

2021

*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*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Gesundheit BAG
Office fédéral de la santé publique OFSP
Ufficio federale della sanità pubblica UFSP
Abteilung Strahlenschutz
Division radioprotection
Divisione radioprotezione

Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz

Radioactivité de l'environnement
et doses de rayonnements en Suisse

Radioattività dell'ambiente e dosi
d'irradiazione in Svizzera

2021

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 2021.

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 2021 finden Sie im vorliegenden Heft.

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

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

Sommaire

1 Surveillance de l'environnement : Résumé - 10

Tâches et programme de mesure - 10

Résultats de la surveillance 2021 - 12

Evaluation - 20

2 Exposition de la population aux rayonnements ionisants - 39

Catégories d'exposition - 39

Origines de l'exposition aux rayonnements - 39

Exposition aux rayonnements de la population générale - 40

Exposition des patients - 42

Bilan de l'exposition de la population suisse - 42

3 Rayonnement externe - 45

Mesures in situ & exposition externe - 46

Réseau NADAM- 51

Mesures d'aéroradiométrie- 60

4 Environnement - 67

Aérosols et précipitations - 68

URAnet Aero - 72

Surveillance de l'air avec des avions militaires - 78

Radioactivité dans les systèmes aquatiques - 81

URAnet Aqua - 86

Tritium-Monitoring - 88

Sols et herbes - 92

5 Denrées alimentaires - 97

Lait, céréales, légumes, viandes, chasse, etc. - 98

6 Radioactivité dans le corps humain - 103

Vertèbres et dents de lait - 104

7 Mesures de nucléides spéciaux - 109

Carbone-14, Krypton-85, Argon-37 - 110

Plutonium et Américium - 120

8 Surveillance des installations nucléaires - 127

Emissions et Immissions - 128

Dose ambiante et débit de dose ambiante - 139

MADUK - 140

ZWILAG - 145

Installations nucléaires et environnement - 148

CERN - rejets et environnement - 156

CERN - mesures OFSP - 162

9 Industries et hôpitaux - 169

Emissions des industries - 170

Emissions des hôpitaux - 173

Surveillance au voisinage des industries - 177

Radionucléides médicaux - 184

Plan d'action Radium - 188

10 Plan d'action Radon - 193

Annexes - 199

Inhaltverzeichnis

1 Umweltüberwachung : Zusammenfassung - 21

Auftrag und Messprogramm - 21
Ergebnisse der Umweltüberwachung 2021 - 23
Beurteilung - 31

2 Strahlenexposition der Bevölkerung - 34

Expositionskategorien - 34
Ursachen der Strahlenexposition - 34
Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung - 35
Exposition von Patienten - 36
Bilanz der Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung - 37

3 Externe Strahlung - 45

In situ Messungen - 46
Netzwerk NADAM- 51
Aeroradiometrische Messungen - 60

4 Umwelt - 67

Aerosol und Niederschlag - 68
URAnet Aero - 72
Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen - 78
Aquatische System - 81
URAnet Aqua - 86
Tritium-Monitoring - 88
Boden und Gras - 92

5 Lebensmittel - 97

Milch, Getreide, Gemüse, Fleisch, Wildfleisch, usw. - 98

6 Radioaktivität im Menschen - 103

Wirbelknochen und Milchzähne - 104

7 Messung von Spezialnukliden - 109

Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37 - 110
Plutonium und Americium - 120

8 Überwachung der Kernanlagen - 127

Emissionen et Immissionen - 128
Ortsdosis und Ortsdosisleistung - 139
MADUK - 140
ZWILAG - 145
Nukleare Anlagen und Umwelt - 148
CERN - Emissionen und Umwelt - 156
CERN - BAG-Messungen - 162

9 Industrien und Spitäler - 169

Emissionen der Betriebe - 170
Emissionen der Spitäler - 173
Überwachung in der Umgebung von Industrien - 177
Radionukliden aus der Medizin-184
Aktionsplan Radium - 188

10 Aktionsplan Radon - 193

Anhänge - 199

Chapitre
Kapitel
1

Surveillance de
l'environnement
Résumé

Umweltüberwachung
Zusammenfassung

Tâches et programme de mesure
Résultats de la surveillance 2021
Evaluation

Auftrag und Messprogramm
Ergebnisse der Umweltüberwachung 2021
Beurteilung

2021

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 rayonnements 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 que de 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 sur 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, l'Inspection

Fédérale de la Sécurité Nucléaire (IFSN) pour les centrales nucléaires, la SUVA pour les industries. Elle commence par le contrôle des émissions (rejets de substances radioactives) de ces entreprises, afin de s'assurer que les limites sont respectées, et se poursuit par la surveillance de 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 sur le 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 et de décharges ou encore des eaux de lavage des fumées d'usines d'incinération.

Des réseaux automatiques de mesure enregistrent le débit de dose ambiant gamma dans tout le pays (réseau automatique NADAM de mesure et d'alarme pour l'irradiation ambiante) et en particulier au voisinage des centrales nucléaires (réseau automatique de surveillance du débit de dose au voisinage des centrales nucléaires, MADUK). La radioactivité des aérosols et des eaux de rivière (figure 1) est mesurée en continu grâce au réseau automatique de mesure URAnet de l'OFSP (volet «aero» pour la surveillance de l'air et volet «aqua» pour la surveillance de l'eau, voir plus bas). En plus des mesures automatiques, des prélèvements d'échantillons d'aérosols, de précipitations et d'eaux de rivière sont effectués en continu afin de procéder à des analyses très sensibles en laboratoire; la surveillance des sédiments, du sol, de l'herbe, du lait et des denrées alimentaires (y compris les importations) s'effectue dans le cadre de contrôles par sondage. Les données sont enregistrées dans une banque de données nationale administrée par l'OFSP. Les résultats des mesures des réseaux automatiques ainsi que la majorité des résultats des mesures de la radioactivité dans des échantillons environnementaux effectués en laboratoire sont consultables en ligne sur le site www.radenviro.ch. Par contre les résultats de

mesures spéciales (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 pleinement opérationnel depuis septembre 2018. Il remplace l'ancien réseau RADAIR, mis en service après l'accident de Tchernobyl et 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 aussi 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

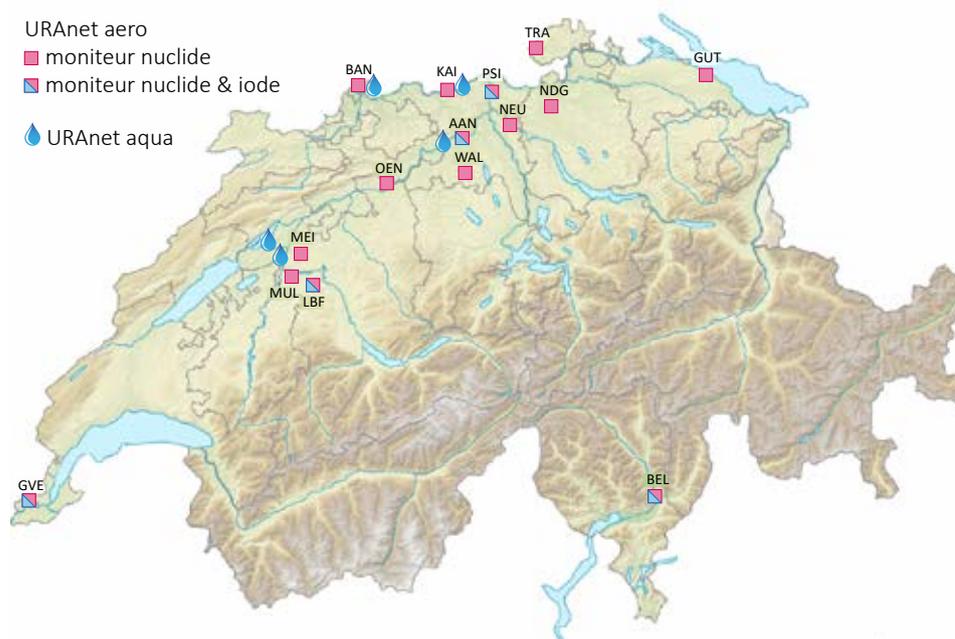


Figure 1: Réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air (URAnet aero) et dans les cours d'eau (URAnet aqua).

3 à 7 milli-becquerels par mètre cube (mBq/m³) pour le ¹³⁷Cs 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.

Résultats de la surveillance 2021

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 2021 sont généralement restés comparables à ceux des années précédentes et montrent que la radioactivité naturelle est prédominante dans ces compartiments environnementaux. Les résultats des mesures des filtres aérosols à haut débit, disponibles sur Internet (www.radenviro.ch), ont ainsi montré que la radioactivité de l'air provient pour l'essentiel des radionucléides naturels tels que le ⁷Be cosmogénique ou le ²¹⁰Pb. D'infimes concentrations de radioactivité artificielle, en particulier de ¹³⁷Cs, sont toutefois régulièrement détectées sur les filtres aérosols, grâce à la très grande sensibilité des méthodes de mesure mises en œuvre. Les sols suisses contiennent en effet du ¹³⁷Cs provenant des retombées de l'accident de Tchernobyl en 1986 ainsi que des essais atomiques en atmosphère

des années 60. C'est la remise en suspension dans l'air de ce césium encore présent dans les sols qui est à l'origine des traces encore mesurées aujourd'hui en Suisse dans les filtres aérosols. Une augmentation des concentrations liées à une plus forte remise en suspension en période sèche est un phénomène régulièrement observé.

Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a été décelé dans les précipitations en 2021. Il en va de même pour les rivières, à l'exception de traces sporadiques de ¹³⁷Cs, provenant 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 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 ⁴⁰K. Les isotopes artificiels proviennent des retombées des essais nucléaires atmosphériques des années 60 (en particulier ⁹⁰Sr, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am et ¹³⁷Cs) ainsi que de l'accident de Tchernobyl en 1986 (essentiellement ¹³⁷Cs) et montrent des différences régionales, liées aux particularités de ces retombées. Dans les Alpes et le sud des Alpes, les valeurs relevées pour le ¹³⁷Cs (voir fig. 2) et le ⁹⁰Sr sont toujours légèrement supérieures à celles du Plateau. Quant aux émetteurs alpha artificiels, comme le ²³⁹Pu, le ²⁴⁰Pu et l'²⁴¹Am, il n'en subsiste que d'infimes traces dans le sol.

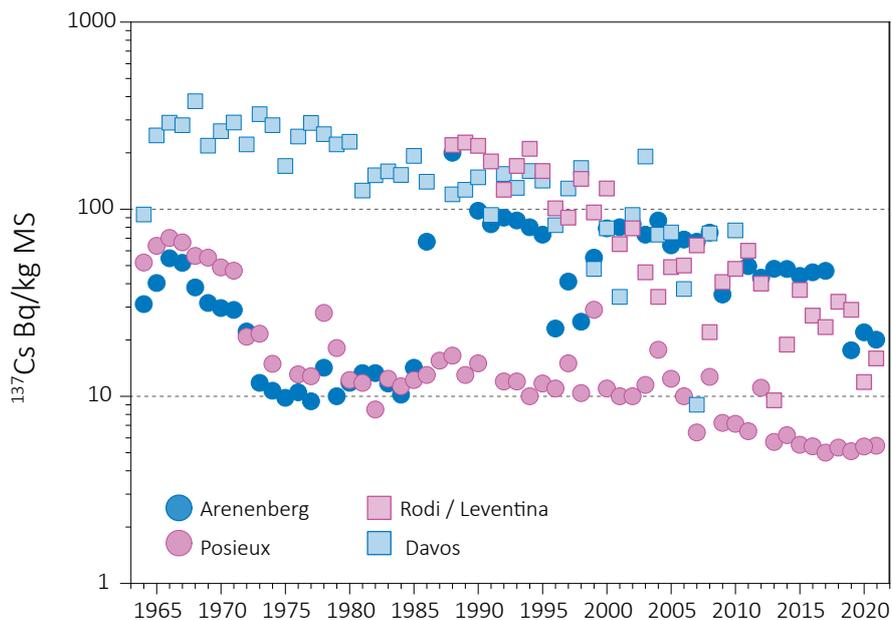


Figure 2: ¹³⁷Cs (en Bq/kg de matière sèche) dans les échantillons de sol de différentes stations de Suisse (1964 - 2021).

Dans l'herbe et les denrées alimentaires, 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. Seuls quelques échantillons de lait sur les 130 analysés en 2021 ont ainsi présenté une activité en ^{137}Cs mesurable: la valeur maximale de 9.9 Bq/l a été enregistrée dans un échantillon prélevé dans les Centovalli; de faibles activités, inférieures à 1 Bq/l, ont également été mesurées dans d'autres échantillons de lait provenant du Tessin et des vallées sud des Grisons. 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, 35 ans après l'accident. Les activités mesurées en 2021 sont toutefois toutes restées nettement inférieures à la valeur maximale de 600 Bq/kg admise pour le ^{137}Cs selon l'Ordonnance Tchernobyl. Les teneurs en ^{90}Sr mesurées dans 65 échantillons de lait par le canton de BS, l'IRA et le laboratoire de Spiez étaient très basses en 2021, avec une valeur maximale de 0.3 Bq/l et une valeur médiane de 0.04 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.

Un seul échantillon de céréales a présenté une activité très faible (0.3 Bq/kg) mais mesurable de ^{137}Cs ; dans les 17 autres échantillons de céréales ainsi que dans les 25 échantillons de fruits et légumes prélevés en Suisse en 2021, la concentration de ^{137}Cs est restée inférieure à la limite de détection. Les valeurs de ^{90}Sr mesurées dans les céréales étaient également très basses, situées entre 0.03 et 0.21 Bq/kg.

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 2021, 1'774 sangliers ont ainsi fait l'objet d'une mesure de tri, réalisée sur place à l'aide d'un instrument dosimétrique. Vingt animaux, soit seulement 1% des cas, dépassaient la valeur maximale pour le ^{137}Cs , fixée à 600 Bq/kg selon l'Ordonnance Tchernobyl. Ce pourcentage est en nette baisse par rapport aux années précédentes. Des mesures de contrôle en laboratoire ont révélé une valeur maximale de ^{137}Cs de 2'662 Bq/kg. Les sangliers concernés ont été confisqués par le vétérinaire cantonal. 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 et le ^{137}Cs est ensuite transféré dans leur viande.

Les concentrations de ^{137}Cs mesurées dans les 27 échantillons de viande de sanglier en provenance du canton du Valais sont restées faibles,

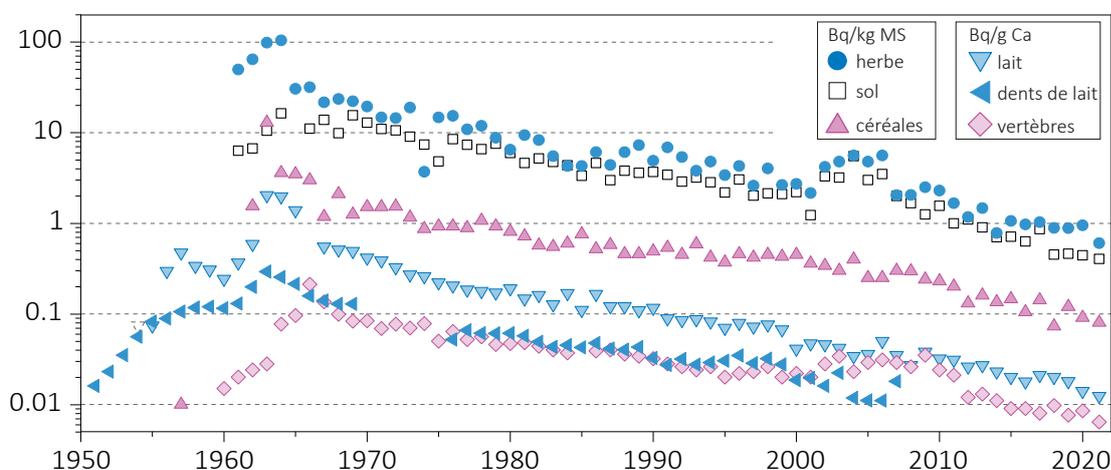


Figure 3:
 ^{90}Sr dans divers échantillons prélevés entre 1950 et 2021.

avec une valeur maximale de 9.7 Bq/kg. Cinq échantillons de gibier (cerf, chevreuil) prélevés dans le canton des Grisons ont donné des valeurs comprises entre 4 et 143 Bq/kg de ^{137}Cs . Dans le seul échantillon de sanglier en provenance des Grisons, la concentration en ^{137}Cs s'élevait à 104 Bq/kg.

Certains champignons sauvages indigènes, notamment les bolets bairiens et les pholiotas ridés présentent toujours des valeurs accrues de ^{137}Cs . Ainsi parmi les 155 échantillons de champignons indigènes analysés en 2021 par les cantons du Tessin et des Grisons, 5 (soit env. 3%) dépassaient la valeur maximale de 600 Bq/kg fixée pour le ^{137}Cs dans l'ordonnance Tchernobyl. La valeur maximale enregistrée s'est élevée à 1'970 Bq/kg (masse fraîche).

Dans les autres denrées alimentaires indigènes analysées par les laboratoires cantonaux (fromages, baies, confitures), 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 en provenance du Japon n'ont que rarement présenté des traces de ^{137}Cs . En 2021, les laboratoires cantonaux de BS et ZH ont analysé 32 échantillons de denrées alimentaires (thé, légumes, assaisonnements, etc.) en provenance du Japon. Seul l'échantillon de champignons shiitake séchés a présenté une activité en ^{137}Cs mesurable (56 Bq/kg de masse sèche).

Des analyses de denrées alimentaires importées provenant d'autres pays, notamment d'Europe de l'Est, ont également été effectuées comme chaque année par les laboratoires cantonaux (BS, ZH): 154 échantillons ont ainsi été analysés par spectrométrie gamma en 2021. Dans environ 10% de ces échantillons, des concentrations de ^{137}Cs supérieures à 10 Bq/kg masse fraîche ont été mesurées. La valeur la plus élevée (env. 200 Bq/kg masse fraîche) a été relevée dans un échantillon de craterelles jaunes.

Aucun dépassement de la valeur maximale pour le ^{137}Cs n'a ainsi été enregistré en Suisse dans les denrées alimentaires importées en 2021.

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 doit mesurer

ses émissions et en communiquer le bilan à l'IFSN. Des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, l'IFSN et l'OFSP sur des filtres aérosols et des cartouches d'iode (charbon actif) 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 2021.

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 un nouveau règlement relatif au rejet de substances radioactives dans l'environnement ainsi qu'à la surveillance de la radioactivité et du rayonnement direct dans le voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM) est entré en vigueur à cette date, 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 2021 de la surveillance mise en oeuvre 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 , à courte demi-vie, qui est 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 du ^{16}N disparaît, toutefois, les travaux de démantèlement, tels que ceux qui ont lieu à la CNM, peuvent entraîner des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture. Ceci a été constaté à plusieurs reprises en 2021 lors des contrôles ponctuels effectués par l'IFSN à la clôture, avec des valeurs instantanées de débit de dose variant entre 0.08 (fond naturel) et 0.32 $\mu\text{Sv/h}$. Des valeurs plus élevées de débit de dose ont également été enregistrées à la clôture de la CNM par l'OFSP dans le cadre des mesures par spectrométrie in situ. Toutefois, 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 d'au maximum 0.016 mSv par semaine, après soustraction du bruit de fond naturel.

Ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés, puisqu'aucune personne ne séjourne de manière durable en ces endroits. Il convient en effet de relever qu'il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en rela-

tion avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside pour de longue période en ces endroits.

Si la très grande sensibilité des méthodes de mesure mises en oeuvre dans le cadre de la surveillance des immissions a permis de mettre en évidence les traces de radionucléides produits par les centrales nucléaires, le marquage de l'environnement dans leur voisinage demeure faible.

Des valeurs accrues de ^{14}C , rejeté dans l'atmosphère par les centrales nucléaires lors de leur exploitation, ont ainsi été mises en évidence dans les feuillages (augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 61 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt). La dose annuelle supplémentaire induite par l'ingestion régulière de denrées alimentaires présentant une telle activité supplémentaire de ^{14}C serait toutefois inférieure à 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 2021 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'emprunte des rejets liquides des centrales nucléaires sur le milieu aquatique est essentiellement mesurable dans les sédiments. En 2021, des traces de ^{60}Co ont ainsi été mesurées dans un échantillon de sédiments prélevé à Hagneck et de faibles activités de ^{54}Mn ont été sporadiquement décelées dans les sédiments prélevés à Hagneck, mais également à Klingnau et 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 oeuvre.

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

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

très majoritaire des retombées des essais nucléaires des années 60.

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. 13 Bq/l 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 2021 n'ont révélé la présence d'aucun radionucléide d'origine artificielle. Il en va de même pour l'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Schönenwerd, Böttstein et Muttenz.

En ce qui concerne l'ancienne centrale nucléaire de Lucens, aucune valeur significativement plus élevée de tritium n'a plus été enregistrée dans son système de drainage depuis la mise en place par l'OFSP du programme de surveillance rapprochée au printemps 2012.

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, Gösgen et Leibstadt, et env. 0.002 mSv pour Mühleberg) 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

Après 2 ans d'arrêt pour maintenance, la majorité des installations du CERN ont progressivement été remises en service en 2021. Le LHC quant à lui n'a

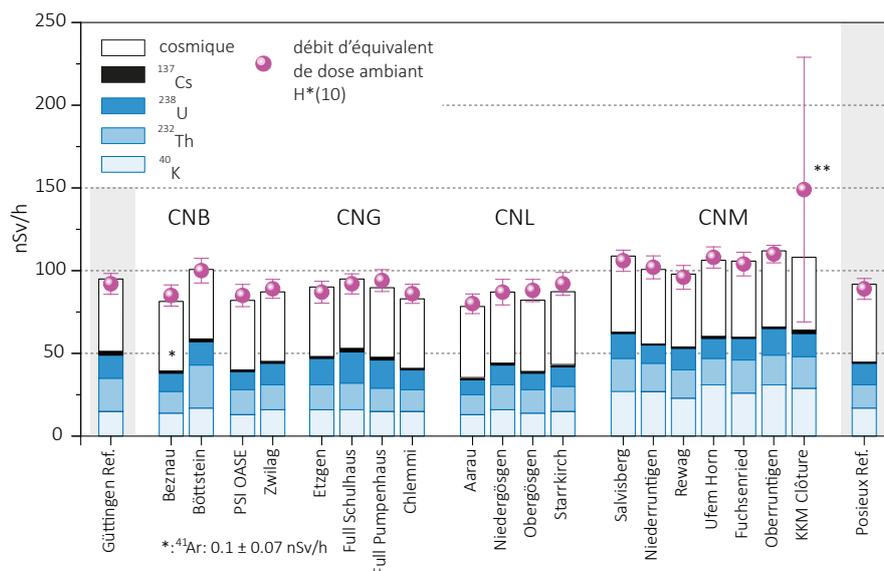


Figure 4:

Contributions individuelles à l'exposition ambiante ($H^*(10)$) attribuables aux différents radionucléides présents sur les sites examinés par l'OFSP en 2021 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. ** La valeur plus élevée de débit de dose mesurée à la clôture de KKM est due à la présence de matériaux issus des travaux de démantèlement, stockés temporairement sur le site (voir chap. 3.1).

fonctionné que pour une brève période de tests à très faibles intensités, en vue de son redémarrage en 2022.

Le bilan et le contrôle des émissions de ses propres installations effectués par le CERN en 2021, 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 0.002 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 le ²⁴Na, l'⁴¹Ar ou l'¹³¹I, ont sporadiquement pu être décelées dans l'air au voisinage du centre de recherche en 2021, leurs concentrations ne représentaient que d'infimes fractions des limites d'immissions dans l'air définies dans l'Ordonnance sur la radioprotection. 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 CERN.

La dose d'irradiation supplémentaire reçue par la population vivant au voisinage du PSI/ZWILAG ne doit pas excéder, au total, 0.15 mSv/an 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 2021 une dose supplémentaire inférieure à 0.011 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 West 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 2021, 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 2021, comme au cours des années précédentes, 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, avec toutefois une forte diminution par rapport aux années précédentes. Les concentrations de tritium enregistrées dans les précipitations à la station Firma, située au voisinage de l'entreprise mb microtec, se sont élevées en moyenne à 365 Bq/l en 2021, avec une valeur maximale de 780 Bq/l. Cette valeur représente 3.9% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ORaP à 20'000 Bq/l pour le tritium dans les eaux accessibles au public. Ces valeurs sont parmi les plus basses enregistrées depuis 2008. Des valeurs plus élevées de tritium sont toujours mesurées dans les denrées alimentaires récoltées au voisinage de l'entreprise, mais la tendance observée est également à la baisse. Les concentrations de tritium dans les distillats des 12 échantillons de fruits et légumes prélevés fin août 2021 par le laboratoire cantonal de BE se sont échelonnées entre 3 et 140 Bq/l, avec une valeur médiane de 40 Bq/l. Dans les distillats des 3 échantillons de lait frais, les concentrations en tritium étaient de l'ordre de 10 Bq/l (9.7-10.2 Bq/l). Les doses supplémentaires qui résulteraient de la consommation régulière de tels produits (eaux de pluie et légumes) ne dépasseraient pas 1 µSv/an et ne présentent donc pas de risque pour la santé. La baisse générale des valeurs de tritium mesurées dans les différents compartiments environnementaux au voisinage de mb microtec s'explique par la diminution significative des émissions de tritium dans l'air par l'entreprise depuis 2020, suite à la mise en œuvre de diverses améliorations techniques.

Les concentrations de tritium mesurées dans les échantillons hebdomadaires de précipitations de Teufen/AR, au voisinage de l'entreprise RC Tritec sont restées basses en 2021, avec une valeur maximale de 54 Bq/l et une valeur médiane de 34 Bq/l. Ces valeurs sont comparables à celles enregistrées en 2020 et comptent parmi les plus faibles enregistrées depuis le début de la surveillance.

Notons finalement que l'OFSP et la SUVA ont initié en début octobre 2021 un programme de surveillance du tritium dans les précipitations et l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise Smolsys située à Root dans le canton de Lucerne, celle-ci disposant également d'une autorisation de rejet de tritium dans l'environnement. Les résultats pour l'année 2021 ne sont que très parcellaires, mais indiquent un faible marquage de l'environnement, avec des concentrations de ^3H s'échelonnant entre < 5 et 16 Bq/l dans les précipitations.

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

Héritages radiologiques

Le plan d'action radium 2015-2022, approuvé par le Conseil fédéral en mai 2015, vise à régler le problème des héritages radiologiques liés à l'application de peinture luminescente au radium dans l'industrie horlogère jusque dans les années 1960. Les travaux dans les quatre différents axes du plan d'action ont été poursuivis en 2021, mais les visites sur le terrain ont à nouveau dû être restreintes durant plusieurs mois en raison de la pandémie de COVID-19, en particulier dans la sphère privée qui représente 80% des biens-fonds concernés. Les restrictions sanitaires ont ainsi entraîné un retard d'une année sur les diagnostics et les assainissements, et ce, malgré les soutiens externes supplémentaires engagés pour les diagnostics. Pour combler ce retard, le Conseil fédéral a approuvé en avril 2022 la prolongation du plan d'action radium jusqu'à fin 2023.

Projet sectoriel «Bâtiments»

Selon l'état au 31 décembre 2021, 880 biens-fonds ont fait l'objet d'un diagnostic lié au radium-226 (^{226}Ra), représentant 80% des biens-fonds recensés dans l'inventaire. En cas de dépassement de la dose efficace de 1 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 la concentration de ^{226}Ra dans la terre.

Parmi les 880 biens-fonds examinés, 137 (soit environ 16%) requièrent un assainissement au sens de l'art. 153 de l'ORaP. Les travaux d'assainissement sont terminés ou en cours dans 118 biens-fonds. Dans les 86 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 43 appartements, entre 2 et 5 mSv/an dans 28 appartements, entre 5 et 10 mSv/an dans 9 appartements, entre 10 et 15 mSv/an dans 5 appartements et entre 15 et 20 mSv/an dans 1 appartement.

Les valeurs maximales de radium mesurées dans des échantillons de terre prélevés dans les 87 jardins à assainir s'élèvent en moyenne à 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. Les cas complexes sont discutés au sein du groupe de soutien sur les pollutions mixtes constitué de représentants et représentantes de l'OFSP, de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et de la Suva, afin d'assurer le respect des législations sur la radioprotection et sur la protection de l'environnement, ainsi que des règles de protection des travailleurs et des travailleuses.

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 ^{226}Ra et d'autre part, de définir les mesures à prendre pour protéger l'environnement et la santé de la population ainsi que des travailleurs et des travailleuses des dangers liés à la présence de ces déchets.

En octobre 2021, l'OFSP a publié le rapport technique «Recensement et gestion des anciennes décharges susceptibles de contenir des déchets contaminés au radium» sous www.bag.admin.ch/heritages-radium (Héritages au radium dans des décharges). Ce rapport, élaboré en collaboration avec l'OFEV et en accord avec les cantons concernés, détermine la méthode d'identification des anciennes décharges potentiellement affectées, leur classement en trois catégories de risque, ainsi que les mesures de protection à mettre en œuvre, en particulier lors de travaux d'excavation.

Les cantons principalement touchés (Berne, Genève, Jura, Neuchâtel et Soleure) ont procédé à la classification de leurs anciennes décharges selon le processus défini. Plus de 280 anciennes décharges susceptibles de contenir des déchets contaminés au ^{226}Ra ont ainsi été identifiées. La liste correspondante est publiée sous le même lien à titre informatif. 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 des différentes parties prenantes. Il est prévu de consulter les cantons principalement concernés dans le courant de l'année 2022.

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. 7j) 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 avoir augmenté de 50% entre 2019 et 2020, l'activité totale de ^{177}Lu appliquée en Suisse a encore pratiquement doublé en 2021 par rapport à l'année précédente pour atteindre 10.8 TBq. Pour tenir compte de la radiotoxicité, on calcule l'activité du ^{177}Lu en équivalent ^{131}I , ce qui donne 0.23 TBq d'équivalent iode ^{131}I (à comparer aux 2.5 TBq d' ^{131}I appliqués en Suisse en 2021). Après une diminution de son utilisation d'un facteur 5 env. entre 2010 et 2020, l'application d' ^{90}Y a fortement (facteur 3) augmenté en 2021 par rapport à 2020.

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 2021 (voir «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 de ^{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

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

L'OFSP coordonne également un programme spécifique de prélèvements et de mesures de la radioactivité (émetteurs gamma et ^3H) des eaux des stations d'épuration ainsi que des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération des déchets. La surveillance des stations d'épuration 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 h) demi-vie, ils ne sont généralement pas détectés par le programme usuel de mesures en laboratoire compte tenu du délai entre prélèvement et mesures. Pour cette raison des mesures en continu ont également été réalisées en 2021 à l'aide d'une sonde automatique de mesure dans les eaux des stations d'épuration de Berne et Bellinzona. Ces mesures ont montré que l' ^{131}I , le ^{177}Lu et l' ^{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 radionucléides à vie très courte ^{99m}Tc et $^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ ne nécessitent pas de rétention dans les hôpitaux en raison de la limite d'immission élevée et ont par conséquent été régulièrement détectés lors des mesures en continu. Cette surveillance a par ailleurs montré que les limites d'immission de tous les radionucléides étaient déjà respectées en moyenne hebdomadaire à l'entrée des STEP. Les mesures dans des STEP sélectionnées seront poursuivies, car elles fournissent de précieuses informations supplémentaires sur les émissions des hôpitaux, qui représentent globalement une source non négligeable de radionucléides artificiels dans 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'empêchera pas l'incinération accidentelle de ^3H , un émetteur bêta pur qui ne peut être décelé par ces portiques.

La surveillance de la radioactivité dans les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération n'a révélé aucun résultat inhabituel en 2021. En janvier 2019, le laboratoire cantonal de Bâle-Ville avait mesuré une concentration particulièrement élevée de tritium (833'000 Bq/l) dans un échantillon hebdomadaire. Sur la base de ces résultats, l'activité totale incinérée avait été estimée à env. 700 GBq. Bien que cet incident n'ait pas eu de conséquences pour la santé de la population, le caractère récurrent du phénomène avait conduit l'OFSP à déposer une plainte auprès du ministère public de la confédération en 2020. L'enquête n'a malheureusement pas permis de retrouver l'origine de la source incinérée.

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 2021 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 déposés 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 ($< 10 \text{ mBq/g Ca}$) 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

En Suisse, les concentrations de radionucléides dans l'environnement et les doses d'irradiation de la population dues aux sources de rayonnements artificielles sont restées en 2021, comme les années précédentes, nettement inférieures aux limites légales; 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 inhomogène 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 35 ans après l'accident. Les concentrations mesurées diminuent régulièrement depuis 1986, mais des dépassements de la valeur maximale pour le ^{137}Cs fixée dans l'Ordonnance Tchernobyl sont toujours observés en 2021 au Tessin dans certaines denrées sensibles comme les sangliers ou certains champignons sauvages.

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. A Niederwangen, les concentrations maximales de tritium enregistrées dans les précipitations sont en nette diminution par rapport aux années précédentes et n'ont pas dépassé 4% de la valeur limite d'immissions pour le tritium dans les eaux accessibles au public. Si des

valeurs plus élevées de ^3H ont également été mesurées dans les échantillons de denrées alimentaires prélevées dans cette localité, elles n'ont pas présenté de risque pour la santé des consommateurs. Quant aux rejets d'effluents radioactifs liquides par les hôpitaux, la surveillance a montré que les limites d'immission sont respectées déjà à l'entrée des stations d'épuration des grandes villes. La surveillance spécifique des eaux des stations d'épuration, des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération ainsi que des eaux de percolation des décharges n'a, quant à elle, mis en évidence aucun résultat inhabituel.

En conclusion, l'impact radiologique liées 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 und wertet die Daten 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 Kehrlichtverbrennungsanlagen.

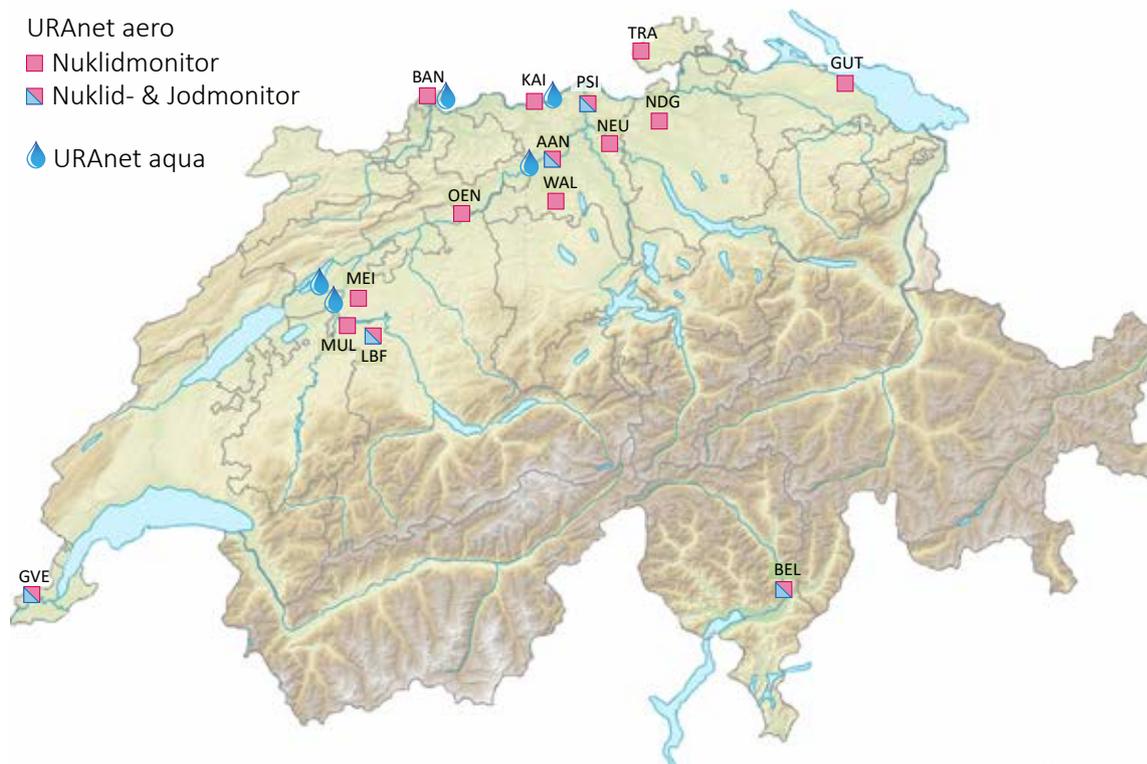
Automatische Messnetze (Figur 1) erfassen die Gamma-Dosisleistung über das ganze Land (NADAM = Alarm- und Messnetz zur Bestimmung der Dosisleistung) sowie speziell in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK = Messnetz in der Umgebung der Kernanlagen zur Bestimmung der Dosisleistung). Die kontinuierliche Überwachung der Radioaktivität der Aerosole und des Flusswassers wird durch die automatische 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; ¹⁴C-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 automatische Messnetz URAnet

Das neue automatische Messnetz zur Überwachung der Radioaktivität in der Luft (URAnet aero) ist seit September 2018 vollständig in Betrieb. Es ersetzt das veraltete RADAIR Messnetz, das nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl aufgebaut wurde. Das neue Messnetz ermöglicht die Identifikation und Quantifizierung der einzelnen im Aerosol 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 auch bezüglich Empfindlichkeit deutlich besser als sein Vorgänger: für eine 12-Stunden Messung erreicht es eine Nachweisgrenze von 3 bis 7 mBq/m³ für ¹³⁷Cs. 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).

Ergebnisse der Umweltüberwachung 2021

Allgemeine Überwachung von Luft, Niederschlag, Gewässer, Boden, Gras sowie Milch und anderen Lebensmitteln

Die Resultate 2021 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 ^7Be oder ^{210}Pb . Dank der hohen Empfindlichkeit der eingesetzten Messverfahren werden jedoch auch regelmässig kleinste Konzentrationen von künstlichen Radionukliden, insbesondere ^{137}Cs , auf den Aerosolfiltern nachgewiesen. Schweizer Böden enthalten immer noch ^{137}Cs aus dem Fallout des Tschernobyl-Unfalls von 1986 und den Atomtests in der Atmosphäre in den 1960er Jahren. Das Aufwirbeln von Bodenpartikeln mit dem darin enthaltenen ^{137}Cs ist für die Spuren verantwortlich ist, die heute noch in Schweizer Aerosolfiltern gemessen werden. Ein Anstieg der ^{137}Cs Konzentrationen in der Luft aufgrund erhöhter Staubaufwirbelung während Trockenperioden ist ein Phänomen, das regelmässig beobachtet wird.

Im Niederschlag waren im Jahr 2021 keine künstliche Radioaktivität nachweisbar. Das stimmt auch für die Flüsse, bis auf einige sporadische Spuren von ^{137}Cs , das durch Ausschwemmen von Partikeln aus Böden stammt.

Die Aktivität von natürlichem Tritium ist im Niederschlag und im Flusswasser im Allgemeinen unter 2 Bq/l. Künstlicher Tritiumeintrag 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 Erdboden dominieren die natürlichen Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen sowie das ^{40}K . Künstliche Radioisotope im Boden stammen aus Ablagerungen aus der Luft und zeigen regionale Unterschiede, die mit dem unterschiedlichen «Fallout» von Radioaktivität aus den oberirdischen Kernwaffenversuchen in den frühen 60er Jahren (besonders ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am und ^{137}Cs) und dem Tschernobyl-Reaktorunfall (vorwiegend ^{137}Cs) zusammenhängen. In den Alpen und Südalpen sind die Werte von ^{137}Cs (siehe Figur 2) und ^{90}Sr immer noch etwas höher als im Mittelland. Künstliche Alphastrahler wie

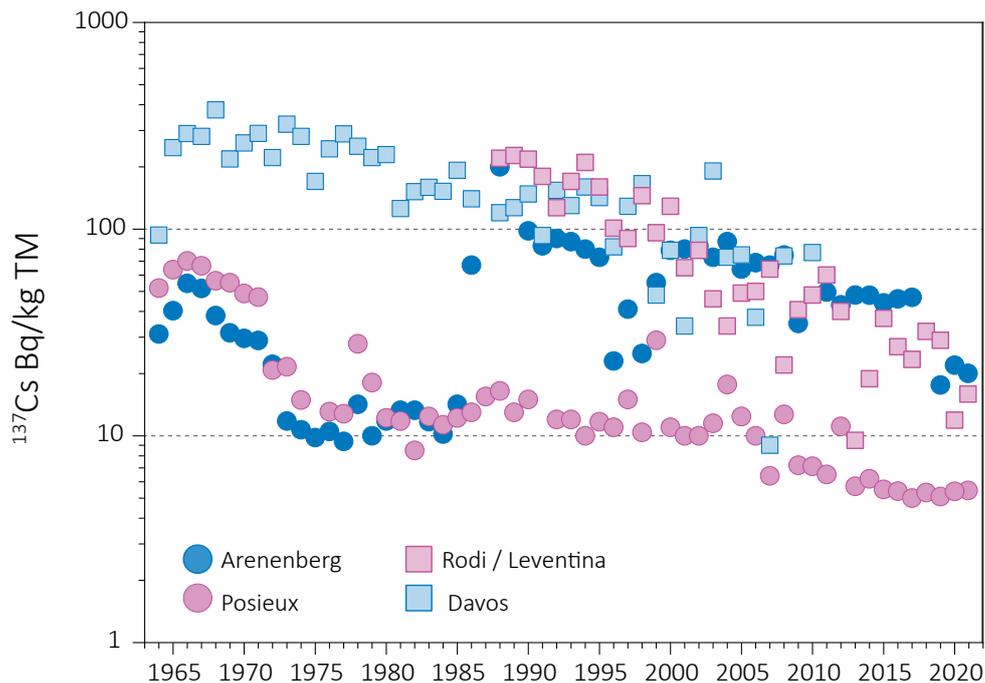
^{239}Pu und ^{240}Pu sowie ^{241}Am treten im Erdboden nur in sehr geringen Spuren auf.

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

In Kuhmilch blieb der ^{137}Cs -Gehalt meist unter der Nachweisgrenze. Nur wenige der 130 Milchproben, die im Berichtsjahr analysiert wurden, wiesen eine messbare ^{137}Cs -Aktivität auf: Der Maximalwert von 9.9 Bq/l wurde in einer Probe aus dem Centovalli festgestellt; andere Milchproben aus dem Tessin sowie den Bündner Südtälern zeigten ebenfalls geringe messbare Aktivitäten (< 1 Bq/l). Diese Spuren von ^{137}Cs sind hauptsächlich auf den Fallout aus dem Tschernobyl-Unfall zurückzuführen. Es ist zu bedenken, dass in der Schweiz die Regionen südlich der Alpen, insbesondere das Tessin, 1986 am stärksten vom radioaktiven Fallout betroffen waren, was erklärt, warum ^{137}Cs auch 35 Jahre nach dem Unfall in einigen Proben immer noch in höheren Konzentrationen gemessen werden kann. Die im Jahr 2021 gemessenen Aktivitäten blieben jedoch alle deutlich unter dem Höchstwert der Tschernobyl-Verordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs . Die vom Kantonalen Laboratorium BS, dem IRA in Lausanne und dem Labor Spiez gemessenen ^{90}Sr -Konzentrationen in 65 Milchproben waren 2021 sehr tief, mit einem maximal gemessenen Wert von 0.3 Bq/l und einem Medianwert von 0.04 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 die Tieflandregionen.

Nur eine Getreideprobe zeigte eine sehr geringe (0.3 Bq/kg), aber messbare ^{137}Cs -Aktivität; in den anderen 17 Getreideproben sowie in den 25 Obst- und Gemüseproben, die 2021 in der Schweiz gesammelt wurden, blieb die ^{137}Cs -Konzentration unter der Nachweisgrenze. Die im Getreide gemessenen ^{90}Sr -Werte waren ebenfalls sehr niedrig und lagen zwischen 0.04 und 0.21 Bq/kg.

Der Kanton Tessin setzte die systematische Überwachung der auf seinem Territorium bejagten Wildschweine fort, die 2013 in Zusammenarbeit mit dem BAG eingeführt wurde. Im 2021 wurden 1'774 Wildschweine vor Ort mit einem dosimetrischen Instrument ausgemessen. Nur 20 Tiere, also knapp 1% der Fälle, überschritten den Höchstwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs . Dieser Prozentsatz ist deutlich niedriger als in den letzten Jahren. Nachmessungen im Labor zeigten einen



Figur 2:
 ^{137}Cs (in Bq/kg Trockenmasse) in Bodenproben verschiedener Stationen der Schweiz (1964 - 2021).

^{137}Cs -Höchstwert von 2'662 Bq/kg. Die betroffenen Wildschweine wurden vom Kantonstierarzt beschlagnahmt. Die Ursache der Kontamination der Wildschweine ist bekanntlich der Verzehr von Hirschtrüffel, ein für Menschen ungeniessbarer, in tieferen Bodenschichten wachsender Pilz, der ^{137}Cs aufnimmt. Das ^{137}Cs , das nach dem Unfall in Tschernobyl auf dem Boden abgelagert wurde, wanderte seither allmählich in diese tieferen Schichten, wo es sich jetzt in Hirschtrüffeln anreichert. In Regionen mit einer hohen Deposition von ^{137}Cs nach dem Unfall, wie im Tessin, kann die Konzentration von ^{137}Cs in Hirschtrüffeln 10'000 Bq/kg übersteigen. Wildschweine lieben diese Trüffel, graben sie aus und verzehren sie, wodurch das ^{137}Cs in ihr Fleisch übergeht.

Die in den 27 Fleischproben von Wildschweinen aus dem Kanton Wallis gemessenen ^{137}Cs -Konzentrationen blieben mit einem Höchstwert von 9.7 Bq/kg niedrig. Fünf Wildfleischproben (Hirsch, Reh) aus dem Kanton Graubünden ergaben Werte zwischen 4 und 143 Bq/kg ^{137}Cs . In der einzigen Wildschweinprobe aus dem Kanton Graubünden betrug die ^{137}Cs -Konzentration 104 Bq/kg.

Gewisse einheimische Wildpilze, insbesondere Steinpilze und Reifpilze weisen immer noch erhöhte Werte von ^{137}Cs auf. So überschritten von den 155 Proben einheimischer Pilze, die 2021 von den Kantonen Tessin und Graubünden analysiert wurden, 5 Proben (das sind rund 3%) den in der Tschernobyl-Verordnung festgelegten Höchstwert von 600 Bq/kg für ^{137}Cs . Der höchste registrierte Wert betrug 1'970 Bq/kg (Frischmasse).

In den anderen einheimischen Lebensmitteln, die von den kantonalen Laboratorien analysiert wurden (Käse, Beeren, Konfitüren), 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 2021 analysierten die kantonalen Laboratorien BS und ZH 32 Lebensmittelproben (Tee, Gemüse, Würzen, usw.) aus Japan. Einzig ein getrockneter Shiitake-Pilz zeigte eine messbare ^{137}Cs -Aktivität (56 Bq/kg Trockengewicht).

Lebensmittelimporte aus anderen Ländern und speziell aus Osteuropa wurden, wie jedes Jahr, von den kantonalen Laboratorien (BS, ZH) ebenfalls analysiert; im Berichtsjahr waren es 154 Proben, die gammaspektrometrisch analysiert wurden. In etwa 10% dieser Proben wurden ^{137}Cs -Konzentrationen von mehr als 10 Bq/kg Frischmasse gemessen. Der höchste Wert (ca. 200 Bq/kg Frischmasse) wurde in einer Probe der Gelben Kraterelle festgestellt.

Somit wurde in der Schweiz keine Überschreitung des Höchstwertes für ^{137}Cs in Lebensmitteln registriert, die im Jahr 2021 importiert wurden.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 4, 5 und 7.2.

Überwachung in 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 2021 haben bestätigt, dass die Betreiber die gesetzlichen Grenzwerte einhalten.

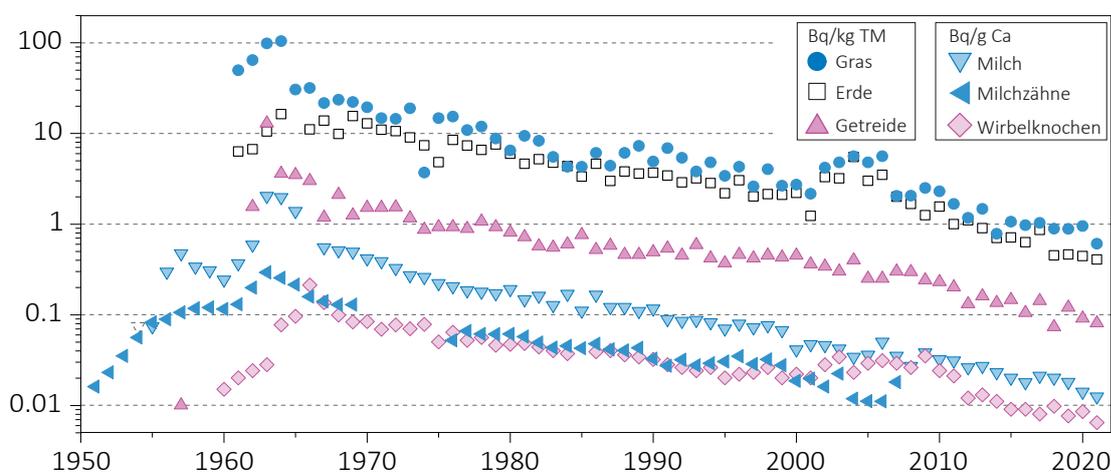
Das Kernkraftwerk Mühleberg wurde am 20. Dezember 2019 für die Stromproduktion abgeschaltet und am 15. September 2020 von der BKW definitiv stillgelegt. Dies markiert den Übergang vom Regime mit einer Betriebsbewilligung zu jenem der Stilllegungsverfügung. Mit der Stilllegung ist ein neues Reglement 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 2021 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 die Strahlung durch ^{16}N verschwunden, jedoch können die Stilllegungsarbeiten selber zu einer kurzzeitig erhöhten Dosis am Zaun führen. Dies wurde 2021 bei den Stichprobenkontrollen des ENSI am Arealzaun mehrfach festgestellt, wobei die Messwerte der Dosisleistung zwischen 0.08 (natürlicher Hintergrund) und 0.32 $\mu\text{Sv/h}$ schwankten. Höhere Dosisleistungswerte am Zaun des KKM wurden auch vom BAG im Rahmen der Messungen mit der In-situ-Spektrometrie beobachtet. Die Auswertung der am Zaun des KKM angebrachten TLD-Dosimeter ergab jedoch eine durchschnittliche Erhöhung der Umgebungsdosis (berechnet auf Basis der gemessenen Quartalswerte) von 0.016 mSv pro Woche, nach Abzug des natürlichen Hintergrundes.

Diese Werte erfüllen die Anforderungen von Art. 79 der StSV zur Begrenzung der Ortsdosis ausserhalb von Kontroll- und Überwachungsbereichen, da sich keine Person dauerhaft an diesen Orten aufhält. Hier ist zu beachten, dass die Direktstrahlungs-Immissionsgrenzwerte für die Ortsdosis gelten und sich nicht auf Personendosen beziehen. Diese Werte können daher nicht mit dem quellenbezogenen Dosisrichtwert für die Bevölkerung von 0.3 mSv/Jahr verglichen werden, da sich keine Person aus der Bevölkerung für lange Zeit am Zaun aufhält.

Die Ergebnisse des Immissionsüberwachungsprogramms rund um die Kernkraftwerke zeigten, dass die Auswirkungen der Kernkraftwerke auf die Umwelt 2021 gering blieben. Mit hochempfindlichen



Figur 3:
 ^{90}Sr in verschiedenen, zwischen 1950 und 2021 entnommenen Proben (logarithmische Skala).

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 61 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 2021 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 2021 in einer Sedimentprobe aus Hagneck Spuren von ^{60}Co gemessen und sporadisch geringe Aktivitäten von ^{54}Mn in Sedimenten aus Hagneck, Klingnau und Pratteln nachgewiesen. 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).

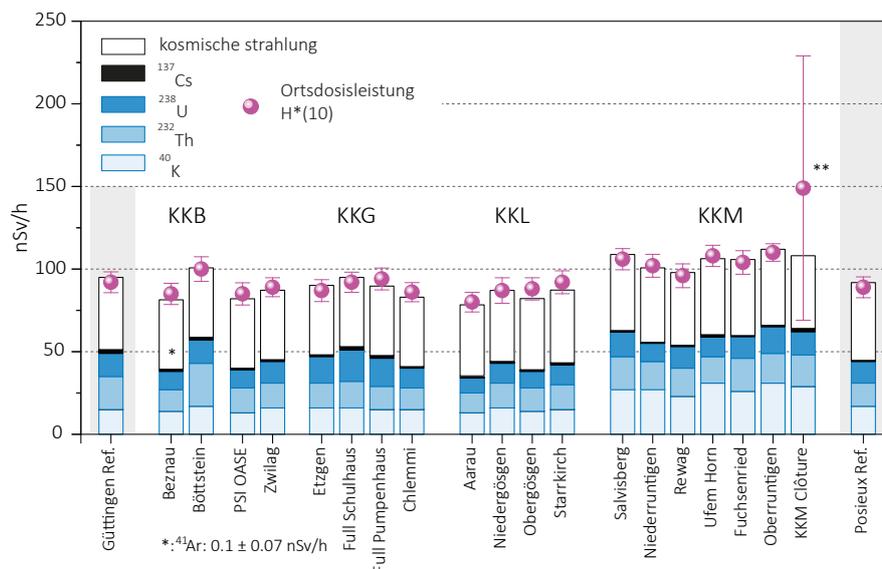
Die vom IRA durchgeführten $^{239+240}\text{Pu}$ und ^{241}Am Messungen an verschiedenen, stromabwärts der Kernkraftwerke entnommenen Proben der aquatischen Umwelt (Wasser aus Aare und Rhein, Wasserpflanzen, Sedimente) ergaben keinen Hinweis auf einen möglichen Einfluss durch Abgaben der Kernkraftwerke,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

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 (13 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 Gösigen vor der Revision.

Analysen von Fischen aus der Aare und dem Rhein flussabwärts der Schweizer Kernkraftwerke ergaben 2021 keine Hinweise auf künstliche Gammastrahler. Das Gleiche gilt für das untersuchte Grundwasser in Aarberg, Schönenwerd, Böttstein und Muttenz.

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



Figur 4: Beiträge zur Ortsdosis ($H^*(10)$) durch die verschiedenen Radionuklide, die vom BAG 2021 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 Gesamtdosisleistung mit Hilfe einer Ionisationskammer dargestellt. Damit lässt sich die Zuverlässigkeit der Methode verifizieren. ** Die erhöhte Dosisleistung, die am Zaun des KKM gemessen wurde, ist auf das Vorhandensein von Materialien aus den Stilllegungsarbeiten zurückzuführen, die zeitweise auf dem Gelände gelagert wurden (siehe Kap. 3.1).

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

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 und KKL bzw. 0.002 mSv für KKM), 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

Die vom CERN im Jahr 2021 durchgeführte Bilanzierung und Überwachung der Emissionen aus seinen eigenen Anlagen in Kombination mit den Dosisberechnungen für die Bevölkerung der Referenzgruppen hat gezeigt, dass die Organisation den in ihren Vorschriften festgelegten Grenzwert von 0.3 mSv/Jahr eingehalten hat. Die maximale effektive Dosis für die Schweizer Öffentlichkeit blieb unter 0.002 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 2021 sporadisch Spuren der von den CERN-Anlagen produzierten Radionuklide kurzer Halbwertszeit wie ^{24}Na , ^{41}Ar oder ^{131}I nachgewiesen werden, ihre Konzentrationen betragen jedoch nur einen Bruchteil der in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Immissionsgrenzwerte für die Luft. Die übrigen Ergebnisse der Luft-, Boden-, Wasser- und Sedimentmessungen im Nant d'Avril unterschieden sich nur geringfügig 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 0.011 mSv führten. Die Abgabe 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 2021 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 wer den Niederschläge, Luftfeuchtigkeit, Gewässer und in einigen Fällen auch Lebensmittel.

Wie in den vorangegangenen Jahren zeigten die Resultate der Überwachung 2021 einen signifikanten Einfluss der Tritium-Emissionen auf Umweltproben (Niederschlag und Nahrungsmittel) aus der unmittelbaren Umgebung dieser Industriebetriebe, besonders bei Niederwangen, wobei die gemessenen Konzentrationen dort verglichen mit früheren Jahren deutlich zurückgingen. Die Tritiumkonzentration im Niederschlag bei der Messstation «Firma» (in der Nachbarschaft der Firma mb-microtec, Niederwangen) betragen 2021 im Mittel 365 Bq/l mit einem Maximum von 780 Bq/l. Dieser Wert entspricht ca. 3.9% des in der neuen Strahlenschutzverordnung festgelegten Immissionsgrenzwertes von $20'000$ Bq/l für öffentlich zugängliche Gewässer. Werte gehören zu den niedrigsten seit 2008. Erhöhte Tritiumwerte zeigten auch in der Umgebung des Unternehmens geerntete Lebensmittel – aber auch hier mit einer Tendenz zu tieferen Werten. Der Median von 12 Destillaten von im August in der Umgebung des Betriebes geernteten Früchten und lag bei 40 Bq/l, mit

einer Spannbreite der Werte zwischen von 3 bis 140 Bq/l. In Destillaten von 3 Milchproben waren die Tritiumkonzentrationen um 10 Bq/l (9.7-10.2 Bq/l). Die zusätzlichen Dosen, die sich aus dem regelmässigen Verzehr solcher Produkte (Regenwasser und Gemüse) ergeben könnten, überträfen 1 μ Sv/Jahr nicht und stellen daher kein Gesundheitsrisiko dar.

Der Rückgang der Tritiumkonzentrationen in den verschiedenen Umweltkompartimenten in der Umgebung von mb-microtec erklärt sich durch die deutliche Reduzierung der Emissionen seit 2020, nach der Umsetzung verschiedener technischer Verbesserungen.

Die Tritiumkonzentrationen in den wöchentlichen Regenproben von Teufen/AR in der Umgebung der Firma RC Tritec blieben 2021 tief, mit einem Maximum von 54 Bq/l und einem Medianwert von 34 Bq/l. Diese Werte sind vergleichbar mit denen des Jahres 2020 und gehören zu den niedrigsten seit Beginn der Überwachung.

Schliesslich sei angemerkt, dass das BAG und die SUVA Anfang Oktober 2021 ein Programm zur Überwachung von Tritium im Niederschlag und in der Luftfeuchtigkeit in der Umgebung des Unternehmens Smolsys in Root im Kanton Luzern gestartet haben, das ebenfalls über eine Genehmigung zur Freisetzung von Tritium in die Umwelt verfügt. Die Ergebnisse für das Jahr 2021 sind noch lückenhaft, deuten aber auf eine geringe Umweltmarkierung hin, wobei die Tritium-Konzentrationen im Niederschlag zwischen <5 und 16 Bq/l liegen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 5, 9.1 und 9.3.

Radium-Altlasten

Der Aktionsplan Radium 2015-2022, der im Mai 2015 vom Bundesrat genehmigt wurde, soll das Problem der radiologischen Altlasten lösen, die durch die Anwendung von radiumhaltiger Leuchtfarbe in der Uhrenindustrie bis in die 1960er-Jahre entstanden sind. Die Arbeiten in den vier verschiedenen Schwerpunkten des Aktionsplans wurden 2021 fortgesetzt, allerdings musste die Feldarbeit wegen der COVID-19-Pandemie erneut über mehrere Monate hinweg eingeschränkt werden, insbesondere im privaten Bereich, der 80% der betroffenen Grundstücke ausmacht. Die gesundheitlichen Einschränkungen führten somit zu einer Verzögerung der Diagnosen und Sanierungen um ein Jahr, und dies trotz der zusätzlichen externen Unterstützung, die für die Diagnosen eingesetzt wurde. Um den Rückstand aufzuholen hat der Bundesrat den Aktionsplan Radium im April 2022 bis Ende 2023 verlängert.

Teilprojekt «Gebäude»

Stand 31. Dezember 2021 wurden bei 880 Liegenschaften Diagnosen im Zusammenhang mit Radium-226 (²²⁶Ra) durchgeführt, was 80% der im Inventar erfassten Liegenschaften entspricht. 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 ²²⁶Ra in der Erde.

Von den 880 untersuchten Liegenschaften sind 137 (rund 16%) sanierungsbedürftig im Sinne von Art. 153 StSV. Bei 118 Liegenschaften sind die Sanierungsarbeiten abgeschlossen oder im Gange.

In den 86 Wohnungen (oder Gewerbeobjekten), für die eine Sanierungsverfügung vorliegt, liegen die geschätzten Dosen in 43 Wohnungen zwischen 1 und 2 mSv/Jahr, in 28 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 87 zu sanierenden Gärten gemessen wurden, betragen im Durchschnitt 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. Komplexe Fälle werden in der Unterstützungsgruppe «Mischbelastungen», bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern des BAG, des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und der Suva, besprochen, um die Einhaltung der Strahlenschutz- und der Umweltschutzgesetzgebung sowie den Schutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer sicherzustellen.

Teilprojekt «Deponien»

Das Teilprojekt «Deponien» hat einerseits zum Ziel, ehemalige Deponien zu erfassen, die möglicherweise mit ²²⁶Ra kontaminierte Abfälle enthalten, und andererseits Massnahmen zu definieren, um die Umwelt und die Gesundheit der Bevölkerung sowie der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer vor den Gefahren zu schützen, die mit diesen Abfällen verbunden sind.

Im Oktober 2021 veröffentlichte das BAG den technischen Bericht «Erfassung und Verwaltung von ehemaligen Deponien, die radiumkontaminierte Abfälle enthalten könnten» unter www.bag.admin.ch/heritages-radium (Radiumaltlasten in Deponien). Dieser Bericht, der in Zusammenarbeit mit dem BAFU und in Absprache mit den betroffenen Kantonen erstellt wurde, legt die Methode zur Identifizierung potenziell betroffener ehemaliger

Deponien, ihre Einstufung in drei Risikoklassen sowie die insbesondere bei Aushubarbeiten zu ergreifenden Schutzmassnahmen fest.

Die hauptsächlich betroffenen Kantone (Bern, Genf, Jura, Neuenburg und Solothurn) haben ihre ehemaligen Deponien nach dem festgelegten Verfahren klassifiziert. Auf diese Weise wurden über 280 ehemalige Deponien identifiziert, die möglicherweise mit ^{226}Ra kontaminierte Abfälle enthalten. Die entsprechende Liste ist unter obigem Link veröffentlicht. Das BAG bereitet derzeit eine Richtlinie vor, die die langfristige Umsetzung der Überwachungsprozesse konkretisieren und die Verantwortlichkeiten der verschiedenen Interessengruppen klären soll. Es ist geplant, die hauptsächlich betroffenen Kantone im Laufe des Jahres 2022 zu konsultieren.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.5.

Verwendung von radioaktiven Stoffen in Spitälern

In Spitälern wird bei der Diagnostik und Behandlung von Schilddrüsenerkrankungen ^{131}I verwendet (Halbwertszeit 8 Tage). Jodtherapie-Patienten, die mit weniger als 200 MBq (1 MegaBq = 10^6 Bq) behandelt wurden, dürfen das Spital nach der Therapie verlassen. Bei über 200 MBq müssen die Patienten 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 einem Anstieg um 50% zwischen 2019 und 2020 hat sich die in der Schweiz angewandte Gesamtaktivität von ^{177}Lu im Jahr 2021 im Vergleich zum Vorjahr mit 10.8 TBq noch einmal fast verdoppelt. Um die Radiotoxizität zu berücksichtigen rechnet man die Aktivität von ^{177}Lu in Äquivalent ^{131}I ; dies ergibt 0.23 TBq Jod-Äquivalent (gegenüber 2.5 TBq für das eigentliche ^{131}I). Nachdem die Anwendung von ^{90}Y zwischen 2010 und 2020 um ca. einen Faktor 5 zurückgegangen war, stieg die Anwendung von ^{90}Y 2021 im Vergleich zu 2020 wieder stark an (Faktor 3).

Die Verwendung von ^{223}Ra (erste Anwendungen im Jahr 2013) ist hingegen 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 wurden 2021 ebenfalls durchgeführt (siehe unten). 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.

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 Kehrrechtverwertungsanlagen (KVA). Die Überwachung der Kläranlagen mit Labormessungen von Abwasserproben 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 und aufgrund Verzögerung zwischen Probenahme und Messung in der Regel nicht mit dem üblichen Programm mit Labormessungen nachgewiesen werden können, wurden 2021 auch kontinuierliche Messungen mit einer automatischen Messsonde im Zulauf der Kläranlagen von Bern und Bellinzona durchgeführt. Die Nuklide ^{131}I , ^{177}Lu und ^{111}In treten dort 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 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und $^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ erfordern aufgrund des hohen Immissionsgrenzwertes keine Rückhaltung im Spital und sind dementsprechend regelmässig nachweisbar. Die Immissionsgrenzwerte aller Radionuklide sind im Wochenmittel bereits im Zulauf der ARAs eingehalten. Messungen in ausgewählten ARAs werden weitergeführt, da sie wertvolle zusätzliche Informationen zu den Emissionen der Spitäler geben, die insgesamt doch ein nicht zu vernachlässigende Quelle für künstliche Radionuklide in der Umwelt darstellen.

Der Zweck der Überwachung von KVAs besteht darin, soweit wie möglich 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.

Die Überwachung der Radioaktivität im Rauchgaswaschwasser von KVAs ergab 2021 keine ungewöhnlichen Ergebnisse. Im Januar 2019 hatte das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt in einer wöchentlichen Probe eine besonders hohe Tritiumkonzentration (833'000 Bq/l) gemessen. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse war die gesamte verbrannte Aktivität auf ca. 700 GBq geschätzt worden. Obwohl dieser Vorfall keine Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung hatte, veranlasste die Wiederholung des Phänomens das BAG 2020 dazu, bei der Bundesanwaltschaft eine Anzeige einzureichen. Die Ermittlungen führten leider nicht zum Auffinden des Ursprung der verbrannten Quelle.

Art. 114 StSV erlaubt unter bestimmten Voraussetzungen die Deponierung von schwach radioaktiven Abfällen mit Zustimmung der Genehmigungsbehörde. Diese Möglichkeit gilt insbesondere für ^{226}Ra -haltige Abfälle, die vor dem Inkrafttreten der StSV von 1994 angefallen sind. Nach Art. 114 muss das BAG Deponien, in denen solche Abfälle dauerhaft abgelagert wurden, überwachen, um sicherzustellen, dass die Grenzwerte für die effektive Dosis eingehalten werden. Diese Überwachung erfolgt durch die Messung von ^{226}Ra im Sickerwasser und/oder im Grundwasser. Um die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Dosisgrenzwerte zu gewährleisten, ist es notwendig, dass der Immissionsgrenzwert für Wasser im Sickerwasser der Deponie eingehalten wird (siehe Wegleitung «Ablagerung von radioaktiven Abfällen mit geringer Aktivität auf einer Deponie»). Der Immissionsgrenzwert für ^{226}Ra in Gewässern ist auf 580 mBq/l festgelegt. Die Ergebnisse der Messungen im Jahr 2021 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 Bq/kg bei den Männern. Die ^{90}Sr -Konzentration in den Wirbelknochen und Milchzähnen liegt heutzutage nur noch bei rund einem Zehntel mBq/g Kalzium (Figur 3). Strontium wird vom menschlichen Körper ebenso wie Kalzium in Knochen und Zähnen eingelagert. Die Wirbelknochen werden als Indikator für die Kontamination des Skeletts herangezogen, weil diese Knochen eine besonders ausgeprägte Schwammstruktur aufweisen und rasch Kalzium über das Blutplasma austauschen. An Wirbelknochen von im laufenden Jahr verstorbenen Personen lässt sich das Ausmass der Kontamination der Nahrungskette mit ^{90}Sr eruieren. Die Milchzähne wiederum bilden sich in den Monaten vor der Geburt und während der Stillphase. Der Strontiumgehalt wird gemessen, wenn der Milchzahn von selbst ausfällt. Er gibt im Nachhinein einen Anhaltspunkt darüber, wie stark die Nahrungskette der Mutter zum Zeitpunkt der Geburt des Kindes kontaminiert war. Die in den Milchzähnen gemessenen Strontiumwerte (Figur 3) sind deshalb nach Geburtsjahr der Kinder aufgeführt. Dies erklärt, weshalb die Kurven zu den Milchzähnen und jene zur Milch beinahe parallel verlaufen. 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 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 2021 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 heute noch immer in vielen Proben messbar – 35 Jahre nach dem Unfall. Die gemessenen Konzentrationen nehmen zwar seit 1986 kontinuierlich ab, das Radiocäsium aus Tschernobyl ist aber dennoch verantwortlich für die 2021 in bestimmten Lebensmitteln, insbesondere in Wildscheinfleisch und gewisse Pilze aus dem Kanton Tessin, festgestellten Grenzwertüberschreitungen.

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 Tritiumverarbeitenden Industrien zeigt in derer unmittelbaren Nähe einen deutlich messbaren Einfluss von Tritium auf die Umwelt (Regen und Lebensmittel). In Niederwangen zeigten die 2021 im Regen festgestellten Tritiumkonzentrationen einen deutlichen Rückgang gegenüber früheren Jahren und erreichten maximal 4% des Immissionsgrenzwertes für Tritium in öffentlich zugänglichen Gewässern. In Lebensmitteln aus der Nachbarschaft des Betriebes ist Tritium zwar auch etwas erhöht, ohne aber ein gesundheitliches Risiko bei deren Konsum darzustellen. Bei den Abgaben von Radionukliden mit dem Abwasser aus Spitälern zeigt die Überwachung, dass die Immissionsgrenzwerte bereits im Zulauf der Kläranlagen grösserer Städte eingehalten ist. Die Überwachung des Wassers aus Kläranlagen, des Waschwassers aus Rauchgaswaschanlagen sowie Sickerwasser aus Deponien zeigte keine auffälligen Resultate.

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.

Chapitre

Kapitel

2

Exposition de la
population aux
rayonnements
ionisants

Strahlenexposition
der Bevölkerung

Catégories d'exposition

Origines de l'exposition aux rayonnements

Exposition aux rayonnements de la
population générale

Exposition des patients

Expositionskategorien

Ursachen der Strahlenexposition

Strahlenexposition der allgemeinen
Bevölkerung

Exposition von Patienten

2021

2.1

Strahlenexposition der Bevölkerung

S. Estier, P. Steinmann

Sektion Umweltradioaktivität URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

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

Expositionskategorien

Im Strahlenschutz unterscheiden wir drei Kategorien von Strahlenexpositionen:

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

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

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

zusätzlichen Dosen aufgrund der medizinischen Exposition sind separat zu betrachten, denn die medizinische Exposition ist gewollt und die Patientin oder der Patient hat einen direkten Nutzen für Gesundheit und Wohlbefinden.

Es handelt sich hier um einen Spezialfall: Die Person, die einer Strahlenexposition ausgesetzt ist, profitiert gleichzeitig direkt davon, beispielsweise von einer genaueren Diagnose.

Ursachen der Strahlenexposition

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

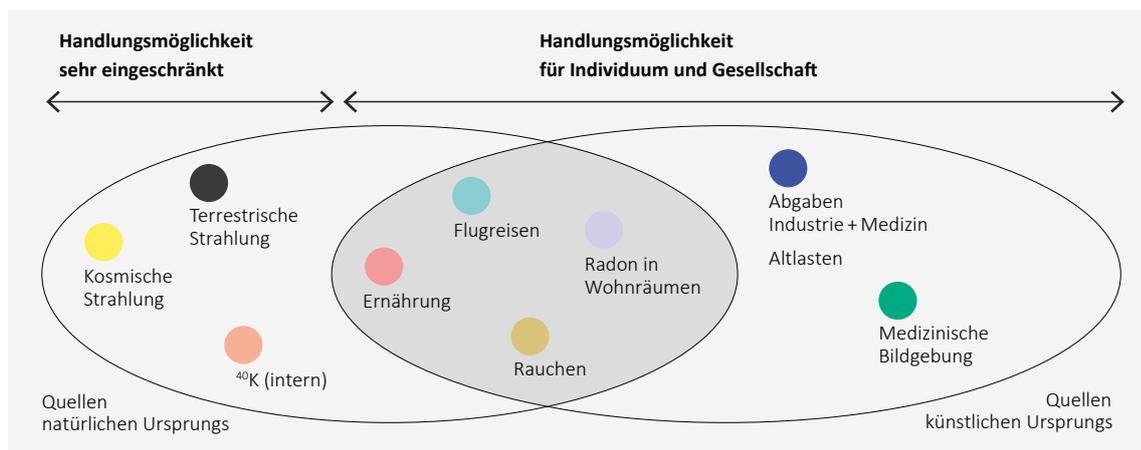


Abbildung 1 :

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

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

Abbildung 1 illustriert die hauptsächlichsten 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 etwa 0.38 mSv pro Jahr. Die kosmische Strahlung nimmt mit der Höhe zu. Deshalb beträgt sie beispielsweise auf 1'500 m über Meer 0.6 mSv pro Jahr. Die Dosen bei Flugreisen in grosser Höhe werden separat behandelt, da sie direkt durch das individuelle Verhalten beeinflusst werden.

Strahlenbelastung durch Nahrungsmittel

Bei der durch Nahrungsmittel verursachten Exposition ist zu unterscheiden zwischen Kalium-40 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 Kalium-40. Eine Person ist somit unabhängig von ihren Ernährungsgewohnheiten immer gleich stark exponiert. Da Kalium-40 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 Kalium-40 hängt hier die Exposition direkt von den Ernährungsgewohnheiten ab.

In gewissen Fischen und Meeresfrüchten kann beispielsweise Polonium-210 und Blei-210 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 Cäsium-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 Lungenkrebsrisiko aufgrund von Radon neu eingeschätzt und deutlich nach oben korrigiert. In ihrer Publikation 137 (2017) schlägt die ICRP einen neuen Dosiskoeffizienten für Personen am Arbeitsplatz vor, der auch für die Radonexposition der Bevölkerung in Wohnräumen anwendbar ist und mit der Einschätzung aus ICRP 115 (2010) übereinstimmt. Der neue Dosiskoeffizient wurde auf der Basis eines dosimetrischen Modells bestimmt und dient in der Schweiz als Referenz für die Bevölkerung sowie für die Personen am Arbeitsplatz. Folglich beträgt die durchschnittliche «Radondosis» für die Schweizer Bevölkerung mit dem neuen Dosiskoeffizienten etwa 3.3 mSv pro Jahr. Der angegebene Mittelwert leitet sich aus der durchschnittlichen Radonkonzentration in Gebäuden von 75 Bq/m³ ab (diese wird zukünftig neu berechnet). Jedoch ist die Radonbelastung der Bevölkerung nicht einheitlich bzw. der Bereich der gemessenen Werte sehr gross. Es sind z. B. Spitzenwerte von mehreren Tausend Bq/m³ gemessen worden.

Der wissenschaftliche Ausschuss der Vereinten Nationen für die Auswirkungen radioaktiver Strahlung (UNSCEAR) empfiehlt allerdings nach seiner jüngsten Bewertung die Beibehaltung eines Dosiskoeffizienten, der deutlich niedriger ist als derjenige der ICRP. Diese Koeffizienten werden im Rahmen des UNSCEAR-Mandats zu Vergleichszwecken bei der Bewertung der weltweiten Bevölkerungsexposition verwendet. Die durchschnittliche «Radondosis» der Schweizer Bevölkerung mit dem UNSCEAR Dosiskoeffizient würde bei etwa 1.9 mSv pro Jahr liegen.

Strahlenbelastung durch Rauchen

Während die gesundheitsschädigende Wirkung des Tabakkonsums allgemein bekannt ist, ist vielen Menschen nicht bewusst, dass Rauchen auch eine zusätzliche Exposition gegenüber ionisierender Strahlung darstellt. Bei Raucherinnen und Rauchern führt das Inhalieren von natürlichen Radionukliden, wie Polonium-210 und Blei-210, die in den Tabakblättern enthalten sind, zu einer zusätzlichen Strahlendosis, verglichen mit Nichtraucherinnen und Nichtrauchern. Gemäss neueren Studien liegt der Mittelwert für die effektive Dosis beim Rauchen von 20 Zigaretten täglich bei 0.26 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 Radionukliden in der Umwelt. Die Emissionen radioaktiver Stoffe über Abluft und Abwasser aus Kernkraftwerken, Industriebetrieben und Forschungszentren ergeben bei Personen, die in unmittelbarer Nähe wohnen, Dosen von höchstens einem Hundertstel mSv pro Jahr. Der Dosisgrenzwert für die Bevölkerung in geplanten Expositionssituationen liegt bei 1 mSv pro Jahr und gilt hauptsächlich für diese Komponente der Exposition.

Zu den radiologischen Altlasten gehört der radioaktive Fallout als Folge des Reaktorunfalls von Tschernobyl im April 1986 und der oberirdischen Kernwaffenversuche in den frühen 1960er Jahren; diese Beiträge verursachen

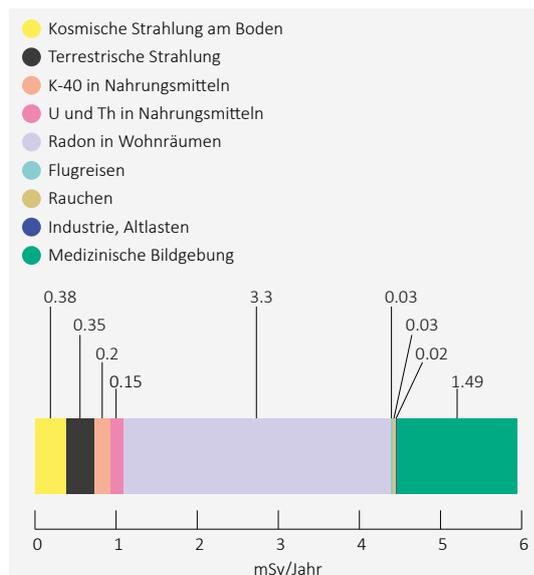


Abbildung 2:
Durchschnittliche Beiträge zur effektiven Dosis pro Jahr und Einwohner/in der Schweiz in mSv.

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 mSv¹ durch CT-Untersuchungen erhalten. Dabei ist allerdings zu erwähnen, dass die Mehrheit der Patientinnen und Patienten diese hohen Dosen in fortgeschrittenem Alter erhalten.

Bilanz der Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung

Durchschnittliche Exposition

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

Variabilität der Exposition

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

Um ein Gesamtbild der Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung zu erhalten, ist es folglich wichtig, die individuellen Voraussetzungen, beispielsweise Wohnort, Lebens- und Ernährungsgewohnheiten und erhaltene medizinische Untersuchungen, zu berücksichtigen. Dies ermöglicht es bei den Strahlenschutzmassnahmen für die Bevölkerung gezielt Prioritäten zu setzen. Auch ist so für jede und jeden besser nachvollziehbar, inwiefern 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 Expositionsquellen zur effektiven Dosis beurteilt. Die resultierenden Gesamtdosen für die jeweilige fiktive Person sind in Abbildung 3 dargestellt.

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>

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

- Fall 1: jährliche Dosis einer Person, die nicht raucht, nicht im Flugzeug reist, in einer Wohnung mit schwacher Radonkonzentration und schwacher terrestrischer und kosmischer Strahlung lebt und wenig Lebensmittel konsumiert, die reich sind an natürlichen Radionukliden,
- Fall 2: jährliche Dosis einer Person wie im Fall 1, ausser dass die Radonkonzentration in der Wohnung dem schweizerischen Durchschnitt entspricht (75 Bq/m^3),
- Fall 3: jährliche Dosis einer Person, die in einer Gemeinde mit mittlerer Radonkonzentration und mittlerer terrestrischer und kosmischer Strahlung wohnt, die durchschnittlich oft Lebensmittel konsumiert, die reich sind an natürlichen Radionukliden, täglich 2.5 Zigaretten raucht und jedes Jahr einmal Zürich-Doha retour (9'000 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).

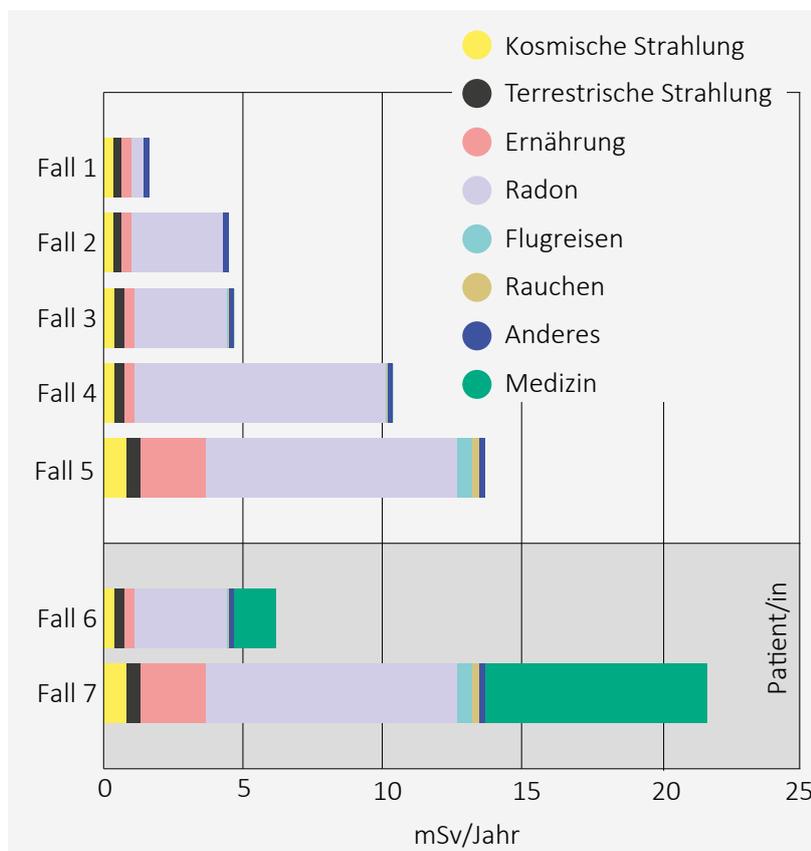


Abbildung 3: Standardisierte Expositionsszenarien der Bevölkerung mit Angabe der Jahresdosis in mSv.

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

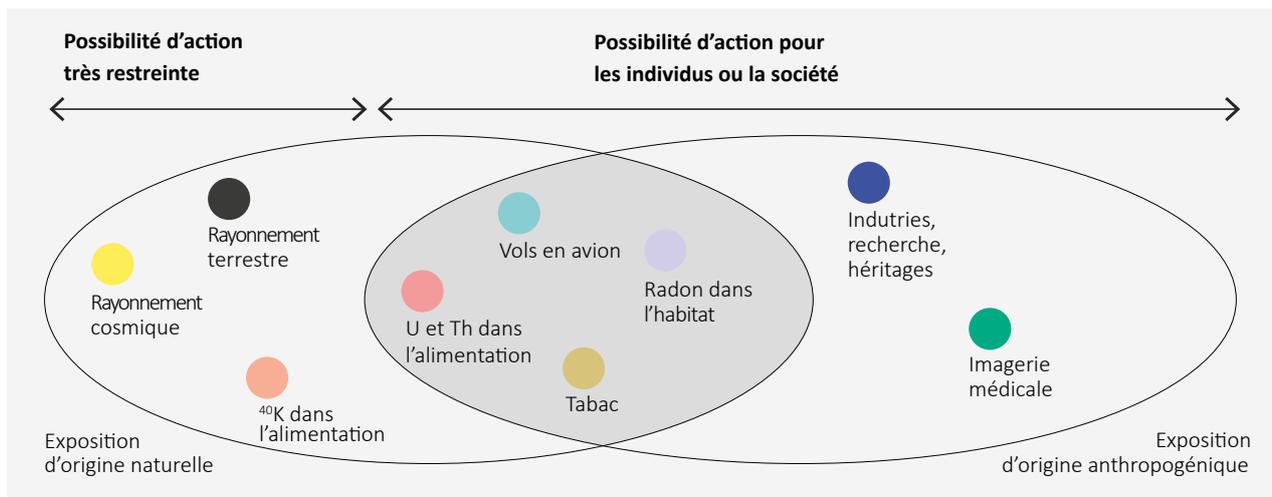


Figure 1 :
 Les contributions importantes à l'exposition aux rayonnements de la population générale. Ovale gauche: exposition d'origine naturelle. Ovale droit: exposition d'origine anthropogénique. Zone de chevauchement (fond sombre): la source de rayonnement est d'origine naturelle, mais l'exposition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

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

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

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

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 à 0.38 mSv/an. 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 sont plus élevées pour les trajectoires à proximité des pôles que pour celles proches de l'équateur. Pour le personnel navigant, la dose supplémentaire liée au rayonnement cosmique peut atteindre plusieurs mSv par an.

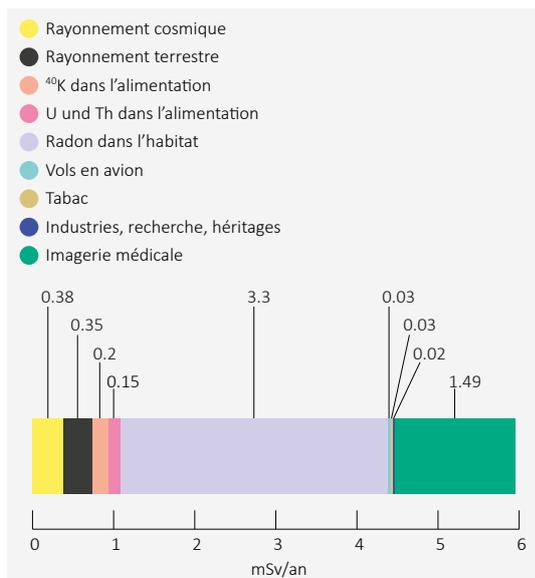


Figure 2 : Contributions moyennes à la dose efficace (en mSv) par année et par habitant en Suisse.

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

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

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

Exposition des patient(e)s

Doses de rayonnement dues au diagnostic médical

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

Bilan de l'exposition de la population Suisse

Exposition moyenne

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

Variabilité de l'exposition

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

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

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

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

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

- Cas 1: dose annuelle reçue par un individu ne fumant pas, ne voyageant pas en avion, vivant dans une habitation à faible concentration en radon et à faible niveau de rayonnements terrestres et cosmiques, et consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.
- Cas 2: dose annuelle reçue par l'individu du cas 1, à la différence que la concentration en radon dans son habitation équivaut à la valeur moyenne suisse (75 Bq/m^3).
- Cas 3: dose annuelle reçue par un individu vivant dans une commune à concentration moyenne en radon et à niveau moyen de rayonnements terrestres et cosmiques, ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels, fumant 2.5 cigarettes par jour et effectuant un voyage Zurich – Doha aller-retour (9'000 km) par an. Ce cas correspond ainsi

à celui d'une personne recevant une dose efficace annuelle égale à la valeur moyenne de la dose reçue par la population suisse (sans la contribution médicale).

- Cas 4: dose annuelle reçue par l'individu du cas 3, à la différence que celui-ci habite dans une habitation à concentration élevée de radon.
- Cas 5: dose annuelle reçue par un individu vivant dans une habitation à concentration élevée de radon et à niveau élevé de rayonnements terrestres et cosmiques, fumant 1 paquet de cigarettes par jour, ayant une consommation très importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant de plus fréquemment en avion.

Les cas 6 et 7 correspondent aux doses reçues par des individus exposés en plus en tant que patient(e) 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).

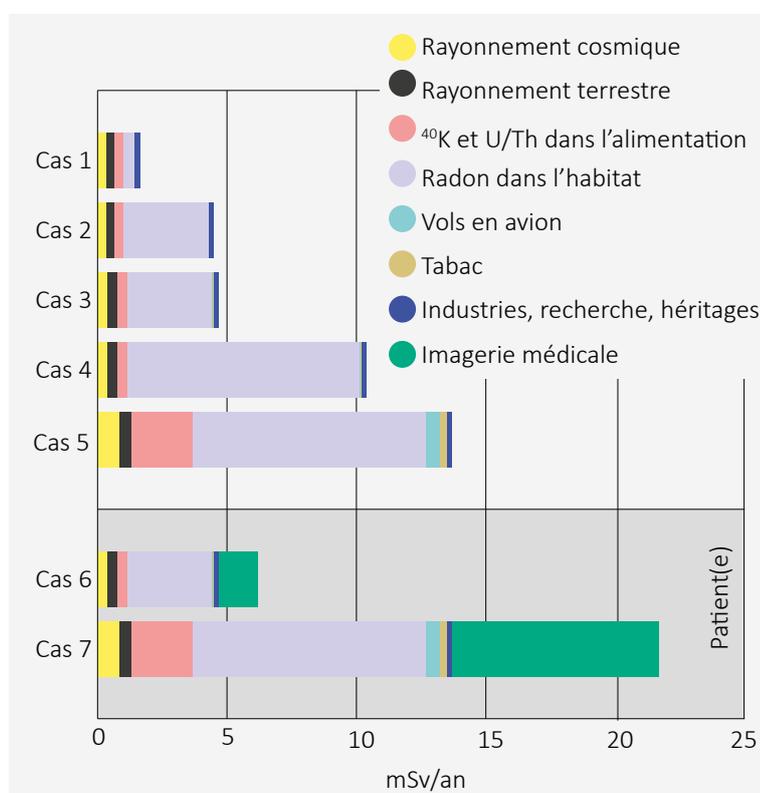


Figure 3 : Variabilité de l'exposition de la population suisse: dose efficace d'un individu en mSv/an pour 7 scénarios standardisés.



Chapitre
Kapitel
3

Rayonnement
externe

Externe
Strahlung

Mesures in situ
Réseau NADAM
Mesures d'aéroradiométrie

In situ Messungen
Netzwerk NADAM
Aeroradiometrische Messungen

2021

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

Les campagnes de mesures de spectrométrie gamma in situ ont essentiellement porté 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 pour l'année 2021. 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 2021 n'ont signalé aucune valeur susceptible de représenter un risque pour la santé du public.

Introduction

Le suivi permanent de l'exposition ambiante repose en Suisse sur les réseaux NADAM (échelle nationale) et MADUK (voisinage des installations nucléaires). L'objectif de ces réseaux en alerte 24h sur 24h est de signaler 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 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). En effet, 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 ICRU¹, notamment pour la détermination de l'activité des radionucléides présents sur le site.

Lors d'une mesure sur le terrain, un spectre gamma est enregistré et le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ global est mesuré simultanément sur le site à l'aide d'une chambre d'ionisation. L'analyse du spectre gamma in situ permet tout d'abord d'identifier les différents 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 $[\text{Bq}/\text{kg}]$ ou $[\text{Bq}/\text{m}^2]$, si leur distribution dans le sol est connue (déposition en surface, distribution homogène des radionucléides dans le sol, décroissance exponentielle, etc.).

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

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

^{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 ^{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 $H^*(10)$

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

où Z est l'altitude en km.

Pour connaître la contribution des radionucléides artificiels au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$, 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 radioactive dans le sol. La somme des contributions naturelles et artificielles calculées à partir des spectres in situ est alors comparée à la valeur globale mesurée avec la chambre d'ionisation, afin d'évaluer la fiabilité de la méthode de reconstitution.

² Lemerrier 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/kommision-strahlenschutz/stellungnahmen-dosimetrie/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspektrometrie.pdf.download.pdf/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspektrometrie.pdf>

Sites examinés en 2021

En 2021, les mesures de spectrométrie gamma in situ ont été réalisées au voisinage des centrales nucléaires de Beznau (KKB), Gösigen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM), 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.

Grangeneuve-Posieux/FR, Güttingen/TG et Cadenazzo/TI, trois sites de référence pour la surveillance de la radioactivité dans l'environnement en Suisse, ont également été examinés en 2021. Le site d'Arenenberg/TG complète la liste des sites visités en 2021. Cette méthode a également été utilisée dans le cadre du plan d'action radium sur différents sites tels que le Rosengarten à Bümpliz/BE, et à Bienne.

Résultats in situ 2021

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 5 pour les sites suisses examinés en 2021. 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 et son incertitude de la mesure globale avec chambre d'ionisation sont également représentées. En 2021, 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, hormis le ^{41}Ar détecté au point de mesure de Beznau situé près de l'enceinte.

En ce qui concerne la centrale nucléaire de Mühleberg, à l'arrêt depuis décembre 2019 (officiellement hors service en septembre 2020) les mesures in situ ont été réalisées en 2021 sur les sept sites examinés dans le cadre du programme complémentaires «Point zéro Démantèlement KKM 2017-2019» (voir figure 2) dont le rapport établi conjointement par

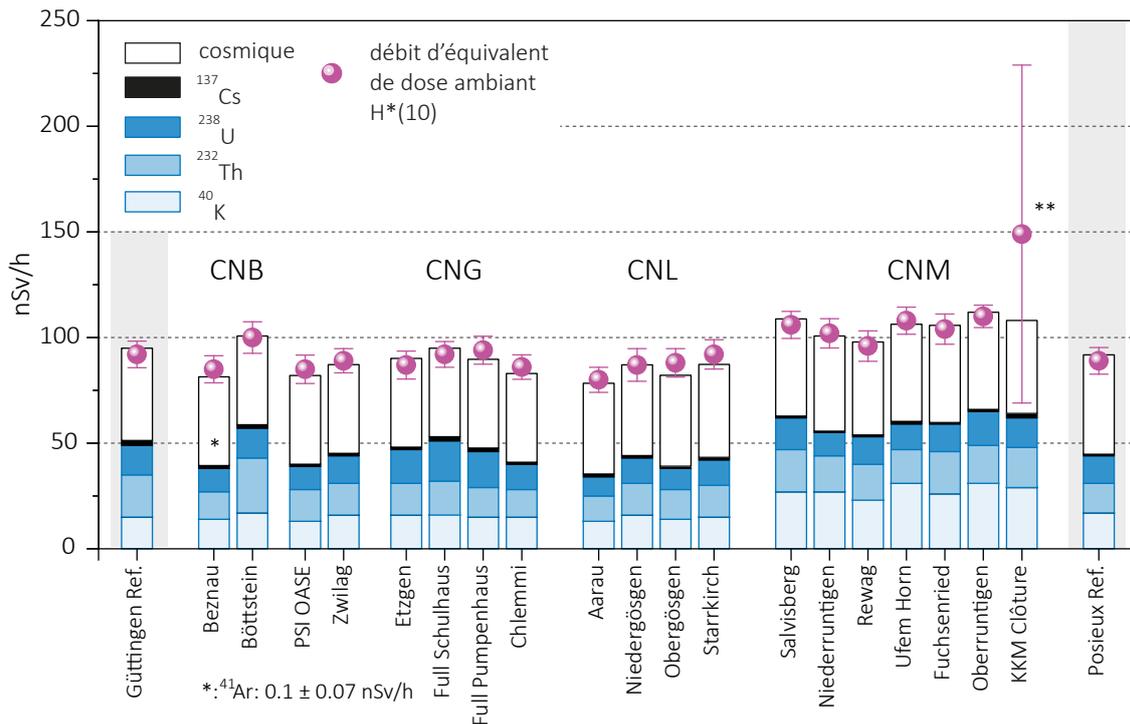


Figure 1:

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 2021 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. ** La valeur plus élevée de débit de dose mesurée à la clôture de KKM est due à la présence de matériaux issus des travaux de démantèlement, stockés temporairement sur le site (voir texte).

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.

Outre les 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.

La valeur plus élevée de débit d'équivalent de dose ambiant (149 ± 80 nSv/h) mesurée sur le site «clôture», qui comme son nom l'indique est très proche (env. 25 m, voir figure 3) de la barrière d'enceinte de la centrale, est due à la présence de matériel radioactif issu des travaux de démantèlement, entreposé temporairement à l'intérieur du site. Le spectre de la mesure de spectrométrie gamma in situ et l'évolution temporelle des mesures du débit de dose ambiant de la figure 3 illustrent ce cas particulier. Du ⁶⁰Co a été détecté lors de la mesure in situ et des pics du débit de dose ambiant atteignant 450 nSv/h ont été mesurés. La mesure gamma en labo-

ratoire du sol prélevé simultanément ne contenant pas de ⁶⁰Co (< 0.3 Bq/kg) indique bien que ces valeurs sont dues au matériel démonté et entreposé. Une estimation de la contribution au débit d'équivalent de dose ambiant due au rayonnement de ces matériaux issus des travaux de démantèlement peut être obtenue en soustrayant les contributions du ⁴⁰K, du ¹³⁷Cs et des séries de ²³⁸U et ²³²Th ainsi que la contribution du rayonnement cosmique à l'équivalent de dose ambiant total mesuré à l'aide d'une chambre d'ionisation. Cette contribution artificielle est ainsi d'environ 40 nSv/h comprenant entre autres le ⁶⁰Co visible sur le spectre gamma in situ et ev. d'autres éléments non décelables par cette méthode. Lors de ses mesures de contrôle périodique, l'IFSN a également enregistré des valeurs de débit de dose temporairement plus élevée au voisinage de la clôture de la centrale de Mühleberg en 2021 en raison des travaux de démantèlement (voir chapitre 8.2).

La figure 4 montre les résultats des mesures in situ réalisées au voisinage du CERN en 2021. Hormis le ⁴¹Ar détecté au point de mesure de La Praille près de l'enceinte du centre de recherche, ces résultats ne se distinguent pas de ceux enregistrés sur le site de référence de Posieux. Ces traces de ⁴¹Ar détectées dans l'air, proviennent très probablement de l'activation des tunnels du CERN. En 2021, le ²²Na n'a pas été détecté dans le sol des 5 sites

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

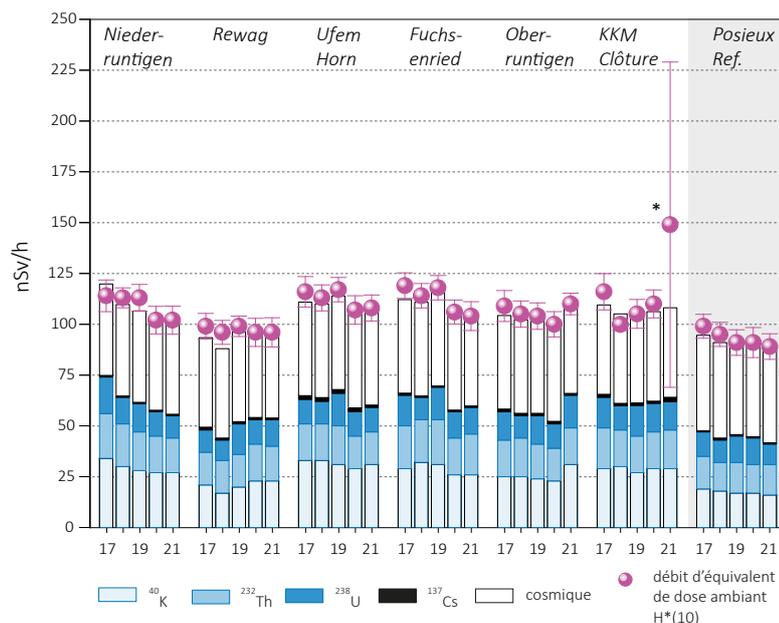


Figure 2:

Suivi 2017-2021 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 (voir texte).

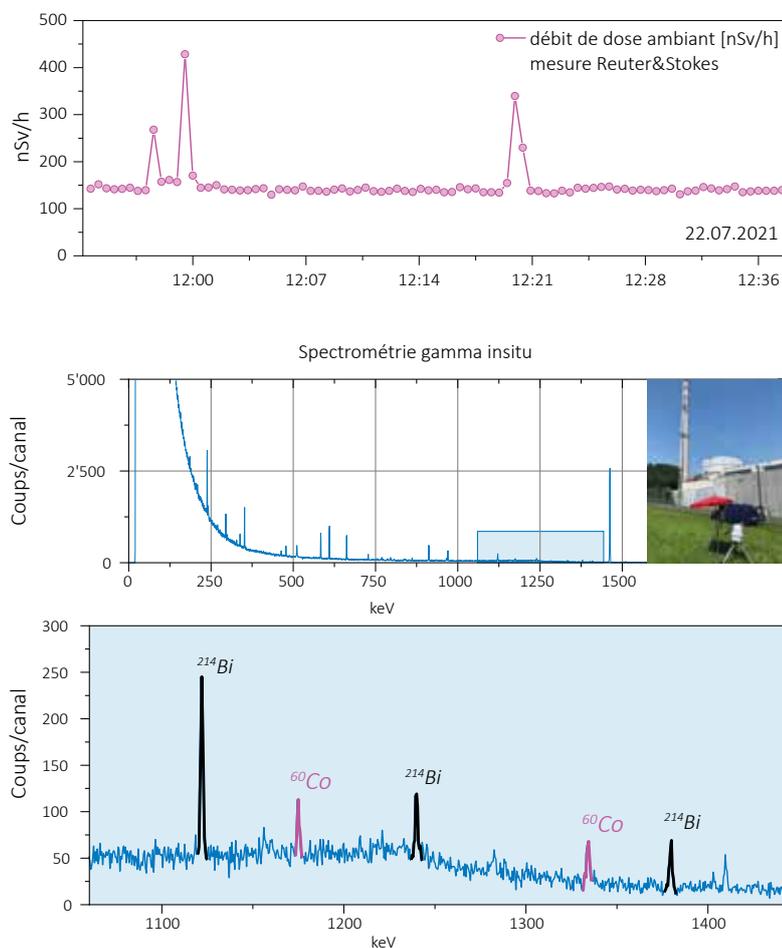


Figure 3:

Valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ et spectre de mesure in situ gamma effectués au point «Clôture» situé au voisinage proche de l'enceinte de la centrale nucléaire de Mühleberg en 2021.

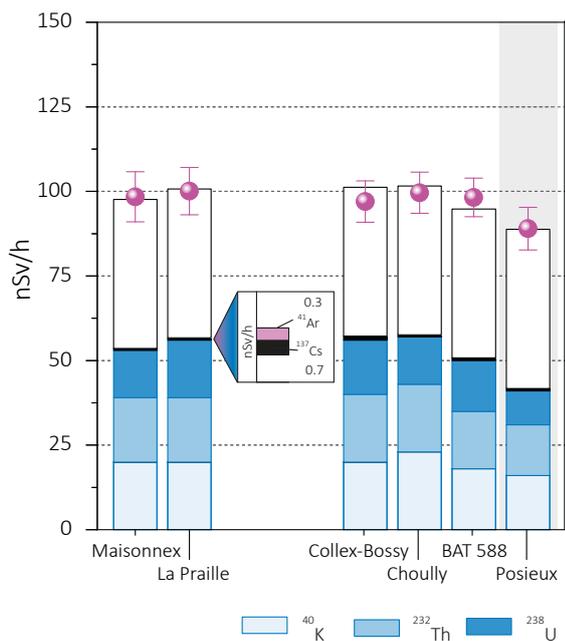


Figure 4 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2021 au voisinage du CERN ainsi qu'au point de référence de Posieux (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

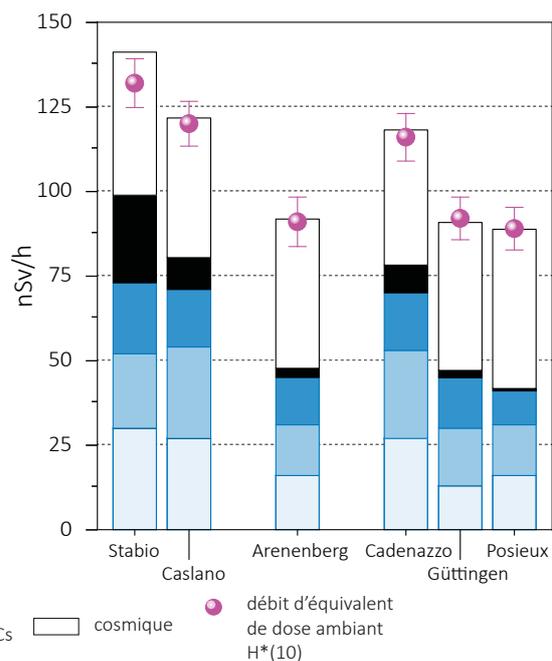


Figure 5 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2021 au Tessin, à Arenenberg ainsi que sur les 3 sites de référence. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

examinés.

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 tous les 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 2021 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

Das Netz für die automatische Dosisleistungs-Alarmierung und-Messung NADAM wird durch die Nationale Alarmzentrale NAZ betrieben. Es dient der grossräumigen und permanenten Überwachung der externen radioaktiven Strahlung in der Schweiz. 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 Meiringen als Beispiel herangezogen, um die Charakteristik der erhobenen Daten und deren Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen zu illustrieren.

Im Jahr 2021 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, ein Teil davon fix-installiert und Teil mobil und ad-hoc einsetzbar.

Gemäss der Verordnung über den Bevölkerungsschutz (BevSV, SR 520.12) ist die NAZ zuständig für den Betrieb des Netzes für die automatische Dosisleistungs-Alarmierung und-Messung (NADAM). Es dient ebenso der ständigen Überwachung der Radioaktivität, wie auch als Frühwarnsystem. Überschreitet der Messwert auf einer NADAM-Station einen Alarmwert, wird automatisch das Pikett (Bereitschaftsdienst) der 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](http://eurdep.org)) 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 Equipen des Labors Spiez aufbieten und veranlassen, damit bei Bedarf innert weniger Stunden das NADAM-Netz ergänzt bzw. verdichtet wird. Im Jahr 2021 gab es keinen Anlass zu einer solchen Verdichtung des NADAM-Netzes mit mobilen Sonden, 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 die technische Unterstützung durch den Hersteller der bisherigen Sonden nicht mehr gegeben ist und um die Kompatibilität der mobilen Kommunikationseinheiten mit aktuellen Mobilfunkstandards zu gewährleisten, werden im Rahmen des Werterhalts-Projektes NADAM 2020 seit dem Jahr 2020 alle NADAM-Sonden sukzessive durch neue Sonden des Typs Gamma Tracer XL2-2 des Herstellers Bertin GmbH ersetzt.

Die Evaluation und Beschaffung der neuen Sonden wurde mit dem ENSI gemeinsam durchgeführt, welches in seinem MADUK-Netz in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen baugleiche Sonden einsetzt. Mit dem Ersatz der letzten 10 ortsfesten NADAM-Sonden wird das Projekt NADAM 2020 im Jahr 2022 abgeschlossen werden.

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. Mit dem METAS wurde für die neu beschafften Sonden eine Gültigkeitsdauer der Eichung von max. 12 Jahren vereinbart, solange alle 12 Monate eine Funktionskontrolle die ausreichende Messgenauigkeit der betreffenden Sonde bestätigt.

Diese periodische Funktionskontrolle erfolgt mit einer zertifizierten radioaktiven Quelle durch Techniker von MeteoSchweiz oder vom Labor Spiez am Sondenstandort. Damit wird sichergestellt, dass der durch eine Sonde gemessene Wert im definierten Wertebereich 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 terrestrischen ODL-Beitrag ist Vicosoprano auf 1'089 m.ü.M. am Talgrund im Bergell, wo mit 178 nSv/h der zweithöchste ODL-Jahresmittelwert aller NADAM-Stationen gemessen im Jahr 2021 wurde.

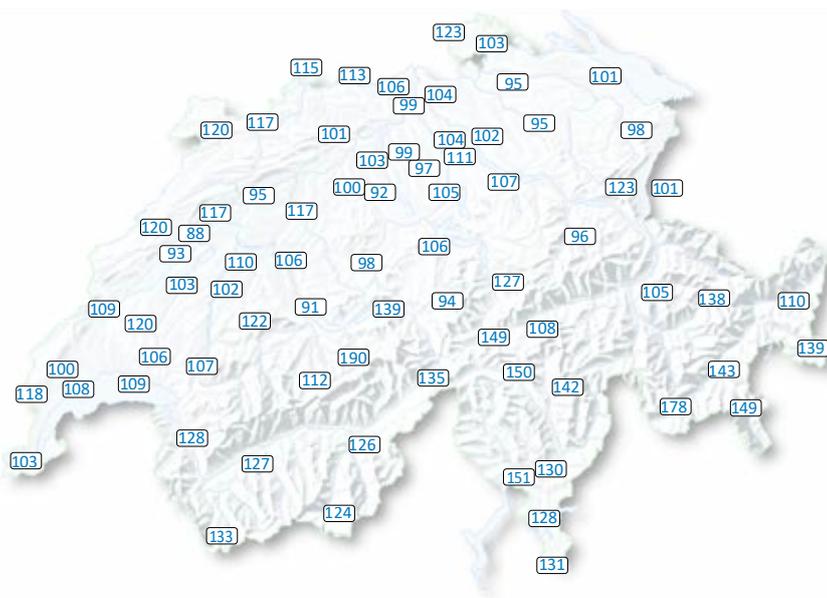
Die Höhe des Sondenstandortes über Meer bestimmt den kosmischen Anteil an der ODL. Je höher der Standort, desto weniger wird die kosmische Strahlung durch die Atmosphäre abgeschwächt, entsprechend grösser wird ihre

Intensität. Die Messstation Jungfrauoch liegt auf 3'580 m.ü.M. Die kosmische Strahlung in dieser Höhe führte im Jahr 2021 mit 190 nSv/h zum einzigen Jahresmittelwert der höher liegt als derjenige in Vicosoprano.

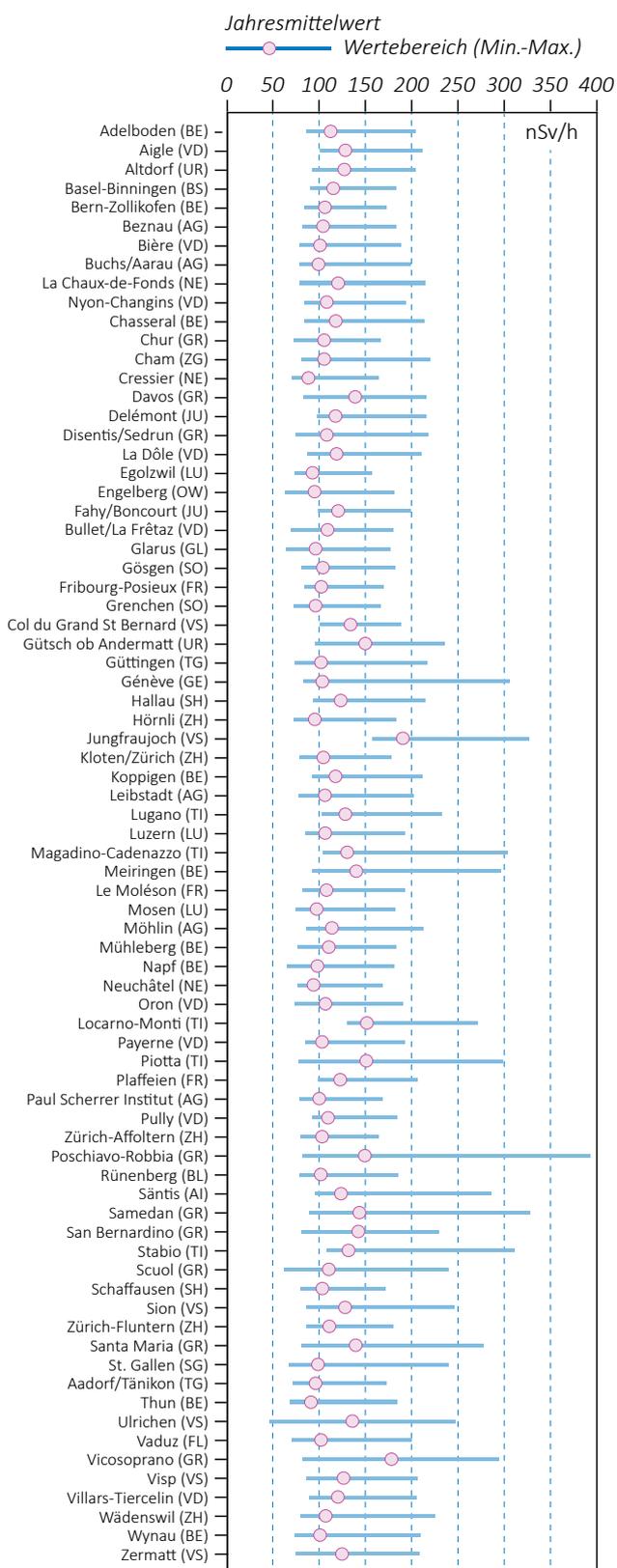
Der Messwertebereich, der die Minima und Maxima der letzten Jahre sicher einschliesst, wird bei der NAZ als Erfahrungsbereich einer bestimmten NADAM-Station bezeichnet. Dieser wird jährlich überprüft und wo nötig angepasst. Er hilft bei der automatischen Plausibilisierung der Messwerte und erleichtert somit das rasche Erkennen erhöhter Messwerte, auch wenn diese noch deutlich unter der Alarmschwelle von 1 mikroSv/h 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. Auch für die Stundenmittelwerte sind 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 Mittelwert bestimmt und zusätzlich derjenige Wert, der am häufigsten gemessen wurde. Wenn über ganze Zeiträume höhere oder tiefere Werte gemessen werden, beeinflusst dies den Jahresmittelwert,



Figur 1: Karte mit den Jahresmittelwerten 2021 aller NADAM-Sonden in Nanosievert pro Stunde, basierend auf den 10 min-Werten. Der Jahresmittelwert der Ortsdosisleistung variiert je nach Standort zwischen 88 nSv/h in Cressier und 190 nSv/h auf dem Jungfrauoch (VS).



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 2021.

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 abgeschirmt, 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.

Am Beispiel der Station Meiringen wird weiter unten in diesem Bericht der Einfluss der Witterungsbedingungen auf den Verlauf der Ortsdosisleistung im Detail diskutiert.

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 erhöht. Beide Effekte haben höhere ODL-Jahresmittelwerte von bis 190 nSv/h zur Folge.

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

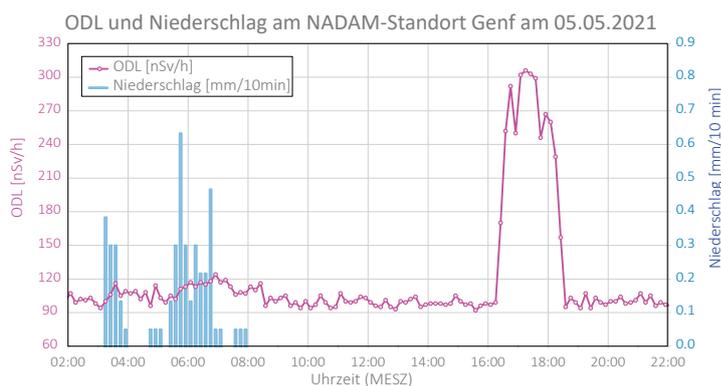
Auch im Jahr 2021 war es so, dass deutlich über dem Jahresmittelwert liegende Maxima während oder unmittelbar nach einsetzendem Niederschlag gemessen wurden, wenn natürlicherweise in der Luft befindliche radioaktive Partikel ausgewaschen und am Boden, d.h. in Sondennähe, deponiert wurden. Dieser Effekt 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

In einem Fall wurden durch eine NADAM-Sonde über einen Zeitraum von ca. 2 h deutlich über dem Erfahrungsbereich, jedoch klar unter einer Alarmschwelle liegende ODL-Werte gemessen. Die NADAM-Messwerte der Station Genf an diesem Tag sind in Figur 3 dargestellt.



Figur 3: Verlauf der 10 min-ODL-Werte und der Niederschlagsmenge am Standort Genf am 05.05.2021. Am Morgen fiel Niederschlag, am späteren Nachmittag wurden aufgrund des Einsatzes einer Strahlungsquelle in Sondennähe erhöhte ODL-Werte gemessen.

In der Nacht und am Morgen vor 08:00 Uhr MESZ fiel Niederschlag. Ein Einfluss des Niederschlages auf den ODL-Verlauf lässt sich nur knapp erahnen, da es schon am Vorabend geregnet hatte und etwaige in der Atmosphäre befindlichen partikelförmige Radionuklide bereits ausgewaschen waren.

Im 10 min-Intervall zwischen 16:20 und 16:30 Uhr begann die ODL deutlich anzusteigen, verblieb für knapp zwei Stunden im Bereich um 250 - 300 nSv/h und fiel schliesslich wieder auf das gewohnte Niveau um 100 nSv/h. Die Sonde registrierte keine Fehlfunktion und der ODL-Verlauf wirkte plausibel.

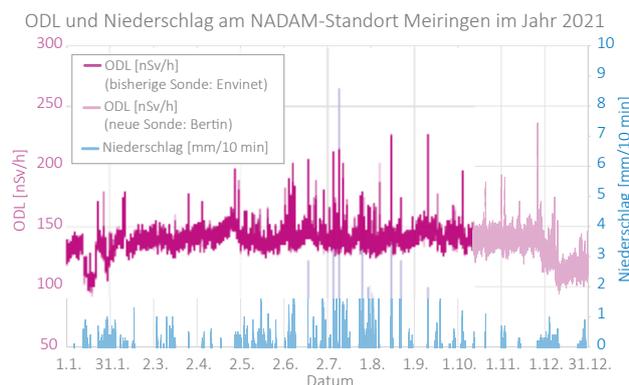
Da sich die erhöhten Messwerte nicht mit Niederschlag erklären liessen und die nächstgelegenen NADAM-Stationen unauffällige Verläufe registrierten, bot der Fachbereich Einsatz-Radioaktivität (ERA) der NAZ die kantonale Messunterstützung KAMU des Kantons Genf auf, um die Situation vor Ort zu untersuchen. Im Dialog mit der Flughafenverwaltung konnte der KAMU eruieren, dass in der fraglichen Zeit unter Verwendung einer Strahlungsquelle Schweissnahtprüfungen in der Nähe der NADAM-Sonde stattgefunden hatten, was schliesslich die beobachteten Werte plausibel erklären konnte.

Detaillierte Betrachtung der NADAM-Station Meiringen

Figur 4 zeigt den Verlauf der ODL-10 min-Mittelwerte in Nanosievert pro Stunde (nSv/h) am Standort Meiringen über das ganze Jahr 2021. Ebenfalls aufgetragen und auf der rechten y-Achse skaliert ist die Niederschlagsmenge in Millimetern pro 10 Minuten (mm/10 min). Der Jahresmittelwert der ODL liegt bei 139 nSv/h, beinahe gleich wie der häufigste Wert von 140 nSv/h. Dazu sind Spikes bis zu einem Maximalwert von 296 nSv/h zu erkennen.

Die ODL-Spikes über 180 nSv/h korrelieren eindeutig mit Niederschlag. Die Höhe der gemessenen Spikes ist nicht zur Niederschlagsmenge proportional, da der kurzfristige Anstieg der ODL primär davon abhängt, wie viele partikelgetragene Radionuklide (v.a. Zerfallsprodukte von Radon ^{222}Rn) sich gerade in der Atmosphäre befinden, wenn der Niederschlag einsetzt und die Deposition der Partikel am Boden in Sondennähe bewirkt.

Mit 296 nSv/h wurde am 08.06.2021 der höchste 10 min-ODL-Wert des Jahres 2021 in Meiringen gemessen. Um diesen Peak genauer betrachten zu können, ist in Figur 5 der Niederschlag und die ODL vom 07. bis 09.06.2021 dargestellt. Dem ODL-Anstieg war keine besonders lange Trockenphase vorangegangen.



Figur 4: Verlauf der 10 min-ODL-Werte und 10 min-Niederschlagswerte am Standort Meiringen über das Jahr 2021. Die ODL-Spikes jeweils bei einsetzendem Niederschlag sind gut zu erkennen. Am 12.10.2021 wurde die Sonde im Rahmen des Werterhaltes NADAM 2020 ersetzt. Die mit der neuen Sonde gemessenen Werte sind in hellem Rot eingezeichnet.

Die 20 Stunden seit dem letzten Niederschlag waren ausreichend, um genügend partikelgetragene Radionuklide in die Atmosphäre zu bringen, sodass beim einsetzenden Regen die ODL zwischen 22:00 und 23:00 Uhr für kurze Zeit vom normalen Untergrundwert unter 150 nSv/h auf gut das Doppelte anstieg. Klar zu erkennen ist auch, dass der anschließende Rückgang auf das normale Niveau schneller erfolgte als die Abnahme der Niederschlagsmenge, was auch zeigt, dass die Auswaschung von Radionukliden und deren Verfrachtung in Bodennähe primär am Anfang eines Niederschlagsereignisses geschieht.

Der ODL-Verlauf, die täglich um 07:00 Uhr gemessene Schneedecke und die täglich erfasste Neuschnee-menge in den ersten und letzten 7 Wochen des Jahres 2021 sind in Figur 6 dargestellt. Im ODL-Verlauf sind auch bei einsetzendem Schneefall Peaks zu erkennen, ähnlich wie sie über das ganze Jahr bei einsetzendem Regen auftreten.

Der Neuschnee am 12. Januar führte zu einer dickeren Schneedecke als zu Jahresbeginn und damit zu einer teilweisen Abschirmung des terrestrischen Anteils der ODL. Das zur Schneedecke gegenläufige Verhalten der ODL ist gut zu erkennen, sowohl in den ersten als auch in den letzten Wochen des Jahres.

Die Häufigkeit aller am Standort Meiringen im Jahr 2021 erhobenen ODL-Messwerte ist logarithmisch skaliert in Figur 7 aufgetragen. Der Wert von 140 nSv/h wurde insgesamt 2'921-mal und damit am häufigsten detektiert. Die zweite dargestellte Datenreihe zeigt die ODL-Werte, welche aufgezeichnet wurden, wenn innerhalb der vorangehenden 50 Minuten oder der nachfolgenden 10 Minuten Niederschlag stattgefunden hatte. Der Anteil der

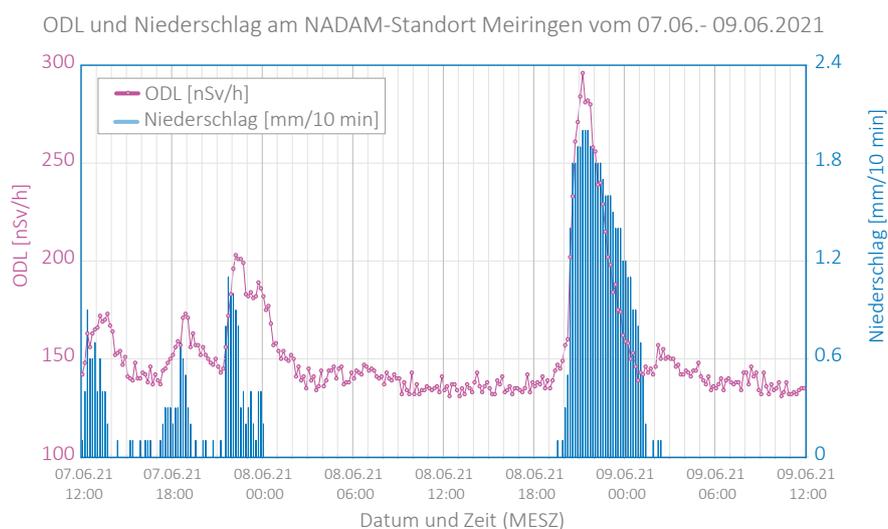
oberhalb von 163 nSv/h gemessenen ODL-Werte ohne Niederschlag ist sehr gering und mit der logarithmischen Skalierung nicht sichtbar.

In Figur 8 ist die Korrelation der im Jahr 2021 in Meiringen gemessenen ODL-Werte mit Niederschlag dargestellt. In dieser Darstellung mit der linearen Skala sind oberhalb von 163 nSv/h noch vereinzelte 10 min-ODL-Werte ohne Niederschlag zu erkennen, die in der sehr trockenen zweiten Aprilhälfte registriert wurden. Die ODL-Werte über 175 nSv/h stehen dann vollständig in Bezug zu einem Niederschlagsereignis.

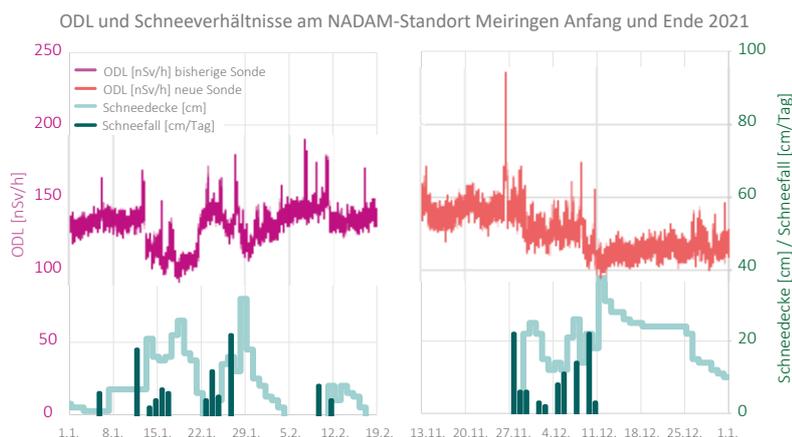
Im Wertebereich um 140 nSv/h, nahe beim häufigsten Messwert und beim Jahresmittelwert, wurde nur ein geringer Anteil der Werte während oder kurz nach Niederschlag registriert. Hingegen ist zwischen 110 und 130 nSv/h ein erhöhter Anteil Messwerte mit Bezug zu Niederschlag zu erkennen. Diese wurden mehrheitlich während oder nach Schneefall gemessen, der zu einer Schneedecke und damit zu diesen tieferen ODL-Werten geführt hatte.

Kennzahlen und Eckwerte zu den Messungen im NADAM-Netz im Jahr 2021

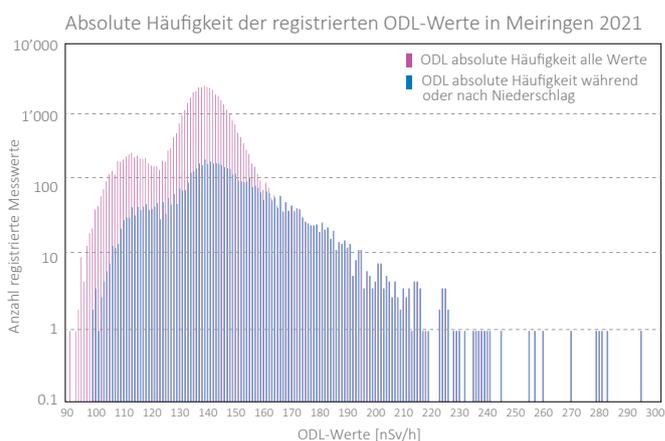
Für alle NADAM-Stationen sind für das Jahr 2021 die ODL-Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte in Tabelle 1 zusammengestellt. Verglichen mit anderen Jahren gibt es keine Auffälligkeiten. Die höchsten ODL-Jahresmittelwerte



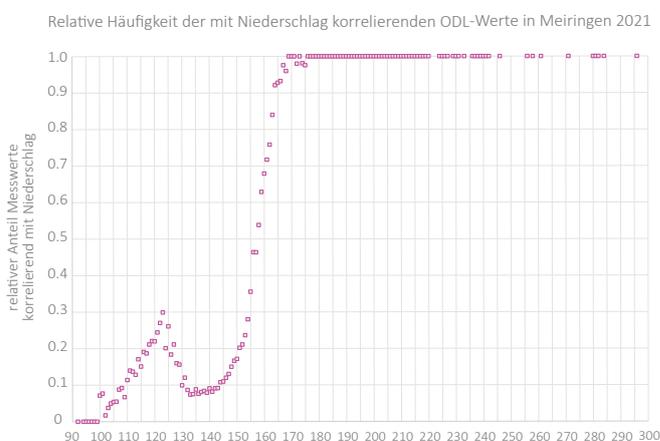
Figur 5: Verlauf der 10 min-ODL-Werte und der Niederschlagsmenge am Standort Meiringen vom 07.06. bis 09.06.2021. Nach 20h ohne Regen fielen am 08.06.2021 ab ca. 22:00 Uhr MESZ 46mm Niederschlag innerhalb von 6 h. Deutlich sichtbar ist der kurzzeitige Anstieg der natürlichen ODL bei einsetzendem Regen.



Figur 6: Verlauf der ODL in Abhängigkeit von Schneedecke und Schneefall in Meiringen in den ersten und letzten 7 Wochen des Jahres 2021. Der Schneefall am 12. Januar führte zu einer dickeren Schneedecke als bei Jahresbeginn und damit zu einer geringeren ODL am Sondenstandort. Gut zu erkennen ist das zur Dicke der Schneedecke gegenläufige Verhalten der ODL, sowohl in den ersten als auch in den letzten Wochen des Jahres.



Figur 7: Verteilung der 10 min-ODL-Werte für die Station Meiringen im Jahr 2021, logarithmisch skaliert. Rot: Alle Messwerte, blau: Messwerte, die zeitnah mit erfolgtem Niederschlag registriert wurden.



Figur 8: Anteil der 10 min-ODL-Werte für die Station Meiringen im Jahr 2021, welche innerhalb von 10min vor oder 50min nach Niederschlag gemessen wurden. Für Werte oberhalb 175 nSv/h liegt dieser Anteil bei 1.

wurden, den langjährigen Erfahrungen entsprechend, auf den Stationen Jungfrauoch und Vicosoprano festgestellt.

Erkenntnisse und Ausblick

Der Niederschlagseffekt, also der Umstand, dass bei einsetzendem Niederschlag eine höhere ODL auftritt, war im Jahr 2021 an den Standorten Stabio TI (niederschlagsbedingter Maximalwert liegt 137% über dem Jahresmittelwert), St. Gallen SG (145%) und Poschiavo-Robbia GR (164%) am stärksten ausgeprägt. Die daraus resultierenden Höchstwerte sind auch in Figur 2 dargestellt, als Obergrenze der eingetragenen Messwertbereiche.

Am detailliert betrachteten Sondenstandort Meiringen lagen 2021 der Jahresmittelwert und der häufigste Messwert bei 139 respektive 140 nSv/h, also sehr nahe beieinander, da es keine Einflüsse gab, welche die ODL über lange Zeit stark beeinflussten. Mittelwerte, die am Deutlichsten unter den häufigsten Messwerten lagen, wurden 2021 wie schon im Vorjahr in Ulrichen VS (17% tiefer) und Gütsch ob Andermatt (19% tiefer) ermittelt. Standorte mit deutlich unter dem Jahresmittelwert liegenden häufigsten Messwert sind 2021 keine aufgefallen.

Im Jahr 2021 wurden keine Werte gemessen, die auf eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung schliessen lassen. In einem einzigen Fall wurden aufgrund des Einsatzes einer Strahlungsquelle in der Nähe eines Sondenstandortes erhöhte ODL-Werte gemessen, allerdings unterhalb der Alarmschwelle. Ansonsten wurden nur einzelne technische Störungen bei der Messung oder der Datenübertragung registriert. Die NADAM-Sonden sind stabil und zuverlässig.

Im Vergleich mit anderen Jahren gab es bezüglich Ortsdosisleistung in der Schweiz im Jahr 2021 keine grossen Auffälligkeiten.

Ende 2021 waren noch zehn der bisherigen NADAM-Sonden in Betrieb. Für das Jahr 2022 ist deren vollständiger Ersatz durch das neue Modell GT XL2-2 von Bertin GmbH vorgesehen, womit das Projekt «Werterhalt NADAM 2020» abgeschlossen wird.

Tabelle 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 2021

| Station | Kanton | Datum Inbetriebnahme | Datum Sondenwechsel NADAM 2020 | Höhe [m.ü.M.] | Jahresmittelwert | Häufigster Wert | Minimum | Maximum |
|------------------------------|--------|----------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-----------------|---------|---------|
| | | | | | | | | |
| Adelboden (ABO) | BE | 04.11.09 | - | 1'322 | 111.9 | 112 | 86 | 204 |
| Aigle (AIG) | VD | 09.09.09 | 07.10.21 | 382 | 127.7 | 126 | 100 | 211 |
| Altdorf (ALT) | UR | 28.10.09 | 11.10.21 | 439 | 126.7 | 124 | 92 | 204 |
| Basel-Binningen (BAS) | BS | 19.11.09 | 14.10.21 | 317 | 114.5 | 113 | 90 | 183 |
| Bern-Zollikofen (BER) | BE | 30.09.09 | 08.06.21 | 554 | 105.6 | 105 | 83 | 172 |
| Beznau (BEZ) | AG | 19.11.09 | 25.08.21 | 327 | 103.6 | 103 | 82 | 183 |
| Bière (BIE) | VD | 12.01.17 | 15.04.21 | 684 | 100.3 | 99 | 78 | 188 |
| Buchs/Aarau (BUS) | AG | 20.11.09 | 14.06.21 | 388 | 98.6 | 98 | 78 | 198 |
| La Chaux-de-Fonds (CDF) | NE | 17.09.09 | 13.09.21 | 1'018 | 120.0 | 123 | 78 | 214 |
| Nyon-Changins (CGI) | VD | 23.09.09 | 29.09.21 | 459 | 107.6 | 104 | 83 | 193 |
| Chasseral (CHA) | BE | 17.09.09 | - | 1'594 | 117.4 | 122 | 83 | 213 |
| Chur (CHU) | GR | 09.10.09 | 12.10.21 | 557 | 104.8 | 103 | 72 | 166 |
| Cham (CHZ) | ZG | 29.01.18 | 10.06.21 | 442 | 104.9 | 103 | 80 | 219 |
| Cressier (CRM) | NE | 03.11.16 | 01.10.20 | 431 | 87.8 | 86 | 70 | 164 |
| Davos (DAV) | GR | 08.10.09 | 02.06.21 | 1'589 | 138.3 | 153 | 82 | 215 |
| Delémont (DEM) | JU | 03.11.16 | 27.10.21 | 439 | 117.2 | 115 | 97 | 215 |
| Disentis/Sedrun (DIS) | GR | 28.10.09 | 21.09.21 | 1'197 | 107.6 | 109 | 74 | 217 |
| La Dôle (DOL) | VD | 23.09.09 | - | 1'670 | 118.2 | 120 | 87 | 210 |
| Egolzwil (EGO) | LU | 22.09.10 | 16.08.21 | 523 | 92.1 | 90 | 73 | 157 |
| Engelberg (ENG) | OW | 30.10.09 | 01.09.21 | 1'035 | 94.3 | 98 | 63 | 181 |
| Fahy/Boncourt (FAH) | JU | 14.10.09 | 31.05.21 | 597 | 119.9 | 121 | 98 | 198 |
| Bullet/La Frêtaz (FRE) | VD | 24.09.09 | 29.09.20 | 1206 | 108.5 | 111 | 69 | 180 |
| Glarus (GLA) | GL | 02.12.09 | 28.06.21 | 518 | 95.5 | 96 | 64 | 177 |
| Gösgen (GOE) | SO | 20.11.09 | 22.06.21 | 381 | 103.3 | 103 | 81 | 182 |
| Fribourg-Posieux (GRA) | FR | 13.01.17 | 18.05.21 | 646 | 101.8 | 100 | 83 | 169 |
| Grenchen (GRE) | SO | 06.12.10 | 30.03.21 | 431 | 95.4 | 93 | 72 | 166 |
| Col du Gd-St-Bernard (GSB) | VS | 09.09.09 | 30.09.20 | 2'491 | 133.2 | 143 | 100 | 188 |
| Gütsch ob Andermatt (GUE) | UR | 01.09.05 | 10.08.21 | 2'296 | 149.4 | 185 | 95 | 235 |
| Güttingen (GUT) | TG | 03.12.09 | 28.10.21 | 441 | 101.4 | 99 | 73 | 216 |
| Genève (GVE) | GE | 24.09.09 | 27.10.20 | 412 | 102.9 | 101 | 83 | 306* |
| Hallau (HLL) | SH | 29.01.18 | 02.06.21 | 419 | 122.7 | 122 | 93 | 214 |
| Hörnli (HOE) | ZH | 12.11.09 | 08.09.21 | 1'133 | 94.7 | 93 | 72 | 183 |
| Jungfrauoch (JUN) | VS | 29.09.09 | 07.09.21 | 3'581 | 189.8 | 188 | 157 | 326 |
| Kloten/Zürich (KLO) | ZH | 24.11.09 | 11.11.21 | 427 | 104.0 | 102 | 79 | 178 |
| Koppigen (KOP) | BE | 13.01.17 | 27.10.21 | 484 | 117.2 | 116 | 92 | 211 |
| Leibstadt (LEI) | AG | 19.11.09 | 22.09.21 | 342 | 105.7 | 108 | 78 | 202 |
| Lugano (LUG) | TI | 21.10.09 | 15.12.21 | 273 | 127.7 | 126 | 102 | 232 |
| Luzern (LUZ) | LU | 05.11.09 | 29.06.21 | 455 | 105.8 | 104 | 85 | 193 |
| Magadino-Cadenazzo (MAG) | TI | 22.10.09 | 27.10.21 | 204 | 129.6 | 126 | 104 | 304 |
| Meiringen (MER) | BE | 06.10.11 | 12.10.21 | 590 | 139.4 | 140 | 92 | 296 |
| Le Moléson (MLS) | FR | 19.08.09 | 12.05.21 | 1'975 | 107.4 | 109 | 81 | 192 |
| Mosen (MOA) | LU | 19.01.18 | 13.08.21 | 452 | 96.7 | 95 | 74 | 182 |
| Möhlin (MOE) | AG | 09.09.10 | 09.06.21 | 341 | 113.2 | 114 | 86 | 213 |
| Mühleberg (MUB) | BE | 15.10.09 | 08.06.21 | 481 | 109.8 | 111 | 76 | 183 |
| Napf (NAP) | BE | 05.11.09 | 10.06.21 | 1'405 | 97.6 | 102 | 65 | 181 |
| Neuchâtel (NEU) | NE | 10.12.09 | 21.09.21 | 485 | 93.2 | 93 | 76 | 168 |
| Oron (ORO) | VD | 29.02.12 | 04.06.21 | 828 | 106.2 | 107 | 73 | 190 |
| Locarno-Monti (OTL) | TI | 22.10.09 | 22.11.21 | 368 | 151.0 | 147 | 130 | 271 |
| Payerne (PAY) | VD | 13.08.09 | 28.09.20 | 490 | 102.6 | 101 | 84 | 192 |
| Piotta (PIO) | TI | 29.10.09 | - | 990 | 150.4 | 158 | 77 | 298 |
| Plaffeien (PLF) | FR | 14.08.09 | - | 1'043 | 122.1 | 122 | 98 | 206 |
| Paul Scherrer Institut (PSI) | AG | 27.07.11 | 23.06.21 | 335 | 99.4 | 100 | 78 | 168 |
| Pully (PUY) | VD | 23.09.09 | 22.10.21 | 456 | 108.9 | 112 | 92 | 184 |
| Zürich-Affoltern (REH) | ZH | 13.11.09 | 26.04.21 | 444 | 102.4 | 101 | 79 | 164 |
| Poschiavo-Robbia (ROB) | GR | 07.10.09 | 11.11.21 | 1'079 | 148.6 | 152 | 82 | 393 |
| Rünenberg (RUE) | BL | 20.11.09 | 07.10.21 | 612 | 101.1 | 101 | 78 | 185 |
| Säntis (SAE) | AI | 11.11.09 | 20.10.21 | 2'503 | 122.9 | 124 | 95 | 286 |
| Samedan (SAM) | GR | 25.08.09 | 24.06.21 | 1'710 | 142.8 | 161 | 89 | 328 |
| San Bernardino (SBE) | GR | 29.10.09 | 06.07.21 | 1'640 | 141.6 | 161 | 80 | 229 |
| Stabio (SBO) | TI | 21.10.09 | - | 352 | 131.2 | 130 | 108 | 311 |
| Scuol (SCU) | GR | 27.08.09 | 10.06.21 | 1'305 | 109.9 | 118 | 62 | 240 |
| Schaffhausen (SHA) | SH | 04.12.09 | 26.08.21 | 439 | 102.9 | 103 | 79 | 171 |
| Sion (SIO) | VS | 10.09.09 | 10.11.21 | 482 | 127.4 | 126 | 86 | 246 |
| Zürich-Fluntern (SMA) | ZH | 24.11.09 | 04.11.21 | 557 | 110.5 | 111 | 86 | 180 |
| Santa Maria (SMM) | GR | 15.12.11 | 01.07.21 | 1'385 | 138.9 | 146 | 80 | 277 |
| St. Gallen (STG) | SG | 12.11.09 | 07.09.21 | 777 | 98.0 | 98 | 67 | 240 |
| Aadorf/Tänikon (TAE) | TG | 03.12.09 | - | 539 | 95.4 | 95 | 71 | 172 |
| Thun (THU) | BE | 29.01.18 | 15.10.21 | 570 | 90.5 | 89 | 68 | 184 |
| Ulrichen (ULR) | VS | 04.11.09 | 18.08.21 | 1'347 | 135.4 | 163 | 46 | 247 |
| Vaduz (VAD) | FL | 03.12.09 | 30.09.21 | 458 | 101.3 | 99 | 70 | 200 |
| Vicosoprano (VIO) | GR | 06.02.13 | 23.09.21 | 1'089 | 177.6 | 193 | 81 | 294 |
| Visp (VIS) | VS | 11.09.09 | 20.09.21 | 640 | 125.9 | 126 | 86 | 206 |
| Villars-Tiercelin (VIT) | VD | 29.01.18 | - | 859 | 119.7 | 121 | 89 | 205 |
| Wädenswil (WAE) | ZH | 02.12.09 | - | 487 | 106.5 | 106 | 79 | 225 |
| Wynau (WYN) | BE | 15.10.09 | 02.06.21 | 423 | 100.3 | 99 | 73 | 209 |
| Zermatt (ZER) | VS | 11.09.09 | - | 1'640 | 124.2 | 132 | 74 | 208 |

* Genève: Der Maximalwert von 306 nSv/h wurde wie oben diskutiert während des Einsatzes einer Strahlungsquelle in der Nähe der NADAM-Station registriert.

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/Juli und November 2021 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Gösgen (KKG) und Mühleberg (KKM) abgedeckt. Zudem wurden die Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 südöstlich des KKG bis 50 km Distanz ergänzt. Die Ergebnisse bei den Kernkraftwerken lagen im Bereich der Ergebnisse aus früheren Jahren. Weitere Messflüge erfolgten im Tessin (Stadt Lugano und weitere kleinere Gebiete), in der Waadt sowie über den Städten Wil/SG und Frauenfeld/TG. Zwei Profile von Rüthi/ZH nach Châtel-Saint-Denis/FR und von Saint-Légier-La-Chiésaz/VD nach Eschenbach/SG komplettierten die Messungen. 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 ¹³⁷Cs-Depositionen detektiert werden, die vom Fallout der bisherigen Nuklearwaffentests sowie der Katastrophe in Tschernobyl stammen. Zusätzlich wurden über dem Neuenburgersee 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.

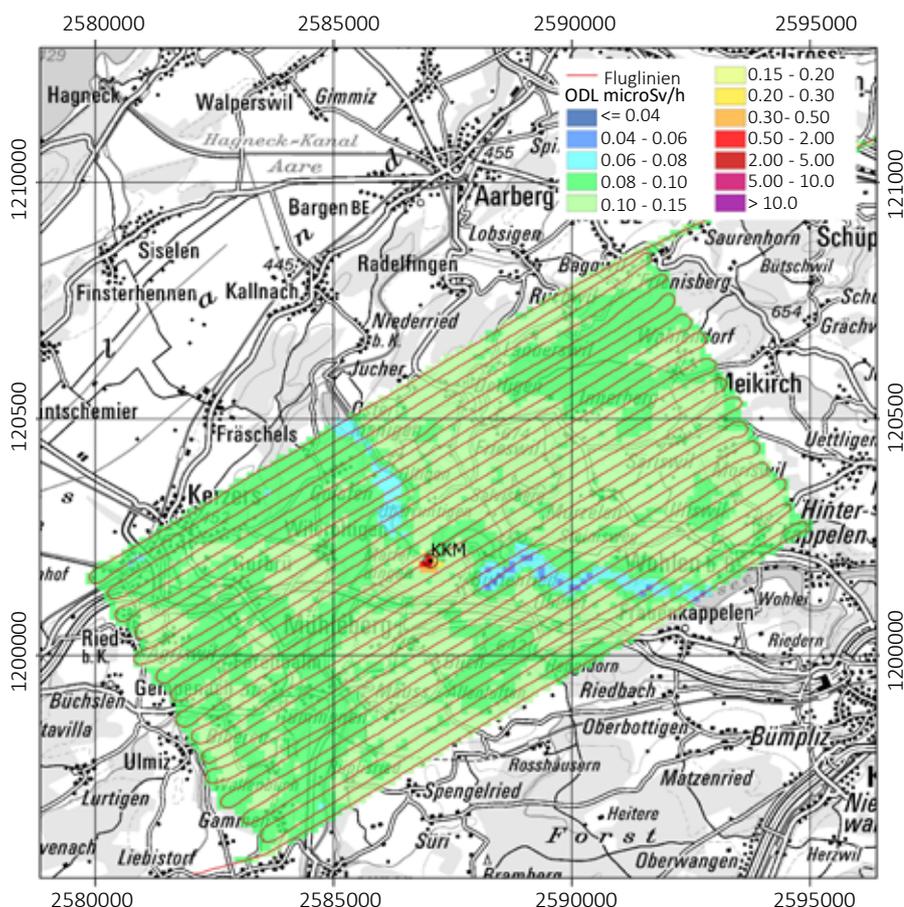
Als mögliche Einsatzfälle stehen KKW-Störfälle, Transport- und Industrieunfälle mit radioaktivem Material, Abstürze von Satelliten mit Radionuklidbatterien und «Dirty Bombs» im Vordergrund. Die jährlichen Messprogramme werden durch die Fachgruppe Aeroradiometrie zusammengestellt, die sich aus Mitgliedern 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 Operator (Messspezialisten an Bord), Piloten und Bodenpersonal, werden jährlich durch die NAZ und das 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: $0.02 \mu\text{Sv/h}$ werden in 95 von 100 Fällen erkannt (Vertrauensbereich 95%).

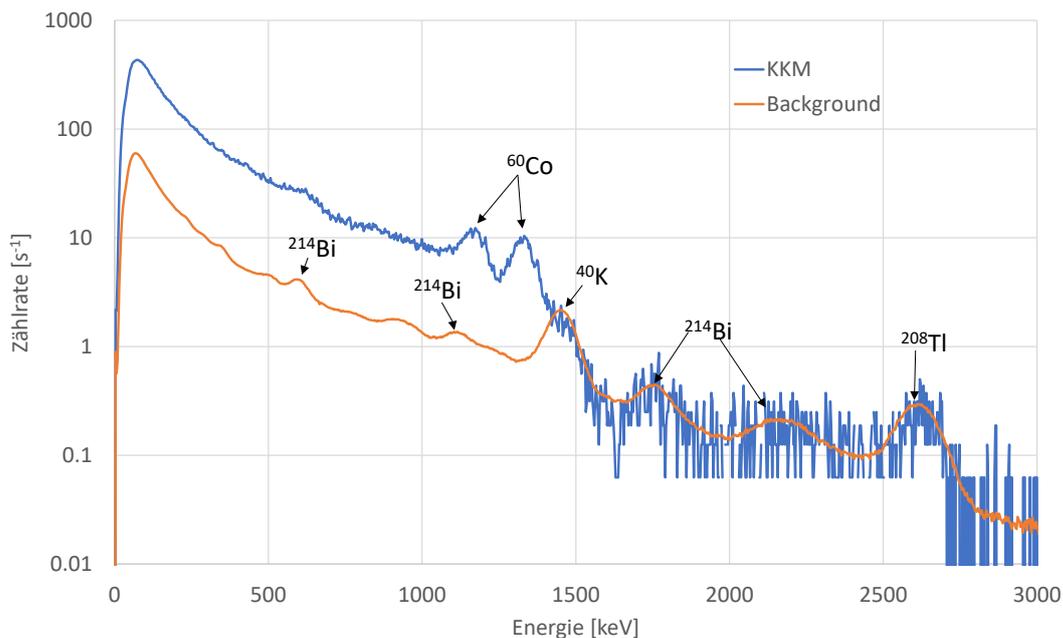
Mit den Messflügen 2018 erfolgte die Ablösung der alten Ausrüstung durch ein Messsystem der Firma Mirion, welches durch die RUAG im Super Puma Helikopter der Schweizer Luftwaffe integriert wurde. Dieses wurde in den vorangehenden Messübungen eingehend getestet und die Ergebnisse mit denen des alten Systems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

Messungen und Messresultate 2021

Vom 28. Juni bis 2. Juli 2021 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Gösgen (KKG) und Mühleberg (KKM) ausgemessen. Im Rahmen der Messflüge wurden zudem die Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 von KKG in südöstlicher Richtung bis 50 km erweitert. Weiter wurden Messungen im Tessin (Stadt Lugano, kleine Gebiete bei Stabio, Balerna, Ronchini, Demanio, Lodrino, Monte di Paudò) und in der Ostschweiz (Städte Wil/SG und Frauenfeld/TG) durchgeführt. Zwei Profile von Rütli/ZH nach Châtel-Saint-Denis/FR und von Saint-Légier-La-Chiésaz/VD nach Eschenbach/SG komplettierten die Messungen.



Figur 1:
Ortsdosisleistung $H^*(10)$ im Jahr 2021 für das Messgebiet KKM.
Kartendaten PK200 © swisstopo.



Figur 2: Gemittelte Spektren im Bereich des Betriebsgeländes KKM und in der weiteren Umgebung (Background). Im Background-Spektrum sind nur die wichtigsten Peaks von natürlichen Radionukliden angegeben.

Weitere Messflüge wurden im Zeitraum vom 9. bis 13. November 2021 mit Schwerpunkt in der Region von Nyon/VD und dem Vallée de Joux/VD durchgeführt.

Die detaillierten Ergebnisse sämtlicher Messungen werden in einem PSI-Bericht im Verlauf des Jahres 2022 publiziert (Butterweck et al., 2022).

Die Messresultate im Messgebiet von KKG und KKM zeigten ein ähnliches Bild wie in vorangegangenen Messkampagnen. Am Standort des KKM können in der Ortsdosisleistungskarte (Figur 1) erhöhte Messwerte erkannt werden. Diese sind auf Komponenten mit dem Aktivierungsprodukt ^{60}Co zurückzuführen, die beim Rückbau auf dem Betriebsareal des KKM zwischengelagert werden. Die entsprechenden Gammalinien von ^{60}Co konnten im Spektrum deutlich identifiziert werden (Figur 2). Im Background-Spektrum sind ausschliesslich Peaks natürlicher Radionuklide zu erkennen. Ausserhalb des Betriebsareals des KKM sowie im ganzen Messgebiet des KKG (Figur 3) liegen die Messwerte im erwarteten Bereich. Unterschiede sind auf Einflüsse der Topographie wie geologischer Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen.

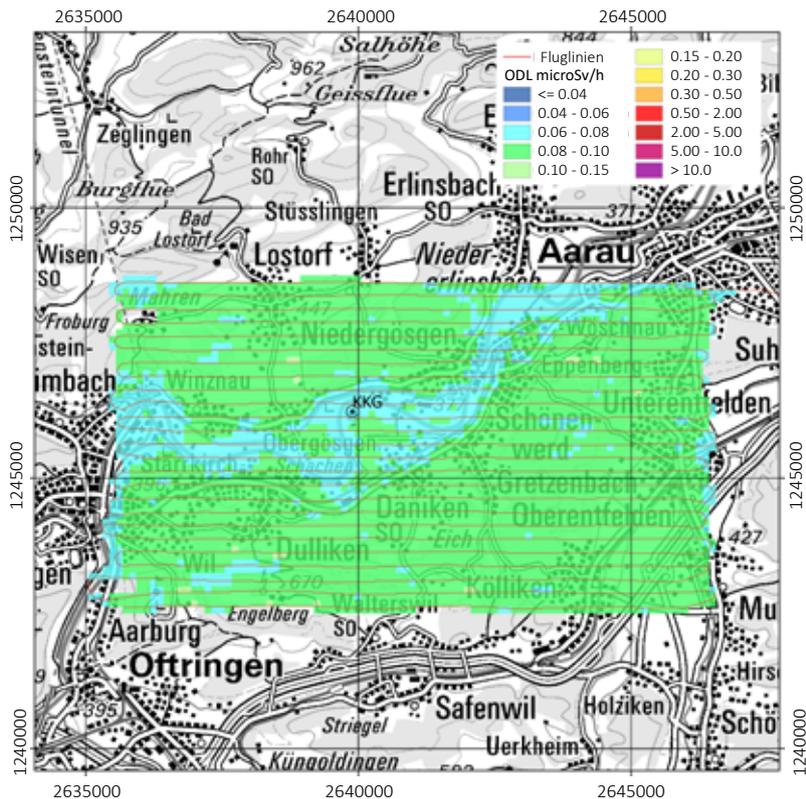
Die Ergebnisse der übrigen Messgebiete zeigten vor allem Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse auf. Die Werte entsprechen den Erwartungen. In den Figuren 4, 5, 6 und 7 sind die Ortsdosisleistungskarten der Messungen ausserhalb der Notfallschutzzone 2 des KKG (Figur 4) sowie über den Städten Frauenfeld (Figur 5), Lugano und Wil (Figur 6) und

im Gebiet Nyon/Vallée de Joux (Figur 7) dargestellt.

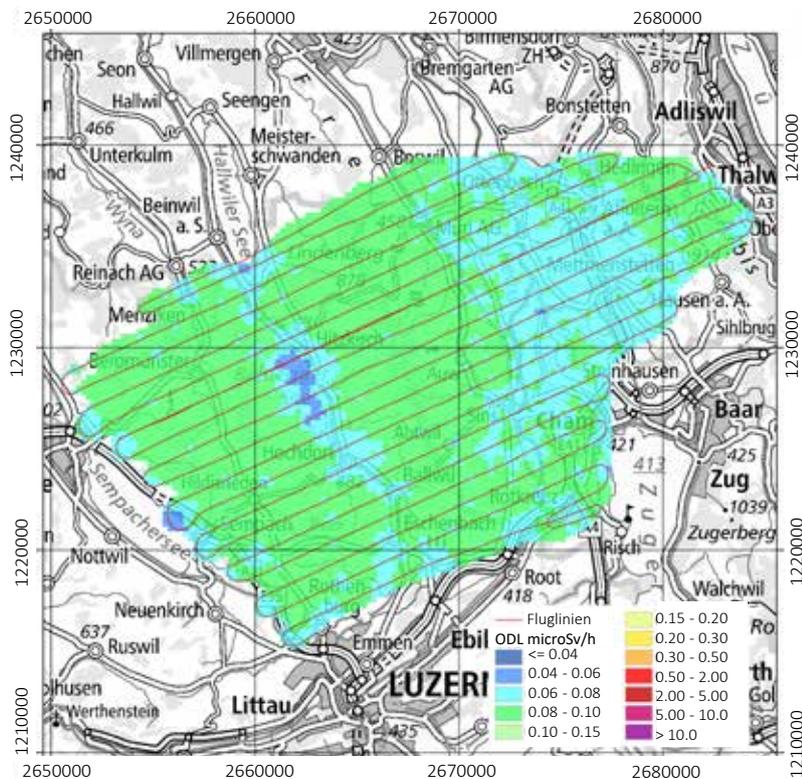
In den Messgebieten im Tessin und in der Westschweiz konnten teilweise ^{137}Cs -Depositionen detektiert werden, die vom Fallout bisheriger Nuklearwaffentests und des Tschernobyl-Ereignisses stammen. Die Vergleiche der aeroradiometrischen Ergebnisse mit Ergebnissen von Bodenmessungen sowie Karten aus wissenschaftlichen Publikationen zeigten eine gute Übereinstimmung innerhalb der Unsicherheiten. Detailliertere Informationen finden sich in Butterweck et al. (2022).

Literatur

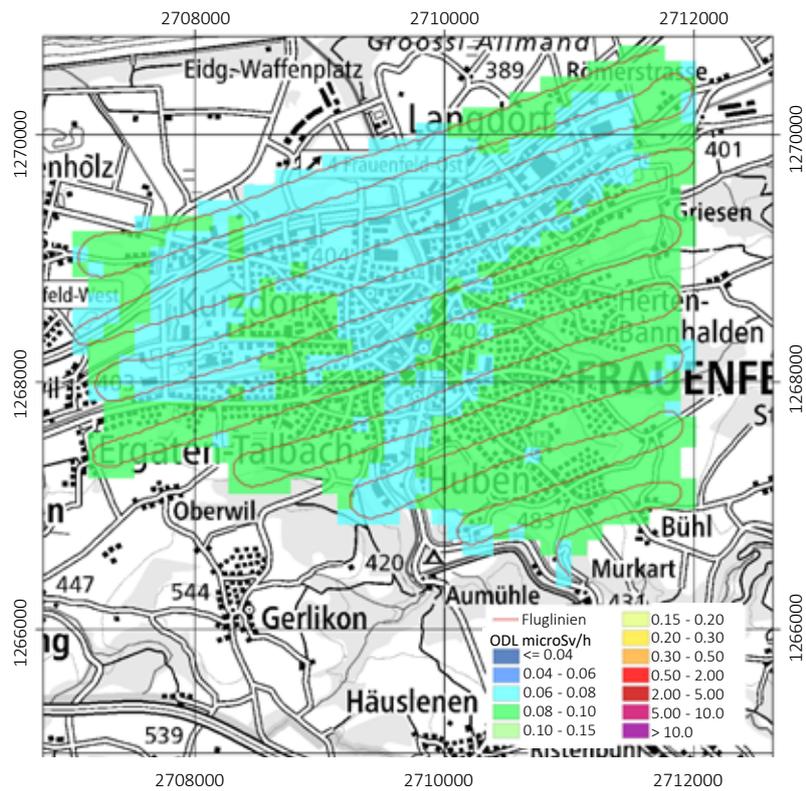
- Schwarz, G. F., 1991: Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr.23, Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Bucher, B., Rybach, L., 2010: Flächendeckende Langzeitanalyse der Strahlung in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen mit Hilfe 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., Bucher, B., Breitenmoser, D., Rybach L., Poretti, C., Maillard, S., Kasprzak, M., Hess, A., Scharding G., Mayer, S., 2022: Aeroradiometric Measurements in the Framework of the Swiss Exercise ARM21. PSI Bericht Nr. 22-02. March 2022. ISSN 1019-0643.



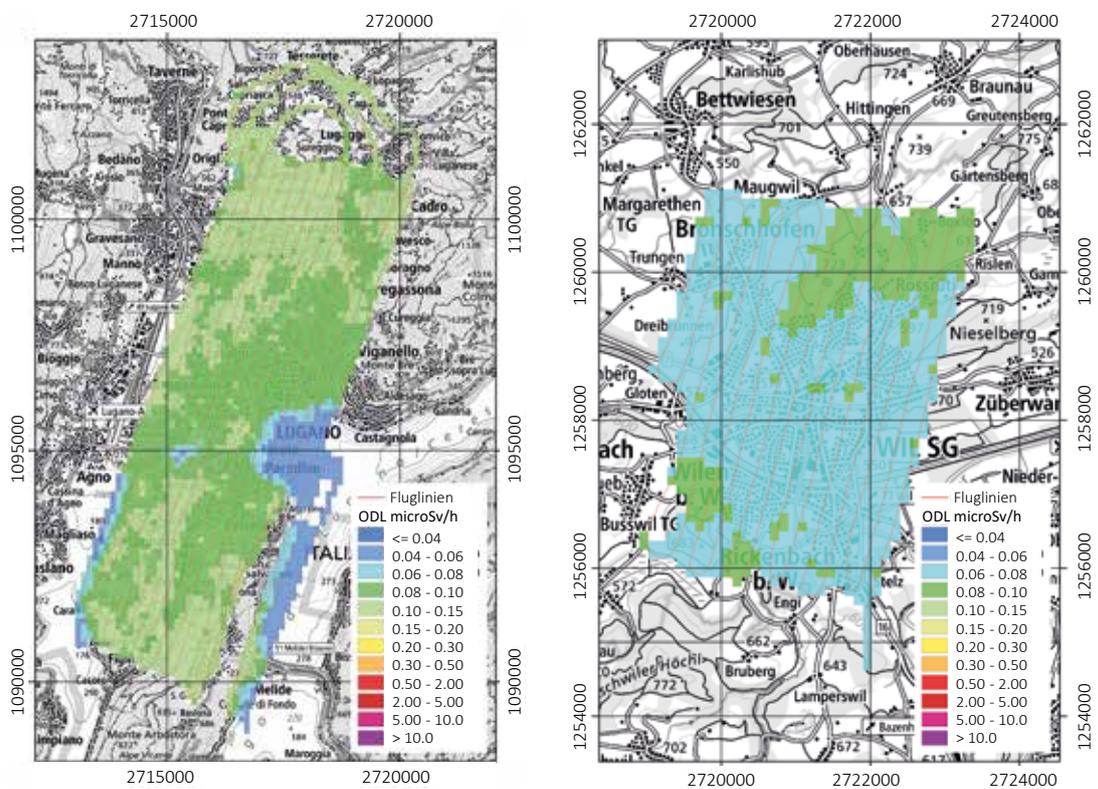
Figur 3:
Ortsdosisleistung $H^*(10)$ im Jahr 2021 für das Messgebiet KKG. Kartendaten PK200 © swisstopo.



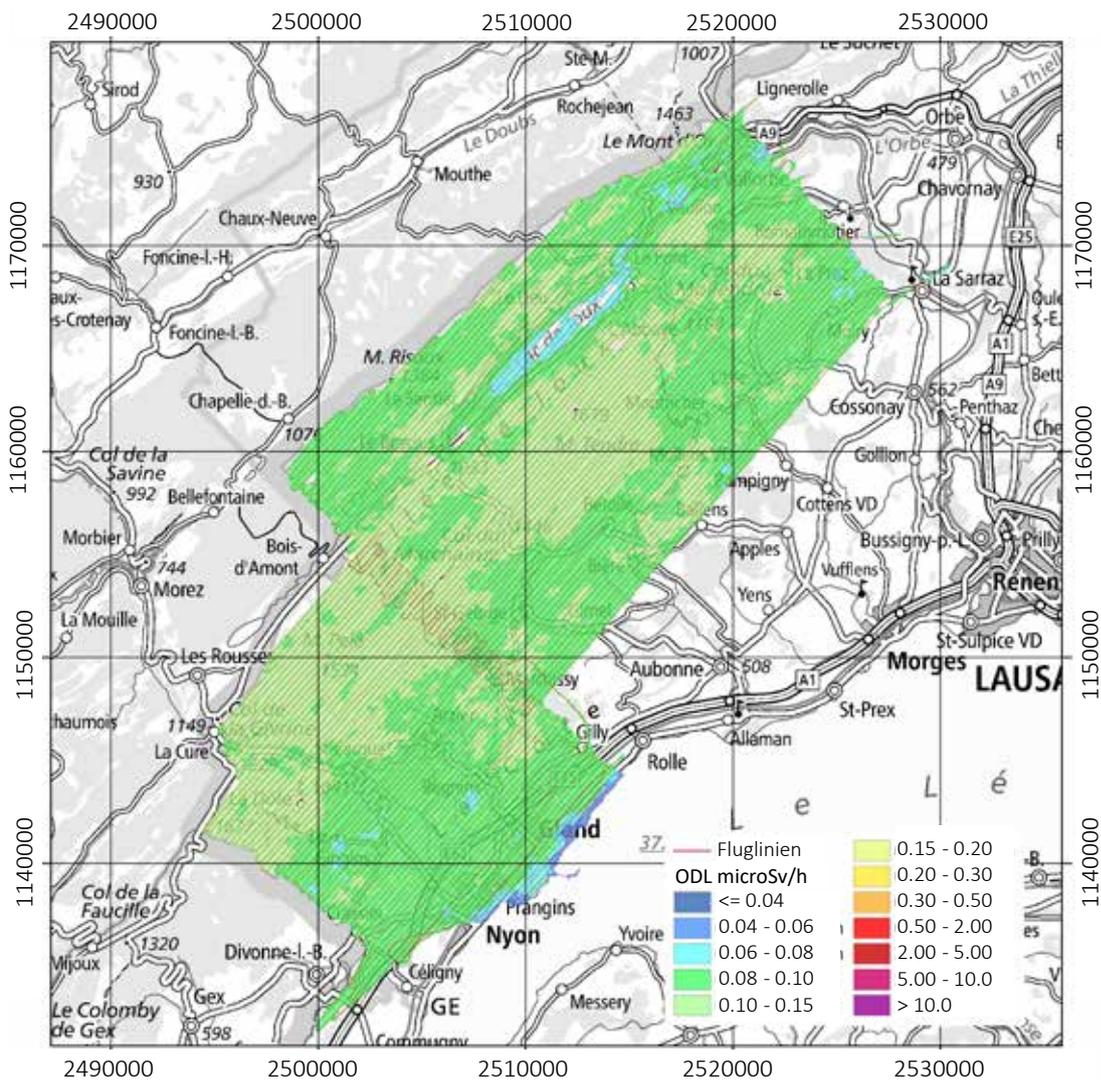
Figur 4:
Ortsdosisleistung 2021 $H^*(10)$ im Messgebiet ausserhalb der Notfallschutzzone 2 südöstlich von KKG. Kartendaten PK500 © swisstopo.



Figur 5 :
Ortsdosisleistung $H^*(10)$ 2021 für das Messgebiet Frauenfeld/TG.
Kartendaten PK100 © swisstopo.



Figur 6 :
Ortsdosisleistung $H^*(10)$ im Jahr 2021 für die Messgebiete der Städte Lugano/TI und Wil/SG.
Kartendaten PK100 © swisstopo.



Figur 7:
 Ortsdosisleistung $H^*(10)$ im Jahr 2021 für das Messgebiet Nyon/VD und Vallée de Joux/VD.
 Kartendaten PK500 © swisstopo.

Chapitre

Kapitel

4

Environnement

Umwelt

Aérosols et précipitations

URAnet Aero

Surveillance de l'air avec des avions militaires

Radioactivité dans les systèmes aquatiques

URAnet Aqua

Tritium dans l'Aar

Sols et herbes

Aerosol und Niederschlag

URAnet Aero

Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen

Aquatische System

URAnet Aqua

Tritium in der Aare

Boden und Gras

2021

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 2021 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 2021 mit Ausnahme von Tritium und sporadischen Spuren von ^{137}Cs keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. Die relativ trockenen Monate März, April und Oktober haben zu etwas höheren Konzentrationen von ^7Be 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 ^3H Konzentrationen im Regenwasser maximal 3.9 % des Immissionsgrenzwertes der StSV für öffentlich zugängliche Gewässer.

Luft

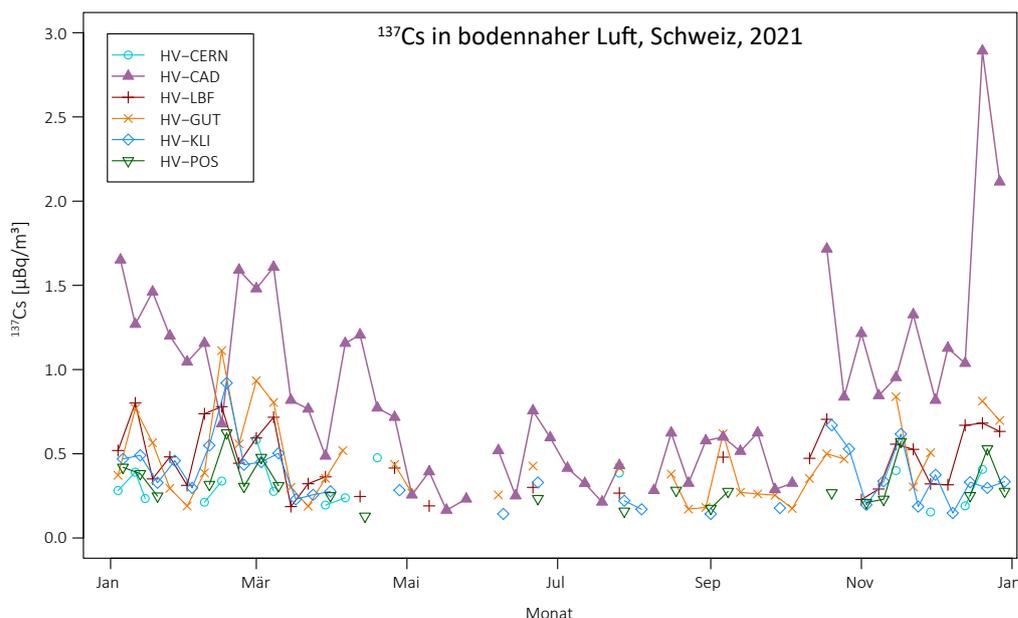
Probenahme und Messung

Das BAG sammelt Aerosolpartikel mit Hochvolumen-Luftfilter (High-Volume-Sampler, HVS) an 6 Stationen in der Schweiz (Tabelle 1). Bei den HVS Stationen werden fortlaufend, je nach Station, 80'000 m³/Woche bis 150'000 m³/Woche Aussenluft gefiltert. Die Filter werden im Routinebetrieb wöchentlich gewechselt und zur Analyse ans BAG gesandt. Die Messung auf einem HPGe-Gamma-spektrometer 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 neu auch map.geo.admin.ch (Karte «Radioaktivität in der Atmosphäre» suchen). Ziel der HVS Messungen ist nicht die schnelle Alarmierung (dafür gibt es URAnet, MADUK und NADAM) sondern der Nachweis von kleinsten Spuren, die von den anderen Messsystemen nicht detektiert werden können. Die Erfahrung, etwa im Jahr 2011 nach dem Reaktorunfall in Fukushima oder beim Ereignis mit ^{106}Ru im Herbst

2017, hat gezeigt, dass für eine glaubwürdige Information der Bevölkerung und als Grundlage für die Behörden eine präzise Messung der tatsächlich vorhandenen Radioaktivität unverzichtbar ist. Neben den HVS-Filtern betreibt das BAG Mittelvolumen-Filter (MV), welche ein 10- bis 20-mal geringeres Luftvolumen filtrieren und damit entsprechend höhere Nachweisgrenzen haben. Die MV-Sammler sind zur Überwachung der Kernkraftwerke bei Gösgen, Leibstadt, Mühleberg und PSI/Beznau stationiert, wobei der letztgenannte vom PSI betrieben und gemessen wird. Ein weiterer MV-Sammler steht für die Überwachung der freien Atmosphäre in der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch. Die Filter der MV-Sammler werden wöchentlich gewechselt und als Monatsprobe (4 - 5 Filter) gammaspektrometrisch gemessen.

Künstliche Radioisotope in der Luft

Das einzige regelmässig nachgewiesene künstliche Radioisotop in der Luft war wie in den Vorjahren Cäsium-137 (^{137}Cs). ^{137}Cs hat eine Halbwertszeit von 30 Jahren und



Figur 1:
 ^{137}Cs Konzentrationen in der Luft für das Jahr 2021.

stammt zur Hauptsache immer noch vom Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahr 1986. Die gemessenen Konzentrationen sind insgesamt sehr gering (fast immer kleiner als $1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Etwas höhere Werte (bis knapp $3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) wurden 2021 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 $1.5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) wurden zudem in den relativ trockenen Monaten Februar-April (Alpensüdseite besonders März; Klimabulletin Jahr 2021 – Meteoschweiz) ge-

messen. Auch die höchsten gemessenen Werte sind nicht mehr als eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert für ^{137}Cs von $8.5 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Das radioaktive Natriumisotop ^{24}Na mit einer Halbwertszeit von 15 Stunden kann sowohl natürliche als auch künstliche Quellen haben. Natürliches ^{24}Na wird wie das ^7Be und ^{22}Na in der oberen Atmosphäre durch die kosmische Strahlung erzeugt. Künstliches ^{24}Na kann in Beschleunigern erzeugt werden, wie sie z. B. 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 11 Mal Spuren von ^{24}Na nachgewiesen werden (41 und $159 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{24}Na kann die Nachweisgrenze variieren und lag 2021 bei rund 4%

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) |

der Messungen bei $> 1'000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Die gemessenen ^{24}Na Werte und die Nachweisgrenzen insgesamt liegen allerdings stets deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes von $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Geringste Spuren von Jod-131 (^{131}I) tauchten 2021 in 12 HVS Filtern der Station beim CERN auf (Maximum $6.5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Ursache ist das Auswechseln von bestrahlten Targets bei der Installation ISOLDE am CERN. Bei diesen Arbeiten können kleinste Mengen von Radioisotopen (wie z.B. ^{131}I) in die Umwelt gelangen. Gesundheitlich sind diese Konzentrationen – eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert – irrelevant. Plutonium-Isotope wurden 2021 an zwei Sammelproben von HVS-Filtern der Station Liebefeld bestimmt - eine Probe mit Filtern vom Winter (Nov. 2020 – April 2021) und eine Probe mit Filtern vom Sommer (April – Sept. 2021). Die Summe der Plutoniumisotope ^{239}Pu und ^{240}Pu ergab $0.6 \pm 15\%$ nano-Becquerel pro m^3 Luft (nBq/m^3) im Winter und $1.4 \pm 10\%$ nBq/m^3 im Sommer. Zusätzliche Proben von den Stationen CERN, Klingnau und Posieux ergaben für November 2020 bis September 2021 zwischen 0.7 und $1.1 \text{ nBq}/\text{m}^3$. HVS-Filter vom von starkem Sahara-staubeintrag geprägten Februar 2021, ergaben einen etwas höheren Wert ($2.3 \text{ nBq}/\text{m}^3$). Diese Erhöhung ist verursacht durch die grössere Staubmenge auf den Filtern (siehe auch Jahresbericht 2020, Kapitel 7.2, Figur 1). Die gemessenen Konzentrationen der künstlichen Alphastrahler sind sehr tief und liegen wie beim ^{137}Cs eine Million Mal unter dem Immissionsgrenzwert. Die Resultate der MV-Filter in der Umgebung der Kernkraftwerke werden im Kapitel 8.5 näher besprochen.

Natürliche Radioisotope in der Luft

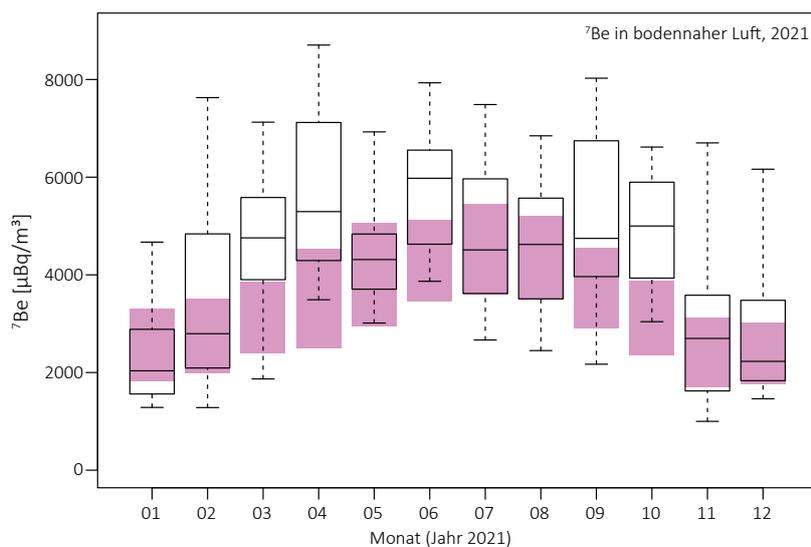
Die 2021 auf den HVS Filtern gemessenen Radioisotope waren fast ausschliesslich natürlicher Herkunft. Vorherrschend waren das Radonfolgeprodukt Blei-210 (^{210}Pb ; Halbwertszeit 21 Jahre) und Beryllium-7 (^7Be ; Halbwertszeit 50 Tage), welches durch die kosmische Strahlung in hohen Schichten der Atmosphäre gebildet und deshalb auch kosmogen genannt wird. Neunzig Prozent der 2021 gemessenen ^{210}Pb -Konzentrationen lagen zwischen 0.15 und $1.18 \text{ mBq}/\text{m}^3$ (Mittelwert = $0.56 \text{ mBq}/\text{m}^3$, Median = $0.5 \text{ mBq}/\text{m}^3$). Diese Werte liegen im Rahmen der Werte der Referenzperiode 2013 - 2018 (Tabelle 2). Auffallend ist (wie in den Vorjahren) dass die Werte der Station Cadenazzo deutlich höher sind, als die Werte der Stationen nördlich der Alpen: im Durchschnitt $0.84 \text{ mBq}/\text{m}^3$ für Cadenazzo gegenüber $0.50 \text{ mBq}/\text{m}^3$ für die anderen 5 Stationen.

Bei ^7Be -Werte lagen 2021 neunzig Prozent der Werte zwischen 1.55 und $7.09 \text{ mBq}/\text{m}^3$ (Mittelwert = $4.5 \text{ mBq}/\text{m}^3$

Tabelle 2:

Verteilung der 2013-2018 (Referenz) sowie 2021 in der Schweiz gemessenen ^{210}Pb und ^7Be Aktivitäten in bodennaher Luft. Aktivitätsangaben in mBq/m^3

| Kenngrosse | ^{210}Pb (Referenz) | ^7Be (2021) | ^7Be (Referenz) | ^7Be (2021) |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 5% - 95%-Perzentil | 0.18 - 1.18 | 0.15 - 1.18 | 1.48 - 6.40 | 1.55 - 7.09 |
| Min - Max | 0.07 - 2.76 | 0.09 - 2.12 | 0.15 - 8.74 | 1.00 - 8.71 |
| Mittelwert / Median | 0.57 / 0.49 | 0.56 / 0.50 | 3.66 / 3.50 | 4.28 / 4.30 |
| Anzahl Messwerte | 1'864 | 307 | 1'864 | 307 |



Figur 2 :

Boxplot der monatlichen ^7Be Konzentrationen bei allen HVS Stationen im Jahr 2021. Die Box umfasst 50% aller Messwerte, die horizontale Linie in der Box entspricht dem Mittelwert und die «whiskers» gehen zu Minimum und Maximum. Die ausgefüllten Boxen gelten für die langjährigen Monatsmittel (1994-2011) (Referenz 1).

m^3 ; Median = 4.4 mBq/m^3). Dies entspricht den erwarteten 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 ^7Be Konzentrationen aller Stationen im Vergleich mit dem langjährigen Jahresverlauf. Der Jahresverlauf der ^7Be Konzentrationen widerspiegelt das Wettergeschehen, insbesondere die konvektive vertikale Durchmischung der Troposphäre an warmen Sommertagen, wobei ^7Be reiche Luft aus der obersten Troposphäre an den Boden gelangt. Weitere Einflüsse für die ^7Be Konzentration in der Luft sind Niederschlag (Auswaschen von ^7Be) und die kosmische Strahlung. Die kosmische Strahlung war 2021 geringfügig tiefer (-0.7%) als 2020 (IGY Neutron Monitor Junfrauoch, cosray.unibe.ch) aber immer noch hoch. Im zweiten Jahr des Sonnenzyklus 25 war die Sonnenaktivität also noch relativ schwach (die Sonnenaktivität ist mit der kosmischen Strahlung negativ korreliert). Der Jahresmittelwert der in der Bodenluft gemessenen ^7Be Konzentrationen ging mit 5.5% stärker zurück als die kosmische Strahlung (4.28 mBq/m^3 gegenüber 4.53 mBq/m^3 im Vorjahr). Während das Jahr 2020 von der ausserordentlichen, warmen Trockenperiode im April dominiert war, zeichnete sich das Jahr 2021 durch hohe Niederschläge und durchschnittliche Temperaturen aus. Die vergleichsweise hohen ^7Be Werte in den Monaten März, April, September und Oktober (Figur 2) hängen sicher damit zusammen, dass diese Monate trocken waren. Demgegenüber ergaben die Messungen für den sehr feuchten Monat Juli, wo normalerweise die höchsten ^7Be Konzentrationen erwartet werden, eher tiefe Werte. Neben ^7Be war in kleinsten Spuren von meist weniger als einem Mikrobecquerel pro Kubikmeter das ebenfalls kosmogene Natrium-22 (^{22}Na) nachweisbar.

Als weiteres natürliches Radioisotop findet sich in den HVS Filtern oft auch ^{40}K . Die Konzentrationen lagen 2021 meist im typischen Bereich von 5 - 15 $\mu\text{Bq/m}^3$. Im trockenen März durch Staubaufwirbelung Etwas höhere Werte (15 - 30 $\mu\text{Bq/m}^3$) konnten im trockenen März (Staubaufwirbelung) und in der stadtnahen Station Liebefeld in der Woche mit dem 1. August (Feuerwerk) beobachtet werden.

Niederschlag

Messungen von Gammastrahlern

Im Berichtsjahr 2021 wurde an folgenden Sammelstationen kontinuierlich Niederschlag gesammelt und monatlich gammaspektrometrisch gemessen: Umgebung der Kernkraftwerke Mühleberg, Leibstadt, Gösgen und Benzau, Umgebung PSI/ZWILAG sowie Posieux FR, Güttingen TG, Cadenazzo TI, Cer-

nier NE und Davos GR. Für die natürlichen Radioisotope ^7Be und ^{210}Pb waren die Messresultate ähnlich wie im Vorjahr (^7Be : 0.2 - 3.9 Bq/l, Mittelwert 1.0 Bq/l; ^{210}Pb : 0.01 - 1.24 Bq/l, Mittelwert 0.09 Bq/l). In 2 von 94 Regen- und Schneeproben lag ^{137}Cs knapp über der Erkennungsgrenze von rund 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 nur zweimal knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l (Maximum $2.2 \pm 0.6 \text{ Bq/l}$). Tritium-Messungen an Regenproben aus der Umgebung der Kernkraftwerke KKG, KKL und KKM ergaben ebenfalls Messwerte unterhalb oder knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l. Bei diesen Stationen war der höchste gemessene Wert $3.1 \pm 0.9 \text{ Bq/l}$. Bei den Sammelstationen PSI, KKB und Zwilag ergaben sich 2021 mit Mittelwerten von 5.5, 7.4 und 2.4 Bq/l zum Teil leicht höhere Werte - wie auch in früheren Jahren beobachtet. Das höchste Monatsmittel trat bei der Station PSI auf (28.5 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 776 Bq/l Tritium mit einem Mittelwert von 104 Bq/l. Die Höchstkonzentration entspricht rund 3.9%, der Mittelwert 0.5% 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.

Referenzen

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

4.2

URAnet aero

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

Zusammenfassung

Die 15 Aerosolmonitore und 5 ^{131}I Monitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2021 keine erhöhte künstliche Radioaktivität in der Umgebungsluft festgestellt. In den Spektren konnten keine Peaks nachgewiesen werden, die eindeutig einem künstlichen Radionuklid zugeordnet werden können. Auch die Konzentration von gasförmigem ^{131}I blieb unterhalb der Nachweisgrenze von ca. 90 mBq/m³. Somit blieben alle Aktivitätskonzentrationen unter den in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerten. Auf allen Stationen wurden die natürlich vorkommenden Radontöchter aus der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallskette täglich nachgewiesen, was die Funktionsfähigkeit der Aerosolmonitore bestätigt. Ein Vergleich der Tagesmittelwerte von ^{214}Pb aus der Uran-Radium-Zerfallskette und ^{212}Pb aus der Thorium-Zerfallskette zeigt, dass die Verläufe der Aktivitätskonzentrationen dieser beiden Radionuklide im Sommer ähnlich sind, jedoch zwischen November und Februar vergleichsweise wenig ^{212}Pb in der Luft vorhanden ist, was wahrscheinlich mit der Inversionshöhe und der unterschiedlichen Halbwertszeiten der Radon-Isotope der beiden Zerfallsreihen zusammenhängt.

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 aus dem Vorgängermessnetz RADAIR übernommenen Iod-Monitor. Diese Iod-Monitore messen 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 m³/h viel tiefer liegt als derjenige von Hochvolumensammlern (ca. 500 m³/h bei 1 Woche Sammelzeit, siehe Kapitel 4.1), liegen die Nachweisgrenzen der Aerosolmonitore höher, aber immer noch weit unter dem gesetzlichen Immissionsgrenzwert.

Von den 15 Messstationen befinden sich eine Station nördlich des Juras (Basel), eine Station südlich der Alpen (Bellinzona) und die restlichen Stationen im Mittelland zwischen Genf und dem Bodensee, mit einer besonderen Verdichtung des Messnetzes in der Umgebung der Kernkraftwerke. In der zweiten Jahreshälfte 2021 wurde die Messstation auf dem Bözberg nach Aarau verschoben. Für die erste Jahreshälfte 2022 ist zudem der Umzug des Iod-Monitors der Station Fribourg in die gleiche Lokalität in Aarau geplant. 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 Messwerte verarbeitet, im Data Warehouse von MeteoSchweiz gespeichert und gleichzeitig an die Sektion Umweltradioaktivität transferiert, wo sie für die Analyse, Visualisierung und gegebenenfalls eine Alarmvalidierung zur Verfügung stehen.

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

Messtechnik

Aerosolsammler:

Die Bandfilter-Messgeräte des Herstellers Thermo Fisher sind ausgestattet mit einem Reinstgermanium-Detektor mit 15% relativer Effizienz gegenüber einem 3x3" NaI-Detektor, über welchem sich in ca. 1cm Abstand die Bestaubungsstelle mit 5cm Durchmesser befindet. Zur Abschirmung vor Umgebungsstrahlung ist dieser Detektor in einem zweiteiligen Bleigehäuse eingebaut. Die beiden Teile werden durch einen metallenen Messstellenring getrennt, über welchen das Filterband bewegt werden kann. Der Messstellenring wird im Messbetrieb von vier Schraubenfedern luftdicht an das obere und von einem O-Ring luftdicht an das untere Bleigehäuse gedrückt. Via einen Ansaugkopf mit einem grobmäsigen 1mm-Gitter – um dem Ansaugen von Insekten oder Schneeflocken vorzubeugen – passiert die Umgebungsluft während einer Bestaubungszeit von 12 Stunden das Glasfaser-Filterband mit einer Durchflussrate von 16 bis 18 m³/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 einem Filterbandvorschub beginnt die Pumpe sofort mit dem Ansaugen von Aussenluft und der Detektor mit der kontinuierlichen Akquisition des Spektrums. Alle 5 Minuten wird das Spektrum neu ausgewertet und auf Grenzwertüberschreitungen geprüft, womit die Information der zeitlichen Entwicklung der 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 ²¹⁴Bi und ²¹⁴Pb und einer eingebauten schwachen ⁴⁰K Quelle automatisch nach. Auf die Halbwertsbreiten haben diese Modulationen keinen signifikanten Einfluss.

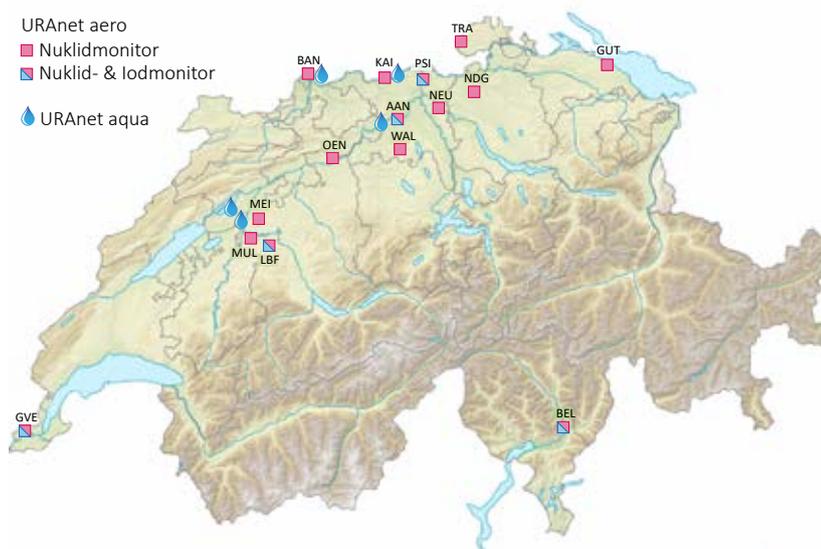


Abbildung 1 :

Standorte der 15 Aerosol- und fünf Iod-Monitore von URAnet aero. Die Stationen sind jeweils mit einem Kürzel für die Gemeinde/Region bezeichnet und bedeuten: BAN: Basel/BS, BEL: Bellinzona/TI, AAN: Aarau/AG, 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: Trasdadingen/SH, WAL: Schmiedrued-Walde/AG. Der Umzug des Iod-Monitors von Fribourg nach Aarau ist für die erste Jahreshälfte 2022 vorgesehen.

¹³¹I-Monitor:

Eine Pumpe saugt Umgebungsluft mit einer Durchflussrate von ca. 10 m³/h an. Diese Luft passiert dabei eine zylindrische Kartusche mit AgNO₃-Granulaten, auf welchen gasförmiges ¹³¹I adsorbiert, falls dieses in der Umgebungsluft (gasförmig oder partikelgebunden) vorhanden sein sollte. In der Mitte der zylindrischen Kartusche ist ein NaI-Detektor installiert, der die Gammaquanten von ¹³¹I bei 364.49 keV registriert. Aus der Zählrate und dem gefilterten Luftvolumen kann dann die Aktivitätskonzentration des ¹³¹I in der Umgebungsluft berechnet werden.

Messresultate

Abbildung 2 zeigt das aufgenommene Spektrum der Messstation Bellinzona am Ende der 12h-Bestaubungszeit am Mittag des 28. Dezembers 2021. Die aus den Hauptlinien von ²¹⁴Pb und ²¹⁴Bi (351.9 und 609.3 keV) abgeleiteten Aktivitätskonzentrationen betragen über 40 Bq/m³ und entsprechen den Jahreshöchstwerten. Bei diesen hohen Konzentrationen identifizierte die Auswertungs-Software 20 Linien von ²¹⁴Pb und 63 Linien von ²¹⁴Bi im Spektrum. Darunter befinden sich auch Summations-Peaks und Double-escape Peaks, welche die Auswertung erschweren. Viele Peaks sind zudem den Compton-Kontinuen überlagert, welche die Abschätzung des Peak-Untergrunds weiter verkomplizieren. Der Double-escape Peak der starken Linie von ²¹⁴Bi bei 1764.5 keV ergibt eine Linie bei 742.5 keV, nur 0.8 keV unterhalb der Hauptlinie von ⁹⁷Zr. Selbst bei einem gut justierten Detektor ist es deshalb möglich, dass dieser Double-escape Peak fälschlicherweise dem ⁹⁷Zr zugeordnet wird. Eine Interferenz-Korrektur kann

leider auch nicht vorgenommen werden, da dieser Double-escape Linie keine Emissionswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Eine verlässlichere Methode, dieses Problem zu lösen, ist die Anwesenheit der Nebenlinie von ⁹⁷Zr bei 507.6 keV zur eindeutigen Identifizierung von ⁹⁷Zr zu fordern, auch wenn sich dadurch die Nachweisgrenze von ⁹⁷Zr verschlechtert.

Gelegentlich taucht auch der ²¹⁴Bi Summationspeak der 609.3 keV Linie mit der 806.2 keV Linie (1'415.5 keV) oder der 665.5 keV Linie (1'274.8 keV) im Spektrum auf. Letztere könnte zur falschen Identifizierung von ²²Na führen, welches nur eine Gamma-Linie bei 1'274.5 keV besitzt. ²⁰⁸Tl hat ebenfalls eine starke Linie bei 2614.5 keV, welche einen Double-escape Peak bei 1'592.5 keV verursacht. Da dieser Double-escape Peak eine etwas höhere Halbwertsbreite aufweist, überlagert er sich teilweise mit der 1'594.7 keV Linie von ²¹⁴Bi. Dieses Multiplet wird teilweise von der Auswertungs-Software als einzelner Peak bei 1'593.5 keV interpretiert, der keinem Nuklid zugewiesen werden kann. Ebenfalls im Spektrum in Abbildung 2 identifiziert wurden einige Linien von ²¹²Pb, ²¹²Bi und ²⁰⁸Tl aus der Thorium-Zerfallsreihe, sowie der ⁴⁰K Peak und der Anihilationspeak (rot). Trotz der schwierigen Analyse durch die Vielzahl von ²¹⁴Pb und ²¹⁴Bi Linien verblieb kein nicht-zugewiesener Peak in diesem Spektrum.

Der vergrößerte Ausschnitt in Abbildung 2 zeigt den Bereich um die Hauptlinie von ²¹²Pb bei 238.6 keV. Ein korrekt justierter Germanium-Detektor mit hoher Auflösung kann diese Hauptlinie gut von der ²¹⁴Pb Nebenlinie bei 242 keV unterscheiden und die Aktivitätskonzentration von ²¹²Pb in der Umgebungsluft bestimmen. Der Verlauf der

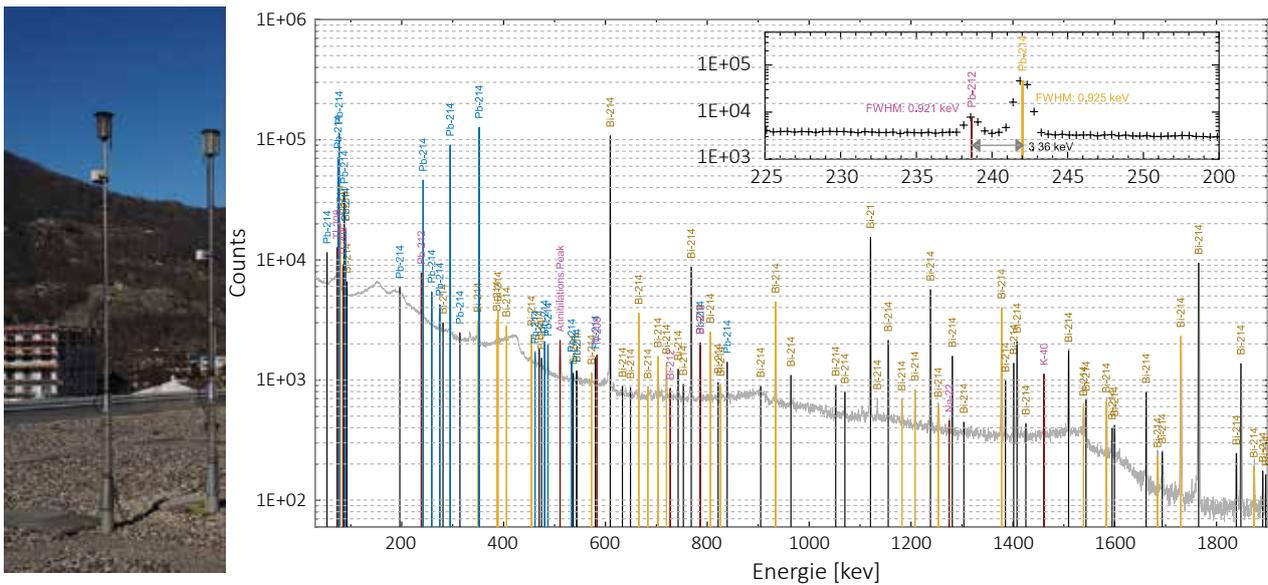


Abbildung 2 :

Spektrum der Messstation Bellinzona vom 28. Dezember 2021 um 12:00 Uhr. Die Linien von ²¹⁴Pb und ²¹⁴Bi aus der Uran-Radium-Zerfallskette sind gelb und blau markiert, alle anderen rot. Der Bereich um die Hauptlinie von ²¹²Pb aus der Thorium-Zerfallskette mit der angrenzenden Nebenlinie von ²¹⁴Pb bei 242 keV ist vergrößert dargestellt. Durch die hohe Auflösung können die Peaks von ²¹²Pb und ²¹⁴Pb gut voneinander unterschieden werden.

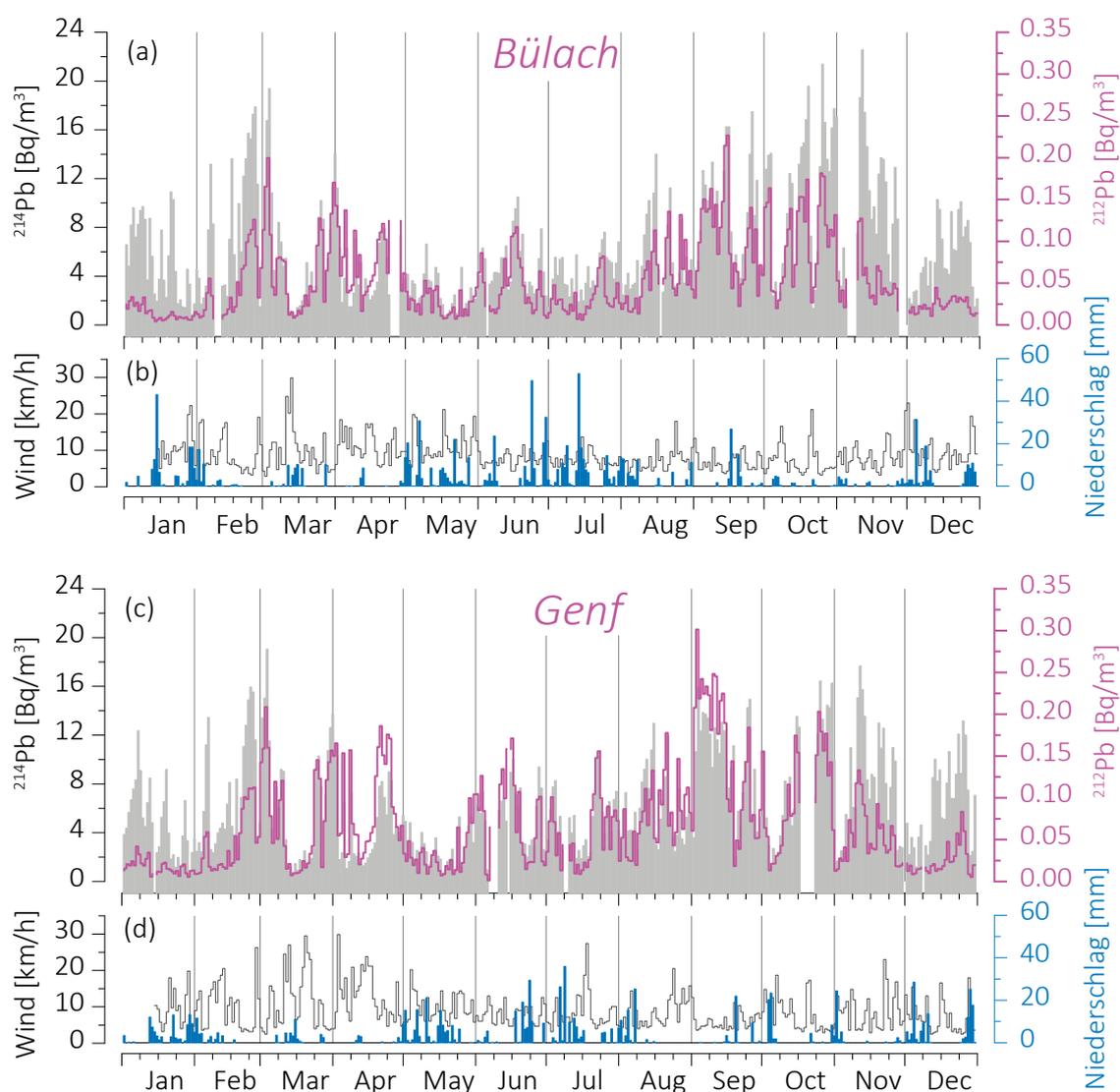


Abbildung 3 :

Zeitreihe der Tagesmittelwerte der ^{214}Pb und ^{212}Pb Aktivitätskonzentrationen der Stationen Bülach und Genf für das Jahr 2021, zusammen mit den Tagesmittelwerten der Windgeschwindigkeiten und der 24h-Niederschlagssumme.

Tagesmittelwerte der Aktivitätskonzentrationen von ^{212}Pb und ^{214}Pb der Stationen Bülach und Genf sind in Abbildung 3 aufgetragen. Diese Tagesmittelwerte von ^{212}Pb liegen im Normalfall unter $0.25 \text{ Bq}/\text{m}^3$ und folgen in den wärmeren Sommermonaten in etwa dem gleichen Trend wie ^{214}Pb . Wie beim ^{214}Pb führen windigere Verhältnisse und die Auswaschung aus der Atmosphäre durch Niederschlag zu niedrigeren ^{212}Pb Tagesmittelwerten. Sehr hohe ^{212}Pb und ^{214}Pb Tagesmittelwerte auf beiden Stationen resultieren aus windstillen Verhältnissen ohne Niederschlag, wie beispielsweise während der zweiten Hälfte im Februar oder der letzten Woche im Oktober. Während regnerischen Tagen wie etwa Mitte Mai wurden hingegen sehr tiefe Konzentrationen gemessen.

Auffallend bei beiden Stationen ist die Entkopplung der beiden Verläufe von ^{212}Pb und ^{214}Pb in den kälteren Monaten zwischen November und Februar. Die Wind- oder Niederschlagsverhältnisse scheinen keinen Einfluss auf diese Entkopplung zu haben. Die unterschiedlichen Trends in den Wintermonaten werden deutlich, wenn die ^{212}Pb Tagesmittelwerte gegen die ^{214}Pb Tagesmittelwerte aufgetragen werden. Abbildung 4 zeigt diese Werte als Kreuze für die Wintermonate und Kreise für die restlichen Monate auf den beiden Stationen Bülach und Genf sowie die vier weiteren Stationen Oensingen, Meikirch, Trasadingen und Bellinzona. In Oensingen treten die höchsten ^{212}Pb Tagesmittelwerte mit bis zu $0.35 \text{ Bq}/\text{m}^3$ auf, in Bellinzona hingegen bleiben die Werte

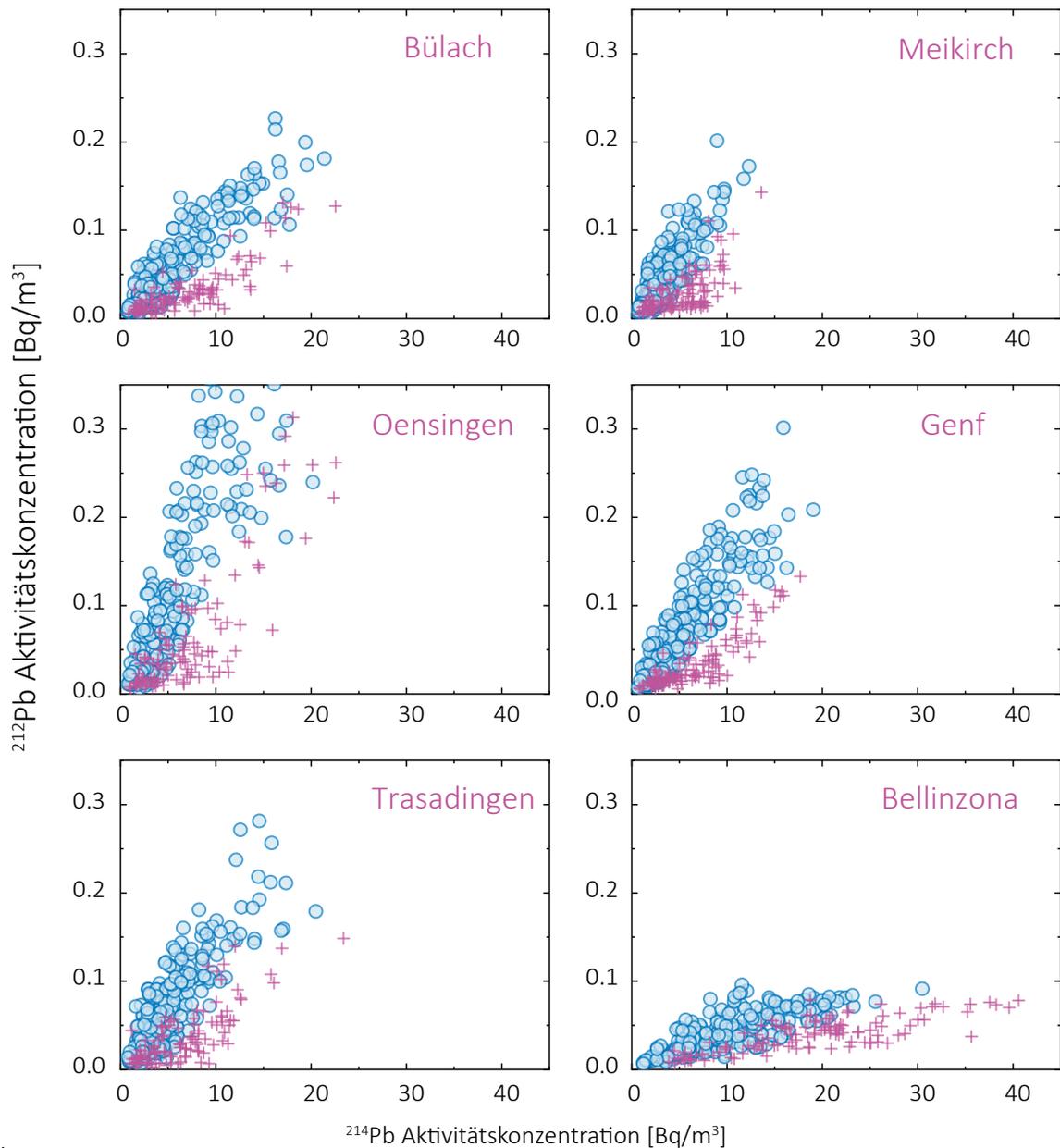


Abbildung 4 :

Tagesmittelwerte der Aktivitätskonzentration von ^{212}Pb als Funktion der Werte von ^{214}Pb auf den Stationen Bülach, Meikirch, Oensingen, Genf, Trasadingen und Bellinzona. Die Kreuze stehen für die Wintermonate Januar, Februar und Dezember 2021, die Kreise für die übrigen Monate im Jahr 2021.

unter 0.1 Bq/m^3 . Die Station Bellinzona misst jedoch schon in den Vorjahren die höchsten ^{214}Pb und ^{214}Bi Konzentrationen.

Auf allen sechs abgebildeten Stationen liegen die ^{212}Pb -Tagesmittelwerte in den kälteren Monaten für gleichhohe Werte von ^{214}Pb tendenziell tiefer als in den wärmeren Monaten. Für diesen Trend vermuten wir einen Zusammenhang mit dem unterschiedlichen Verhalten der verschiedenen Radon-Isotope und deren Töchter. Die Thorium-Zerfallskette verläuft über das gasförmige ^{220}Rn mit einer sehr kurzen Halbwertszeit von weniger als einer Minute zum ^{212}Pb mit einer Halbwertszeit von über 10 Stunden, welches sich auf den Luftpartikeln anlagert.

Kurz nach dem Austritt aus dem Boden breitet sich das ^{212}Pb folglich zusammen mit den Aerosolpartikeln aus. In der Uran-Radium-Zerfallskette hat das gasförmige ^{222}Rn eine Halbwertszeit von mehr als drei Tagen, wodurch genügend Zeit für das ^{222}Rn selbst bleibt, um sich in der Gasphase bis in höhere Luftschichten auszubreiten. Während den Inversionen im Winter kann sich das Radon und seine Töchter aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe in der gesamten Inversionsschicht ausbreiten, während die Radon-Töchter aus der Thorium-Zerfallsreihe auf den Aerosolpartikeln - besonders bei der Ausbildung von Bodeninversionen - in den tiefsten Luftschichten zurückgehalten werden. Entsprechend müsste in den Ergebnissen eine Abhängigkeit von der Probenahmehöhe über Grund

zu erkennen sein. Die bisherigen Daten stützen diese Theorie jedoch nicht (Meikirch, Oensingen und Trasadingen im 1. Stock, Bellinzona und Genf im 4. Stock und Bülach im 7. Stock).

Die fünf Iod-Monitore auf den Stationen in Bellinzona, Genf, Fribourg, Liebefeld und PSI haben zu keinem Zeitpunkt im Jahr 2021 gasförmiges ^{131}I nachgewiesen. Die Absenz von ^{131}I in der Luft bestätigen auch die Histogramme der durchschnittlichen ^{131}I Konzentrationen gemessen auf den Stationen in Fribourg und Bellinzona in Figur 5, die eine Gaußsche Glockenkurve mit einem Mittelwert von Null zeigen.

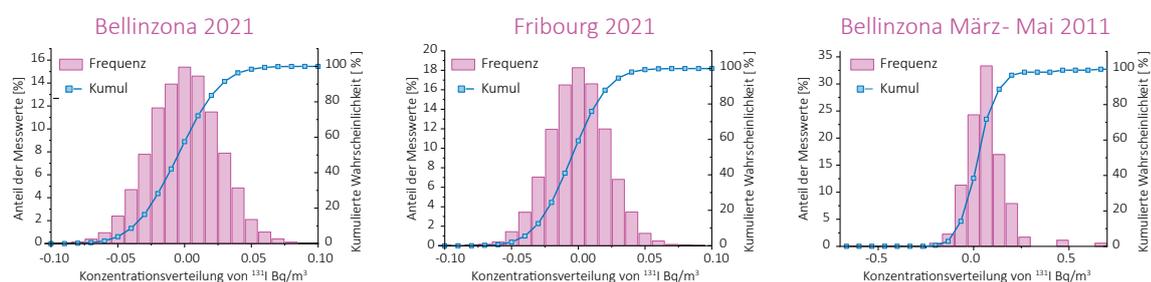


Abbildung 5:

Histogramm der Durchschnittskonzentration von ^{131}I auf den Stationen Bellinzona und Fribourg im Jahr 2021. Zum Vergleich ist ebenfalls das Histogramm von Bellinzona aus dem Jahr 2011 (Monate März bis Mai), als der Monitor nach dem Unfall im KKW Fukushima ^{131}I detektierte.

Schlussfolgerung

Die 15 nuklidspezifischen Aerosolmonitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2021 zuverlässig Gamma-Spektren mit guter Auflösung erzeugt. Weder die Aerosolsammler noch die Iod-Monitore konnten 2021 künstliche Radionuklide feststellen. Die gute Justierung und automatische Anpassung der Energiekalibration der Germanium-Detektoren erlauben die Messung der Radontöchter ^{212}Pb , ^{212}Bi und ^{208}Tl aus der Thorium-Zerfallsreihe trotz der in den Spektren dominanten ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe mit gemeinsam teilweise über 80 Peaks. Die Zeitverläufe von ^{214}Pb und ^{212}Pb zeigen ein unterschiedliches Verhalten dieser beiden Radionuklide in den Wintermonaten, was wahrscheinlich mit der unterschiedlichen Halbwertszeit der Radon-Isotope aus den beiden Zerfallsreihen und den Inversionen zusammenhängt.

4.3

Überwachung der Radioaktivität der Luft mit Militärflugzeugen

M. Müller, S. Estier, G. Ferreri

Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

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

Vorgeschichte

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

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

Im Ernstfall (d.h. bei einem Kernwaffeneinsatz oder einem schweren Kernkraftwerk-Unfall) müssen die Einsatzorgane rasch über allfällige Schutzmassnahmen für die

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

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

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 Meteo-Schweiz in Payerne ermittelt.

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

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

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



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

Messung der Proben

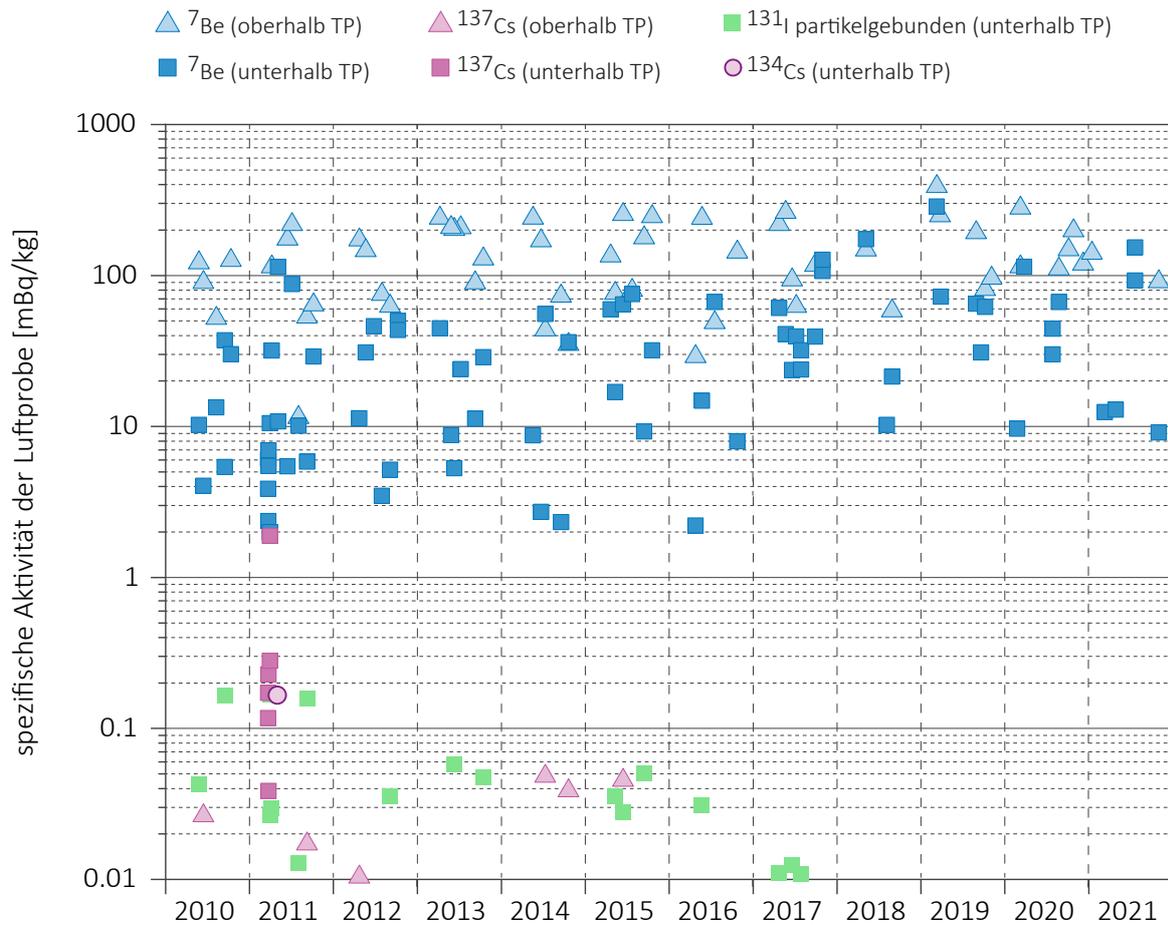
Die Messung erfolgt im Labor mittels hochauflösender Gammaskpektrometrie, wobei nach 1-2 Tagen Messzeit für ^{137}Cs eine Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg Luft erreicht wird. Anschliessend können an den Filtern weitere Untersuchungen durchgeführt werden, z.B. mit radiochemischen oder massenspektrometrischen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

Über die letzten zwölf Jahre liegt die durchschnittliche Konzentration des kosmogenen Radionuklids ^7Be oberhalb der Tropopause bei 129 mBq/kg. Bei den Messungen 1 km unterhalb der Tropopause liegt der Durchschnittswert bei 24 mBq/kg. Als Vergleich seien hier die Werte von P. Winiger [1] bis [4] erwähnt, die für ^7Be 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 2021 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:
 ^7Be -, ^{134}Cs -, ^{137}Cs - und partikelgebundene ^{131}I - Messwerte in mBq/kg Luft in den Jahren 2010-2021.

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 ^7Be , ^{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 2021 weder ^{54}Mn , ^{58}Co oder ^{60}Co aus Abgaben der Kernkraftwerke Mühleberg, Gösgen, Beznau oder Leibstadt nachgewiesen, wobei die Nachweisgrenzen bei $0.08 - 0.6 \text{ Bq/m}^3$ lagen; diese Radionuklide wurden nur in den Schwebstoffproben von Aare und Rhein gefunden. Im Januar wurde im Wasserproben ^{137}Cs beobachtet, welches zum grössten Teil noch vom Unfall im KKW Tschernobyl stammt. In Stichproben von Schwebstoffen im Rhein bei Weil (D) wurden im Weiteren die kurzlebigen Radionuklide ^{131}I , ^{177}Lu und ^{223}Ra gefunden, welche in der Nuklearmedizin eingesetzt werden. In einzelnen Wasserpflanzenproben wurden geringe Mengen von ^{137}Cs knapp oberhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen beobachtet. In Fischen und Grundwasserproben wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

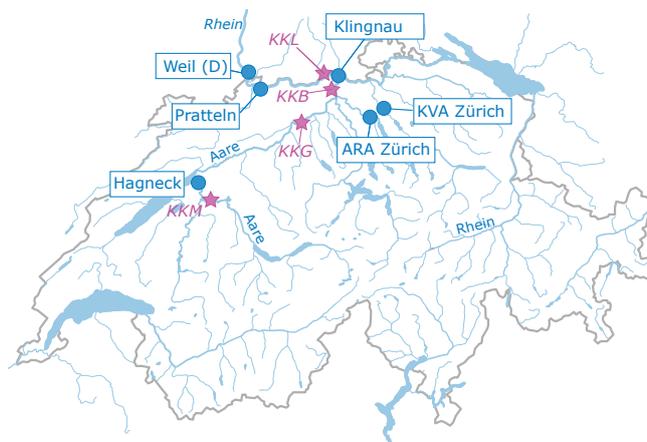
Übersicht

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 an der Mündung der Aare in den Bielersee. An der Station Klingnau weiter stromabwärts werden zusätzlich die Abgaben der Kernkraftwerke Gösgen und Beznau überwacht. An der Station Pratteln werden schliesslich auch die Abgaben des Kernkraftwerks Leibstadt überwacht.

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

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



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

Die Aktivitäten der Radionuklide in allen Proben werden an der Eawag mittels Gammaskpektrometrie 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 Schwebstoffen. Diese werden vom kantonalen Labor Basel-Stadt (KLBS) analysiert.

Ergebnisse

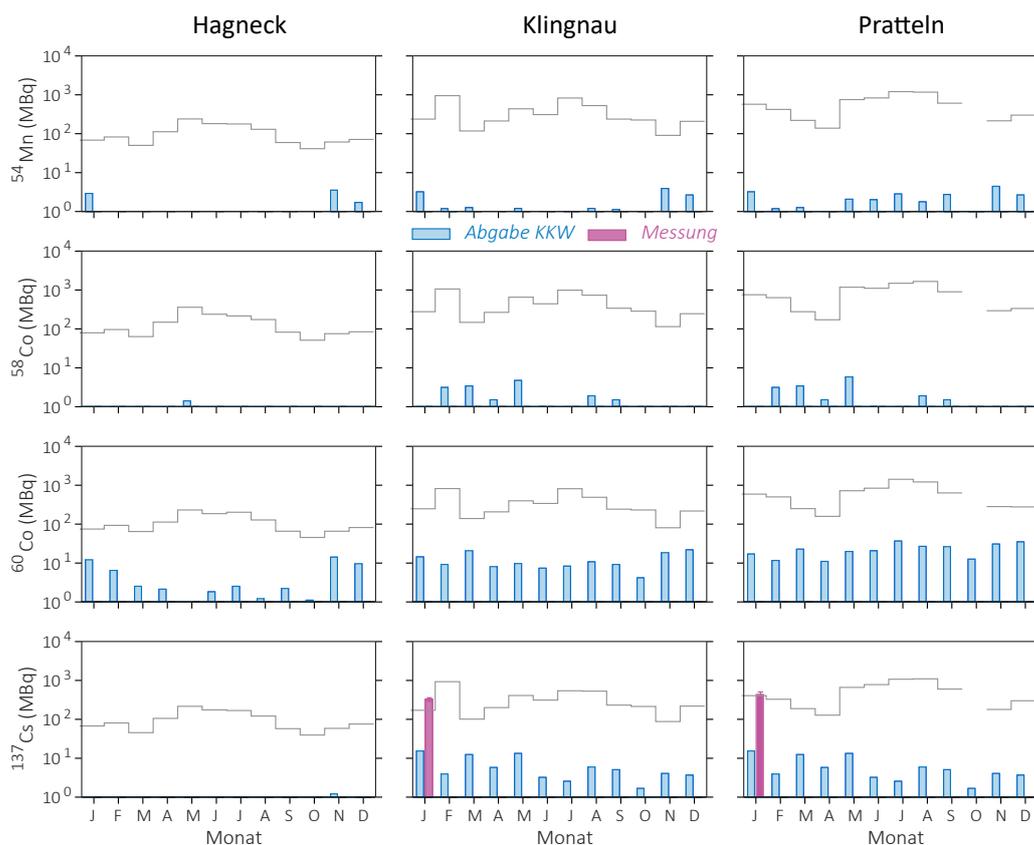
Wasserproben aus Aare und Rhein

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

werden die Radionuklide aus den Sammelproben durch eine Eisenhydroxidfällung extrahiert. Danach wird das Fällungsprodukt getrocknet und darin die Aktivitäten der betreffenden Radionuklide bestimmt. Die Radionuklidfracht ergibt sich aus dem Produkt der gemessenen Aktivität und der während der Sammelperiode abgeflossenen Wassermenge.

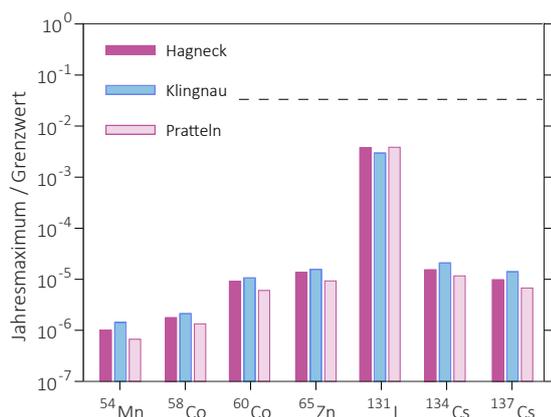
Figur 2 zeigt die monatlichen Frachten der im Wasser gelösten Radionuklide ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs bei den Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln.

Die Summe der Radionuklidabgaben aus den Kernkraftwerken in die Aare bzw. in den Rhein waren für ^{54}Mn vorwiegend durch das KKW Mühleberg dominiert. Etwa dieselbe Menge wurde durch die KKW's Beznau und Leibstadt zusammen abgegeben. ^{58}Co stammt zum grössten Teil aus dem KKW Beznau und ^{60}Co wurde von allen drei KKW's abgegeben. Im Fall von ^{137}Cs sind die Abgaben durch das Kernkraftwerk Beznau dominiert. Durch das KKW Gösgen wurden keine Abgaben der genannten Nuklide ausgewiesen, wohl aber andere Nuklide wie $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und ^{144}Ce .

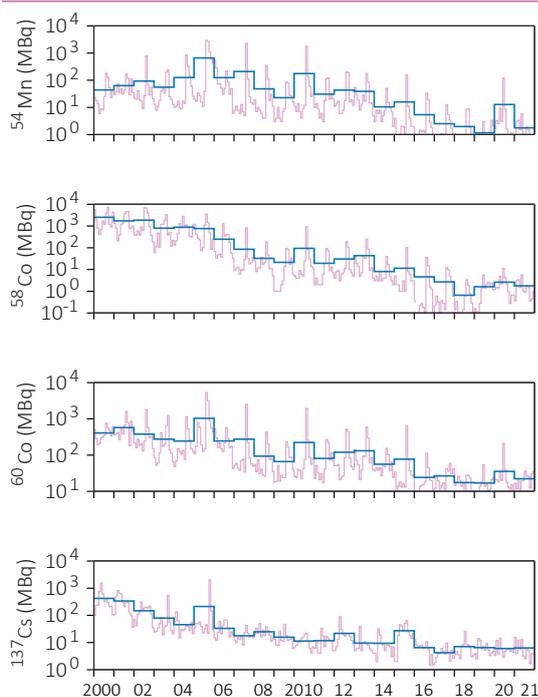


Figur 2:

Vergleich der berechneten und gemessenen Frachten von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs an den drei Stationen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln. Die berechneten Frachten entsprechen den kumulierten Abgaben der flussaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte lagen mit Ausnahmen von ^{137}Cs immer unter der Bestimmungsgrenze (schwarze Stufenlinie, engl. «limit of quantification»/LOQ). Die Fehlerbalken zeigen den Standardmessfehler der Fracht. Aufgrund des Umbaus der Elektronik in der Hardwasser AG kam es zu einer Störung der Anlage in Pratteln, wodurch die Wasserprobe des Monats Oktober nicht gesammelt wurde.



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 (Jahresmaximum der Nachweisgrenzen; vereinzelt lagen Messwerte unterhalb der Maxima der Nachweisgrenzen vor), normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer gemäss StSV. Die gestrichelte Linie markiert die Untersuchungsschwelle (1/30 der Immissionsgrenzwerte).



Figur 4: Entwicklung der summierten Abgaben der Kernkraftwerke über Abwasser von 2000 - 2021. Die hellblaue Linie zeigt die Abgaben pro Monat, die dunkelblaue jeweils das Jahresmittel.

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

Jahrzehnte sind die Abgaben dieser Radionuklide aus den KKW jedoch um mehrere Grössenordnungen zurück gegangen (siehe weiter unten).

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

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

Konzentrationsmaxima im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten

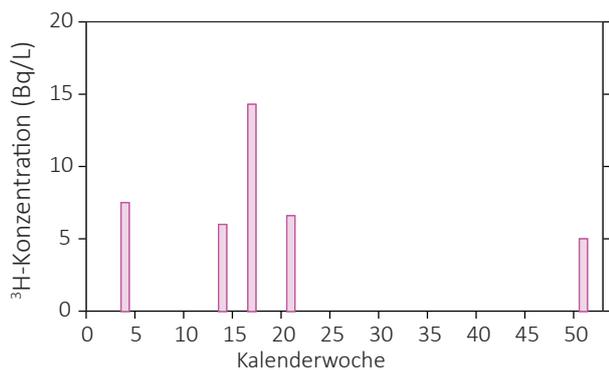
Figur 3 zeigt die jährlichen Maxima der Konzentrationen von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{131}I , ^{134}Cs und ^{137}Cs im Wasser. Die Konzentrationen wurden normiert auf die Immissionsgrenzwerte für Gewässer (StSV). Die Konzentrationen bzw. Nachweisgrenzen für Nuklide, die nicht nachgewiesen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

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 - 2021. Als Folge der Revisionen der Kernkraftwerke sind die Abgaben in der Regel im Sommer/Herbst am grössten. Über die Jahre betrachtet haben die Abgaben von ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs bis ca. 2008 tendenziell abgenommen. Danach ist bis 2013 zunächst keine systematische Veränderung erkennbar. Von 2014 bis 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.

^3H -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 Tagesproben zu Wochenmischproben und bestimmt deren ^3H -Aktivität. Die Bestimmungsgrenze liegt neu bei 4 Bq/l anstatt 2 Bq/l, wodurch der Anschein erweckt werden kann, es



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

wäre seltener Tritium im Wasser gemessen worden. Die ³H-Aktivität des Rheinwassers ist in Figur 5 dargestellt. Die ³H-Konzentrationen betragen über das ganze Jahr <15 Bq/L. Bei 90% aller Proben liegen die ³H-Konzentrationen unterhalb der Messgrenze von 4 Bq/L.

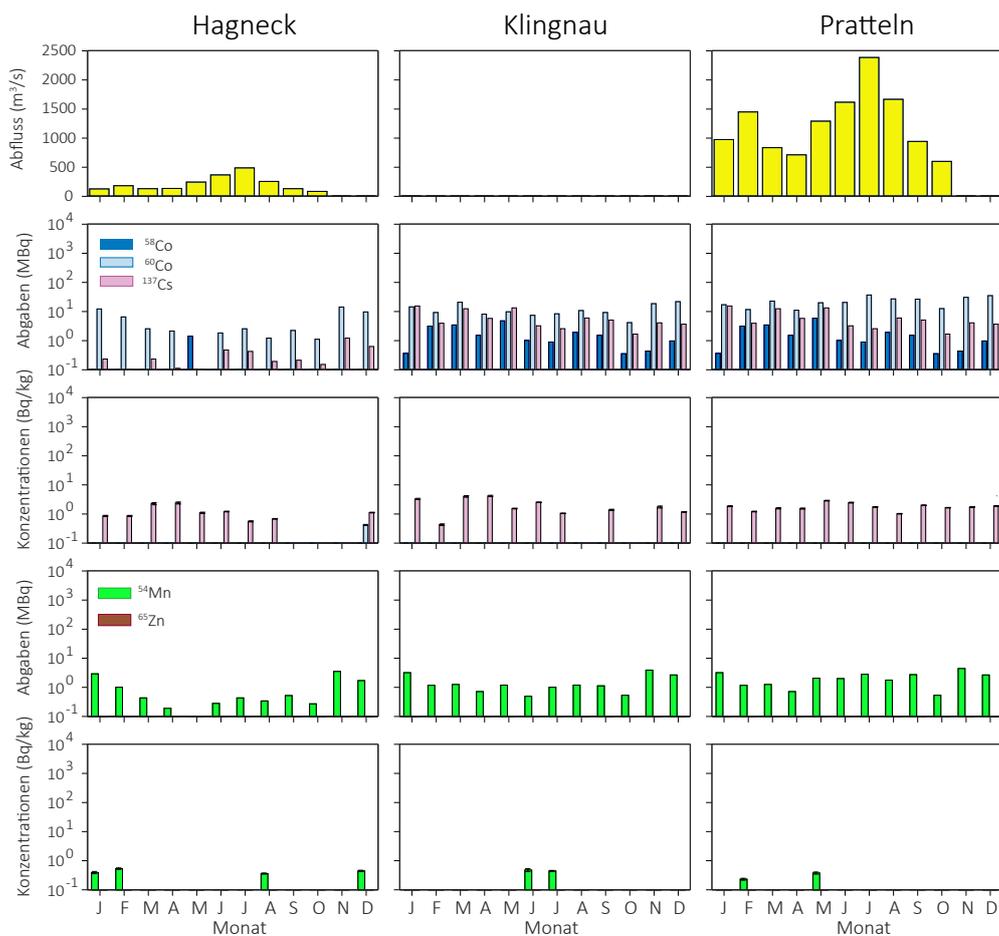
Schwebstoffe in Aare und Rhein

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 Sammelpollen der Schwebstoffe bei den Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln. Diese Schwebstoffproben werden gefriergetrocknet, gemörsert und danach gamma-spektrometrisch analysiert.

Die spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten der Partikelproben liegen bei allen drei Stationen bei maximal 15 Bq/kg, und zeigen keine generelle Korrelation mit den Abgaben aus den Kernkraftwerken (Figur 6). Die ¹³⁷Cs-Nachweise werden wie auch bei den Wasserproben auf die Remobilisierung von ¹³⁷Cs vom Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt. Sporadisch wurden ⁵⁴Mn und ⁶⁰Co gefunden; ⁵⁸Co, und ⁶⁵Zn wurden nicht nachgewiesen.

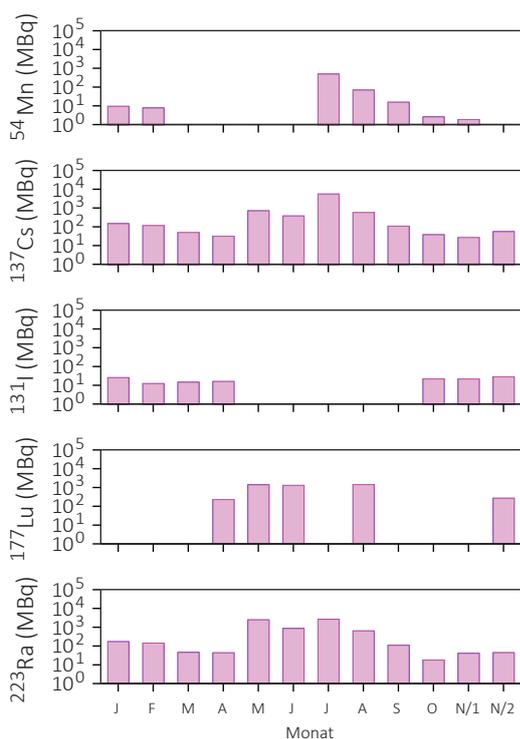


Figur 6:
 Spezifische Aktivitäten von ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn und ¹³⁷Cs in den monatlichen Partikelproben aus den Sedimentfallen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln im Vergleich mit dem Abfluss und den kumulierten Abgaben der stromaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte wurden nur dann eingezeichnet,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

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 Schwebstoffe abzentrifugiert. 2021 wurden Anfang und Ende November Proben genommen, jedoch keine im Dezember. Die Probe von Ende November wird in diesem Bericht als Dezemberprobe betrachtet.

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 zeigt die aus den Stichproben bei Weil am Rhein (D) abgeschätzten Frachten von ^{54}Mn und ^{137}Cs auf Schwebstoffen. ^{137}Cs wurde fast jeden Mo-



Figur 7:

Monatliche Frachten von ^{54}Mn , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{177}Lu und ^{223}Ra auf Schwebstoffen 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. Da der Abfluss im Juli sehr hoch war, können die Frachten überschätzt werden, was zu dem hohen Wert von ^{54}Mn führt, der scheinbar grösser ist als die Abgaben der KKW. Im November wurden 2 Proben genommen (N-1: Anfang und N-2: Ende Monat), dafür keine im Dezember.

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

Fische: Im Jahr 2021 wurden Fische aus der Aare bei Aarberg (gefangen am 10.02.2021), Schönenwerd (03.09.2021), Döttingen (09.05.2021) und aus dem Rhein bei Augst (03.11.2021) analysiert. Bei allen Fischproben wurde natürliches ^{40}K gefunden (431 - 708 Bq/kg). Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

Wasserpflanzen: Am 13.10.2021 wurden Wasserpflanzen oberhalb der Station in Hagneck, im Klingnauer Stausee, und im Rhein bei Möhlin sowie am 17.11.2021 aus der Aare bei Erlinsbach entnommen. In keiner der Proben wurden künstliche Radionuklide nachgewiesen, aber natürliches ^{40}K (303 - 374 Bq/kg).

Grundwasser bei Aarberg, Schönenwerd, Böttstein und Muttenz

Am 18.10.2021 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 am 17.11.2021 bei Schönenwerd (Pumpwerk Aarefeld in Gretzenbach) 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 0.05 - 1 mBq/L).

4.5

URAnet aqua:

Automatisches Messnetz Flusswasser

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

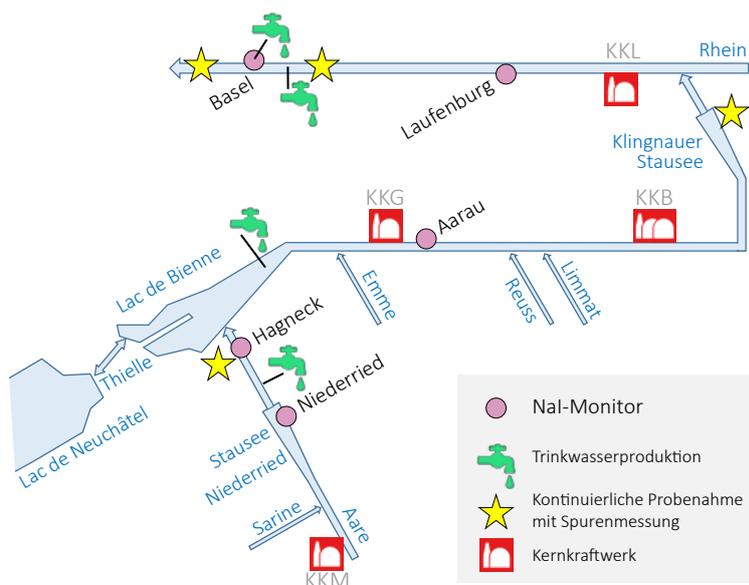
Zusammenfassung

Die fünf automatische Natrium-Iodid-Sonden des Messnetzes URAnet aqua messen fortlaufend die Konzentration von Gammastrahlern in Aare und Rhein und übermitteln alle 10 Minuten einen Messwert. Künstliche Radionuklide konnten im Berichtsjahr im Flusswasser nicht nachgewiesen werden. Die Verfügbarkeit der Messsonden war 2021 hoch.

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).



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

Eine fünfte Sonde überwacht das von IWB für die Trinkwasserversorgung der Stadt Basel aus dem Rhein entnommene Wasser. Auch hier befinden sich also zwei Messsonden zwischen dem letzten Kernkraftwerk und der Trinkwasserentnahme. Die Aufgabe der neuen automatischen Messsonden ist es starke Erhöhungen von Radioaktivität im Flusswasser rasch zu erkennen. Die tiefe Nachweisgrenze erlaubt es eine untere Meldeschwelle in Grössenordnung der Immissionsgrenzwerte für Gewässer aus der revidierten Strahlenschutzverordnung zu setzen. Für ^{137}Cs , ^{60}Co und ^{131}I ist die untere Meldeschwelle auf 10 Bq/l gesetzt. Eine zweite Schwelle mit Alarmauslösung basiert auf dem Dosisgrenzwert für Personen aus der Bevölkerung von 1 mSv/Jahr. Die Überlegung dabei ist, dass bei der Nutzung des Flusswassers als Trinkwasser der Dosisgrenzwert eingehalten ist, wenn getroffene Massnahmen spätestens nach einem Monat greifen. Für ^{137}Cs und ^{60}Co liegt die obere Radioaktivitätsschwelle bei 500 Bq/l; für ^{131}I etwas tiefer bei 250 Bq/l. Bei Überschreitung der unteren Meldeschwelle wird die zuständige Stelle 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 2021

Die Verfügbarkeit der Sonden, d.h. das Vorhandensein von 10-Minuten-Spektren, ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Generell sind diese Werte hoch. Die «Uptime» entspricht der Zeit, in der die Alarmfunktion des Messnetzes gewährleistet war. Werte von 99.9% in Tabelle 1 bedeuten, dass die Sonden nur wenige Stunden im Jahr nicht einsatzbereit waren und zwar während den jährlichen Messungen zur Konstanzprüfung oder bei der Reinigung. Zwei Sonden hatten etwas längere Ausfälle: Die Sonde bei Aarau vom 19. bis zum 27. Januar 2021 für acht Tage durch eine Panne bei der Datenübertragung und die Sonde in Hagneck vom 1. bis am 8. November 2021 für sieben Tage aufgrund eines gerissenen Kabels. Bei den auf radenviro.ch publizierten Tagesmittelwerten ist der Anteil fehlender Werte etwas höher, als die in der Tabelle genannten Uptime-Angaben. Der Grund dafür ist, dass die Sonde beim Fehlen eines einzigen 10-Minuten Wertes kein Tagesmittelwert rechnet. Die NaI-Detektoren des URAnet aqua Messnetzes konnten 2021 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 in den Kurven der Tagesmittelwerte auf radenviro.ch sichtbar.

Tabelle 1:
Verfügbarkeit (Uptime) der NaI-Wassersonden 2021

| Station | Uptime | Inbetriebnahme |
|------------|--------|----------------|
| Niederried | 99.9% | Juni 2014 |
| Hagneck | 98.1% | Juni 2015 |
| Aarau | 97.8% | Juni 2014 |
| Laufenburg | 99.9% | Januar 2015 |
| Basel | 99.9% | Juli 2013 |

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 2021 setzte die Abteilung für Klima- und Umweltphysik (KUP) der Universität Bern das Monitoring von Tritium (^3H) in Fließgewässern und im Niederschlag an ausgewählten Standorten im Kanton Bern fort. Das Monitoring wurde 2017 im Auftrag der BKW Energie AG (BKW) und des Kantons Bern sowie mit Unterstützung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) begonnen und in dieser Partnerschaft bis zum 31.12.2019 durchgeführt. Seit dem 1.1.2020 wird das Tritium-Monitoring vom BAG und der KUP in reduzierter Form weitergeführt. Die höchsten Tritiumwerte wurden auch im Jahr 2021 im Niederschlag aus dem Raum Niederwangen gemessen.

Hintergrund

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

Tabelle 1:

Tritium-Messungen Januar bis Dezember 2021 nach Art oder Entnahmeort der Probe

| Art oder Entnahmeort der Probe | Anzahl |
|--|--------|
| Aare Mühleberg Rewag | 328 |
| Niederschlag Niederwangen | 25 |
| Stadtbach Niederwangen | 26 |
| Niederschlag Physikalisches Institut | 12 |
| Rhein flussabwärts vom KKL | 143 |
| Standards/Nulleffekt/Vergleichsmessungen | 104 |
| Total: 638 | |

Probenahmen

Im Jahr 2021 wurden im Rahmen dieses Monitorings die folgenden Standorte beprobt:

- Aare flussabwärts vom KKM (Tagesmischproben vom Standort Mühleberg-Rewag)
- Niederschlag Niederwangen (Sammelproben, Standort 240 m östlich der Firma mb-microtec)
- 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.

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

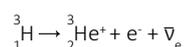
Tabelle 1 (links) zeigt die im Jahr 2021 gemessenen Proben im Einzelnen.

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.

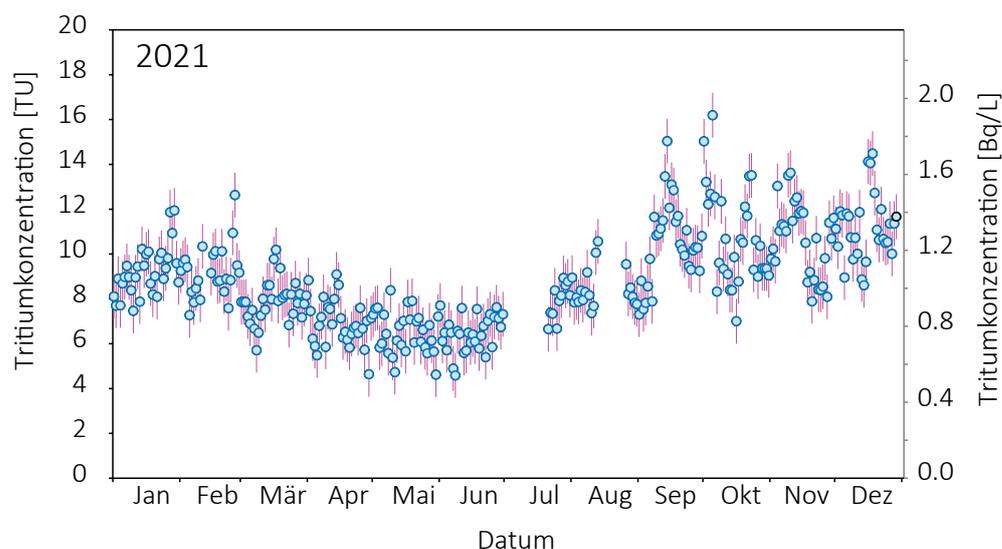
Im Raum Niederwangen wurde alle zwei Wochen eine Stichprobe aus dem Stadtbach entnommen und gemessen. Seit Herbst 2020 erfolgen diese Probenahmen wieder regelmässig alle zwei Wochen. Der Niederschlag (Regen bzw. Schnee), der unweit der Firma MB Microtec in Niederwangen in einem Regensammler erfasst wird, 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 $4'500 \pm 8$ Tagen (12.32 Jahren) unter Emission eines Elektrons und eines Antineutrinos in das Heliumisotop ^3He (Beta-Minus-Zerfall):



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 ^3H im Niederschlag bestimmt werden kann



Figur 1: Tritium-Messwerte Mühleberg Rewag. Die fehlenden Messwerte im Sommer 2021 sind auf das Hochwasser bzw. einen technischen Defekt des Probenehmers zurückzuführen.

Messergebnisse Januar bis Dezember 2021

Standort Mühleberg Rewag (Aare)

Die Tritium - Messwerte des Wassers vom Standort Mühleberg Rewag bewegten sich grösstenteils relativ stabil in einem Band zwischen 5 und 15 TU (entsprechend 0.6 - 2 Bq/L). Leider stand der Autosampler während des Hochwassers im Juli 2021 vollständig unter Wasser und war nicht zugänglich, sodass die Messreihe im Juli 2021 eine Lücke aufweist. Ein paar Tage nach der erneuten Inbetriebnahme trat ein technischer Defekt auf, was zu einer zweiten, etwas kleineren Messlücke führte.

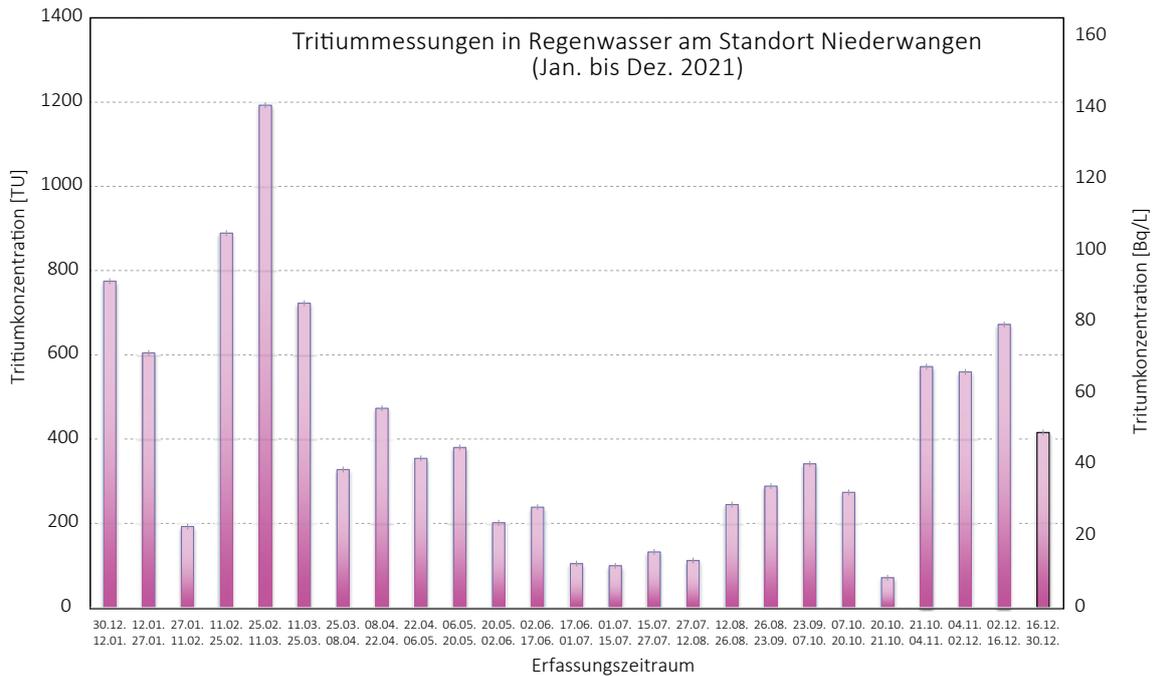
Standorte Niederwangen

Im Raum Niederwangen wurden 25 Messungen am lokalen Niederschlag durchgeführt (Figur 2). Die Messwerte der Schnee- oder Regenwasserproben lagen bei maximal ca. 1'200 TU.

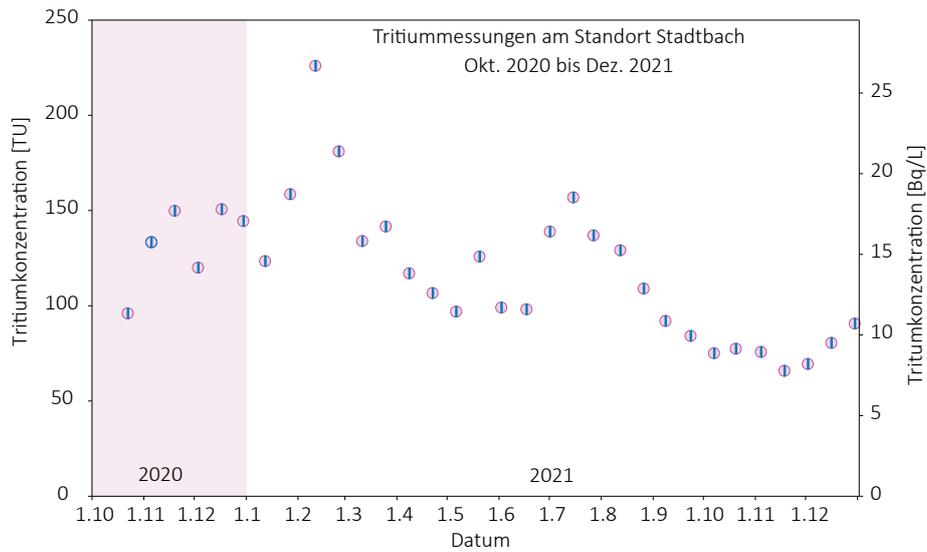
Seit Herbst 2020 wird in Niederwangen auch der Stadtbach wieder regelmässig alle zwei Wochen beprobt. Die Messwerte lagen im langjährigen Mittel, welches 110 TU beträgt (Figur 3).

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 2021 gemessenen Monatsproben wurden auf dem Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern gesammelt und liegen im Bereich 13 - 44 TU.



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 Leibstadt (Rhein)

Von Mitte Mai bis Anfang Dezember 2021 wurde stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) vorübergehend ein automatischer Probenehmer betrieben, um den Tritiumgehalt des Rheins vor, während und nach dem Revisionsstillstand zu ermitteln, welcher ursprünglich vom 24.06.2021 bis 26.10.2021 terminiert war, aber bis Anfang Dezember 2021 dauerte. Es wurden Tagesproben mit einem Sampling-Intervall von je 60 Minuten entnommen.

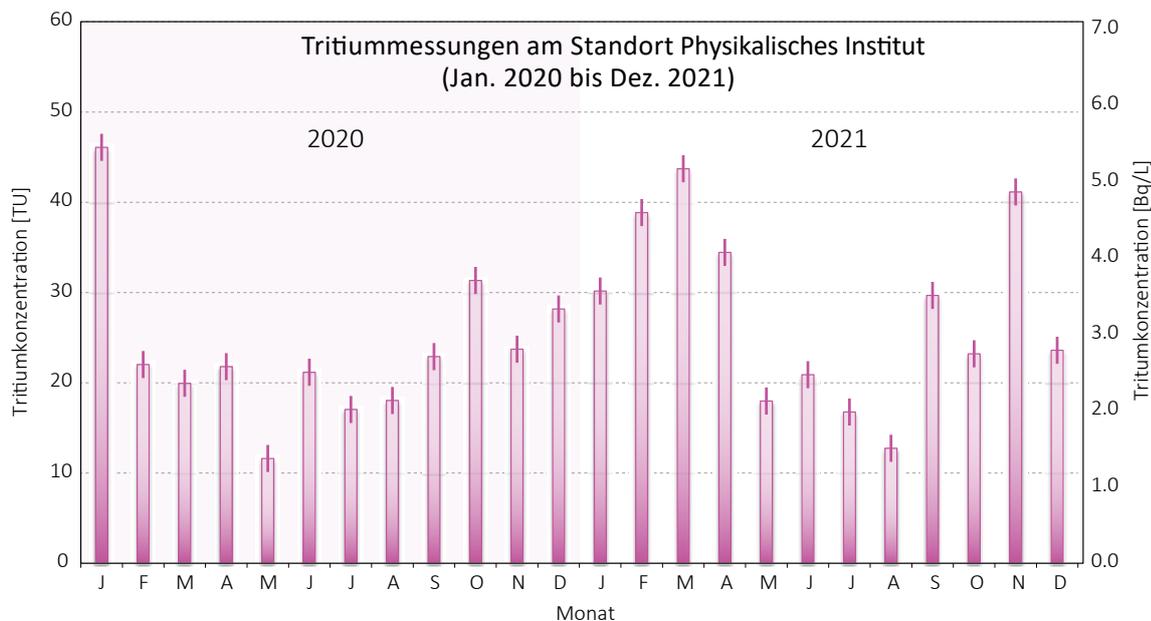
Kurz nach Revisionsbeginn zeichnete sich ein deutlicher Anstieg von ca. 10 TU auf ca. 80 TU ab (Figur 5). In den darauffolgenden Wochen gingen die Messwerte wieder auf Werte um 10 TU zurück.

Leider wurde jedoch im Juli 2021 die gesamte am Rhein-Ufer aufgestellte temporäre Messstation vom Hochwasser fortgespült. Trotz intensiven Nachforschungen konnte sie nicht wieder aufgefunden werden, sodass die Messreihe im Sommer 2021 eine grosse Lücke aufweist. Im Juli

und August konnten lediglich zwei Stichproben im Rahmen eines Augenscheins entnommen werden. Am 20. August 2021 wurde jedoch ein neuer Probennehmer in Betrieb genommen, der in einem Betonschacht untergebracht ist und im Oktober mit einem verlängerten Ansaugrohr ausgestattet wurde. Auf diese Weise soll gewährleistet werden, dass in den

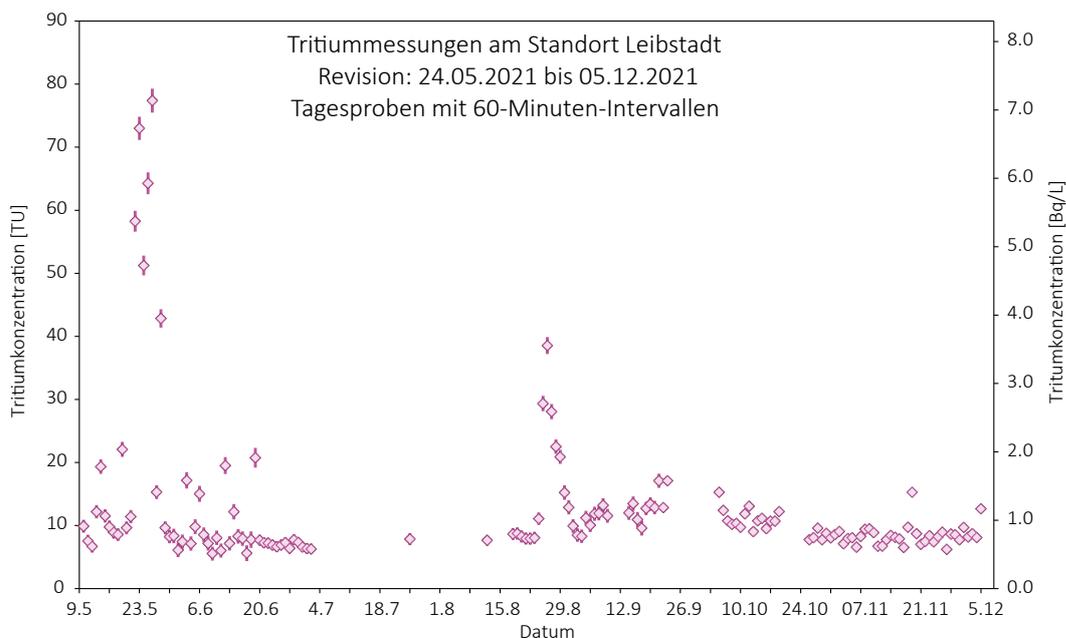
nächsten Jahren auch bei Hoch- und Niedrigwasser regelmässige Proben entnommen werden können.

In Figur 5 ist Ende August 2021 deutlich ein zweiter Peak erkennbar. Dieser ist wahrscheinlich auf die Revision des KKL Beznau zurückzuführen, welche am 6. August 2021 begonnen hatte.



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 vor und während dem Revisionsstillstand. Die Messlücken sind auf das Hochwasser im Juli 2021 sowie den ab Ende September sehr tiefen Wasserstand des Rheins zurückzuführen.

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

M. Burger, S. Röllin, R. Holzer, H. Sahli, M. Astner

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 chaîne alimentaire, et pourra finalement se trouver dans les tissus osseux [1] et les dents [2]. La mesure du ^{90}Sr dans des échantillons de sol, d'herbe, de céréale, de lait, de vertèbre et de dents de lait est effectuée en Suisse depuis les années soixante. La

figure 3 du chapitre 1.1 illustre l'évolution des moyennes annuelles obtenues depuis plus de soixante ans pour chaque type d'échantillon correspondant à un compartiment de l'environnement. Après avoir atteint des valeurs maximales au milieu des années soixante, une décroissance 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 chaîne alimentaire. Au contraire du ^{90}Sr , il se retrouvera principalement dans les tissus musculaires des vertébrés et sera éliminé plus rapidement que le strontium.

Résultats et discussion

Les résultats des mesures pour les sols sont présentés dans le Tableau 1. La présence du ^{90}Sr et des actinides Pu et Am est principalement due aux retombées des essais nucléaires atmosphériques des années soixante. Cette déposition ayant été amenée au sol par les précipitations, les régions connaissant une pluviosité plus importante montrent les activités les plus élevées. Ainsi, les activités en ^{90}Sr sont dans une gamme de 0.2 à 0.6 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 0.3 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 Stabio au sud des Alpes. Les rapports $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ proches de 0.41 (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 (19 à 172 Bq/kg). Le passage du nuage de Tchernobyl a également touché le nord-est de la Suisse, les valeurs relevées à Arenenberg (20.1 Bq/kg) et Güttingen (14.5 Bq/kg) étant supérieures à celle obtenues sur les autres sites du plateau suisse (5 à 13 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 ^7Be , 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 et surtout au Tessin (21.5 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 2021 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 2021
(Bq/kg matière sèche, fraction < 2 mm).

| Canton / Lieu | n | ^{40}K | ^{60}Co | ^{134}Cs | ^{137}Cs | ^{90}Sr | $^{239+240}\text{Pu}$ | ^{241}Am |
|---------------------------|---|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| AG (Voisinage KKB) | 2 | 444 ± 33 | < 0.5 | < 0.5 | 12.7 ± 1 | 0.28 ± 0.10 | 0.185 ± 0.018 0.175 ± 0.014 | 0.077 ± 0.006 0.069 ± 0.006 |
| AG (KKB in-situ) | 2 | 310 ± 23 | | | 8.1 ± 0.7 | | | |
| AG (PSI) | 1 | 347 ± 38 | < 0.7 | < 0.7 | 8.8 ± 1.1 | 0.19 ± 0.07 | 0.142 ± 0.015 0.140 ± 0.012 | 0.049 ± 0.006 0.055 ± 0.005 |
| AG (PSI in-situ) | 1 | 258 ± 27 | | | 5.1 ± 0.7 | | | |
| AG (ZWILAG) | 1 | 426 ± 45 | < 0.6 | < 0.6 | 9.0 ± 1.1 | 0.35 ± 0.10 | 0.160 ± 0.010 | 0.074 ± 0.006 |
| AG (ZWILAG in-situ) | 1 | 308 ± 32 | | | 6.3 ± 0.8 | | | |
| AG (Vois. KKL) | 4 | 398 ± 21 | < 0.8 | < 0.7 | 12.7 ± 0.7 | 0.59 ± 0.14 | 0.201 ± 0.017 0.197 ± 0.014 | 0.078 ± 0.007 0.080 ± 0.010 |
| AG (KKL in-situ) | 4 | 299 ± 15 | | | 7.5 ± 0.5 | | | |
| AG/SO (Vois. KKG) | 4 | 402 ± 21 | < 0.8 | < 0.7 | 11.5 ± 0.7 | 0.51 ± 0.12 | 0.233 ± 0.023 0.260 ± 0.016 | 0.106 ± 0.007 0.115 ± 0.012 |
| AG/SO (KKG in-situ) | 4 | 283 ± 15 | | | 6.4 ± 0.4 | | | |
| BE (Voisinage KKM) | 7 | 668 ± 26 | < 0.7 | < 0.6 | 7.2 ± 0.3 | 0.33 ± 0.10 | 0.151 ± 0.016 0.150 ± 0.013 | 0.060 ± 0.006 0.051 ± 0.007 |
| BE (KKM in-situ) | 7 | 538 ± 21 | | | 5.6 ± 0.3 | | | |
| BE (Mürren) ¹⁾ | 1 | 495 ± 21 | < 0.3 | < 0.4 | 11.8 ± 0.8 | 1.8 ± 0.4 | 0.38 ± 0.01 | 0.40 ± 0.05 ³⁾ |
| BE (Gimmelwald) | 1 | 313 ± 14 | < 0.3 | < 0.3 | 11.0 ± 0.7 | 2.7 ± 0.6 | 0.61 ± 0.03 | 0.37 ± 0.03 ³⁾ |
| BE (Fahrni) ²⁾ | 1 | 446 ± 19 | < 0.3 | < 0.3 | 12.4 ± 0.8 | 2.5 ± 0.7 | 0.56 ± 0.02 | 0.35 ± 0.03 ³⁾ |
| BE (Diesse/Jura) | 1 | 455 ± 20 | < 0.3 | < 0.3 | 12.7 ± 0.8 | 0.9 ± 0.2 | 0.45 ± 0.02 | 0.23 ± 0.03 ³⁾ |
| BL (Sissach) | 1 | 546 ± 26 | < 0.2 | < 0.2 | 16.5 ± 0.9 | 4.79 ± 0.96 | | |
| FR (Posieux) | 1 | 381 ± 41 | < 0.7 | < 0.6 | 5.4 ± 0.8 | 0.37 ± 0.10 | 0.204 ± 0.022 0.194 ± 0.015 | 0.080 ± 0.008 0.068 ± 0.010 |
| FR (Posieux in-situ) | 1 | 315 ± 33 | | | 3.5 ± 0.5 | | | |
| GE (Vois. CERN) | 5 | 437 ± 21 | < 0.9 | < 0.7 | 5.8 ± 0.3 | 0.20 ± 0.06 | 0.108 ± 0.011 | 0.039 ± 0.006 |
| GE (CERN in-situ) | 5 | 393 ± 18 | | | 4.0 ± 0.3 | | | |
| TG (Arenenberg) | 1 | 396 ± 42 | < 0.5 | < 0.5 | 20.1 ± 2.1 | 0.59 ± 0.15 | 0.174 ± 0.010 | 0.072 ± 0.006 |
| TG (Arenenberg in-situ) | 1 | 316 ± 33 | | | 13.9 ± 2.0 | | | |
| TG (Güttingen) | 1 | 369 ± 39 | < 0.5 | < 0.5 | 14.5 ± 1.5 | 0.34 ± 0.08 | 0.155 ± 0.009 | 0.058 ± 0.005 |
| TG (Güttingen in-situ) | 1 | 259 ± 27 | | | 11.0 ± 1.1 | | | |
| TI (Centovalli) | 1 | 417 ± 22 | < 0.2 | < 0.2 | 66.7 ± 3.4 | 6.45 ± 1.29 | | |
| TI (Prato Leventina) | 1 | 502 ± 27 | < 0.2 | < 0.2 | 18.8 ± 1.1 | 2.51 ± 0.50 | | |
| TI (Sessa) | 1 | 670 ± 36 | < 0.2 | < 0.2 | 63.7 ± 3.4 | 4.72 ± 0.94 | | |
| TI (Cadenazzo) | 1 | 675 ± 72 | < 1.0 | < 0.9 | 75.8 ± 7.8 | 0.79 ± 0.18 | 0.120 ± 0.009 | 0.052 ± 0.005 |
| TI (Cadenazzo in-situ) | 1 | 525 ± 54 | | | 42.9 ± 4.5 | | | |
| Ti (Caslano) | 1 | 612 ± 64 | < 0.6 | < 0.6 | 69.5 ± 7.1 | | | |
| Ti (Caslano in-situ) | 1 | 525 ± 54 | | | 48.8 ± 5.0 | | | |
| TI (Stabio) | 1 | 646 ± 67 | < 0.6 | < 0.6 | 172 ± 17.3 | 0.64 ± 0.16 | 0.567 ± 0.026 | 0.323 ± 0.015 |
| TI (Stabio in-situ) | 1 | 584 ± 60 | | | 135 ± 19.2 | | | |

n = nombre d'échantillons;

¹⁾ alpage (Allmendhubel, 1'900 m);

²⁾ bord des Alpes (850 m);

³⁾ méthode non accréditée

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

Tableau 2 :

Activité en ^7Be , ^{40}K , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs et ^{90}Sr dans des échantillons d'herbe prélevés en Suisse en 2021 lors de deux saisons (printemps et automne) de coupe (Bq/kg de matière sèche).

| Canton/Lieu | n | ^7Be | ^{40}K | ^{60}Co | ^{134}Cs | ^{137}Cs | ^{90}Sr |
|---------------------------|---|---------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|---|
| AG (Voisinage KKB) | 4 | 162 ± 11 | 691 ± 39 | < 1.1 | < 1.1 | < 1.1 | 0.35 ± 0.08 ³⁾ 0.63 ± 0.14 ⁴⁾ |
| AG (PSI) | 2 | 307 ± 27 | 413 ± 34 | < 1.1 | < 1.1 | 0.9 ± 0.5 | 0.34 ± 0.08 ³⁾ 0.85 ± 0.19 ⁴⁾ |
| AG (ZWILAG) | 2 | 207 ± 18 | 741 ± 58 | < 1.1 | < 1.1 | < 1.1 | 0.55 ± 0.12 ³⁾ 0.79 ± 0.19 ⁴⁾ |
| AG (Voisinage KKL) | 8 | 175 ± 7 | 660 ± 27 | < 1.1 | < 1.1 | 1.4 ± 0.2 | 0.61 ± 0.13 ³⁾ 0.80 ± 0.17 ⁴⁾ |
| AG/SO (Voisinage KKG) | 8 | 163 ± 8 | 799 ± 32 | < 1.1 | < 1.1 | 0.7 ± 0.4 | 0.38 ± 0.10 ³⁾ 0.78 ± 0.18 ⁴⁾ |
| BE (Voisinage KKM) | 8 | 134 ± 7 | 845 ± 33 | < 1.1 | < 1.1 | 0.7 ± 0.5 | 0.42 ± 0.12 ³⁾ 0.40 ± 0.09 ³⁾ 1.02 ± 0.21 ⁴⁾ |
| BE (Lauterbrunnen) | 1 | 12 ± 2.3 | 516 ± 46 | < 0.4 | < 0.3 | 1.1 ± 0.2 | 1.10 ± 0.10 |
| BE (Mürren) ¹⁾ | 1 | 341 ± 54 | 891 ± 77 | < 0.4 | < 0.3 | < 0.2 | 2.90 ± 0.30 |
| BE (Gimmelwald) | 1 | 186 ± 29 | 637 ± 55 | < 0.3 | < 0.2 | 0.2 ± 0.1 | 1.90 ± 0.20 |
| BE (Fahrni) ²⁾ | 2 | 215 ± 29 | 747 ± 46 | < 0.5 | < 0.3 | < 0.3 | 0.61 ± 0.06 |
| BE (Diesse/Jura) | 2 | 333 ± 37 | 1'415 ± 86 | < 0.5 | < 0.4 | 0.4 ± 0.1 | 0.91 ± 0.07 |
| BL (Sissach) | 1 | 259 ± 19 | 675 ± 26 | < 0.3 | < 0.2 | 0.5 ± 0.3 | 0.24 ± 0.05 |
| FR (Posieux) | 2 | 108 ± 10 | 944 ± 75 | < 1.1 | < 1.1 | < 1.1 | 0.39 ± 0.09 ³⁾ |
| GE (Voisinage CERN) | 4 | 163 ± 10 | 784 ± 46 | < 1.1 | < 1.1 | < 1.1 | 0.84 ± 0.17 ⁴⁾ |
| TG (Güttingen) | 2 | 167 ± 14 | 1'009 ± 77 | < 1.1 | < 1.1 | < 1.1 | 0.46 ± 0.10 ³⁾ |
| Ti (Centovalli) | 1 | 377 ± 23 | 1'084 ± 53 | < 0.3 | < 0.3 | 13.9 ± 1.0 | 21.5 ± 4.30 |
| TI (Prato Leventina) | 1 | 292 ± 18 | 1'148 ± 56 | < 0.3 | < 0.2 | 2.8 ± 0.4 | 5.90 ± 1.20 |
| TI (Sessa) | 1 | 222 ± 15 | 854 ± 47 | < 0.4 | < 0.2 | 3.8 ± 0.5 | 4.70 ± 0.90 |
| TI (Cadenazzo) | 2 | 388 ± 30 | 1'068 ± 81 | < 1.1 | < 1.1 | 3.0 ± 0.5 | 2.94 ± 0.58 ³⁾ |
| TI (Stabio) | 1 | 292 ± 31 | 555 ± 61 | < 0.9 | < 0.8 | 10.6 ± 1.3 | |

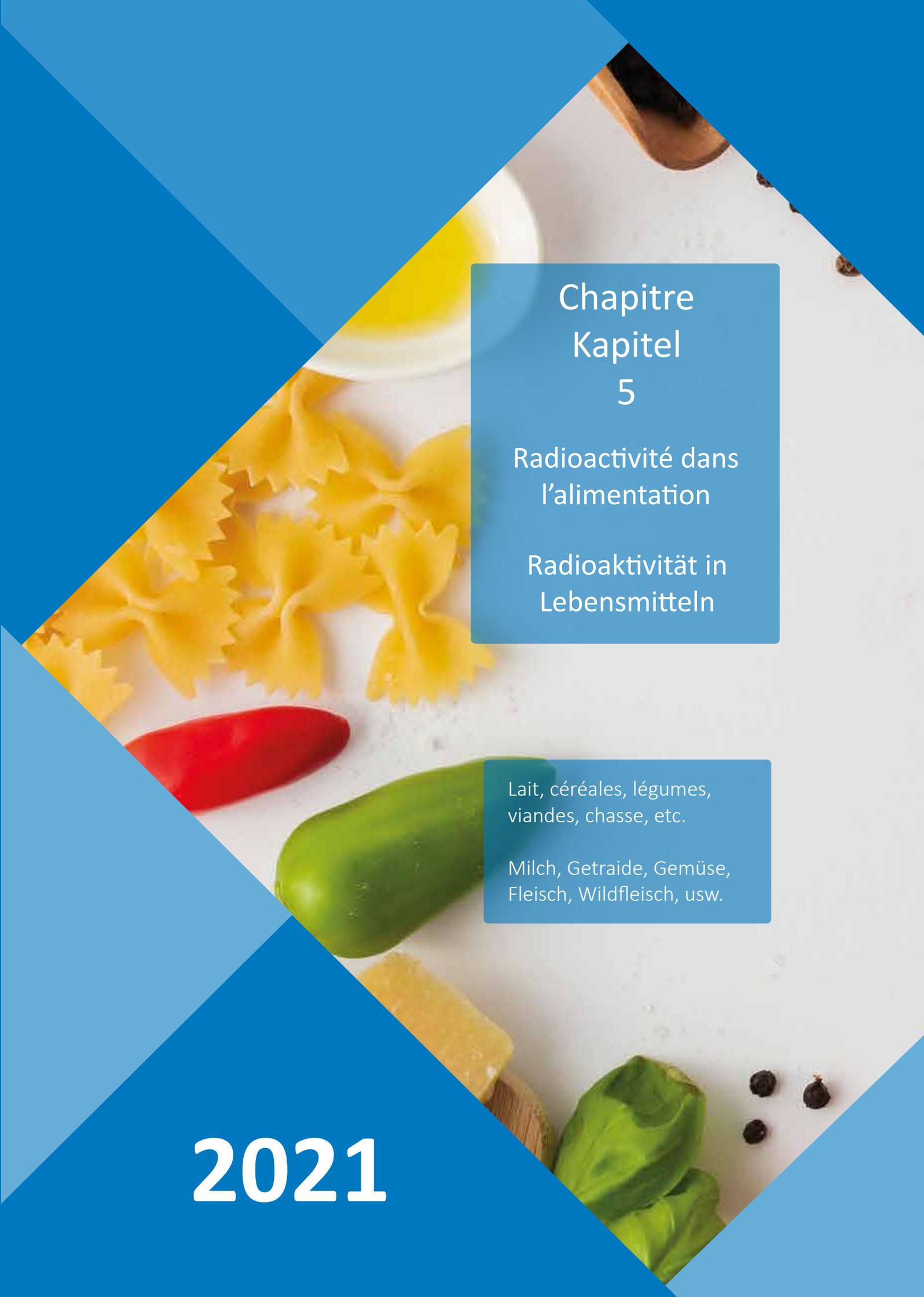
n = nombre d'échantillons;

¹⁾ alpage (Allmendhubel);

²⁾ bord des Alpes, 850 m ;

³⁾ coupe de printemps;

⁴⁾ coupe d'automne.



Chapitre
Kapitel
5

Radioactivité dans
l'alimentation

Radioaktivität in
Lebensmitteln

Lait, céréales, légumes,
viandes, chasse, etc.

Milch, Getraide, Gemüse,
Fleisch, Wildfleisch, usw.

2021

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

P. Froidevaux, P.-A. Pittet, F. Barraud, M. Straub

Institut de Radiophysique, Lausanne

G. Ferreri, A. Gurtner

Sektion Umweltradioaktivität, URA/BAG, Bern

Zusammenfassung

Insgesamt wurden 2021 etwas mehr als 400 Lebensmittelproben aus der Schweiz (ohne Spezialkampagnen für Wildschweine) sowie fast 200 importierte Lebensmittel auf Radioaktivität untersucht. Die Analysen fanden im Rahmen des BAG Probenahmeplans, von kantonalen Messkampagnen und von Spezialprogrammen statt. In den Hauptnahrungsmitteln waren wie erwartet Spuren von ^{137}Cs , ^{90}Sr und Tritium als anthropogene Radionuklide nachweisbar. Bei rund 1% der untersuchten Wildschweine aus dem Tessin lag der ^{137}Cs -Gehalt über dem Grenzwert von 600 Bq/kg. Damit war der Anteil konfiszierter Wildschweine etwas tiefer als in den Vorjahren. Aus Graubünden und dem Tessin wurden 155 Pilzproben untersucht. Hier wurde der Grenzwert bei rund 3% aller Proben überschritten, mit einem Maximum von 1'970 Bq/kg ^{137}Cs (Frischgewicht). Bei allen anderen Proben – Lebensmittelproben aus der Schweiz sowie importierte Lebensmittel – waren die festgestellten Konzentrationen von künstlichen Radionukliden sehr tief.

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 Gammaskpektrometrie 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-erarbeitender 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).

Ergebnisse der Überwachung der Lebensmittel aus der Schweiz

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

2021 wurden 130 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. Der höchste Wert wurde bei einer Probe aus dem Centovalli festgestellt (9.9 Bq/l). Solche leicht erhöhten Werte in der Nähe des ehemaligen Toleranzwertes (10 Bq/l) oder 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. Aus den genannten Regionen konnten kleinste Spuren von ^{137}Cs in einigen weiteren Proben nachgewiesen werden (Maximum 0.9 Bq/l). Diese wenig erhöhten Werte sind immer noch eine Folge der hohen ^{137}Cs -Depositionen nach dem Unfall von Tschernobyl in der Südschweiz. Alle Werte liegen aber deutlich unterhalb der Höchstgrenze von 600 Bq/l aus der Tschernobyl-Verordnung. ^{131}I konnte 2021 in keiner Milchprobe nachgewiesen werden (Nachweisgrenze: <1 Bq/l oder tiefer).

Tabelle 1:

Höchstwerte für Radionuklide in Lebensmitteln (Bq/kg).

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

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

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

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

Das KL BS, das IRA in Lausanne und das LABOR SPIEZ untersuchten insgesamt 65 Milchproben auf ^{90}Sr . Alle gemessenen Werte waren sehr tief mit einem Maximum von 0.3 Bq/l und einem Median von 0.04 Bq/l. Als Vergleich können wir die abgeleitete Konzentration aus der TBDV (4.9 Bq/l), den ehemaligen Toleranzwert der FIV (1 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 25 Gemüse- und Obstproben aus der Schweiz konnte in einer einzigen Getreideprobe Spuren von ^{137}Cs erkannt werden (Messwert 0.3 Bq/kg; in den anderen Proben Nachweisgrenzen typischerweise 0.4 Bq/kg). Je etwa die Hälfte der Proben stammte aus der Umgebung der Kernkraftwerke und aus von davon entfernten Gegenden. Ein Unterschied zwischen diesen beiden Probengruppen konnte nicht festgestellt werden. Die gemessenen Konzentrationen (< 0.4 Bq/kg ^{137}Cs) sind sehr tief und liegen beispielsweise deutlich unter dem Toleranzwert der ehemaligen FIV (10 Bq/kg Frischgewicht).

Die ^{90}Sr Werte der Getreideproben ($n=17$), sowohl aus der Umgebung von Kernkraftwerken als auch aus entfernten Gebieten, variierten zwischen 0.04 und 0.23 Bq/kg mit einem Medianwert von 0.07 Bq/kg. Diese tiefen, mit den Vorjahren vergleichbaren Werte sind noch Spuren 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 0.1 Bq/kg Frischgewicht.

Tritium (^3H) in Obst und Milch

Die genehmigten Abgaben an die Umwelt der Firma mb-microtec in Niederwangen verursachen lokal erhöhte Tritiumwerte im Niederschlag (siehe Kapitel 9.3). Als Folge davon ist Tritium in diesem Gebiet auch in Lebensmitteln nachweisbar. Die gemeinsam vom KL BE und BAG jährlich durchgeführten Routinemessungen von Gemüse- und Obstproben aus der Umgebung der Firma 2021 ergaben Tritiumkonzentrationen (^3H) von 3 - 143 Bq/l im Destillat (12 Proben; Mittelwert: 43 Bq/l). Die ebenfalls leicht erhöhte ^3H -Aktivität der Milch aus der Umgebung des genannten Betriebes (9 - 10.2 Bq/l im Destillat von 3 Milchproben) ist auf die Aufnahme von ^3H aus lokalen Futtermitteln zurückzuführen.

In 8 Milchproben aus der Umgebung des KKW 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 in Zusammenarbeit mit dem BAG 2021 die Triagemessungen an Wildschweinen mit einem empfindlichen Dosisleistungsmessgerät weitergeführt. Von Tieren, bei denen die Triagemessung (Dosisleistung) vor Ort einen zu hohen Wert anzeigte, wurden im Labor Proben nachgemessen. Dies war bei 20 von 1'774 untersuchten Tieren der Fall. Das entspricht wie in den letzten Jahren einer Quote von ca. 1%. Die Positivbefunde wurden im Labor nachgemessen. Mit einer Ausnahmen lagen alle Werte über dem Grenzwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs in Wildtieren. Die Ergebnisse im Bereich von 332 bis maximal 2'662 Bq/kg zeigen, dass die Triagemessungen auch Werte über dem Grenzwert zuverlässig erfassen und dass die Rate der falschen Positiven klein ist.

Die Messungen von 27 Proben von Wildschweinfleisch aus dem Kanton Wallis ergaben sehr tiefe Konzentrationen von ^{137}Cs (höchster Wert: 9.7 Bq/kg). Aus dem Kanton Graubünden ist ein Wildschwein mit 104 Bq/kg bekannt.

Andere Lebensmittel aus der Schweiz

In den 4 jährlich untersuchten Fischproben aus Aare und Rhein wurde bei keinem Fisch Spuren von ^{137}Cs festgestellt (Nachweisgrenze < 0.5 Bq/kg). In diesen Proben werden auch die Aktinide Plutonium, Americium und Curium gemessen. Ausser Spuren von ^{241}Am in einer Probe (2 mBq/kg) konnten keine Actinide nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze schwankte dabei je nach zur Verfügung stehender Probemengen zwischen < 1 mBq/kg Frischgewicht und 25 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 und Tessin haben insgesamt 155 Proben einheimischer Pilze untersucht: Mittelwert 89 Bq/kg (Frischgewicht) ^{137}Cs ; Maximum 1'970 Bq/kg ^{137}Cs ; Median 10 Bq/kg ^{137}Cs . Der Grenzwert von 600 Bq/kg aus der Tschernobylverordnung wurde insgesamt 5 mal überschritten (d.h. bei ca. 3% aller Proben).

Von 30 Käseproben aus der Schweiz (gemessen am KL-BS) konnte in einer einzigen Spuren von ^{137}Cs nachgewiesen werden (0.3 Bq/kg); in 29 der 30 Käseproben wurde ^{90}Sr detektiert. Der höchste Wert wurde mit 1.6 ± 0.3 Bq/kg in einem Bündner Bergkäse mit der oben genannten ^{137}Cs Konzentration festgestellt. Der Mittelwert aller ^{90}Sr Konzentrationen lag bei 0.46 Bq/kg.

In 6 Beerenproben aus der Schweiz (offen und als Konfitüre) konnte kein ^{137}Cs festgestellt werden.

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 186 importierte Lebensmittel geprüft.

Für Proben aus Japan, für welche in der Schweiz - gleich wie in der Europäischen Union - besteht seit dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi ein Programm zur Kontrolle beim Import. Im Berichtsjahr wurden von KL BS und KL ZH 32 importierte Lebensmittel aus Japan geprüft. Vier Proben fielen in die Kategorie «Würzen», 13 Proben waren Gemüse und 14 Tee. Dazu kam ein getrockneter Shiitakepilz, der mit 56 Bq/kg ^{137}Cs (Trockengewicht) auch den höchsten Wert lieferte. Alle anderen Proben enthielten kein ^{137}Cs oder nur Spuren (Teeproben). Die ^{90}Sr Messungen (26 Proben) des KL-BS ergaben einen Durchschnittswert von 0.4 Bq/kg. Der Maximalwert von 1.9 Bq/kg betraf einen getrockneten Seetang. Verglichen mit den Grenzwerten von Tabelle 1 sind diese Konzentrationen sehr tief.

Von den Lebensmittelimporten aus anderen Ländern wurden 154 Proben gammaspektrometrisch untersucht. In rund 10% dieser Proben konnten ^{137}Cs Konzentrationen von mehr als 10 Bq/kg (Frischgewicht) erkannt werden. Der höchste Wert von rund 200 Bq/kg ^{137}Cs (Frischgewicht) erzielten dabei gelbe Kraterellen. In 41 dieser Proben (Pilze, Beeren, Käse) von Importen wurde auch ^{90}Sr analysiert. Diese Untersuchungen ergaben einen Mittelwert von 0.3 Bq/kg ^{90}Sr . Zwei Werte lagen über 1 (1.2 und 3.6 Bq/kg), dies bei zwei Beerenproben.

Grenzwertüberschreitungen sind bei den importierten Lebensmitteln im Berichtsjahr 2021 nicht aufgetreten.

Bewertung und Interpretation

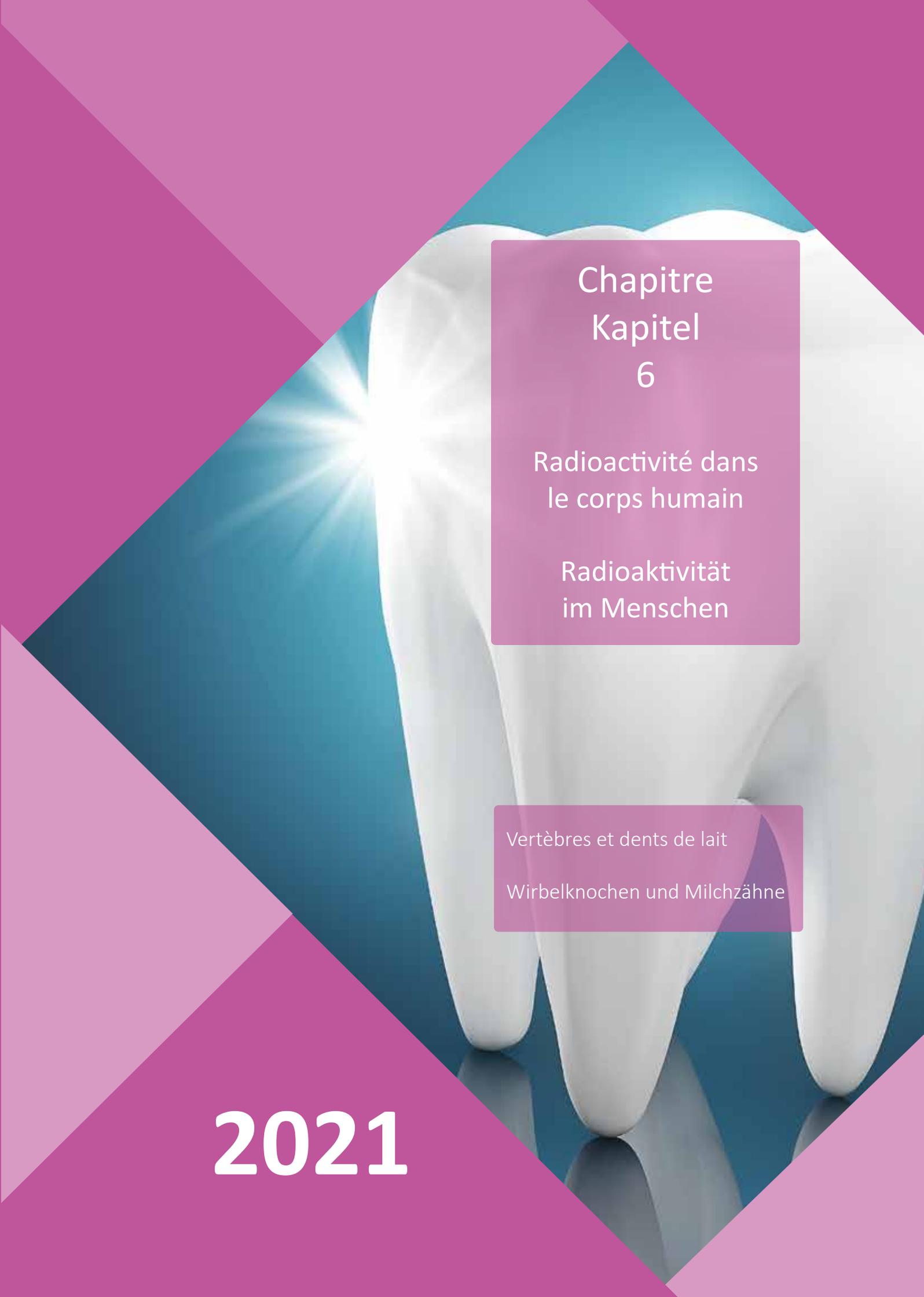
Der Grenzwert für ^{137}Cs der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg) wurde 2021 von 20 Wildschweinproben (Maximum 2'662 Bq/kg) aus der Schweiz überschritten. Bezogen auf die Gesamtzahl untersuchter Proben machen diese Grenzwertüberschreitungen mit 1% der untersuchten Tiere etwas weniger aus als in den letzten 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 2021 mit 155 Proben untersucht. Die Quote der Grenzwertüberschreitungen für ^{137}Cs lag hier bei rund 3%. Das Maximum erreichte 1'970 Bq/kg (Frischgewicht). Wie erwartet wurden auch in importierten Pilzproben etwas erhöhte ^{137}Cs Werte gemessen (Maximum 200 Bq/kg Frischgewicht).

Ebenfalls erwartet war die leicht erhöhte Konzentration von ^{137}Cs in einigen der Milchproben aus dem Tessin und den Bündner Südtälern (höchster Wert mit 9.9 Bq/l knapp unter dem Parameterwert für Trinkwasser).

Bei allen anderen Lebensmitteln aus der Schweiz und importierten Lebensmitteln 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.



Chapitre
Kapitel
6

Radioactivité dans
le corps humain

Radioaktivität
im Menschen

Vertèbres et dents de lait

Wirbelknochen und Milchzähne

2021

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, F. Barraud, 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 chaîne alimentaire. L'année 2021 a permis une reprise de la collecte des vertèbres dans les instituts de pathologie suite à une réduction d'échantillonnage due aux contaminations Covid-19. Nous avons pu analyser le ^{90}Sr dans douze échantillons, le ^{210}Po dans six échantillons et le ^{226}Ra dans quatre échantillons, répartis équitablement entre Vaud et Tessin selon le plan de mesures de l'OFSP. Six analyses ont pu être réalisées sur les dents-de-lait, dont la collecte a atteint son terme.

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 11 mBq/g Ca dans ces deux types d'échantillons. Les activités en ^{210}Po sont situées entre 4.7 et 33.6 mBq/g Ca, soit des valeurs incluses dans l'intervalle des valeurs de notre base de données des mesures effectuées à l'IRA depuis 2006 sur des prélèvements de vertèbres dans les instituts de pathologie de Lausanne et Locarno (moyenne à 28.1 mBq/g Ca). Les activités en ^{226}Ra sont situées entre 3.6 et 6.1 mBq/g Ca et sont dans la gamme des valeurs obtenues les années précédentes (moyenne à 1.99 mBq/g Ca). Il est important d'extraire un maximum de données de ces échantillons humains, par ailleurs difficiles à collecter, afin de construire des bases de données utiles en modélisation dosimétrique.

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 chaîne alimentaire et de l'homme permet d'estimer le transfert de ce radionucléide issu d'explosions d'armes nucléaires ou d'accidents radiologiques, ainsi que d'estimer la dose de radioactivité reçue par l'être humain. 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 chaîne alimentaire par ce radioélément car, de 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 chaîne 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 $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ est incorporé dans l'organisme humain par inhalation des produits de filiation du gaz ^{222}Rn présent dans l'air. L'inhalation de fumées de tabac peut par ailleurs apporter une contribution supplémentaire non négligeable. Une proportion importante de $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ 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 , le ^{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.

L'année 2021 a permis une reprise des activités de collecte d'échantillons de vertèbres dans les instituts de pathologie du Tessin et de Lausanne, malgré la pandémie du Covid-19, toujours d'actualité. Nous avons donc déterminé l'activité en ^{90}Sr , qui nécessite au moins 10 g de cendres d'os, dans six cas prélevés au Tessin et six cas prélevés dans le canton de Vaud courant 2021. Nous avons également mesuré le ^{210}Po dans six échantillons et le ^{226}Ra dans quatre échantillons. Dans ce rapport, nous rapportons également la mesure en ^{90}Sr des dents de lait d'une personne née en 1973 et ayant vécu son enfance dans le canton de Neuchâtel.

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.

Tableau 1:

^{90}Sr , ^{210}Po et ^{226}Ra (mBq/g Ca) dans les vertèbres de personnes décédées en Suisse en 2021. Incertitudes pour u (95%).

| Lieu décès | ^{90}Sr (mBq/g Ca) | ^{210}Po (mBq/g Ca) | ^{226}Ra (mBq/g Ca) |
|------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Tessin | 10.7 ± 2.7 | 25.2 ± 2.0 | |
| | 4.8 ± 1.4 | | |
| | 4.5 ± 1.8 | | |
| | 7.2 ± 1.9 | 6.6 ± 0.6 | 0.8 ± 0.4 |
| | 6.3 ± 1.8 | | 0.5 ± 0.2 |
| | | 33.6 ± 2.5 | |
| Vaud | 2.7 ± 0.7 | 4.7 ± 0.4 | |
| | 4.6 ± 1.3 | 7.9 ± 0.7 | 0.5 ± 0.2 |
| | 4.4 ± 1.2 | | |
| | 6.9 ± 1.8 | | |
| | 9.0 ± 2.3 | | |
| | 6.6 ± 1.8 | 20.2 ± 1.6 | 0.4 ± 0.2 |
| | 6.3 ± 2.2 (n=12) | | |

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 décroître avec une période biologique d'environ 13 ans, depuis la fin des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère des années soixante [5, 6]. En 2021, l'activité moyenne en ^{90}Sr des vertèbres humaines en Suisse était de 6.3 ± 2.2 mBq/g 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 2006 nous analysons régulièrement l'activité en ^{210}Po des vertèbres humaines. Notre base de données contient actuellement 84 cas, pour une moyenne à 28.1 mBq/g Ca et un écart-type à 21.4 mBq/g Ca. La valeur minimale est à 5.95 mBq/g Ca et la valeur maximale à 101.6 mBq/g Ca. L'incorporation de $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ est variable selon les personnes et dépend de plusieurs facteurs, dont les habitudes en matière de tabagisme 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 ^{210}Pb et ^{210}Po sont à l'équilibre radioactif dans ce compartiment du modèle biocinétique du polonium. Cette donnée nous sera d'importance pour la modélisation de l'incorporation de ^{210}Pb et ^{210}Po

Tableau 2:

^{90}Sr (mBq/g Ca) dans les dents de lait d'enfants nés en Suisse en 1973 et entre 2005 et 2014, mesurées en 2021. Les dents de lait sont groupées pour former un échantillon d'au moins 5g de cendre après calcination (environ 10 dents). Incertitudes pour u (95%).

| Année | Naissance | |
|--------------------------|-----------|--------------------------------|
| | Lieu | ^{90}Sr (mBq/g Ca) |
| 1973 ^{a)} | Neuchâtel | 67.8 ± 18.5 |
| 2006- 2008 ^{b)} | Vaud | 7.5 ± 4.0 |
| 2008- 2009 ^{b)} | Zürich | 8.7 ± 2.6 |
| 2011- 2014 ^{b)} | Zürich | 8.9 ± 3.3 |
| 2005- 2008 ^{b)} | Zürich | 8.2 ± 3.5 |
| 2005- 2008 ^{b)} | Vaud | 7.2 ± 3.6 |

^{a)} Dents extraites pendant l'enfance d'une seule personne, née en 1973.

^{b)} Mélange de dents extraites pour plusieurs enfants.

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 à sa fin, car il est presque impossible d'obtenir des tailles d'échantillons suffisantes pour des analyses au niveau d'activité actuelle ($< 12 \text{ mBq/g Ca}$). 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 . 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]. La mesure des dents de lait de la personne née en 1973 est très importante car nous n'avons pas de valeur de référence pour cette date, le programme de mesure des dents de lait ayant été arrêté pour les dates de naissances comprises entre 1970 et 1976, puis repris après l'accident de Tchernobyl. La valeur obtenue de 67.8 mBq/g 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 par l'exercice d'activités horlogères utilisant de la peinture au ^{226}Ra , l'OFSP a initié un programme d'assainissement des bâtiments contenant du ^{226}Ra (Plan d'action Radium 2015-2023). Il est apparu important alors de pouvoir déterminer une moyenne d'activité en ^{226}Ra dans les os humains de la population suisse non exposée 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 . Notre base de données contient actuellement 41 cas, pour une moyenne à $1.99 \pm 1.28 \text{ mBq/g Ca}$. La valeur minimale est à 0.7 mBq/g Ca et la valeur maximale à 6.1

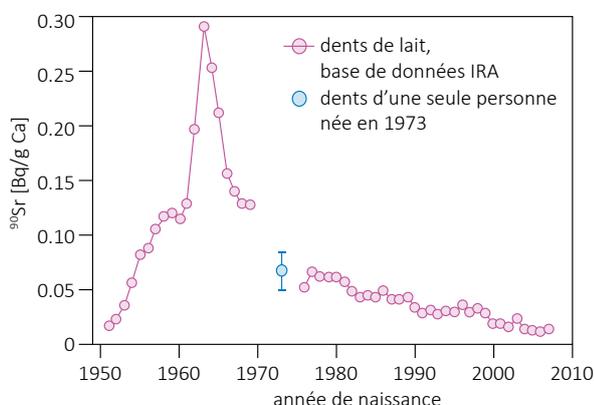


Figure 1 : Activité en ^{90}Sr des dents de lait pour des enfants nés entre 1951 et 2007 (base de données IRA, points rouges) et pour une personne née en 1973 (cercle bleu).

mBq/g Ca . L'histogramme de la distribution des valeurs (Figure 2) ne montre pas de singularité, avec plus de 80% des valeurs distribuées entre 0.7 et 3.0 mBq/g Ca . 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 élément alcalino-terreux similaire au calcium, probablement principalement par la nourriture (boisson comprise). En 2021, l'activité d'un des échantillons du Tessin a dépassé 5 mBq/g Ca . Toutefois, l'incertitude associée à cette mesure est supérieure à 45% et ne nous permet pas de conclure avec certitude à une exposition au ^{226}Ra autre que par une source naturelle.

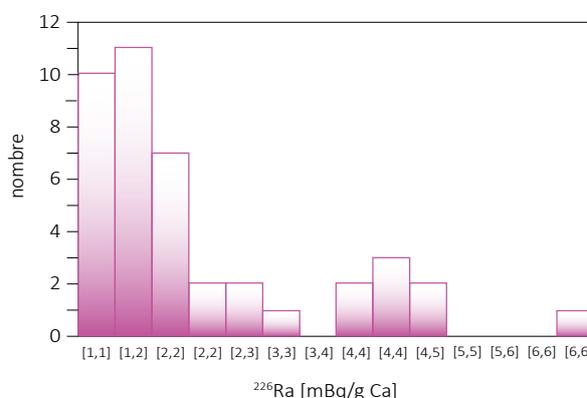


Figure 2 : Histogramme des valeurs en ^{226}Ra (mBq/g Ca) pour 41 analyses réalisées dans les vertèbres et os cortical prélevés en Suisse entre 2014 et 2021.

Conclusions

Les mesures de radioactivité dans les vertèbres humaines en 2021 n'ont pas montré d'exposition à des valeurs d'activité qui pourraient s'avérer problématiques en terme 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 la 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 $^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ra}$ 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.

Chapitre
Kapitel
7

Mesures de
nucléides spéciaux

Messung von
Spezialnukliden

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

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

2021

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), Kehrlichtverbrennungsanlagen (Bern, Lausanne und Zürich), des Paul Scherrer Instituts und an verschiedenen Standorten der Stadt Basel wurden 2021 weitergeführt. Als Referenzwert diente hierbei der ^{14}C -Gehalt von Laubbäumen an drei Standorten ohne lokale ^{14}C -Quellen und Verdünnungen, an denen im Jahresverlauf je drei Messungen (im Juni, August und Oktober 2021) durchgeführt wurden. Aus diesen neun Messungen resultierte für 2021 der $\Delta^{14}\text{C}$ -Referenzwert $-4 \pm 3\%$.

Die 83 auf ^{14}C untersuchten Standorte unterscheiden sich um -19% (E-10, Basel Kronenplatz) bis maximal $+61\%$ (Kernkraftwerk Leibstadt, Ried) von diesem Referenzwert. In der Stadt Basel lag der Netto-Höchstwert bei 0% (E-6, Rosentalanlage), alle anderen Standorte in Basel wiesen Messwerte $<0\%$ auf. Selbst die Maximalwerte entsprechen einer zusätzlichen Strahlendosis für die Bevölkerung von nicht mehr als $1 \mu\text{Sv}$ ($1 \mu\text{Sv} = 10^{-6}$ Sievert) in einem Jahr. Im Vergleich zur natürlichen Strahlenbelastung von ca. $4'500 \mu\text{Sv/a}$ fallen die gemessenen geringfügigen Erhöhungen im Berichtsjahr nicht ins Gewicht.

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

Kohlenstoff-14 (^{14}C)

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

Referenzwert

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

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

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

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

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

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

Tabelle 1:

Messwerte 2021 und Koordinaten der Referenzstationen für Laubmessungen

| Ort | Labor | $\Delta^{14}\text{C}$ [‰] | | | Koordinaten | [m.ü.M.] | Baumart/Standort |
|------------|-------|---------------------------|------|------|-------------------|----------|-----------------------|
| | | Juni | Aug. | Okt. | | | |
| Taanwald | KUP | -6 | -1 | -7 | 601'320 / 186'150 | 938 | Rotbuchen im Wald |
| | LARA | -2 | -4 | -6 | | | |
| Belpberg | KUP | -1 | -1 | -2 | 606'096 / 190'600 | 825 | Rotbuchen auf Krete |
| | LARA | 0 | -3 | -4 | | | |
| Ballenbühl | KUP | -4 | -3 | -8 | 612'550 / 192'800 | 852 | 2 Linden, freistehend |
| | LARA | -2 | -2 | -10 | | | |

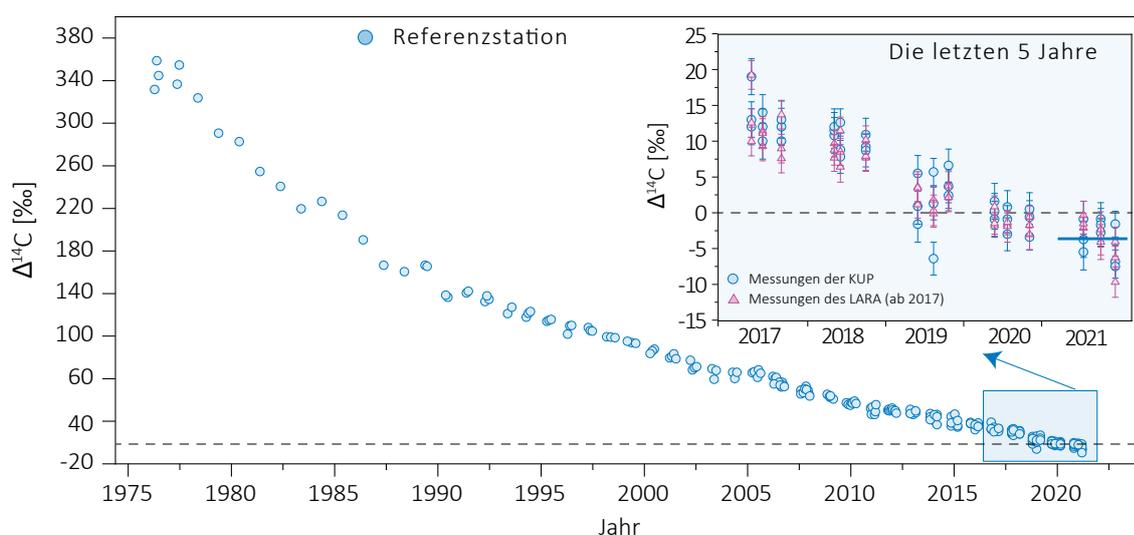
Sinnvoll ist auch ein Vergleich mit ^{14}C -Werten von Laub, welches von Bäumen ohne lokale ^{14}C -Quellen oder Verdünnungen stammt. Zu diesem Zweck wurden an drei ländlichen Standorten Buchen- bzw. Lindenblätter gesammelt. Ihr ^{14}C -Gehalt wurde bestimmt und nach (2) mit $^{14}\text{A}_0$ verglichen (Figur 1). Aus den resultierenden $\Delta^{14}\text{C}$ -Werten wurde für die Zeit der Hauptprobenahmen 2021 ein Referenzwert für Laub in ungestörter Umgebung definiert. Als Basis hierzu dienten die im Juni, August und Oktober gesammelten Blätter.

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref, 2021}} = -4 \pm 3 [\text{‰}] \quad (3)$$

Die Differenz

$$\text{Netto } \Delta^{14}\text{C} = \Delta^{14}\text{C}_{\text{Probe}} - \Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref, 2021}} \quad (4)$$

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



Figur 1:

$\Delta^{14}\text{C}$ -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 Blattkohle¹
- *Methode B:* ^{14}C -Bestimmung im ganzen Blatt

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

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

Der ^{14}C -Gehalt von Blättern der Referenzstationen ist im Jahr 2021 gegenüber dem Vorjahr erneut abgefallen. Mit $-4 \pm 3\%$ (gerundeter Mittelwert aller in Tabelle 1 dargestellten Messergebnisse) liegt der Referenzwert um 3% unter dem Wert von 2020.

^{14}C im Umfeld der Schweizer Kernkraftwerke

Gemäss Jahresrückblick des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI [1] wurden die Schweizer Kernkraftwerke im Jahr 2021 sicher betrieben. Insgesamt traten 25 meldepflichtige Vorkommnisse auf, was unter dem Durchschnitt 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

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

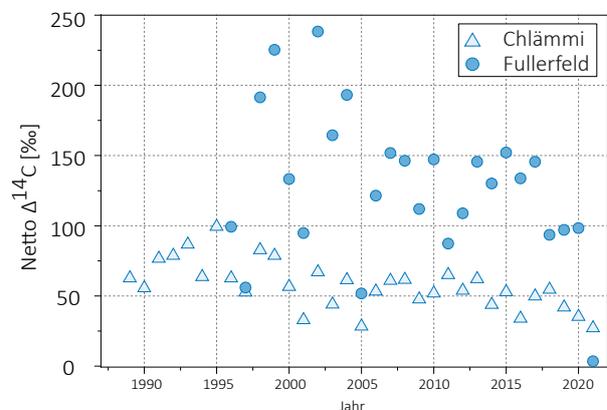
von Radiokohlenstoff mit AMS (LARA) am Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie der Universität Bern. Im Allgemeinen wurden ganze Blätter analysiert (Methode B).

Kernkraftwerk Leibstadt

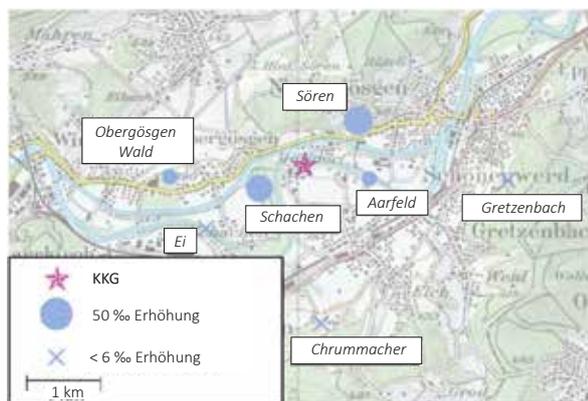
Im Umfeld des Kernkraftwerks Leibstadt (KKL) wurden im Jahr 2021 zwei Probenahmen durchgeführt: die erste am 22. Juni 2021 vor der Jahresrevision, die ursprünglich vom 24. Mai bis 26. Oktober 2021 terminiert war und schliesslich bis Anfang Dezember 2021 dauerte, und eine zweite am 15. September 2021 während 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 er-



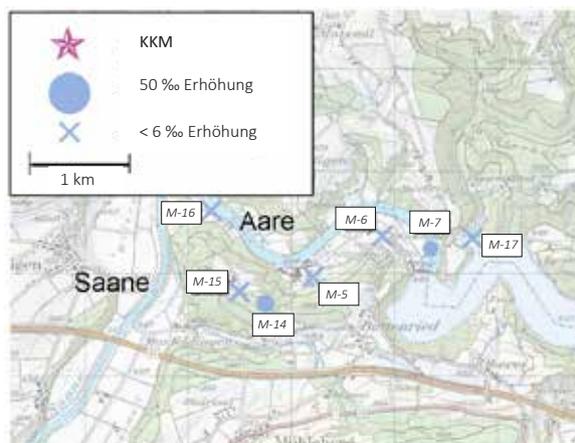
Figur 2: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Leibstadt (KKL) im Jahr 2021. Revisionsabschaltung: 24.06.2021 bis 05.12.2021. Probenahme: 22.06.2021 (KUP) bzw. 15.09.2021 (LARA). Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



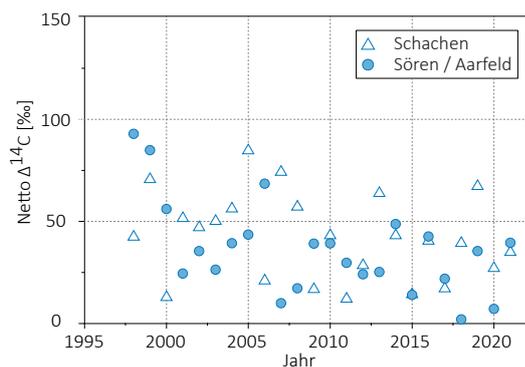
Figur 3: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte nordöstlich (●) und südwestlich (Δ) des Kernkraftwerkes Leibstadt. Der Standort Fullerfeld wird seit 1996, derjenige von Chlämmi seit 1989 beprobt (Standorte: siehe Figur 2). Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.



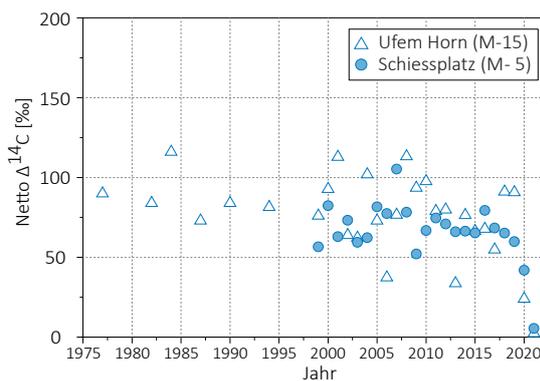
Figur 4: Örtliche Verteilung der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Druckwasserreaktors Gösgen (KKG). Revisionsabschaltung: 22.05.2021 bis 24.06.2021. Probenahme: 05.07.2021. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 6: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Mühleberg (KKM) im Jahr 2020. Probenahme: 14.05.2020. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 5: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (●) und westlich (Δ) des Kernkraftwerkes Gösgen. Standorte: siehe Figur 4. Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA



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

gab sich in knapp 2 km Distanz vom KKL in nordöstlicher Richtung am Standort Ried (Figur 2). In südwestlicher Richtung wies der Standort Chlämmi die höchsten Werte auf.

In der folgenden Abbildung sind die Mittelwerte der Messergebnisse beider Probenahmen dargestellt. Die beiden Probenahmen führten in den meisten Fällen zu annähernd identischen Messwerten. Lediglich am Standort Fullerfeld wurde von der KUP an den vor der Revision gesammelten Blättern mit 38‰ ein signifikant höherer Wert ermittelt als der vom LARA ermittelte Wert, welcher bei 4‰ lag.

Figur 3 zeigt die gemessenen Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte der Standorte Fullerfeld und Chlämmi seit Messbeginn. Es sind dies die beiden Standorte mit den traditionell

höchsten Werten in der jeweiligen Windrichtung. 2021 lag der höchste Messwert nordöstlich des KKL bei 61‰ (Standort Ried), am Standort Fullerfeld wurde 2021 nur eine geringe Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen festgestellt, was darauf zurückzuführen ist, dass das KKL während des gesamten Sommers abgeschaltet war. In südwestlicher Richtung wurde 2021 am Standort Chlämmi mit 32‰ der höchste Wert gemessen. Der grösste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert seit Messbeginn beträgt 238‰ und stammt vom Standort Fullerfeld (2002).

Kernkraftwerk Gösgen

In Figur 4 sind die Resultate der am 05. Juli 2021 gesammelten Blattproben in der Umgebung des Kernkraftwerkes Gösgen (KKG) dargestellt. Der höchste ^{14}C -Messwert westlich vom KKG resultierte mit einer Erhöhung von

39‰ am Standort Schachen, in östlicher Richtung mit 34‰ am Standort Sören.

In Figur 5 sind die z. T. seit Messbeginn ermittelten höchsten Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte aufgeführt. Werte $>100\text{‰}$ 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 2021 fortgesetzt. Der ^{14}C -Gehalt der beprobten Bäume nähert sich rasch dem Gehalt unbelasteter Standorte an: die Erhöhung gegenüber den Referenzstationen lag im Jahr 2021 nur noch im ein- bzw. tiefen zweistelligen Promille-Bereich.

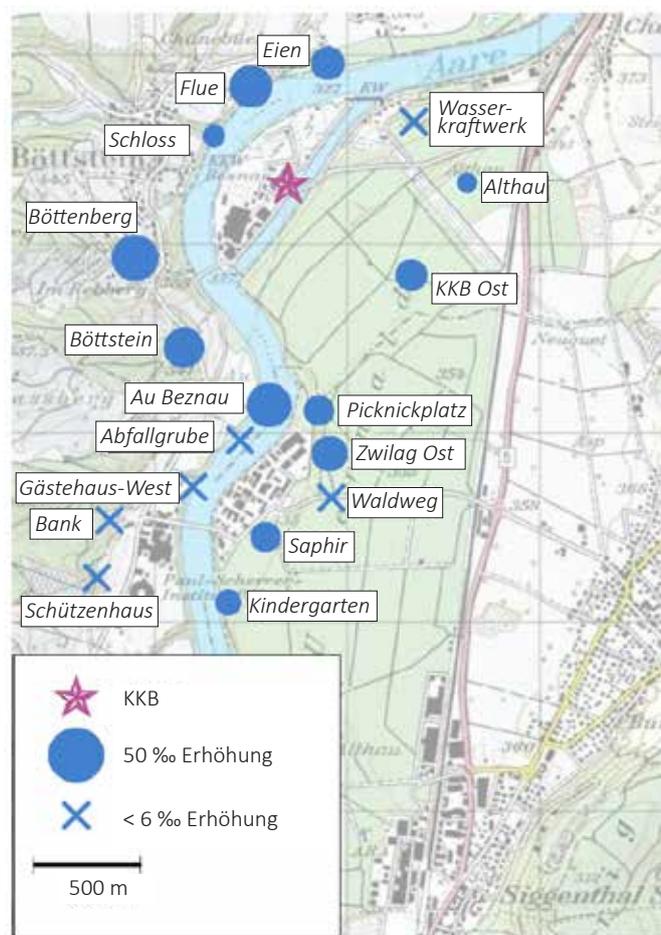
In Figur 6 sind die Ergebnisse der Probenahme dargestellt. Die grösste Erhöhung wurde mit 14‰ am Standort M-14 (Runtigenrain) gemessen. Sämtliche im Jahr 2021 gemessenen Proben liegen deutlich unter den seit Messbeginn im Jahr 1977 registrierten Höchstwerten. Der mit 116‰ höchste Wert stammt aus dem Jahr 1984.

In Figur 7 sind die seit Messbeginn jährlich gemessenen höchsten Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte aufgeführt. Die Messwerte aus dem Jahr 2021 liegen deutlich unter den Werten der Vorjahre.

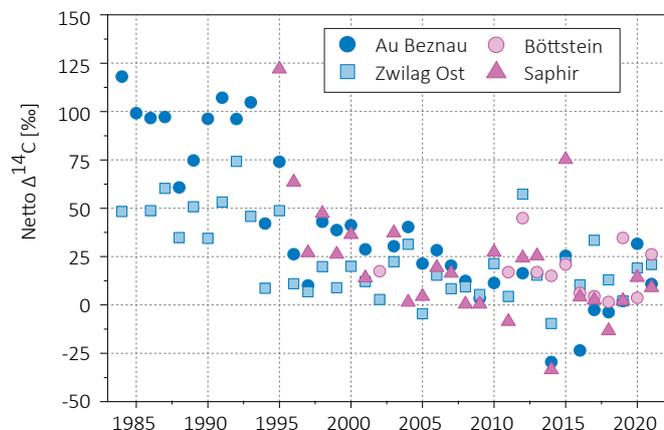
Paul Scherrer Institut, Zentrales Zwischenlager Würenlingen, Kernkraftwerk Beznau

Auch im Jahr 2021 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 2021 etwas unter den Werten des Vorjahrs. Insbesondere wiesen mehrere Standorte in der Nähe des PSI keine signifikanten Erhöhungen gegenüber unbelasteten Standorten auf.

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



Figur 8: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Paul Scherrer Instituts (PSI), des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen (ZWILAG) und des Kernkraftwerkes Beznau (KKB) im Jahr 2021. Revisionsabschaltung KKB I: 11.05.2021 bis 24.05.2021, KKB II: 06.08.2021 bis 12.09.2021. Probenahme: 15.09.2021. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 9: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (■▲) und westlich (●●) des PSI/ZWILAG sowie des Kernkraftwerkes Beznau seit Messbeginn. Standorte: siehe Figur 8. Messungen bis 2016: KUP (Standort Böttstein) und PSI. Messungen 2017 bis 2019: LARA (Standort Böttstein) und PSI. Messungen ab 2020: LARA.

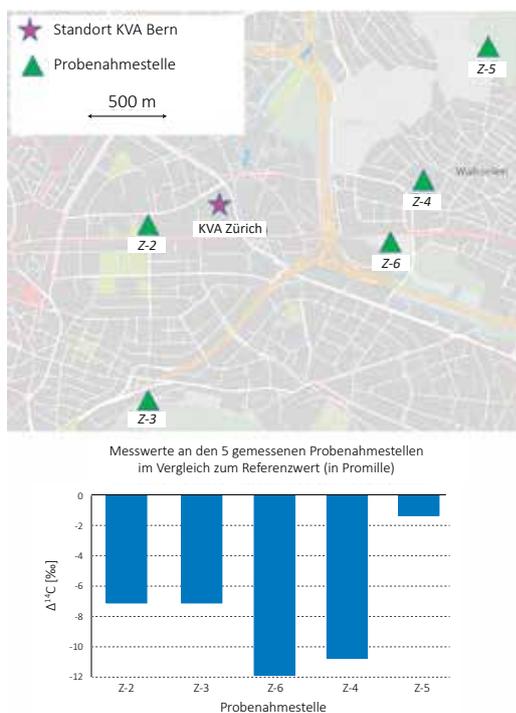
Kehrichtverbrennungsanlagen

KVA Bern

In Blättern von Bäumen, die am 26. August 2021 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 4‰. 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

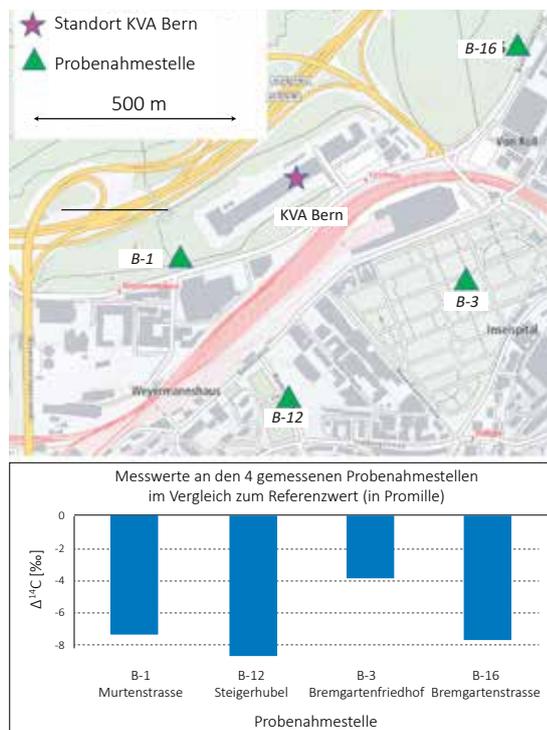
Am 15. September 2021 wurden fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Lausanne beprobt. Es wurden keine Erhöhungen der ^{14}C Konzentration festgestellt. An der Probenahmestelle Libellules (L-128) wurden 0‰ gemessen. Dies bedeutet, dass an diesem Ort eine allfällige Erhöhung der ^{14}C -Konzentration durch den Suess-Effekt exakt wieder aufgehoben wird. In Figur 10b sind oben die fünf Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen dargestellt.



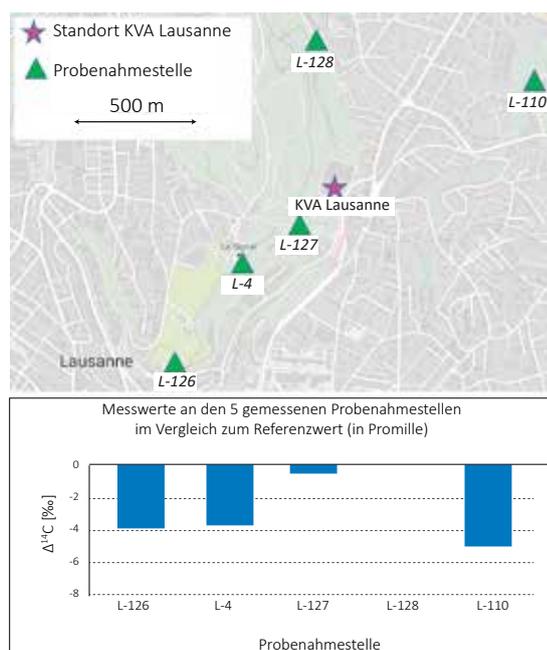
Figur 10c: Probenahmestellen und $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte bei der KVA Zürich. Messungen: KUP.

KVA Zürich Hagenholz

In Blättern von Bäumen, die am 05. September 2021 an fünf Probenahmestellen im Umfeld der KVA Zürich Hagenholz gesammelt wurden, konnte keine erhöhte ^{14}C Konzentration festgestellt werden. In Figur 10c sind oben die fünf Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen dargestellt.



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



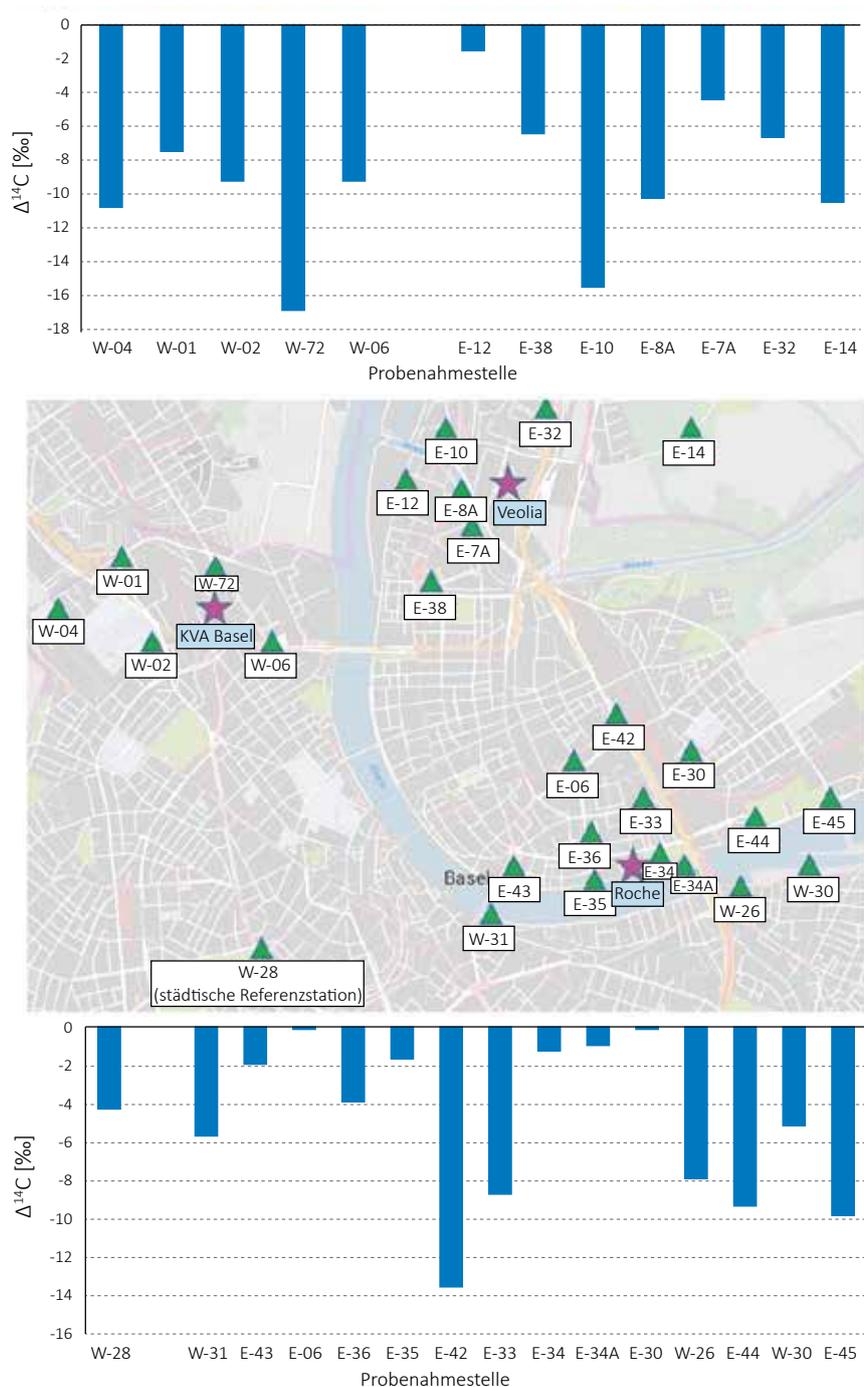
Figur 10b: Probenahmestellen und $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte bei der KVA Lausanne. Messungen: KUP.

Messungen in der Region Basel-Stadt

Im Jahr 2021 wurden in Basel zwei Laubprobenahmen durchgeführt. Bei der ersten Probenahme am 1. 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 prak-

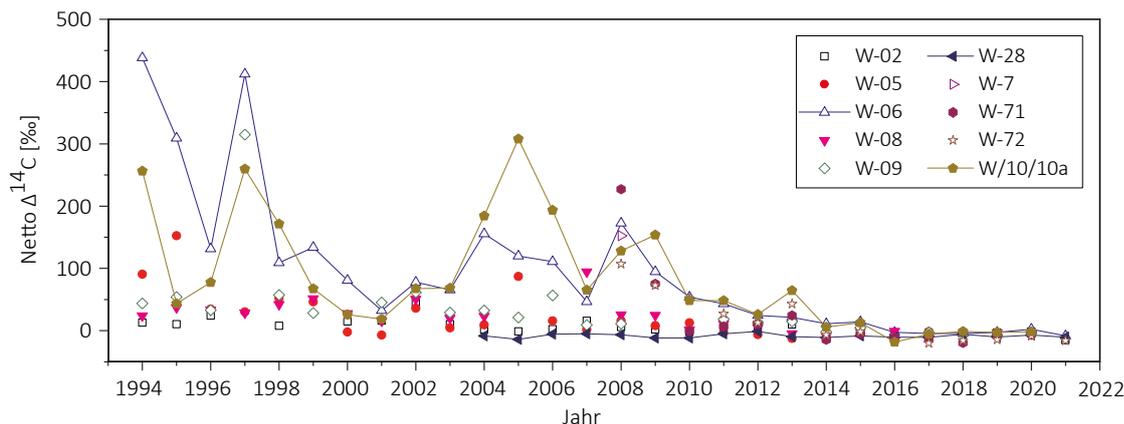
tisch allen Standorten wurde aufgrund des weiter oben erwähnten Suess-Effekts eine Verdünnung der $^{14}\text{CO}_2$ -Konzentration relativ zu den unbelasteten Referenzstationen festgestellt, häufig um 10‰ oder mehr (Figur 11). Auch in der Nähe zur Grenze nach Frankreich nordwestlich der KVA Basel sowie im deutschen Grenzgebiet östlich des Veolia-Verbrennungssofens wurden keine Erhöhungen registriert.

Im oberen Teil von Figur 11 sind die Messergebnisse von den Probenahmestellen im Norden der Stadt Basel, im

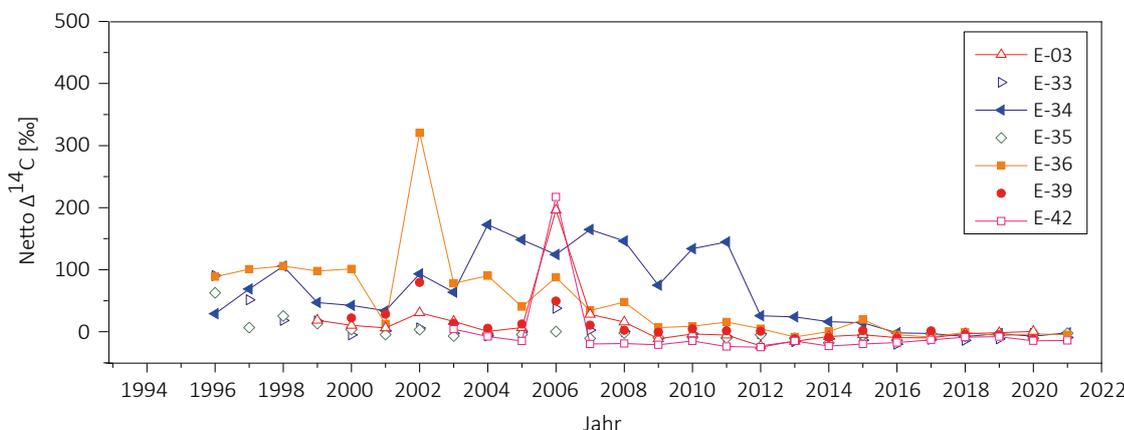


Figur 11 :

Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte für Blattproben aus dem Raum Basel. Die Balkendiagramme stellen die Reduzierung der Messwerte gegenüber den unbelasteten ländlichen Referenzstationen dar. An den Probenahmestellen E-06 und E-30 wurden 0‰ gemessen, d. h. eine allfällige Erhöhung der ^{14}C -Konzentration wird durch den Suess-Effekt exakt wieder aufgehoben.



Figur 12:
Zeitreihe der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte westlich des Rheins (östlich der KVA). Am Standort W-28 wird die von ^{14}C unbelastete Stadtluft gemessen. Liegen von einem Standort mehrere Messwerte vor, so ist der höchste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert eingetragen.



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

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.

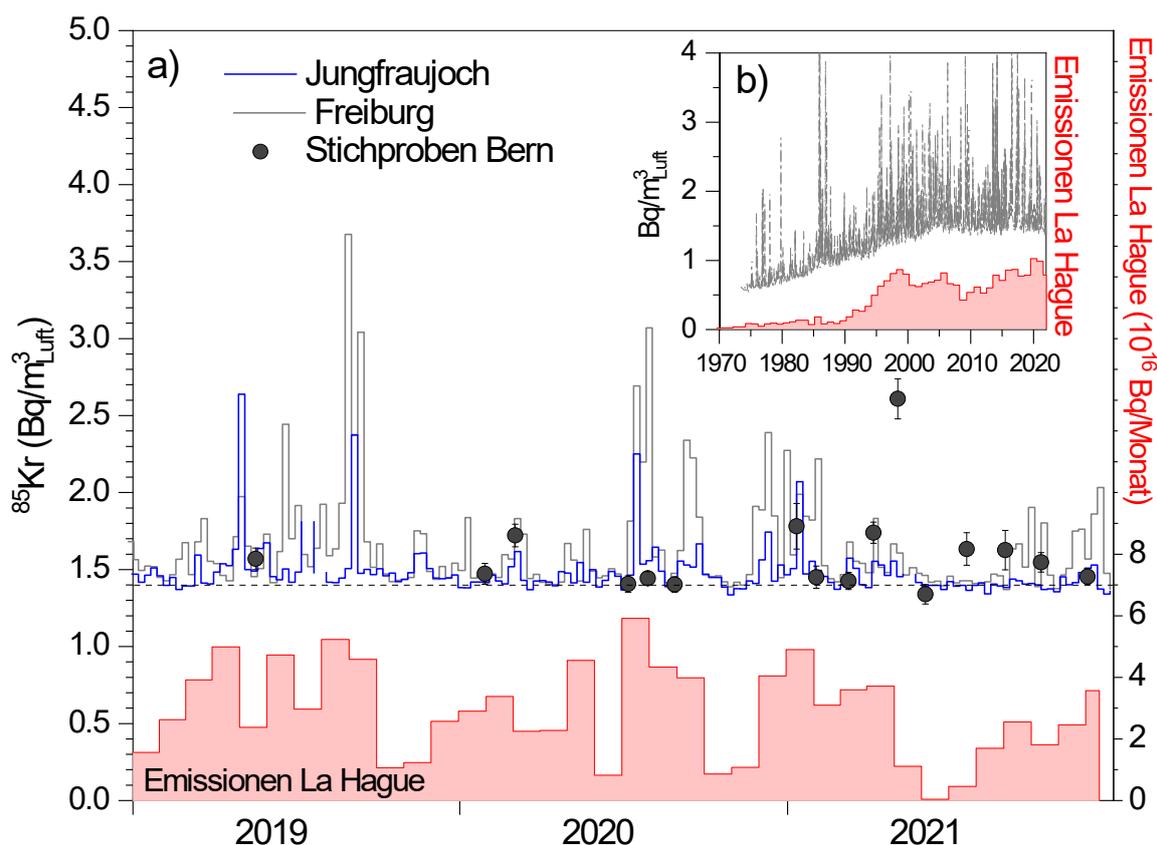
Die Figuren 12 und 13 zeigen die Messergebnisse seit Messbeginn an ausgewählten Standorten. Die Netto-Messwerte haben sich in den letzten Jahren auf einem sehr niedrigen Niveau stabilisiert.

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 ^{85}Kr und ^{37}Ar werden in der Atmosphäre auf natürliche Weise nur in sehr geringen Mengen produziert. ^{85}Kr , freigesetzt bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstäben, konnte sich wegen der vergleichsweise langen Halbwertszeit von 10,74 Jahren und den lange Zeit zunehmenden Emissionsraten über die letzten 40 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. Beide Isotope verursachen keine 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 Krypton-85 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 $9 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$ oder einer spezifischen Aktivitätskonzentration von $\sim 0.2 \mu\text{Bq/m}^3_{\text{Luft}}$. Im Gegensatz dazu stammt das derzeitige ^{85}Kr in der Atmosphäre hauptsächlich aus der Wiederaufarbeitung von Brennstäben und wird lokal und zeitlich gepulst freigesetzt. Zurzeit ist die Aufbereitungsanlage in La Hague (F) die weltweit grösste Emissionsquelle (Figur 14a). Durch radioaktiven Zerfall nimmt das atmosphärische Inventar jährlich um 6.2% ab. Diese Reduktionsrate wurde lange Zeit von den globalen Freisetzungsraten von ^{85}Kr übertroffen, was zu einem Anstieg der atmosphärischen Basisaktivitätskonzentration führte (Figur 14b).

In der letzten Dekade ist eine Stabilisierung bei einer Konzentration von $1.4\text{--}1.5 \text{ Bq/m}^3_{\text{Luft}}$ in Mitteleuropa zu beobachten [2]. In der Südhemisphäre liegt die Basisaktivität wegen praktisch fehlender Emittenten um ca. 15% tiefer [3]. ^{85}Kr wird an kumulativen Wochenproben gemessen, die auf dem Jungfraujoch (JFJ) gesammelt und im Edelgaslabor des Bfs in Freiburg analysiert werden [2] (Fig. 14). Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Werte von Freiburg im Breisgau (D) dargestellt. Die Zeitperioden von gehäuften Aktivitätsspitzen, die den Basiswert bei der Station Freiburg um bis zu einem Faktor 3 übersteigen, stimmen bei beiden Stationen überein mit Zeiten erhöhter Emissionsraten von La Hague [4]. Wegen der erhöhten Lage der Station JFJ wird diese Station aber weniger von bodennahen Emissionen beeinflusst und weist Aktivitätsspitzen geringerer Amplitude auf.

Im Jahr 2021 zeigen die Wiederaufbereitungsaktivitäten und Emissionen von La Hague hohe Werte in den Wintermonaten und ein deutliches Minimum im Sommer, als die Emissionen um mehr als eine Grössenordnung abnehmen

(Fig. 14a). Dieses Muster spiegelt sich in den Messwerten von JFJ und Freiburg i. B. wider. Im Sommer 2021 konvergierten die Werte an beiden Stationen in Richtung der aktuellen Basisaktivitätskonzentration der nördlichen Hemisphäre von $\sim 1.4 \text{ Bq/m}^3_{\text{Luft}}$. Die Daten deuten sogar auf einen leicht abnehmenden Trend der ^{85}Kr -Basislinie hin, der bereits 2020 beobachtet wurde (Fig. 14b).

Der Anstieg der Emissionen Ende 2021 ist in Freiburg i.B. viel deutlicher zu erkennen als in JFJ, wo die Spitzenwerte deutlich gedämpft sind. Dies steht im Gegensatz zu der Situation 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 in wenigen 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 weder in Freiburg noch auf dem JFJ 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. 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 ($8 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq m}^{-3} \text{ Jahr}$ [5]) und ist damit gering in Relation zur Strahlenbelastung von etwa 3.3 mSv verursacht durch natürlich vorkommendes Radon.

Argon-37 (^{37}Ar)

^{37}Ar wird in der Atmosphäre durch die Spallationsreaktion $^{40}\text{Ar}(n,4n)^{37}\text{Ar}$ produziert. Theoretische Abschätzungen der durch kosmische Strahlung erzeugten troposphärischen Gleichgewichtsaktivität liegen bei ca. $0.5 - 2 \text{ mBq/m}^3_{\text{Luft}}$, in guter Übereinstimmung mit den über die letzten 7 Jahre am häufigsten gemessenen 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. Februar 2022
- [2] Bollhöfer, A., Schlosser, C., Schmid, S., Konrad, M., Purtschert, R. and Kraiss, 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] Kersting, A., Schlosser, C., Bollhöfer, A., Suckow, A. (2020) Evaluating 5 decades of atmospheric ^{85}Kr measurements in the southern hemisphere to derive an input function for dating water and ice with implications for interhemispheric circulation and the global ^{85}Kr emission inventory. *Journal of Environmental Radioactivity* 225, 106451. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106451>
- [4] Data provided by Orano, La Hague
- [5] 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. Lors de l'épisode de tempête de sable saharien du 06 et du 24 février 2021, les mesures de Pu et Am sur les filtres à air collectés durant le mois de février n'ont pas révélé de contamination autres que celles provenant des retombées des essais nucléaires des années soixante. 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 de particules de sédiments contenant Pu et Am sur les feuilles. 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 l'Aar à Däniken (2.0 ± 0.8 mBq/kg ms). L'activité en Pu des eaux de rivières prélevées en aval des centrales nucléaires ne dépasse pas 4.7 mBq/m³, soit dans l'ensemble des valeurs très proches de celles mesurées les années précédentes. L'analyse détaillée des données en Pu et Am disponibles pour les filtres à air entre 2013 et 2021 montre que l'activité de l'air (en nBq/m³) est proportionnelle à la masse de particules de sol présentes sur les filtres (en µg/m³), 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, malgré la tempête de sable saharien de février. En transformant l'activité des filtres à air de mBq/µg cendre en Bq/kg de masse sèche, on constate que l'activité (0.178 Bq/kg) est très proche de celle de sols mesurés en plaine en Suisse ($0.108 - 0.259$ 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 deux radioéléments artificiels dont l'origine dans l'environnement remonte aux essais d'armes nucléaires en atmosphère durant les années soixante, à différents accidents nucléaires (Windscale, Tchernobyl, Mayak, Fukushima) ainsi qu'à des émissions (notamment dans l'eau) autorisées. Ces deux radioéléments représentent un risque radiologique s'ils sont incorporés dans l'organisme via l'inhalation ou à travers la chaîne alimentaire. 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, qui sont des émetteurs de particules alpha, est très sensible (par ex: quelques mBq/kg dans le sol). On possède ainsi un bon indicateur de contamination possible de l'environnement par l'industrie nucléaire.

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). Sur mandat de l'OFSP, l'IRA 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 entraîné du Pu encore présent dans la stratosphère dû aux essais nucléaires jusque dans les couches basses de l'atmosphère [1]. L'intégration des dépôts de Pu et Am dans le sol, dont l'origine sont les essais nucléaires, donne des rapports isotopiques de $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.028 ± 0.003 et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.41 ± 0.05 pour l'année 2021. 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 liquides radioactifs. 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. L'année 2021 a été marquée par un événement de forte tempête de sable du Sahara, observable jusqu'en Suisse en février. On focalisera donc l'analyse sur de possibles répercussions de l'entraînement de sable contaminé par les essais nucléaires français de Reggane (Algérie) dans nos mesures de filtres à air.

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 [2]

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 2021 (incertitudes à 95%).

| Lieu | $^{239+240}\text{Pu}$ Bq/kg MS | ^{238}Pu Bq/kg MS | ^{241}Am Bq/kg MS | $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ | $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|
| Arenenberg | 0.174 ± 0.010 | 0.0044 ± 0.0013 | 0.072 ± 0.006 | 0.411 ± 0.043 | 0.025 ± 0.008 |
| Bezau | 0.184 ± 0.018 | 0.0056 ± 0.0025 | 0.077 ± 0.006 | 0.419 ± 0.052 | 0.030 ± 0.014 |
| | 0.174 ± 0.014 | 0.0043 ± 0.0018 | 0.069 ± 0.006 | 0.392 ± 0.048 | 0.024 ± 0.011 |
| Cadenazzo | 0.120 ± 0.009 | 0.0039 ± 0.0014 | 0.052 ± 0.005 | 0.437 ± 0.051 | 0.033 ± 0.012 |
| Däniken | 0.233 ± 0.023 | 0.0068 ± 0.0029 | 0.106 ± 0.007 | 0.454 ± 0.055 | 0.029 ± 0.013 |
| | 0.259 ± 0.017 | 0.0072 ± 0.0020 | 0.115 ± 0.012 | 0.444 ± 0.053 | 0.028 ± 0.008 |
| Güttingen | 0.155 ± 0.009 | 0.0039 ± 0.0012 | 0.058 ± 0.005 | 0.375 ± 0.041 | 0.025 ± 0.008 |
| Leibstadt | 0.201 ± 0.017 | < LD | 0.078 ± 0.007 | 0.387 ± 0.047 | - |
| | 0.197 ± 0.014 | 0.0053 ± 0.0018 | 0.079 ± 0.010 | 0.404 ± 0.059 | 0.027 ± 0.009 |
| Meyrin | 0.108 ± 0.011 | < LD | 0.039 ± 0.006 | 0.362 ± 0.063 | - |
| Mühleberg | 0.150 ± 0.016 | < LD | 0.060 ± 0.006 | 0.402 ± 0.060 | - |
| | 0.150 ± 0.012 | 0.0038 ± 0.0017 | 0.051 ± 0.007 | 0.342 ± 0.052 | 0.026 ± 0.011 |
| Posieux | 0.194 ± 0.015 | 0.0042 ± 0.0018 | 0.080 ± 0.008 | 0.394 ± 0.057 | 0.022 ± 0.009 |
| | 0.204 ± 0.022 | 0.0065 ± 0.0031 | 0.068 ± 0.010 | 0.352 ± 0.047 | 0.032 ± 0.016 |
| Stabio | 0.567 ± 0.026 | 0.0179 ± 0.0029 | 0.323 ± 0.015 | 0.569 ± 0.037 | 0.032 ± 0.005 |
| Villigen-PSI | 0.142 ± 0.015 | < LD | 0.049 ± 0.006 | 0.347 ± 0.054 | - |
| | 0.140 ± 0.012 | 0.0038 ± 0.0016 | 0.055 ± 0.005 | 0.395 ± 0.051 | 0.027 ± 0.012 |
| Würenlingen | 0.160 ± 0.010 | 0.0050 ± 0.0015 | 0.073 ± 0.006 | 0.460 ± 0.049 | 0.032 ± 0.010 |
| moyenne | | | | 0.41 ± 0.05 (n=18) | 0.028 ± 0.003 (n=14) |

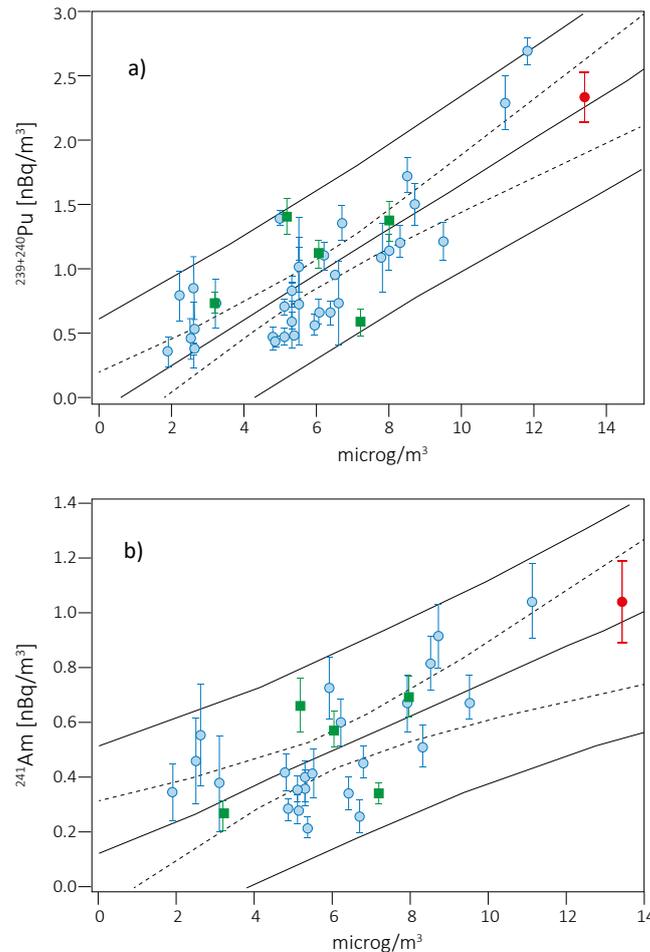


Figure 1 :

Activité en **a)** $^{239+240}\text{Pu}$ et **b)** ^{241}Am , des filtres à air (nBq/m^3) en fonction de la quantité de cendres sur les filtres, exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pour les années 2013-2021 et différentes stations de prélèvement du plateau suisse. En rouge, la valeur d'activité déterminée sur le mélange des filtres à air de Cadenazzo, du CERN, de Güttingen, de Klingnau, de Liebfeld et de Posieux durant les tempêtes de sable du Sahara, du 01.02.2021 au 24.02.2021. En vert, les valeurs obtenues en 2021.

Résultats et discussion

Le Tableau 1 présente les résultats obtenus dans la mesure des sols échantillonnés sur l'ensemble du territoire suisse, avec une focalisation sur les sites aux environs des centrales nucléaires suisses. Les activités sont très proches de celles obtenues les années précédentes, qui sont en diminution constante ces vingt dernières années, et ne montrent pas de marquage autre que par les retombées des essais nucléaires des années soixante. La mesure du rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et du rapport isotopique $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ permet de déterminer l'origine de la contamination par comparaison avec les mêmes rapports des retombées des essais nucléaires des années soixante. Pour l'année 2021, ces rapports sont de 0.028 ± 0.003 ($n=14$) pour $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et de 0.41 ± 0.05 ($n=18$) pour $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$. Par comparaison, le combustible irradié d'une centrale nucléaire montre en général des rapports $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ supérieurs à 1.

Nous avons répété certaines analyses afin d'évaluer la

reproductibilité des mesures pour ce type d'échantillon. Les résultats montrent que, dans la limite des incertitudes de mesure, les valeurs indiquées pour $^{239+240}\text{Pu}$ sont très reproductibles entre les aliquotes de mesure de 50 g chacun. On constate que l'activité en ^{238}Pu est très difficile à quantifier lorsque l'activité en $^{239+240}\text{Pu}$ 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 le ^{238}Pu pour des activités en $^{239+240}\text{Pu}$ d'environ 200 mBq/kg sol sec. Néanmoins, nous avons pu déterminer le ^{238}Pu au-dessus de la limite de détection pour 14 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.

Tableau 2:
Activités (nBq/m³) en plutonium et américium dans les filtres à air collectés sur différents sites en Suisse en 2021. Incertitudes à 95%.

| Lieu | Volume m ³ | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu nBq/m ³ | ²³⁸ Pu nBq/m ³ | ²⁴¹ Am nBq/m ³ | ²⁴¹ Am/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu |
|---|-----------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Klingnau | 5'148'565 | 0.73 ± 0.09 | < 0.06 | 0.26 ± 0.05 | 0.36 ± 0.09 |
| Posieux | 4'353'659 | 1.41 ± 0.14 | < 0.07 | 0.66 ± 0.10 | 0.47 ± 0.12 |
| Liebefeld, semestre 1 | 3'651'014 | 0.58 ± 0.10 | < 0.10 | 0.34 ± 0.04 | 0.59 ± 0.15 |
| Liebefeld, semestre 2 | 3'651'014 | 1.38 ± 0.15 | < 0.08 | 0.69 ± 0.08 | 0.50 ± 0.13 |
| Meyrin | 4'016'003 | 1.12 ± 0.11 | 0.059 ± 0.023 | 0.57 ± 0.07 | 0.51 ± 0.13 |
| Mélange février 2021, «tempête de sable du Sahara » | 2'445'127 | 2.33 ± 0.21 | 0.08 ± 0.03 | 1.04 ± 0.14 | 0.45 ± 0.06 |
| moyenne | | | | | 0.48 ± 0.07 |

Tableau 3:
Activités (mBq/m³) en plutonium et américium des eaux collectées en Suisse durant l'année 2021. (Incertitudes à 95%).

| Type | Lieu | Volume [l] | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu mBq/m ³ | ²³⁸ Pu mBq/m ³ | ²⁴¹ Am mBq/m ³ | ²⁴¹ Am/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu |
|-----------------|----------------------------------|------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Eau de rivière | Rhône, Chancy | 154 | < 2.3 | < 2.3 | < 2.8 | - |
| | Aar (Hagneck), janvier - février | 240 | 2.5 ± 0.5 | < 0.5 | < 1.0 | - |
| | Aar (Hagneck), mars | 185 | < 1.8 | < 1.8 | < 1.8 | - |
| | Aar (Hagneck), mai - juin | 350 | 2.1 ± 0.4 | < 0.4 | < 0.6 | - |
| | Aar (Klingnau), janvier | 185 | 4.7 ± 1.1 | < 1.4 | < 1.3 | - |
| | Rhin (Pratteln), janvier | 175 | 3.9 ± 1.0 | < 1.3 | < 2.9 | - |
| Eau souterraine | Aarberg, 18.10.2021 | 145 | < 2.0 | < 2.0 | < 1.4 | - |
| | Däniken, 17.11.2021 | 160 | < 1.4 | < 1.4 | < 1.1 | - |
| | Döttingen, 18.10.2021 | 165 | < 1.3 | < 1.3 | < 1.1 | - |
| | Pratteln, 18.10.2021 | 160 | < 2.5 | < 2.5 | < 1.0 | - |
| Eau de pluie | Posieux | 1'367 | n.m. | n.m. | 0.66 ± 0.11 | - |
| | Mühleberg | 811 | 2.2 ± 0.6 | < 1 | 0.86 ± 0.03 | 0.40 ± 0.17 |
| | Leibstadt | 1'526 | 1.27 ± 0.37 | < 0.6 | 0.28 ± 0.08 | 0.22 ± 0.09 |

Tableau 4:
Activités (mBq/kg Matières Sèches - MS) en plutonium et américium de différents échantillons aquatiques prélevés en 2021 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 |
|--------------------|-------------------------------|--------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| Plantes aquatiques | Aar (Hagneck), 13.10.2021 | 44 | 28.9 ± 11.7 | < 27 | 6.4 ± 2.3 | 0.22 ± 0.12 |
| | Aar (Klingnau), 13.10.2021 | 22 | 31.9 ± 7.4 | < 11 | 18.1 ± 7.1 | 0.57 ± 0.26 |
| | Rhin (Pratteln), 13.10.2021 | 35 | 40.5 ± 7.5 | < 8 | 31.4 ± 14.2 | 0.77 ± 0.38 |
| | Aar (Däniken), 17.11.2021 | 23 | 56.6 ± 10.3 | < 11 | 22.4 ± 9.4 | 0.40 ± 0.18 |
| Sédiments | Aar (Hagneck), mai 2021 | 52 | 38.2 ± 4.4 | < 3.1 | n.m. | - |
| | Aar (Hagneck), mars- avril 21 | 25 | 68.5 ± 10.4 | < 8.8 | 77.8 ± 9.2 | 1.13 ± 0.43 |
| | Aar (Hagneck), février 2021 | 52 | 31.0 ± 4.1 | < 3.3 | n.m. | - |
| | Aar (Klingnau), janvier 2021 | 54 | 88.6 ± 7.40 85.3 ± 31.3 | < 3.3 < 45.0 | 38.5 ± 5.4 34.9 ± 5.2 | 0.41 ± 0.16 0.43 ± 0.07 |
| | Rhin (Pratteln), mai 2021 | 53 | 61.9 ± 5.7 | 2.1 ± 0.07 | 35.0 ± 6.0 | 0.56 ± 0.11 |
| Poissons | Aar (Mühleberg), 10.02.2021 | 70 | < 8 | < 8 | < 4.1 | - |
| | Aar (Däniken), 03.09.2021 | 113 | < 7.4 | < 7.4 | 2.0 ± 0.8 | - |
| | Aar (Beznau), 09.05.2021 | 98 | n.m. | n.m. | < 3.6 | - |
| | Rhin (Leibstadt), 03.11.2021 | 45 | < 7.2 | < 7.2 | < 7.2 | - |

S'il n'y a pas d'émission accidentelle de radioactivité dans l'atmosphère, l'activité en Pu et Am des filtres à air reflète la remise en suspension de particules de sol par abrasion par le vent. Les résultats pour quatre stations de prélèvement à haut volume sont présentés dans le Tableau 2. Nous avons aussi inclus dans ce rapport l'analyse de filtres à air collectés sur les stations de Cadenazzo, du CERN, de Güttingen, de Klingnau, de Liebefeld et de Posieux durant les tempêtes de sable du Sahara, du 01.02.2021 au 24.02.2021. L'analyse de Pu et Am s'est portée sur un mélange de 24 filtres HV, collectés sur une semaine chacun, soit un volume de 2'445'127 m³, afin d'obtenir une sensibilité de mesure suffisante pour pouvoir quantifier ces deux radioéléments indicatifs de fission/activation nucléaire. En effet, la zone de tempête saharienne englobait la région algérienne de Reggane, région dans laquelle la France a effectué quatre essais nucléaires atmosphériques et 13 essais nucléaires souterrains au début des années soixante. Cette zone est donc susceptible d'être contaminée par les retombées de ces tirs. Les résultats montrent que la quantité de particules de sable collectées sur les filtres était légèrement supérieure à ce qui est habituellement mesuré en Suisse, soit 13.4 µg/m³ (Suisse : 1.9 - 11.8 µg/m³). L'activité en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu était de 2.34 ± 0.20 nBq/m³ et celle en ²⁴¹Am de 1.04 ± 0.15 nBq/m³. Ces activités s'intègrent parfaitement parmi celles mesurées habituellement en Suisse, comme démontré dans la Figure 1. De plus, les rapports isotopiques ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu de 0.035 ± 0.015 et ²⁴¹Am/²³⁹⁺²⁴⁰Pu de 0.45 ± 0.08 sont très représentatifs des retombées des essais nucléaires des années soixante, comme discuté ci-dessus.

La Figure 1 représente l'activité en nBq/m³ des filtres à air de différentes stations de prélèvement d'air en Suisse de 2013 à 2021, en fonction de la quantité de cendres, normalisée au volume, obtenue lors de la calcination des filtres collectés sur l'année en cours (environ 52 filtres). Cette grandeur est une bonne approximation de la quantité de particules de sol remises en suspension et collectées par les filtres. On constate que l'activité mesurée sur les filtres à air est directement proportionnelle à la quantité de cendres (exprimée en µg/m³) contenue sur le filtre. Les deux courbes cernant les points de mesure indiquent l'intervalle de confiance à 95%, dans lequel les mesures devraient se trouver. Si un point devait figurer significativement hors de ces limites, il y aurait matière à investiguer de manière plus approfondie la présence d'une éventuelle contamination de l'air ne provenant pas de la resuspension de particules de sol. En 2021, tous les points du plan de surveillance (carrés bleus, Figure 1 a et b) se trouvaient dans l'intervalle de confiance du modèle, ce qui indique qu'il n'y a pas eu de contamination atmosphérique autre que la resuspension de particules de sols. En divisant les activités exprimées en nBq/m³ par la quantité de cendres résiduelle des filtres à air (µg/m³) et en prenant un rapport de calcination moyen des sols en Suisse de 0.95, on obtient une estimation de l'activité des particules de sol resuspendus. Celle-ci est en

moyenne de 0.178 ± 0.067 Bq/kg ms en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu pour les 5 sites étudiés et confirme que les activités mesurées en 2021 proviennent bien uniquement de la resuspension de particules de sol, car figurant bien dans l'intervalle des mesures de ²³⁹⁺²⁴⁰Pu sur le plateau Suisse en 2021 (moyenne = 0.195 ± 0.100 Bq/kg ms, n=18). Ces données confirment également que la tempête de sable saharien de février 2021 n'a pas contribué à un apport significatif de radioactivité dans l'air en Suisse.

Comme les années précédentes, le site de Posieux montre une activité en Pu légèrement plus élevée (1.41 nBq/m³) que les autres stations, toutefois très proche de la mesure du deuxième semestre pour le site de Liebefeld (1.38 nBq/m³). C'est aussi pour ces deux sites que la quantité de cendres après calcination des filtres à air est la plus élevée (5.2 et 7.9 µg/m³). D'une manière générale, et en accord avec les années précédentes, les activités n'ont pas dépassé 1.41 nBq/m³ pour ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et 0.69 nBq/m³ pour ²⁴¹Am. Le rapport ²⁴¹Am/²³⁹⁺²⁴⁰Pu était de 0.48 ± 0.07, soit une valeur très proche de celui déterminé en 2021 pour les sols, ce qui confirme encore une fois que l'origine de la contamination de filtres à air par ces deux radioéléments provient de la resuspension de particules de sol uniquement.

Les activités des eaux de surface (eaux de rivière) et eaux souterraines sont présentées dans le Tableau 3. Les valeurs d'activité sont très proches de celles mesurées en 2020. L'activité du ²³⁸Pu est restée inférieure à la limite de détection dans tous les cas. Lorsqu'elle est quantifiable, l'activité en ²⁴¹Am est toujours plus basse que celle en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ce qui confirme que l'origine de la contamination est due aux retombées des essais nucléaires des années soixante.

Dans les eaux souterraines, l'augmentation du volume collecté, qui est passé d'environ 100L à 160L pour les trois stations a permis d'abaisser la limite de détection mais n'a pas permis de quantifier l'activité.

La plupart des résultats de mesure d'échantillons d'eau de surface ou souterraine se trouvent en dessous des limites de détection et montrent qu'il est nécessaire de prélever au moins 200L d'eau pour être en mesure de déterminer les activités en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am avec une sensibilité suffisante pour des mesures par spectrométrie alpha. En 2021, les volumes prélevés étaient en moyenne de 50-100L inférieurs aux volumes prélevés en 2020, ce qui s'est traduit par des activités mesurées le plus souvent en dessous des limites de détection. En joignant les prélèvements de deux mois en mai et juin sur le site de Hagneck, nous avons obtenus 350L d'eau de surface, permettant une mesure en dessus de la limite de détection, ce qui confirme de manière rassurante que seuls des prélèvements de grands volumes permettent une quantification de l'activité en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am. La mesure des eaux de pluie représente une mesure indirecte de la contamina-

tion de l'air, les précipitations ayant pour effet d'entraîner les particules en suspension dans l'air vers le sol. Les eaux de pluie présentaient des activités en Pu et Am similaires à celles des eaux de surface, en moyenne inférieure à 2.5 mBq/m³ pour Pu et inférieure à 1 mBq/m³ pour Am.

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⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am sont mesurables au-dessus des limites de détection dans les sédiments (phase suspendue) de rivière, dans un rapport d'activité proche de celui des sols (voir Tableau 1). Les faibles quantités de plantes aquatiques prélevées (22-44 g de masse sèche) sont un obstacle à la quantification systématique de Pu et Am si le rendement de séparation chimique n'atteint pas 65%. Comme pour les sédiments, les activités en Pu et Am des plantes aquatiques sont restées proches de celles des années précédentes. Le rapport ²⁴¹Am/²³⁹⁺²⁴⁰Pu proche de 0.5 confirme qu'il n'y a pas eu d'apport significatif d'un des deux radioéléments aux plantes aquatiques autrement que par un dépôt foliaire de particules de sédiments contenant Pu et Am dans des rapports isotopiques proches de ceux des sols.

Dans les poissons, aucune activité quantifiable au-dessus de la limite de détection n'a été mesurée à l'exception de ²⁴¹Am dans un poisson de l'Aar à Däniken (2.0 ± 0.8 mBq/kg) dont la masse sèche disponible pour l'analyse était supérieure (113g) aux autres prélèvements. Ce fait est en soit positif, car il signifie un environnement sain du point de vue de la radioactivité artificielle résiduelle. Pour tous les échantillons aquatiques, ²³⁸Pu 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 (< 0.567 Bq/kg) de Pu et (< 0.323 Bq/kg) Am dans les sols de Suisse. Cette activité est bien fixée dans le sol et 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 1.41 nBq/m³ en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et 0.69 nBq/m³ en ²⁴¹Am. Les deux tempêtes de sable sahariennes du mois de février 2021 n'ont pas apporté de contribution significative à la contamination de l'air par Pu et Am et les valeurs mesurées sur un échantillon formé des filtres collectés dans les stations de Cadenazzo, du CERN, de Güttingen, de Klingnau, de Liebfeld et de Posieux sont comparables à ce qui est mesuré habituellement en Suisse. La masse de cendre est un bon estimateur de la quan-

tité de particules de sol remise en suspension dans l'environnement du collecteur d'air. Plus cette quantité est élevée, plus l'activité en Pu et Am des filtres à air est élevée, ce qui confirme que l'on observe bien un phénomène de remise en suspension du sol par le vent.

Les activités des eaux de surface et des eaux souterraines sont similaires aux années précédentes et n'ont pas dépassé 4.7 mBq/m³. Les mesures confirment qu'il est nécessaire de collecter plus de 200L 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 ²⁴¹Am (2.0 ± 0.8 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.

Remerciements

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

Références

- [1] Corcho Alvarado et al. Nature Communications, 2014, 5, article n° 3030.
- [2] Luisier et al. A new method for the determination of plutonium and americium using high pressure microwave digestion and alpha-spectrometry or ICP-SMS. J. Radioanal. Nucl. Chem. 2009, 281,425-432.

Chapitre / Kapitel 8

Surveillances 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- rejets et environnement
CERN- mesures OFSP

Emissionen und Immissionen
Ortsdosis und Ortsdosisleistung
MADUK
ZWILAG
Nukleare Anlagen und Umwelt
CERN-Emissionen und Umwelt
CERN- BAG-Messungen

2021

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 Abluft lagen im Jahr 2021 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 2021

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft 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 2021. 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 Abluft 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 25 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 179 Proben eigene gammaspktrometrische 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-

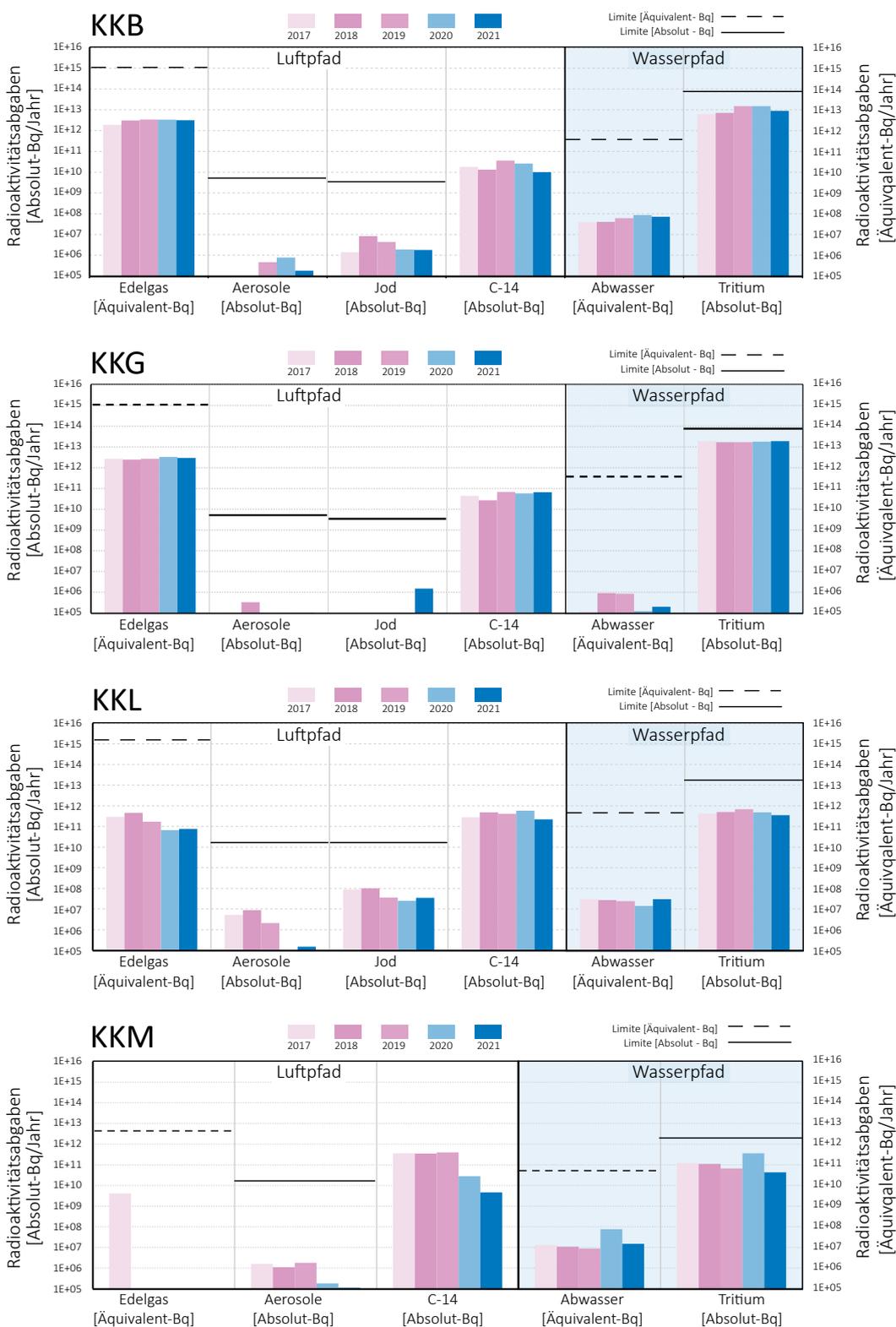


Fig 1.a: Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2017 bis 2021) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten.

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.

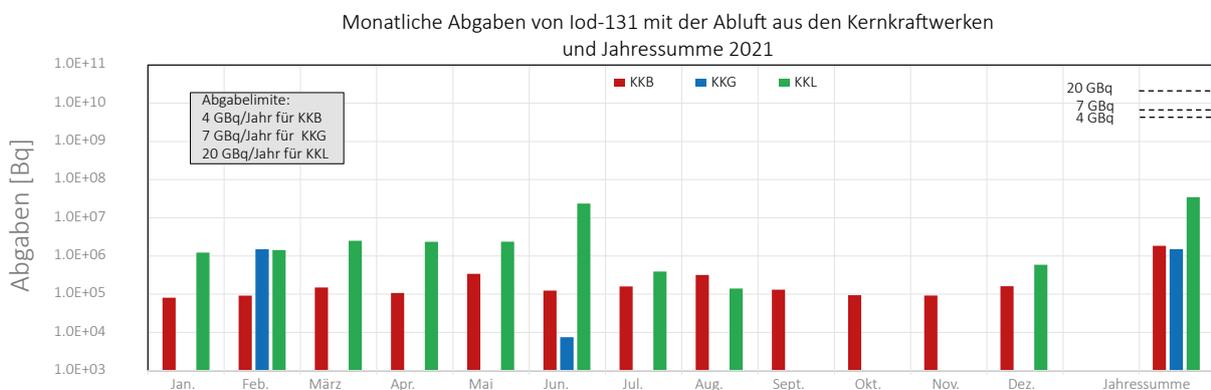
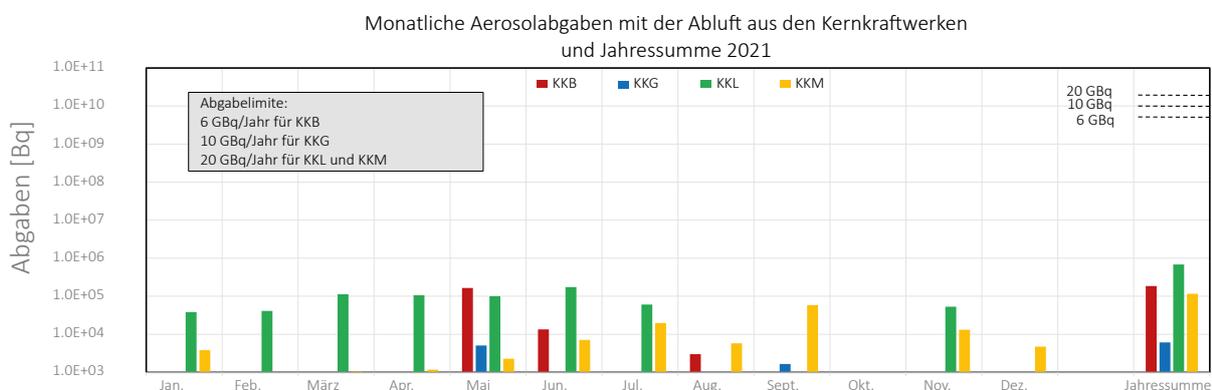
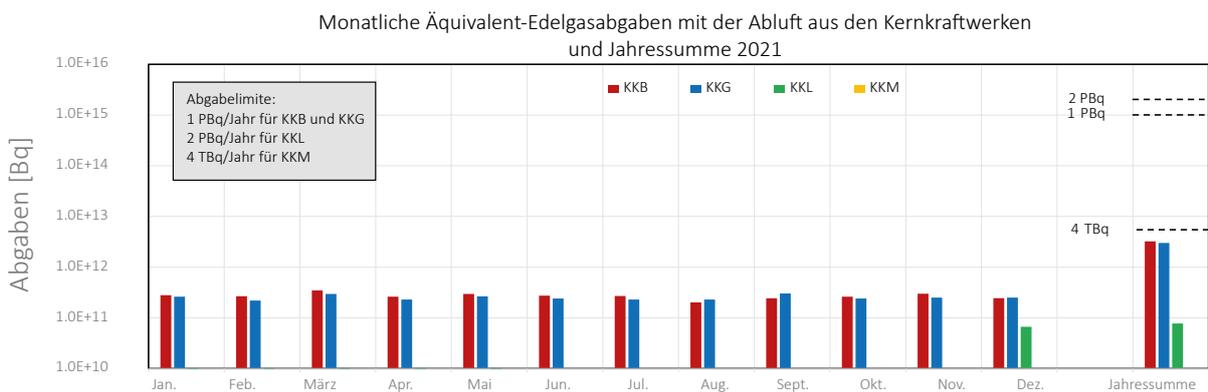
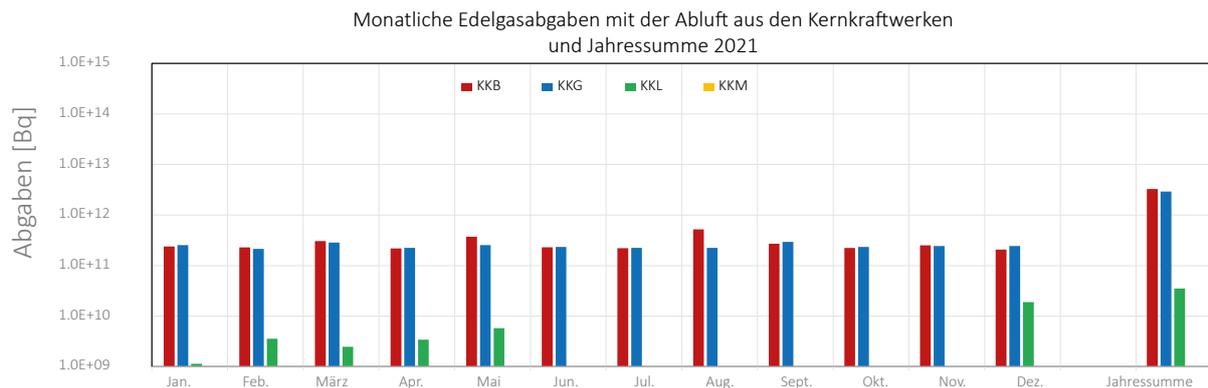
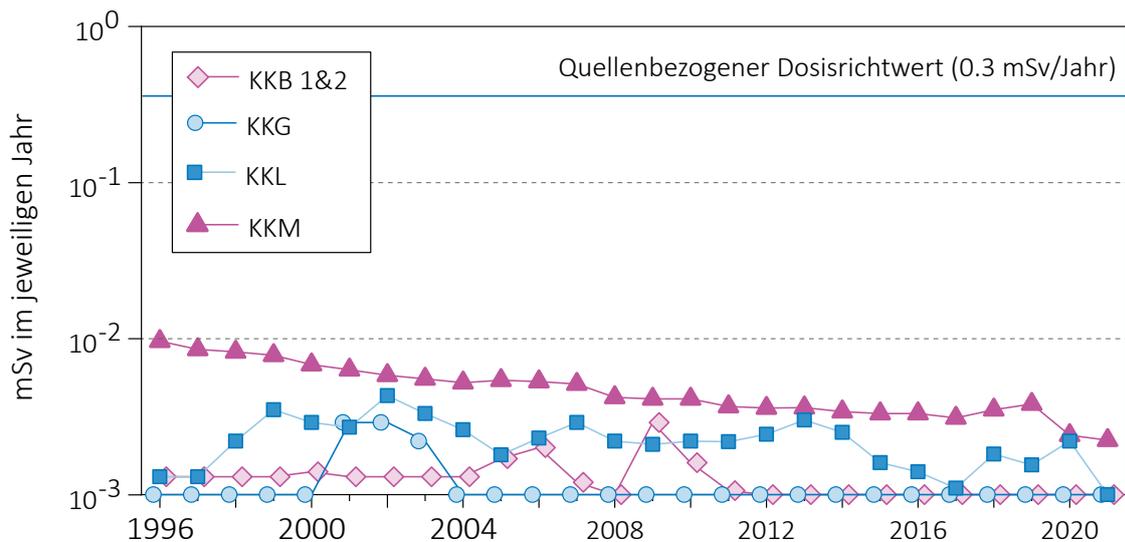


Fig 1.b (Teil 1):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2021 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 2021 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 2021 | Typ | Leistung |
|--------------|--|--------------------|----------|
| KKB/Block 1 | Leistungsbetrieb: 01.01-11.05; 24.05-31.12 Revisionsstillstand: 12.05-23.05 | Druckwasserreaktor | 365 MW |
| KKB/Block 2 | Leistungsbetrieb: 01.01-06.08; 11.09-31.12 Revisionsstillstand: 07.08-10.09 | Druckwasserreaktor | 365 MW |
| KKG | Leistungsbetrieb: 01.01-21.05; 25.06-31.12 Revisionsstillstand: 22.05-24.06 | Druckwasserreaktor | 985 MW |
| KKL | Leistungsbetrieb: 1.1-23.05; 01.12-31.12 Revisionsstillstand: 24.05-30.11 | Siedewasserreaktor | 1'275 MW |
| KKM | Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019 | Siedewasserreaktor | 373 MW |

Figur 3: Betrieb der Kernanlagen 2021.

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 KKB und KKG weniger als 0.001 mSv, bei KKM und KKL etwa 0.002 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2021 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 0.011 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 2021 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 2021 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 | | |
|-------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------------|----------|---------|
| | | | Messung | 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 3'600 m ³ | Nuklidgemisch ohne Tritium | 4.0·10 ⁸ | 7.2·10 ⁷ | 4·10 ¹¹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Tritium | 8.9·10 ¹² | - | 7·10 ¹³ | 13 % | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | Abluft | Edelgase | 3.2·10 ¹² | 3.2·10 ¹² | 1·10 ¹⁵ | 0.3% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Aerosole | 1.8·10 ⁵ | - | 6·10 ⁹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Iod: ¹³¹ I | 1.8·10 ⁶ | 1.8·10 ⁶ | 4·10 ⁹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂ | 1.0·10 ¹⁰ | - | - | - | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Dosis total | | | | | | <0.001 | <0.001 | <0.001 | |
| KKG | Abwasser 7'799 m ³ | Nuklidgemisch ohne Tritium | 2.3·10 ⁶ | 2.0·10 ⁵ | 2·10 ¹¹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Tritium | 1.9·10 ¹³ | - | 7·10 ¹³ | 27 % | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | Abluft | Edelgase | <2.9·10 ¹² | <3.0·10 ¹² | 1·10 ¹⁵ | <0.3% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Aerosole | 5.9·10 ³ | - | 1·10 ¹⁰ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Iod: ¹³¹ I | 1.5·10 ⁶ | 1.5·10 ⁶ | 7·10 ⁹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂ | 6.6·10 ¹⁰ | - | - | - | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Dosis total | | | | | | <0.001 | <0.001 | <0.001 | |
| KKL | Abwasser 15'937 m ³ | Nuklidgemisch ohne Tritium | 1.3·10 ⁸ | 3.0·10 ⁷ | 4·10 ¹¹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Tritium | 3.5·10 ¹¹ | - | 2·10 ¹³ | 1.8 % | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | Abluft | Edelgase | 3.4·10 ¹⁰ | 7.6·10 ¹⁰ | 2·10 ¹⁵ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Aerosole | 1.5·10 ⁵ | - | 2·10 ¹⁰ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Iod: ¹³¹ I | 3.5·10 ⁷ | 3.5·10 ⁷ | 2·10 ¹⁰ | 0.2 % | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂ | 2.2·10 ¹¹ | - | - | - | <0.001 | 0.0011 | 0.0018 |
| Dosis total | | | | | | <0.001 | 0.0011 | 0.0019 | |
| KKM | Abwasser 2'657 m ³ | Nuklidgemisch ohne Tritium | 1.5·10 ⁷ | 1.5·10 ⁷ | 4·10 ¹⁰ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Tritium | 4.3·10 ¹⁰ | 4.3·10 ¹⁰ | 2·10 ¹² | 2.2% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | Abluft | Edelgase | - | - | 4·10 ¹² | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Aerosole | 1.1·10 ⁵ | - | 2·10 ¹⁰ | <0.1% | 0.0022 | 0.0022 | 0.0021 |
| | | Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂ | 4.6·10 ⁹ | - | - | - | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Dosis total | | | | | | 0.0022 | 0.0022 | 0.0021 | |
| ZZL | Abwasser 419 m ³ | Nuklidgemisch ohne Tritium | 7.2·10 ⁷ | 2.0·10 ⁷ | 2·10 ¹¹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Tritium | 4.3·10 ⁹ | - | - | - | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | Abluft | β-γ-Aerosole | 3.0·10 ⁵ | - | 1·10 ⁹ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | α-Aerosole | 1.1·10 ⁴ | - | 3·10 ⁷ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂ | 1.6·10 ⁷ | - | 1·10 ¹² | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| | | Tritium | 2.1·10 ⁹ | - | 1·10 ¹⁴ | <0.1% | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Dosis total | | | | | | <0.001 | <0.001 | <0.001 | |

Tabelle 2:

Zusammenstellung der Abgaben des Paul Scherrer Instituts im Jahr 2021 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

| | PSI Ost | | | | |
|--|----------------------|-----------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| | Hochkamin | Saphir, Proteus | Forschungs-labor | Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle | Bundes-zwischen-lager |
| Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a] | | | | | |
| Nuklidgemisch ohne Tritium | - | - | - | - | - |
| Tritium | - | - | - | - | - |
| Abgaben über die Abluft^{1,2} [Bq/a] | | | | | |
| Edelgase und andere Gase | 2.3·10 ¹¹ | - | - | - | - |
| β/γ-Aerosole, ohne Iod | - | - | - | - | 1.4·10 ⁴ |
| α-Aerosole | - | - | - | - | - |
| Iod: Summe aller Isotope | - | - | - | - | - |
| Tritium als HTO | 3.5·10 ⁹ | - | - | 3.6·10 ⁹ | 4.8·10 ⁹ |
| Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂ | - | - | - | - | 1.7·10 ⁷ |
| Jahresdosis³ [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 Dosisrichtwert⁴ | < 0.1% | < 0.1% | < 0.1% | < 0.1% | < 0.1% |

| | PSI West | | | Gesamtanlage des PSI ^{1,2} | | |
|--|--------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Zentrale Fortluftanlagen | Injektor II | C-Labor | Abwasser 1'096 m ³ | Abluft | Aequivalent-abgaben |
| Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a] | | | | | | |
| Nuklidgemisch ohne Tritium | - | - | - | 3.7·10 ⁷ | - | 2.9·10 ⁶ |
| Tritium | - | - | - | 5.8·10 ⁹ | - | - |
| Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a] | | | | | | |
| Edelgase und andere Gase | 2.8·10 ¹⁴ | 1.8·10 ¹⁰ | - | - | 2.8·10 ¹⁴ | 1.2·10 ¹⁵ |
| β/γ-Aerosole, ohne Iod | 7.8·10 ⁹ | 1.0·10 ⁷ | 1.3·10 ⁴ | - | 7.8·10 ⁹ | - |
| α-Aerosole | - | - | - | - | - | - |
| Iod: Summe aller Isotope | 1.1·10 ⁸ | - | - | - | 1.1·10 ⁸ | 6.6·10 ⁷ |
| Tritium als HTO | 2.3·10 ¹² | - | - | - | 2.3·10 ¹² | - |
| Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂ | - | - | - | - | 1.7·10 ⁷ | - |
| Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für: | | | | | | |
| Erwachsene | 0.0106 | < 0.00015 | < 0.00015 | < 0.00015 | 0.011 | |
| Kind 10j | 0.0106 | < 0.00015 | < 0.00015 | < 0.00015 | 0.011 | |
| Kleinkinder | 0.0106 | < 0.00015 | < 0.00015 | < 0.00015 | 0.011 | |
| Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴ | 7.1 % | < 0.1% | < 0.1% | < 0.1% | < 8.0% | |

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2021:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

| Nuklid β/γ -Strahler | Abgaben [Bq im Jahr] | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| | KKB | KKG | KKL | KKM | PSI | ZZL |
| ^3H | $8.9 \cdot 10^{12}$ | $1.9 \cdot 10^{13}$ | $3.5 \cdot 10^{11}$ | $4.3 \cdot 10^{10}$ | $5.8 \cdot 10^9$ | $4.3 \cdot 10^9$ |
| ^7Be | | | | | $3.9 \cdot 10^4$ | |
| ^{22}Na | | | | | $1.2 \cdot 10^5$ | $8.6 \cdot 10^5$ |
| ^{24}Na | $6.1 \cdot 10^6$ | | | | | |
| ^{44}Sc | | | | | $1.2 \cdot 10^4$ | |
| ^{44}Ti | | | | | $1.2 \cdot 10^4$ | |
| ^{51}Cr | $1.5 \cdot 10^6$ | | | | | |
| ^{54}Mn | $6.6 \cdot 10^6$ | | $6.9 \cdot 10^6$ | $1.2 \cdot 10^7$ | $6.6 \cdot 10^4$ | $1.9 \cdot 10^5$ |
| ^{57}Co | | | | | $3.7 \cdot 10^3$ | |
| ^{58}Co | $1.6 \cdot 10^7$ | | $1.1 \cdot 10^6$ | | | |
| ^{59}Fe | $8.2 \cdot 10^4$ | | | | | |
| ^{60}Co | $8.5 \cdot 10^7$ | | $1.3 \cdot 10^8$ | $5.7 \cdot 10^7$ | $4.2 \cdot 10^5$ | $4.4 \cdot 10^6$ |
| ^{65}Zn | $4.3 \cdot 10^4$ | | | | | |
| ^{67}Ga | | | | | $2.1 \cdot 10^5$ | |
| ^{89}Sr | $5.1 \cdot 10^5$ | | | $1.5 \cdot 10^5$ | | |
| $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ | $6.2 \cdot 10^5$ | | | $4.6 \cdot 10^4$ | $2.4 \cdot 10^5$ | $1.5 \cdot 10^5$ |
| ^{95}Zr | $1.9 \cdot 10^5$ | | | | | |
| ^{95}Nb | $3.8 \cdot 10^5$ | | | | | |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | $2.1 \cdot 10^5$ | $3.8 \cdot 10^4$ | | | | |
| ^{103}Ru | $2.2 \cdot 10^5$ | | | | | |
| ^{106}Ru | | | | | $4.1 \cdot 10^4$ | |
| $^{108\text{m}}\text{Ag}$ | | | | | $5.7 \cdot 10^3$ | |
| $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | $9.4 \cdot 10^6$ | | | | | |
| ^{111}In | | | | | $5.3 \cdot 10^5$ | |
| ^{122}Sb | $3.2 \cdot 10^6$ | | | | | |
| ^{124}Sb | $1.4 \cdot 10^8$ | | | | | |
| ^{125}Sb | $4.1 \cdot 10^7$ | | | | | $3.0 \cdot 10^5$ |
| $^{123\text{m}}\text{Te}$ | $1.3 \cdot 10^7$ | $2.1 \cdot 10^6$ | | | | |
| ^{132}Te | $2.0 \cdot 10^6$ | | | | | |
| ^{131}I | $3.7 \cdot 10^6$ | | | | | |
| ^{133}I | $2.6 \cdot 10^5$ | | | | | |
| ^{134}Cs | $1.2 \cdot 10^6$ | | | | $1.1 \cdot 10^5$ | $1.2 \cdot 10^5$ |
| ^{137}Cs | $7.2 \cdot 10^7$ | | | $3.7 \cdot 10^6$ | $4.7 \cdot 10^6$ | $6.6 \cdot 10^7$ |
| ^{140}La | $3.0 \cdot 10^4$ | | | | | |
| ^{144}Ce | | $1.6 \cdot 10^5$ | | | | |
| ^{155}Tb | | | | | $2.1 \cdot 10^5$ | |
| ^{156}Tb | | | | | $1.2 \cdot 10^4$ | |
| ^{161}Tb | | | | | $6.2 \cdot 10^6$ | |
| ^{172}Lu | | | | | $1.1 \cdot 10^4$ | |
| ^{177}Lu | | | | | $2.4 \cdot 10^7$ | |
| $^{194}\text{Hg}/^{194}\text{Au}$ | | | | | $5.1 \cdot 10^3$ | |
| α -Strahler | *) | $1.0 \cdot 10^5$ | $1.7 \cdot 10^5$ | $2.6 \cdot 10^4$ | | *) |
| $^{234}/^{238}\text{U}$ | | | | | | |
| $^{239}/^{240}\text{Pu}$ | $6.6 \cdot 10^3$ | | | | | |
| $^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ | $3.4 \cdot 10^4$ | | | | | |
| ^{239}Np | | | | | | |
| ^{242}Cm | $1.1 \cdot 10^4$ | | | | | |
| $^{243}/^{244}\text{Cm}$ | $3.7 \cdot 10^4$ | | | | | |

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2020 bis und mit dem 3. Quartal 2021

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2021:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

| Nuklid β/γ- Strahler | Abgaben [Bq im Jahr] | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| | KKB | KKG | KKL | KKM | PSI | ZZL |
| Gase, Edelgase | | | | | | |
| Tritium | 5.6·10 ¹¹ | 6.0·10 ¹¹ | 3.2·10 ¹¹ | 1.6·10 ¹⁰ | 2.3·10 ¹² | 2.1·10 ⁹ |
| ¹⁴ C (CO ₂) | 1.0·10 ¹⁰ | 6.6·10 ¹⁰ | 2.2·10 ¹¹ | 4.6·10 ⁹ | 1.7·10 ⁷ | 1.6·10 ⁷ |
| ¹¹ C | | | | | 4.3·10 ¹³ | |
| ¹³ N | | | | | 4.5·10 ¹³ | |
| ¹⁵ O | | | | | 1.8·10 ¹⁴ | |
| ¹⁸ F | | | | | 1.4·10 ¹² | |
| ²⁴ Ne | | | | | | |
| ⁴¹ Ar | | | 1.2·10 ¹⁰ | | 6.0·10 ¹² | |
| ⁸⁵ Kr | | | | | | |
| ^{85m} Kr | 1.1·10 ¹¹ | | | | | |
| ⁸⁸ Kr | 1.9·10 ¹¹ | | | | | |
| ¹³³ Xe | 1.5·10 ¹² | | 9.0·10 ⁹ | | | |
| ¹³⁵ Xe | 1.4·10 ¹² | | 1.3·10 ¹⁰ | | | |
| ^{135m} Xe | | | 7.2·10 ⁸ | | | |
| EG-Aequiv. | | | | | | |
| EG: β-total | | <2.9·10 ¹² | | | | |
| Andere | | | | | | |
| Iod | | | | | | |
| ¹²³ I | | | | | 1.8·10 ⁷ | |
| ¹²⁴ I | | | | | 3.1·10 ⁵ | |
| ¹²⁵ I | | | | | 9.6·10 ⁷ | |
| ¹²⁶ I | | | | | 1.3·10 ⁵ | |
| ¹³¹ I | 1.8·10 ⁶ | 1.5·10 ⁶ | 3.5·10 ⁷ | | | |
| ¹³³ I | 1.1·10 ⁷ | | | | | |

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2021:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben
(Fussnoten siehe Text).

| Nuklid β/γ -Strahler | Abgaben [Bq im Jahr] | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | KKB | KKG | KKL | KKM | PSI | ZZL |
| ⁷ Be | | | | | 1.9·10 ⁶ | |
| ²⁴ Na | | | | | 2.0·10 ⁸ | |
| ⁵⁷ Co | | 1.6·10 ³ | | | | |
| ⁶⁰ Co | | | 8.6·10 ⁴ | 2.8·10 ⁴ | 3.3·10 ⁵ | |
| ⁷⁷ Br | | | | | 7.1·10 ⁶ | |
| ^{80m} Br | | | | | 2.3·10 ⁷ | |
| ⁸² Br | | | | | 9.3·10 ⁸ | |
| ⁸⁹ Sr | | | 7.4·10 ⁴ | | | |
| ⁹⁰ Sr | | | | | | |
| ¹⁰³ Ru | 3.2·10 ³ | | | | | |
| ^{123m} Te | | 4.3·10 ³ | | | | |
| ¹²¹ Te | | | | | 5.4·10 ⁵ | |
| ¹³⁷ Cs | | | 6.6·10 ⁴ | 8.4·10 ⁴ | | |
| ¹⁷³ Lu | | | | | 5.9·10 ⁴ | |
| ^{177m} Lu | | | | | 7.0·10 ⁴ | |
| ¹⁸¹ Re | | | | | 8.8·10 ⁷ | |
| ¹⁸² Re | | | | | 8.5·10 ⁸ | |
| ^{182m} Re | | | | | 1.7·10 ⁶ | |
| ¹⁸³ Re | | | | | 1.2·10 ⁷ | |
| ¹⁸² Os | | | | | 3.3·10 ⁸ | |
| ¹⁸³ Os | | | | | 4.0·10 ⁸ | |
| ^{183m} Os | | | | | 8.7·10 ⁷ | |
| ¹⁸⁵ Os | | | | | 2.9·10 ⁷ | |
| ¹⁸⁵ W | | | | | 1.1·10 ⁸ | |
| ¹⁹¹ Os | 1.8·10 ⁵ | | | | | |
| ¹⁹¹ Pt | | | | | 1.3·10 ⁷ | |
| ¹⁹² Au | | | | | 1.2·10 ⁹ | |
| ¹⁹³ Au | | | | | 3.2·10 ⁸ | |
| ¹⁹⁴ Au | | | | | 1.4·10 ⁶ | |
| ¹⁹² Hg | | | | | 1.2·10 ⁹ | |
| ^{193m} Hg | | | | | 2.7·10 ⁸ | |
| ¹⁹⁴ Hg | | | | | 1.4·10 ⁶ | |
| ¹⁹⁵ Hg | | | | | 5.6·10 ⁸ | |
| ^{195m} Hg | | | | | 1.7·10 ⁸ | |
| ¹⁹⁷ Hg | | | | | 6.7·10 ⁸ | |
| ^{197m} Hg | | | | | 2.1·10 ⁸ | |
| ²⁰³ Hg | | | | | 1.5·10 ⁷ | |
| Nicht spezifizierte | | | | | | 3.0·10 ⁵ |
| α -Aerosole | | 4.3·10 ⁴ | 8.4·10 ³ | 5.1·10 ³ | | 1.1·10 ⁴ |

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

[1] Bei der **Art der Abgaben** resp. den Bilanzierten Abgaben ist folgendes zu präzisieren:

Abwasser : Die Summe der Abwasserabgaben ist in der Spalte «Abgaben» angegeben. Für den Vergleich mit den Abgabelimiten werden die Werte mit einem Referenz-Immissionsgrenzwert für Gewässer ($IG_{Gw,ref}$ -Wert) von 10 Bq/l umgerechnet und als sogenannte Aequivalentabgaben angegeben:

$$Q_{Aeq} = \sum_i Q_i \frac{IG_{Gw,ref}}{IG_{Gw,i}}$$

Edelgase und Gase : Die Summe der Edelgas- bzw. Gasabgaben ist in der Spalte «Abgaben» angegeben. Für den Vergleich mit den Abgabelimiten werden die Werte mit einem Referenz-Immissionsgrenzwert für Luft ($IG_{Lf,ref}$ -Wert) von 2'000 Bq/m³ umgerechnet und als sogenannte Aequivalentabgaben angegeben:

$$Q_{Aeq} = \sum_i Q_i \frac{IG_{Lf,ref}}{IG_{Lf,i}}$$

Iod : Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von ¹³¹I limitiert; somit ist bei den bilanzierten Abgaben nur dieses Iod-Isotop angegeben. Beim PSI ist die Abgabe für die einzelnen Abgabestellen und die Gesamtanlage als Summe der Aktivität der gemessenen Iod-Nuklide angegeben. Für die Gesamtabgabe des PSI wird zudem auch ein ¹³¹Iod-Aequivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben.

Für die Berechnung der Jahresdosis werden sowohl für die KKW wie für das PSI immer sämtliche verfügbaren Iod-Messungen verwendet.

[2] Abgaben kleiner als 1'000 Bq werden in den Tabellen 3a-c 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 wurden.

Ergebnisse 2021

Die Ortsdosisleistung $H^*(10)$ ist im Nahbereich (beispielsweise am Arealzaun) des Siedewasserreaktors in Leibstadt durch Direkt- und Streustrahlung aus dem Maschinenhaus erhöht. Diese Strahlung resultiert aus dem radioaktiven Zerfall des kurzlebigen Stickstoffnuklids ^{16}N , welches im Reaktor produziert und bei Siedewasserreaktoren mit dem Dampf in die Turbine im Maschinenhaus getragen wird. Weiter können Abfalllager zu einer erhöhten Ortsdosis am Zaun beitragen. Rückbauarbeiten, wie sie im KKM stattfinden, können zu temporären Erhöhungen der Ortsdosis am Zaun führen.

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 $0.06 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.19 \mu\text{Sv/h}$ 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 0.03 mSv . Am Zaun des KKM wurden bei den vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen $0.08 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.32 \mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Auf eine Woche hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am

meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von etwa 0.04 mSv resultieren. Im Falle des KKM wird bei einer solchen Hochrechnung die Ortsdosis stark überschätzt, da die maximalen Ortsdosisleistungen am Zaun in der Regel aufgrund der Rückbauarbeiten zeitlich begrenzt sind. In diesem Falle wurde der hohe Wert während Arbeiten im Aktivlager gemessen. Die vom KKM quartalsweise ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.016 mSv . Am Zaun des PSI wurden bei vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen Ortsdosisleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.09 \mu\text{Sv/h}$ 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 0.005 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 Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

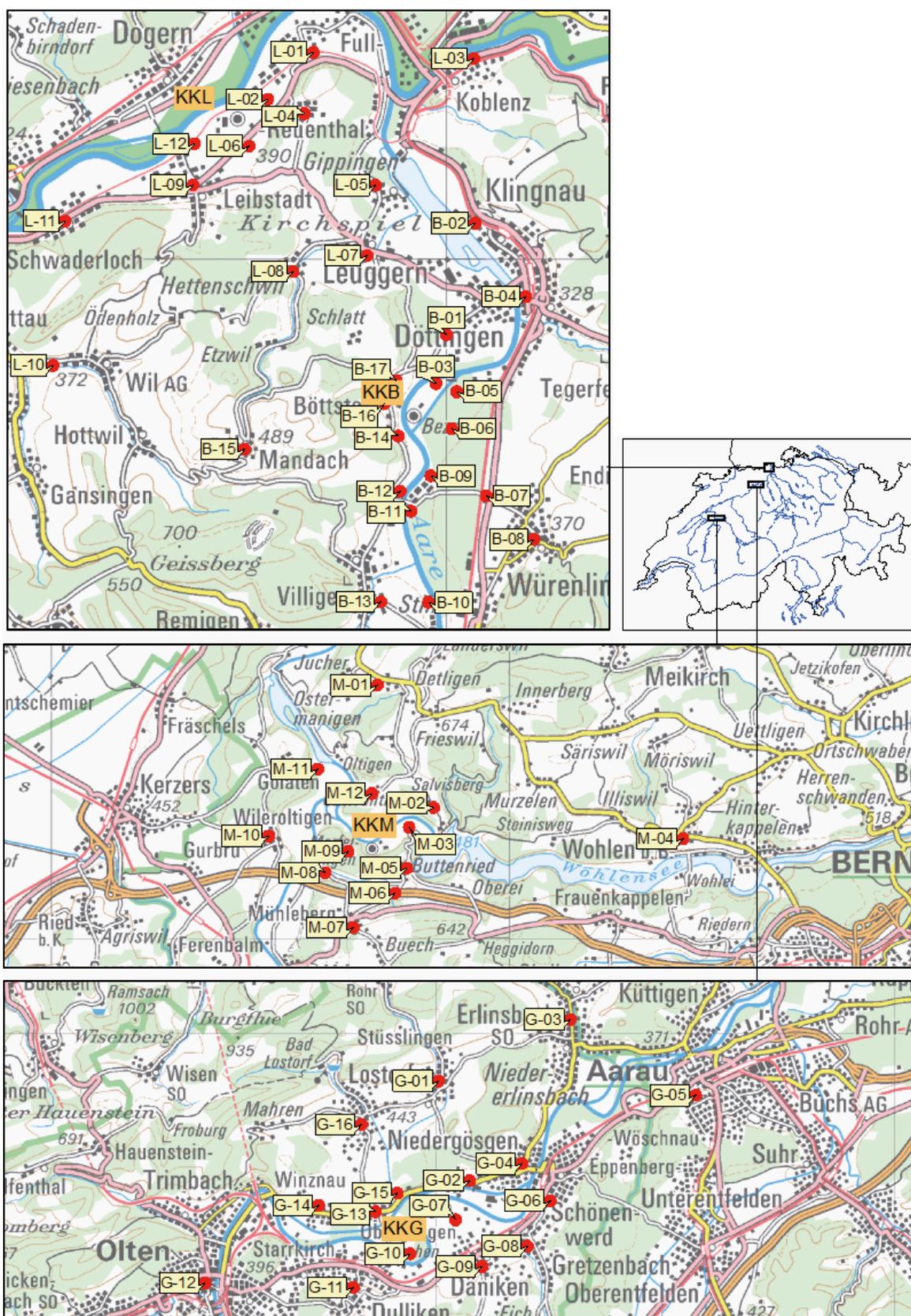
Das MADUK-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung $H^*(10)$ in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und zur Schaffung 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 2021 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

Übersicht

Das **MADUK**-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von **Anlageparametern (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 Radioaktivitätsüberwachung, 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 und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ), Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM und JRODOS/LASAT im ENSI. Die Figur 1 zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.



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

Die Daten von MADUK können mittels einer speziellen Software auf bestimmten Windows-Arbeitsplatzrechnern im ENSI und in den Kernkraftwerken visualisiert werden. Auf der [Internetseite](https://www.ensi.ch/de/messwerte-radioaktivitat/) sind alle seit 1994 archivierten Tages-, Stunden- und Zehnmittelnmittelwerte der MADUK Stationen abrufbar. (<https://www.ensi.ch/de/messwerte-radioaktivitat/>).

Systeminstandhaltung und -ergänzung



Figur 2:
Neuer Sondentyp GammaTracer XL2 der Firma Bertin GmbH.

Im Jahr 2020 wurde mit dem Umbau der Stationen auf den neuen Sondentyp (Figur 2) begonnen und bereits 40 Stationen umgerüstet. Bereits in den ersten Monaten mussten rund 20 Sonden mit defektem Hochdosiszählrohr ausgetauscht und zur Reparatur an den Lieferanten retourniert werden. Deshalb konnten nur weitere 8 Stationen im Jahr 2021 auf den neuen Sondentyp umgerüstet werden, da bis Ende Jahr nur 10 reparierte Sonden wieder verfügbar, geeicht und als Reservematerial für weitere Ausfälle zur Verfügung standen. Die restlichen Sonden werden voraussichtlich im Februar 2022 wieder verfügbar sein und im März geeicht, so dass der Umbau im Frühjahr 2022 abgeschlossen werden kann.

Die MADUK-Zentrale wurde auf neue Systeme mit aktuellen Betriebs- und Datenbanksystemen migriert. Die Migration konnte ohne nennenswerte Unterbrüche für den Betrieb durchgeführt 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.

Tabelle 1:

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

| Station | Störungsdauer [h] | Permanenter Datenverlust [h] | Ursache |
|---------|-------------------|------------------------------|--|
| G-06 | 23.0 | 23.0 | Ausfall Kommunikation |
| M-10 | 24.5 | 24.5 | Ausfall Kommunikation |
| G-09 | 19.4 | 19.4 | Defekt Stationselektronik |
| G-05 | 21.8 | 21.8 | Wasserschaden Stationsstandort |
| L-12 | 17.2 | 17.2 | Defekte Messsonde |
| M-08 | 1.7 | 1.7 | Technisches Problem bei Neukonfiguration |
| G-07 | 19.7 | 19.7 | Blockierter Datenlogger |
| B-17 | 2.0 | 2.0 | Blockierter Datenlogger |
| G-05 | 91.3 | 91.3 | Defekte Batterie |

Die Messstationen liefen auch im Jahr 2021 grösstenteils zuverlässig. Die Anzahl Kommunikationsunterbrüche gingen im Vergleich zu den Vorjahren deutlich zurück. Dies war hauptsächlich auf den Einsatz des neuen Sondentyps mit redundanter Datenübertragung zurückzuführen. Bei zwei Kommunikationsausfällen wurde jeweils gleich die Messstation auf den neuen Sondentyp umgebaut (G-06, M-10). Bei der Station G-05 führte ein Wasserschaden am Standort zu einem langen Stromausfall. Deshalb wurde diese Station ebenfalls auf den neuen Sondentyp umgerüstet. Die ersten Betriebserfahrungen mit dem neuen Sondentyp sind gut. Die Autarkie durch die eingebauten Solarpanels ist grösstenteils ausreichend. Bei Messstationen mit starker Beschattung durch Gebäude und/oder Bäume wurden in den bestehenden Messkasten Schaltungen montiert, um zyklisch die Batterien der Sonden über das Stromnetz zu laden. Damit kann auch bei längerem Stromausfall von mehr als 30 Tagen der Betrieb der Sonden an allen Standorten gewährleistet werden.

Aufgrund von Bauarbeiten am Standort musste die Messsonde der Station G-11 für den Zeitraum vom 29. März 2021 11:50 Uhr bis 23. Juni 2021 14:20 Uhr demontiert werden. Für diesen Zeitraum liegen keine Messdaten für diese Station vor.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99,9% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99,54% (Ausfall der Station G-11 mit 0,4% 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. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Aufgrund der Umrüstung der Messstationen auf einen neuen Sondentyp, der Ressourcensituation und der aktuellen Überarbeitung der StMmV wurde auch im 2021 auf die Durchführung der Funktionsprüfung vor Ort verzichtet. Durch die permanente Messung und die laufende automatische Prüfung der Messdaten kann trotzdem eine sehr hohe Datenqualität sichergestellt werden.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden üblicherweise Messungen mittels In-Situ-Gamma-spektrometrie bei den Messstationen durchgeführt. Im Jahre 2021 erfolgten die Messungen an den MADUK-Standorten der Messringe KKB und KKM. Bei allen Messungen wurden die Untersuchungsschwellen nicht erreicht. Es konnten keine Immissionen der Kernanlagen nachgewiesen werden.

Messergebnisse

Im Jahr 2021 wurden insgesamt drei Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h (Tabelle 2) festgestellt. Alle waren aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen.

Tabelle 2:

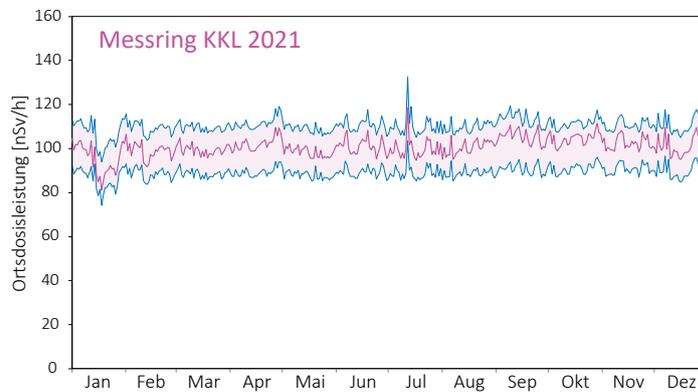
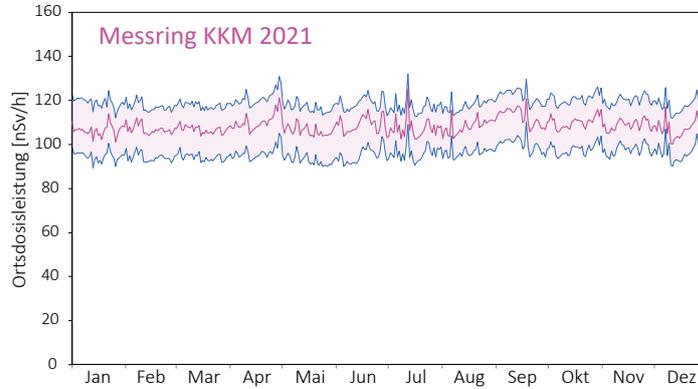
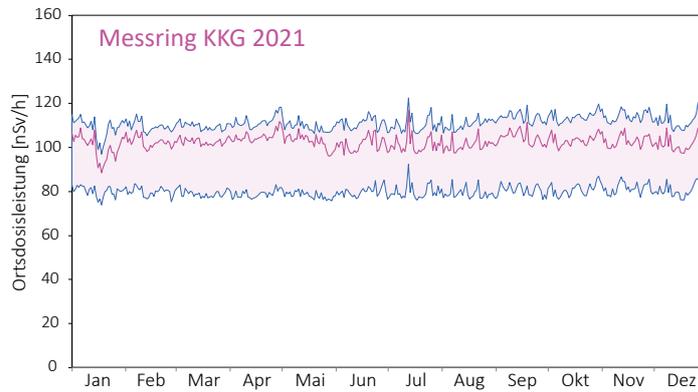
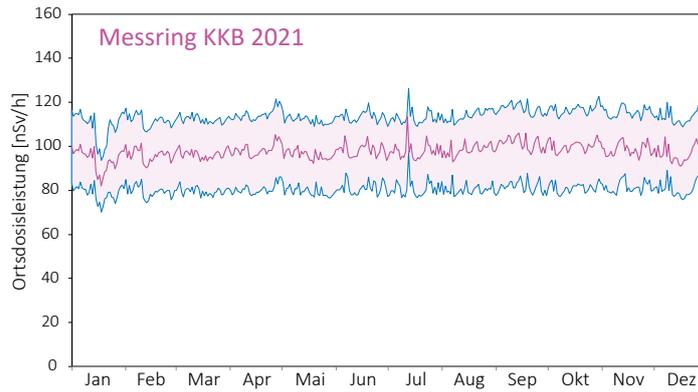
Auflistung der Nettodosisleistungsschwellenwertüberschreitungen im Jahr 2021.

| Datum | Station | Dauer [h] | Max. NDL [nSv/h] | Max. ODL [nSv/h] |
|------------------|---------|-----------|------------------|------------------|
| 06.01.2021 07:00 | L-12 | 1.3 | 108 | 210 |
| 08.06.2021 16:50 | M-04 | 0.2 | 52 | 140 |
| 30.08.2021 16:00 | L-03 | 0.3 | 61 | 167 |

Bei der Station L-12 wurde am 6. Januar zwischen 07:00 Uhr und 08:40 Uhr eine Verletzung des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h registriert. Die maximale Ortsdosisleistung betrug 210 nSv/h und die maximale Nettodosisleistung 108 nSv/h. Aufgrund des Verlaufs der Erhöhung mit dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten konnte die Erhöhung auf Washout natürlicher Radionuklide (Radonfolgeprodukte) durch Niederschlag zurückgeführt werden. Ein Augenschein vor Ort zeigte Schnee bei der Station, obwohl in der Region ansonsten kein Schnee lag. Der künstliche Schneefall (Industrieschnee) konnte sich durch die Temperaturen um den Gefrierpunkt aus dem Dampf des Kühlturmes des Kernkraftwerkes Leibstadt bilden. Da es wegen dieser Erhöhung zu einer Öffentlichkeitsanfrage kam, wurde auf der Webseite des ENSI ein Artikel zu diesem Thema aufgeschaltet: <https://www.ensi.ch/de/2021/01/20/schneefall-kann-zu-erhoehten-messwerten-fuehren/>.

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

Die Figur 3 zeigt die Maxima, die Minima und die Medianwerte der Tagesmittelwerte der jeweiligen Messringe im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke.



Figur 3:
 Maxima, Minima und Medianwerte der Tagesmittelwerte der Sonden der Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2021.

8.4

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

M. Jäggi, P. Kramer, H. Hauswirth, 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 ^7Be , ^{210}Pb gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der γ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung von α - und β -Strahlern (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm und ^{131}I). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 15 - 40 Bq/kg für das Jahr 2021. Diese Abnahmen sind mit dem radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von ^{137}Cs beträgt 30.17 Jahre) und mit einer begrenzten Aufenthaltszeit in der oberen Bodenschicht zu erklären. Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope ^{90}Sr und $^{239+240}\text{Pu}$ sind ähnlich signifikant, zumal diese Radionuklide schon sehr viel früher (Beginn der 1960er Jahre) als Fallout der A-Bombentest in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf 1.4 - 3.5 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) schwankten im Spurenbereich von 0.2 - 1.0 Bq/kg im Jahr 2021. Die konstanten Isotopenverhältnisse von $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.03) und $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.35) zeigen, dass die gemessenen Werte für die Actinoide 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 20 - 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 180 und 460 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 [1]. Diese Analysen dienten der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B. ^7Be),

terrestrischer (^{40}K sowie Radionuklide aus den U- und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm und ^{131}I) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von oberirdischen Kernwaffentests der 60iger Jahre und der Chernobyl-Reaktorkatastrophe 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 Trennmethode(n) (Boden)

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. Durch die Zugabe von H_2O_2 (Oxidationsmittel) beim Auslaugen, liegt das Plutonium vorwiegend als Pu^{4+} vor. 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 DGATM- und eine Anionenaustauscher-Kolonnen (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-Kolonnen gelaufene Fraktion, welche ebenso das Am und Cm enthält, wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer UTEVA-Kolonnen zur Retention von U und Th und einer DGA-Kolonnen, die Am und Cm adsorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach-salzsäuren 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 [1]).

Das Radionuklid ^{90}Sr (reiner β -Strahler) wird nach dem Leaching und einer Vorkonzentration via Oxalat-Fällung auf einer Sr-Resin-Kolonnen in 8 M HNO_3 -Medium fixiert und mit verdünnter Salpetersäure eluiert. Anschließend wird das Eluat 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 photonene-emittierende Radioisotope wie ^7Be , ^{241}Am , ^{137}Cs und ^{131}I gemessen. Die γ -Messung dauert 15 Stunden.

Niederschlag

In einem monatlichen Turnus wird das in diesem Zeitraum anfallende Niederschlagswasser aus dem Niederschlags-sammler beim ZwiLAG-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10ml 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.



Figur 1 :
Installierte Staubfangplatte an der Seitenwand der ZwiLAG auf ca. 2m Höhe über Boden. Sämtlicher Staub und Partikel, die durch Wind und Witterung auf der Fettschicht kleben bleiben, werden alle 2 Wochen auf ihren Radionuklidgehalt analysiert. Foto: Patricia Kramer (04-2022).

Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{131}I) und 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 Aktivitäten sind über die Zeit äusserst stabil und liegen auf sehr tiefem Niveau. Die Aktivitäten gewisser Nuklide lagen in verschiedenen Jahren teilweise tiefer als die

Tabelle 1:

Anthropogene Fallout-Isotope in Bodenproben aus der Umgebung der Zwiilag (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten fünf Jahre (2017-2021). Wertebereiche der Analysenresultate in Bq/kg Trockengewicht. Die Messunsicherheit einer einzelnen Analyse betrug zwischen 10% - 40%.

| Isotop | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|----------------------------------|-------------|-------------|----------------|----------------|-------------|
| ^{90}Sr | < 1 - 2 | <1 - 2.5 | <1 - 3 | <1 - 2 | 1.3 - 3.5 |
| ^{131}I | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 |
| ^{134}Cs ⁽¹⁾ | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 |
| ^{137}Cs | 10 - 50 | 10 - 50 | 5 - 40 | 10 - 40 | 7 - 60 |
| ^{238}Pu ⁽²⁾ | 0.01 - 0.03 | 0.01 - 0.03 | < 0.005 - 0.03 | < 0.005 - 0.03 | 0.02 - 0.06 |
| $^{239+240}\text{Pu}$ | 0.2 - 0.8 | 0.2 - 0.8 | 0.1 - 0.8 | 0.05 - 0.5 | 0.2 - 1.0 |
| ^{241}Am | 0.1 - 0.3 | 0.1 - 0.3 | 0.05 - 0.3 | 0.02 - 0.3 | 0.02 - 0.4 |
| ^{226}Ra | 20 - 30 | 10 - 24 | 15 - 30 | 20 - 30 | 19 - 30 |
| ^{228}Ra | 20 - 40 | 13 - 25 | 17 - 30 | 20 - 40 | 15 - 40 |

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

⁽²⁾ Einzelne ^{238}Pu -Resultate lagen unter der Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg.

Nachweisgrenze des verwendeten Messverfahrens. Für 2021 konnten praktisch alle Nuklide über der Nachweisgrenze gemessen werden. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ liegen derzeit zwischen 0.2 und 1.0 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.02 und 0.4 Bq/kg. In Spuren ist noch ^{238}Pu nachweisbar (0.02- 0.06 Bq/kg). Es wurde dieses Jahr festgestellt, dass ^{238}Pu in sämtlichen Bodenproben nach wie vor nachgewiesen werden konnte. Der Wertebereich für das Spaltprodukt ^{90}Sr lag 2021 geringfügig höher als im Vorjahr (1.3 - 3.5 Bq/kg), scheint jedoch immer noch in derselben Grössenordnung einem langsamen Abbau- und Zerfallstrend zu folgen. Die Resultate für ^{137}Cs (10 - 60 Bq/kg, im Mittel 35 Bq/kg) liegen zuverlässig im langjährigen Mittel. Der Grund für die grundsätzlich höheren Aktivitätskonzentrationen ist der Beitrag von Fallout-Cäsium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall von 1986. Über die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (im Mittel 0.37 in 2021 bei einem erwarteten Wert von 0.35) und $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (0.03 ± 0.01) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Actinoide ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren stammt [1,2]. 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 10 - 30 Bq/kg und zeigen keinen Trend mit der Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingebaut 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 bzw. 0.4 Bq/m². Die tiefe Nachweisgrenze für ^{241}Am von 0.4 Bq/m² ergibt sich aufgrund der Verwendung eines hochauflösenden Gamma-Spektrometers mit Be-Eintrittsfenster. Anhand des in der oberen Atmosphäre durch Sonnenpartikel produzierten ^7Be lassen sich die mittleren Jahreszeitverläufe abbilden. Auch die Flächenaktivitäten auf den Staubfangplatten von ^7Be schwankten zwischen ca. 5 - 20 Bq/m² im Winter und maximal 105 Bq/m² im Sommerhalbjahr 2021.

Bei den Regenwasserproben wurden ^3H -Aktivitätskonzentrationen von 2 - 6 Bq/Liter nachgewiesen. Mit der Gammaskopimetrie konnten seit 1997 noch nie anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs oder ^{131}I nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze dieser Radionuklide liegt jeweils bei 0.04 Bq/Liter.

Literaturliste

- [1] 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.
- [2] 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, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller, P. Steinmann

Section radioactivité dans l'environnement, URA / OFSP, Berne

Résumé

Les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, mises en œuvre dans le cadre de la surveillance de la radioactivité au voisinage des centrales nucléaires ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques (^{14}C dans les feuillages) et des rejets liquides (^3H dans l'eau ou ^{54}Mn et ^{60}Co dans les sédiments) de ces installations. La contribution du rayonnement direct a également été détectée en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühleberg. Les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont toutefois restées nettement inférieures aux limites réglementaires et donc, sans danger pour la santé.

Hormis ces quelques exemples, les résultats des mesures environnementales sont similaires à ceux relevés dans les endroits situés hors de l'influence des installations nucléaires. Ils montrent que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que les contaminations détectables proviennent principalement des essais nucléaires des années 60 (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am) ainsi que de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs).

Introduction

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 population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus.

nus 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 , ^3H) | 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 2021

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 Bznau (KKB 1 et 2), Gösigen (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 2021 (voir Chap. 8.1). Comme attendu, les rejets de substances radioactives dans l'air par la centrale nucléaire de Mühleberg ont encore diminué en 2021 avec la disparition complète des émissions d'iode. 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 2021.

La figure 1 présente les doses calculées pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires suisses entre 1981 et 2021. 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

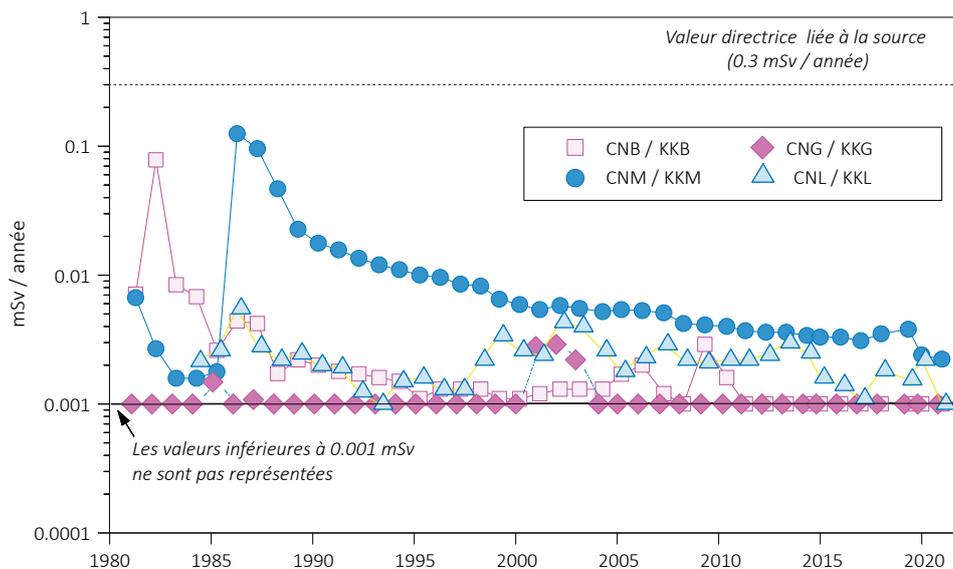


Figure 1:

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 2021 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

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. La dose calculée pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage de KKM sur la base des émissions effectives, en tenant compte des rejets des années précédentes, s'est élevée en 2021 à env. 0.002 mSv. Pour toutes les autres centrales (KKB, KKG, KKL), les doses pour les personnes adultes les plus exposées ont été évaluées à < 0.001 mSv. Dans le cas de la centrale nucléaire de Leibstadt, les émissions de ^{14}C conduisent à une dose d'env. 0.002 mSv pour les très petits enfants (1 an).

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 thermoluminescents (TLD) 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. La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint 0.02 mSv par semaine en moyenne, après soustraction du bruit de fond naturel. 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 à Mühleberg, la contribution de ^{16}N a disparu, toutefois, les travaux de démantèlement peuvent entraîner des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture. Ainsi des valeurs instantanées de débit de dose comprises entre 0.08 (correspondant au fond naturel) et 0.32 $\mu\text{Sv/h}$ ont été mesurées lors des contrôles périodiques sur site effectués par l'IFSN en 2021. En extrapolant cette valeur instantanée maximale sur une semaine, on obtiendrait une dose supplémentaire d'environ 0.04 mSv. Toutefois, cette valeur est très certainement surestimée car les augmentations de débit de dose à la clôture dus aux travaux de démantèlement sont généralement temporaires. L'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale de Mühleberg montre en effet une élévation moyenne (calculée sur la base de la valeur trimestrielle mesurée) de la dose ambiante de 0.016 mSv par semaine, après soustraction du bruit de fond naturel.

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

Toutes ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés. En effet, cet article stipule que la dose ambiante ne doit pas dépasser 0.02 mSv par semaine aux endroits situés à l'extérieur de ces secteurs où peuvent séjourner durablement des membres du public. Cette valeur peut être dépassée jusqu'à 5 fois (0.1 mSv/semaine) dans les endroits où personne ne séjourne du-

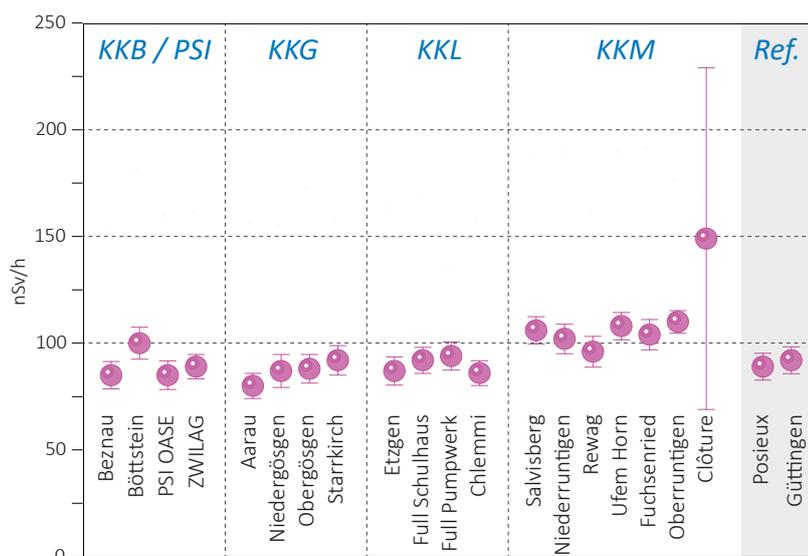


Figure 2:

Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiante $H^*(10)$ effectués en 2021 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). La valeur instantanée plus élevée mesurée à la clôture de la centrale de Mühleberg est due à des travaux de démantèlement.

ablement, 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. Lors de ces mesures, une valeur de débit de dose plus élevée (0.149 $\mu\text{Sv/h}$) a également été mesurée à la clôture de la centrale nucléaire de Mühleberg. Cette valeur se situe dans la gamme de celles mesurées par l'IFSN lors de ces contrôles périodiques. La figure 2, illustrant les résultats de ces mesures, montre qu'hormis ce cas particulier, l'exposition ambiante au voisinage 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 autres points du voisinage de la centrale de Mühleberg (en particulier Ufem Horn, Oberruntigen, Niederruntigen et Salvisberg) 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 2021 étaient 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 0.134 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 uniquement 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 contre toujours en fonction.

Aucun émetteur gamma d'origine artificielle résultant de l'exploitation des centrales nucléaires n'a pu être mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2021 (voir aussi chapitre 4.2). Les activités du ^{137}Cs enregistrées par URAnet en 2021, sont également restées inférieures à la limite de détection d'env. 3-7 mBq/m³ (pour une mesure de 12h).

Le ^{137}Cs provenant de la remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que l'accident de Tchernobyl) 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 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour un temps de collecte de 7 jours et une mesure en laboratoire de 48h. A la station HVS de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer, les concentrations de ^{137}Cs ne se sont pas distinguées de celles enregistrées à la station de référence de Güttingen. Ainsi en 2021, les concentrations maximales de ^{137}Cs dans ces 2 stations ont été enregistrées en février et ont atteint respectivement 0.9 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ à Klingnau et 1.1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ à Güttingen.

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 entre juillet et décembre. La concentration maximale mesurée s'élève à $159 \pm 31 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immission dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/m³.

Tableau 2:

Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2021.

| Lieu | Valeur min/max (Bq/l) | Médiane (Bq/l) |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|
| Niederruntingen * (environs KKM) | < 2.0 - 2.7 | - |
| Niedergösgen * (environs KKG) | < 2.0 - 3.1 | - |
| Full (environs KKL) * | < 2.0 | - |
| Beznau (environs KKB) ** | < 1.8 - 23.0 | 4.2 |
| PSI ** | < 1.8 - 28.2 | 3.7 |
| ZWILAG ** | < 1.8 - 6.8 | - |

* mesures OFSP / ** mesures PSI

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 toutes restées inférieures aux limites de détection, qui se situent globalement entre 0.2 et 2.0 mBq/l par exemple pour le ^{137}Cs . La limite de détection dépend en particulier de la quantité de précipitations.

Les résultats des mesures du tritium (^3H) 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 25 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 2021 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 61 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Cette valeur est plus faible que les années précédentes, en raison de la longue période d'arrêt de la centrale pour révision (révision KKL du 24.5 au 30.11.2021). Les doses supplémentaires qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales sont ainsi très faibles (inférieures à 1 μSv par an).

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 2021 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 2021. 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 (en particulier à Mühleberg), les valeurs enregistrées aux environs des installations nucléaires ne se distinguent pas de celles mesurées sur les sites de référence.

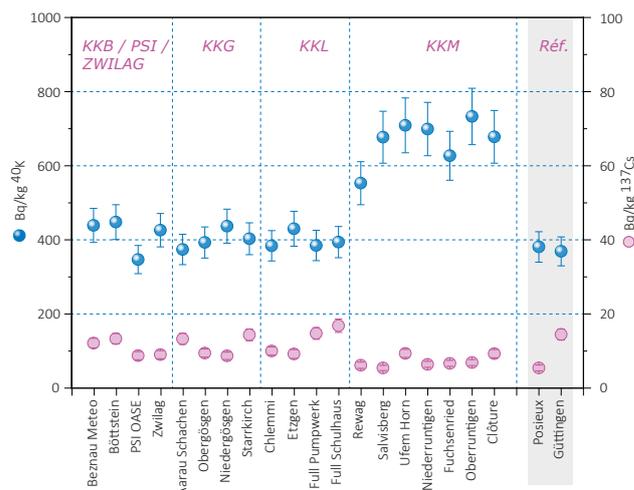


Figure 3:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2021 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisées).

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 KKB), Klingnau (aval de KKG) 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 2021, 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 reste sporadiquement présent dans les échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin. Il est essentiellement dû à la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes nucléaires des années 60; il n'existe ainsi pas de corrélation, pour cet isotope, entre les activités rejetées par les centrales et les valeurs mesurées dans les eaux.

La figure 4 montre que de manière générale, les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2021 dans les eaux de l'Aar et du Rhin sont restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l, à l'exception de la période avril-mai. Comme chaque

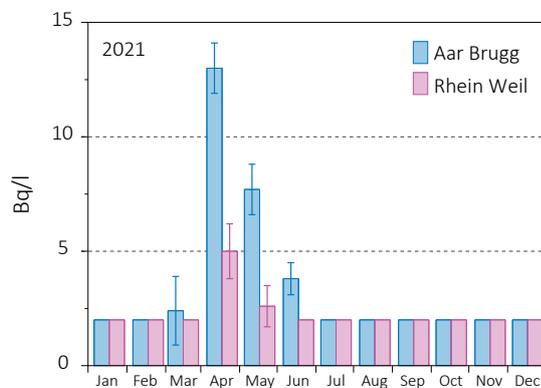


Figure 4:

Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2021.

année à cette période, on constate en effet une légère augmentation des concentrations de tritium dans l'Aar à Brugg (jusqu'à 13 Bq/l) et à Klingnau (jusqu'à 11 Bq/l), ainsi que, dans une moindre mesure, dans le Rhin (jusqu'à 5 Bq/l à Weil am Rhein) en raison de rejets plus importants de tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant sa révision.

Les traces des rejets liquides sont essentiellement mesurables dans les sédiments. En effet, les produits d'activation, comme le ^{54}Mn et le ^{60}Co , ne sont pas (ou peu) dissolus dans l'eau, mais sont présents sous forme particulaire (corrosion) dans les effluents liquides. Des traces de ^{60}Co ont été mesurées à une seule reprise dans les sédiments prélevés à Hagneck en 2021; de faibles activités de ^{54}Mn ont également été sporadiquement décelées dans les sédiments prélevés à Hagneck, ainsi qu'à Klingnau et Pratteln en 2021.

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.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar à Aarberg, Schönenwerd et Döttingen, ainsi que dans le Rhin, près de Augst, en 2021 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle.

Comme chaque année, des échantillons de plantes aquatiques ont également été prélevés en 2021 dans l'Aar (Hagneck, lac du barrage de Klingnau ainsi qu'à Erlinsbach) et le Rhin (Möhlin). Les activités de tous les radionucléides gamma d'origine artificielle sont restées inférieures aux limites de détection. De même, l'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Schönenwerd, Böttstein et Muttentz n'a mis en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle.

Situation radiologique du site démantelé de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens (site soustrait à la législation sur les installations nucléaires)

La surveillance du site de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens effectuée par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP comprend la mesure de la radioactivité (émetteurs gamma, tritium (^3H) et ^{90}Sr) dans les eaux provenant du bassin de contrôle (BdC) et de la chambre de contrôle (CdC). Le bassin de contrôle est un bassin de collecte dans lequel sont réunies les eaux de drainage provenant des 9 drains principaux du système de drainage; la chambre de contrôle est située juste avant le rejet dans la Broye (voir Figure 5). Les prélèvements sont effectués à l'aide de collecteurs automatiques et envoyés à l'IRA par un membre du personnel du dépôt de conservation des objets culturels du Canton de Vaud, qui occupe maintenant l'ancienne caverne des machines.

En 2021, 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 envoyée à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2021. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 0.5 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^3H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2021 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 5.3 ± 0.7 Bq/l et 4.9 ± 0.9 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

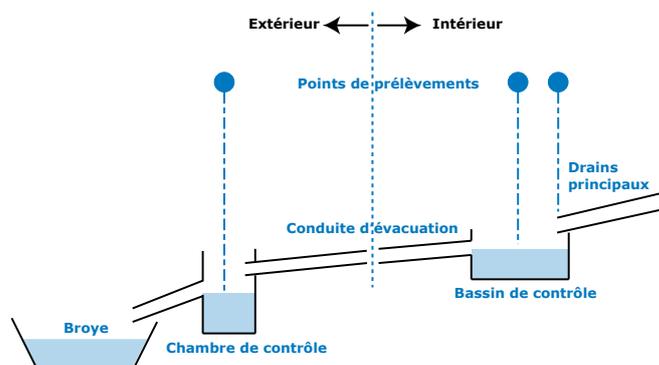


Figure 5 : Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

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 mBq/l n'a été mise en évidence en 2021.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2021.

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 ^3H 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)

F. Malacrida

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 2021, 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 0.002 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 telle manière à ce que seule une fraction infime des rayonnements traverse ces protections; ce type de rayonnement est nommé rayonnement diffusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Conséquemment, le rayonnement diffusé, les effluents gazeux et liquides sont surveillés en continu.

CERN's Accelerator Complex

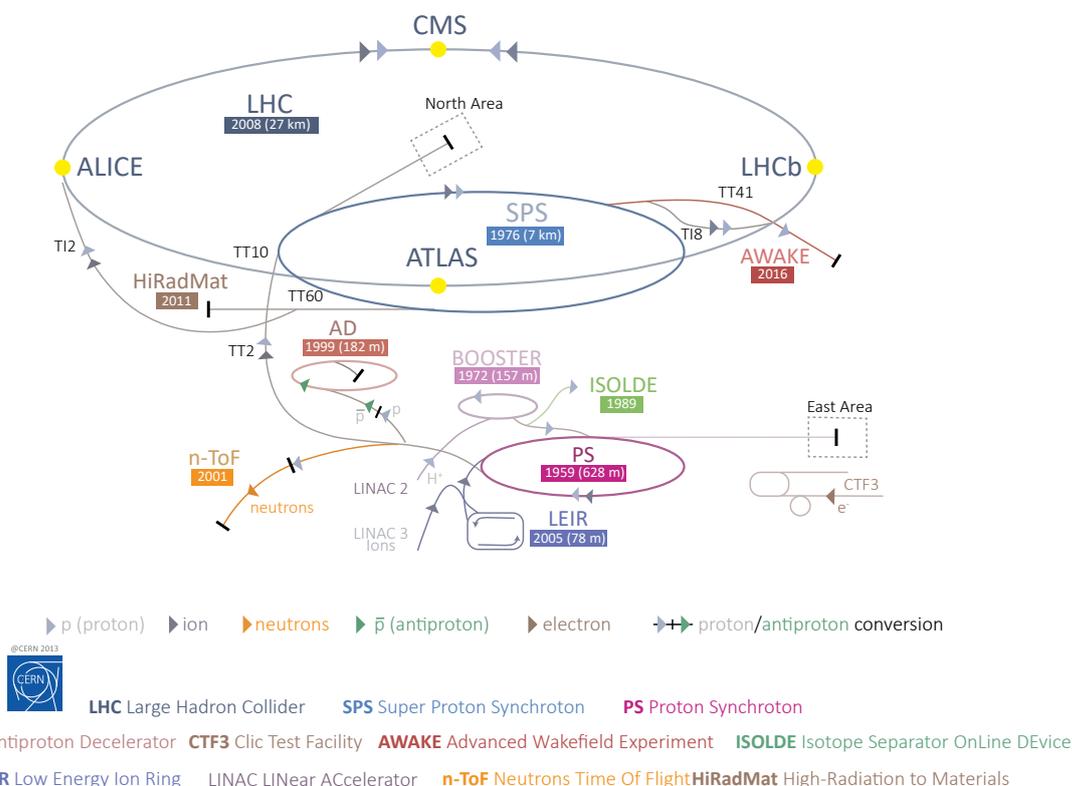


Figure 1:

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 récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radionucléides produits sont principalement des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités. Pour plus d'information, se référer au site: <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 composantes des tunnels, des machines, des cibles et des détecteurs sont sensiblement marquées par leur exposition au faisceau; celles-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 radionu-

cléides peuvent être mesurées dans l'air, lorsque par exemple le tritium dégage des composantes précipitées. L'installation ISOLDE peut 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 2021, 40 stations de ce type étaient en opération.

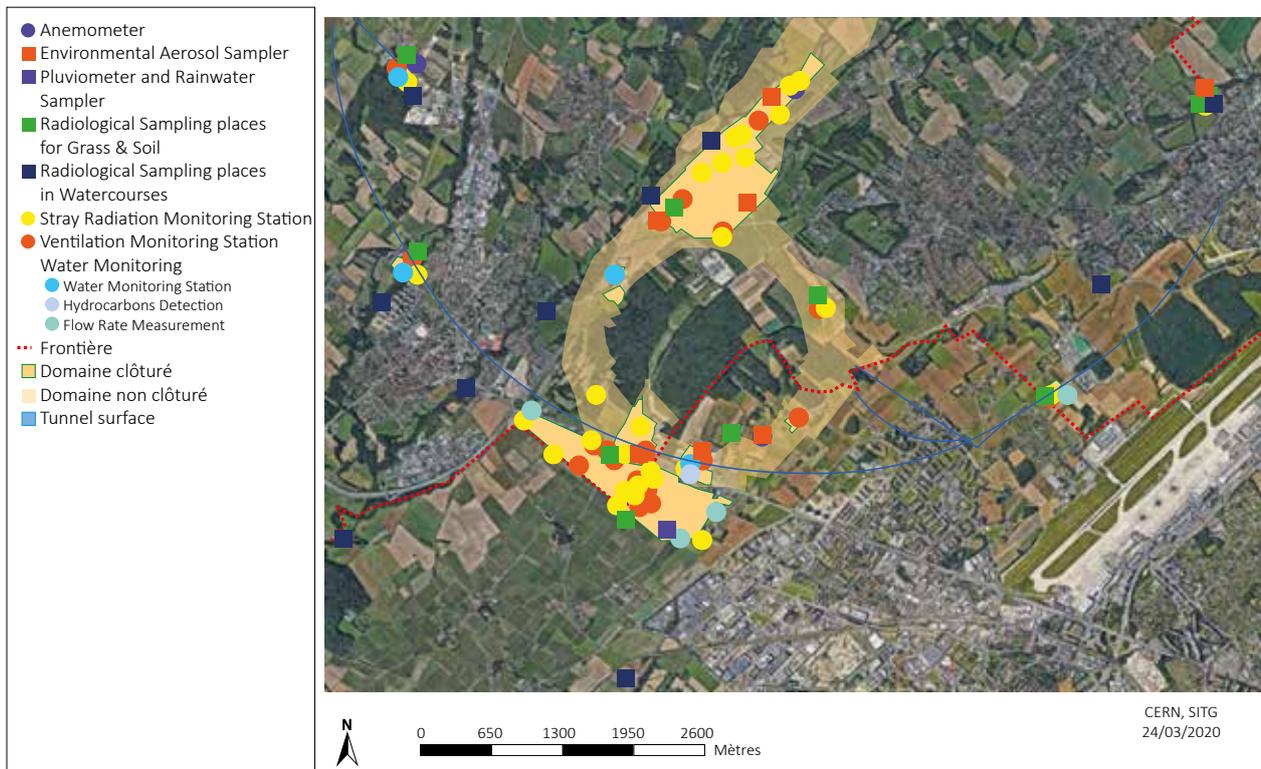


Figure 2:

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.

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-vie courte et échantillonnent les aérosols sur des filtres périodiquement analysés en laboratoire. En 2021, 42 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 2021); 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.

Les niveaux de rayonnement diffusé mesurés ainsi que le bilan des rejets vers l'atmosphère et les cours d'eau sont utilisés pour quantifier l'impact dosimétrique, par le biais de modèles environnementaux et radiologiques reconnus [3, 4]. 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, dont deux collectent aussi les éléments volatils comme l'iode gazeux sur charbons actifs ainsi que l'humidité pour la mesure du tritium dans l'air), 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 2021

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2021

Après 2 ans d'arrêt dédiés à l'amélioration des installations, la majorité des installations du CERN ont progressivement été remises en service. Le LHC n'a fait l'objet que d'une brève période de tests à très faibles intensités, en vue de son redémarrage en 2022.

Sur le site de Meyrin, la zone cible du décélérateur d'antiprotons et la zone est primaire ayant fait l'objet de renouvellements importants, de nouvelles stations de surveillance des rejets atmosphériques y ont été déployées.

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 vont être redirigés vers le sol. Ce phénomène dit du skyshine contribue à une faible hausse de l'équivalent de dose ambiant en clôture des sites. 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).

Tableau 1: Rejets radioactifs dans l'air en 2021.

| Origine du rejet | ¹¹ C, ¹³ N, ^{14,15} O, ⁴¹ Ar | ⁷ Be aérosols | Bêta aérosols | Tritium | ¹³¹ I |
|---------------------------------|---|-----------------------------|------------------|---------|------------------|
| | TBq | MBq | MBq | GBq | MBq |
| LINAC 4 | 0.03 | <LD | <LD | <LD | < LD |
| PS BOOSTER | 1.0 | 160 | 2.0 | 2.9 | < LD |
| MEDICIS * | 0.007 | < LD | < LD | 0.04 | 0.1 |
| ISOLDE | 5.9 | < LD | 0.6 | 3.3 | 169 |
| Anneau principal PS | 1.1 | < LD | < LD | 5.3 | < LD |
| TT70 transfert PS-SPS | 4.0 | < LD | < LD | < LD | < LD |
| n-TOF | 1.3 | 0.2 | 0.001 | 0.9 | 0.02 |
| Zone est primaire | 0.08 | < LD | < LD | 0.005 | < LD |
| Zone est, IRRAD/CHARM | 0.5 | 4.1 | 0.1 | 0.02 | < LD |
| TT10 injection PS-SPS | 0.6 | 2.5 | 0.05 | 1.7 | < LD |
| Évaporation tritium | < LD | < LD | < LD | 33 | < LD |
| SPS BA5 | 3.6 | 0.03 | 0.002 | 1.4 | < LD |
| HIRADMAT | 0.02 | < LD | < LD | 2.9 | < LD |
| LHC Machine Secteurs 2->1, 8->1 | < LD | < LD | < LD | 0.06 | < LD |

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

Tableau 2: Rejets dans les cours d'eau en 2021.

| 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 Préveessin, SPS | 15 | < LD | < LD | < LD | Le Lion (F) |
| Site de Meyrin, Sud-est | 0.003 | < LD | < LD | < LD | Nant d'Avril (CH) |
| Site de Meyrin, Sud-ouest | 2.1 | < LD | < LD | < LD | Nant d'Avril (CH) |
| Site de Meyrin, Ouest | 0.08 | < LD | < LD | < LD | Le Lion (F) |
| Site SPS BA6 + site LHC PA1 | 0.2 | < LD | < LD | < LD | Nant d'Avril (CH) |
| Site LHC PA7 | 0.02 | < LD | < LD | < LD | Affluent du Marquet (F/CH) |
| CNGS, rejet par le site du LHC PA8 | 2.7 | < LD | < LD | < LD | Le Nant (F) |

La Figure 3 présente les doses mesurées par les moniteurs de rayonnement diffusé.

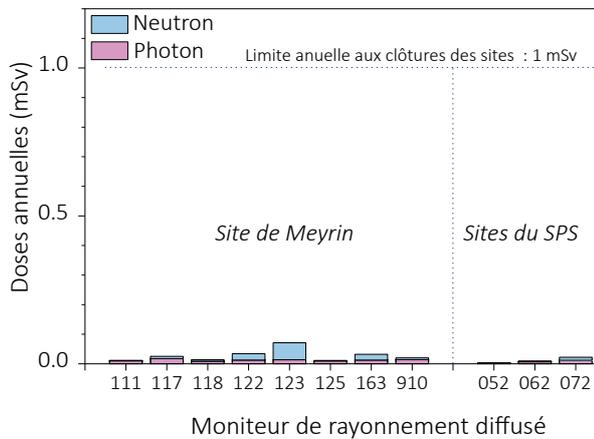


Figure 3: Doses annuelles nettes enregistrées par les moniteurs de rayonnement diffusé situés en clôtures (CERN, 2021).

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 ^7Be ; l'activité bêta totale (majoritairement ^{32}P et ^{33}P), le tritium (^3H) ainsi que les isotopes de l'iode, représentés par I^{131} . 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}O , ^{15}O) et (d) le ^{24}Na d'une demi-vie de 15 heures. Le Tableau 2 présente les rejets de 2021, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés.

Contrairement aux années d'exploitations précédentes, aucun radioélément de demi-vie courte n'a été détecté.

Surveillance des immissions

Les rejets atmosphériques des installations du site de Meyrin ont dérivé en des concentrations locales maximales de $0.09 \pm 0.02 \text{ Bq/m}^3$ en ^3H , de $0.09 \pm 0.05 \text{ mBq/m}^3$ en ^{125}I , $0.14 \pm 0.07 \text{ mBq/m}^3$ en ^{131}I ainsi que $0.6 \pm 0.2 \text{ mBq/m}^3$ en ^{194}Hg , provenant majoritairement de l'installation ISOLDE.

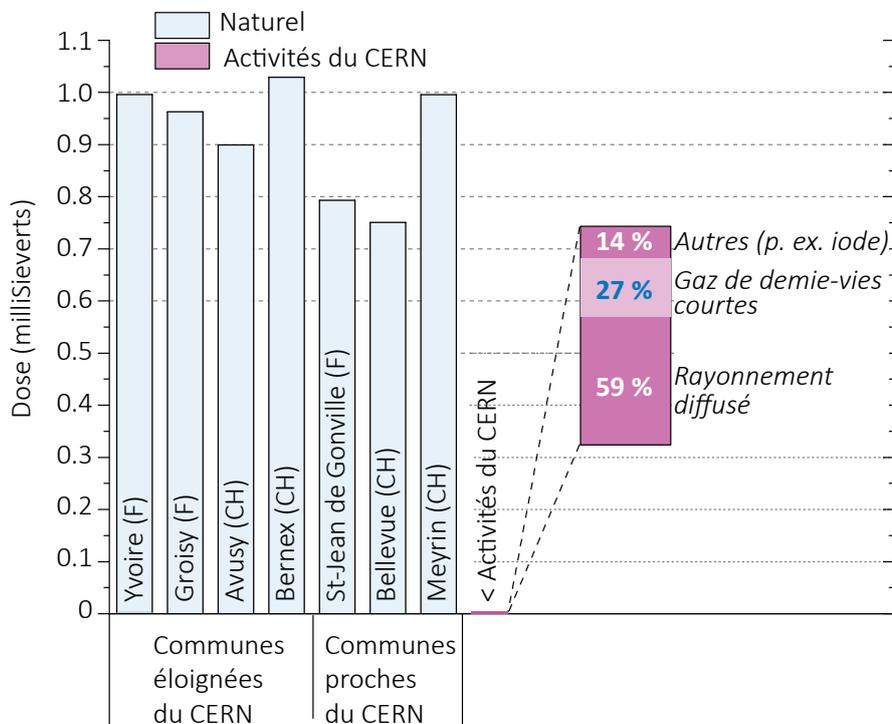


Figure 4: Contribution à la dose annuelle des activités du CERN sur le site CERN de Meyrin, comparée aux variations des doses externes naturelles dans des communes françaises et suisses.

Concernant l'environnement aquatique et comme pour les années précédentes, du ^{54}Mn (3 ± 1 Bq/kg masse sèche) a été mesuré dans l'échantillon de bryophytes prélevées dans le Lion (F), tandis que l'échantillon ponctuel d'eau du Nant (F) contenait 6 ± 1 Bq/l de tritium.

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 négligeable.

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du groupe de référence a été calculée à partir des équivalents de dose ambiants mesurés aux barrières du site [3] et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion basé sur les directives [4, 5]. Les membres du public Suisse ont reçu une dose efficace de maximum 0.002 mSv. Il convient de mentionner que les échanges menés avec les autorités des pays des états hôtes dans le cadre des accords tripartites conduit le CERN à faire évoluer ses méthodes d'évaluation de l'impact. Il n'est cependant pas attendu que l'exercice amènera à des valeurs de doses efficaces significativement différentes dans le futur.

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 2021 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 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 0.002 mSv avec la dose annuelle mesurée en plusieurs localités proches et éloignées des sites CERN.

Références

- [1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2021), Annexe 3.
- [3] Evaluation of doses from stray radiation in the environment of CERN (2021) EDMS# 2386315
- [4] 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).
- [5] 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, 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 2021 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 minime.

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 (13 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 ^3H dans le vin).

A noter qu'après 2 ans d'arrêt pour maintenance, la majorité des installations du CERN ont progressivement été remises en service en 2021. Le LHC quant à lui n'a fonctionné que pour une brève période de tests à très faibles intensités, en vue de son redémarrage en 2022.

Mesures de l'exposition ambiante

Douze sites ont été surveillés en 2021 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. En plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée.

Les équivalents de dose ambiants des neutrons et des photons relevés dans les emplacements autour du CERN sont généralement restées faibles en 2021, 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

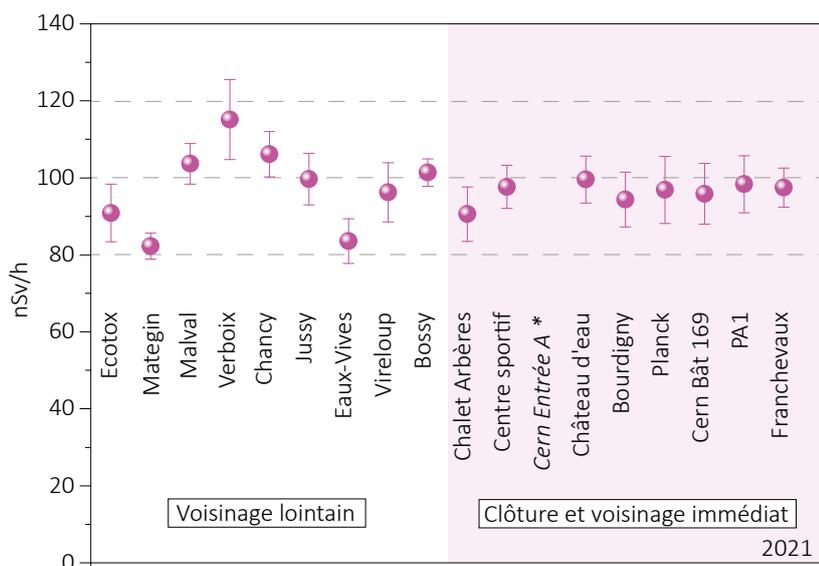


Figure 1:

Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2021 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol (* pas de mesure en 2021).

les gammas). Ainsi, les doses des neutrons étaient faibles ou inférieures à la limite de détection en presque tous les points, sauf aux points situés près du synchrotron à protons à Meyrin, où des doses clairement mesurables (0.047 à 0.178 mSv par trimestre) ont été observées après le redémarrage de l'installation en mars et jusqu'à la fin de l'année. On observe également des doses neutrons en un point (proche de NA62) à Prévessin, mais uniquement au 4^{ème} trimestre. C'est une situation qui correspond à celle observée en 2018 et auparavant, avec les installations en exploitation.

La dose des photons correspond partout à l'irradiation naturelle sauf en un point situé à Prévessin où une valeur 2 fois plus élevée a été mesurée au 3^{ème} trimestre, ce qui s'est déjà produit en 2016 et 2017 (et auparavant en 2006, 2007, 2010 et 2012).

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2021 sur 8 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants 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 gammas se sont échelonnées entre 82 et 115 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 96 ± 3 nSv/h; moyenne des sites distants 98 ± 11 nSv/h).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air, URAnet, située au CERN a fonctionné sans interruption en 2021. Les nouveaux moniteurs spectrométriques permettent de mesurer en continu les concentrations individuelles des différents émetteurs gamma présents dans l'air (aérosols) (voir chapitre 4.2). Si les concentrations du ^{214}Pb et du ^{214}Bi , descendants du radon, sont clairement mesurables, les concentrations des émetteurs gamma d'origine artificielle sont toutes restées inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 3 à 7 mBq/m³ pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2021. 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/m³.

Les résultats des mesures hebdomadaires des filtres aérosols à haut débit (HVS) du CERN ont confirmé, comme les années précédentes, la prédominance des radioéléments d'origine naturelle, tels que ^7Be et ^{210}Pb (fig. 2). Le cas du ^7Be 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).

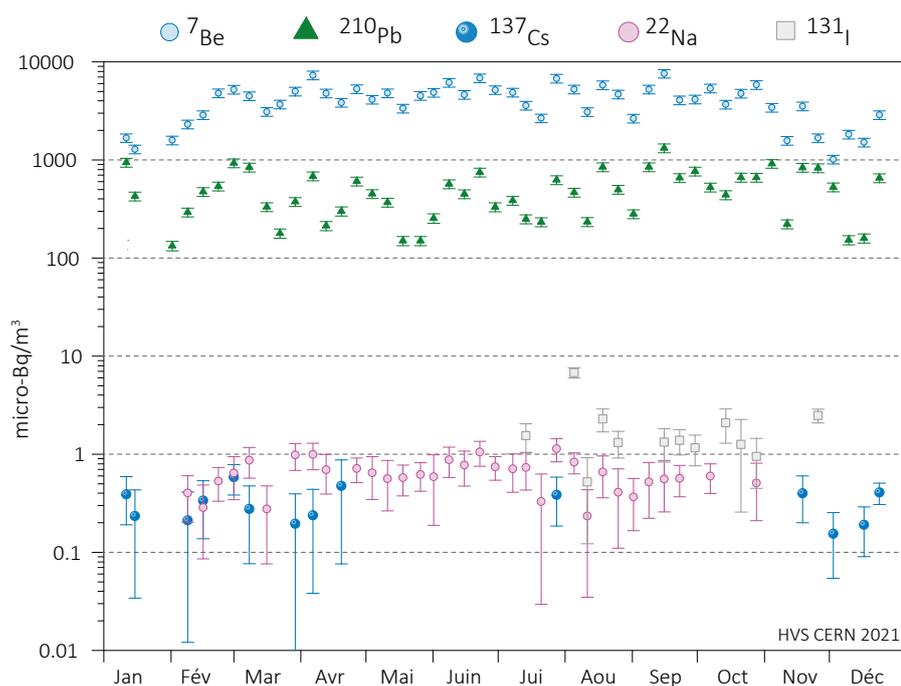


Figure 2 :
Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2021.

Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ${}^7\text{Be}$ mesurées en 2021 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Tableau 1 :
Concentrations du ${}^7\text{Be}$ mesurées en 2021 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

| Station de collection à haut débit | Valeur min/max (mBq/m ³) | Moyenne (mBq/m ³) |
|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| CERN (Meyrin/GE)* | 1.0 - 7.6 | 4.1 ± 1.6 |
| Posieux/FR | 1.2 - 7.3 | 4.4 ± 1.7 |
| Klingnau/AG | 1.0 - 6.8 | 3.7 ± 1.5 |
| Güttingen/TG | 1.2 - 7.8 | 4.2 ± 1.7 |
| Cadenazzo/TI | 1.4 - 8.2 | 4.8 ± 1.5 |

Des traces de ${}^{22}\text{Na}$, également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre 0.2 et 1.1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ${}^{137}\text{Cs}$ (valeur maximale de $0.6 \pm 0.2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont, comme partout en Suisse, été détectées à plusieurs reprises.

Avec la remise en exploitation des installations, des traces de ${}^{24}\text{Na}$ (46 à 78 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) et de ${}^{131}\text{I}$ (0.5 à 7 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) ont à nouveau été décelées dans les filtres aérosols en 2021, contrairement aux années 2019 - 2020. Ces radioisotopes de courte demi-vie (15h pour le ${}^{24}\text{Na}$ et 8 jours pour le ${}^{131}\text{I}$) sont produits dans les installations du CERN et sont sporadiquement mesurables dans l'environnement quand celles-ci sont en fonction. Même si la concentration d' ${}^{131}\text{I}$ mesurée dans les filtres aérosols ne représente qu'une fraction de la concentration totale d' ${}^{131}\text{I}$ présent dans l'air (N.B la partie gazeuse n'est pas mesurée sur les filtres aérosols, mais seulement par le moniteur d'iode du réseau URAnet), l'impact radiologique de ces radionucléides est resté négligeable. Les concentrations maximales sont en effet restées nettement inférieures à 0.1% des limites d'immissions définies pour ces radionucléides dans l'air selon l'Ordonnance sur la radioprotection.

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 3 montre que les valeurs mesurées au voisinage du centre de recherche sont tout à fait comparables à celles relevées dans des sites hors de son influence, tel que Posieux/FR (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au chapitre 3.1). Seuls les résultats enregistrés au point de mesure situé à l'intérieur de la clôture du

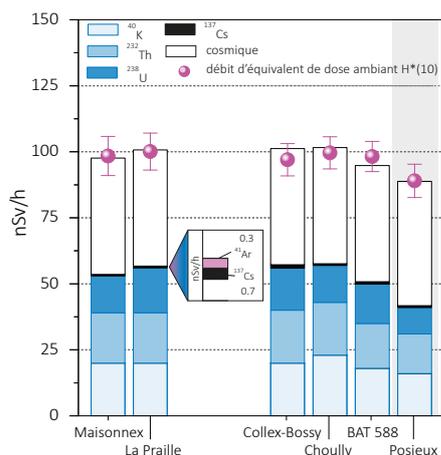


Figure 3 :

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres *in situ* (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2021. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

centre de recherche (BAT 588) s'en distinguent légèrement. En effet, d'infimes traces de ^{41}Ar , un gaz rare de demi-vie inférieure à 2 heures produit dans les accélérateurs du centre de recherche, ont pu être enregistrées dans l'air sur ce site. La contribution supplémentaire à l'exposition ambiante due à ce radionucléide est minime (de l'ordre de 0.3 nSv/h).

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 naturelle, dont les concentrations prédominent, on y détecte encore les traces des injections artificielles des essais nucléaires des années 50 et 60 et dans une moindre mesure de l'accident de Tchernobyl.

Mesures dans le milieu aquatique

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle mesurable en 2021. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par le département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme ont

fait l'objet d'un rapport spécifique¹.

25 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 2 novembre 2020 et le 12 novembre 2021, avec un temps d'intégration de 13 ± 4 jours par échantillon. A noter que certaines périodes (3.-27.11.20, 12-22.01.21, 3-16.05.21 et 20-24.06.21) 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 $1.2 \mu\text{m}$. 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 ^7Be est le principal radioisotope détecté (figure 4). Son activité moyenne (lorsque l'isotope est présent) pour la période couverte par le rapport s'est élevée à 0.37 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ^7Be (1.17 ± 0.04 Bq/l) a été mesurée au mois de septembre 2021.

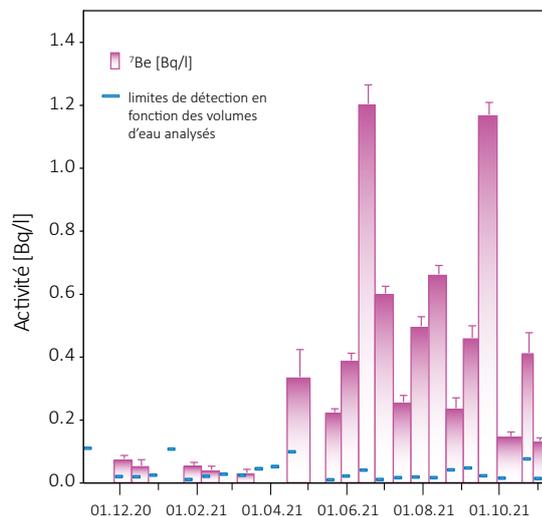


Figure 4 :

Activités du ^7Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'Avril entre novembre 2020 et novembre 2021

Le ^{137}Cs , issu des tests nucléaires dans l'atmosphère et de l'accident de la centrale de Tchernobyl, n'a été mesuré sur les particules qu'à quatre reprises,

1 J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°22 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2020 – Novembre 2021; Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Janvier 2022)

avec une valeur maximale de 0.011 ± 0.001 Bq/l. Le ^{22}Na a été détecté dans quatre échantillons également (0.003 à 0.007 Bq/L), avec des valeurs très proches de la limite de détection.

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 $\text{m}^3/\text{période}$) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de ^7Be pour la période 2020 - 2021 est ainsi de $1'641$ MBq par an au minimum et de $2'001$ MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent au niveau des années précédentes, qui montraient une moyenne de $1'640$ MBq/an (figure 5).

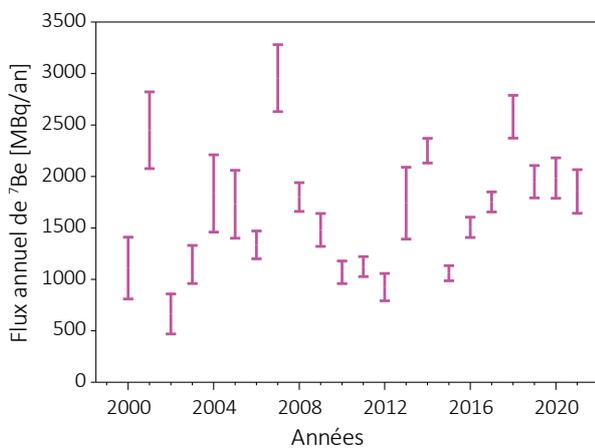


Figure 5 : Estimation des flux annuels minimums et maximums de ^7Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^7Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons avec des activités spécifiques variant respectivement entre 502 et $1'574$ Bq/kg, et entre 3.6 et 10.7 Bq/kg. Ces résultats se situent dans la moyenne des valeurs mesurées les années précédentes.

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 30 septembre au 29 octobre 2021. Sur chaque site, des bryophytes ont été prélevées le 30 septembre 2021. En raison de l'absence de bryophytes sur les points PA7 et PA8, aucune mesure pour ce type d'échantillon n'a pu être effectuée pour ces sites. A noter que le LHC, à l'arrêt depuis 2019, n'a été redémarré qu'à la fin octobre 2021 pour des tests à faible intensité de faisceau ; il n'était donc pas en fonction pendant la période couverte par le rapport du département F.-A. Forel.

Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux points de rejet du LHC se sont échelonnées entre 43 et $1'128$ Bq/kg pour le ^7Be et entre 3.9 et 15.7 Bq/kg pour le ^{137}Cs . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^7Be variant entre 124 et $3'928$ Bq/kg et de 3.9 Bq/kg pour le ^{137}Cs , certains sites présentant des valeurs inférieures à la limite de détection. L'activité très élevée en ^7Be ($3'928 \pm 264$ Bq/kg) du point P6 (proche du Bois sous Villars Dame) est la valeur la plus élevée mesurée depuis le début de la surveillance.

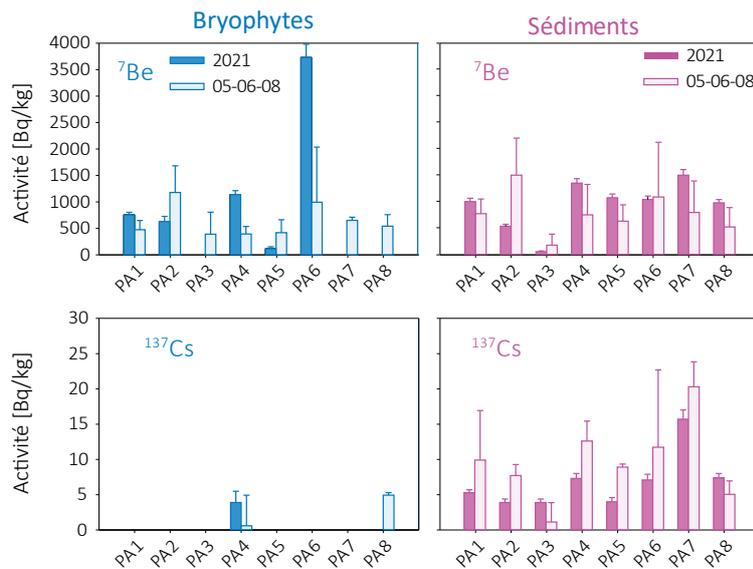


Figure 6 : Activités du ^7Be et du ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8) en 2021 comparées aux valeurs moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008 (valeurs 05-06-08), avant la mise en service du LHC. Il n'y a pas d'échantillon de bryophytes aux points PA7 et PA8 en 2021.

Une origine naturelle est plausible, car l'activité en ^{210}Pb , également d'origine essentiellement atmosphérique, est nettement plus élevée dans cet échantillon (448 Bq/kg) que sur les autres sites (~ 150 Bq/kg).

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 ^7Be et le ^{137}Cs . Le ^7Be 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.

Des traces de ^{22}Na pouvant provenir du CERN ont été détectées en 2021 dans les eaux du Nant d'Avril, avec toutefois des valeurs très proches des limites de détection. 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 (à l'arrêt pendant la période de surveillance mise en œuvre par le département F.-A. Forel).

Conclusions

Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec le département F.-A. Forel, a montré que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement et la population avoisinante a été faible en 2021.

Si des traces des radionucléides de courte demi-vie produits par les installations du CERN, comme le ^{24}Na , l' ^{41}Ar ou l' ^{131}I , ont sporadiquement pu être décelées dans l'air au voisinage du CERN en 2021, leur impact radiologique est resté négligeable. 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.

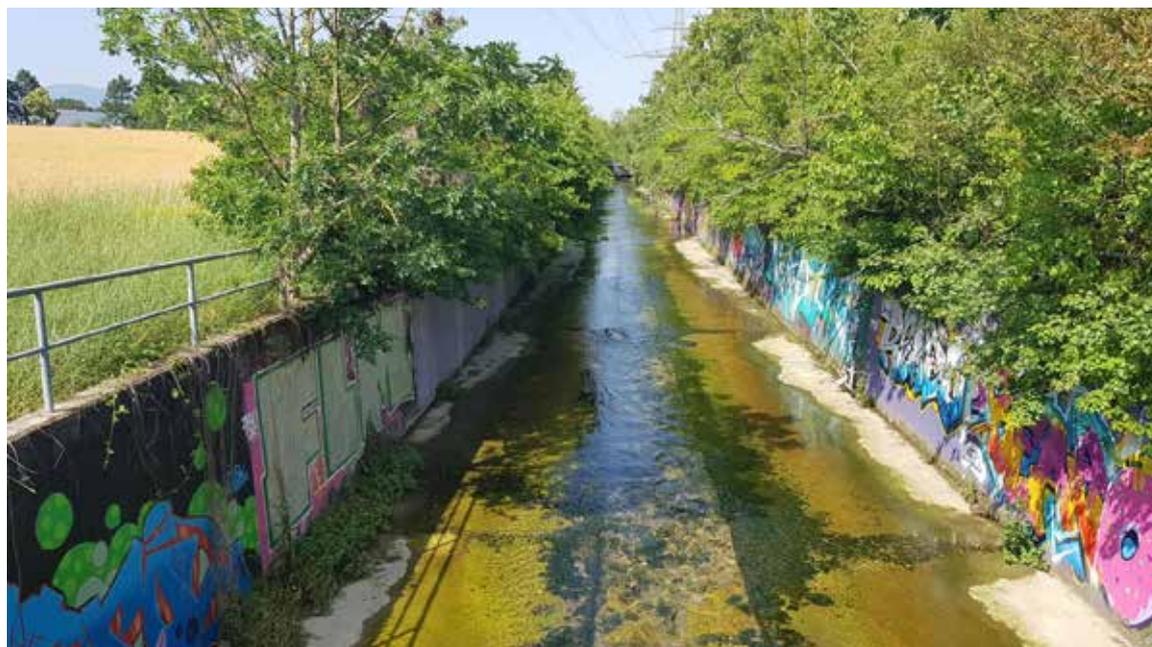


Figure 7 :
Nant d'Avril



Chapitre Kapitel 9

Industries et
hôpitaux

Industrien und
Spitäler

Emissions des industries
Emissions des hôpitaux
Surveillance au voisinage des industries
Radionucléides provenant de la Médecine
dans les stations d'épuration des eaux usées
Plan d'action Radium

Emissionen der Betriebe
Emissionen der Spitäler
Überwachung in der Umgebung von Industrien
Radionuklide aus der Medizin in Kläranlagen
Aktionsplan Radium

2021

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 ^{14}C markierten Stoffen zu. Sämtliche Abgabelimiten wurden im Berichtsjahr eingehalten.

Überwachte Betriebe

Die Suva betreut als Aufsichtsbehörde folgende Betriebe, die mit offenen radioaktiven Stoffen arbeiten:

Produktionsbetriebe (Total 3 Betriebe)

Radioaktive Stoffe werden benötigt für die Produktion von:

- Radioaktiv markierten Verbindungen für die Forschung (^3H , ^{14}C)
- Kalibrierquellen (^{90}Sr , ^{147}Pm , ^{204}Tl).
- Tritiumgaslichtquellen (^3H)

Tabelle 1:

Einkauf radioaktiver Stoffe 2011 - 2021.

| | Isotope | 2021 | 2020 | 2019 | 2018 | 2017 | 2016 | 2015 | 2014 | 2013 | 2012 | 2011 | Einheit |
|--------------------------|-------------------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Produktionsbetriebe | ^3H | 12.3 | 12.11 | 11.26 | 12.75 | 7.31 | 10.54 | 5.74 | 4.07 | 7.53 | 15.11 | 10.03 | PBq |
| | ^{14}C | 0.19 | 0.26 | 0.26 | 0 | 0 | 0.07 | 0 | 0.74 | 0.58 | 0.19 | 1.33 | TBq |
| | ^{147}Pm | 0 | 0.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.03 | 5.76 | 0.07 | TBq |
| Forschungsbetriebe | ^3H | 0.1 | 7.4 | 0.2 | 7.6 | 7.6 | 3.8 | 7.6 | 0.2 | 11.4 | 18.8 | 11.4 | TBq |
| | ^{14}C | 10.4 | 51.1 | 35.4 | 21.3 | 17.1 | 41.3 | 53.9 | 158.9 | 76.0 | 192.6 | 200.6 | GBq |
| | ^{32}P | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.9 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 1.4 | 1.0 | 1.4 | GBq |
| | ^{35}S | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 1.4 | 1.4 | 2.4 | 2.4 | 3.7 | 2.0 | 0.8 | GBq |
| | ^{51}Cr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | GBq |
| | ^{125}I | 0.1 | 0 | 0.2 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 14.1 | 12.1 | 15.7 | GBq |
| Analytische Laboratorien | ^{125}I | 0.05 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 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 5 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 2021 haben sämtliche Betriebe die Abgabelimite eingehalten. In den Tabellen 2a und 2b sind die Jahresabgabewerte der Basler Chemie an die Abluft und das Abwasser mit den entsprechenden Abgabelimite zusammengefasst. Der Synthesebetrieb bei Novartis wurde im Verlauf von 2016 eingestellt. Dies führte dazu, dass in diesem Betrieb keine Abgaben an die Abluft mehr gemessen wurden. Tabelle 3 gibt die Aktivitätsmengen an, die gemäss Art. 116 der Strahlenschutzverordnung (StSV) in einem Ofen mit Zustimmung des BAG verbrannt wurden.

Die Tritium-Abgaben der drei Produktionsbetriebe, sowie die Tritium-Messungen in der Umgebung der Firma RC Tritec AG sind in den Figuren 1a, 1b, 1c und 1d graphisch dargestellt. Der 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 Abgabelimite 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. In Tabelle 4 sind die bewilligten Jahresabgabelimite der drei Produktionsbetriebe zusammengefasst.

Tabelle 2a :

Abgabe radioaktiver Stoffe an die Abluft während des Jahres 2021 (GBq).

| | Abgaben an die Abluft (GBq) | | Abgabelimite (GBq) | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | ^3H | ^{14}C | ^3H | ^{14}C |
| Hoffmann-La Roche AG | 55.4 (org.) 0 (Gas) | 3.2 | 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 2021 (GBq).

| | Abgaben an das Abwasser (GBq) | | Abgabelimite (GBq) | |
|----------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | ^3H | ^{14}C | ^3H | ^{14}C |
| Hoffmann-La Roche AG | 2.0 | 0.2 | 80 | 40 |
| Novartis Pharma AG | 0.5 | 0.0 | 300 | 30 |

Tabelle 3 :

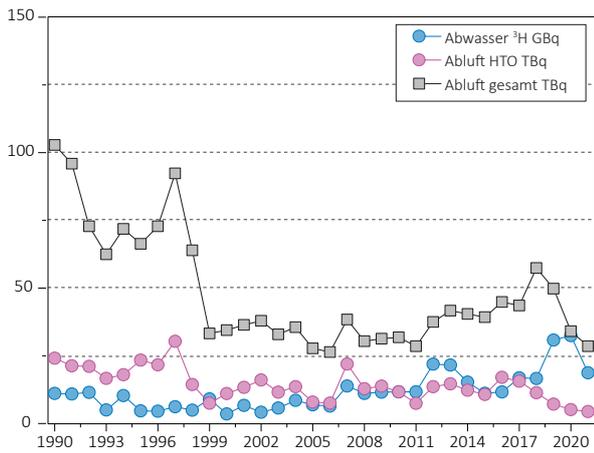
Verbrennung in einem Ofen mit Zustimmung des BAG gemäss StSV, Art. 116 während des Jahres 2021 (GBq).

| | ^3H (GBq) | ^{14}C (GBq) |
|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Veolia Basel | 485.1 | 76.6 |
| KVA St. Gallen | 492.8 | 0 |
| KVS Dottikon | 0 | 2'508 |
| Energie Wasser Bern | 26.5 | < 0.001 |

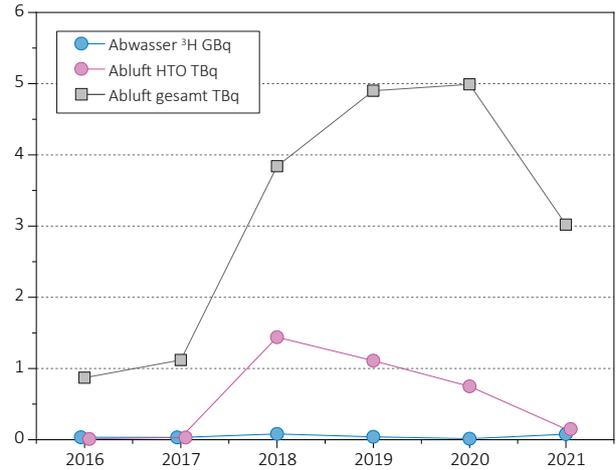
Tabelle 4 :

Jahresabgabelimite der Produktionsbetriebe.

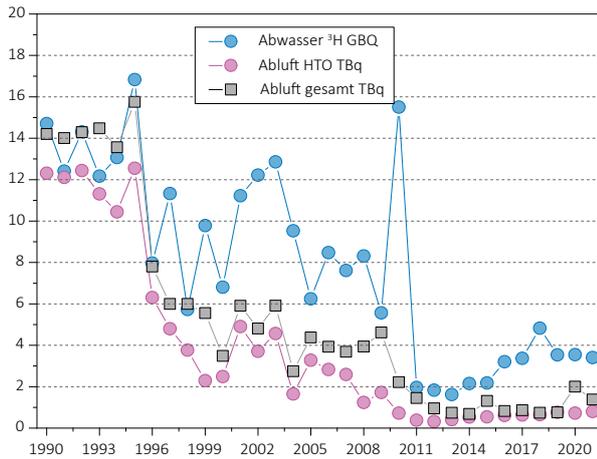
| | Abwasser | Abluft | |
|-----------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|
| | ^3H | ^3H (HT) | ^3H (HTO) |
| MB-Microtec AG, Niederwangen / BE | 40 GBq | 370 TBq | 37 TBq |
| Smolsys AG, Root / LU | 1.3 GBq | 40 TBq | 4 TBq |
| RC-Tritec AG, Teufen / AR |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



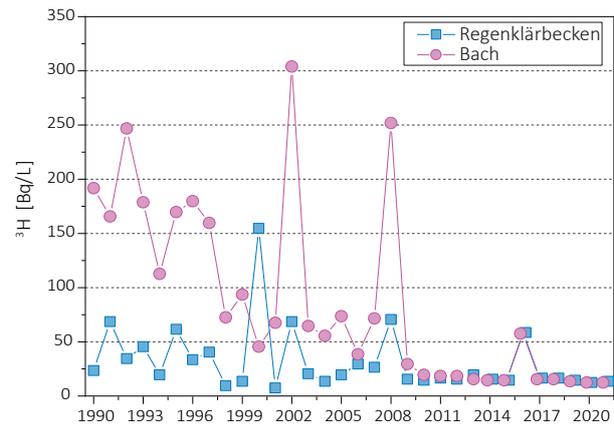
Figur 1a:
Mb-microtec AG, Niederwangen/BE: Jahreswerte der Emissionen.
Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt
und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



Figur 1b:
Smolsys AG, Root/LU: Jahreswerte der Emissionen.
Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt
und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



Figur 1c:
RC Tritec AG, Teufen/AR: Jahreswerte der Emissionen.
Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt
und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft.



Figur 1d:
RC-Tritec AG, Teufen/AR: Umgebungsüberwachung.
Die Proben der Umgebungsüberwachung werden von der Suva
analysiert.

9.2

Emissionen der Spitäler

R. Linder, N. Stritt, Th. Flury

Sektion Forschungsanlagen und Nuklearmedizin, BAG, Bern

Zusammenfassung

Gegenüber dem vergangenen Jahr hat sich der Verbrauch an Lutetium 177 (^{177}Lu) fast verdoppelt. Dies ist offensichtlich auf einen weiteren Anstieg der ^{177}Lu PSMA Therapie, welche zur Behandlung von Patienten mit Prostatakarzinom eingesetzt wird, zurückzuführen. Möglicherweise sind die therapeutischen Anwendungen ebenfalls aufgrund von Pandemie-Effekten gegenüber 2020 wieder angestiegen. Dies würde den Anstieg bei den Jod 131 (^{131}I) Therapien und den erhöheten Yttrium 90 (^{90}Y) und Holmium 166 (^{166}Ho) Umsatz zur Therapie von Lebermetastasen begründen. Da Patienten zur ^{177}Lu PSMA- und Radioiod- Therapie stationiert werden müssen, steigt dadurch auch die Abgabe ans Abwasser wieder an. Die Abgabe der zu diagnostischen Zwecken verwendeter Radionuklide wie Technetium 99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 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 Aufsichtsbehore 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 Schilddrusentherapie verwendet wird, kann den Patienten bis zu einer Aktivität von 200 MBq ambulant verabreicht werden. Bei höheren Aktivitäten werden die Patienten mindestens für die

ersten 48 Stunden in speziellen Therapiezimmern isoliert und dürfen erst entlassen werden, wenn eine Dosisleistung von $10\ \mu\text{Sv/h}$ 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 (IG_{GW}) nicht überschreiten.

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

Tabelle 1:

Applikationen radioaktiver Stoffe zu therapeutischen Zwecken 2021 in MBq.

| | Spital | ^{131}I amb. | ^{131}I stat. | ^{186}Re | ^{169}Er | ^{90}Y | ^{177}Lu | ^{223}Ra | ^{166}Ho |
|-------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------|--------------|------------|------------------|-------------------|--------------|----------------|
| AG-40.2 | Kantonsspital Aarau AG | | | 74 | | 2'570 | | 169 | |
| AG-579.2 | Kantonsspital Baden AG | | 62'457 | 302 | | 6'325 | 224'600 | 21 | |
| BE-32.2 | Klinik Linde AG | 800 | | | | | | | |
| BE-138.2 | Klinik Engeried | | | | | | | 34 | |
| BE-284.12 | Inselspital Bern | | 307'900 | 228 | 237 | 45'800 | 1'556'000 | 64 | |
| BL-158.2 | Kantonsspital Baselland | 805 | | | | 185 | | | |
| BL-315.2 | Kantonsspital Liestal | 413 | | | | 756 | | 17 | |
| BS-30.2 | St. Claraspital Basel | | | | | 4'757 | | | |
| BS-350.1 | Universitätsspital Basel | | 273'198 | 185 | | 10'480 | 3'453'090 | 17 | 102'460 |
| FR-103.2 | HFR Hôpital fribourgeois | | 85'371 | | | 607 | | 29 | |
| GE-200.3 | Hôp. universitaires de Genève HUG | 202 | 225'641 | | | 107657 | | 80 | |
| GE-752.3 | Hôpital de la Tour | | | | | | | 42 | |
| GE-1633.1 | GRGB Santé SA | | | | | | | 22 | |
| GR-54.2 | Kantonsspital Graubünden | 420 | 80'007 | | 22 | 3'695 | | 22 | |
| LU-1.2 | Hirslanden-Klinik St. Anna | | 165'576 | | 74 | 1'120 | 1'984'838 | 69 | |
| LU-527.11 | Luzerner Kantonsspital LUKS | | 94'548 | | 0 | 56'419 | | 102 | |
| NE-169.6 | Hôpital Neuchâtelois | 2'095 | | | | | | 17 | |
| SG-195.3 | Kantonsspital St. Gallen | | 217'056 | 74 | 37 | 3'150 | 1'035'130 | 167 | |
| SO-29.6 | Bürgerspital Solothurn | | | | | 370 | | | |
| TG-46.2 | Spital Thurgau Münsterlingen | | 31'697 | 185 | | 398 | | 61 | |
| TI-453.6 | Ospedale Regionale Bellinzona | 1'600 | 106'490 | 74 | 70 | 18'900 | 244'200 | 173 | |
| TI-482.4 | Ospedale Civico | 3'000 | | 74 | 74 | 1'665 | | | |
| VD-129.2 | Clinique de la Source | 2'339 | | | | | | 26 | |
| VD-832.14 | CHUV Lausanne | 926 | 162'863 | 77 | | 816'359 | 1'954'028 | 36 | |
| VS-125.1 | RSV Hôpital du Valais | | 48'960 | | | | | | |
| ZH-117.2 | Klinik Hirslanden | 312 | | | | 428'710 | | 64 | |
| ZH-348.7 | Universitätsspital Zürich | | 131'385 | 444 | 37 | 63'245 | 339'514 | | |
| ZH-352.3 | Kantonsspital Winterthur | 1'000 | 178'650 | 591 | | 46'053 | | 149 | |
| ZH-1171.13 | Stadtpital Triemli | 7'400 | 275'476 | | | 18'030 | | 162 | |
| ZH-4221.1.1 | Schilddrüsen-Praxis Zürich | 340 | | | | | | | |
| | Gesamte Schweiz 2021 | 21'652 | 2'447'275 | 2'308 | 551 | 1'637'251 | 10'791'400 | 1'544 | 102'460 |

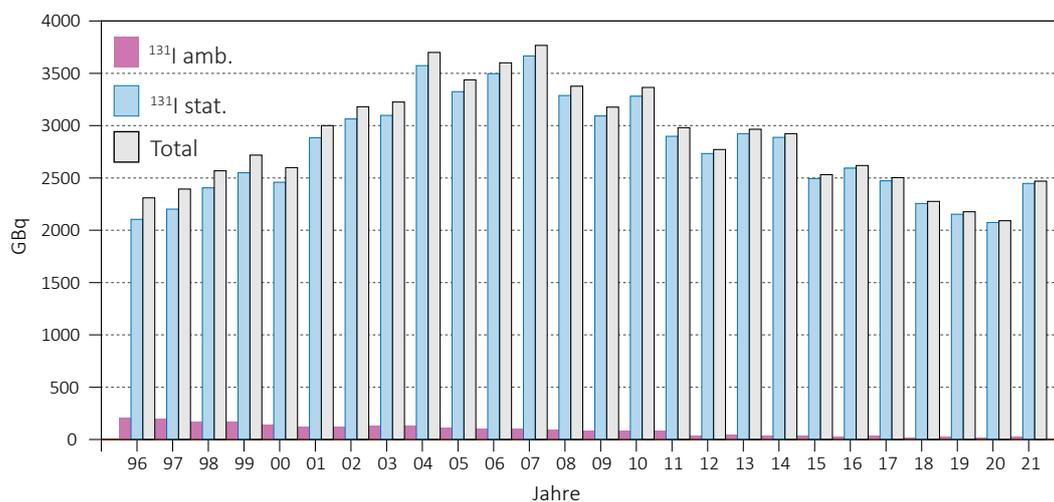
an die Umwelt abgegeben (^{177}Lu), wird dieser Anteil in ^{131}I Äquivalente umgerechnet und in die Abgabeaktivität mit einbezogen (46 Bq ^{177}Lu entsprechen 1 Bq ^{131}I Äquivalent). Die Spitäler sind verpflichtet,

die Abgaben radioaktiver Abwässer so gering wie möglich zu halten und dazu laufend organisatorische und technische Optimierungsmassnahmen vorzunehmen.

Tabelle 2:

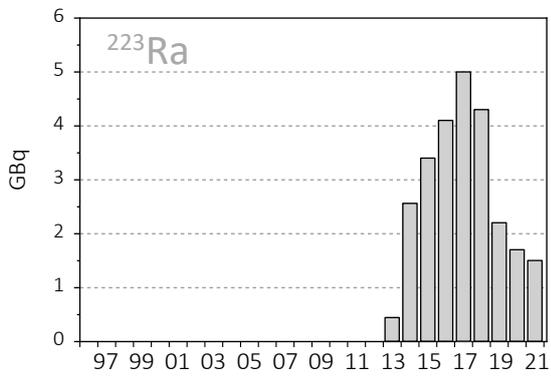
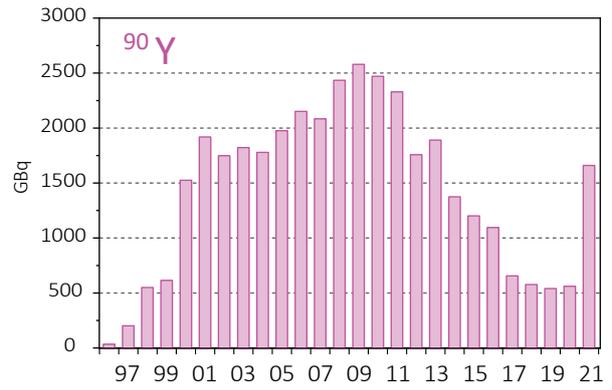
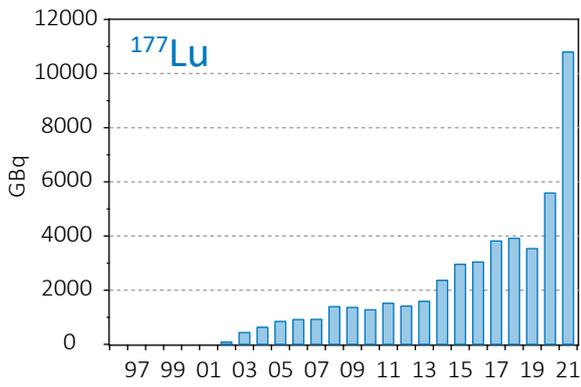
Abgabe von ^{131}I und ^{177}Lu aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2021 in MBq ^{131}I Äquivalent.

| Abgabe MBq/ Monat Nuklearmedizin | Jan. | Feb. | März | April | Mai | Juni | Juli | Aug. | Sept. | Okt. | Nov. | Dez. | Total 2020 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------------|
| Kantonsspital Graubünden | 0.35 | 0.96 | 2.04 | 12.28 | 2.99 | 0.33 | 1.65 | 20.21 | 12.99 | 8.76 | 5.51 | 0.42 | 68.5 |
| Osp. Regionale Bellinzona | | 1.75 | 2.87 | 0.70 | 0.90 | 0.86 | 2.34 | | | 0.90 | | 0.57 | 10.9 |
| Kantonsspital St. Gallen | 59.95 | 212.29 | 64.23 | 63.34 | 9.74 | 27.43 | 0.84 | 12.47 | 27.52 | 37.12 | 53.12 | | 568.1 |
| Stadtspital Triemli | 1.60 | 1.10 | | 0.90 | 1.60 | 3.10 | 1.00 | 2.30 | 1.50 | | 2.20 | 1.90 | 17.2 |
| HFR Hôpital fribourgeois | 0.60 | | 8.70 | | | 0.20 | | | 0.90 | | 14.30 | | 24.7 |
| Hôp. Uni. de Genève HUG | 9.00 | | 72.00 | 15.00 | | 1.00 | 81.00 | 19.00 | | 24.00 | 49.00 | | 270.0 |
| RSV Hôpital du Valais | 1.74 | | | | 0.18 | | 0.24 | | 7.58 | | | 2.17 | 11.9 |
| Kantonsspital Baden AG | 3.66 | 6.90 | 11.32 | 5.89 | 6.65 | 0.16 | 0.57 | 0.37 | 18.40 | | 11.59 | | 65.5 |
| CHUV Lausanne | 0.43 | 1.69 | 2.22 | 32.72 | 5.58 | 5.16 | 37.50 | 11.37 | 12.32 | 15.11 | 7.71 | 1.52 | 133.3 |
| Universitätsspital Basel | 415.46 | 233.74 | 297.64 | 305.22 | 309.98 | 535.98 | 445.18 | 457.28 | 346.15 | 288.74 | 454.13 | 205.94 | 4295.4 |
| Kantonsspital Winterthur | | 1.52 | 3.47 | 4.35 | 5.00 | 8.50 | 10.90 | 3.28 | 3.10 | 8.10 | 6.20 | 8.70 | 63.1 |
| Universitätsspital Zürich | | 71.70 | | 1.72 | 52.90 | | 25.80 | | | 0.27 | 0.21 | | 152.6 |
| Hirslanden-Klinik St. Anna | | 6.11 | 0.57 | 12.48 | | 0.55 | 17.33 | 11.06 | 3.80 | 8.75 | 8.39 | 6.20 | 75.2 |
| Luzerner Kantonsspital LUKS | | | | 0.50 | | 5.00 | | | 20.80 | | 5.80 | | 32.1 |
| Insel Bern | 6.87 | 32.31 | 3.67 | 4.26 | 2.12 | 7.46 | 19.10 | 25.02 | 8.07 | 18.40 | 0.45 | 7.16 | 134.9 |
| Gesamte Schweiz 2021 MBq | | | | | | | | | | | | 5'923.5 | |

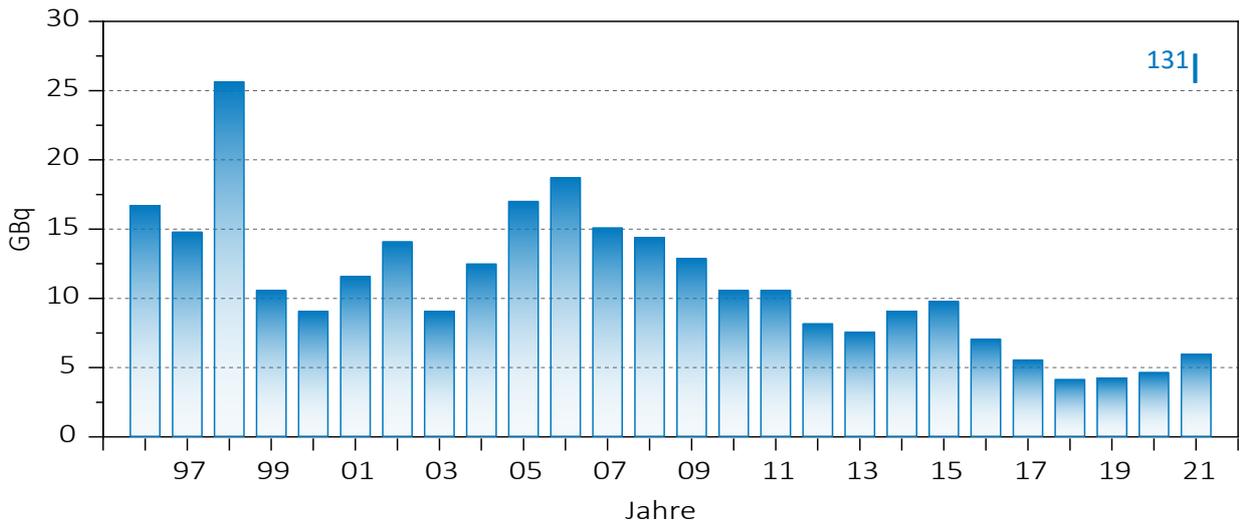


Figur 1:

Umsatz an ^{131}I und ^{177}Lu zu therapeutischen Zwecken in GBq ^{131}I Äquivalent.



Figur 2:
Umsatz weiterer Therapie-Nuklide in GBq.



Figur 3:
Abgabe von ^{131}I ins 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

Kantonaales Labor Basel-Stadt, Basel

M. Brennwald, P Rünzi

Eawag, Dübendorf

Résumé

Les résultats de la surveillance effectuée en 2021 au voisinage des entreprises utilisatrices de tritium ont montré un marquage significatif de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) par ce radionucléide, à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier à Niederwangen. Toutefois les valeurs mesurées en 2021 comptent parmi les plus faibles enregistrées au cours des 15 dernières années. Les doses supplémentaires occasionnées pour la population avoisinante sont ainsi restées faibles.

La surveillance de la radioactivité dans les eaux des stations d'épuration, les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération et les eaux de percolation des décharges a été poursuivie comme par le passé. Aucune valeur anormale n'a été enregistrée en 2021.

Introduction

Tout comme les installations nucléaires, les entreprises qui utilisent des substances radioactives et qui disposent d'une autorisation réglementant leurs rejets dans l'environnement font l'objet d'une surveillance particulière, mise en place par la SUVA (autorité de surveillance pour les industries) et l'OFSP. Ces programmes spécifiques commencent au terme source, par la surveillance des rejets: les exploitants sont en effet tenus de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois aux autorités. La SUVA vérifie ces déclarations par le biais de mesures de contrôle.

La surveillance se poursuit par la mesure des immissions de ces entreprises, à savoir des concentrations radioactives effectivement présentes dans l'environnement dans leur voisinage.

L'OFSP coordonne également un programme spécifique de prélèvements et de mesures des eaux des stations d'épuration ainsi que des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération des déchets. La surveillance des stations d'épuration permet d'évaluer les rejets de certaines substances radioactives dans l'environnement par les industries et les hôpitaux. Celle 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 portiques 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 ces portiques de détection permet de couvrir ces exigences, elle n'empêchera pas l'incinération accidentelle de ^3H , un émetteur bêta pur qui ne peut être décelé par ces portiques.

Voisinage des entreprises utilisatrices de Tritium ^3H

Certaines industries ont recours au tritium pour la fabrication de sources lumineuses au gaz de tritium ou pour la production de marqueurs radioactifs au tritium pour la recherche. C'est le cas des entreprises mb microtec à Niederwangen/BE, de RC Tritec à Teufen/AR et de Smolsys AG à Root/LU. Les émissions de ces entreprises sont détaillées au chapitre 9.1. Dans le cadre de la surveillance radiologique de l'environnement dans leur voisinage, l'OFSP collecte des échantillons de précipitations à Teufen/AR ainsi qu'en 4 endroits distincts à Niederwangen/BE. La concentration en tritium des échantillons de Teufen et celle des précipitations de Niederwangen sont analysées tous les 15 jours.

Tableau 1 :

Tritium dans les précipitations au voisinage des entreprises utilisatrices de ^3H en 2021.

**A Niederwangen, 21 échantillons ont été mesurés pour chaque station en 2021. En effet, en raison du manque de précipitation, il n'y a pas eu d'échantillons entre le 16.02 et 12.3, entre le 15 et le 27.4, entre le 26.08 et 09.09, ni entre le 07.10 et le 19.10.*

| Lieu | Valeur min/max (Bq/l) | Mediane/moyenne (Bq/l) |
|---|-----------------------|------------------------|
| Teufen/AR 65 m E Firma RCT | 13 - 54 | 34 / 35 |
| Niederwangen/BE* | | |
| Bauernhaus 300 m SE de l'entreprise | 11 - 189 | 39 / 51 |
| Garage 200 m SW de l'entreprise | 11 - 121 | 21 / 30 |
| Gemeinde Köniz 180 m NNW de l'entreprise | 20 - 549 | 50 / 77 |
| Firma Schär 320 m NE de l'entreprise | 54 - 776 | 330 / 365 |

Les résultats 2021 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 restées, en 2021, inférieures à 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,

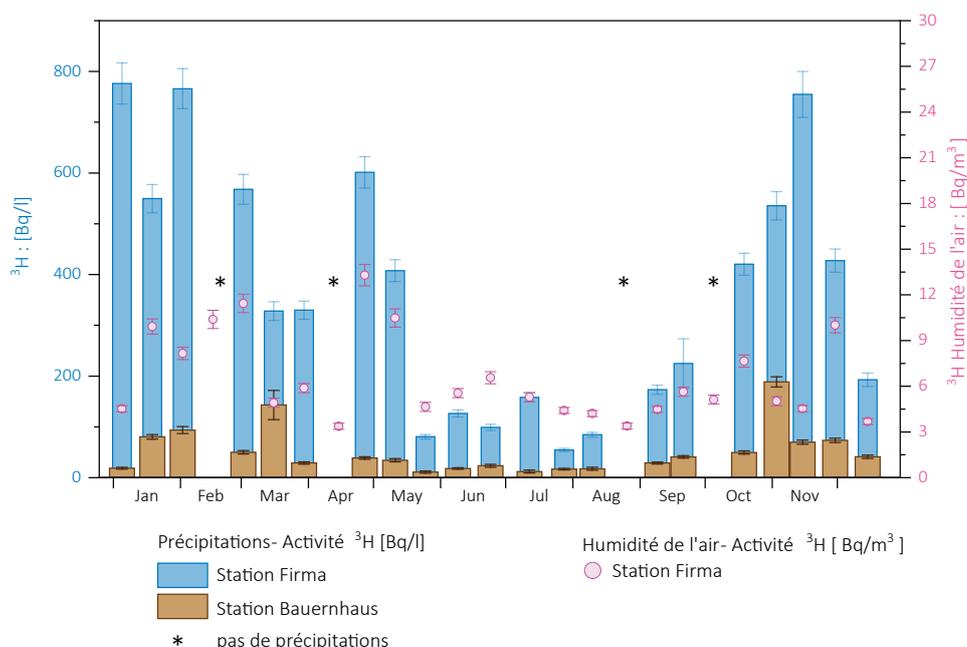


Figure 1 :

Concentrations de tritium [Bq/l] enregistrées en 2021 dans les précipitations des stations de collecte «Bauernhaus» (située à 300 m au sud est de l'entreprise) et «Firma» (située à 320 m au nord est de l'entreprise) et concentration de tritium dans l'humidité de l'air [Bq/m³] à la station de «Firma»; précipitations en mm - station «Firma»

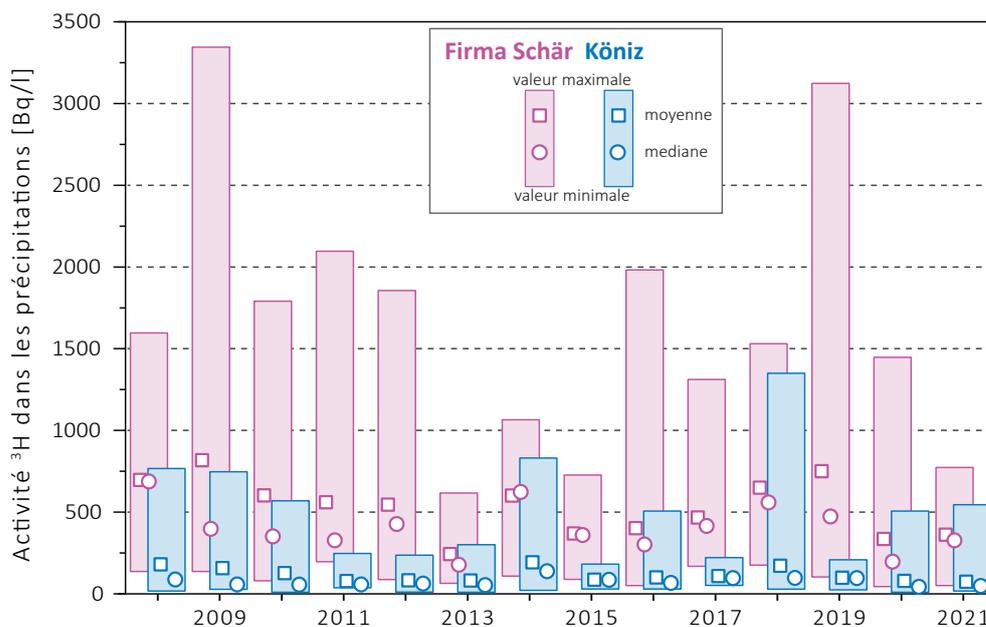


Figure 2 : Valeurs moyennes et médianes annuelles des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations aux stations de Firma et Köniz à Niederwangen entre 2008 et 2021.

denrées alimentaires) à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier de mb microtec à Niederwangen. En comparant les concentrations dans la pluie à la station Firma des années 2018/2019 avec celles des années 2020/2021, on constate une baisse significative (env. 50%). Les améliorations techniques mises en oeuvre par l'entreprise depuis 2020 pour réduire ses émissions sont principalement à l'origine de la diminution des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations. La figure 1a du chapitre 9.1 montre en effet que les émissions de tritium dans l'air par l'entreprise ont encore diminué en 2021 par rapport à 2020 et comptent parmi les plus basses des 20 dernières années. La nette diminution des concentrations de tritium dans l'environnement constatée l'an dernier par rapport aux années précédentes, s'est ainsi confirmée en 2021, avec une valeur maximale de 780 Bq/l mesurée à la station «Firma». Elle correspond à 3.9% 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 valeurs sont parmi les plus basses enregistrées depuis 2008 (voir figure 2). Toutefois, les concentrations de ^3H mesurées en un point dans l'environnement (immissions) ne dépendent pas uniquement des émissions, mais également de la dispersion des rejets dans l'environnement, et donc des conditions météorologiques (direction des vents, quantité de précipitations, etc). Les résultats des mesures des immissions en un point donné ne sont donc pas directement proportionnelles aux émissions de l'entreprise. Des variations locales importantes peuvent ainsi être observées en fonc-

tion des conditions météorologiques dominantes au cours de la période de collecte. Dans ce contexte, on pourra comparer les résultats de la figure 1 du présent chapitre (station Firma) à ceux de la figure 2 du chapitre 4.6. Si les concentrations de tritium mesurées dans les précipitations de Niederwangen par l'université de Berne sont globalement très comparables à celles obtenues par l'OFSP à la station «Firma», des différences assez significatives peuvent être observées pour certaines valeurs bimensuelles, alors que la station de collecte des précipitations de l'Université de Berne n'est située qu'à une centaine de mètres de la station «Firma». Les concentrations annuelles moyennes de ^3H mesurées à la station Firma (Figure 2) reflètent ainsi davantage l'évolution des émissions de l'entreprise que les valeurs bimensuelles.

A Niederwangen, l'activité du ^3H 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 en 2020: ainsi l'ancien barboteur a été définitivement remplacé par un piègeur passif (filtre moléculaire). Les valeurs obtenues en 2021 se sont échelonnées entre 3.4 et 13.3 Bq/m³ avec une valeur moyenne de 6.5 Bq/m³; ces valeurs sont comparables à celles de 2020.

Les concentrations de tritium mesurées dans les distillats des 12 échantillons de fruits et légumes (pommes, poires, pruneaux, rhubarbe et courgettes) prélevés fin août 2021 par le canton de Berne à

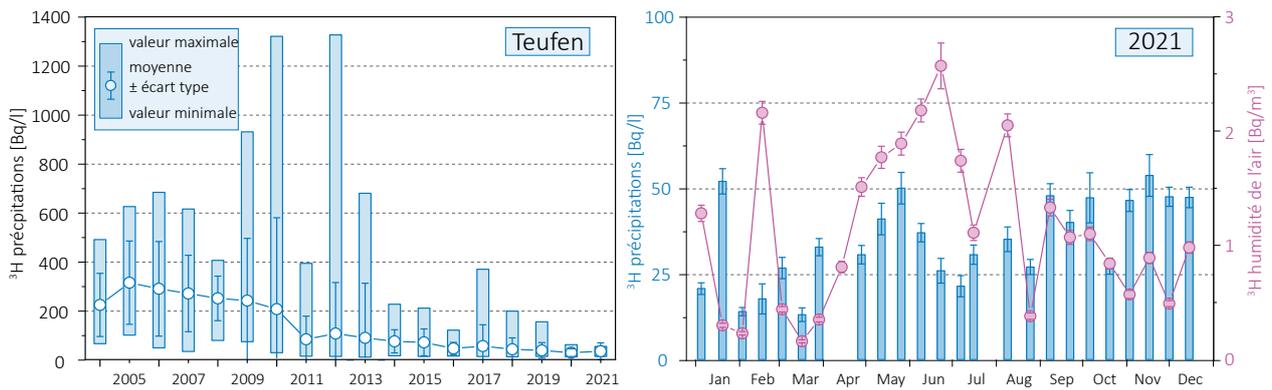


Figure 3 : Concentrations du tritium mesurées dans les précipitations [Bq/l] et dans l'humidité de l'air [Bq/m³] de Teufen/AR de 2004 à 2021.

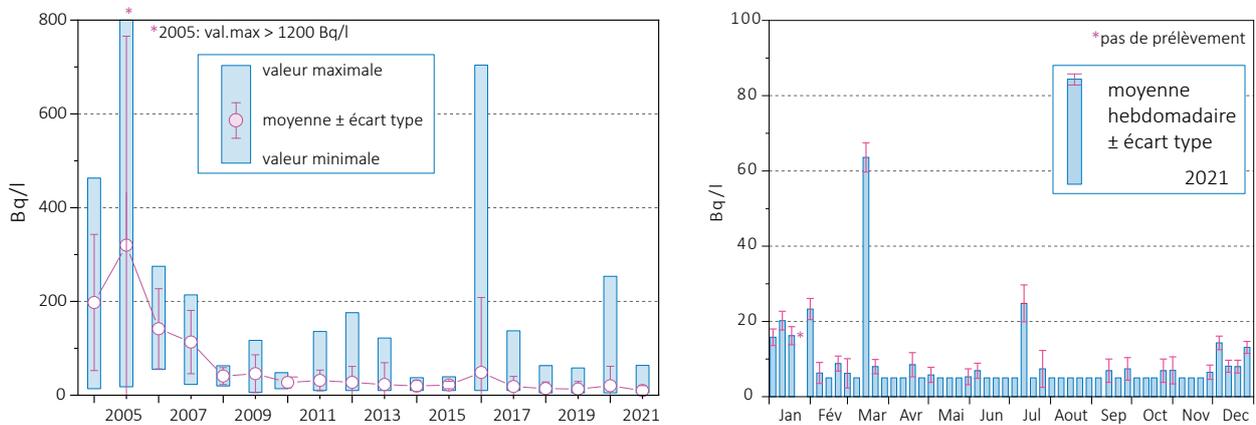


Figure 4 : Concentrations du tritium mesurées dans les eaux de la station d'épuration de La Chaux-de-Fonds entre 2004 et 2021.

Tableau 2 : Tritium (³H) et ¹³¹I dans les eaux de rejet des usines d'incinération et des stations d'épuration (STEP) en 2021.

| Ville | Laboratoire | Isotope | Nombre | Valeur min/max (Bq/l) | Médiane (Bq/l) | Moyenne (Bq/l) |
|------------------------|-------------|------------------|--------|-----------------------|----------------|----------------|
| STEP Bâle | KL-BS | ¹³¹ I | 53 | < 0.06 - 0.69 | 0.21 | 0.24 |
| | | ³ H | 53 | < 2.0 - 56.0 | < 4.0 | < 5.0 |
| Incinération Bâle | KL-BS | ¹³¹ I | 53 | 0.08 - 3.0 | 0.55 | - |
| | | ³ H | 53 | 7.7 - 16'745 | 141 | 760 |
| STEP Berne | Labor Spiez | ¹³¹ I | 52 | < 0.1 - 0.13 | - | - |
| | URA/OFSP | ³ H | 12 | < 5.0 - 17.0 | - | - |
| Incinération Bienne | URA/OFSP | ³ H | 52 | < 5.0 - 18.0 | - | - |
| STEP La Chaux-de-Fonds | URA/OFSP | ³ H | 51 | < 5.0 - 64.0 | - | - |
| STEP Lausanne | IRA | ¹³¹ I | 49 | < 0.5 | - | - |
| | | ³ H | 12 | < 2.0 - 2.2 | - | - |
| STEP Zürich | EAWAG | ¹³¹ I | 52 | < 0.1 - 0.30 | - | - |
| | URA/OFSP | ³ H | 12 | < 5.0 | - | - |

proximité de l'entreprise se sont échelonnées entre 3 et 140 Bq/l, avec une valeur médiane de 40 Bq/l. Dans les distillats des 3 échantillons de lait frais, les concentrations en tritium étaient de l'ordre de 10 Bq/l (9.7 - 10.2 Bq/l). Ces résultats confirment 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 2021 dans les produits agricoles sont à nouveau similaires à celles enregistrées au cours de la période 2008 - 2016.

La figure 3 montre le suivi des concentrations de ^3H enregistrées dans les précipitations collectées à 65 m à l'est de la cheminée de la firme RC Tritec à Teufen et mesurées par l'OFSP au cours des 12 dernières années. On constate généralement une bonne corrélation entre les concentrations annuelles moyennes de ^3H mesurées dans les précipitations et les émissions de tritium dans l'air par l'entreprise (voir Figure 1c, Chap. 9.1). Un piègeur passif à filtre moléculaire pour la mesure du ^3H dans l'humidité de l'air a également été installé au voisinage de l'entreprise fin 2020, et les résultats des mesures 2021 sont représentées sur la figure 3b. Avec une valeur moyenne de 1.1 Bq/m³, les activités du tritium dans l'humidité de l'air sont, comme attendu, restées faibles.

Notons finalement que l'OFSP et la SUVA ont initié en début octobre 2021 un programme de surveillance du tritium dans les précipitations et l'humidité de l'air au voisinage de l'entreprise Smolsys située à Root dans le canton de Lucerne, celle-ci disposant également d'une autorisation de rejet de tritium dans l'environnement. Les résultats pour l'année

2021 ne sont que très parcellaires, mais indiquent un faible marquage de l'environnement, avec des concentrations de ^3H s'échelonnant entre < 5 et 16 Bq/l dans les précipitations et entre 0.1 et 0.6 Bq/m³ 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, Berne, Lausanne et La Chaux-de-Fonds ainsi que les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération de Bâle-Ville, de Berne, Bienne et Zürich afin de détecter d'éventuelles éliminations de ^3H ou de ^{131}I dans l'environnement. Les résultats de ces mesures sont résumés dans le tableau 2 pour l'année 2021.

Le laboratoire cantonal de Bâle-Ville mesure depuis des années le tritium dans les échantillons hebdomadaires d'eaux de lavage des fumées de l'usine de Valorisation Thermique des Déchets de Bâle (UVDT/lwB). Des pics de concentration journalière de ^3H dépassant les 100'000 Bq/l durant un à deux jours avaient été régulièrement observés par le passé, notamment en 2003 - 2005 ainsi qu'en 2014 - 2015. Malgré les recherches menées par la SUVA en collaboration avec l'OFSP et le laboratoire cantonal de Bâle-Ville, leur origine n'avait malheureusement toujours pas pu être éclaircie. En janvier 2019, le laboratoire cantonal de Bâle-Ville avait mesuré une concentration particulièrement élevée de tritium (833'000 Bq/l) dans un échantillon hebdomadaire. Sur la base de ces résultats, l'activité totale incinérée

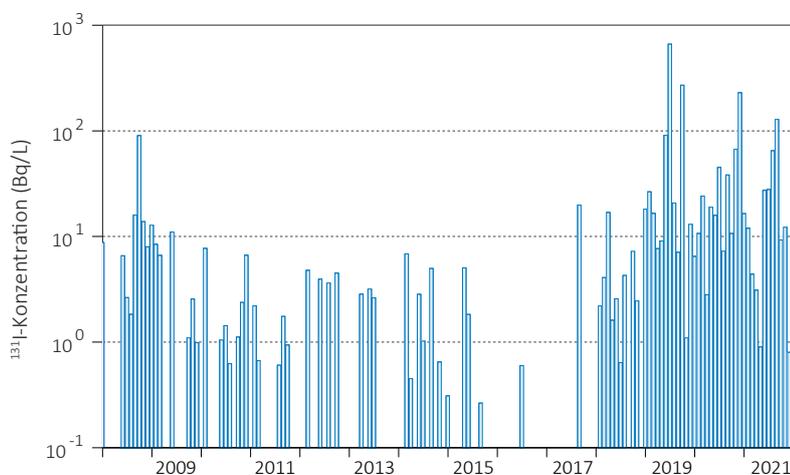


Figure 5 : Concentrations de ^{131}I (Bq/l) enregistrées dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz de 2008 à 2021 (prélèvement et analyse effectués par l'EAWAG).

Tableau 3 :

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

| Type d'échantillon | Lieu | Date | Remarque | ^3H (Bq/l) | ^{222}Rn (Bq/l) | ^{226}Ra (mBq/l) |
|--------------------------------|------------------|------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| décharges, eaux de percolation | Härkingen (SO) | 17.11.2021 | non-filtré pour ^{226}Ra | 34.8 ± 2.2 | | 13.0 ± 1.6 |
| | Tüfentobel (SG) | 17.11.2021 | non-filtré pour ^{226}Ra | < 2.0 | | 3.3 ± 1.0 |
| | Jaberg (BE) | 17.11.2021 | non-filtré pour ^{226}Ra | 81.1 ± 4.9 | | 14.5 ± 1.5 |
| eaux souterraines | Pratteln (BL) | 13.10.2021 | filtré < 0.45 μm | < 5.0 | | 1.1 ± 0.1 |
| | Aarberg (BE) | 13.10.2021 | filtré < 0.45 μm | < 5.0 | | 1.7 ± 0.2 |
| | Böttstein (AG) | 13.10.2021 | filtré < 0.45 μm | < 5.0 | | 3.0 ± 0.3 |
| | Schönenwerd (SO) | 17.11.2021 | filtré < 0.45 μm | < 5.0 | | 2.0 ± 0.2 |

avait été estimée à env. 700 GBq. Bien que cet incident n'ait pas eu de conséquences pour la santé de la population, le caractère récurrent du phénomène avait conduit l'OFSP à déposer une plainte auprès du ministère public de la confédération en 2020. L'enquête n'a malheureusement pas permis de retrouver l'origine de la source incinérée. En 2021, les valeurs de tritium sont restées inférieures à 17'000 Bq/l dans les échantillons hebdomadaires.

Le tableau 2 montre que les concentrations de ^3H dans les échantillons hebdomadaires d'eau de la STEP de Bâle sont généralement restées proches ou inférieures à la limite de détection de 4 Bq/l, mais une valeur plus élevée de 44 Bq/l a été constatée dans la semaine du 26 avril au 3 mai 2021. La valeur moyenne sur l'ensemble de l'année est néanmoins inférieure à 5 Bq/l.

A l'usine d'incinération de Bienne, les concentrations hebdomadaires de tritium pour l'année 2021 sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 5 Bq/l, hormis quelques valeurs de l'ordre de 10 à 20 Bq/l.

La figure 4 montre les concentrations de ^{131}I mesurées entre 2011 et 2021 dans les échantillons d'eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz à Zürich par l'EAWAG. Un mélange mensuel d'eaux de lavage est prélevé et mesuré par spectrométrie gamma. A noter qu'il a été constaté fin 2017 qu'un raison d'un manque de coordination ces échantillons avaient été prélevés pendant plusieurs années après le passage d'une cartouche filtrante dans l'installation de traitement de l'usine d'incinération. Ce filtre élimine le charbon actif utilisé dans le traitement des eaux usées et par conséquent probablement les radionucléides présents dans l'eau de lavage, ce qui rend les échantillons correspondants moins pertinents. En 2018, un échantillon a été prélevé avant et après le filtre pendant 6 mois pour vérifier cette hypothèse. Il s'est avéré que le ^{131}I n'était effectivement présent que dans les échantillons prélevés avant la filtration (données non présentées). Par conséquent, le personnel

d'exploitation de l'usine d'incinération a reçu l'instruction de toujours prélever l'échantillon avant le filtre (c'est-à-dire avec du charbon actif en suspension). Depuis 2019, l' ^{131}I a alors été décelé dans tous les échantillons prélevés, contrairement aux années précédentes. Pour l'année 2021, les concentrations de ^{131}I se sont situées entre 1 et 130 Bq/l. Des traces sporadiques de ^{137}Cs (0.1 - 0.3 Bq/l) ont par ailleurs été décelées dans certains échantillons.

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 été décelé dans les échantillons hebdomadaires d'eaux prélevés et mesurés par l'EAWAG, à l'exception du ^{131}I décelé dans 2 échantillons (valeurs de 0.19 Bq/l et 0.3 Bq/l).

Les concentrations de tritium observées à la STEP de la région de La Chaux-de-Fonds sont généralement restées faibles en 2021, avec sporadiquement quelques valeurs supérieures à la limite de détection et une valeur légèrement plus élevée (64 Bq/l) en mars. La figure 4 montre qu'après la nette diminution observée jusqu'en 2008, en corrélation avec la très forte baisse de l'utilisation du ^3H 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.

A la STEP de Berne, les résultats des mesures du tritium dans les échantillons mensuels d'eaux étaient conformes à ceux enregistrés au cours des années précédentes, à savoir généralement inférieurs à la limite de détection de 5 Bq/l avec quelques valeurs plus élevées (valeur maximale de 17 Bq/l). 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 2021, les valeurs se sont échelonnées entre 270 et 9'400 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»). 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.

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 2021 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, avec toutefois une nette diminution par rapport aux années précédentes. Des valeurs plus élevées de ^3H ont également été mesurées dans les échantillons de denrées alimentaires prélevés à Niederwangen, mais les doses supplémentaires qui résulteraient de la consommation régulière de tels produits (eaux de pluie et légumes) ne dépasseraient pas 1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ et ne présentent donc pas de risque pour la santé.

La surveillance de la radioactivité dans les eaux de lavage des fumées des usines d'incinération, des eaux des stations d'épuration et des eaux de percolation des décharges n'a révélé aucun résultat inhabituel en 2021.

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 und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (Gammaemitter für SPECT) sowie ^{18}F und ^{68}Ga (Positron-Emitter für PET) wurden 2021 kontinuierlich mit NaI-Detektoren im Zulauf der Abwasserreinigungsanlagen (ARA) Bern und Giubiasco (Bellinzona) gemessen. Die Nuklide ^{131}I und ^{177}Lu treten 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 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und $^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ erfordern aufgrund des hohen Immissionsgrenzwertes keine Rückhaltung im Spital und sind dementsprechend regelmässig nachweisbar. Die Immissionsgrenzwerte aller Radionuklide sind im Wochenmittel bereits im Zulauf der ARAs eingehalten. Die markantesten Erhöhungen der Dosisleistung entstehen nach Regenereignissen durch das Einschwemmen von Radonfolgeprodukten ins Abwasser. Messungen in ausgewählten ARAs werden weitergeführt, da sie wertvolle zusätzliche Informationen zu den Emissionen der Spitäler geben.

Gammaemittierende Radionuklide in der Medizin

Viele der in der Medizin eingesetzte Radionuklide können mit NaI-Gammaspektrometrie gemessen werden. Tabelle 1 zeigt eine Liste der in dieser Arbeit nachgewiesenen Radionuklide (fett gedruckt) sowie weiterer potentiell nachweisbarer Isotope.

Kontinuierliche Messungen mit NaI-Sonden

NaI-Gammaspektrometrie-Sonden waren 2021 in den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) von Giubiasco (Bellinzona) und Bern 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.

Niederschlagsereignisse bewirken in ARAs oft einen starken Anstieg von Radonfolgeprodukten (^{214}Pb und ^{214}Bi) im Wasser. Dies kann dazu führen, dass der ^{40}K -Peak nicht mehr erkannt wird und sich die Energiekalibrierung verschiebt. In dieser Situation wird typischerweise der ^{214}Pb -Peak bei 351.9 keV als ^{131}I (364.5 keV) interpretiert. Eine so ausgewertete ^{131}I Konzentration ist natürlich nicht korrekt. Für diese Arbeit wurden alle Stundenspektren nachträglich neu ausgewertet, wobei der Beitrag von ^{214}Pb zum ^{131}I -Peak anhand des ^{214}Bi -Peaks bei 609 keV geschätzt und abgezogen wurde. Die Unsicherheit der Messwerte ist mit dieser nachträglichen Auswertung für alle Isotopen in der Größenordnung von 20%. Die Nachweisgrenzen liegen bei rund 0.5 Bq/l für ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 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 und ^{111}In

^{177}Lu ist seit einigen Jahren 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, die von der Sonde gut messbar sind (Immissionsgrenzwert für Gewässer: 307.7 Bq/l). Die in den Figuren 1 und 2 gezeigten Spitzen von ^{177}Lu Konzentrationen korrelieren für Bern nicht mit den Entleerungen der Rückhaltetanks des Inselspitals und stammen daher vermutlich von Abwasser aus Haushalten entlassener Patienten.

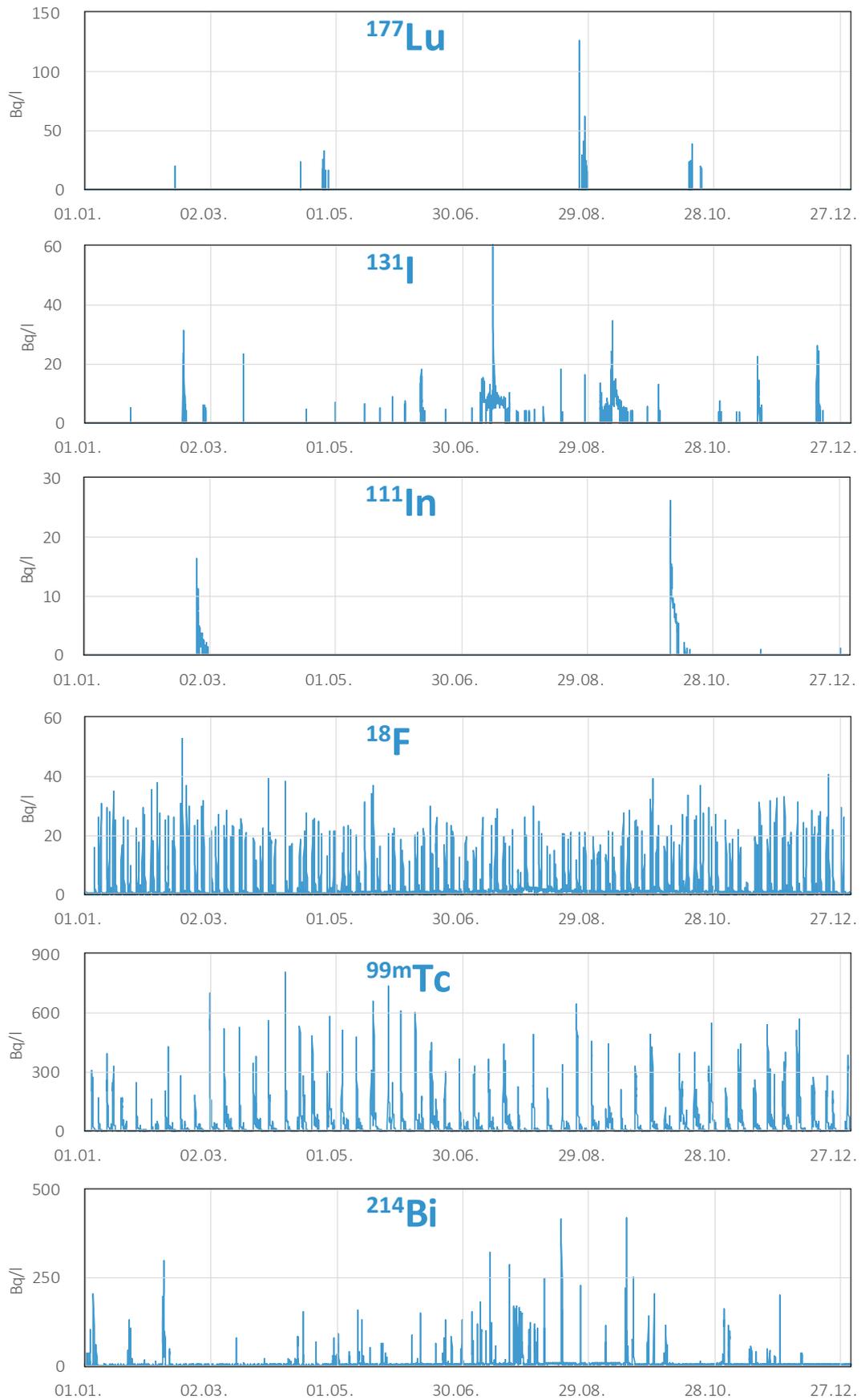
Das in der Radiotherapie eingesetzte ^{131}I hat einen tiefen Immissionsgrenzwert für Gewässer (6.7 Bq/l) und wird in deshalb in den Spitälern wie ^{177}Lu in Abklingtanks gelagert. Die Konzentration in der ARA ist nur selten (ARA Bern, Figur 2) oberhalb der Nachweisgrenze der Sonde (ca. 1 Bq/l). In der ARA Bellinzona wurden, vermutlich aufgrund der geringeren Verdünnung der Abwässer aus den Spitälern, etwas häufiger und etwas höhere ^{131}I Konzentrationen gemessen (Figur 2). Aber auch hier konnte (mit Berücksichtigung der Messunsicherheit) keine Überschreitung des Immissionsgrenzwertes im Wochenmittel festgestellt werden.

Das nur selten und ambulant verwendete ^{111}In war zweimal während weniger Tage in tiefen Konzentrationen in der ARA Giubiasco feststellbar.

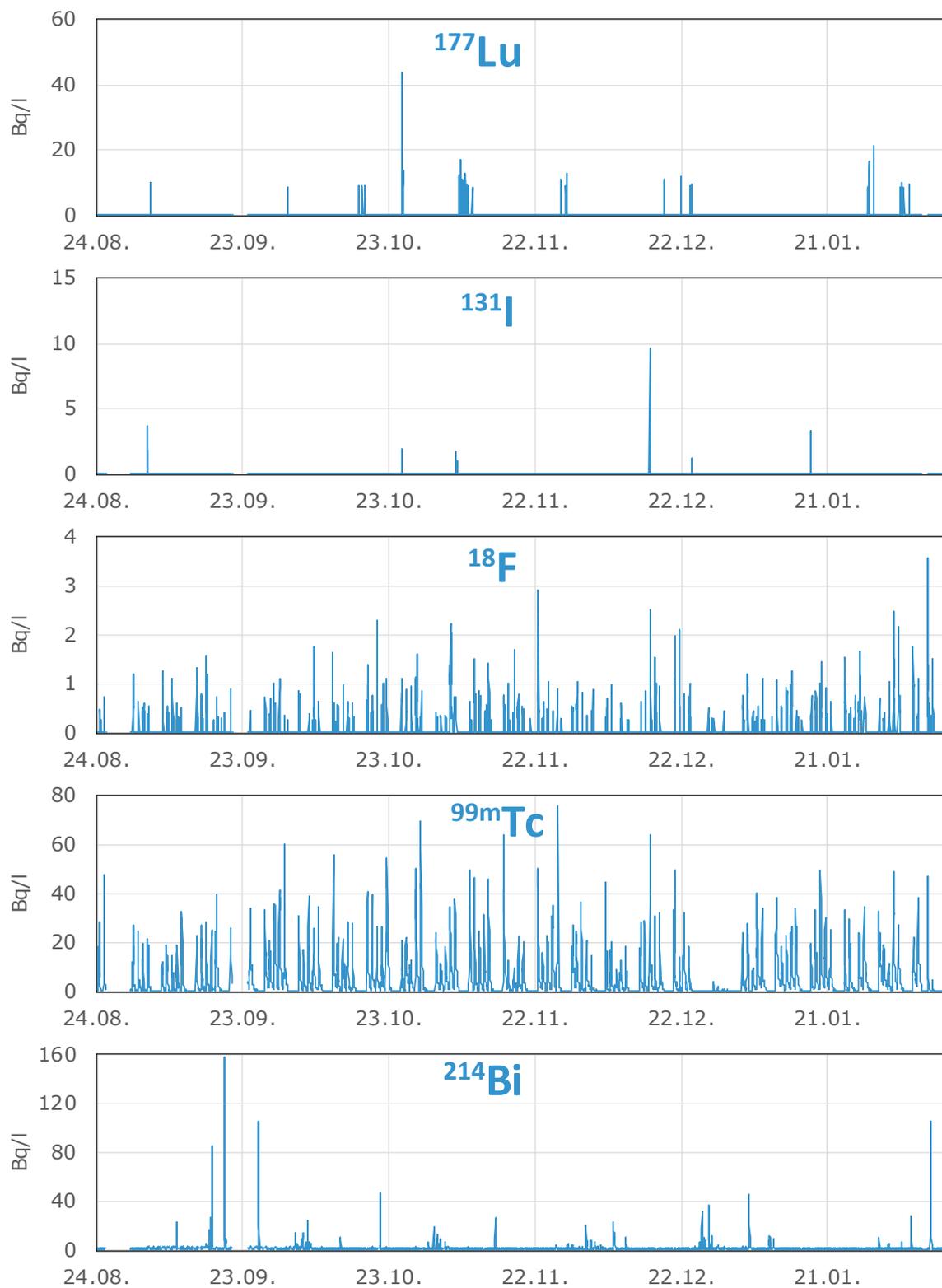
Technetium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) und PET Radionuklide

Die ^{99}Mo -Tochter $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist ein häufig für SPECT-Aufnahmen verwendetes Radionuklid. Aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von 6 Stunden ist eine Rückhaltung im Spital nicht nötig. Deshalb kann $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in den ARAs regelmässig nachgewiesen werden und kann dort auch zu einer Erhöhung der Gesamtdosisleistung beitragen. Die Zeitverläufe von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in den beiden untersuchten ARAs sind in den Figuren 1 und 2. Typischerweise am frühen Nachmittag ist die Konzentration erhöht, jeweils an den Wochentagen (Montag bis Freitag) in der ARA Bern und vornehmlich am Montag in der ARA Giubiasco (Bellinzona), wo insgesamt auch die höheren Aktivitäten gemessen wurden. Im Wochenmittel ist der Immissionsgrenzwert aber überall klar eingehalten.

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 (1.3 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 Abbildungen 1 und 2 als ^{18}F ausgewertet, aufgrund dessen häufigeren Einsatzes (^{68}Ga macht zur Zeit maximal 5% der angewendeten Aktivität von ^{18}F aus) und der längeren Halbwertszeit. Die PET Isotope kommen in den Spitälern täglich zum Einsatz. Diese Isotope können in beiden untersuchten ARAs regelmässig nachgewiesen werden.



Figur 1 :
Stundenmittel der Radioaktivität (Bq/l) im Zulauf der ARA Giubiasco (Bellinzona) für das Jahr 2021.



Figur 2:
Stundenmittel der Radioaktivität (Bq/l) im Zulauf der ARA Bern für den Zeitraum vom 24.8.2021 bis 14.2.2022.

9.5

Aktionsplan Radium 2015-2022

M. Palacios, D. Storch

Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Der Bundesrat hat den Aktionsplan Radium 2015-2022 verabschiedet, um die radiologischen Altlasten zu bewältigen, die auf die in der Uhrenindustrie bis in die 1960er Jahre verwendete, ²²⁶Ra-haltige Leuchtfarbe zurückgehen. In diesem Kapitel wird der Stand der Teilprojekte «Gebäude» und «Deponien» dargestellt.

Teilprojekt «Gebäude»

Das Teilprojekt «Gebäude» hat zum Ziel, potenziell mit ²²⁶Radium kontaminierte Liegenschaften zu identifizieren, Messungen durchzuführen und falls erforderlich zu sanieren.

Inventar der betroffenen Liegenschaften

Zwischen 2020 und 2021 beauftragte das Bundesamt für Gesundheit (BAG) die Firma CSD Ingenieure AG mit historischen Nachforschungen in den kantonalen Archiven von Basel-Landschaft, Genf und Waadt und ergänzte damit die 2018 veröffentlichte Studie der Universität Bern. Die Ergebnisse dieser beiden Studien sind unter www.bag.admin.ch/radium-altlasten (historische Nachforschungen) verfügbar.

Insgesamt ergaben die historischen Nachforschungen rund 1'100 potenziell mit ²²⁶Radium kontaminierte Liegenschaften. Fast 90% der Liegenschaften des Inventars befinden sich in den Kantonen Bern, Neuenburg und Solothurn. Die restlichen 10% verteilen sich auf die Kantone Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Genf, Jura, Luzern, St. Gallen, Tessin, Waadt und Zürich.

Untersuchung der Liegenschaften

Bis zum 31. Dezember 2021 wurden 880 Liegenschaften auf ²²⁶Ra-Kontaminationen untersucht, was 80% der im Inventar erfassten Liegenschaften entspricht (Tabelle 1). Wenn die effektive Dosis, mit der die Bewohner und Bewohnerinnen belastet werden, 1 Millisievert (mSv) pro Jahr überschreitet, ist eine Sanierung notwendig. Im Aussenbereich wurde der Grenzwert für die Konzentration von ²²⁶Ra in der Erde bei 1'000 Bq/kg festgelegt. Die im Rahmen des Aktionsplans angewendeten dosimetrischen Modelle wurden in einem wissenschaftlichen Artikel beschrieben, der im Dezember 2021 in der Fachzeitschrift Radiation Protection Dosimetry¹ erschien.

Sanierungsarbeiten

Von den 880 untersuchten Liegenschaften sind 137 sanierungsbedürftig. Der Anteil der sanierungsbedürftigen Liegenschaften liegt damit bei etwa 16%. Bei 118 Liegenschaften sind die Sanierungsarbeiten abgeschlossen oder im Gange (Tabelle 1).

¹ C. Murith, G. Di Tommaso, S. Estier, T. Flury, M. Palacios-Gruson, C. Stalder, S. Baechler, MODELLING THE EXPOSURE OF RESIDENTS OF A RADIUM-CONTAMINATED LIVING PLACE, Radiation Protection Dosimetry, Volume 197, Issue 2, December 2021, Pages 101–110, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab167>

Tabelle 1:
Stand der diagnostischen Untersuchungen und der Sanierungen am 31. 12.2021.

| | Anzahl untersuchter Liegenschaften | Sanierung | | |
|--------------|------------------------------------|--------------------|--------------|-----------------------------|
| | | nicht erforderlich | erforderlich | abgeschlossen oder im Gange |
| Kanton BL | 11 | 8 | 3 | 1 |
| Kanton BS | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Kanton BE | 277 | 221 | 56 | 52 |
| Kanton GE | 26 | 24 | 2 | 2 |
| Kanton JU | 28 | 28 | 0 | 0 |
| Kanton LU | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Kanton NE | 370 | 323 | 47 | 38 |
| Kanton SG | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Kanton SH | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Kanton SO | 134 | 108 | 26 | 23 |
| Kanton TI | 3 | 3 | 0 | 0 |
| Kanton VD | 19 | 18 | 1 | 0 |
| Kanton ZH | 8 | 7 | 1 | 1 |
| Total | 880 | 743 | 137 | 118 |

Das Vorgehen beinhaltet die Beseitigung der Kontamination durch einen spezialisierten Betrieb sowie die Entsorgung, Kontrollmessungen und die Wiederherstellung des Standards vor Beginn der Arbeiten. Der Sanierungsprozess umfasst auch die Überwachung der Konzentration von ^{222}Rn in der Raumluft, gemessen in Becquerel pro Kubikmeter (Bq/m^3), als Zerfallsprodukt von ^{226}Ra . Figur 2 zeigt den starken Rückgang der ^{222}Rn -Konzentration nach der Beseitigung der Kontamination mit ^{226}Ra in einem Schlafzimmer von mehreren tausend Bq/m^3 auf etwa 200 Bq/m^3 . Mit einem Ventilator konnte das Personal der Sanierungsfirma während der Arbeiten vor einer Exposition durch hohe Radonkonzentrationen geschützt werden (rot eingefärbte Bereiche in der Grafik).

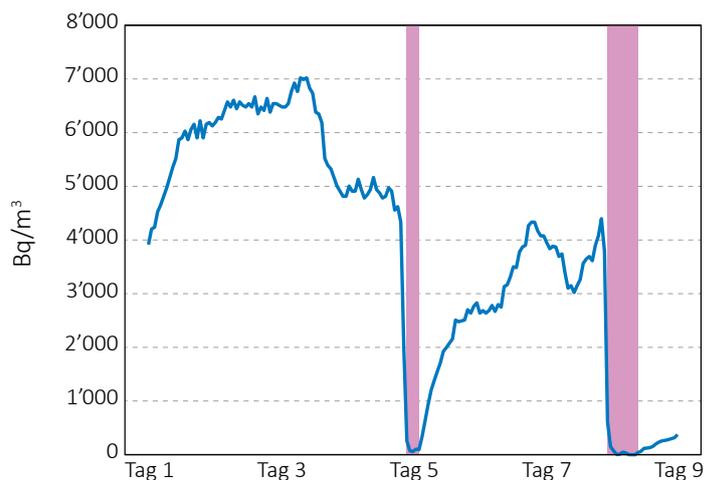
Problematik der Mischkontaminationen

In fast 20% Aussenbereiche, die zu sanieren waren, wurde eine Mischkontamination (Kontamination mit radioaktiven und chemischen Schadstoffen) festge-

stellt. Das BAG koordiniert die Sanierung von Parzellen mit Mischkontaminationen von Fall zu Fall mit den betroffenen Kantonen. Komplexe Fälle werden in der «Unterstützungsgruppe Mischkontaminationen» diskutiert, in der neben dem BAG das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und die Suva vertreten sind, um die Einhaltung der Strahlenschutz- und der Umweltschutzgesetzgebung sowie der Vorschriften zum Schutz der Arbeitskräfte zu gewährleisten. 2021 hat das BAG eine neue Zusammenarbeit mit der Firma ARCADIS ins Leben gerufen, die mit ^{226}Ra kontaminierte Proben auf ein breites Spektrum chemischer Schadstoffe untersucht. Dies ergänzt die bestehende Zusammenarbeit mit dem Labor Spiez, das solche Proben auf Schwermetalle analysiert.

Entsorgung

Im Jahr 2021 wurden mehr als 250 m^3 inerte Abfälle im Rahmen des Aktionsplans zur Ablagerung auf Deponien gemäss Artikel 114 StSV abgegeben, wobei die maximale spezifische Aktivität von 10'000 Bq/kg für ^{226}Ra eingehalten wurde.



Figur 1. :
Beispiel für die Entwicklung der ^{222}Rn -Konzentration (in Bq/m^3) während der Sanierung aufgrund einer ^{226}Ra -Kontamination. Rot eingefärbt sind Phasen, während denen ein Ventilator verwendet wurde.

Zusätzlich wurden fast 16'000 Liter brennbare Abfälle in einer Verbrennungsanlage gemäss Artikel 116 StSV entsorgt, der eine maximale wöchentliche Aktivität von 2 MBq für ^{226}Ra vorsieht. Es handelte sich insbesondere um Sondermüll, d.h. etwa dreissig Möbelstücke, die zuvor in einem kontrollierten Bereich zerlegt worden waren, sowie etwa zwanzig Fensterrahmen nach einer Asbestsanierung.

Abfälle, deren Kontamination die genannten Werte übersteigt, gelten als radioaktive Abfälle und werden unter Aufsicht des BAG konditioniert und in das Bundeszwischenlager befördert (Figur 3). 2021 wurden auf diesem Weg knapp 1'800 Liter Abfälle entsorgt.

Teilprojekt «Deponien»

Ziel des Teilprojekts «Deponien» ist die Identifikation alter Deponien, die möglicherweise mit ^{226}Ra kontaminierte Abfälle enthalten. Ausserdem sollen Massnahmen festgelegt werden, welche die Umwelt und die Gesundheit der Bevölkerung und des Personals vor den Gefahren solcher Abfälle schützt.

Im Oktober 2021 veröffentlichte das BAG einen technischen Bericht mit dem Titel «Erfassung und Verwaltung von ehemaligen Deponien, die radium-kontaminierte Abfälle enthalten könnten» unter www.bag.admin.ch/radium-altlasten (Radium-Altlasten in Deponien). Dieser Bericht, der in Zusammenarbeit mit dem BAFU und in Absprache mit den betroffenen Kantonen erstellt wurde, definiert die Methode zur Identifizierung potenziell betroffener ehemaliger Deponien, ihre Einstufung in drei Risikokategorien sowie die Schutzmassnahmen, die insbesondere bei Aushubarbeiten zu ergreifen sind.

Die hauptsächlich betroffenen Kantone (Bern, Genf, Jura, Neuenburg und Solothurn) haben damit begonnen, ihre alten Deponien nach dem festgelegten Prozess zu klassifizieren. Bisher wurden mehr als 280 alte Deponien identifiziert, die möglicherweise mit ^{226}Ra kontaminierte Abfälle enthalten. Die entsprechende Liste wird unter demselben Link zu Informationszwecken veröffentlicht.

Das BAG bereitet derzeit eine Richtlinie zur Umsetzung der langfristigen Überwachung und zur Klärung der Verantwortlichkeiten der verschiedenen Interessengruppen vor. Es ist geplant, die hauptsächlich betroffenen Kantone im Laufe des Jahres 2022 zu konsultieren.

Verzögerung aufgrund der Pandemie

Das BAG prüft derzeit Möglichkeiten, den Aktionsplan Radium bis Ende 2023 zu verlängern. Aufgrund der Pandemie musste das BAG seine Einsätze vor Ort zwischen 2020 und 2021 mehrmals aussetzen, insbesondere bei Privatpersonen, was bei 80% der betroffenen Liegenschaften der Fall war. In einem COVID-19-Schutzkonzept wurden die Einzelheiten zur Kommunikation und Intervention festgelegt. Diese Einschränkungen führten zu einer Verzögerung von einem Jahr bei den diagnostischen Untersuchungen und den Sanierungen, trotz der zusätzlichen externen Unterstützung bei den diagnostischen Untersuchungen.



*Figur 2. :
Konditionierung von stark mit ^{226}Ra kontaminierter, für die Entsorgung im Bundeszwischenlager.*

Chapitre / Kapitel
10

RADON

86

Rn

Radon

(222)

2021

10

Start des Aktionsplans Radon 2021 – 2030

M. Palacios, D. Storch

Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Im Berichtsjahr haben die Arbeiten zur Umsetzung des Aktionsplans Radon 2021 – 2030 gestartet. Der Bundesrat hat diesen am 8. Mai 2020 verabschiedet. Der Aktionsplan definiert vier Stossrichtungen mit insgesamt 12 Zielen. Dadurch soll der Radonschutz weiterentwickelt und vor allem verbessert werden. Neben einem ausgebauten Schutz bei Immobilien, der vereinfachten Risikoabschätzung und der weiterentwickelten Kompetenzen zu Radon, fokussiert der Aktionsplan neu auch auf den Radonschutz von Personen am Arbeitsplatz.

Start des Aktionsplans Radon 2021 – 2030

Der Aktionsplan Radon 2021 – 2030 trägt einerseits den neuen Herausforderungen im Radonschutz Rechnung und berücksichtigt andererseits die Ziele, die im abgeschlossenen Aktionsplan 2012 – 2020 nicht wie gewünscht erreicht werden konnten. Der Radonschutz im Immobilienpark muss mit einem Schwerpunkt auf Neubauten weiter verbessert werden. Die Energiestrategie 2050, die den Energieverbrauch in Gebäuden reduzieren und diese nachhaltiger machen soll, stellt dabei für den Radonschutz eine neue Herausforderung dar. Die wichtigen Aspekte «dichte Gebäudehülle» und «ausreichender Luftaustausch» müssen in Einklang gebracht werden.

Die Kommunikation hinsichtlich des Gesundheitsrisikos durch Radon muss verbessert werden. Es soll vor allem dort kommuniziert werden, wo das Risiko direkt gemindert werden kann, etwa bei der Planung von Neubauten, grösseren Umbauten oder auch bei Immobilientransak-

tionen. Darüber hinaus muss es einfacher werden, das persönliche Radonrisiko zu ermitteln. Dazu braucht es einfachere und attraktivere Tools, um die eigene Radonbelastung abschätzen zu können.

Die Zusammenarbeit mit Organisationen der Arbeitswelt, insbesondere im Baugewerbe, soll weitergeführt und verstärkt werden. Dabei ist es vor allem wichtig, geeignete Lehrmittel und Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, die es den Berufsverbänden erleichtern, das Thema Radon in ihre Lehrpläne aufzunehmen. Die Ausbildung von Radonfachpersonen in der Schweiz soll zwischen den Sprachregionen harmonisiert und auf eine klar definierte Grundlage gestellt werden. Dies soll die Voraussetzungen schaffen, dass künftig alle Elemente eines guten Radonschutzes, wie etwa die Beratung, die Radonmessung oder die Radonsanierung, aus einer Hand angeboten werden können.

Der Arbeitnehmerschutz bildet ein neues Element im Rahmen des Aktionsplans. Die mit der Revision der Strahlenschutzverordnung (StSV) neugeschaffene Kategorie

des radonexponierten Arbeitsplatzes muss dabei klar definiert werden. Arbeitsplätze dieser Kategorie sollen identifiziert werden können. Der ganze Prozess von der Messung über die Dosisabschätzung bis hin zur persönlichen Radondosimetrie muss neu aufgebaut und definiert werden. Dabei ist die Zusammenarbeit mit der Suva, dem Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) oder dem Eidgenössischen Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) besonders wichtig.

Die vier Stossrichtungen des Aktionsplans: Stand und Ausblick

Immobilienpark

Im Rahmen der Weiterentwicklung der SIA-Norm 180 wird in Zukunft eine engere Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA) möglich. Die entsprechende Normkommission der SIA hat dazu eine Kontaktperson nominiert, die den direkten Austausch zwischen dem BAG und der SIA vertiefen und vereinfachen soll. Um besser auf den Zusammenhang zwischen energetischen Massnahmen in Gebäuden und der Innenraumluftqualität aufmerksam zu machen, will das BAG den Austausch mit dem Bundesamt für Energie (BFE) verstärken. Das BFE wird deshalb neu

einen Vertreter in den Steuerungsausschuss des Aktionsplans Radon 2021 – 2030 entsenden. Als erste konkrete Massnahme ist geplant, die BAG-Webseiten mit spezifischen Informationen zu ergänzen, die aufzeigen sollen, was bei energetischen Massnahmen in Gebäuden hinsichtlich Radon zu beachten ist. Schliesslich wurde das Projekt «Radon Mitigation Efficiency (RAME)» abgeschlossen, das insbesondere die langfristige Funktionalität von Radonschutzmassnahmen untersucht hat. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in einer kleinen Broschüre dokumentiert, die Tipps für Gebäudeeigentümer bzw. Gebäudeeigentümerinnen betreffend Radonsanierungen bereithält (Figur 1).

Gesundheitsrisiko

Die Kommunikation zu gesundheitlichen Risiken, die durch das nicht wahrnehmbare Radon entstehen können, ist schwierig. Ein erster Schritt, um die Kommunikation in diesem Bereich zu verbessern, ist der «Radon-Check», der online verfügbar ist unter www.radonkarte.ch: Er erlaubt es, die Dringlichkeit einer Radonmessung in einem bestimmten Gebäude abzuschätzen. Durch ähnliche Methoden, die über reine Radonmessungen hinausgehen, möchten wir auch die Abschätzung des persönlichen Radonrisikos erleichtern. Dazu können aber auch Kurzzeitmessungen gehören, die ein verlässliches Resultat liefern. Generell muss die Kommunikation verstärkt werden,



Figur 1 : Die RAME-Broschüre hält Tipps für die langfristige Effizienz von Radonschutzmassnahmen bereit.

insbesondere in Situationen, in denen Radon ein relevantes Thema ist. Dazu zählen Immobilientransaktionen oder auch Mietverhältnisse. Eine Broschüre, die die rechtlichen Aspekte des Radonschutzes in solchen Situationen behandelt, wurde überarbeitet, sie wird 2022 publiziert.

Radonkompetenz

Zusammen mit Holzbau Schweiz, dem Berufsverband der Holzbaubranche, wurde ein Projekt angestossen, um ein Lernmodul zum Thema Radon für die Lernplattform «Holzbau-Lab» zu erarbeiten. Das Modul soll aus Webinhalten und kurzen Lernfilmen bestehen und eine Einführung in die Radonthematik bieten. Dies ist ein Pilotprojekt für die vertiefte Zusammenarbeit auch mit anderen Berufsverbänden.

Für die Ausbildung der Radonfachpersonen wurde zusammen mit den regionalen Radonfachstellen ein Aus- und Fortbildungskonzept erarbeitet, das zur Harmonisierung der Radonausbildung in der Schweiz beitragen soll. Vor allem die Fortbildung, die für die Radonfachpersonen alle fünf Jahre obligatorisch ist, muss auf einheitliche Art in den drei Sprachregionen etabliert werden. Ab 2022 sollen alle Kurse auf der Basis dieses Aus- oder Fortbildungskonzepts durchgeführt werden. Die Konzepte sollen regelmässig angepasst werden und so in den nächsten Jahren zur Zusammenführung der Kompetenzen von Radonfachpersonen und anerkannten Radonmessstellen führen – dies im Hinblick auf die Verwirklichung des Ziels im Radonaktionsplan «Radon aus einer Hand».

Arbeitnehmerschutz

Die Einführung des Begriffs der radonexponierten Arbeitsplätze erfordert die entsprechende Anpassung einiger bestehender Tools. So muss die Radondatenbank für die Erfassung der Messresultate an radonexponierten Arbeitsplätzen und vor allem für die eventuell folgende Dosisabschätzung angepasst werden. Dieser neu programmierte Teil steht in einer Testversion bereits zur Verfügung. Die Arbeitsgruppe «Radon am Arbeitsplatz», die für diese Stossrichtung gegründet wurde, hat begonnen, den ganzen Prozess, von der anerkannten Radon-Messung über die Dosisabschätzung bis hin zur möglicherweise nötigen Radon-Personendosimetrie, für den Radonschutz an Arbeitsplätzen zu definieren. In einem ersten Schritt muss bestimmt werden, welche Arbeitsplätze als radonexponiert gelten sollen und somit gemessen werden müssen. Die Arbeitsgruppe Arbeitnehmerschutz besteht aus Vertretern und Vertreterinnen der zuständigen Aufsichtsbehörden (Suva, ENSI, BAG), dem VBS und dem Eidgenössischen Institut für Metrologie Metas gebildet.

Koordinationsplattform Radon für Vollzugsbehörden

Am 23. November 2021 fand das erste Treffen der Koordinationsplattform Radon für Vollzugsbehörden statt. Dies ist ein neues Format, das von einigen Kantonen gewünscht wurde. Es soll den Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen den Vollzugsbehörden im Bereich Radon fördern und vertiefen. An diesem ersten Event wurde über den Stand des Aktionsplans Radon berichtet und die Aktivitäten aus den Arbeitsgruppen vorgestellt. Die Diskussionen drehten sich vor allem um den Einbezug der Baubewilligungsbehörden, die Erfahrungen im Zusammenhang mit den Messkampagnen in Schulen und Kindergärten und das Öffentlichkeitsprinzip, das auch in diesem Jahr dazu geführt hat, dass Messresultate aus Schulen und Kindergärten veröffentlicht worden sind. Die Resultate der im Vorfeld des Treffens durchgeführten Umfrage ermöglichen es, besser auf die Bedürfnisse und Anliegen der kantonal für Radon zuständigen Behörden einzugehen.

Begleitgruppe des Aktionsplans Radon 2021 – 2030

Die Begleitgruppe des Aktionsplans Radon 2021 – 2030, in der neben Behördenvertreter/innen alle unsere Partner/innen vertreten sind, konnte sich in diesem Jahr noch nicht treffen. Aus diesem Grund wurde die Begleitgruppe mit Hilfe eines Newsletters informiert. Das erste Treffen der Begleitgruppe im Rahmen des Aktionsplans ist am 4. Mai 2022 geplant.



Annexes 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

2021

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, 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 Environmen- tal 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, |
| LS | LABOR SPIEZ, Bundesamt für Bevölkerungsschutz des VBS | Spiez/BE | S. Röllin, J.A. Corcho Alvarado, M. Astner, R. Althaus, R. Gosteli, H. Sahli |
| LUBW | Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturs- chutz, Baden-Württemberg | Karlsruhe / D | R. Bechtler |
| NAZ | Nationale Alarmzentrale, Bundesamt für Bevölke- rungsschutz 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. Haus- wirth, E. G. Yukihara |
| Suva | Bereich Physik, Abt. Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz | Luzern | M. Hammans, F. Danini |
| Uni-BE | Physikalisches Institut, Abt. Klima- und Umweltphysik, Universität Departement für Chemie, Universität | Bern Bern | T. Stocker, R. Purtschert, P. Düring, T. Wagner, 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 Hammerstrasse 25, 4410 Liestal |
| BS | P. Hübner, A. Pregler | Kantonales Laboratorium Kannenfeldstr. 2, Postfach, 4012 Basel |
| FR | X. Guillaume | Laboratoire Cantonal ch. du Musée 15, 1700 Fribourg |
| 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 Planaterrastrasse 11, 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 37, 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 Digital-Aerosolsammler Jungfrauoch URAnet: Aerosolwarnnetz 15 Stellen on-line-Messung mit Datenfernübertragung ⁸⁵ Kr-Messungen an Luftproben vom Jungfrauoch | Aerosolsammler und High-Volume-Sampler: kontinuierliche Sammlung auf Aerosolfiltern mit γ -Spektrometrie im Labor: Nachweisgrenze für ¹³⁷ Cs: 1 μ Bq/m ³ bzw. 0.1 μ Bq/m ³ RADAIR: α/β -Messung (FHT-59S) Ende 2017 eingestellt, 4 Stellen mit Jod-Monitor (FHT-1700); URAnet: 15 Stationen nuklidspezifischer Monitor (FHT-59N1) |
| Niederschläge | Regensammlerstationen, ganze Schweiz inkl. Umgebung der KKW, sowie Forschungsanlagen und Industrien | 10 Regensammler mit Trichtern von 1 m ² Fläche, wöchentlich γ -Spektrometrie der Rückstände; Nachweisgrenze für ¹³⁷ Cs: 10 mBq/l (monatliche Probe) An 14 Stellen Sammlung der Niederschläge für die 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: Gammaskpektrometrie 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 Spitälern, Deponien, Kehrrechtverbrennungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen γ -, α - und ⁹⁰ Sr-Messung |

4. Überwachungsbereiche und Kompetenzzentren¹⁾

| Bereich: | überwacht wird: | Kompetenzzentren ¹⁾ : |
|--------------------|---|---|
| Atmosphäre | Aerosole, Niederschläge ¹⁴ C, Edelgase | URA (BAG) inkl. URAnet / RADAIR UniBE |
| Deposition | Boden, Bewuchs, in-situ ⁹⁰ Sr- und Alpha-Messung Aeroradiometrie | URA (BAG), IRA und LABOR SPIEZ ENSI, NAZ |
| Aquatisches Milieu | Gewässer, Fische, Sedimente Grund- und Quellwasser, Deponien | EAWAG, Institut Forel, LABOR SPIEZ, URA BAG |
| Lebensmittel | Milch, Getreide, Gemüse, Wild, Pilze, etc. | Kantonale Laboratorien, URA, IRA, LABOR SPIEZ |
| Dosis | α - und n-Dosen automatische Dosiswarnnetze | PSI, IRA NAZ (NADAM), ENSI (MADUK) |
| menschliche Körper | Ganzkörpermessungen ⁹⁰ Sr in Knochen und Zähnen | PSI IRA |
| Kernanlagen | Emissionen, Umgebung | ENSI, URA (BAG) |
| Betriebe | Emissionen, Umgebung | Suva, URA (BAG) |
| Spitäler | Emissionen | FANM (BAG) |
| Radon | Radon in Häusern und im Boden | SRR (BAG), URA (BAG) |

¹⁾Liste der Abkürzungen s. Anhang 1.

5. Im Strahlenschutz verwendete Grössen und ihre Bedeutung

Aktivität A

angegeben in Bq (Becquerel)

Die Aktivität einer Substanz ist die mittlere Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Zeiteinheit. $1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall/s}$. Die alte Einheit war das Ci (Curie) mit $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Zerfälle/s}$; $1 \text{ nCi} = 37 \text{ Bq}$ oder $1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$.

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); $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

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 Strahlenwichtungsfaktor w_R (vgl. auch Dosis, effektive).

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Der spezielle Name der Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert (Sv); $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Effektive Dosis E

angegeben in Sv (Sievert)

Summe der mit den Wichtungsfaktoren w_T gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben.

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ = Im Gewebe T durch Strahlung R absorbierte Dosis

w_R = Wichtungsfaktor der Strahlung

w_T = Wichtungsfaktor für Gewebe (Anteil am Gesamtrisiko für Gewebe/Organ T)

H_T = Äquivalentdosis des Gewebes/Organs T

Die spezielle Einheit der effektiven Dosis ist das Sievert (Sv); $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

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);

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

l'unité de la dose équivalente est le sievert (Sv); 1 Sv = 1 J/kg.

Dose efficace E

exprimée en Sv (Sievert)

Somme des doses équivalentes reçue par tous les tissus et organes, pondérées à l'aide de facteurs spécifiques w_T

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ = dose absorbée dans le tissu T sous l'effet du rayonnement R

w_R = facteur de pondération du rayonnement R

w_T = facteur de pondération du tissu (apport de l'organe ou tissu T au risque total)

H_T = dose équivalente reçue par l'organe ou par le tissu T

L'unité de la dose effective est le sievert (Sv); 1 Sv = 1 J/kg.

Dose efficace engagée 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.

Impressum

@ Bundesamt für Gesundheit (BAG)
Herausgeber : Bundesamt für Gesundheit
Layout: André Gurtner, URA
Publikationszeitpunkt : Juli 2022

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 2022

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