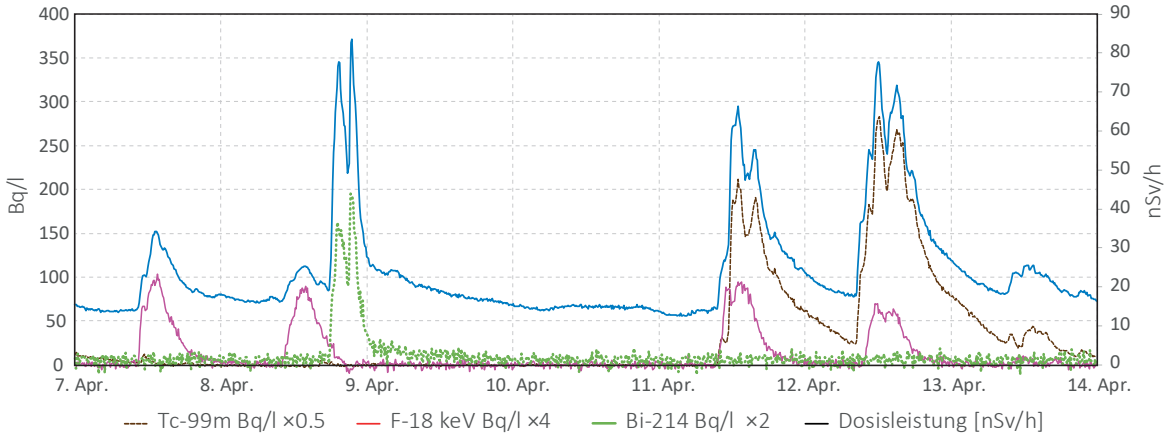


Abbildung 2 :
Zeitverlauf vom 7. bis 13. April 2022 der Konzentrationen von ^{99m}Tc, ^{18}F sowie ^{214}Bi sowie deren Auswirkung auf die Dosisleistung.

Am 11. und 12. April kommen zu ähnlich hohen PET-Nuklid Konzentrationen 400 - 500 Bq/l ^{99m}Tc; das führt zu einer ODL bis rund 70 nSv/h. Für die stärkste Erhöhung der ODL, bis über 80 nSv/h, sorgt aber in der Nacht vom 8. auf den 9. das natürliche ^{214}Bi, eingeschwemmt durch den Niederschlag vom 8. April. Der Zusammenhang ist der 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.

9.5
Plan d'action Radium 2015-2023

M. Palacios, D. Storch
Risques radiologiques, Division Radioprotection, Berne

Résumé

En avril 2022, le Conseil fédéral a approuvé la prolongation du plan d'action radium jusqu'à fin 2023, afin de combler le retard accumulé durant la pandémie de COVID-19. Ainsi, les plus de 1'000 biens-fonds identifiés comme potentiellement affectés par une contamination au radium, utilisé par l'industrie horlogère jusque dans les années 1960, pourront être examinés et, le cas échéant, assainis d'ici fin 2023. L'état d'avancement des travaux du plan d'action est présenté dans ce chapitre.

Projet sectoriel « bâtiments »

Le projet sectoriel « bâtiments » a pour objectif d'identifier les biens-fonds potentiellement contaminés au radium-226 (^{226}Ra), d'y effectuer des mesures et de procéder, si nécessaire, à leur assainissement.

Inventaire et diagnostic des biens-fonds potentiellement affectés

Les recherches historiques menées dans le cadre du plan d'action ont permis de dresser un inventaire de plus de 1'000 biens-fonds abritant jadis des ateliers de posage de peinture au radium, principalement situés dans l'Arc jurassien (voir Recherches historiques (admin.ch)). Selon l'état au 31 décembre 2022, 1'010 biens-fonds ont fait l'objet d'un diagnostic du radium. En cas de dépassement de la dose efficace de 1 millisievert (mSv) par an pour les occupants et les occupantes, un assainissement s'avère nécessaire. Pour ce qui est des espaces extérieurs, la valeur de seuil est fixée à 1'000 Bq/kg pour l'activité spécifique de ^{226}Ra dans la terre.

Travaux d'assainissement

Parmi les 1'010 biens-fonds examinés, 151 requièrent un assainissement, ce qui représente 90 appartements et 100 jardins (Tableau 1). Ainsi, la fraction des biens-fonds examinés nécessitant un assainissement est de l'ordre de 15%. La démarche inclut la dépollution par une entreprise spécialisée, l'élimination des déchets, les mesures de contrôle et la remise en état selon le standard avant travaux.

Les assainissements sont déjà terminés (ou en cours) dans 138 biens-fonds. Parmi la vingtaine d'assainissements réalisés en 2022, on peut citer celui du « Neues Schloss Bümpliz » à Berne[1] autrefois occupé par l'entreprise Merz&Benteli, principal fournisseur de peinture luminescente au ^{226}Ra en Suisse jusque dans les années 1960 (figure 1). Un autre assainissement de grande ampleur touchant plusieurs parcelles voisines a par ailleurs eu lieu dans la commune de Langendorf (SO)[2].

La présence de pollutions mixtes (chimique et radiologique) a été constatée dans près de 20% des espaces extérieurs à assainir. L'OFSP coordonne au cas par cas l'assainissement de ces parcelles avec les cantons concernés (et avec l'Office fédéral de l'environnement 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 ARCADIS pour l'analyse de polluants chimiques sur les échantillons contaminés au ^{226}Ra.

1 Radiumsanierung im Schlosspark Bümpliz beginnt — Mediencenter (bern.ch) - lien
2 Erbe der Uhrenindustrie: Radium-Sanierung in Langendorf (solothurnerzeitung.ch) - lien

Tableau 1 :
État d'avancement des diagnostics et des assainissements au 31 décembre 2022

	Nombre de biens-fonds examinés	Assainissement		
		pas nécessaire	nécessaire	terminés ou en cours
Canton BL	12	9	3	2
Canton BS	1	1	0	0
Canton BE	305	247	58	55
Canton GE	30	28	2	2
Canton JU	28	28	0	0
Canton LU	4	4	0	0
Canton NE	426	372	54	49
Canton SG	1	1	0	0
Canton SH	1	0	1	1
Canton SO	166	135	31	28
Canton TI	7	7	0	0
Canton VD	20	19	1	0
Canton ZH	9	8	1	1
Total	1'010	859	151	138

Élimination des déchets

Selon l'état au 31.12.2022, plus de 2'500 m^3 de déchets inertes associés au plan d'action ont été éliminés en décharge conformément à l'article 114 de l'ORaP, le critère d'activité spécifique de 10'000 Bq/kg pour le ^{226}Ra étant respecté. De plus, environ 230 m^3 de déchets combustibles ont été éliminés en usine d'incinération conformément à l'article 116 de l'ORaP, qui fixe une activité hebdomadaire maximale de 2 MBq pour le ^{226}Ra. Enfin, 4.8 m^3 de déchets du plan d'action avec une activité supérieure aux valeurs susmentionnées ont été conditionnés comme déchets radioactifs et acheminés sous contrôle de l'OFSP au Dépôt intermédiaire fédéral.

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'Office fédéral de l'environnement. La liste correspondante ainsi que le rapport technique sont disponibles sous Héritages au radium dans des décharges (admin.ch). L'OFSP prépare actuellement une directive visant à concrétiser la mise en œuvre à long terme des processus de surveillance et à clarifier les responsabilités. Il est prévu de publier cette directive en 2023, après consultation des principales parties prenantes.

RADON

10

Aktionplan Radon 2021-2030

- Immobilienpark
- Gesundheitsrisiko
- Radonkompetenz
- Arbeitnehmerschutz

Plan d'action Radon 2021-2030

- Parc immobilier
- Risques pour la santé
- Compétences Radon
- Protection des travailleurs

2022

10
Aktionsplan Radon 2021 – 2030

M. Palacios, D. Storch
Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Der Aktionsplan Radon 2021-2030 hat sich im Rahmen der vier Stossrichtungen Immobilienpark, Gesundheitsrisiko, Radonkompetenz und Arbeitnehmerschutz ehrgeizige Ziele gesetzt. In all diesen Bereichen wurden bereits Projekte gestartet. Insbesondere die Zusammenarbeit mit wichtigen externen Partnern konnte intensiviert und zum Teil institutionalisiert werden, speziell mit den kantonalen Vollzugsbehörden und dem Bundesamt für Energie (BFE).

Stand der Arbeiten im Rahmen der vier Stossrichtungen



Immobilienpark

Unter der Federführung des BFE haben wir im Rahmen der WTO-Vorgaben die Aufgaben einer Geschäftsstelle «Energie und Gesundheit» ausgeschrieben. Die Geschäftsstelle soll sich inskünftig mit der Kommunikation in den Bereichen Legionellen, Radon und Innenraumluftqualität beschäftigen und auch einen Beitrag zum Ausbau des Weiterbildungsangebots in diesen Bereichen leisten. Die Tatsache, dass die Themen Energie und Gesundheit im Zusammenhang mit Gebäuden eng verknüpft sind, muss bei den involvierten Akteuren besser verankert und berücksichtigt werden. Die Zusammenarbeit mit dieser Geschäftsstelle wird es uns erlauben, die radonrelevanten Aspekte auch in die Umsetzung der Energiestrategie 2050 einzubringen.

Um den Zusammenhang energetischer Massnahmen und Radon in Gebäuden bereits jetzt in unserer Kommunikation breiter abzudecken, haben wir neue Inhalte auf unserer Webseite erarbeitet, vgl. www.ch-radon.ch. Dort sind die wichtigsten Informationen im Hinblick auf eine frühzeitige und angemessene Berücksichtigung der Radonproblematik bei der Planung von energetischen Massnahmen in Gebäuden zusammengestellt.

Die Umsetzung spezifischer Radonschutzmassnahmen ist in verschiedenen Publikationen beschrieben. Informationen zu den technischen Details und den geeigneten Materialien sind jedoch spärlich. Um diese Lücke zu schliessen, entwickelt die Radonfachstelle Tessin an der Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI) im Auftrag des BAG technische Blätter zu den häufigsten Radonschutzmassnahmen für Neubauten und für bestehende Gebäude. Diese Anleitungen sollen bei der praktischen Umsetzung dieser Massnahmen zum Einsatz kommen und eine gute Qualität der Arbeiten gewährleisten. Die technischen Blätter sollen mit dem Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA) im Rahmen der SIA-Norm 180 konsolidiert und 2023 publiziert werden.



Gesundheitsrisiko

Dem Schutz der Kinder vor einer zu hohen Radonbelastung gilt ein ganz besonderes Augenmerk. Vermehrte Messungen in Schulen und Kindergärten (gemäss Art. 164, 2, StSV) sind deshalb sehr wichtig. Es ist sehr erfreulich, dass in vielen Kantonen entsprechende Messkampagnen gestartet wurden und die Orte, an denen sich Kinder in Innenräumen aufhalten, systematisch überprüft werden. Auf diese Weise konnten schon einige Gebäude identifiziert werden, wo Radonschutzmassnahmen nötig sind.

Die Erfahrungen aus diesen Messkampagnen haben gezeigt, dass das entsprechende Messprotokoll verbessert werden kann. Insbesondere werden die zu messenden Räume besser definiert und damit die Anzahl Messungen pro Gebäude klarer vorgegeben. In Absprache mit den Kantonen soll das Messprotokoll Anfang 2023 in einer neuen Version publiziert werden.

Um der Bevölkerung noch einfacher ihre Radonbelastung aufzuzeigen, soll im Rahmen dieser Stossrichtung ein Online-Vorhersagetool entwickelt werden. Mit der Haute école d'ingénierie et d'architecture (HEIA) in Fribourg wurde ein Projekt gestartet, das untersuchen soll, inwiefern Kurzzeitmessungen einen Beitrag zur Vorhersage der Radonsituation in einem spezifischen Gebäude liefern können. Es ist geplant, die Ergebnisse dieses Projekts in die Daten zu integrieren, die für die Entwicklung des Vorhersagetools verwendet werden sollen.



Radonkompetenz

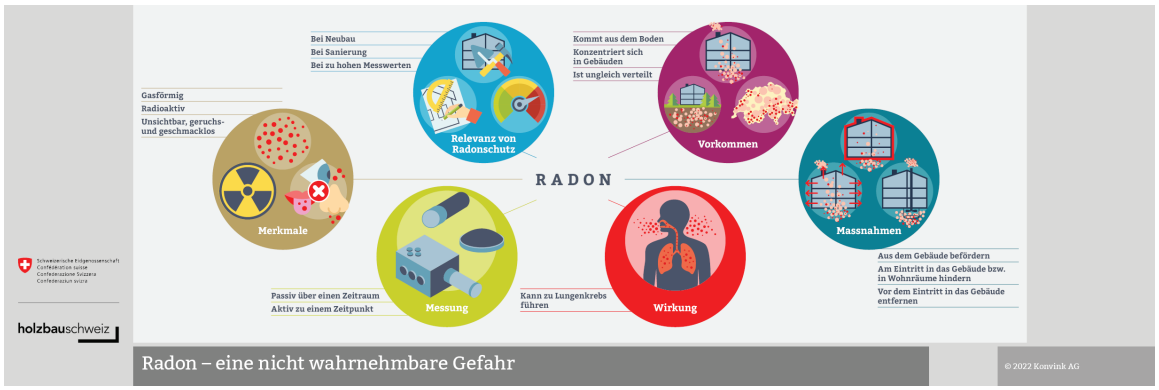
In Zusammenarbeit mit den regionalen Radonfachstellen (Fachhochschule der Nordwestschweiz FHNW, HEIA, SUPSI) haben wir ein Aus- und Fortbildungskonzept erarbeitet, das die Bildungsgänge für Radonfachpersonen harmonisieren soll. Es wurden Inhalte und Ziele der Kurse definiert und die Anforderungen an die Teilnehmenden festgelegt. Es soll sichergestellt werden, dass die Absolventinnen und Absolventen der Kurse die gleichen Kenntnisse und Fähigkeiten vermittelt bekommen und der Arbeitsaufwand grundsätzlich gleich ist. Das Aus- und Fortbildungskonzept dient auch als Grundlage für mögliche Ausbildungsangebote anderer Anbieter.

Ein wichtiger Aspekt der Stossrichtung Radonkompetenz ist die Zusammenarbeit mit Berufsverbänden aus der Baubranche, um das Thema Radon in die entsprechenden Lehrpläne der Bauberufe integrieren zu können. In diesem Bereich entwickelte das BAG mit dem Berufsverband Holzbau Schweiz im Rahmen eines wegweisenden Pilotprojekts ein Radonmodul für die Grundbildung (vgl. Fig. 1). Dieses digitale Lernwerkzeug wurde in das HolzbauLab integriert und steht nun allen Lernenden der Holzbauberufe zur Verfügung. Das Radonmodul beinhaltet einen Wissensbaustein und Lernvideos, die das Thema Radon stufengerecht vermitteln sollen. Die Videos zu den Themen Radioaktivität, Radonschutz, Radonmessungen und Radonberatung sind auch auf YouTube und auf unserer Webseite (www.ch-radon.ch) verfügbar.



Arbeitnehmerschutz

Die Arbeitsgruppe «Radon am Arbeitsplatz», bestehend aus Vertretern der Suva, des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI), des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) und des BAG, hat 2022 im Hinblick auf die für 2023 geplante Erneuerung der Zulassungen der Messstellen die Messprotokolle für Radon am Arbeitsplatz (verfügbar unter Radonkonzentration messen (admin.ch)) sowie die



Figur 1 :
Schaubild zum Radonmodul im Holzbau-Lab

Radon-Datenbank angepasst. Zudem hat sie sich dieses Jahr insbesondere mit der persönlichen Radondosimetrie beschäftigt. Dieser Aspekt wirft aktuell zwei wichtige Fragen auf: Wie soll die persönliche Radondosimetrie durchgeführt werden und gibt es dafür geeignete Messmittel? Wie soll mit den ermittelten Radondosen umgegangen werden?

Mobile Arbeiterinnen und Arbeiter in Wasserwerken, die keinen festen Arbeitsplatz haben, sondern sich in kurzer Zeit von Anlage zu Anlage bewegen, können stark schwankenden Radonkonzentrationen ausgesetzt sein. Es muss abgeklärt werden, auf welche Weise diese Art der Radonexposition am besten gemessen werden kann. Die Registrierung der daraus berechneten Radondosen muss ebenfalls noch etabliert werden. Schliesslich ist die Arbeitsgruppe auch daran, die entsprechenden Messprotokolle anzupassen, was wiederum zu einem Änderungsbedarf in der Radondatenbank führt.

Ausblick

Im kommenden Jahr soll mit einer Vorstudie ein Online-Vorhersagetool für die Radonbelastung angegangen werden. Dieses Vorhersagetool ist als Leuchtturmprojekt des Aktionsplans Radon zu sehen. Zudem wird die bestehende Radondatenbank zu einem Radonportal erweitert, das einerseits mehr Daten beinhalten soll und deutlich erweiterte Funktionalitäten bieten wird.

Radonmessstellen benötigen gemäss den Vorgaben der StSV von 2018 eine Anerkennung vom BAG, welche 5 Jahre gültig ist. 2023 werden viele dieser Anerkennungen erneuert/verlängert werden müssen. Das BAG wird diese Erneuerung nutzen, um das System der Messkompetenzen zu vereinfachen; dies ist ein erster Schritt in Richtung des Ziels, alle Verfahren von einem einzigen Anbieter zu offerieren.

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

2022

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
Publikationszeitpunkt : Juli 2023

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
Date de publication : Juillet 2023

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