

*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*

2020



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

2020

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 2020.

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 des consommateurs
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 Gammasspektrometrie). 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 2020 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 Verbraucherschutz
Abteilung Strahlenschutz*

Sommaire

1 Surveillance de l'environnement : Résumé - 10

Tâches et programme de mesure - 10
Résultats de la surveillance 2020 - 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- 59

4 Environnement - 65

Aérosols et précipitations - 66
URAnet Aero - 70
Surveillance de l'air avec des avions militaires - 76
Radioactivité dans les systèmes aquatiques - 79
URAnet Aqua - 84
Tritium dans l'Aar - 87
Sols et herbes - 91

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
Plutonium et ²³⁶U dans des échantillons de glace du glacier du Gauli - 126

8 Surveillance des installations nucléaires - 133

Emissions et Immissions - 134
Dose ambiante et débit de dose ambiante - 146
MADUK - 148
ZWILAG - 153
Installations nucléaires et environnement - 156
CERN - rejets et environnement - 164
CERN - mesures OFSP - 169

9 Industries et hôpitaux - 177

Emissions des industries - 178
Emissions des hôpitaux - 181
Surveillance au voisinage des industries - 185
Plan d'action Radium - 191

10 Plan d'action Radon - 195

Annexes - 201

Inhaltverzeichnis

1 Umweltüberwachung : Zusammenfassung - 21

- Auftrag und Messprogramm - 21
- Ergebnisse der Umweltüberwachung 2020 - 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 - 59

4 Umwelt - 65

- Aerosol und Niederschlag - 66
- URAnet Aero - 70
- Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen - 76
- Aquatische System - 79
- URAnet Aqua - 84
- Tritium in der Aare - 87
- Boden und Gras - 91

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
- Plutoniumisotopen und ^{236}U in Eisproben des Gauligletschers - 126

8 Überwachung der Kernanlagen - 133

- Emissionen et Immissionen - 134
- Ortsdosis und Ortsdosisleistung - 146
- MADUK - 148
- ZWILAG - 153
- Nukleare Anlagen und Umwelt - 156
- CERN - Emissionen und Umwelt - 164
- CERN - BAG-Messungen - 169

9 Industrien und Spitäler - 177

- Emissionen der Betriebe - 178
- Emissionen der Spitäler - 181
- Überwachung in der Umgebung von Industrien - 185
- Aktionsplan Radium - 191

10 Aktionsplan Radon - 195

- Anhänge - 201

2020

Chapitre Kapitel 1

Surveillance de
l'environnement
Résumé

Umweltüberwachung
Zusammenfassung

Tâches et programme de mesure
Résultats de la surveillance 2020
Evaluation

Auftrag und Messprogramm
Ergebnisse der Umweltüberwachung 2020
Beurteilung

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 nouveau 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. Ce nouveau réseau 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 nouveau réseau est capable de détecter des niveaux de radioactivité largement plus faibles que

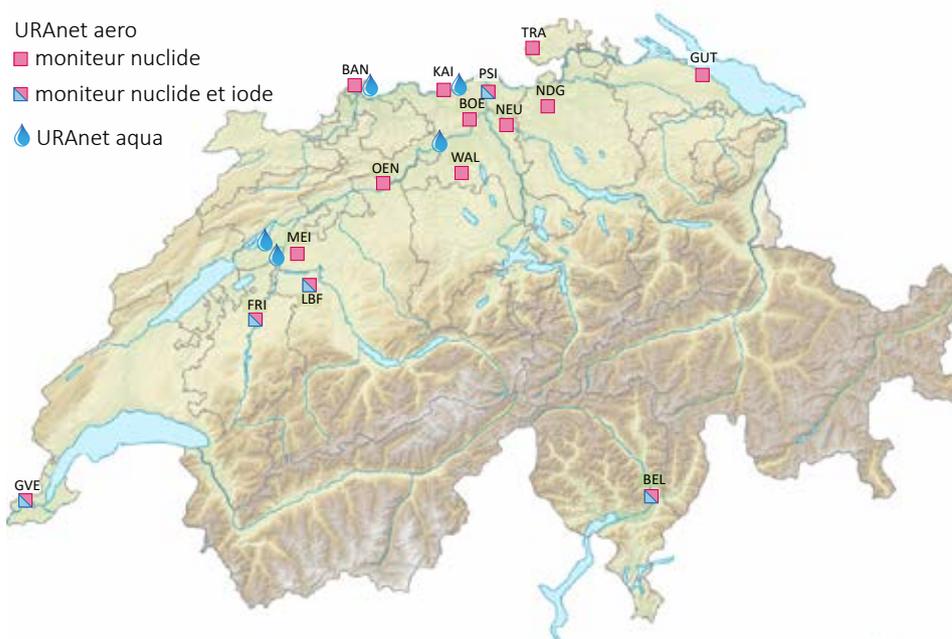


Figure 1: Réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air (URAnet aero) et dans les cours d'eau (URAnet aqua).

son prédécesseur (limite de détection de l'ordre de 1 à 2.5 milli-becquerels par mètre cube (mBq/m³) pour le césium-137 (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. Avec la mise en service du volet dédié à la surveillance de l'air, la Suisse dispose d'un réseau de surveillance automatique de la radioactivité dans l'environnement approprié et performant.

Résultats de la surveillance 2020

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 2020 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.

Des valeurs de ¹³⁷Cs situées dans la gamme supérieure des concentrations habituellement mesurées en Suisse ont été enregistrées en avril 2020, en particulier à Güttingen; à cette période de nombreux foyers d'incendie de forêt se sont déclarés en Ukraine et se sont étendus jusqu'à atteindre l'environnement proche de l'ancienne centrale nucléaire de Tchernobyl. Il ne peut être exclu que la valeur un peu plus élevée de ¹³⁷Cs mesurée à la station de Güttingen à la fin du mois d'avril soit en partie attribuable aux incendies de forêt en Ukraine. Cependant, il est tout aussi possible que la grave sécheresse d'avril en Suisse soit responsable de cette valeur plus élevée. Les résultats de la surveillance des précipitations tendent à montrer que du ¹³⁷Cs en provenance d'Ukraine a atteint la Suisse en avril, car ce radionucléide a été mesuré au-dessus de la limite de détection dans toutes les stations situées au Nord des Alpes en avril (valeur maximale de 2 mBq/l à Güttingen), ce qui est assez inhabituel et indicateur d'un apport extérieur (voir chapitre 4.1).

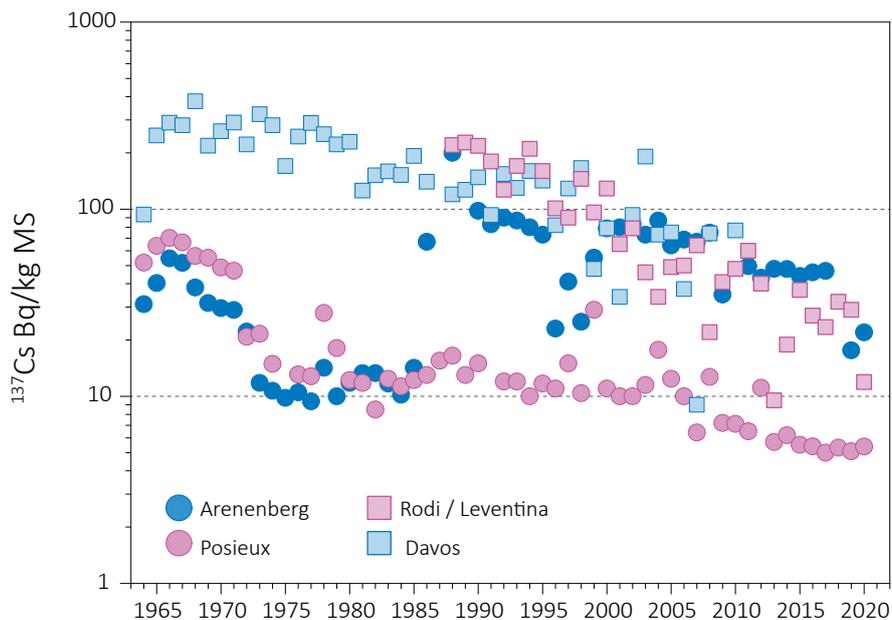


Figure 2: ¹³⁷Cs (en Bq/kg de matière sèche) dans les échantillons de sol de différentes stations de Suisse (1964 - 2020).

A l'exception de ces traces sporadiques de ^{137}Cs , aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a été décelé dans les précipitations en 2020. Il en va de même pour les rivières.

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 ^{40}K . Les isotopes artificiels proviennent des dépôts atmosphériques et montrent des différences régionales, liées aux particularités des retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. Dans les Alpes et le sud des Alpes, les valeurs relevées pour le ^{137}Cs (voir fig. 2) et le ^{90}Sr sont toujours légèrement supérieures à celles du Plateau. Quant aux émetteurs alpha artificiels, comme le ^{239}Pu , le ^{240}Pu et l' ^{241}Am , il n'en subsiste que d'infimes traces dans le sol.

Dans l'herbe et les denrées alimentaires, 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 qui

se situe entre 0.02 et 1 Bq/l selon les laboratoires de mesure. Seuls quelques échantillons de lait sur les 142 analysés en 2020 ont présenté une activité en ^{137}Cs mesurable: la valeur maximale de 15.8 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 ses retombées radioactives en 1986, ce qui explique que le ^{137}Cs y soit toujours mesurable à des niveaux plus élevés dans certains échantillons, plus de 30 ans après l'accident. Les activités mesurées en 2020 sont toutefois toutes restées nettement inférieures à la valeur maximale de 600 Bq/kg admise pour le ^{137}Cs selon l'Ordonnance Tchernobyl pour les denrées contaminées à la suite de cet accident. Les teneurs en ^{90}Sr mesurées dans 67 échantillons de lait par le canton de BS, l'IRA et le laboratoire de Spiez étaient très basses en 2020, avec une valeur maximale de 0.2 Bq/l et une valeur médiane de 0.03 Bq/l. Le ^{90}Sr mesuré en Suisse provient des retombées des essais nucléaires des années 60 et les régions d'altitude, recevant davantage de précipitations, ont été plus touchées que les régions de plaine.

Un seul échantillon de céréales a présenté une activité très faible (0.2 Bq/kg) mais mesurable de ^{137}Cs ; dans les 18 autres échantillons de céréales ainsi que dans les 28 échantillons de fruits et légumes prélevés en Suisse en 2020, 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 0.04 et 0.23 Bq/kg.

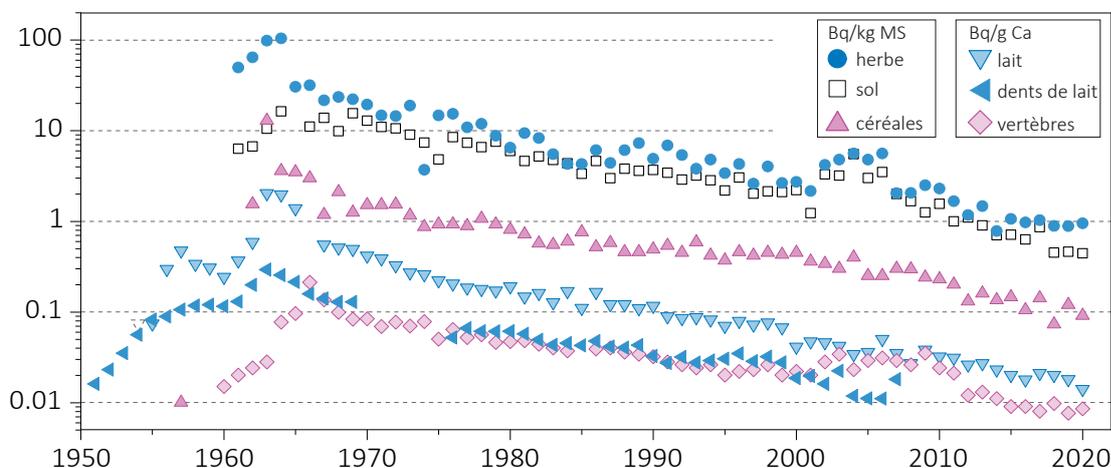


Figure 3:
 ^{90}Sr dans divers échantillons prélevés entre 1950 et 2020.

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 2020, 957 sangliers ont ainsi fait l'objet d'une mesure de tri, réalisée sur place à l'aide d'un instrument dosimétrique. Comme l'an passé, un dépassement de la valeur maximale pour le ^{137}Cs , fixée à 600 Bq/kg selon l'Ordonnance Tchernobyl, a été constatée dans env. 5% des cas et les sangliers concernés ont été confisqués par le vétérinaire cantonal. En 2020, le canton des Grisons a également mené une campagne de mesure similaire: 13 sangliers sur les 43 contrôlés ont dû être confisqués. Bien que les sangliers soient largement les plus contrôlés, 37 autres échantillons de gibier suisse (cerf, chevreuil, chamois) ont également été analysés en 2020, mais aucun dépassement de la valeur maximale pour le ^{137}Cs de l'ordonnance de Tchernobyl n'a été constaté dans ces échantillons.

A noter que si certains champignons sauvages indigènes, notamment les bolets bails et les pholiotés ridés présentent toujours des valeurs accrues de ^{137}Cs , très peu d'échantillons de ce type ont été analysés par les laboratoires cantonaux en 2020.

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 2020, le laboratoire cantonal de Bâle a encore analysé 26 échantillons de denrées alimentaires (thé, sauces, etc) en provenance du Japon. Seuls quatre échantillons ont présenté une activité en ^{137}Cs mesurable au-dessus de la limite de détection (moyenne des valeurs mesurées 0.4 ± 0.3 Bq/kg).

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). Le laboratoire cantonal de BS a ainsi mesuré les émetteurs gamma et le ^{90}Sr dans 26 échantillons de poissons et 34 échantillons d'épices importées ainsi que dans des aliments pour nourrissons (10 échantillons importés et 3 échantillons suisses). Les résultats obtenus sont conformes aux valeurs usuelles attendues. Les analyses effectuées par le laboratoire cantonal de ZH sur les produits importés ont essentiellement porté sur les champignons (frais, séchés ou en boîte) qui sont connus pour accumuler davantage le ^{137}Cs . La plupart des échantillons n'ont présenté que de faibles activités de ^{137}Cs , avec sporadiquement quelques valeurs plus élevées (maximum de 76 Bq/kg m.f.) mais toutes les valeurs mesurées sont restées nettement inférieures à la valeur maximale pour le ^{137}Cs fixée dans l'Ordonnance Tchernobyl.

Ainsi, les seuls dépassements de la valeur maximale pour le ^{137}Cs de l'Ordonnance Tchernobyl (600 Bq/kg)

constatés en Suisse en 2020 l'ont été dans des échantillons de sangliers (plus de 60) chassés en Suisse, au Sud des Alpes. Ceux-ci se nourrissent en effet parfois de truffes de cerf, des champignons non comestibles pour l'homme, qui accumulent le ^{137}Cs déposé au sol il y a près de 35 ans, après l'accident de Tchernobyl, et qui entretemps a migré dans les couches plus profondes, où se trouvent ces champignons.

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 à aérosols et à iode ainsi que sur des échantillons d'eau en phase de rejet permettent de vérifier régulièrement les valeurs déclarées aux autorités. Les divers contrôles ont confirmé le respect des limites réglementaires par les exploitants en 2020.

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

L'IFSN, en concertation avec l'OFSP, avait renforcé le programme existant de surveillance de la radioactivité dans l'environnement au voisinage de la CNM, en particulier dans le milieu terrestre, pour la période 2017-2019, i.e avant sa mise à l'arrêt; ce programme complémentaire avait pour objectif de permettre l'évaluation objective de l'impact radiologique éventuel des travaux de désaffectation de la CNM sur l'environnement et la population avoisinante. Les résultats de ce programme spécifique ont été publiés en avril 2021 dans le rapport commun IFSN-OFSP intitulé «[Programme complémentaire: Point zéro démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg \(CNM\) 2017-2019](#)».

Les résultats 2020 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 de l' ^{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 lors d'un contrôle périodique sur site effectué par l'IFSN en 2020 où une valeur instantanée de débit de dose de 0.32 $\mu\text{Sv/h}$ a été mesurée (voir chapitre 8.2). Toutefois, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la CNM a montré une élévation moyenne (calculée sur la base de la valeur trimestrielle mesurée) de la dose ambiante de 0.007 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 relation 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.

Les résultats de surveillance des immisions ont montré un faible marquage de l'environnement au voisinage des centrales nucléaires, même si les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, ont permis de mettre en évidence les traces de radionucléides produits par ces installations. Ainsi des valeurs accrues de ^{14}C , rejeté dans l'atmosphère par les centrales nucléaires lors de leur exploitation, ont été mises en évidence dans les feuillages (augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 99 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt). A titre indicatif, notons qu'une activité supplémentaire de 100 pour mille de ^{14}C dans les denrées alimentaires induit une dose annuelle supplémentaire de l'ordre de 1 micro-Sv. Le seul autre radionucléide provenant des rejets atmosphériques occasionnellement détecté est le tritium mesuré dans les précipitations, avec des activités très faibles.

Les rejets d'effluents radioactifs liquides par la CNM ont été, en 2020, supérieurs à ceux des années précédentes (avec le ^{60}Co et le ^{54}Mn comme isotopes dominants), mais 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. Par contre, l'augmentation des activités rejetées dans le milieu aquatique par la CNM s'est traduit immédiatement par l'apparition de traces sporadiques de ^{54}Mn et ^{60}Co dans les échantillons de sédiments prélevés à Hagneck, mais également à Klingnau et Pratteln pour le ^{54}Mn . A noter que les activités rejetées dans l'Aar en 2020 proviennent à près de 90% de la centrale nucléaire de Mühleberg. Le ^{60}Co , systématiquement décelé par le passé dans les échantillons de sédiments, n'avait pas pu être mesuré en 2019 en raison de la diminution des rejets de la CNM. Les activités mesurées en 2020 sont très faibles et ne présentent pas de risque pour la santé; elles témoignent de l'efficacité des programmes de surveillance mis en œuvre.

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

Les résultats des mesures de $^{239+240}\text{Pu}$ et 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-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation dans l'Aar (env. 10 Bq/l dans l'Aar à Brugg en avril) et dans une moindre mesure dans le Rhin, en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant la période de révision. A noter qu'une augmentation de la concentration journalière de ^3H dans l'eau de l'Aar en aval de la centrale de Mühleberg a pu être mesurée par l'Université de Berne en juin 2020 (jusqu'à 5 Bq/l) dans le cadre de son programme spécifique de mesure à très haute sensibilité. Si cette augmentation est directement liée à un rejet autorisé de tritium par la CNM (256 GBq de ^3H), les activités rejetées étaient 100 fois inférieures à la limite annuelle de rejet encore en vigueur en juin 2020¹ et n'ont pas

¹ Une nouvelle valeur limite de rejet pour le tritium dans les effluents liquides, 10 fois inférieure à celle qui prévalait en régime d'exploitation, a été fixée dans le nouveau règlement concernant le rejet de substances radioactives, entré en vigueur en septembre 2020, avec la décision de désaffectation.

entraîné d'augmentation de la concentration mensuelle moyenne du tritium de l'eau de l'Aar. Cette dernière est en effet restée inférieure à 2 Bq/l. Les mesures de surveillance usuelles ne peuvent donc pas mettre en évidence des variations de courte durée d'une si faible ampleur.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval des centrales nucléaires suisses en 2020 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, Döttingen et Pratteln.

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

Même si l'exposition de la population attribuable aux rejets des centrales nucléaires conduit à des doses très

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

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

Surveillance des centres de recherche

Le deuxième long arrêt du CERN (Long Shutdown 2) qui a débuté en décembre 2018 s'est poursuivi pendant toute l'année 2020. La quasi totalité des installations du CERN étant à l'arrêt, les rejets de substances radioactives dans l'environnement et l'impact radiologique du centre de recherche sur la population avoisinante ont été particulièrement faibles en 2020.

Le bilan et le contrôle des émissions de ses installations effectués par le CERN ont indiqué presque uniquement des rejets de tritium dans l'air et dans l'eau. Les niveaux de rayonnement diffusés sont restés le plus souvent nuls. Ce constat est confirmé par le programme de surveillance indépendant mis en œuvre par l'OFSP autour du centre de recherche. Les résultats des mesures effectuées en 2020 n'ont révélé la présence d'aucun radionucléide à courte demi-vie produit par les accélérateurs du CERN,

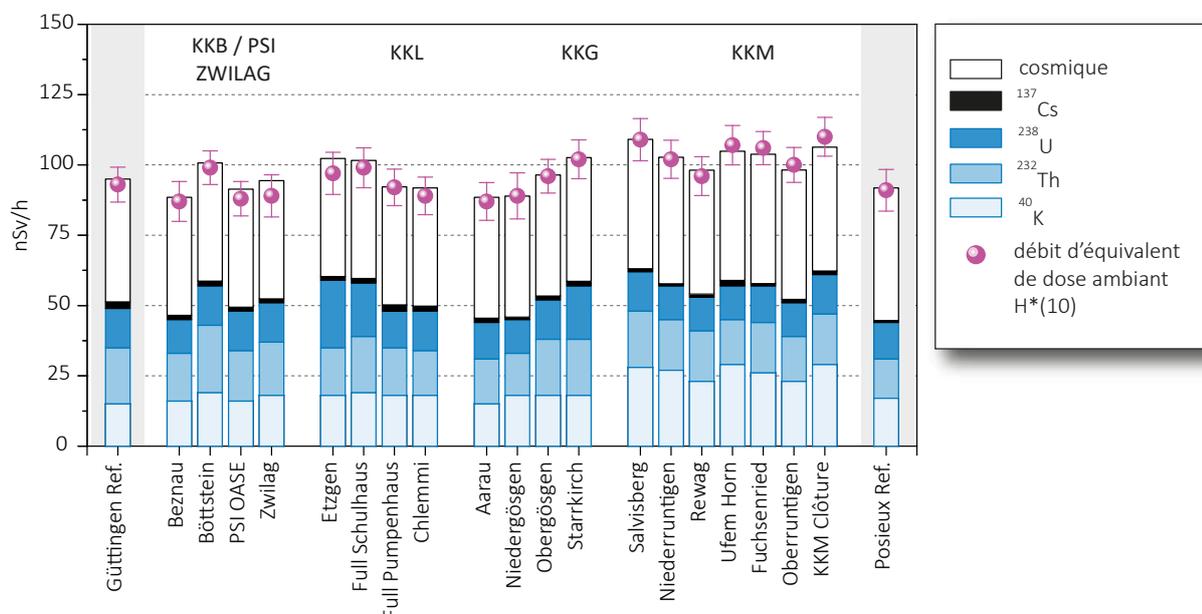


Figure 4: Contributions individuelles à l'exposition ambiante ($H^*(10)$) attribuables aux différents radionucléides présents sur les sites examinés par l'OFSP en 2020 au voisinage des centrales nucléaires suisses ainsi qu'aux sites de référence de Güttingen et Posieux (grisé). Ces contributions ont 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.

contrairement aux années précédentes, ou des traces de ^{24}Na ou d' ^{131}I étaient sporadiquement enregistrées. Ainsi, hormis des traces de ^{22}Na détectées dans le sol dans l'enceinte du centre de recherche, les résultats des mesures effectuées dans l'air et le milieu terrestre au voisinage du CERN ainsi que dans les eaux et sédiments du Nant d'Avril ne se sont pas distingués de ceux enregistrés hors influence de ses installations.

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 2020 une dose supplémentaire inférieure à 0.007 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. Ainsi, la station de mesure URAnet aero du PSI a pu mesurer des traces de $^{24}\text{Na}^2$, un radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15h) dans les aérosols de l'air le 28.09.2020. L'évaluation du spectre a montré un signal faible mais significatif provenant de ce radionucléide avec une concentration d'activité d'env. 1 mBq/m³ moyennée sur toute la période de collecte, à savoir 12h. Bien qu'inhabituelles, les activités rejetées sont restées nettement inférieures aux limites de rejet autorisées, aussi bien annuelle qu'à court terme. Cette légère augmentation de la radioactivité dans l'air, de courte durée (env. 10 minutes) et localement limitée, n'a pas eu de conséquences pour la santé. La détection d'une si faible concentration de radioactivité dans l'air par la sonde URAnet montre toutefois l'efficacité du système et son bon état de fonctionnement. Hormis cet exemple et quelques valeurs sporadiquement plus élevées de tritium dans les précipitations, les résultats de la surveillance au voisinage du PSI étaient similaires à ceux enregistrés à la station de référence de Güttingen.

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

² Pour plus de détails, le lecteur pourra également consulter le site <https://www.radenviro.ch/fr/detection-de-traces-de-sodium-24-dans-lair-par-un-detecteur-uranet-aero>.

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 2020, 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 2020, 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 Niederrwangen, avec toutefois une forte diminution (facteur 2 environ) par rapport à 2019. 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 350 Bq/l en 2020, avec une valeur maximale de 1'450 Bq/l en janvier. Cette valeur représente env. 7% 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. Même si des valeurs plus élevées de tritium sont toujours mesurées dans les denrées alimentaires récoltées au voisinage de l'entreprise, la tendance observée est également à la baisse. La valeur médiane des concentrations de tritium dans les distillats des 12 échantillons de fruits et légumes prélevés en août 2020 par le laboratoire cantonal de BE s'est ainsi élevée à 30 Bq/l avec une valeur maximale de 220 Bq/l, soit une diminution significative par rapport aux années précédentes. Dans les échantillons de lait, les concentrations en tritium étaient encore plus faibles (valeur maximale de 11 Bq/l). Les doses supplémentaires qui résulteraient de la consommation régulière de tels produits (eaux de pluie et légumes) ne dépasseraient pas quelques $\mu\text{Sv}/\text{an}$ et ne présentent donc aucun risque pour la santé.

La baisse générale des valeurs de tritium mesurées dans les différents compartiments environnementaux s'explique par la diminution significative des émissions de tritium dans l'air par mb Microtec en 2020. Cette réduction des émissions résulte, d'une part, de la diminution de la production en raison de la pandémie, et d'autre part, de la mise en service, fin 2019, d'un nouveau dispositif d'épuration des gaz. L'entreprise s'était en effet engagée fin 2017 à rénover son système de ventilation pour réduire les émissions. L'entreprise a encore d'autres projets

pour réduire ses émissions. La SUVA, en tant qu'autorité de surveillance, suit la situation de près.

Les concentrations de tritium mesurées dans les échantillons hebdomadaires de précipitations de Teufen/AR, au voisinage de l'entreprise RC Tritec, ont poursuivi leur tendance à la baisse. Avec une valeur maximale de 61 Bq/l et une médiane de 22 Bq/l, les valeurs mesurées dans les précipitations de Teufen en 2020 sont ainsi parmi les plus basses enregistrées depuis le début de la surveillance.

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 2020, mais les visites sur le terrain ont dû être restreintes durant une grande partie de l'année 2020 en raison de la pandémie de COVID-19. L'OFSP tentera de rattraper le retard accumulé en faisant appel à des soutiens externes en 2021, si la situation sanitaire le permet.

Selon l'état au 31 décembre 2020, 752 biens-fonds ont été examinés dans le cadre du plan d'action (représentant plus de 4'300 appartements ou objets commerciaux). La démarche de diagnostic consiste à mesurer le débit de dose sur toute la surface du bâtiment ou de l'espace extérieur concerné. En présence de traces de ^{226}Ra dans des locaux intérieurs, l'OFSP évalue la dose efficace reçue par les personnes qui séjournent dans le bâtiment sur la base des résultats de mesure et de scénarios d'exposition. En cas de dépassement de la dose efficace de 1 mSv par an pour les occupant(e)s, un assainissement s'avère nécessaire. Pour ce qui est des espaces extérieurs, une valeur seuil de 1'000 Bq/kg a été fixée pour la concentration de ^{226}Ra dans la terre.

Parmi les biens-fonds examinés, 120 (soit environ 16%) requièrent un assainissement au sens de l'art. 153 de l'ORaP, 77 appartements ou objets commerciaux et 77 espaces extérieurs étant concernés. Les travaux d'assainissement sont terminés ou en cours dans 105 biens-fonds. En ce qui concerne les locaux intérieurs, les doses estimées pour l'occupant actuel ou futur potentiellement le plus exposé se situent dans la majorité des cas (64) entre 1 et 5 mSv/an. Dans 8 appartements, la dose potentiellement reçue par la personne la plus exposée se situe entre 5 et 10 mSv/an, dans quatre appartements entre 10 et 15 mSv/an et dans un appartement entre 15 et 20 mSv/an. Les valeurs maximales de radium mesurées dans des échantillons de terre prélevés dans les 77 jardins

à assainir s'élèvent en moyenne à 28'000 Bq/kg. Dans un cas, elles avoisinent ponctuellement les 668'200 Bq/kg.

Par ailleurs, l'OFSP a déjà identifié 14 anciens sites industriels figurant au cadastre des sites pollués au sens de l'OSites qui nécessitent un assainissement lié au ^{226}Ra . L'OFSP a par ailleurs découvert des pollutions chimiques dans dix biens-fonds supplémentaires non-inscrits au cadastre des sites pollués et nécessitant également un assainissement lié au radium. L'OFSP coordonne au cas par cas l'assainissement de parcelles avec des pollutions mixtes avec les cantons concernés. Les cas complexes sont discutés au sein du «groupe de soutien sur les pollutions mixtes» constitué de représentants 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.

La surveillance des anciennes décharges susceptibles de contenir des déchets contaminés au radium constitue un volet spécifique du plan d'action, mené en étroite collaboration avec l'OFEV ainsi que les communes et cantons concernés. L'exemple de l'ancienne décharge du Lischenweg à Bienne a montré qu'il est possible encore aujourd'hui de découvrir des déchets contaminés au radium avec des niveaux de radioactivité parfois élevés dans les anciennes décharges même s'il s'agit de contaminations très localisées.

Un concept permettant de sélectionner les anciennes décharges inscrites au cadastre des sites pollués pouvant potentiellement contenir des déchets contaminés au radium et de les classer en trois catégories de risque sur la base de critères prédéfinis a été élaboré par l'OFSP, en collaboration avec l'OFEV. Pour les 2 catégories pour lesquelles le risque ne peut être négligé (catégories B et C), les mesures qui devront être mises en oeuvre en cas de travaux d'excavation (catégorie B et C) ou pour la surveillance à long terme (catégorie C) ont été définies.

Durant l'année 2020, l'OFSP a envoyé le concept en consultation à tous les cantons concernés par la problématique des déchets contaminés au radium dans les anciennes décharges, à savoir Berne, Bâle-Campagne, Bâle-Ville, Fribourg, Genève, Jura, Neuchâtel, Saint-Gall, Soleure, Schaffhouse, Vaud, Tessin et Zürich. Il a demandé aux cantons les plus touchés (Berne, Genève, Jura, Neuchâtel et Soleure) d'établir leur liste respective de décharges nécessitant des mesures de radioprotection en cas d'ouverture (catégorie B).

Le concept ayant été validé, l'OFSP prévoit de préciser les modalités de sa mise en oeuvre dans une directive. Il s'agira notamment de détailler les mesures à mettre en oeuvre en cas de travaux d'excavation ainsi que de préciser les responsabilités aussi bien pour les contrôles que pour

l'élimination des déchets. Sur la base des listes déjà envoyées par les cantons, plus de 100 décharges de catégorie B ont été identifiées.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 9.4.

Utilisation de substances radioactives dans les hôpitaux

Les hôpitaux utilisent depuis de nombreuses années de ^{131}I 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 mégabecquerel = 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. 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 leur concentration en ^{131}I (voir plus bas).

D'autres radionucléides comme ^{90}Y , le ^{177}Lu et depuis 2018 le ^{166}Ho sont également utilisés par des applications diagnostiques et thérapeutiques. Si l'utilisation du premier est en diminution constante depuis 2010, l'activité annuelle totale de ^{177}Lu appliquée en Suisse a plus que triplé entre 2007 et 2018 et a encore augmenté de 50% entre 2019 et 2020. Ce radionucléide est utilisé pour le traitement des cancers de la prostate. En 2020, il est le radionucléide le plus largement utilisé en médecine nucléaire, avec des activités appliquées plus de 2 fois supérieures à celles de ^{131}I . Le ^{166}Ho , utilisé depuis 2018 pour le traitement des tumeurs du foie est en 2020, le 4^{ème} radionucléide en termes d'activité annuelle appliquée en Suisse.

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. 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 et eaux de lavage des fumées des usines d'incinération

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. 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 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 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.

Les résultats de ces mesures ont montré que même si des traces d' ^{131}I utilisé par les hôpitaux sont parfois détectées dans les eaux des stations d'épuration, les valeurs se situent nettement en dessous des valeurs limites d'immissions définies dans l'ordonnance sur la radioprotection. En 2020, aucun pic de concentration de tritium n'a été enregistré par le laboratoire cantonal de Bâle-Ville dans les eaux de lavage des fumées de l'UVTD de Bâle, phénomène régulièrement observé par le passé, mais dont l'origine n'a pu être éclaircie malgré les recherches de la SUVA et de l'OFSP. 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 des résultats des mesures individuelles des échantillons journaliers, l'activité totale incinérée avait été estimée à env. 700 GBq, soit le double de l'activité maximale qui pourrait être légalement incinérée avec l'accord préalable de l'autorité selon l'Art.116 de l'ORaP. Le caractère récurrent de la situation constituant un facteur aggravant, l'OFSP a déposé une plainte auprès du ministère public de la confédération en 2020. Une enquête a été ouverte pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs en tant qu'ordures conventionnelles vers l'UVTD de Bâle a eu lieu par négligence ou de manière intention-

nelle. Les mesures réalisées dans les eaux de lavage des fumées des autres usines d'incinération n'ont mis en évidence aucun résultat inhabituel.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 9.3.

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 4). 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 4) sont donc répertoriées en fonction de l'année de naissance de l'enfant. Ceci explique que les courbes relatives aux dents de lait et au lait montrent une évolution pratiquement parallèle.

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 2020, 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 où il est encore présent dans de nombreux échantillons, ainsi que, dans une moindre mesure, sur les reliefs jurassiens et dans certaines parties du nord-est de la Suisse. 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 2020 dans certaines denrées sensibles et en particulier dans la viande de certains sangliers chassés au Tessin ainsi que dans les Grisons.

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, bien qu'en nette diminution par rapport aux années précédentes, ont atteint en 2020 7% 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, ils ne sont décelables que sporadiquement dans les eaux 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, les conséquences radiologiques liées au fonctionnement des centrales nucléaires, centres de recherche et industries sont restées très faibles pour les populations avoisinantes. Les traces de radioactivité artificielle décelées 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, Depo- nien und Kehrichtverbrennungsanlagen.

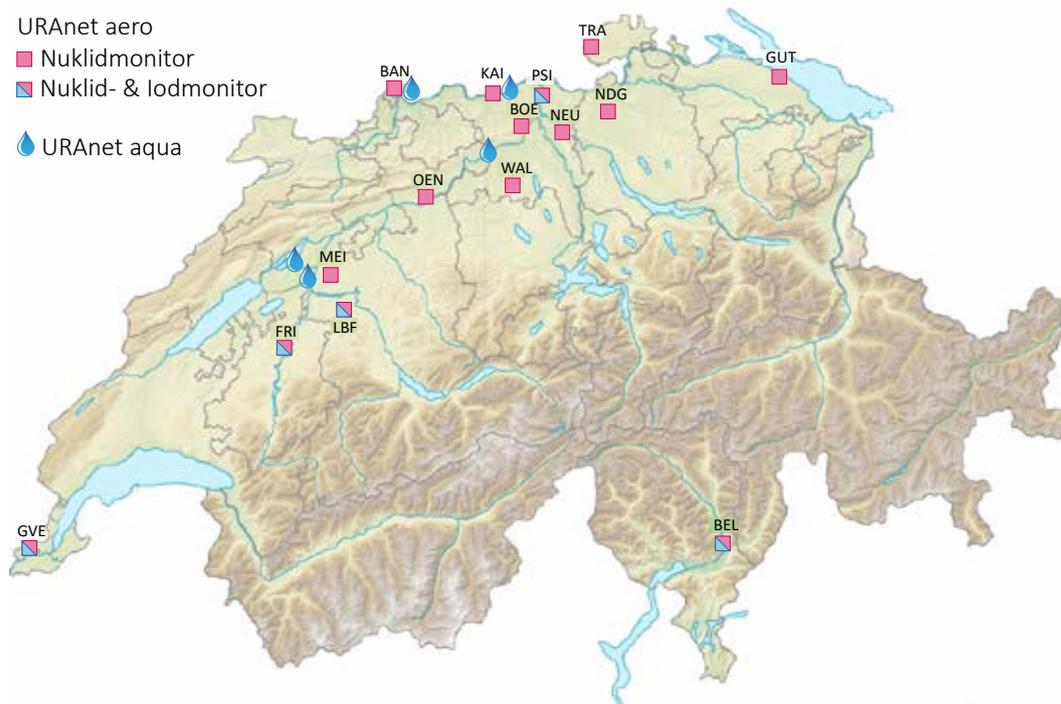
Automatische Messnetze (Figur 1) erfassen die Gamma- Dosisleistung über das ganze Land (NADAM = Alarm- und Messnetz zur Bestimmung der Dosisleistung) sowie speziell in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK = Mess- netz in der Umgebung der Kernanlagen zur Bestimmung der Dosisleistung). Die kontinuierliche 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 Fluss- wassers. Zusätzlich zu den automatischen Messungen werden von Aerosolen, Niederschlägen und Flusswasser kontinuierlich Proben für empfindliche Messungen im Labor entnommen. Die Überwachung von Sedimenten, Erdproben, Gras, Milch und Lebensmitteln (inklusive Importe) erfolgt stichprobenweise. Die Daten werden in einer nationalen Datenbank beim BAG erfasst. Die Messresultate der automatischen Messnetze sowie ein Grossteil der Ergebnisse der Labormessungen sind auf www.radenviro.ch abrufbar. Hingegen werden die Ergeb- nisse von speziellen Messprogrammen (z.B. Messungen von Wirbelknochen oder Milchzähnen; ¹⁴C-Messungen in Baumblättern) zurzeit noch ausschliesslich im hier vor- liegenden Jahresbericht publiziert. Die Messprogramme sind vergleichbar mit denjenigen unserer Nachbarländer. Die Methoden für die Probenentnahme und die Messpro-

gramme entsprechen dem aktuellen Stand von Wissen- schaft und Technik. Die Qualitätskontrolle erfolgt durch eine regelmässige Teilnahme der Laboratorien an natio- nalen und interna-tionalen Vergleichsmessungen.

Das automatische Messnetz URAnet

Das neue automatische Messnetz zur Überwachung der Radioaktivität in der Luft (URAnet aero) ist seit Septem- ber 2018 vollständig in Betrieb. Es ersetzt das veraltete RADAIR Messnetz, das nach dem Reaktorunfall in Tschern- obyl aufgebaut wurde. Das neue Messnetz ermöglicht die Identifikation und Quantifizierung der einzelnen im Aerosol vorhandenen Radionuklide (Gammaemitter) und alarmiert wenn vordefinierte Warnschwellen über- schritten 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 besie- deltem Gebiet verdichtet.

Das neue Messnetz ist auch bezüglich Empfindlichkeit deutlich besser als sein Vorgänger: für eine 12-Stunden Messung erreicht es eine Nachweisgrenze von 1 bis 2.5 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 Ge- fahr für die Gesundheit darstellen, und ermöglicht so, die Abschätzung der Strahlendosis für die Bevölkerung zu ver- bessern.



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

Der Teil «Flusswasser» von URAnet (URAnet aqua) ist mit fünf Sonden in der Aare und im Rhein seit November 2015 in Betrieb. Mit der vollständigen Inbetriebnahme des Teiles «Luft» verfügt die Schweiz über ein zweckmässiges und leistungsfähiges automatisches Messnetz zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt.

Ergebnisse der Umweltüberwachung 2020

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

Die Resultate 2020 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 April 2020 wurden (insbesondere in Güttingen) ^{137}Cs -Werte im oberen Bereich der in der Schweiz üblicherweise gemessenen Konzentrationen beobachtet. Zu dieser Zeit wüteten in der Ukraine zahlreiche Waldbrände, die sich auf die Umgebung des ehemaligen Kernkraftwerks Tschernobyl ausbreiteten. Es ist daher nicht auszuschliessen, dass der Ende April an der Station Güttingen gemessene erhöhte ^{137}Cs -Wert mit diesen Waldbränden zusammenhängt. Ausbreitungsrechnungen des IRSN unterstützen diese These. Es ist natürlich aber auch möglich, dass die starke Trockenheit in der Schweiz im April für den höheren Wert verantwortlich ist. Die Ergebnisse der Messungen von Regenproben deuten ebenfalls darauf hin, dass im April ^{137}Cs aus der Ukraine in die Schweiz gelangt ist, da dieses Radionuklid an allen Stationen

nördlich der Alpen über der Nachweisgrenze gemessen wurde (Maximalwert von 2 mBq/l in Güttingen), was recht ungewöhnlich ist und auf einen externen Eintrag hinweist (siehe Kapitel 4.1).

Mit Ausnahme dieser und sporadischen Spuren wurde im Jahr 2020 keine künstliche Radioaktivität im Niederschlag nachgewiesen. Dasselbe gilt für die Flüsse. 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 den Ablagerungen aus der Luft und zeigen regionale Unterschiede, die mit dem unterschiedlichen «Fallout» von Radioaktivität aus den oberirdischen Kernwaffenversuchen und dem Tschernobyl-Reaktorunfall 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 von 0.02 bis 1 Bq/l, je nach Messlabor. Nur wenige der 142 Milchproben, die im Berichtsjahr analysiert wurden, wiesen eine messbare ^{137}Cs -Aktivität auf: Der Maximalwert von 15.8 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 mehr als 30 Jahre nach dem Unfall in einigen Proben immer noch in höheren Konzentrationen gemessen werden kann. Die im Jahr 2020 gemessenen Aktivitäten blieben jedoch alle deutlich unter dem Höchstwert der Tschernobyl-Verordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs in durch

diesen Unfall kontaminierten Lebensmitteln. Die vom Kantonalen Laboratorium BS, dem IRA in Lausanne und dem Labor Spiez gemessenen ^{90}Sr -Konzentrationen in 67 Milchproben waren 2020 sehr tief, mit einem maximal gemessenen Wert von 0.2 Bq/l und einem Medianwert von 0.03 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 (0.2 Bq/kg), aber messbare ^{137}Cs -Aktivität; in den anderen 18 Getreideproben sowie in den 28 Obst- und Gemüseproben, die 2020 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 0.23 Bq/kg.

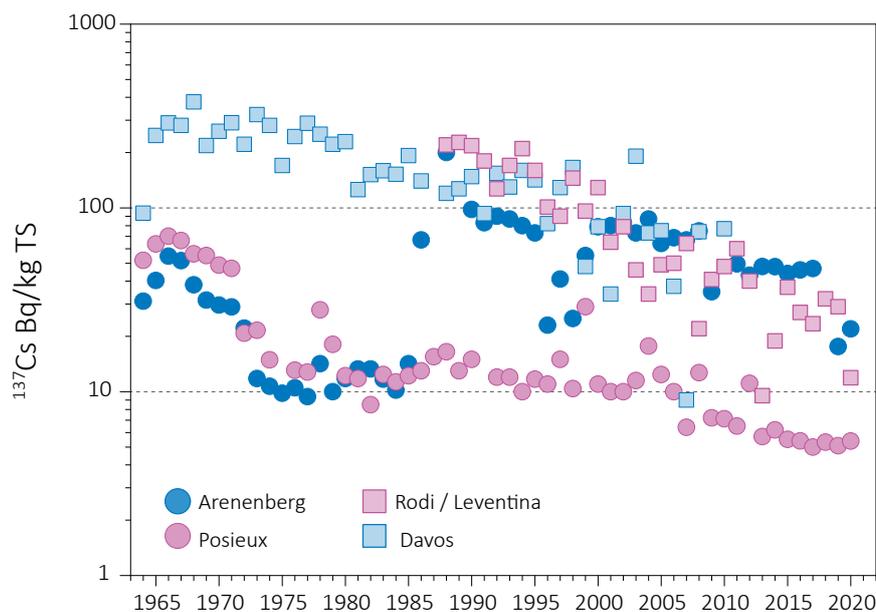
Der Kanton Tessin setzte die systematische Überwachung der auf seinem Territorium bejagten Wildschweine fort, die 2013 in Zusammenarbeit mit dem BAG eingeführt wurde. Im Jahr 2020 wurden 957 Wildschweine vor Ort mit einem dosimetrischen Instrument ausgemessen. Wie letztes Jahr wurde in rund 5% der Fälle der Höchstwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs überschritten und die betroffenen Wildschweine wurden vom Kantonstierarzt beschlagnahmt. Im Jahr 2020 führte auch der Kanton Graubünden eine ähnliche Messaktion durch: 13 der 43 getesteten Wildschweine mussten beschlagnahmt werden. Obwohl Wildschweine am häufigsten untersucht wurden, wurden im Jahr 2020 auch 37 andere Proben von Schweizer Wild (Hirsche, Rehe, Gämsen) analysiert. In diesen Proben wurde keine Überschrei-

itung des Höchstwertes für ^{137}Cs der Tschernobyl-Verordnung festgestellt.

Es ist anzumerken, dass einige einheimische Wildpilze, insbesondere Steinpilze und Faltenpilze, zwar immer noch erhöhte Werte von ^{137}Cs aufweisen, aber im Jahr 2020 nur sehr wenige Pilzproben von den kantonalen Laboratorien analysiert wurden.

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 2020 analysierte das kantonale Laboratorium in Basel 26 Lebensmittelproben (Tee, Saucen usw.) aus Japan. Nur vier Probe (Tee) zeigten eine messbare ^{137}Cs -Aktivität oberhalb der Nachweisgrenze (Mittel der Messwerte 0.4 ± 0.3 Bq/kg).

Lebensmittelimporte aus anderen Ländern und speziell aus Osteuropa wurden, wie jedes Jahr, von den Kantonalen Laboratorien (BS, ZH) ebenfalls analysiert. Das KL BS hat Gammastrahler und ^{90}Sr in 26 Proben von importiertem Fisch und 34 Proben von importierten Gewürzen sowie in Babynahrung (10 importierte Proben und 3 Schweizer Proben) gemessen. Die Ergebnisse stimmen mit den erwarteten Werten überein. Die vom KL ZH durchgeführten Analysen von Importprodukten konzentrierten sich auf Pilze (frisch, getrocknet oder in Dosen), von denen bekannt ist, dass sie mehr ^{137}Cs anreichern. Die meisten Proben wiesen nur geringe ^{137}Cs -Aktivitäten auf, vereinzelt auch höhere Werte (maximal 76 Bq/kg Frischgewicht), aber sämtliche Werte blieben deutlich unterhalb des



Figur 2:
 ^{137}Cs (in Bq/kg Trockenmasse) in Bodenproben verschiedener Stationen der Schweiz (1964 - 2020).

Höchstwertes für ^{137}Cs aus der Tschernobyl-Verordnung.

Insgesamt sind also die wenigen 2018 in der Schweiz festgestellten Überschreitungen des Höchstwertes der Tschernobyl-Verordnung in einheimischen Lebensmitteln (Wildschwein, Pilze) noch immer eine Folge des Reaktorunfalles in Tschernobyl – auch mehr als 30 Jahre danach.

Die einzigen Überschreitungen des Höchstwertes für ^{137}Cs aus der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg), die 2020 in der Schweiz festgestellt wurden, betrafen Proben von rund 60 Wildschweinen, die in der Schweiz südlich der Alpen gejagt wurden. Wildschweine ernähren sich gerne von Hirschtrüffeln. Diese für die Menschen ungeniessbaren Pilze wachsen in tieferen Bodenschichten und reichern dort das vor nahezu 35 Jahren nach dem Tschernobyl-Unfall auf dem Boden abgelagerte, aber inzwischen nach unten gewanderte, ^{137}Cs an.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 4, 5 und 7.2.

Überwachung in der Umgebung von Kernanlagen

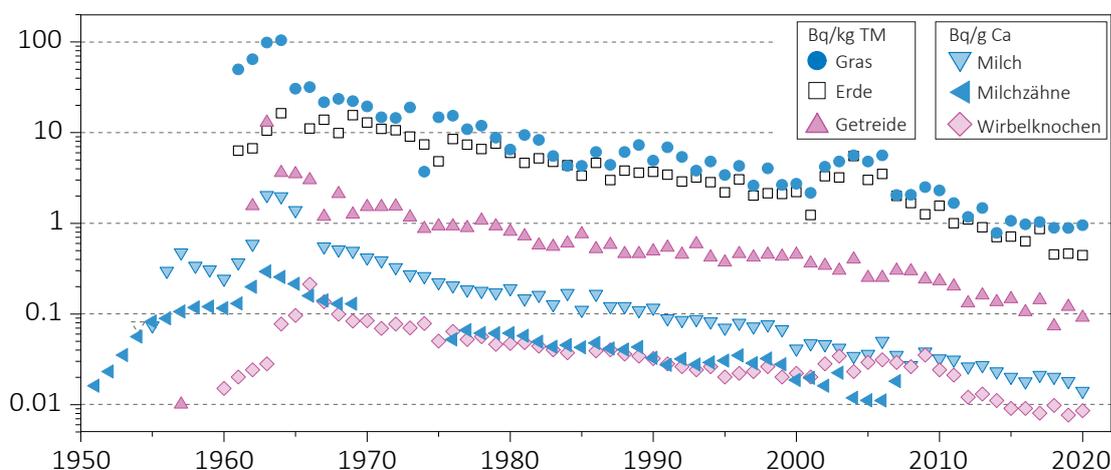
Bei den Kernkraftwerken werden die Grenzwerte für die Emissionen radioaktiver Stoffe durch die Bewilligungsbehörde so festgelegt, dass niemand der in der Umgebung wohnt eine Dosis von mehr als 0.3 mSv pro Jahr erhalten kann (einschliesslich direkte Strahlung). Der Betreiber muss seine Emissionen erfassen und dem ENSI mitteilen. Die den Behörden gemeldeten Abgaben werden regelmässig durch parallele Messungen von Betreibern, ENSI und BAG

an Aerosol- und Iodfiltern sowie Abwasserproben überprüft. Die verschiedenen Kontrollen haben bestätigt, dass die schweizerischen Kernkraftwerke die Abgabengrenzwerte 2020 eingehalten haben.

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.

Das ENSI hatte in Absprache mit dem BAG das bestehende Programm zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt (insbesondere Boden und Gras) in der Umgebung des KKM für den Zeitraum 2017-2019, also vor der Stilllegung, verstärkt. Ziel dieses zusätzlichen Programms war es, eine Grundlage für die objektive Beurteilung der möglichen radiologischen Auswirkungen der Stilllegungsarbeiten auf die Umwelt sowie Anwohnerinnen und Anwohner zu schaffen. Die Ergebnisse dieses Programms wurden im April 2021 im gemeinsamen ENSI-BAG-Bericht mit dem Titel «[Ergänzungsprogramm: Nullpegelmessung Rückbau Kernkraftwerk Mühleberg \(KKM\) 2017-2019](#)» veröffentlicht.

Die Ergebnisse der Überwachung der Kernanlagen 2020 zeigten die erwarteten Ergebnisse. Wie schon in der Vergangenheit konnten an gewissen



Figur 3: ^{90}Sr in verschiedenen, zwischen 1950 und 2020 entnommenen Proben (logarithmische Skala).

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 2020 bei einer periodischen Vor-Ort-Kontrolle durch das ENSI festgestellt, bei der ein Momentanwert der Dosisleistung von $0.32 \mu\text{Sv/h}$ gemessen wurde (siehe Kapitel 8.2). Die Auswertung der TLD am Zaun des KKM ergab jedoch eine durchschnittliche Erhöhung der Umgebungsdosis (berechnet auf der Basis des gemessenen Quartalswertes) von $0.007 \text{ mSv pro Woche}$, nach Abzug des natürlichen Hintergrundes.

Diese Werte erfüllen die Anforderungen von Art. 79 der StStV zur Begrenzung der Ortsdosis ausserhalb von Kontroll- und Überwachungsbereichen, da sich keine Person dauerhaft an diesen Orten aufhält. Hier ist zu beachten, dass die Immissionsgrenzwerte für Direktstrahlung für die Ortsdosis gelten und sich nicht auf Personendosen beziehen. Diese Werte können daher nicht mit dem quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.3 mSv/Jahr für die Bevölkerung 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 2020 gering blieben. Mit hochempfindlichen Messmethoden konnten Spuren der Abgaben an die Atmosphäre festgestellt werden, etwa erhöhte Werte für ^{14}C im Laub (maximale Erhöhung gegenüber der Referenzstation von 99 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 flüssigen radioaktiven Abgaben aus dem KKM waren im Jahr 2020 höher als in den Vorjahren (mit ^{60}Co und ^{54}Mn als dominierende Isotope), blieben aber unter dem Zielwert von 1 GBq/Jahr und führten nicht zu einem messbaren Anstieg der ^{54}Mn - oder ^{60}Co -Konzentrationen in den monatlichen Wasserproben aus der Aare. Hingegen führte der Anstieg der Abgaben ins Flusswasser zum Auftreten von sporadischen Spuren von ^{54}Mn und ^{60}Co in Sedimentproben, die in Hagneck genommen wurden, sowie für ^{54}Mn auch in Sedimentproben von Klingnau und Pratteln. Es ist zu beachten, dass fast 90% der im Jahr 2020 in die Aare eingeleiteten Aktivitäten aus dem Kernkraftwerk Mühleberg stammen. ^{60}Co , das in der Vergangenheit

systematisch in Sedimentproben nachgewiesen wurde, konnte 2019 aufgrund der Verringerung der Einleitungen aus dem KKM nicht gemessen werden. Die im Jahr 2020 gemessenen Aktivitäten sind sehr gering und stellen kein Gesundheitsrisiko dar; sie spiegeln die Wirksamkeit der durchgeführten Überwachungsprogramme wider.

Das ^{137}Cs , welches in Wasserproben 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 Juni, wo wie jedes Jahr eine leichte Erhöhung der Werte in der Aare festgestellt wurde (10 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.

Im Juni 2020 hat die Universität Bern im Rahmen ihres hochempfindlichen Messprogramms einige erhöhte Tageswerte für die Konzentration von ^3H im Aarewasser unterhalb des Kraftwerks Mühleberg festgestellt (bis zu 5 Bq/l). Ursache dieses Anstiegs war eine genehmigte Abgabe von Tritium aus dem KKM. Die abgegebene Aktivität ($256 \text{ GBq } ^3\text{H}$) war 100-mal geringer als die im Juni 2020¹ noch geltende jährliche Abgabelimite und führte nicht zu einem messbaren Anstieg der durchschnittlichen monatlichen Tritiumkonzentration im Aarewasser, die unter 2 Bq/l blieb. Die Routineüberwachung mit Monatsproben ist nicht darauf ausgelegt derart geringe kurzfristige Schwankungen zu erkennen.

Analysen von Fischen aus der Aare und dem Rhein flussabwärts der Schweizer Kernkraftwerke ergaben 2020 keine Hinweise auf künstliche Gammastrahler. Das Gleiche gilt für das untersuchte Grundwasser in Aarberg, Döttingen, Gösigen und Pratteln.

¹ Im Rahmen der Stilllegungsverfügung ist im neuen, ab September 2020 gültigen Abgabereglement eine angepasste Limite für die Abgabe von Tritium im Abwasser festgelegt, die zehnmal tiefer ist als jene während der Betriebsphase.

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

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

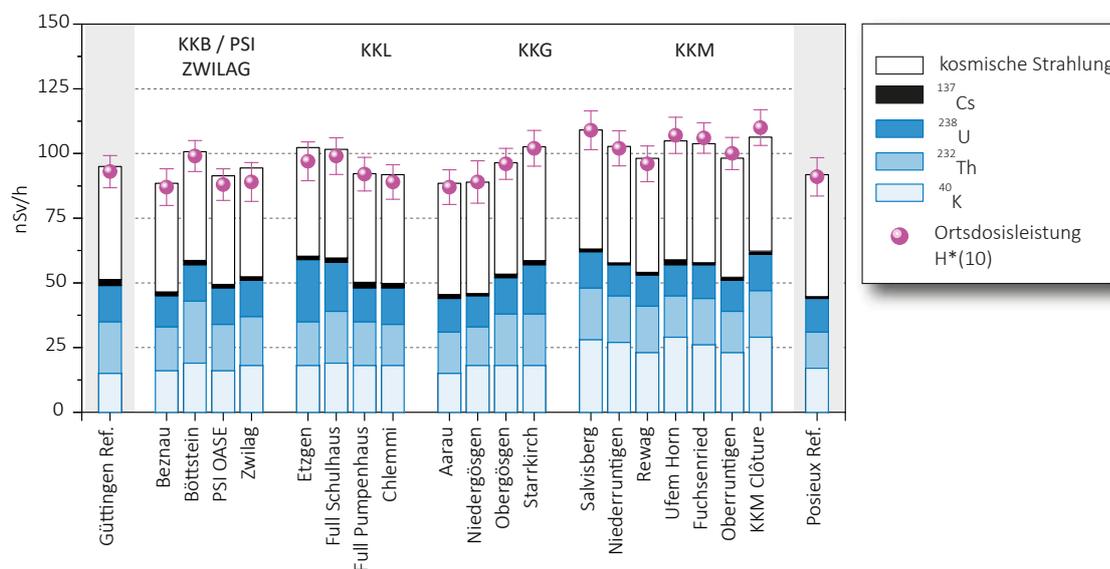
Doch selbst wenn die Exposition der Bevölkerung durch die Emissionen der Kernkraftwerke im Vergleich zu natürlichen oder medizinischen Quellen zu sehr niedrigen Dosen führt (jährliche zusätzliche Dosis für meistbetroffene Erwachsene von <0.001 mSv für KKB und KKG bzw. 0.002 mSv für KKL und KKM), ist 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 zweite lange Abschaltung des CERN (Long Shutdown 2) die im Dezember 2018 begann dauerte auch das ganze Jahr 2020 noch an. Da praktisch alle Anlagen abgeschaltet waren, waren die Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umwelt und damit die radiologischen Auswirkungen für die umliegende Bevölkerung 2020 besonders tief. Die interne Emissionskontrolle der Anlagen durch das CERN ergab fast ausschliesslich Tritiumfreisetzungen in Luft und Wasser. Die Streustrahlungswerte blieben grösstenteils Null. Dies wird durch das vom BAG rund um das Forschungszentrum durchgeführte unabhängige Überwachungsprogramm bestätigt. Die Ergebnisse der 2020 durchgeführten Messungen ergaben keine von den CERN-Beschleunigern produzierten Radionuklide; dies im Unterschied zu früheren Jahren, wo sporadisch Spuren von ^{24}Na oder ^{131}I aufgezeichnet wurden. So unterscheiden sich, abgesehen von Spuren von ^{22}Na im Boden innerhalb der Umzäunung des Forschungszentrums, die Ergebnisse der Messungen von Luft, Boden und Bewuchs aus der Nähe des CERN sowie von Wasser und Sedimenten der Nant d'Avril nicht von Proben, die ausserhalb des Einflusses der Anlagen genommen wurden.

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



Figur 4:

Beiträge zur Ortsdosis ($H^*(10)$) durch die verschiedenen Radionuklide, die vom BAG 2020 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 Gesamtdosis mit Hilfe einer Ionisationskammer dargestellt. Damit lässt sich die Zuverlässigkeit der Methode verifizieren.

Jahr ausmachen darf. Die Auswertungen des ENSI zeigen, dass die tatsächlichen Abgaben des PSI/ZWILAG 2020 zu einer zusätzlichen Dosis für Anwohner von weniger als 0.007 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.

So meldete das vom BAG betriebene Luftüberwachungsnetz URAnet aero am PSI am 28. September 2020 Spuren des künstlichen kurzlebigen Radionuklids $^{24}\text{Na}^2$ (Halbwertszeit 15 h). Die Spektrenauswertung zeigte ein schwaches, aber signifikantes Signal dieses Radionuklids mit einer Aktivitätskonzentration von ca. 1 mBq/m³ gemittelt über den gesamten Sammelzeitraum von 12 h. Obwohl ungewöhnlich, blieben die freigesetzten Aktivitäten weit unter den bewilligten Abgabelimiten, sowohl jährlich als auch kurzfristig. Dieser leichte Anstieg der Radioaktivität in der Luft, der kurzlebig (ca. 10 Minuten) und lokal begrenzt war, hatte keine gesundheitlichen Folgen. Der Nachweis einer so geringen Konzentration von Radioaktivität in der Luft durch die URAnet-Sonde zeigt jedoch die Effizienz dieses Systems. Abgesehen von diesem Beispiel und einigen sporadisch höheren Werten von Tritium im Niederschlag waren die Überwachungsergebnisse in der Umgebung des PSI ähnlich wie an der Referenzstation in Güttingen.

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 2020 haben alle betroffenen Betriebe die in ihren jeweiligen Bewilligungen festgehaltenen Abgabelimiten respektiert. Zur Kontrolle der Immissionen in der Umgebung dieser Betriebe führt das BAG ein spezifisches Überwachungsprogramm durch. Auf Tritium untersucht werden Niederschläge, Luftfeuchtigkeit, Gewässer und in einigen Fällen auch Lebensmittel.

Wie in den vorangegangenen Jahren zeigten die Resultate der Überwachung 2020 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

² Für weitere Angaben siehe auch: [URAnet aero: Detektor erfasst Spuren von Natrium-24 in der Luft – Radenviro](#)

mit 2019 deutlich zurückgingen (ungefähr um einen Faktor 2). Die Tritiumkonzentration im Niederschlag bei der Messstation «Firma» (in der Nachbarschaft der Firma mb-microtec, Niederwangen) betrug 2020 im Mittel 350 Bq/l mit einem Maximum von 1'450 Bq/l im Januar. Dieser Wert entspricht ca. 7% des in der neuen Strahlenschutzverordnung festgelegten Immissionsgrenzwertes von 20'000 Bq/l für öffentlich zugängliche Gewässer. Diese im Niederschlag gemessenen 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 30 Bq/l, mit einem Höchstwert von 220 Bq/l, was einen deutlichen Rückgang gegenüber 2019 bedeutet. In Milchproben waren die Tritiumkonzentrationen noch tiefer, mit einem Maximum von 11 Bq/l. Die zusätzlichen Dosen, die sich aus dem regelmässigen Verzehr solcher Produkte (Regenwasser und Gemüse) ergeben würden, entsprächen ein paar wenigen $\mu\text{Sv}/\text{Jahr}$ und stellen daher kein Gesundheitsrisiko dar.

Der Rückgang der in den verschiedenen Umweltkompartimenten gemessenen Tritiumwerte ist auf die deutliche Reduzierung der Emissionen durch mb Microtec im Jahr 2020 zurückzuführen. Diese Verringerung resultiert zum einen aus dem pandemiebedingten Produktionsrückgang und zum anderen aus der Inbetriebnahme einer neuen Gasreinigungsanlage Ende 2019. Das Unternehmen hat sich Ende 2017 verpflichtet, seine Lüftungsanlage zu erneuern, um die Emissionen zu reduzieren und hat noch weitere Projekte, um seine Emissionen zu reduzieren. Die SUVA als Aufsichtsbehörde beobachtet die Situation genau.

Die Tritiumkonzentrationen in den wöchentlichen Regenproben von Teufen/AR in der Umgebung der Firma RC Tritec sind deutlich tiefer. Mit einem Maximum von 61 Bq/l und einem Medianwert von 22 Bq/l gehören die dort im Jahr 2020 gemessenen Tritiumkonzentrationen zu den tiefsten seit Beginn der Überwachung.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 5, 9.1 und 9.3.

Radium-Altlasten

Der vom Bundesrat im Mai 2015 verabschiedete Aktionsplan Radium 2015-2022 hat das Ziel, die durch die Verwendung von radiumhaltiger Leuchtfarbe in der Uhrenindustrie bis in die 1960er Jahre entstandenen Altlasten zu bewältigen. Die Arbeit in den vier verschiedenen Achsen des Aktionsplans wurde im Jahr 2020 fortgesetzt, jedoch musste die Feldarbeit während eines grossen Teils des Jahres 2020 aufgrund der Pandemie COVID-19 reduziert werden. Das BAG wird versuchen, den Rückstand mit

externer Unterstützung im Jahr 2021 aufzuholen, sofern es die gesundheitliche Situation erlaubt.

Stand 31. Dezember 2020 wurden im Rahmen des Aktionsplans 752 Objekte untersucht (das entspricht mehr als 4'300 Wohnungen oder Gewerbelokalitäten). Bei der Diagnose wird die Dosisleistung auf der gesamten Fläche des betroffenen Gebäudes oder Aussenbereichs gemessen. Werden in Innenräumen Spuren von Radium festgestellt, so evaluiert das BAG anhand der Messergebnisse und mit Expositionsszenarien die zusätzliche Jahresdosis, der sich die Gebäudenutzenden aussetzen könnten. Diese Szenarien sollen ausschliessen, dass jemand, der diese Räumlichkeiten derzeit oder künftig nutzt, einer Strahlung oberhalb des Grenzwertes von 1 Millisievert (mSv) pro ausgesetzt wird. Zeigt die Abschätzung, dass der Grenzwert von 1 mSv pro Jahr für die Bewohner überschritten werden kann, so werden die Räumlichkeiten saniert. Gärten werden saniert, wenn die ^{226}Ra -Konzentration in der Erde den Grenzwert von 1'000 Bq/kg übersteigt.

Von den untersuchten Objekten sind 120 (ca. 16%) nach Art. 153 StSV sanierungsbedürftig: 77 Wohnungen bzw. Gewerberäumlichkeiten und 77 Aussenanlagen. Bei 105 Liegenschaften sind die Sanierungsarbeiten bereits abgeschlossen oder im Gange. Bei Innenräumen liegen die geschätzten Dosen für die potenziell am stärksten exponierten derzeitigen oder zukünftigen Bewohner in den meisten Fällen (64) zwischen 1 und 5 mSv/Jahr. In 8 Wohnungen liegt diese Dosis zwischen 5 und 10 mSv/Jahr, in vier Wohnungen zwischen 10 und 15 mSv/Jahr und in einer Wohnung zwischen 15 und 20 mSv/Jahr. Die maximalen Radiumkonzentrationen in Bodenproben aus den 77 zu sanierenden Gärten betragen durchschnittlich 28'000 Bq/kg. Der höchste gemessene Wert lag bei 668'200 Bq/kg.

Darüber hinaus hat das BAG bereits rund 14 ehemalige Industriestandorte im Kataster der belasteten Standorte gemäss Altlastenverordnung identifiziert, die im Zusammenhang mit ^{226}Ra sanierungsbedürftig sind.

Das BAG hat ausserdem chemische Verschmutzungen auf zehn weiteren Liegenschaften entdeckt, die nicht im Kataster der belasteten Standorte enthalten waren und die ebenfalls einer Radiumsanie rung bedürfen. Das BAG koordiniert die Sanierung von Liegenschaften mit Mischkontaminationen fallweise mit den betroffenen Kantonen. Komplexe Fälle werden in der Begleitgruppe «pollutions mixtes» besprochen, die sich aus Vertretern des BAG, des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und der Suva zusammensetzt, um die Einhaltung der Strahlen-

schutz- und Umweltschutzgesetzgebung sowie der Arbeitnehmerschutzvorschriften sicherzustellen.

Die Überwachung von ehemaligen Deponien mit Verdacht auf radiumhaltige Abfälle bildet einen weiteren Schwerpunkt des Aktionsplans. Hier arbeitet das BAG eng mit dem BAFU sowie den betroffenen Gemeinden und Kantonen zusammen. Das Beispiel der ehemaligen Deponie Lischenweg in Biel hat gezeigt, dass es auch heute noch möglich ist auf Deponien stark mit Radium kontaminierte Abfälle zu finden, wenn auch lokal eng begrenzt.

Das BAG hat in Zusammenarbeit mit dem BAFU ein Konzept entwickelt, um die im Altlastenkataster aufgeführten ehemaligen Deponien zu finden, die potenziell ^{226}Ra kontaminierte Abfälle enthalten könnten. Die betroffenen Deponien wurden dann auf der Grundlage vordefinierter Kriterien in drei Risikokategorien eingeteilt. Für die beiden höheren Risikokategorien wurden spezifische Strahlenschutz- und/oder Überwachungsmassnahmen festgelegt, die bei Aushubarbeiten auf der Deponie (Kategorie B und C) beziehungsweise bei einer Langzeitüberwachung (Kategorie C) umgesetzt werden müssen.

Im Jahr 2020 schickte das BAG das Konzept zur Vernehmlassung an alle Kantone, die von der Problematik betroffen sind, d.h. Bern, Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Freiburg, Genf, Jura, Neuenburg, St. Gallen, Solothurn, Schaffhausen, Waadt, Tessin und Zürich. Die am stärksten betroffenen Kantone (Bern, Genf, Jura, Neuenburg und Solothurn) wurden gebeten, eigene Listen von Deponien zu erstellen, die im Falle von Aushubarbeiten Strahlenschutzmassnahmen erfordern (Kategorie B).

Nachdem das Konzept nun validiert ist, will das BAG die Details der Umsetzung in einer Wegleitung festlegen. Dabei werden insbesondere die Massnahmen bei Aushubarbeiten und die Zuständigkeiten für die Überwachung und die Abfallentsorgung festgelegt. Anhand der bereits von den Kantonen eingesandten Listen wurden mehr als 100 Deponien der Kategorie B identifiziert.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.4.

Verwendung von radioaktiven Stoffen Spitälern

In Spitälern wird bei der Diagnostik und Behandlung von Schilddrüsenerkrankungen ^{131}I verwendet. Iodtherapie-Patienten, die mit weniger als 200 MBq (1 MegaBq = 10^6 Bq) behandelt wurden, dürfen das Spital nach der Therapie verlassen. Bei über 200 MBq müssen die Patienten mindestens während den

ersten 48 Stunden in speziellen Zimmern isoliert werden. Die Ausscheidungen dieser Patienten werden in speziellen Abwasserkontrollanlagen gesammelt und erst nach Abklingen unter die bewilligten Immissionsgrenzwerte an die Umwelt abgegeben. Im Rahmen der Umgebungsüberwachung werden wöchentliche Sammelproben von Abwasser aus den Kläranlagen der grösseren Agglomerationen auf ^{131}I untersucht (siehe unten).

Zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken kommen auch andere Radionuklide wie ^{90}Y , ^{177}Lu und seit 2018 auch ^{166}Ho zum Einsatz. Während ersteres seit 2010 immer weniger verwendet wird, hat sich die Gesamtaktivität des eingesetzten ^{177}Lu zwischen 2007 und 2018 mehr als verdreifacht und von 2019 auf 2020 noch einmal um 50% erhöht. Dieses Radionuklid wird für die Behandlung von Prostata-Krebs eingesetzt. Im Jahr 2020 war es das in der Nuklearmedizin weitaus am meisten verwendete Radionuklid. Die eingesetzten ^{177}Lu Aktivitäten übertrafen diejenigen von ^{131}I um mehr als das Doppelte. Das seit 2018 zur Behandlung von Lebertumoren verwendete ^{166}Ho war 2020, an den eingesetzten Aktivitäten gemessen, das vierthöchste Radionuklid in der Schweiz.

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.

Es ist anzumerken, dass diese Radionuklide zwar selten in Flusswasser nachgewiesen werden, Spuren davon jedoch in Sedimenten zu finden sind. So werden beispielsweise in Schwebeteilchen des Rheins (bei Weil am Rhein gesammelt) regelmässige Spuren von ^{131}I , ^{177}Lu und ^{223}Ra nachgewiesen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.2.

Kläranlagen und Waschwasser aus der Rauchgasreinigung in Verbrennungsanlagen

Das BAG koordiniert auch ein Programm zur Probenahme und Messung der Radioaktivität (Gammastrahler und Tritium) von Wasser aus Kläranlagen und Waschwasser aus der Rauchgasreinigung von Kehrrechtverwertungsanlagen (KVA). Die Überwachung der Kläranlagen erfasst die Abgaben bestimmter radioaktiver Stoffe durch Industrie und Spitäler ins Abwasser und damit an die Umwelt. 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 Portal-detektoren (Gamma-detektoren) 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 Ergebnisse dieser Messungen haben gezeigt, dass zwar manchmal Spuren von in den Spitälern verwendetem ^{131}I im Wasser von Kläranlagen nachgewiesen werden, die Werte aber deutlich unter den in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerten liegen. 2020 hat das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt keine Spitzen in den Konzentrationen von Tritium im Rauchgasreinigungswasser der KVA in Basel festgestellt, ein Phänomen, das in der Vergangenheit regelmässig beobachtet wurde, dessen Herkunft aber trotz Untersuchungen der SUVA und des BAG nicht geklärt werden konnte. Im Januar 2019 hatte das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt im Abwasser der Rauchgasreinigungsanlage der KVA Basel in einer Wochenmischprobe eine ausserordentlich hohe Tritiumkonzentration von 833'000 Bq/l festgestellt. Die daraus abgeschätzte Gesamtaktivität von rund 700 GBq Tritium beträgt mehr als das Doppelte der maximal bewilligungsfähigen Wochenabgabe (StSV Art. 116). Da das wiederholte Auftreten der Situation einen erschwerenden Faktor darstellte, reichte das BAG im Jahr 2020 eine Beschwerde bei der Bundesanwaltschaft ein. Es wurde eine Untersuchung eingeleitet, um festzustellen, ob diese Entsorgung von radioaktivem Abfall als konventioneller Abfall in der KVA fahrlässig oder vorsätzlich war. Messungen des Rauchgasreinigungswassers aus anderen Kehrrechtverwertungsanlagen ergaben keine ungewöhnlichen Ergebnisse.

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 menschl-

chen 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.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 6.1.

Beurteilung

In der Schweiz blieben 2020 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 Atomwafferversuche und des Reaktorunfalls von Tschernobyl ist inhomogen über das Land verteilt. Radioaktives ^{137}Cs aus Tschernobyl wurde beispielsweise vornehmlich im Tessin abgelagert und ist dort heute noch immer in vielen Proben messbar. In geringerem Ausmass gab es auch erhöhte Ablagerungen in höheren Lagen des Jurabogens und in Teilen der Nordostschweiz. Die gemessenen Konzentrationen nehmen zwar seit 1986 kontinuierlich ab, das Radiocäsium aus Tschernobyl ist aber dennoch verantwortlich für die 2020 in bestimmten Lebensmitteln, insbesondere in Wildscheinfleisch aus den Kantonen Tessin und Graubünden, 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 Tritium-verarbeitenden Industrien zeigt in derer unmittelbaren Nähe einen deutlich messbaren Einfluss von Tritium auf die Umwelt (Regen und Lebensmittel). In Niederwangen zeigten die 2020 im Regen festgestellten Tritiumkonzentrationen einen deutlichen Rückgang gegenüber früheren Jahren und erreichten maximal 7% 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. Abgaben von Radionukliden mit dem Abwasser aus Spitälern sind nur sporadisch im Wasser in Kläranlagen grösserer Städte nachweisbar.

Die gezielte Überwachung von Wasser aus Kläranlagen, Rauchgasreinigungswasser aus Verbrennungsanlagen und Sickerwasser aus Deponien erbrachte keine ungewöhnlichen Ergebnisse.

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 und Industrien sehr gering geblieben ist. Die tiefen Messwerte für künstliche Radionuklide in der Umwelt zeigen ein ordnungsgemässes Funktionieren dieser Betriebe und können als Bestätigung für die Wirksamkeit der Überwachungsprogramme gedeutet werden.

2020

Chapitre Kapitel 2

Exposition de la
population aux
rayonnements
ionisants

Strahlenexposition
der Bevölkerung

Expositionskategorien

Ursachen der Strahlenexposition

Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung

Exposition von Patienten

Catégories d'exposition

Origines de l'exposition aux rayonnements

Exposition aux rayonnements de la population générale

Exposition des patients

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.

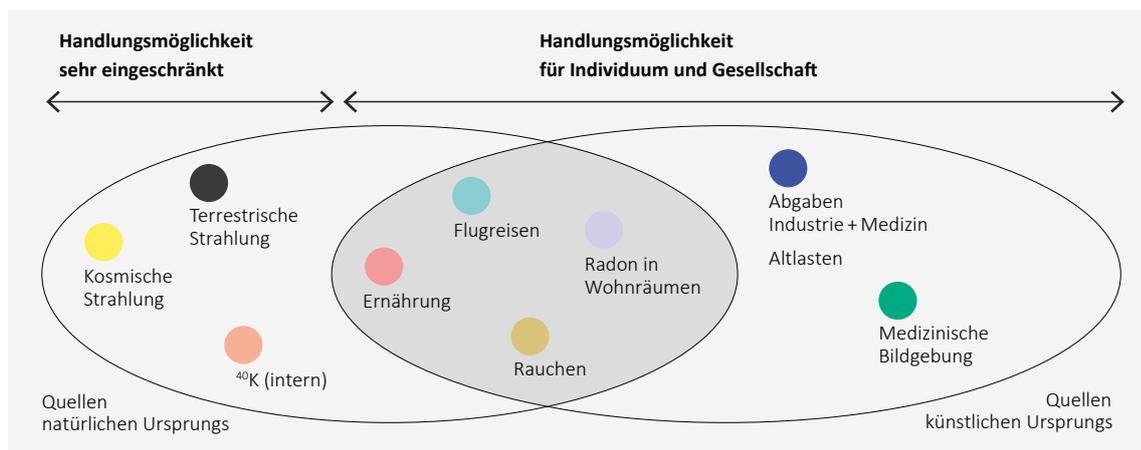


Abbildung 1 :

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

Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung

Exposition gegenüber terrestrischer und kosmischer Strahlung

Die Dosis aufgrund der terrestrischen Strahlung (d.h. Strahlung aus Boden und Fels) macht im Mittel 0.35 mSv pro Jahr aus und hängt von der Zusammensetzung des Untergrundes ab. Die Dosis durch kosmische Strahlung beträgt im Mittel 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 Neubewertung im Gange. 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 Wohnräumen 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

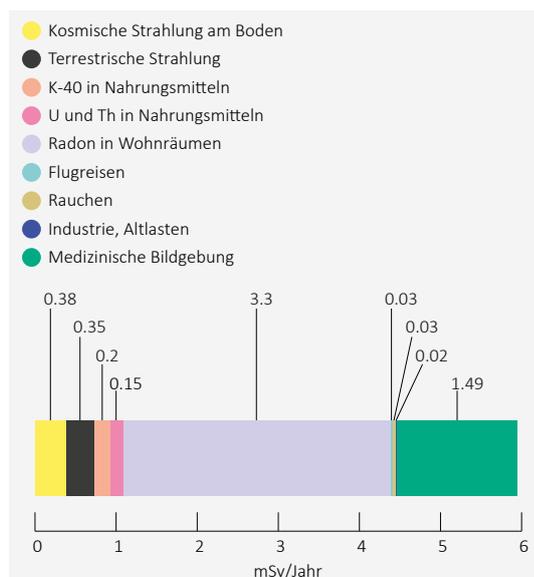


Abbildung 2 :
Durchschnittliche Beiträge zur effektiven Dosis pro Jahr und Einwohner/in der Schweiz in mSv.

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 Woh-

nung 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).

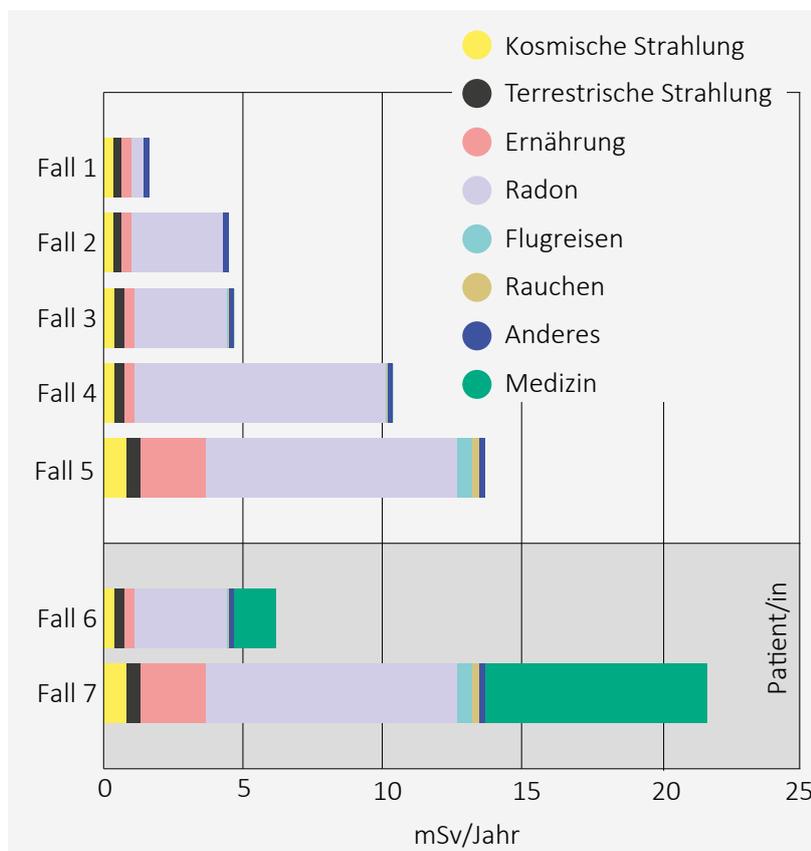


Abbildung 3: Standardisierte Expositionsszenarien der Bevölkerung mit Angabe der Jahresdosis in mSv.

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 navigant. 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

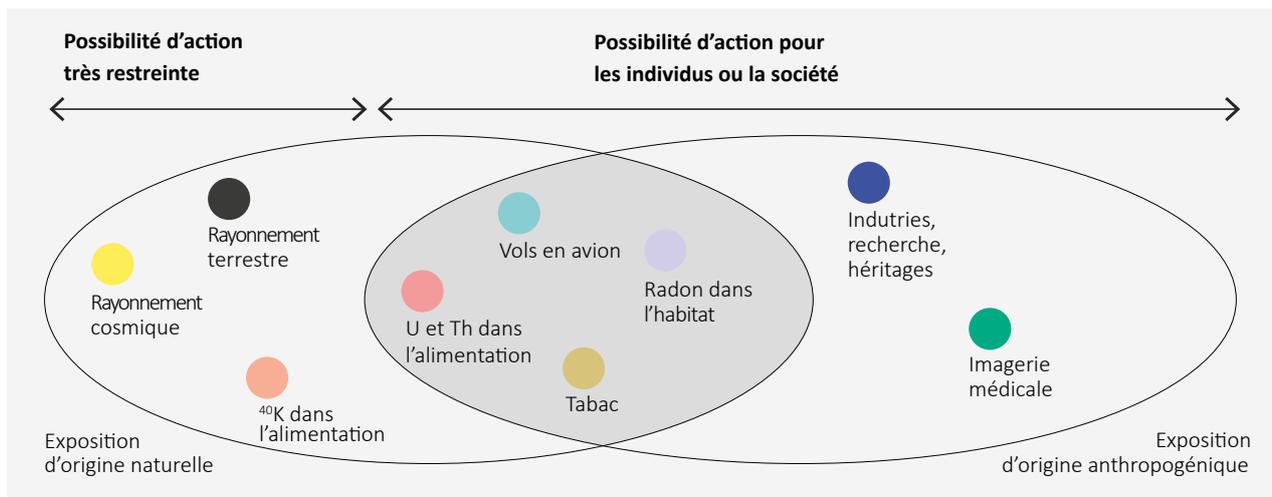


Figure 1 :
 Les contributions importantes à l'exposition aux rayonnements de la population générale. Ovale gauche: exposition d'origine naturelle. Ovale droit: exposition d'origine anthropogénique. Zone de chevauchement (fond sombre): la source de rayonnement est d'origine naturelle, mais l'exposition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

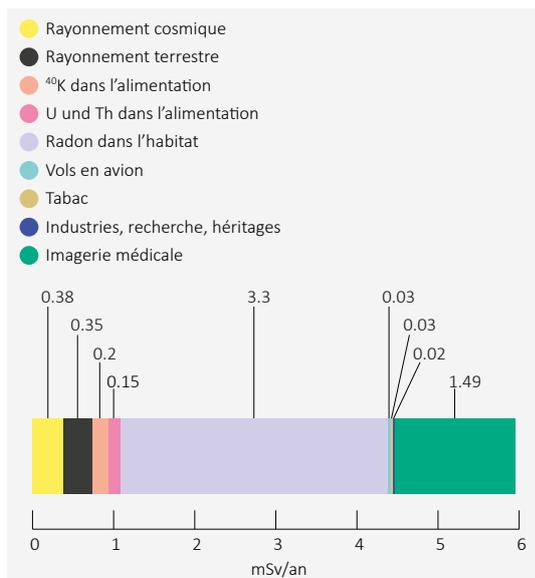


Figure 2 : Contributions moyennes à la dose efficace (en mSv) par année et par habitant en Suisse.

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 (page 13 du rapport de division 2020), 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/m³).
- Cas 3: dose annuelle reçue par un individu vivant dans une commune à concentration moyenne en radon et à niveau moyen de rayonnements terrestres et cosmiques, ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels, fumant 2.5 cigarettes par jour et effectuant un voyage Zurich – Doha aller-retour (9'000 km) par an. Ce cas correspond ainsi

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

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

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

- Cas 6: dose annuelle reçue par l'individu du cas 3, mais avec un examen radiographique annuel, délivrant une dose de 1.49 mSv (correspondant à la dose moyenne reçue par la population par le biais des applications médicales).
- Cas 7: dose annuelle reçue par l'individu du cas 5 ayant par ailleurs reçu un scanner abdomino-pelvien (deux passages).

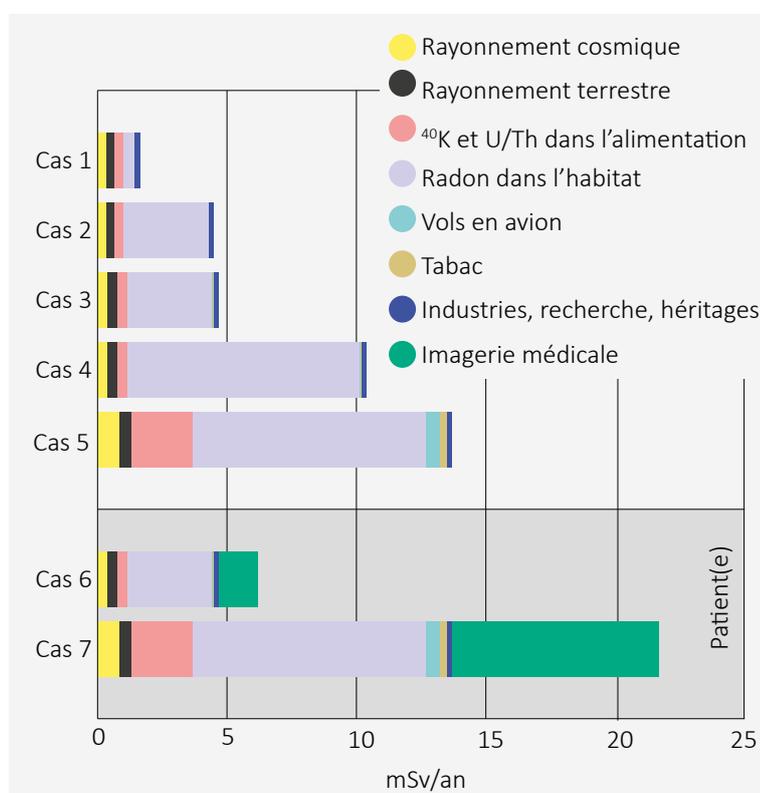


Figure 3 : Variabilité de l'exposition de la population suisse: dose efficace d'un individu en mSv/an pour 7 scénarios standardisés.

2020

Chapitre Kapitel 3

Rayonnement
externe

Externe Strahlung

In situ Messungen
Netzwerk NADAM
Aeroradiometrische Messungen

Mesures in situ
Réseau NADAM
Mesures d'aéroradiométrie

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

En 2020, les mesures de spectrométrie 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. Même si cette contamination reste plus importante au Tessin et localement dans les régions montagneuses (Alpes, Jura) par rapport au Plateau suisse, les résultats de spectrométrie in situ 2020 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 24 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 l'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 ^{238}U et du ^{232}Th ainsi que pour le ^{40}K et le ^{137}Cs , dans le cas d'une distri-

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

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

bution homogène de ces radionucléides dans le sol, sont résumés dans le tableau 1^{2,3}.

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-gammaspectrometrie.pdf.download.pdf/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspectrometrie.pdf>

Sites examinés en 2020

En 2020, les mesures de spectrométrie gamma in situ ont été réalisées au voisinage des centrales nucléaires de Beznau (KKB), Gösgen (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.

Les trois sites de référence pour la surveillance de la radioactivité dans l'environnement en Suisse, à savoir Grangeneuve-Posieux/FR, Güttingen/TG et Cadenazzo/TI ont également été examinés en 2020, comme à l'accoutumée. Quelques points particuliers tels que les cols du Splügen et du Grimsel ainsi que le site d'Arenenberg/TG complètent la liste des sites mesurés en 2020. Cette méthode a également été utilisée lors de l'exercice d'aéroradiométrie ARM20 sur la place d'armes de Thoune/BE.

Résultats in situ 2020

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, 2, 3 et 4 pour les sites suisses examinés en 2020. 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 de la mesure globale avec chambre d'ionisation avec son incertitude sont également représentées. En 2020, 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. Les valeurs plus élevées de débit de dose enregistrées au voisinage de la centrale de Mühleberg en particulier à Salvisberg, Fuchsenried, KKM clôture et Ufem Horn (figure 1) sont d'origine naturelle. Elles sont en effet essentiellement dues aux concentrations plus importantes de ^{40}K dans le sol, ainsi que, dans une moindre mesure, au rayonnement cosmique légèrement plus élevé en raison de l'altitude supérieure de ces sites.

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

Le rapport conjoint IFSN-OFSP sur les résultats de ces mesures complémentaires a été publié en avril 2020 et est consultable sur le site internet de l'OFSP : [Démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg: Mesures Point Zéro 2017-2019](#). Ainsi, 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 figure 3 montre les résultats des mesures in situ réalisées au voisinage du CERN en 2020. Hormis le ^{22}Na détecté dans l'enceinte du centre de recherche (BAT 588), ces résultats ne se distinguent pas de ceux enregistrés sur le site de référence de Posieux. Ces traces de ^{22}Na détectées

dans le sol, proviennent très probablement de l'activation des tunnels du CERN. Tout comme en 2019, mais contrairement aux années précédentes, aucune trace de ^{41}Ar n'a par contre été mesurée dans l'air en 2020. L'absence de détection de ce radionucléide de courte période (demi-vie de 109.6 minutes) s'explique par l'arrêt quasi complet des installations du CERN en 2020 (voir chapitre 8.7)

La figure 4 montre les résultats des mesures effectuées au Tessin et sur les sites supplémentaires analysés en 2020.

Au Tessin, 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. Comme le montre la figure 4, 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.).

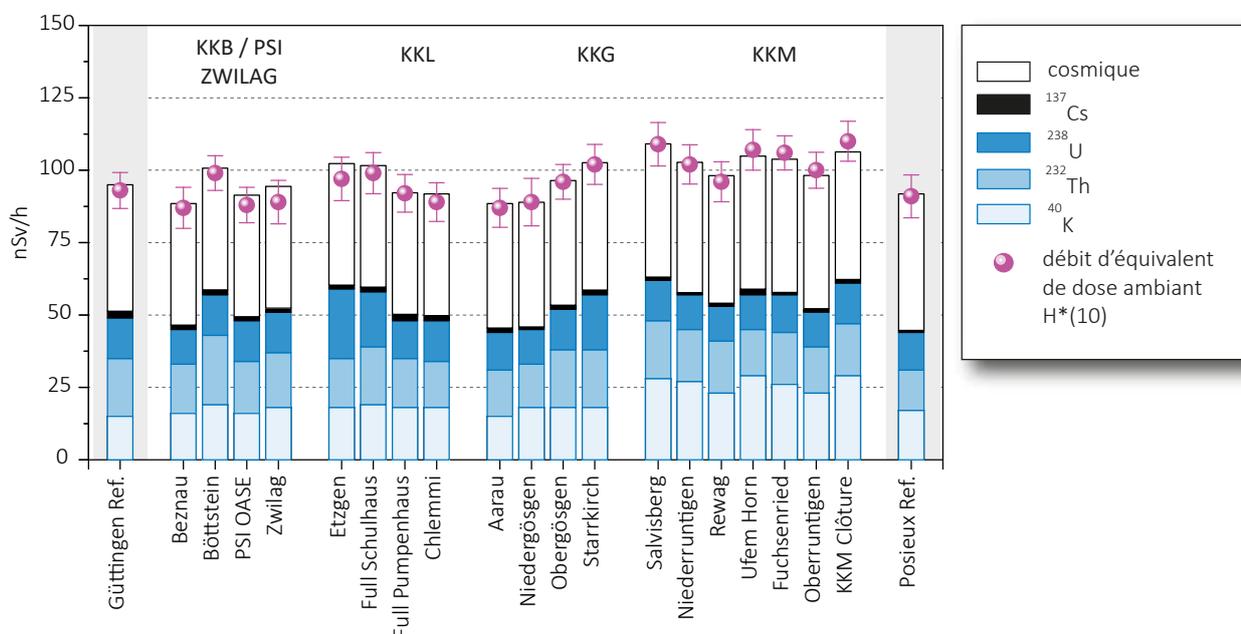


Figure 1: Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage des centrales nucléaires suisses en 2020 ainsi qu'aux points de référence de Güttingen/TG et Posieux/FR (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

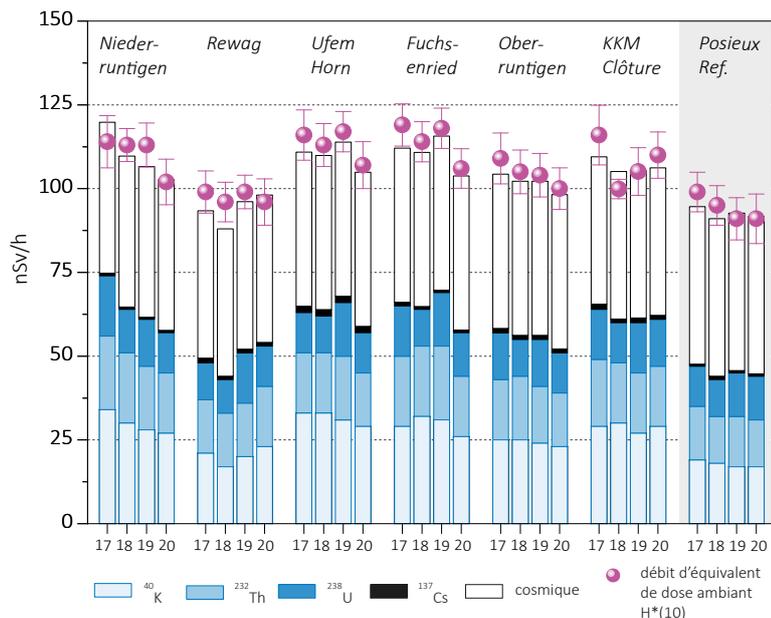


Figure 2:

Suivi 2017-2020 des contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambient $H^*(10)$ 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 ambient $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

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.

A noter que le débit d'équivalent de dose le plus élevé (208 nSv/h) a, comme attendu, été mesuré au col

du Grimsel (2'163 m d'altitude) où le rayonnement cosmique⁵ est presque doublé par rapport aux sites de plaine.

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.

⁵ formule de calcul de la contribution du rayonnement cosmique- page 47

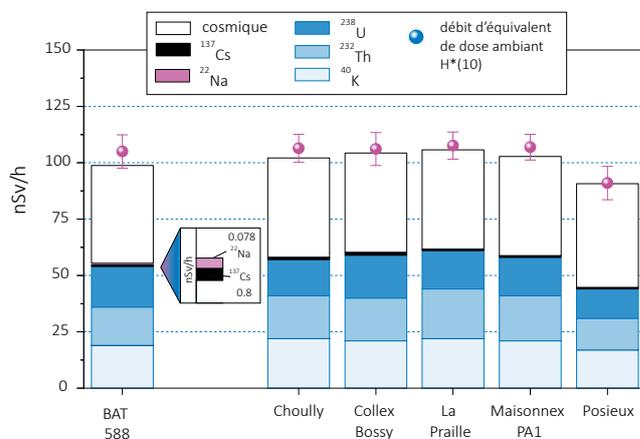


Figure 3:

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambient $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2020 au voisinage du CERN ainsi qu'au point de référence de Posieux (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambient $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

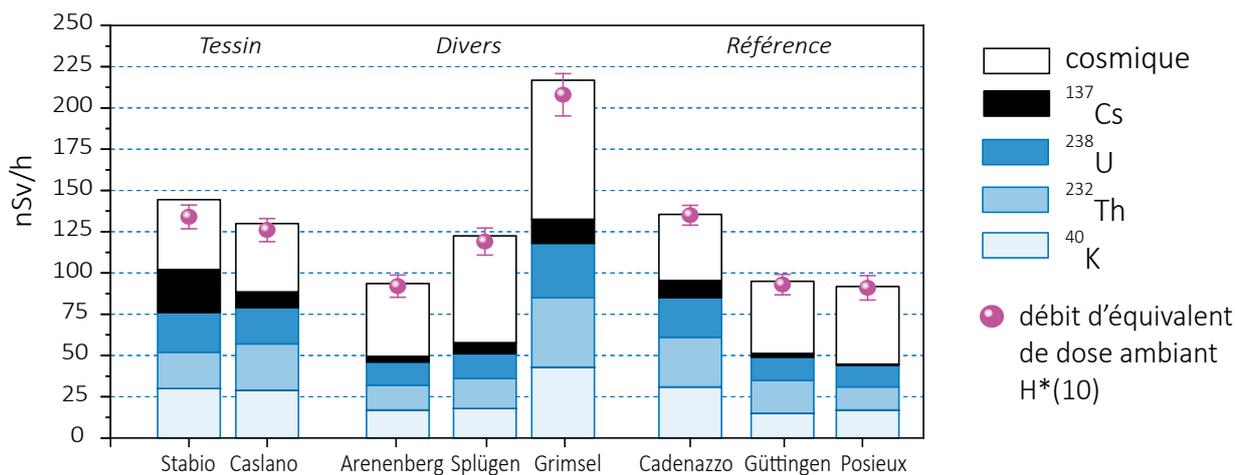


Figure 4: Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2020 au Tessin, aux cols du Splügen et du Grimsel, à Arenenberg ainsi que sur les 3 sites de référence. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

Conclusions

Les mesures de spectrométrie gamma in situ réalisées par l'OFSP en 2020 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

A. Hess, F. Stoffel

Nationale Alarmzentrale NAZ, Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS,
Guisanplatz 1B, 3003 Bern

Zusammenfassung

Zur grossräumigen und permanenten Überwachung der externen Strahlung betreibt die Nationale Alarmzentrale (NAZ) das Netz für die automatische Dosisleistungs-Alarmierung und -Messung (NADAM). Das System ermöglicht eine detaillierte Dokumentation 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. Die NADAM-Station in Locarno-Monti wird im aktuellen Bericht als Beispiel herangezogen, um die Charakteristik der erhobenen Daten und deren Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen zu illustrieren.

Im Jahr 2020 wurden mit dem NADAM-Netz keine Werte gemessen, die auf eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung schliessen lassen.

Einleitung

Die Nationale Alarmzentrale (NAZ) ist die Fachstelle des Bundes für ausserordentliche Ereignisse. Sie ist 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, um Behörden im In- und Ausland, internationale Organisationen und andere Partner warnen und orientieren, die Bevölkerung im Inland alarmieren und informieren zu können.

Im Bereich «Erhöhte Radioaktivität» hat die NAZ besonders umfangreiche Aufgaben. Als zentrales Element 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.

Gemäss der Verordnung über den Bevölkerungsschutz (BevSV, SR 520.12) ist die NAZ zudem zuständig für den Betrieb des Netzes für die automatische Dosisleistungs-Alarmierung und -Messung (NADAM). Es dient der ständigen Überwachung der Radioaktivität und als Frühwarnsystem. Überschreitet der Messwert auf einer NADAM-Station einen Alarmwert, wird automatisch das Pikett (Bereitschaftsdienst) alarmiert, und der Messwert muss durch Mitarbeitende 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 wird als 10 Minuten-Mittelwerte abgelegt. Die Daten dienen in erster Linie der NAZ zur Beurteilung der radiologischen Situation im Normalzustand und im Ereignisfall. Sie werden zudem mit den Behörden mehrerer Nachbarstaaten geteilt.

Aus den erhobenen 10 min-Mittelwerten werden 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 zudem der «European Radiological Data Exchange Platform» (EURDEP) und dem «International Radiation Monitoring Information System» (IRMIS) der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO bzw. englisch: IAEA) zur Verfügung gestellt. Damit erhalten die Teilnehmerstaaten beider Plattformen Zugang zu den Schweizer Messdaten und im Gegenzug die Schweiz zu den 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 der MeteoSchweiz befinden. Damit stehen für jede Station Wetterdaten zur Verfügung, die wichtige Zusatzinformationen für die Interpretation der Messwerte liefern.

Diese Standorte bieten zudem den Vorteil, dass für die Stromversorgung der Sonden und die Übermittlung der Messdaten die nötige Infrastruktur vorhanden ist und die Wartung der Sonden durch Techniker von MeteoSchweiz erfolgen kann, welche an den gleichen Standorten auch andere Systeme betreuen. In diesem Rahmen wird jede Sonde mindestens alle 12 Monate einer Funktionsprüfung unterzogen.

An vier Wartungsstandorten (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, die mit Stativ, Regensensor, Solar- und Mobilfunkmodulen ausgerüstet sind und mehrere Wochen autark betrieben werden können.

Sie sind mit derselben Sensorik ausgestattet wie die ortsfesten Sonden und so eingerichtet, dass sie Messdaten direkt in die Datenbank der NAZ übermitteln können. Diese Sonden sind im Labor Spiez stationiert. Die Messorganisation der NAZ kann entsprechende Equipen aufbieten und veranlassen, dass damit bei Bedarf innert weniger Stunden das NADAM-Netz ergänzt bzw. verdichtet wird.

Die Sonden sind mit Geiger-Müller-Zählrohren für den Nieder- und den Hochdosisbereich bestückt, mit denen die γ -Ortsdosisleistung (ODL, $H^*(10)$) gemessen und als 10 min-Mittelwerte gespeichert wird. Der Abgleich der Messwerte beider Zählrohre 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 sehr gut den Bereich ab von der natürlicherweise vorhandenen Radioaktivität bis hin zu Dosisleistungen, wie sie z.B. nach einer Nuklearwaffenexplosion auftreten könnten.

Im Normalbetrieb werden die Messdaten terrestrisch über Mobilfunk- oder Kabelverbindungen übertragen. Seit 2017 sind 15 Stationen mit der zusätzlichen Möglichkeit ausgerüstet, Messdaten via Satellitenverbindung an die Datenbank der NAZ 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, bis zu 16-jährigen NADAM-Sonden nicht mehr gegeben ist und die mobilen Sonden nicht mit neuen Mobilfunkstandards kompatibel sind, wurden im Jahr 2020 alle mobilen Sonden und fünf ortsfeste Sonden durch neue Sonden des Typs Gamma Tracer XL2 2 des Herstellers Bertin GmbH ersetzt. Der Ersatz der restlichen ortsfesten Sonden ist für das Jahr 2021 vorgesehen.

Die Beschaffung der neuen NADAM-Sonden wurde gemeinsam mit dem ENSI durchgeführt, welches in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen das MADUK-Netz mit Sonden identischer Spezifikationen betreibt und diese aus den gleichen Gründen ersetzen muss. Somit werden in den beiden Messnetzen auch weiterhin Sonden des gleichen Typs eingesetzt.

Die Sonden sind vom Hersteller typengeprüft. Vor der Inbetriebnahme und nach Reparaturen erfolgt eine zertifizierte Eichung durch eine anerkannte Eichstelle, 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 mindestens 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 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.

Jede NADAM-Sonde misst an ihrem Standort kontinuierlich die Ortsdosisleistung (ODL), die sich natürlicherweise aus einem terrestrischen und einem kosmischen Beitrag zusammensetzt. Sollte im Falle eines radiologisch/nuklearen Ereignisses Radioaktivität in die Umwelt gelangen, könnte dies einen künstlichen zusätzlichen 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 daher in alpinen Gebieten zu einem höheren terrestrischen Strahlungsbeitrag als z.B. im Mittelland. Ein Beispiel für eine solche Station ist Vicosoprano auf 1089 m.ü.M. am Talgrund im Bergell, wo mit 193 nSv/h der höchste ODL-Jahresmittelwert aller NADAM-Stationen gemessen wurde.

Die Höhe des Sondenstandortes über Meer bestimmt den kosmischen Anteil an die 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 3580 m.ü.M. Die kosmische Strahlung in dieser Höhe führte im Jahr 2020 mit 192 nSv/h zu einem nahezu gleichen Jahresmittelwert wie 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.

Die ODL-Werte werden in der Einheit nSv/h (Nanosievert pro Stunde) als 10 min-Mittelwerte gespeichert. Ausserdem werden für die Partner und für die Publikation auf der NAZ-Homepage die Mittelwerte für jede volle Stunde und für jeden Kalendertag berechnet. Auch für die Stundenmittelwerte sind Erfahrungsbereiche definiert. Diese sind enger als die-

jenigen für die 10 min-Mittelwerte, da die Mittelung über längere Zeiträume kleinere Schwankungen zur Folge hat.

Für langfristige Statistiken werden zudem einige Kennzahlen für das jeweilige 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, jedoch bleibt der häufigste Messwert ähnlich, sofern noch genügend Messungen aus Perioden ohne diese Einflüsse vorhanden sind.

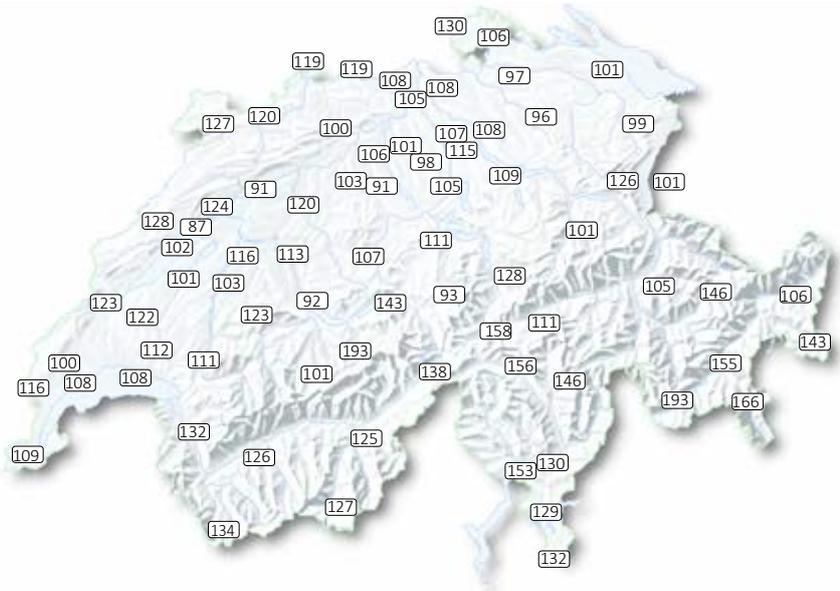
Wenn aufgrund einer Schneedecke während einiger Wochen der terrestrische Anteil der Strahlung über eine gewisse Dauer teilweise abgeschirmt wird, führt dies zu einem tieferen Jahresmittelwert, während der häufigste Messwert zunächst nicht beeinflusst wird. Hält die Schneedecke besonders lange an, kann sie hingegen den Effekt zur Folge haben, dass der häufigste Wert unter dem Jahresmittelwert zu liegen kommt, da in letzteren auch Werte ohne den Einfluss der Schneedecke einfließen.

Am Beispiel der Station Locarno-Monti wird der Einfluss der Witterungsbedingungen auf den Verlauf der Ortsdosisleistung diskutiert.

Gemessene Daten

Alle NADAM-Fix-Stationen der Schweiz sind mit ihrem jeweiligen numerischen Jahresmittelwert in der Übersichtskarte in Figur 1 eingetragen. Die Beiträge der terrestrischen und der kosmischen Strahlung, sowie die meteorologischen Verhältnisse (Niederschlag, Schneedecke) sind die wichtigsten Einflussfaktoren, welche sich auf die ODL und damit auf deren Jahresmittelwerte auswirken.

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 und damit zu höheren ODL-Jahresmittelwerten. Der aus diesem Grund höchste Wert wurde in Vicosoprano auf 1089 m.ü.M. am Talgrund im Bergell gemessen. Nur auf dem Jungfrauoch, auf 3580 m.ü.M. wurde ein nahezu gleich hoher ODL-Jahresmittelwert bestimmt. In dieser Höhe ist jedoch nicht der terrestrische, sondern der kosmische Beitrag der Hauptgrund für überdurchschnittliche ODL-Werte.



Figur 1:

Karte mit den Jahresmittelwerten 2020 aller NADAM-Sonden in Nanosievert pro Stunde, basierend auf den 10 min-Werten. Der Jahresmittelwert der Ortsdosisleistung variiert je nach Standort zwischen 87 nSv/h in Cressier und 193 nSv/h in Vicosoprano im Bergell.

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 sind sehr ähnlich verteilt wie im Vorjahr und entsprechen den langjährigen Erfahrungen, im Gegensatz beispielsweise zum Jahr 2018, als im ausserordentlich trockenen Herbst jeweils höhere Maximalwerte auftraten, wenn nach längeren Trockenperioden erstmals Regen einsetzte.

Auch im Jahr 2020 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 Radionuklide ausgewaschen werden und am Boden zusätzlich zum Zerfall versickern oder abfliessen und wenn anschliessend die mit Wasser gesättigten obersten Bodenschichten allfällige Strahlung aus tieferliegenden Gesteinsschichten abschirmen sowie das Aufsteigen gasförmiger Radionuklide verhindern. Daher liegen die Minimalwerte besonders tief unter den Mittelwerten an Standorten mit zeitweise dicker Schneedecke.

Detaillierte Betrachtung der NADAM-Station Locarno-Monti

Figur 3 zeigt den Verlauf der ODL-10 min-Mittelwerte in Nanosievert pro Stunde (nSv/h) am Standort Locarno-Monti über das ganze Jahr 2020. 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 153 nSv/h, der häufigste Wert wenig tiefer bei 149 nSv/h. Dazu sind Spikes bis zu einem Maximalwert von 284 nSv/h zu erkennen.

Praktisch alle 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 Radionuklide (v.a. Zerfallsprodukte von Radon ^{222}Rn) sich gerade in der Atmosphäre befinden, wenn der Niederschlag einsetzt und deren Deposition am Boden in Sondennähe bewirkt.

Der ODL-Verlauf, die Niederschlagsmenge und die täglich um 07:00 Uhr gemessene Schneedecke für den Zeitraum vom 03. bis 11.12.2020 sind in Figur 4 dargestellt: Bis am 03.12.2020 lagen die ODL-Werte um die gewohnten 150 nSv/h, dann setzte in der Nacht Niederschlag ein, der einen Anstieg der ODL auf bis zu 247 nSv/h bewirkte. Dass es sich dabei zunächst um Regen gehandelt hat, lässt sich daran erkennen, dass am 04.12.2020 um 07:00 Uhr noch kein Schnee gemessen wurde.

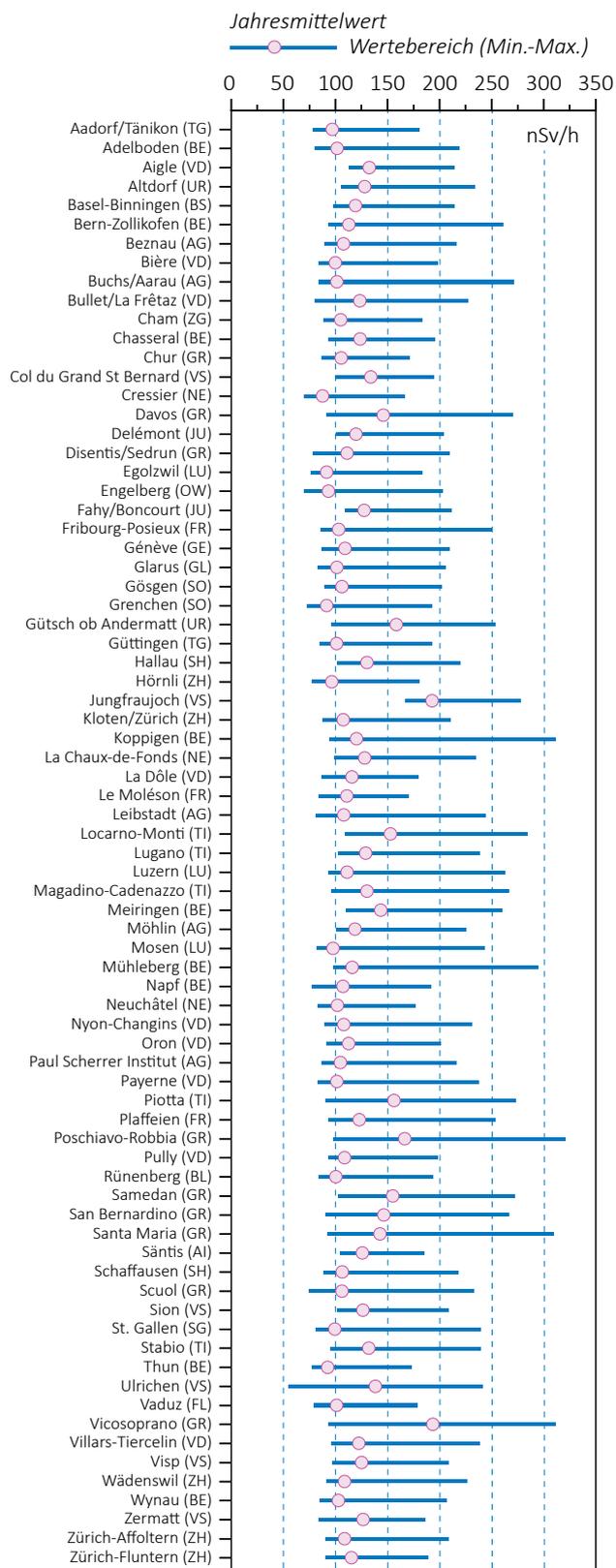
Im Verlauf des Tages ging der Regen in Schneefall über und führte zu einer Schneedecke von 19 cm am Morgen des 05.12.2020. Die in dieser Zeit registrierte Niederschlagsmenge stellt ein Regen-Äquivalent dar und gibt tatsächlich die im Regensensor geschmolzene Schneemenge wieder. In Figur 4 ist an diesem Tag deutlich die auf ca. 120 nSv/h reduzierte ODL zu erkennen, da aufgrund der Schneedecke der terrestrische Beitrag teilweise abgeschirmt wurde. Später wiedereinsetzender Niederschlag führte zeitweise zu einem leichten kurzfristigen Anstieg der ODL. Aufgrund der Schneedecke fielen die Werte nach dem Abklingen der beim erneuten Niederschlag deponierten Radionuklide bald wieder deutlich unter den Jahresdurchschnitt.

Ab dem 09.12.2020 fiel kein Niederschlag mehr und Ausschläge der ODL nach oben blieben aus. In den letzten drei Tagen des betrachteten Zeitraumes schmolz die verbleibende Schneedecke nahezu kontinuierlich dahin, entsprechend nahm die ODL langsam zu und kehrte zurück zu Werten im Bereich des Jahresdurchschnittes.

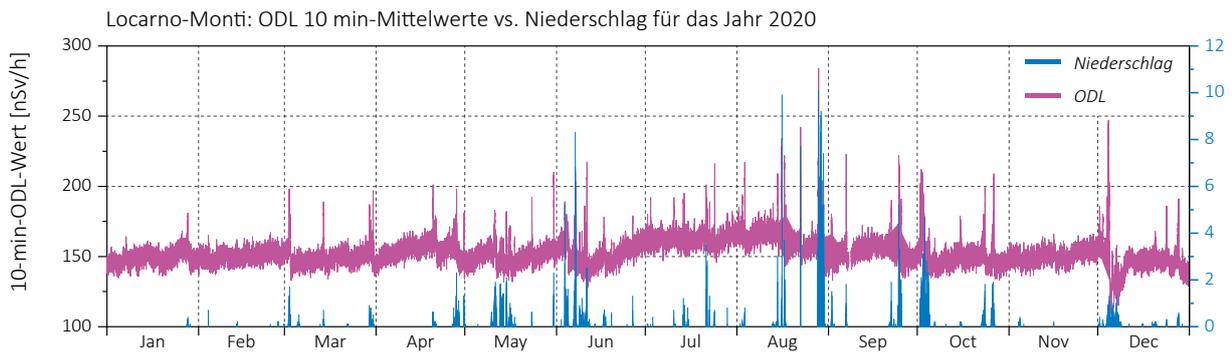
Die Häufigkeit aller am Standort Locarno-Monti im Jahr 2020 erhobenen ODL-Messwerte ist logarithmisch skaliert in Figur 5 aufgetragen. Der Wert von 149 nSv/h wurde insgesamt 2969-mal und damit am häufigsten detektiert. Ebenfalls dargestellt sind die ODL-Werte, die aufgezeichnet wurden, wenn innerhalb der vorangehenden 50 Minuten oder der nachfolgenden 10 Minuten Niederschlag stattgefunden hatte. Der häufigste dieser Werte liegt bei 155 nSv/h. Schliesslich ist klar zu erkennen, dass oberhalb von 185 nSv/h kaum ODL-Werte gemessen wurden, die nicht mit Niederschlag einhergehen.

In Figur 6 ist aus der gesamten Anzahl registrierter ODL-Messwerte der mit Niederschlag korrelierende Anteil dargestellt. Analog zur Darstellung in Figur 5 findet man oberhalb von 185 nSv/h kaum Werte, die gemessen wurden, ohne dass Niederschlag stattgefunden hatte. Der maximale ODL-10 min- Mittelwert ist 284 nSv/h. Er kam durch den Niederschlagseffekt zustande und liegt 86 % über dem Jahresmittelwert von 153 nSv/h.

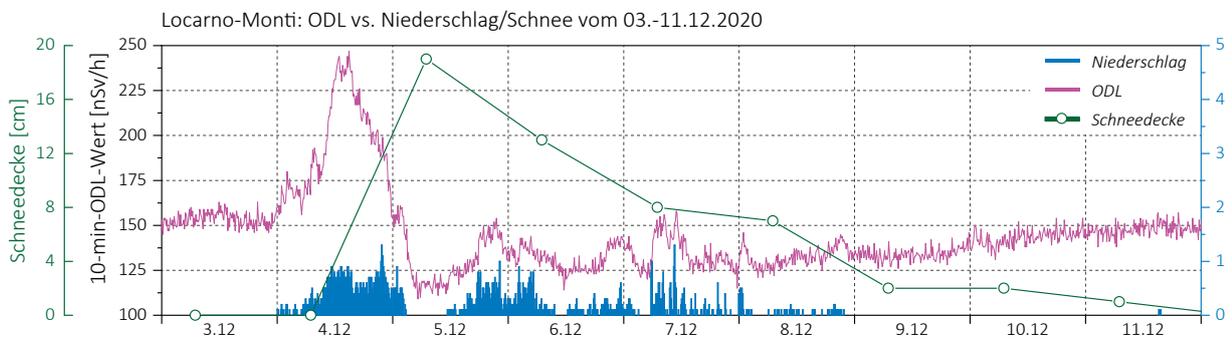
Im Wertebereich um 150 nSv/h, nahe beim häufigsten Messwert und beim Jahresmittelwert, wurden in Locarno nur sehr wenige Werte während oder kurz nach Niederschlag registriert. Hingegen häufen sich zwischen 110 und 140 nSv/h die zeitnah zu Niederschlag ermittelten Werte. Diese wurden mehrheitlich während oder nach Schneefall gemessen, der zu einer Schneedecke geführt hatte, welche wie oben beschrieben die terrestrische Strahlung teilweise abgeschirmt und daher tiefere ODL-Werten zur Folge hatte.



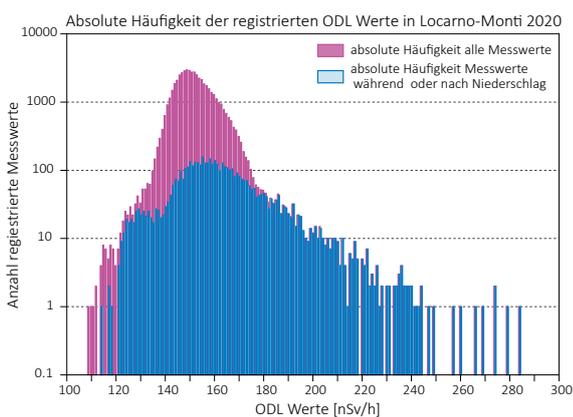
Figur 2: Jahresmittelwerte und Messwertebereiche der NADAM-Sonden. Der dargestellte Messwertebereich jeder Station entspricht dem Bereich zwischen dem minimalen und dem maximalen 10 min-Wert der Sonden im Jahr 2020.



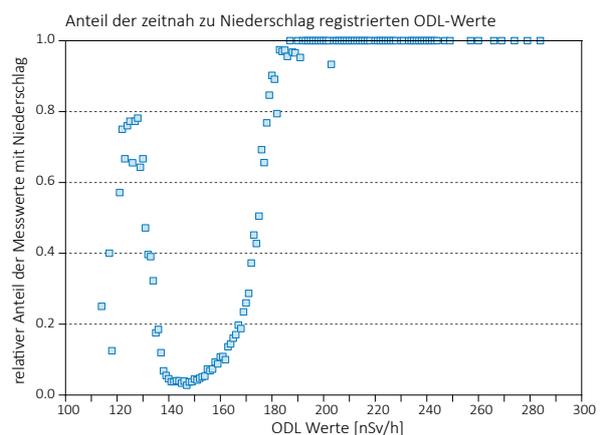
Figur 3: Verlauf der 10 min-ODL-Werte und der Niederschlagsmenge am Standort Locarno-Monti über das Jahr 2020. Deutlich zu erkennen sind die ODL-Spikes jeweils bei einsetzendem Niederschlag.



Figur 4: Verlauf der ODL in Abhängigkeit von Niederschlag und Schnee in Locarno-Monti vom 03. bis 11.12.2020. Zunächst bewirkte der Niederschlag einen ODL-Anstieg, anschliessend wurden aufgrund einer vorhandenen Schneedecke ODL-Werte unter dem Jahresdurchschnitt gemessen. Nach dem Wegschmelzen des Schnees hatte sich wieder eine ODL im normalen Bereich ergeben.



Figur 5: Verteilung der 10 min-ODL-Werte für die Station Locarno-Monti im Jahr 2020, logarithmisch skaliert. Rot: Alle Messwerte, blau: Messwerte, die zeitnah mit erfolgreichem Niederschlag registriert wurden.



Figur 6: Anteil der 10 min-ODL-Werte für die Station Locarno-Monti im Jahr 2020, welche innerhalb von 10 min vor oder 50 min nach Niederschlag gemessen wurden. Für Werte oberhalb 185 nSv/h liegt dieser Anteil nahezu bei 1. Auffällig ist der erhöhte Anteil bei unterdurchschnittlichen ODL-Werten, bedingt durch die vorhandene Schneedecke.

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 2020

Station	Kanton	Inbetriebnahme	Höhe [m.ü.M.]	Jahres-mittelwert	Häufigster Wert		
					[nSv/h]		
Adelboden (ABO)	BE	04.11.09	1'322	101.4	97	80	219
Aigle (AIG)	VD	09.09.09	382	132.4	129	113	214
Altdorf (ALT)	UR	28.10.09	439	128.0	126	106	234
Basel-Binningen (BAS)	BS	19.11.09	317	119.0	118	98	214
Bern-Zollikofen (BER)	BE	30.09.09	554	112.7	112	93	261
Beznau (BEZ)	AG	19.11.09	327	107.6	105	89	216
Bière (BIE)	VD	12.01.17	684	99.7	97	84	199
Buchs/Aarau (BUS)	AG	20.11.09	388	101.1	100	84	271
La Chaux-de-Fonds (CDF)	NE	17.09.09	1'018	128.0	127	99	235
Nyon-Changins (CGI)	VD	23.09.09	459	107.9	106	89	231
Chasseral (CHA)	BE	17.09.09	1'594	123.6	124	93	195
Chur (CHU)	GR	09.10.09	557	105.5	104	86	171
Cham (CHZ)	ZG	29.01.18	442	105.0	103	88	183
Cressier (CRM)	NE	03.11.16	431	87.5	86	70	167
Davos (DAV)	GR	08.10.09	1'589	145.8	157	91	270
Delémont (DEM)	JU	03.11.16	439	119.6	117	101	204
Disentis/Sedrun (DIS)	GR	28.10.09	1'197	111.0	111	78	209
La Dôle (DOL)	VD	23.09.09	1'670	115.6	115	87	180
Egolzwil (EGO)	LU	22.09.10	523	91.3	90	76	183
Engelberg (ENG)	OW	30.10.09	1'035	93.2	88	70	203
Fahy/Boncourt (FAH)	JU	14.10.09	597	127.3	125	109	211
Bullet/La Frêtaz (FRE)	VD	24.09.09	1'206	123.3	128	80	227
Glarus (GLA)	GL	02.12.09	518	101.2	98	83	206
Gösgen (GOE)	SO	20.11.09	381	106.2	105	89	202
Fribourg-Posieux (GRA)	FR	13.01.17	646	103.0	101	86	251
Grenchen (GRE)	SO	06.12.10	431	91.4	89	73	193
Col du Gd-St-Bernard (GSB)	VS	09.09.09	2'491	133.8	143	100	195
Gütsch ob Andermatt (GUE)	UR	01.09.05	2'296	158.3	187	96	254
Güttingen (GUT)	TG	03.12.09	441	101.0	99	85	193
Genève (GVE)	GE	24.09.09	412	109.1	108	87	210
Hallau (HLL)	SH	29.01.18	419	130.2	129	102	220
Hörnli (HOE)	ZH	12.11.09	1'133	96.4	95	78	181
Jungfraujoch (JUN)	VS	29.09.09	3'581	192.7	188	167	278
Kloten/Zürich (KLO)	ZH	24.11.09	427	107.3	106	88	211
Koppigen (KOP)	BE	13.01.17	484	120.0	119	94	311
Leibstadt (LEI)	AG	19.11.09	342	107.9	110	81	244
Lugano (LUG)	TI	21.10.09	273	128.9	128	103	239
Luzern (LUZ)	LU	05.11.09	455	111.1	108	93	263
Magadino-Cadenazzo (MAG)	TI	22.10.09	204	130.1	126	96	267
Meiringen (MER)	BE	06.10.11	590	143.3	142	110	260
Le Moléson (MLS)	FR	19.08.09	1'975	110.7	113	84	170
Mosen (MOA)	LU	19.01.18	452	97.6	96	82	243
Möhlin (MOE)	AG	09.09.10	341	118.6	116	101	226
Mühleberg (MUB)	BE	15.10.09	481	115.9	114	98	295
Napf (NAP)	BE	05.11.09	1'405	107.2	110	77	192
Neuchâtel (NEU)	NE	10.12.09	485	101.8	101	83	177
Oron (ORO)	VD	29.02.12	828	112.4	110	91	201
Locarno-Monti (OTL)	TI	22.10.09	368	152.8	149	109	284
Payerne (PAY)	VD	13.08.09	490	101.1	99	83	238
Piotta (PIO)	TI	29.10.09	990	156.0	160	90	273
Plaffeien (PLF)	FR	14.08.09	1'043	122.8	123	93	253
Paul Scherrer Institut (PSI)	AG	27.07.11	335	104.6	104	86	216
Pully (PUY)	VD	23.09.09	456	108.5	112	93	198
Zürich-Affoltern (REH)	ZH	13.11.09	444	108.5	107	91	209
Poschiavo-Robbia (ROB)	GR	07.10.09	1'079	166.3	164	98	321
Rünenberg (RUE)	BL	20.11.09	612	100.3	99	84	194
Sântis (SAE)	AI	11.11.09	2'503	125.9	125	104	185
Samedan (SAM)	GR	25.08.09	1'710	154.9	166	102	272
San Bernardino (SBE)	GR	29.10.09	1'640	146.3	163	91	267
Stabio (SBO)	TI	21.10.09	352	131.8	130	95	240
Scuol (SCU)	GR	27.08.09	1'305	106.2	108	75	233
Schaffhausen (SHA)	SH	04.12.09	439	106.3	106	88	218
Sion (SIO)	VS	10.09.09	482	126.2	124	102	209
Zürich-Fluntern (SMA)	ZH	24.11.09	557	115.2	113	90	189
Santa Maria (SMM)	GR	15.12.11	1'385	142.6	148	92	309
St. Gallen (STG)	SG	12.11.09	777	99.2	98	81	239
Aadorf/Tänikon (TAE)	TG	03.12.09	539	96.8	95	79	181
Thun (THU)	BE	29.01.18	570	92.5	91	77	173
Ulrichen (ULR)	VS	04.11.09	1'347	138.2	165	55	241
Vaduz (VAD)	FL	03.12.09	458	100.9	99	79	179
Vicosoprano (VIO)	GR	06.02.13	1'089	193.4	197	93	311
Visp (VIS)	VS	11.09.09	640	125.1	126	97	209
Villars-Tiercelin (VIT)	VD	29.01.18	859	122.4	121	96	239
Wädenswil (WAE)	ZH	02.12.09	487	108.6	106	91	226
Wynau (WYN)	BE	15.10.09	423	102.7	100	85	207
Zermatt (ZER)	VS	11.09.09	1'640	126.5	132	84	186

Kennzahlen und Eckwerte zu den Messungen im NADAM-Netz im Jahr 2020

Für alle NADAM-Stationen sind für das Jahr 2020 die ODL-Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, Minima und Maxima der ODL-10 min-Mittelwerte in Tabelle 1 zusammengestellt. Verglichen mit anderen Jahren gibt es keine Auffälligkeiten. Die höchsten ODL-Jahresmittelwerte wurden, den langjährigen Erfahrungen entsprechend, auf den Stationen Vicosoprano und Jungfrauoch festgestellt.

Der Niederschlagseffekt, also der Umstand, dass eine höhere ODL auftritt, wenn Niederschlag einsetzt, war im Jahr 2020 an den Standorten Mühleberg BE (154 % über dem Jahresmittelwert), Koppigen BE (159 %) und Buchs AG (168 %) am stärksten ausgeprägt. Die daraus resultierenden Höchstwerte sind auch in Figur 2 dargestellt, als Obergrenze der eingetragenen Messwertbereiche.

Am genauer betrachteten Sondenstandort Locarno-Monti lag 2020 der Jahresmittelwert nur 2.5 % unter dem häufigsten Wert, da es keine Einflüsse gab, welche die ODL über lange Zeit stark beeinflussten. Die diskutierte Schneedecke war nach wenigen Tagen weggeschmolzen. Im Jahr 2020 sind keine Standorte aufgefallen, an denen der Jahresmittelwert deutlich unter dem häufigsten Wert lag.

Häufigste Werte, die aufgrund einer besonders beständigen Schneedecke unter dem Jahresmittelwert lagen, waren im Jahr 2020 in Gütsch ob Andermatt (18.1 % tiefer) und in Ulrichen VS (19.4 % tiefer) am stärksten ausgeprägt.

Erkenntnisse und Ausblick

Im Jahr 2020 wurden keine Werte gemessen, die auf eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung schliessen lassen. Es 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 2020 keine grossen Auffälligkeiten. Dadurch, dass vielerorts die Schneedecke weniger ausgeprägt und weniger langanhaltend war, fielen die Unterschiede zwischen häufigsten Messwerten und Jahresmittelwerten eher gering aus.

Für das Jahr 2021 ist der vollständige Ersatz der bisherigen NADAM-Sonden durch das neue Modell GT XL2 2 von Bertin GmbH vorgesehen, womit das Projekt «Werterhalt NADAM 2020» voraussichtlich abgeschlossen wird.

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

Zusammenfassung

Bei den Messflügen im Juni und November 2020 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Beznau (KKB) und Leibstadt (KKL) sowie der Forschungseinrichtung Paul Scherrer Institut (PSI) und der Zwischenlager AG (ZWILAG) abgedeckt. Zudem wurden die Messungen innerhalb der Notfallschutzzone 2 des KKB und KKL komplettiert. Die Ergebnisse bei den Kernkraftwerken lagen im Bereich der Ergebnisse aus früheren Jahren. Weitere Messflüge wurden am Zürichsee und am Genfersee sowie über der Stadt St. Gallen absolviert. In diesen Arealen wurden nur Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse registriert. Zusätzlich wurde über dem Thunersee ein Höhenprofil zur Charakterisierung des neuen Messsystems durchgeführt. Auf dem Waffenplatz Thun erfolgten eine Quellensuche sowie Vergleichsmessungen mit Bodenequipen.

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 Transport- und Industrieunfälle mit radioaktivem Material, KKW-Störfälle, Abstürze von Satelliten mit Nuklearreaktoren und «Dirty Bombs» im Vordergrund. Die jährlichen Messprogramme werden durch die Fachgruppe Aeroradiometrie zusammengestellt, die sich aus Mitgliedern der beteiligten Stellen zusammensetzt. Der Einsatz erfolgt zivil unter der Regie der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) und militärisch unter der Regie des Kompetenzzentrums ABC KAMIR

der Armee. Zum Training der ARM-Teams, bestehend aus Operateuren (Messspezialisten an Bord), Piloten und Bodenpersonal, werden jährlich von der NAZ und dem Kompetenzzentrum ABC KAMIR der Armee Übungsmessflüge durchgeführt.

Im Jahre 2010 (Bucher et. al, 2010) wurde mithilfe der Auswertung der Langzeitdaten die Nachweisgrenze der Messmethode ermittelt: 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.

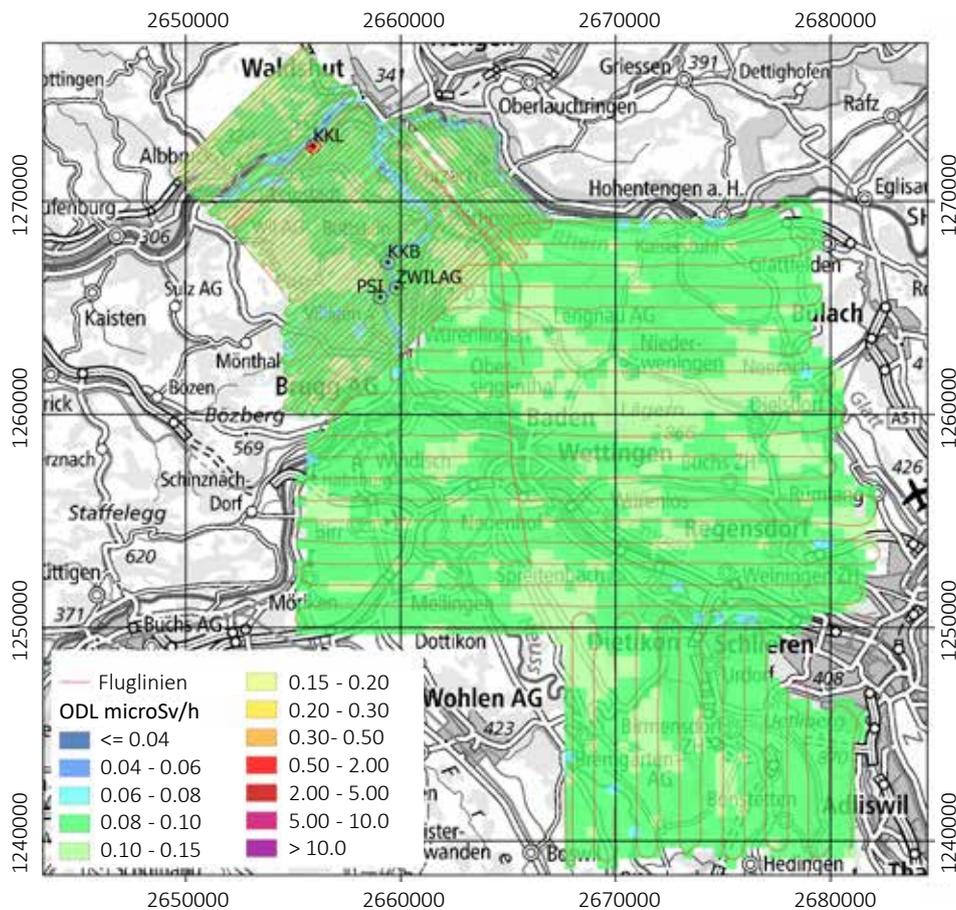
Messungen und Messresultate 2020

Vom 12. bis 19. Juni 2020 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Beznau (KKB) und Leibstadt (KKL) sowie der Forschungseinrichtung Paul Scherrer Institut (PSI) und der Zwischenlager AG (ZWILAG) ausgemessen. Im Rahmen der Messflüge wurden zudem die Messungen innerhalb der Zone 2 von KKB und KKL komplettiert. Zudem wurden Messungen am Zürichsee und über der Stadt St. Gallen durchgeführt. Auf dem Waffenplatz Thun erfolgten eine Quellensuche sowie Vergleichsmessungen mit Bodenequipen (Ortsdosisleistungsmessungen, insitu-Gammaspektrometrie, fahrzeuggestützte Messungen, Drohnen). Über dem Thunersee wurde ein Höhenprofil zur Charakterisierung des Messsystems durchgeführt.

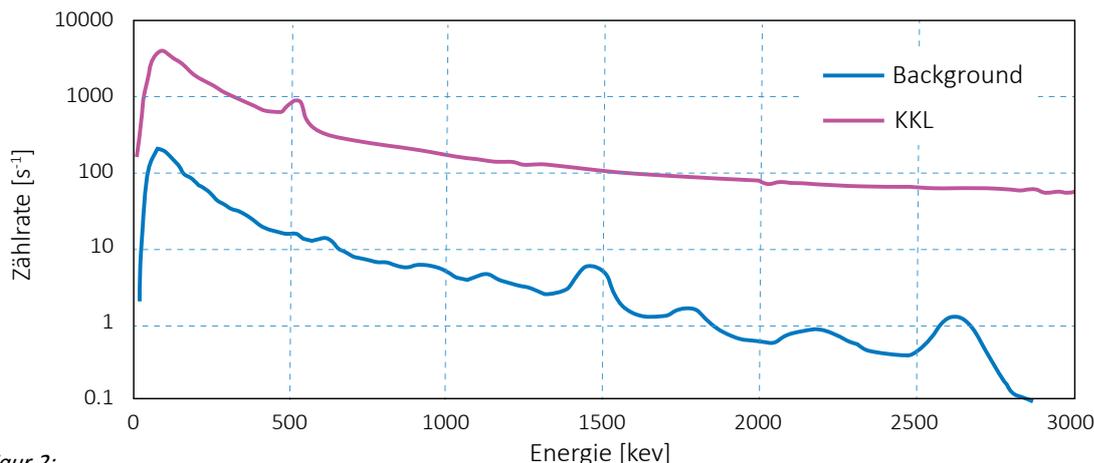
Weitere Messflüge wurden im Zeitraum vom 9. bis 13. November 2020 mit Schwerpunkt am Genfersee durchgeführt. Die detaillierten Ergebnisse sämtlicher Messungen wurden in einem PSI-Bericht im Verlauf des Jahres 2021 publiziert (Butterweck et al., 2021).

Die Messresultate im Messgebiet von KKB, KKL, PSI und ZWILAG zeigten ein ähnliches Bild wie in vorangegangenen Messkampagnen. Am Standort des KKL können in der Ortsdosisleistungskarte (Figur 1) erhöhte Messwerte erkannt werden. Diese sind beim KKL mit seinem Siedewasserreaktor auf gestreute, hochenergetische Photonenstrahlung zurückzuführen, die zu erhöhten Zählraten über das gesamte gemessene Spektrum führen (Figur 2). Diese Strahlung wird durch das Aktivierungsprodukt ^{16}N erzeugt, welches bei Siedewasserreaktoren durch die Frischdampfleitung in die Turbinen im Maschinenhaus gelangt. Da das Dach des Maschinenhauses vergleichsweise gering abgeschirmt ist, kann die hochenergetische Gammastrahlung des ^{16}N aus der Luft gut gemessen werden. Die hochenergetische Gammastrahlung führt über Paarbildung und die damit verbundene Annihilationsstrahlung auch zu einem Peak bei 511 keV im Spektrum (Figur 2).

Im Bereich des KKB sind keine besonderen Werte bei der Ortsdosisleistung (Figur 1) zu erkennen. KKB mit seinem Druckwasserreaktor konnte aeroradiometrisch weder aufgrund der Ortsdosisleistung noch aufgrund des MMGC-Verhältnisses erkannt werden.



Figur 1:
Ortsdosisleistung 2020 im Messgebiet KKB, KKL, PSI und ZWILAG sowie von Teilen der Notfallschutzzone 2 von KKB und KKL. Kartendaten PK500 © swisstopo.



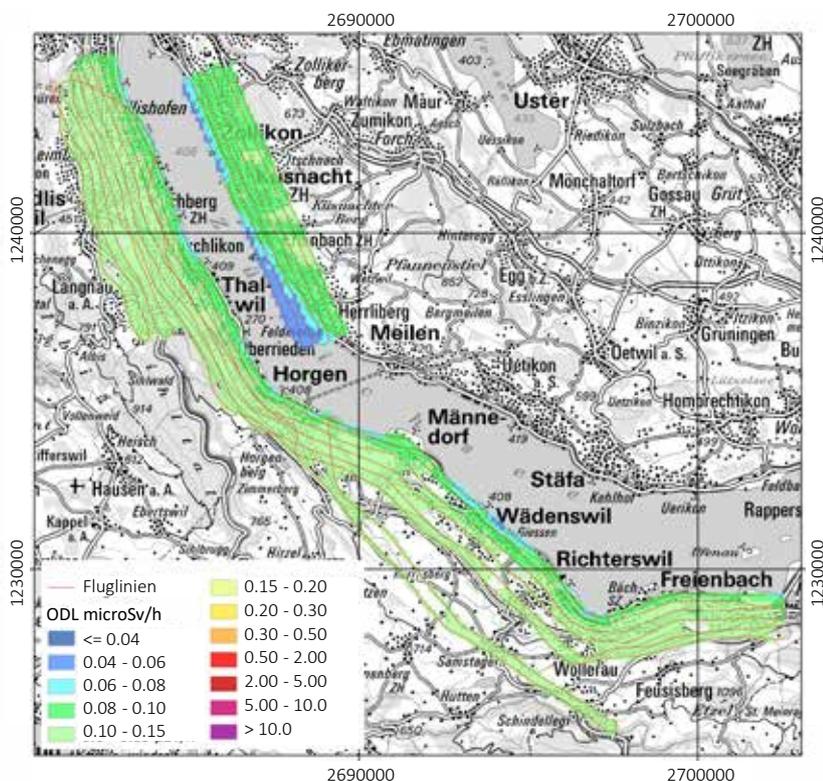
Figur 2:
Gemittelte Spektren im Bereich des Betriebsgeländes KKL und in der weiteren Umgebung (Background).

Das MMGC-Verhältnis steht für den Quotienten der Zählraten im Energiebereich von 400-1'400 keV und 1'400 - 3'000 keV. Da die meisten Spaltprodukte Gammalinien im Energiebereich unterhalb von 1'400 keV aufweisen, stellt das MMGC-Verhältnis ein empfindliches Instrument zur Lokalisierung künstlicher Radionuklide dar. Auch an den Standorten von PSI und ZWILAG konnte in den Messergebnissen kein Einfluss der Anlagen erkannt werden.

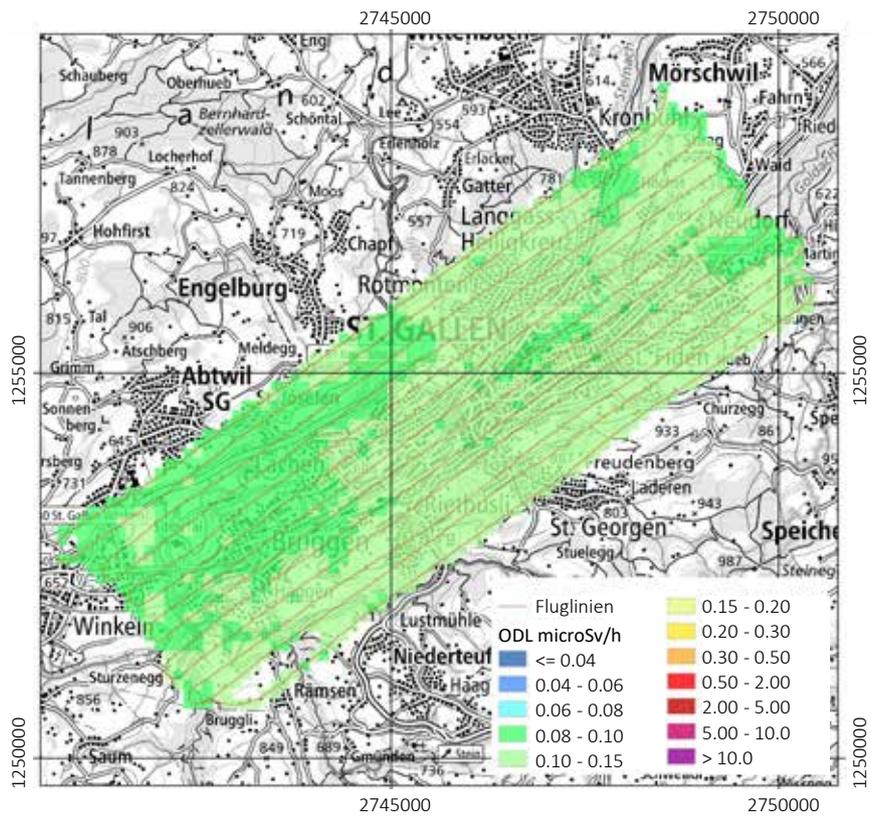
Auch ausserhalb der Betriebsareale der Kernanlagen sind keine erhöhten Werte erkennbar. Die Messwerte liegen im erwarteten Bereich. Unterschiede

sind auf Einflüsse der Topographie wie Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen.

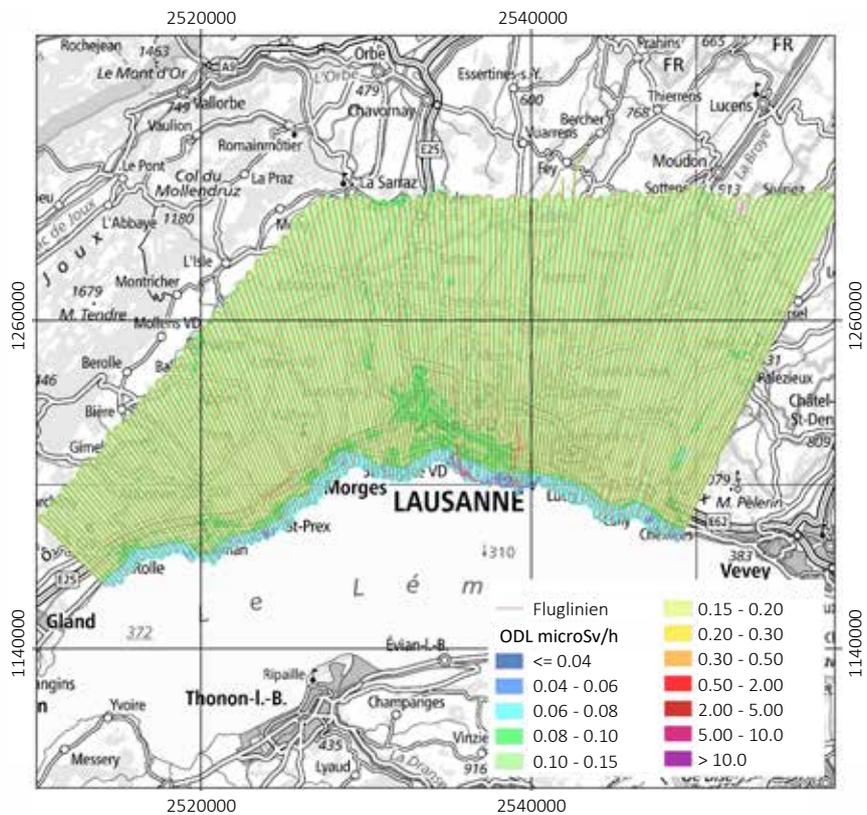
Die Ergebnisse der übrigen Messgebiete zeigten nur Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse auf und entsprechen den erwarteten Werten. In den Figuren 3, 4 und 5 sind die Ortsdosisleistungskarten der Messungen am Zürichsee (Figur 3), über der Stadt St. Gallen (Figur 4) und am Genfersee (Figur 5) dargestellt.



Figur 3:
Ortsdosisleistung im Messgebiet Zürichsee. Kartendaten PK200 © swisstopo.



Figur 4:
Ortsdosisleistung im Messgebiet der Stadt St. Gallen. Kartendaten PK100 © swisstopo.



Figur 5:
Ortsdosisleistung im Messgebiet am Genfersee. Kartendaten PK500 © swisstopo.

Literatur

- Schwarz, G. F., 1991: Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr.23, Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Bucher, B., Rybach, L., 2010: Flächendeckende Langzeitanalyse der Strahlung in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen mit Hilfe der Aeroradiometrie, in: Natürliche und künstliche Radionuklide in unserer Umwelt, 42. Jahrestagung des Fachverbands für Strahlenschutz e.V., FS-2010-153-T, ISSN 1013-4506, TÜV Media GmbH, Köln.
- Butterweck, G., Bucher, B., Breitenmoser, D., Rybach L., Poretti, C., Maillard, S., Kasprzak, M., Ferreri, G., Gurtner, A., Astner, M., Hauenstein, F., Straub, M., Bucher, M., Harm, Ch., Mayer, S., Scharding S., 2021: Aeroradiometric Measurements in the Framework of the Swiss Exercise ARM20. PSI Bericht Nr. 21-01. March 2021. ISSN 1019-0643.

2020

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

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 2020 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 2020 mit Ausnahme von Tritium und sporadischen Spuren von ^{137}Cs keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. Die ausgeprägte Trockenperiode im April hat zu etwas höheren ^7Be in der Luft und ^{137}Cs im Regenwasser geführt. Letzteres vermutlich in Zusammenhang mit den Waldbränden in der Region um Tschernobyl. In der unmittelbaren Umgebung von Tritium-verarbeitenden Industriebetrieben erreichten die ^3H -Konzentrationen im Regenwasser maximal 7.3% des Immissionsgrenzwertes der StSV für öffentlich zugängliche Gewässer.

Luft

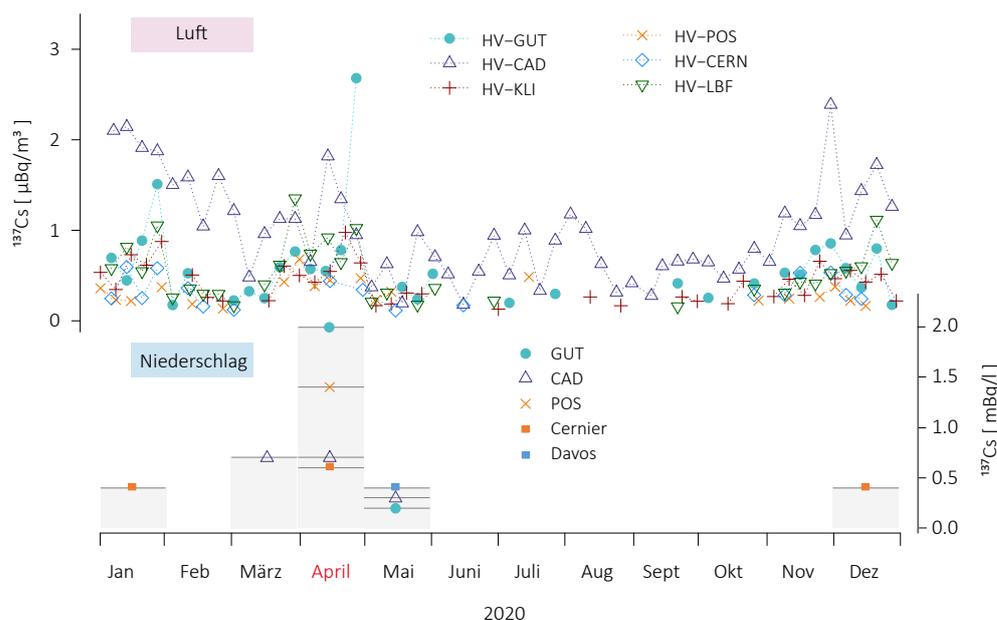
Probenahme und Messung

Das BAG sammelt Aerosolpartikel mit sogenannten High-Volume-Samplern (HVS) an 6 Stationen in der Schweiz (siehe Tabelle 1). Bei den HVS Stationen werden fortlaufend grosse Volumen von Luft gefiltert; je nach Station sind es 80'000 m³ bis 150'000 m³ pro Woche. Die Filter werden im Routinebetrieb wöchentlich gewechselt und zur Analyse ans BAG gesandt. Die anschliessende Messung auf einem HPGe-Gammaspektrometer dauert 2 Tage. Die lange Messzeit ist nötig, weil die Konzentration der radioaktiven Stoffe sehr tief ist. Die Messresultate werden auf www.radenviro.ch und www.bag.admin.ch/ura-hvs-de zeitnah veröffentlicht. 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 Gösigen, Leibstadt, Mühleberg und PSI/Beznau stationiert, wobei der letztgenannte vom PSI betrieben und gemessen wird. Ein weiterer MV-Sammler steht für die Überwachung der freien Atmosphäre in der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch. Die Filter der MV-Sammler werden wöchentlich gewechselt und als Monatsprobe (4 - 5 Filter) gammaspektrometrisch gemessen.

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 stammt zur Hauptsache immer noch vom Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahr 1986. Die gemessenen Konzentrationen sind insgesamt sehr gering. Etwas höhere Werte (bis 2.4 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) wurden 2020 wie jedes Jahr in den Wintermonaten gemessen (siehe Figur 1). Zu den erhöhten ^{137}Cs Konzentrationen im Winterhalbjahr tra-



Figur 1:

^{137}Cs Konzentrationen in der Luft (oben) und im Niederschlag (unten) für das Jahr 2020. Ein Einfluss der Waldbrände in der Region Tschernobyl im April 2020, insbesondere für die Station Güttingen, darf vermutet werden.

gen 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 als Folge von Niederschlägen nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl erklärt die meist etwas höheren Werte der Station Cadenazzo. Ebenfalls leicht höhere Werte und der insgesamt höchste Wert ($2.7 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) konnten im April festgestellt werden. Möglicherweise stehen diese höheren Messwerte im Zusammenhang mit den ausgedehnten Waldbränden in der Region um Tschernobyl, welche im April 2020 Schlagzeilen machten (siehe auch www.radenviro.ch). Gemäss Ausbreitungsrechnungen sind Anfang und Ende April Luftmassen aus den betroffenen Gebieten bis in die Schweiz verfrachtet worden. Da gleichzeitig in den Niederschlagsproben Spuren von ^{137}Cs gefunden wurden (Fig.1) lässt sich eine Spur der Waldbrände bis in die Schweiz durchaus vermuten. Es ist aber ebenso gut möglich, dass die auch in der Schweiz vorherrschende grosse Trockenheit im April zu einer verstärkten lokalen Aufwirbelung von Staub aus Böden in der Umgebung geführt hat. Auch die höchsten gemessenen Werte sind mehr als eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert für ^{137}Cs von $8.5 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

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)

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. Beim HVS Klingnau konnten im Berichtsjahr zweimal Spuren von ^{24}Na nachgewiesen werden (37 und $111 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, Ende Oktober/Anfang November). Die HVS Station Klingnau liegt in rund 6 km Entfernung vom PSI, welches daher als mögliche Quelle in Betracht gezogen werden muss. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{24}Na kann die Nachweisgrenze variieren und lag 2020 bei rund 8 % der Messungen bei $> 1'000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Die gemessenen ^{24}Na Werte und die Nachweisgrenzen insgesamt liegen aller-

Tabelle 2:

Verteilung der 2013-2018 (Referenz) sowie 2020 in der Schweiz gemessenen ^{210}Pb und ^7Be Aktivitäten in bodennaher Luft. Aktivitätsangaben in mBq/m^3

Kenngrosse	^{210}Pb (Referenz)	^7Be (2020)	^7Be (Referenz)	^7Be (2020)
5% - 95%-Perzentil	0.18 - 1.18	0.21 - 1.29	1.48 - 6.40	1.96 - 7.51
Min - Max	0.07 - 2.76	0.14 - 2.24	0.15 - 8.74	0.76 - 9.18
Mittelwert / Median	0.57 / 0.49	0.61 / 0.53	3.66 / 3.50	4.53 / 4.36
Anzahl Messwerte	1'864	308	1'864	308

dings stets deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes von $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Geringste Spuren von Jod-131 (^{131}I) tauchten 2020 nur in 2 HVS Filtern auf (Maximum $0.9 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Die Ursache ist in den medizinischen Anwendungen zu suchen, etwa wenn ^{131}I durch die Verbrennung von Abfällen aus Spitälern in die Luft gelangt. Gesundheitlich sind diese Konzentrationen – eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert – irrelevant. Plutonium-Isotope wurden 2020 an zwei Sammelproben von HVS-Filtern der Station Liebefeld bestimmt - eine Probe mit Filtern vom Winter (Nov-April) und eine Probe mit Filtern vom Sommer (Mai-Sept). Die Summe der Plutoniumisotope ^{238}Pu , ^{239}Pu und ^{240}Pu ergab $0.7 \pm 10\%$ nano-Becquerel pro m^3 Luft (nBq/m^3) in beiden Proben. Zusätzliche Proben von den Stationen Klingnau und Posieux ergaben als Summe der Alphastrahler zwischen 0.6 und $0.1 \text{ nBq}/\text{m}^3$. Diese Konzentrationen der künstlichen Alphastrahler sind sehr tief und liegen wie beim ^{137}Cs eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert. Die Resultate der MV-Filter in der Umgebung der Kernkraftwerke werden im Kapitel 8.5 näher besprochen.

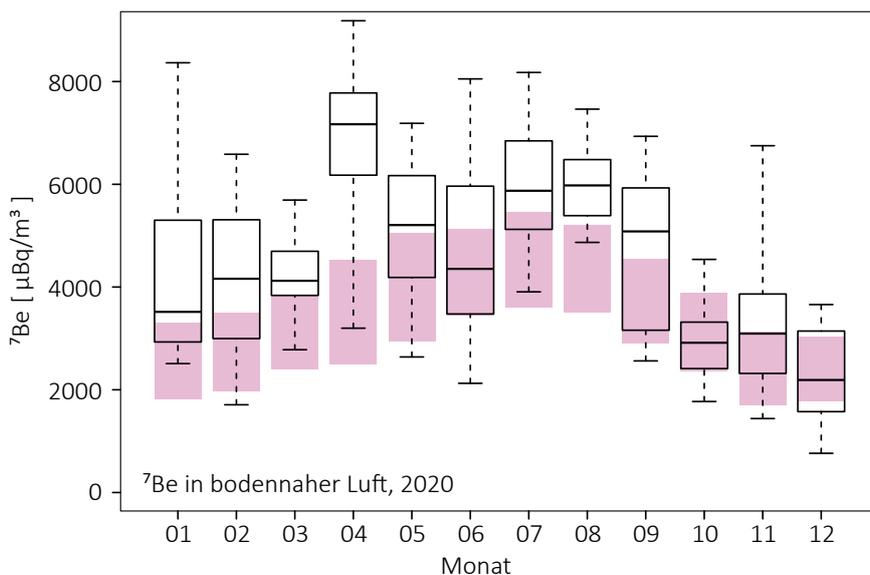
Natürliche Radioisotope in der Luft

Die 2020 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 ^7Be -Werte lagen 2020 zwischen 2.0 und $7.5 \text{ mBq}/\text{m}^3$ (Mittelwert = $4.5 \text{ mBq}/\text{m}^3$; Median = $4.4 \text{ mBq}/\text{m}^3$).

Dies entspricht den erwarteten Werten (siehe Tabelle 2), wobei der Höchstwert 2020 mit $9.08 \text{ mBq}/\text{m}^3$ leicht aus dem Rahmen fiel. Neben ^7Be war in kleinsten Spuren von meist weniger als einem $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ das ebenfalls kosmogene Natrium-22 (^{22}Na) nachweisbar. Neunzig Prozent der 2020 gemessenen ^{210}Pb -Konzentrationen lagen zwischen 0.21 und $1.29 \text{ mBq}/\text{m}^3$ (Mittelwert = $0.61 \text{ mBq}/\text{m}^3$, Median = $0.53 \text{ mBq}/\text{m}^3$). Diese Werte sind höher als die über die vorherigen 6 Jahre gemittelten ^{210}Pb Aktivitäten (Tabelle 2 und Figur 3).

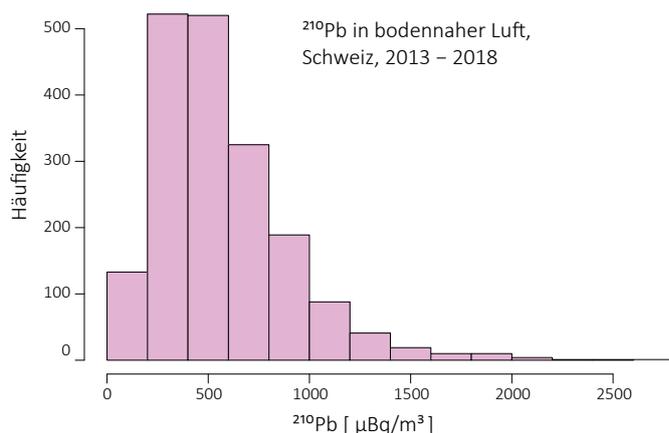
Die Figur 2 zeigt für jeden Monat die Verteilung der ^7Be Konzentrationen aller Stationen im Vergleich mit dem langjährigen Jahresverlauf. Der Jahresverlauf der ^7Be Konzentrationen widerspiegelt das Wettergeschehen, insbesondere die konvektive vertikale Durchmischung der Troposphäre an warmen Sommertagen, 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 2020 noch einmal

minim höher (+0.6%) als 2019 (IGY Neutron Monitor Jungfraujoch, cosray.unibe.ch). Das passt zum Beginn des Sonnenzyklus 25 der praktisch sonnenfleckenfremd startete. Aufgrund der negativen Korrelation der kosmischen Strahlung mit der Sonnenaktivität war die ^7Be -Produktion also hoch. Die geringe Erhöhung der kosmischen Strahlung kann aber nicht die 7.5% Erhöhung des Jahresmittelwert von ^7Be erklären ($4.5 \text{ mBq}/\text{m}^3$ gegenüber $4.2 \text{ mBq}/\text{m}^3$ im Vorjahr). Die erwähnten Klimaparameter sind also dominierend. 2020 war das wärmste Jahr seit Messbeginn (zusammen mit 2018) und eher trocken und entsprechend hoch war der Jahresmittelwert für ^7Be . Der auffälligste Monat war der April mit fast doppelt so hohen ^7Be Konzentrationen als



Figur 2:

Boxplot der monatlichen ^7Be Konzentrationen bei allen HVS Stationen im Jahr 2020. 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).



Figur 3 :
Histogramm der ^{210}Pb Aktivitäten in bodennaher Luft in der Schweiz, 2013-2018. 1864 Messwerte. Siehe auch Tabelle 2

im langjährigen Mittel. Dies lässt sich mit der langandauernden und warmen Trockenperiode von Ende März bis im April gut erklären. Einzig im kalten und niederschlagsreichen Oktober waren die ^7Be -Konzentrationen leicht unter dem langjährigen Durchschnitt. Als weiteres natürliches Radioisotop findet sich in den HVS Filtern oft auch ^{40}K . Die Konzentrationen lagen 2020 meist im typischen Bereich von 5 - 20 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Auch die ^{40}K Konzentrationen zeigen im April etwas höhere Werte (15-25 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)- wohl aufgrund erhöhter Staubaufwirbelung während der Trockenperiode.

Niederschlag

Messungen von Gammastrahlern

Im Berichtsjahr 2020 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, Cernier NE und Davos GR. Für die natürlichen Radioisotope ^7Be und ^{210}Pb waren die Messresultate sehr ähnlich wie im Vorjahr (^7Be : 0.2 - 3.0 Bq/l, Mittelwert 0.9 Bq/l; ^{210}Pb : 0.02 - 0.41 Bq/l, Mittelwert 0.07 Bq/l). In 10 von rund 100 Regen- und Schneeproben lag ^{137}Cs knapp über der Erkennungsgrenze. Interessanterweise traten höchsten Werte im Monat April auf (Maximum 2 mBq/l in Güttingen). Ein Zusammenhang mit den Waldbränden in der Region um Tschernobyl im selben Monat kann daher vermutet werden (siehe Figur 1 und für weitere Informationen radenviro.ch). Diese Konzentrationen knapp über der Nachweisgrenze sind aber sehr tief und könnten, wie die Spuren von ^{137}Cs in der Luft, auch lokale Quellen haben. Ein gesundheitliches Risiko ist sicher 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 Sammelprobe von Niederschlag der Referenzstationen Posieux, Güttingen, Cadenazzo sowie bei den Stationen Basel-Binningen und La Chaux-de-Fonds lagen die Tritiumkonzentrationen nur einmal knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l: Im März bei Güttingen (2.7 ± 0.7 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 2.3 ± 0.6 Bq/l. Bei den Sammelstationen PSI, KKB und Zwilag ergaben sich 2020 mit Mittelwerten von 3, 11 und 8 Bq/l leicht höhere Werte - wie in früheren Jahren. Das höchste Monatsmittel trat bei der Station KKB auf (25 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 Teufen AR und Niederwangen BE enthielt das Regenwasser zwischen 7 und 1'451 Bq/l Tritium mit einem Mittelwert von 112 Bq/l. Die Höchstkonzentration entspricht rund 7.3 %, der Mittelwert 0.6 % des Immissionsgrenzwertes für öffentlich zugängliche Gewässer, der in der StSV festgehalten ist. 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 fünfzehn Aerosolmonitore und fünf ^{131}I Monitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2020 keine erhöhte künstliche Radioaktivität in der Umgebungsluft festgestellt. Mit Ausnahme einer kurzzeitigen Detektion von ^{24}Na der Station PSI mit einer Aktivitätskonzentration weit unter dem Immissionsgrenzwert konnten keine künstlichen Radionuklide in den Spektren nachgewiesen werden. Auch die Konzentration von gasförmigem ^{131}I blieb unterhalb der Nachweisgrenze von ca. 90 mBq/m^3 . Somit blieben alle Aktivitätskonzentrationen unter den in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerten. Auf allen Stationen wurden die natürlich vorkommenden Radontöchter aus der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallskette täglich nachgewiesen, was die Funktionsfähigkeit der Aerosolmonitore bestätigt. Durch Weiterentwicklung der Datenanalyse konnte die zeitliche Auflösung der Aktivitätskonzentrationen der Radontöchter verbessert werden. Die Aerosolsammler detektieren sporadisch kosmogones ^7Be , die Nachweisgrenze liegt aber noch nicht genügend tief, um mit diesen Werten aussagekräftige Zeitreihen zu erstellen.

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 die Aktivitätskonzentrationen der auf Luftpartikeln gebundenen Radionuklide kontinuierlich messen, und die Messwerte per Mobilfunknetz übertragen werden. Fünf Messstandorte verfügen zusätzlich über Iod-Monitore, die aus dem Vorgängermessnetz RADAIR in URAnet aero integriert wurden. Diese messen die ^{131}I Konzentrationen in der Luft (gasförmig und partikelgebunden).

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. Zu diesem Zweck wird für dieses Messnetz eine moderne Messtechnik eingesetzt, die die Identifizierung und Quantifizierung von Radionukliden mit den von internationalen Empfehlungen geforderten Nachweisgrenzen erlaubt. Da der Luftdurchsatz von URAnet aero Monitoren mit 16 bis $18 \text{ m}^3/\text{h}$ um einiges tiefer liegt als derjenige von Hochvolumensammlern (ca. $500 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 1 Woche Sammelzeit, siehe Kapitel 4.1),

liegen auch die Nachweisgrenzen höher, aber immer noch weit unter dem 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 Folge der Stilllegung des Kernkraftwerks Mühleberg wurde das Messgerät der Station Fribourg in die nähere Umgebung des Kernkraftwerks verschoben. Die Verschiebung des Standorts Bözberg nach Aarau ist für die zweite Jahreshälfte 2021 geplant.

Die Messgeräte sind eingebunden in das SwissMetNet der MeteoSchweiz. Innerhalb des SwissMetNet werden die Messwerte verarbeitet und auf die Server der Sektion Umweltradioaktivität transferiert, von wo aus sie für die Analyse, Visualisierung und gegebenenfalls eine Alarmvalidierung verfügbar gemacht werden. Zusätzlich speichert die MeteoSchweiz alle Messwerte in ihrer eigenen zentralen Datenbank (DataWareHouse).

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 einen O-Ring luftdicht an das untere Bleigehäuse gedrückt. Via einen Ansaugkopf mit einem grobmaschigen 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. Das obere Bleigehäuse verfügt über einen Einlass für die Luftansauglinie und das untere Bleigehäuse über einen Ausgang für den Luftabzug.

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 Peak Fläche in der Auswertung abgespeichert ist.

Die Temperaturschwankungen der angesogenen Umgebungsluft während einer 12h-Bestaubungszeit

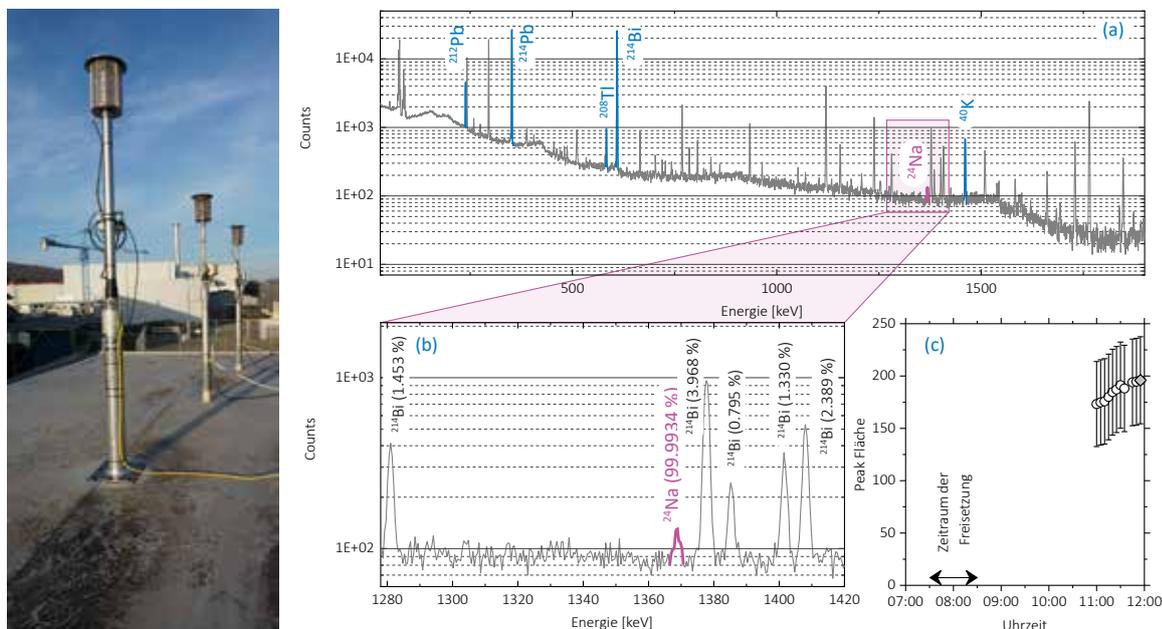


Abbildung 1 a,b,c :

(a) Spektrum der Messstation PSI vom 28. September um 12:00 Uhr. Die Hauptlinien der natürlich vorkommenden Radionuclide sind blau eingezeichnet, der Peak von ²⁴Na rot hervorgehoben.

(b) Vergrößerter Ausschnitt des Bereichs um den ²⁴Na Peak bei 1368.63 keV, umgeben von den markierten ²¹⁴Bi Nebenlinien (Emissionswahrscheinlichkeiten sind angegeben).

(c) Peak Fläche der 1368.63 keV-Linie, die erst ca. 3h nach der Abgabe die Nachweisgrenze erreicht.

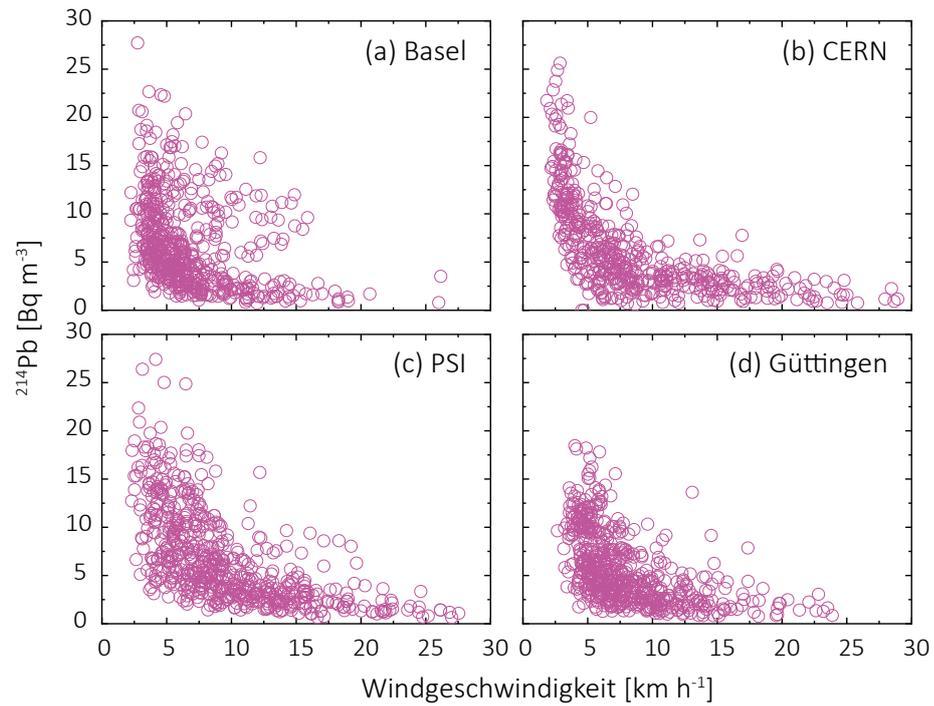


Abbildung 2 :
 12-Stunden Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ^{214}Pb als Funktion der 12-Stunden Mittelwerte der Windgeschwindigkeit der Stationen Basel, CERN, PSI und Göttingen.

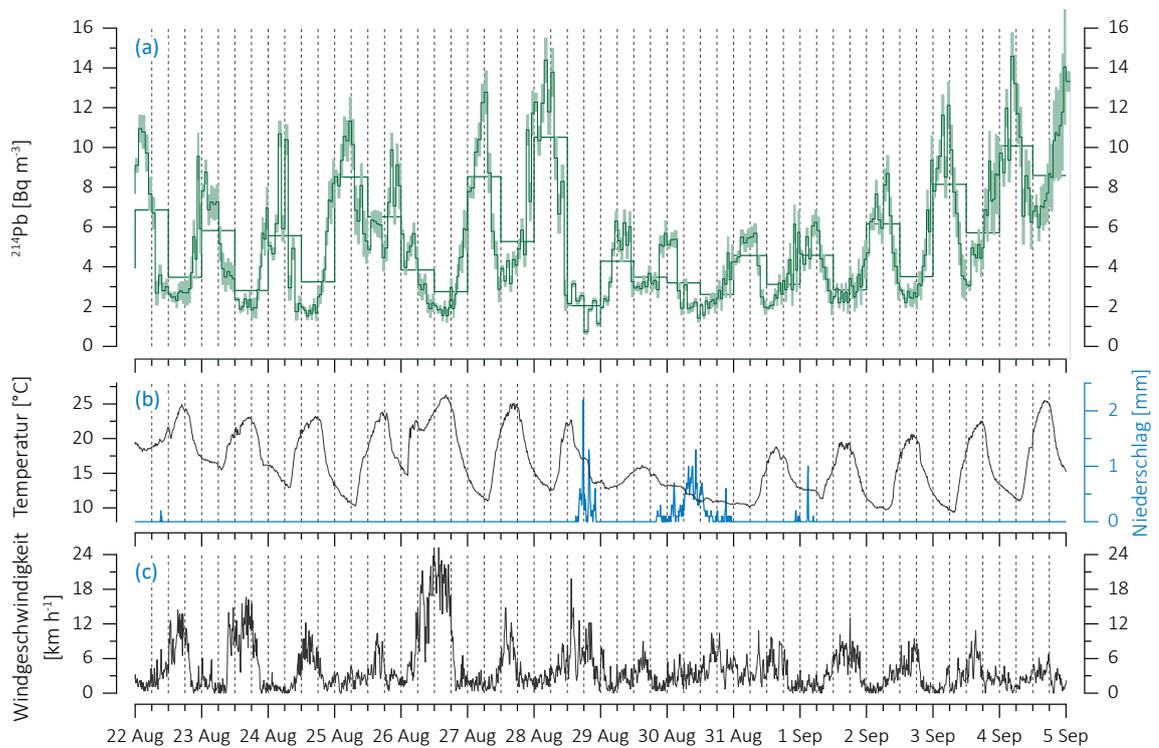


Abbildung 3 a,b,c :
 Messwerte der Station Mühleberg vom 22. August bis 5. September:
 (a) ^{214}Pb Aktivitätskonzentration (1h- und 12h-Mittelwerte),
 (b) Temperatur und 10-Minuten Niederschlagsmenge,
 (c) Windgeschwindigkeit.

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

^{131}I -Monitor:

Eine Pumpe saugt Umgebungsluft mit einer Durchflussrate von ca. 10 m^3 an. Diese Luft passiert dabei eine zylindrische Kartusche mit AgNO_3 -Granulaten, auf welchen gasförmiges ^{131}I 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 ^{131}I bei 364.49 keV registriert. Aus der Zählrate und dem gefilterten Luftvolumen kann dann die Aktivitätskonzentration des ^{131}I in der Umgebungsluft berechnet werden.

Messresultate

Abbildung 1a zeigt das aufgenommene Spektrum der Messstation PSI am Ende der 12h-Bestau-

bungszeit am Mittag des 28. Septembers 2020. Die Hauptlinien der Radontöchter ^{214}Pb und ^{214}Bi aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe sind wie üblich die höchsten Peaks, die Hauptlinien von ^{212}Pb und ^{208}Tl aus der Thorium-Zerfallsreihe und der ^{40}K Peak bei $1'460.81\text{ keV}$ sind auch im Spektrum zu finden. In diesem Spektrum wurde ebenfalls ^{24}Na bei 1368.63 keV nachgewiesen, rot hervorgehoben. In Abbildung 1b ist der nähere Energiebereich um den ^{24}Na Peak mit den benachbarten Linien der Radontochter ^{214}Bi ersichtlich. Aufgrund der Aktivitätskonzentration von ^{214}Bi – üblicherweise im Bereich von einigen Bq/m^3 – sind selbst Linien mit vergleichsweise geringen Emissionswahrscheinlichkeiten im Spektrum zu finden und beeinflussen den Untergrund.

Das PSI bestätigte die Abgabe von ^{24}Na , welches beim Betrieb von Teilchenbeschleunigern entsteht. Andere Radionuklide, die dabei ebenfalls entstehen können, wie ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F und ^{41}Ar sind gasförmig und werden vom Aerosolmonitor nicht erfasst. Die Abgabe fand morgens um ca. 8 Uhr statt und dauerte etwa 10 Minuten. Aufgrund der meteorologischen Bedingungen zur Zeit der Abgabe (Nebel, kein Wind) kann davon ausgegangen werden, dass das ^{24}Na während rund einer Stunde auf dem Filter der URAnet Station gesammelt wurde. Der Peak bei $1'368.63\text{ keV}$ überschreitet schliesslich gegen 11 Uhr die Nachweisgrenze (siehe Abbildung 1c).

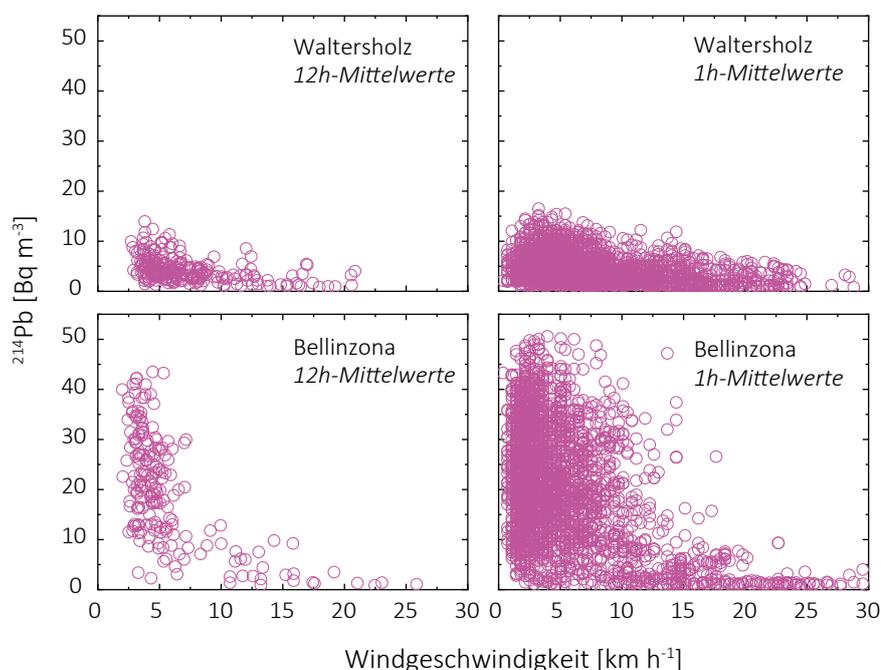


Abbildung 4:

Vergleich der 12h-Mittelwerte (linke Panels) und 1h-Mittelwerte (rechte Panels) der Aktivitätskonzentrationen von ^{214}Pb als Funktion der Windgeschwindigkeit von Juli bis Dezember für die Stationen Waltersholz (oben) und Bellinzona (unten). Aufgrund eines Ausfalls des Windmessers der Station Bellinzona fehlen die Werte für den Monat November dieser Station.

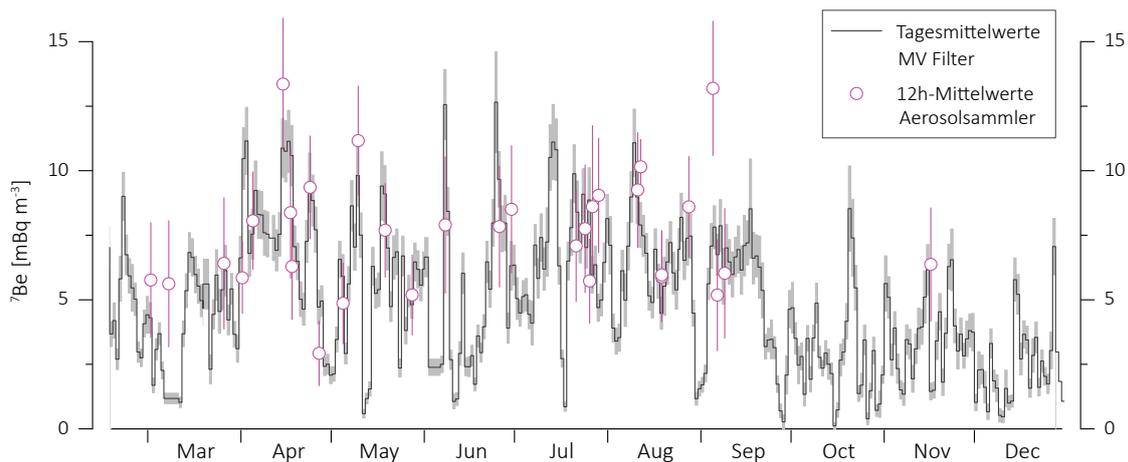


Abbildung 5 :

Aktivitätskonzentration von ${}^7\text{Be}$ auf der Messstation Liebefeld von Mitte Februar bis Ende Dezember. Gezeigt sind die mit einem MV Filter gemessenen Tagesmittelwerte (grau) und die 12h-Mittelwerte des Aerosolsammlers (rot). Da die Erkennungsgrenze vielfach nicht überschritten wird, gibt der Aerosolsammler nur sporadisch ${}^7\text{Be}$ Aktivitätskonzentration an.

Aus der Peak Fläche, der Emissionswahrscheinlichkeit und der Halbwertszeit von ${}^{24}\text{Na}$ (14.96h) ergibt sich für den fraglichen Zeitraum eine ${}^{24}\text{Na}$ -Aktivitätskonzentration in der Luft von ca. $110 \pm 30 \text{ mBq/m}^3$. Dieser Wert ist 500 Mal kleiner als der Immissionsgrenzwert für ${}^{24}\text{Na}$ gemäss Strahlenschutzverordnung.

Abgesehen von diesem Ereignis konnten keine künstlichen Radionuklide in den Spektren festgestellt werden. Hingegen können die Radontöchter ${}^{214}\text{Pb}$ und ${}^{214}\text{Bi}$ meist bereits nach kurzen Bestaubungszeiten von weniger als einer halben Stunde mit hoher Sicherheit nachgewiesen werden. Ihre Aktivitätskonzentrationen sind bestimmt durch die Eigenschaften des Bodens und die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen. Abbildung 2 zeigt die 12-Stunden Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ${}^{214}\text{Pb}$ als Funktion der Windgeschwindigkeit für die Stationen Basel, CERN, PSI und Göttingen. Auch ohne Berücksichtigung des Einflusses von Niederschlag, Temperatur oder Inversionsdauer zeigt diese Darstellung, dass hohe Windgeschwindigkeiten im Allgemeinen keine hohen ${}^{214}\text{Pb}$ Aktivitätskonzentrationen zulassen und vice versa, d.h. hohe ${}^{214}\text{Pb}$ Aktivitätskonzentrationen werden meistens nur bei geringen Windgeschwindigkeiten gemessen. In Basel ist die Beziehung etwas weniger deutlich als beispielsweise am CERN. In Göttingen sind die Aktivitätskonzentrationen im Allgemeinen etwas tiefer als bei den anderen drei gezeigten Stationen.

Mit dem Ziel, die zeitliche Auflösung der ${}^{214}\text{Pb}$ Aktivitätskonzentration zu verbessern, wurde die 12h-Bestaubungszeit in Intervalle von je ca. 1h aufgeteilt. Anhand der Bateman-Gleichungen kann jedem dieser Intervalle eine durchschnittliche ${}^{214}\text{Pb}$ Aktivitätskonzentration zugewiesen werden, unter Berücksichtigung der bereits während der vorangegangenen Intervallen abgelagerten Radionuklide. Da der 351.92-keV Peak von ${}^{214}\text{Pb}$ auch in 1h-Intervallen mit geringer statistischer Unsicherheit behaftet

ist und die Halbwertszeit von ${}^{214}\text{Pb}$ weniger als die Hälfte der Intervall-Dauer beträgt, bleibt die Unsicherheit der ${}^{214}\text{Pb}$ Aktivitätskonzentration auch bei den 1h-Intervallen gegen Ende der Bestaubungszeit von 12h relativ gering. In Abbildung 3 sind die Zeitverläufe der 12h-Mittelwerte und die zugehörigen Mittelwerte der 1h-Intervalle der Station Mühleberg im Zeitraum zwischen dem 22. August und 5. September dargestellt. Es zeigt sich, dass der Unterschied zwischen den beiden Verläufen mehrere Bq/m^3 betragen kann. Die höhere zeitliche Auflösung zeigt, dass ${}^{214}\text{Pb}$ in der Regel abends ansteigt und in den frühen Morgenstunden einen Höchstwert erreicht, bevor der Temperaturanstieg bei Tagesanbruch und die damit verbundene Durchmischung der Atmosphäre die Konzentrationen einbrechen lässt. Die Höchstwerte von ${}^{214}\text{Pb}$ stimmen zeitlich meistens gut mit den Temperaturminima und dem Beginn von etwas windigeren Bedingungen überein.

Zwischen dem 29. August und 2. September kam es zu Niederschlägen. Damit wurden die Luftpartikel ausgewaschen und der Boden aufgrund der Feuchte weniger durchlässig. Die Bodenfeuchte verlangsamte in der Folge den ${}^{214}\text{Pb}$ Anstieg zwischen dem 2. und 5. September.

Analog zu Abbildung 2 ist in Abbildung 4 die 12h-Mittelwerte und 1h-Mittelwerte der ${}^{214}\text{Pb}$ Aktivitätskonzentration gegen die Windgeschwindigkeit für die Monate Juli bis Dezember der Stationen Waltersholz und Bellinzona dargestellt. Die bessere zeitliche Auflösung der 1h-Intervalle bestätigt die oben beschriebene generelle Tendenz aus den 12h-Mittelwerten, zeigt aber auch einige Ausnahmen. In Bellinzona werden ${}^{214}\text{Pb}$ Aktivitätskonzentration von über 50 Bq/m^3 erreicht, während bei Waltersholz als Folge der Bodeneigenschaften und der sehr guten Durchmischung mit der freien Troposphäre kaum mehr als 15 Bq/m^3 gemessen werden.

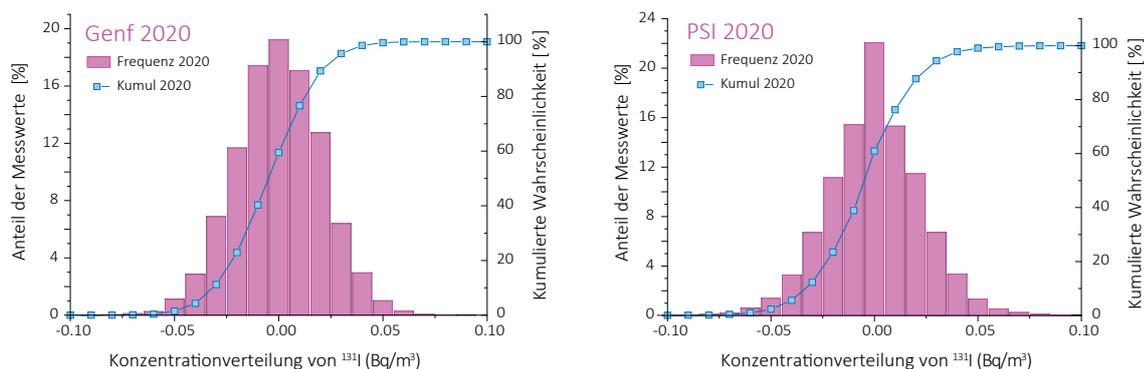


Abbildung 6:

Histogramm der Durchschnittskonzentration von ^{131}I auf den Stationen in Genf und PSI im Jahr 2020.

Wie bereits im Vorjahr haben die Aerosolsammler auch im Jahr 2020 sporadisch ^7Be detektiert. Eine visuelle Überprüfung von einigen Spektren bestätigte die Anwesenheit der Linie bei 477.60 keV. Die Erkennungsgrenze am Ende der 12h-Bestaubungszeit lag für ^7Be jeweils zwischen 5 und 15 mBq/m³, abhängig vom Untergrund des Spektrums, der aufgrund des Einflusses der Radontöchter stark schwanken kann. Die mit Hochvolumensammlern oder Mittelvolumensammlern (MV) gemessenen ^7Be Aktivitätskonzentrationen betragen ebenfalls meistens zwischen 5 und 15 mBq/m³, was die Quantifizierung von ^7Be mit dem Aerosolsammler deutlich erschwert. In Abbildung 5 sind ^7Be Aktivitätskonzentrationen des Aerosolsammlers in Liebefeld eingezeichnet. Ein Vergleich mit den von einem MV gemessenen Tagesmittelwerten zeigt, dass in den meisten Fällen, bei denen der Aerosolsammler ^7Be detektiert hat, die angegebenen Aktivitätskonzentration in etwa mit Werten des MV Filters übereinstimmen. Bei jeweils einem Wert Anfangs März und Anfangs September gibt es grosse Abweichungen, was die Schwierigkeit von Messungen im Bereich der Erkennungsgrenze verdeutlicht. Möglicherweise könnte ein abgeänderter Aerosolsammler mit anderen Filtereigenschaften und höherem Durchfluss eine genügend tiefe Nachweisgrenze von ^7Be erreichen, um interessante Konzentrationsverläufe zu messen.

Auch bei den fünf ^{131}I Monitoren der Stationen in Bellinzona, Genf, Fribourg, Liebefeld und PSI wurde bei keiner Messung im Jahr 2020 die Nachweisgrenze überschritten. Die Absenz von ^{131}I in der Luft bestätigen auch die Histogramme der durchschnittlichen ^{131}I Konzentration der Stationen in Genf und am PSI in Abbildung 6. Sie zeigen die eine Gaußsche Glockenkurve mit einem Mittelwert von Null.

Schlussfolgerung

Die 15 nuklidspezifischen Aerosolmonitore des Messnetzes URAnet aero haben im Jahr 2020 zuverlässig Gamma-Spektren mit guter Auflösung erzeugt. Mit Ausnahme der Messung von ^{24}Na auf der Station am PSI konnten weder die Aerosolsammler noch die ^{131}I Monitore künstliche Radionuklide feststellen. Die weiterentwickelte Datenverarbeitung hat die zeitliche Auflösung der Aktivitätskonzentration der Radontöchter verbessert und die Analyse vereinfacht. Die Aerosolsammler detektieren sporadisch kosmogener ^7Be . Die Nachweisgrenze liegt aber noch nicht genügend tief, um sinnvoll Zeitverläufe zu messen.

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 nun 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 ob 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

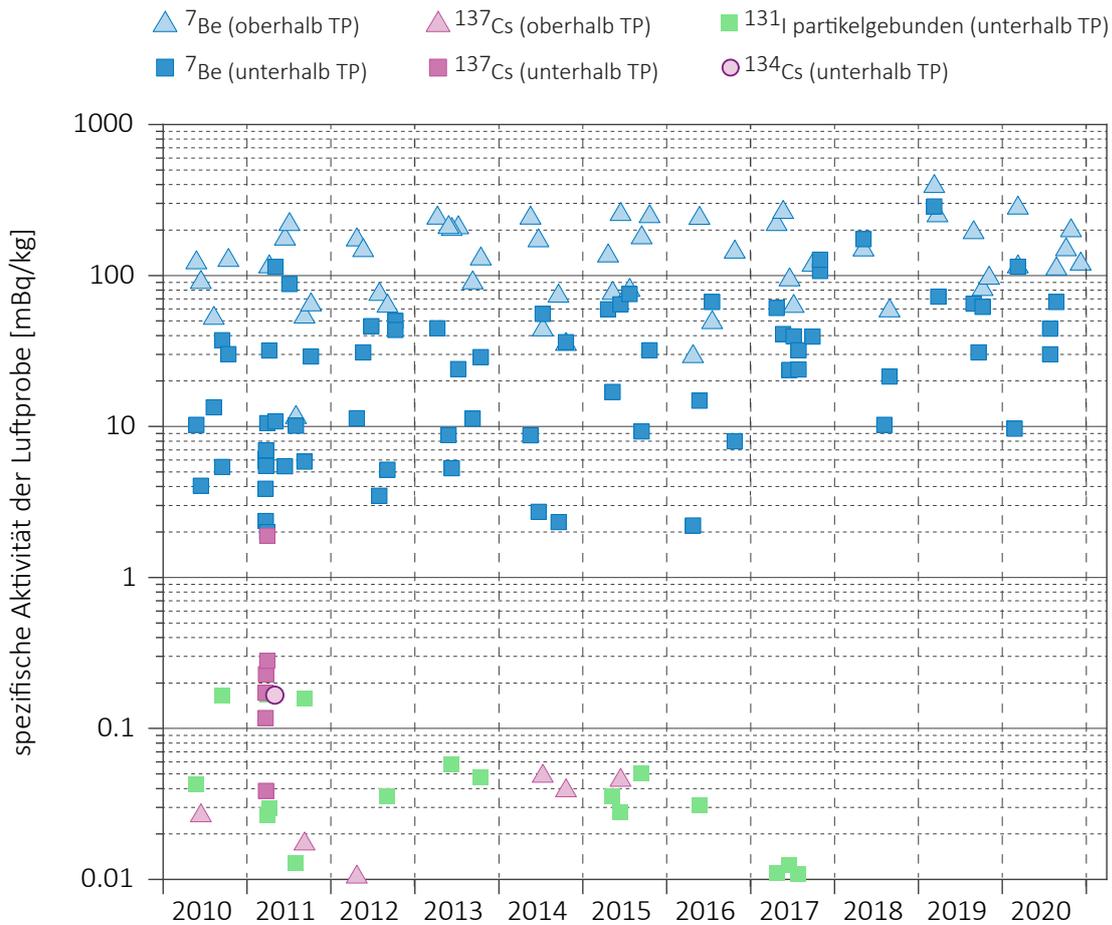
Die Messung erfolgt im Labor mittels hochauflösender Gammaskpektrometrie, wobei nach 1-2 Tagen Messzeit für ^{137}Cs eine Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg Luft erreicht wird. Anschliessend können an den Filtern weitere Untersuchungen durchgeführt werden, z.B. mit radiochemischen oder massenspektrometrischen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

Über die letzten elf 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 2020 alle unter der Nachweisgrenze von 0.01 - 0.05 mBq/kg. In Figur 3 deutlich sichtbar sind die nach dem Reaktorunfall Fukushima (Japan) gemessenen ^{131}I -Konzentrationen, welche jedoch infolge der Halbwertszeit von 8 Tagen schon kurze Zeit später nicht mehr messbar waren. Auch das Radionuklid ^{134}Cs konnte in den Jahren nach 2011 nicht mehr nachgewiesen werden.



Figur 3:
 ${}^7\text{Be}$ -, ${}^{134}\text{Cs}$ -, ${}^{137}\text{Cs}$ - und partikelgebundene ${}^{131}\text{I}$ - Messwerte in mBq/kg Luft in den Jahren 2010-2020.

Quellen:

- [1] P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Halbleitermessungen von Fallout. Helv. Phys. Acta, Vol. 41/5, pp. 645-649 (1968).
- [2] P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Rechenmethoden zur Analyse von Halbleiterspektren. Helv. Phys. Acta Vol. 42/7-8, pp. 901-902, (1969).
- [3] P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Rechenmethoden zur Analyse hochaufgelöster g-Spektren und ihre Anwendung auf Spaltfragmentgemische. Helv. Phys. Acta, Vol. 43/6, pp. 693-712 (1970).
- [4] P. Winiger, O. Huber, J. Halter und B. Michaud: Konzentrationsmessungen von ${}^7\text{Be}$, ${}^{137}\text{Cs}$ und jungen Spaltfragmenten an der Tropopause. Tellus Vol. 28/5, 434-441.

4.4

Radioaktivität in aquatischen Systemen

M.S. Brennwald

Eawag, Gruppe Umweltisotope, Abteilung W+T, Dübendorf

P. Rünzi

Eawag, Gruppe Sedimentologie, Abteilung SURF, Dübendorf

A. Pregler

Kantonales Labor Basel-Stadt, Gruppe Radioaktivität, Basel

Zusammenfassung

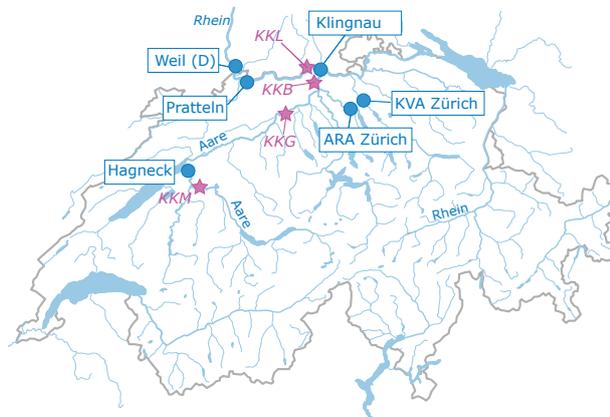
In den Wasserproben von Aare und Rhein wurden 2020 weder ^{54}Mn , ^{58}Co oder ^{60}Co aus Abgaben der Kernkraftwerke Mühleberg, Gösgen, Beznau oder Leibstadt nachgewiesen; diese Radionuklide wurden nur in den Schwebstoffproben von Aare und Rhein gefunden. Vereinzelt wurde ^{137}Cs beobachtet, welches zum grössten Teil 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 ^{131}I und ^{137}Cs knapp oberhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen beobachtet. In Fischen wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen. Auch in Grundwasserproben wurden keine künstlichen Radionuklide gefunden.

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 mit dem Ziel, die Radionuklid-Immissionen der entsprechenden Betriebe zu überwachen.

Die kumulierten Radionuklidabgaben der Kernkraftwerke werden von der Eawag mittels Wasserproben an verschiedenen Standorten entlang von Aare und Rhein monatlich 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



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

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

Die Aktivitäten der Radionuklide in allen Proben werden an der Eawag mittels Gammaskpektrometrie bestimmt.

Zusätzlich zu diesen monatlichen Sammelproben entnimmt das Amt für Umweltschutz und Energie Basel Stadt (AUE BS) bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D) Stichproben von Rheinwasser und Schwebestoffen. Diese werden vom kantonalen Labor Basel-Stadt (KLBS) analysiert.

Ergebnisse

Wasserproben aus Aare und Rhein

Die Wasserproben aus Aare und Rhein bei Hagneck, Klingnau und Pratteln werden als grossvolumige, monatliche Sammelproben entnommen. Entsprechend dem jeweiligen Abfluss werden pro Tag automatisch zwischen 20 und 80 Proben genommen, was monatliche Sammelproben zwischen 50L und 200L ergibt. Zur Bestimmung der monatlichen Fracht der Radionuklide in Aare und Rhein werden die Radionuklide aus den Sammelproben durch eine Eisenhydroxidfällung extrahiert. Danach wird das Fällungsprodukt getrocknet und darin die Aktivitäten der betreffenden Radionuklide bestimmt. Die Radionuklid-Fracht ergibt sich aus dem Produkt der bestimmten Aktivitätskonzentration 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 Radionuklid-Abgaben aus den Kernkraftwerken in die Aare bzw. in den Rhein waren für ^{54}Mn vorwiegend durch das Kernkraftwerk Mühleberg dominiert. Die Abgaben von ^{58}Co und ^{60}Co sind im Juni ebenfalls vom Kernkraftwerk Mühleberg bestimmt, wobei ansonsten auch das Kernkraftwerk Beznau beiträgt. Im Fall von ^{137}Cs sind die Abgaben durch das Kernkraftwerk Beznau dominiert.

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 unten).

Bei allen drei Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln wurde sporadisch ^{137}Cs in Konzentrationen nahe der Bestimmungsgrenze gefunden. Diese ^{137}Cs -Nachweise 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 liegen in allen Fällen um mindestens zwei Grössenordnungen unterhalb der Immissionsgrenzwerte.

Langfristige Entwicklung der Radionuklidabgaben und Frachten in Aare und Rhein

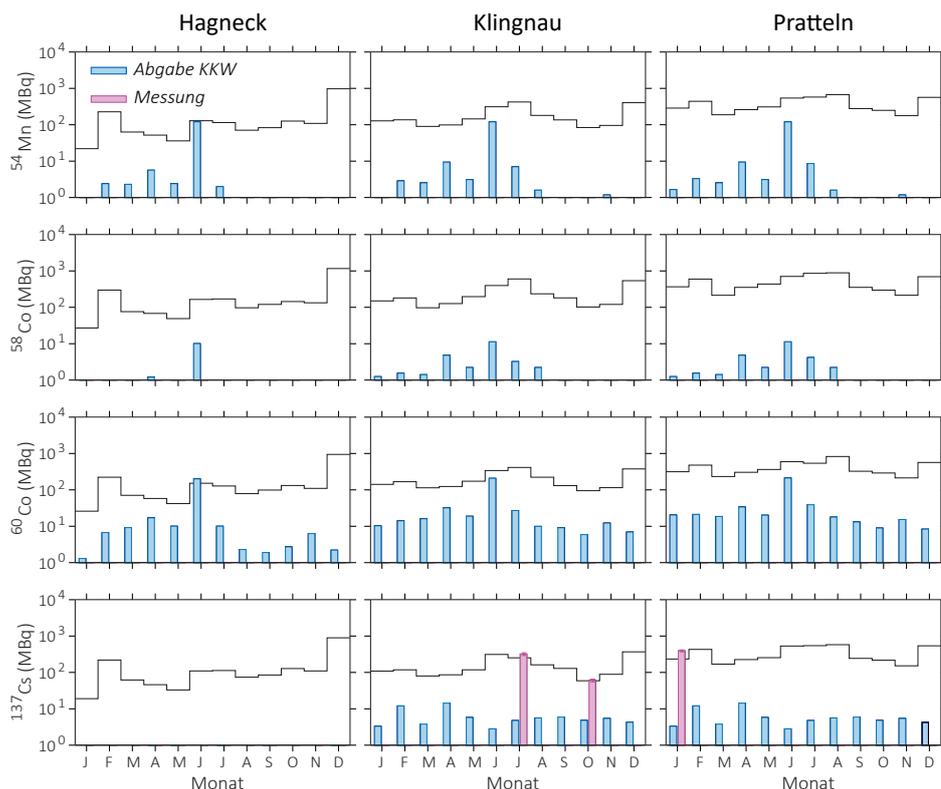
Figur 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abgaben von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs aller Kernkraftwerke während den Jahren 2000 - 2020. Als Folge der Revisionen der Kernkraftwerke sind die Abgaben in der Regel im Sommer/Herbst am grössten. Über die Jahre betrachtet haben die Abgaben von ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs bis ca. 2008 tendenziell abgenommen. Danach ist bis 2013 zunächst keine systematische Veränderung erkennbar. Von 2014 bis 2018 zeigt sich nochmals ein Trend zu tieferen Abgaben von ^{54}Mn , ^{58}Co und ^{60}Co . Im Jahr 2020 waren die Abgaben (vorallem ^{54}Mn) wieder etwas höher, aber dennoch so gering, dass in den Wasserproben keines dieser Radionuklide nachgewiesen wurde.

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

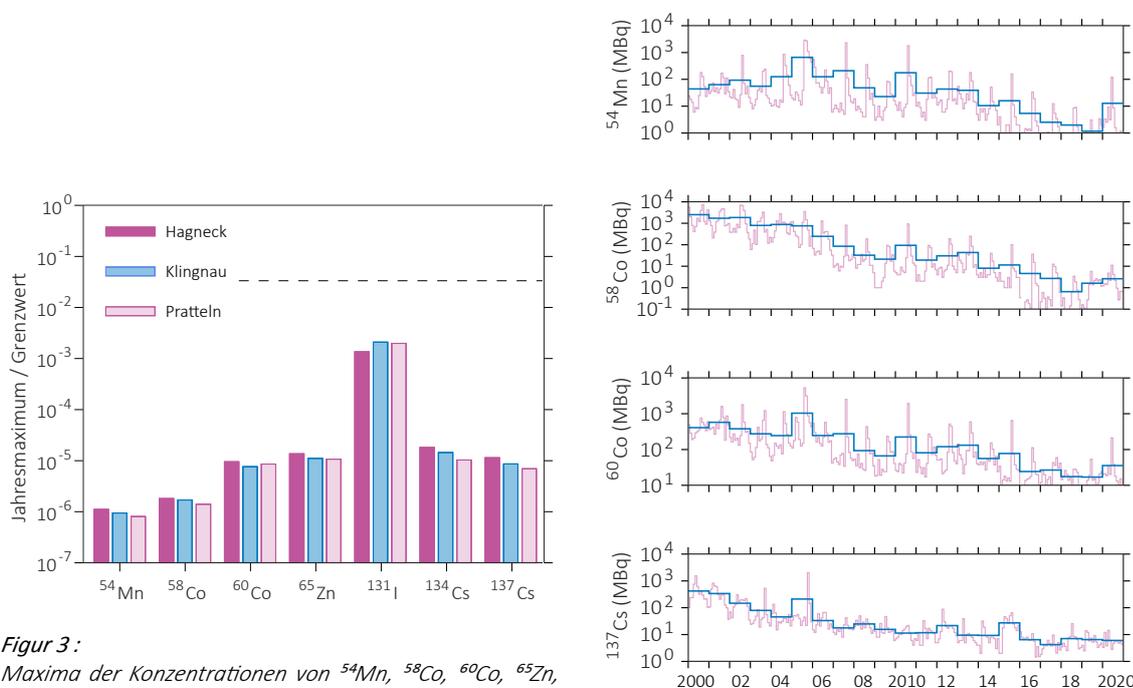
Bei der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein (D) werden durch das Amt für Umweltschutz und Energie Basel Stadt (AUE BS) täglich Wasserproben gesammelt. Das kantonale Labor Basel-Stadt (KLBS) mischt die Tagesproben zu Wochenmischproben und bestimmt deren ^3H -Aktivität (Bestimmungsgrenze 2 Bq/L). Die ^3H -Aktivität des Rheinwassers ist in Figur 5 dargestellt. Die ^3H -Konzentrationen betragen über das ganze Jahr <15 Bq/L. Bei 75% aller Proben liegen die ^3H -Konzentrationen unterhalb der Messgrenze von 2 Bq/L.

Schwebestoffe in Aare und Rhein

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

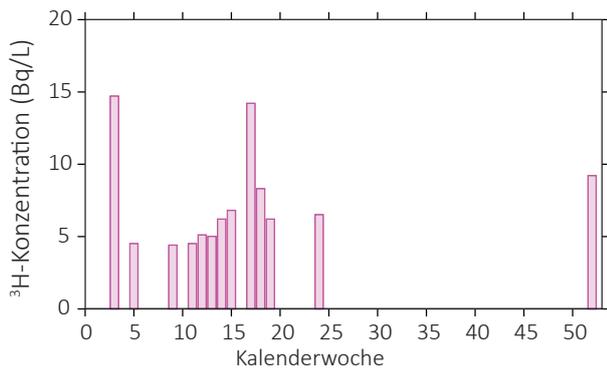


Figur 2: Vergleich der berechneten und gemessenen Frachten von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs an den drei Stationen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln. Die berechneten Frachten entsprechen den kumulierten Abgaben der flussaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte lagen mit Ausnahmen bei ^{137}Cs immer unter der Nachweisgrenze (schwarze Stufenlinie, engl. «limit of quantification» / LOQ). Die Fehlerbalken zeigen den Standardmessfehler der Fracht.



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

Figur 4: Jahres- und Monatsmittel der Abgaben von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs aus den Kernkraftwerken während 2000 - 2020 (Summe der Abgaben aller Kernkraftwerke).

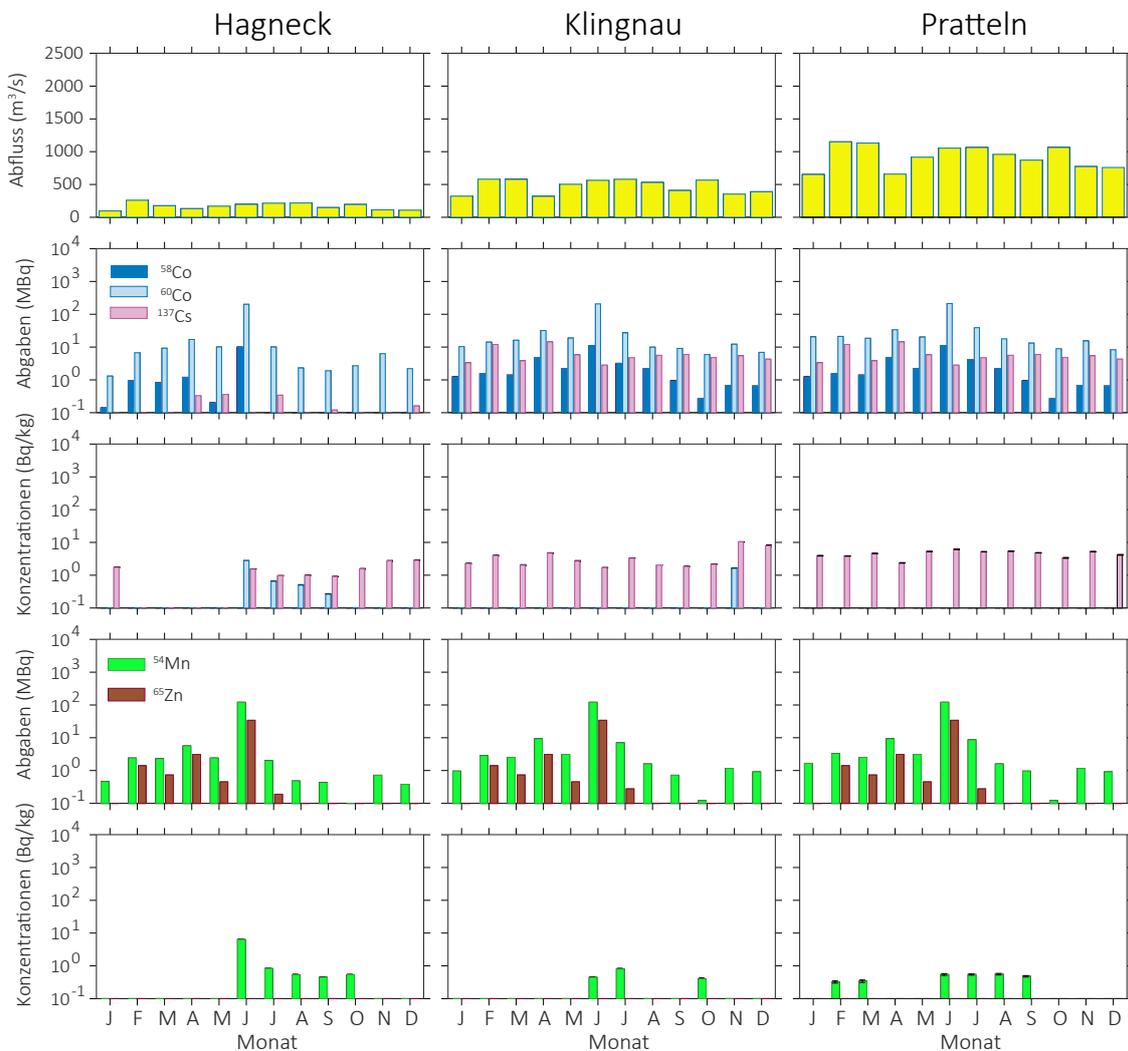


Figur 5:
³H-Aktivitätskonzentration im Rhein bei Weil am Rhein (D).

dem offenen Wasser entfernt. Umgekehrt können Radionuklide durch Resuspension des Sediments auch wieder zurück in die Wasserphase gelangen.

Mit Hilfe von Sedimentfallen gewinnt die Eawag monatliche Sammelproben der Schwebstoffe bei den Stationen Hagneck, Klingnau und Pratteln. Zudem sammelt das AUE BS bei Weil am Rhein monatlich Schwebstoff-Stichproben. Dabei wird über Zeiträume von einigen Tagen Rheinwasser aus der Querprofilmischung entnommen und davon die Schwebstoffe abzentrifugiert. Diese Schwebstoffproben werden gefriergetrocknet, gemahlen und danach gamma-spektrometrisch analysiert.

Die Radionuklidaktivitäten der Stichproben des AUE BS werden in monatliche Radionuklidfrachten in Form

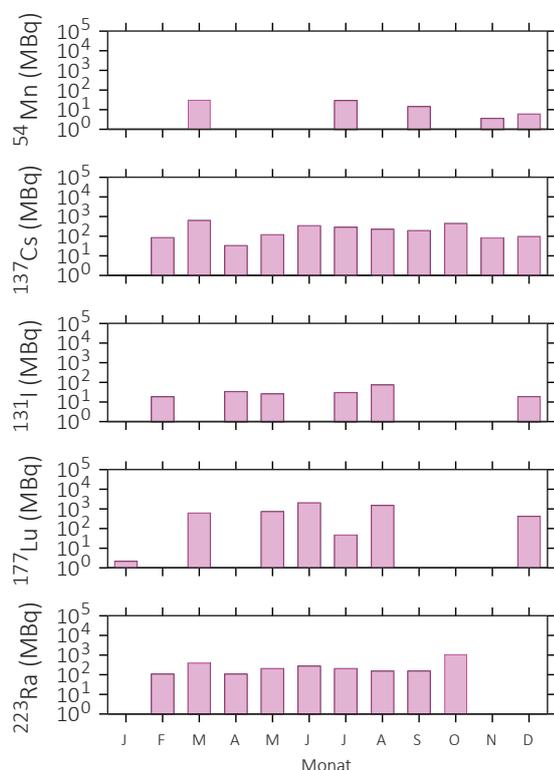


Figur 6:
Spezifische Aktivitäten von ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn und ¹³⁷Cs in den monatlichen Partikelproben aus den Sedimentfallen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln im Vergleich mit dem Abfluss und den kumulierten Abgaben der stromaufwärts gelegenen Kernkraftwerke. Die Messwerte wurden nur dann eingezeichnet,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

suspendierter Partikel 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.

Die spezifischen ^{137}Cs -Aktivitäten der Partikelproben liegen bei allen drei Stationen bei maximal 10 Bq/kg, und zeigen keine generelle Korrelation mit den Abgaben aus den Kernkraftwerken (Figur 6). Die ^{137}Cs -Nachweise werden wie auch bei den Wasserproben auf die Remobilisierung von ^{137}Cs vom Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt. Sporadisch wurden ^{54}Mn und ^{60}Co gefunden; ^{58}Co , und ^{65}Zn wurden nicht nachgewiesen.

Figur 7 zeigt die aus den Stichproben bei Weil am Rhein (D) abgeschätzten Frachten von ^{54}Mn und ^{137}Cs auf Schwebestoffen. ^{54}Mn wurde sporadisch nachgewiesen. In fast allen Stichproben wurde ^{137}Cs gefunden, was wiederum primär auf die Remobilisierung von ^{137}Cs aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt wird. ^{58}Co wurde nicht und ^{60}Co nur in 2 Proben nachgewiesen (in Figur 7 nicht gezeigt).



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

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 2020 wurden Fische aus der Aare bei Aarberg (gefangen am 18.12.2020), bei Wöschnau (26.6.2020), dem Klingnauer Stausee (28.6.2020) und dem Rhein bei Augst (26.6.2020) analysiert. Bei allen Fischproben wurde natürliches ^{40}K gefunden (618 - 816 Bq/kg). Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

Wasserpflanzen: Am 2.11.2020 wurden Wasserpflanzen oberhalb der Station in Hagneck, bei Wöschnau, im Klingnauer Stausee, und im Rhein bei Muttenz entnommen. In zwei Proben wurde ^{137}Cs gefunden (Wöschnau: 1.8 Bq/kg, Muttenz: 4.2 Bq/kg). In der Probe vom Klingnauer Stausee wurde ^{131}I festgestellt (18.3 Bq/kg). Neben diesen künstlichen Radionukliden wurde natürliches ^{40}K beobachtet (477 - 870 Bq/kg).

Grundwasser bei Aarberg, Döttingen und Pratteln

Am 8.7.2020 wurden die Grundwasserströme bei Aarberg (Pumpwerk Römerstrasse II, in der Nähe der Überwachungsstation Hagneck), bei Schönenwerd (Pumpwerk Aarefeld in Gretzenbach), bei Böttstein (Pumpwerk Schulhaus, unterhalb des KKW Beznau) und im Hardwald bei Muttenz (Grundwasserbrunnen 16 der Hardwasser AG) beprobt. Dabei werden die Radionuklide aus 150 L Grundwasser analog zu den Flusswasserproben vor der Analyse angereichert und analysiert. Es wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen (Nachweisgrenzen 0.1 - 1 mBq/L).

4.5

URAnet aqua:

Automatisches Messnetz Flusswassers

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

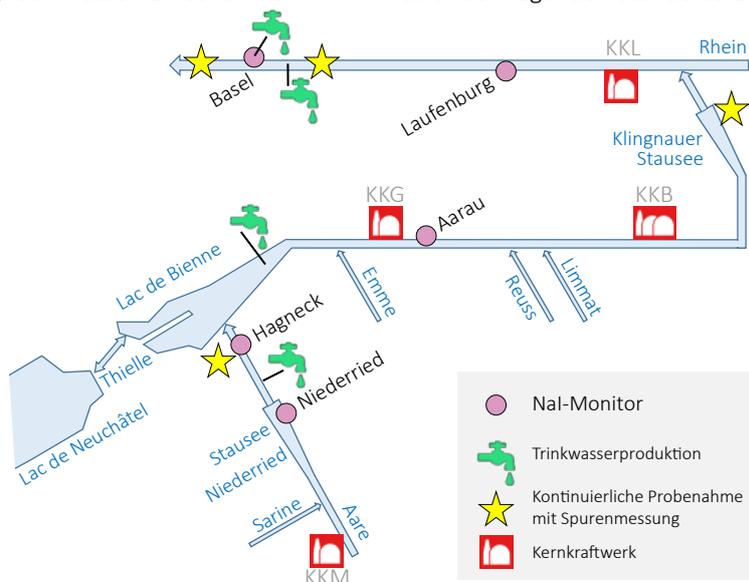
Zusammenfassung

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 mit praktisch 100% bei allen Sonden sehr hoch.

Das Messnetz und seine Aufgaben

Das Messnetz URAnet aqua überwacht kontinuierlich und automatisch das Flusswassers 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



Figur 1: Standorte der NaI-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).

zwei weitere Sonden installiert (Aarau und Laufenburg). 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 am BAG sowie die NAZ benachrichtigt. Das BAG verifiziert die Messwerte, eruiert die Ursache einer allfälligen Kontamination. Die Nationale Alarmzentrale (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

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 , siehe auch Lit. [1]). Bei tiefen 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 möglich, dass die Linie der Radontochter ^{214}Pb bei 352 keV fälschlicherweise dem künstliche ^{131}I zugerechnet wird (vergleiche Spektrum in Figur 2).

Verfügbarkeit der Messsonden und Messergebnisse 2020

Die Verfügbarkeit der Sonden, d.h. das Vorhandensein von 10-Minuten-Spektren, ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Generell sind diese Werte sehr hoch. Die «Uptime» entspricht der Zeit, in der die Alarmfunktion des Messnetzes gewährleistet war. Die Werte 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. Die Sonde bei Laufenburg hatte zwischen dem 20. und dem 30. April durch ein defektes Modem einen längeren Ausfall der Datenübertragung zu verzeichnen.

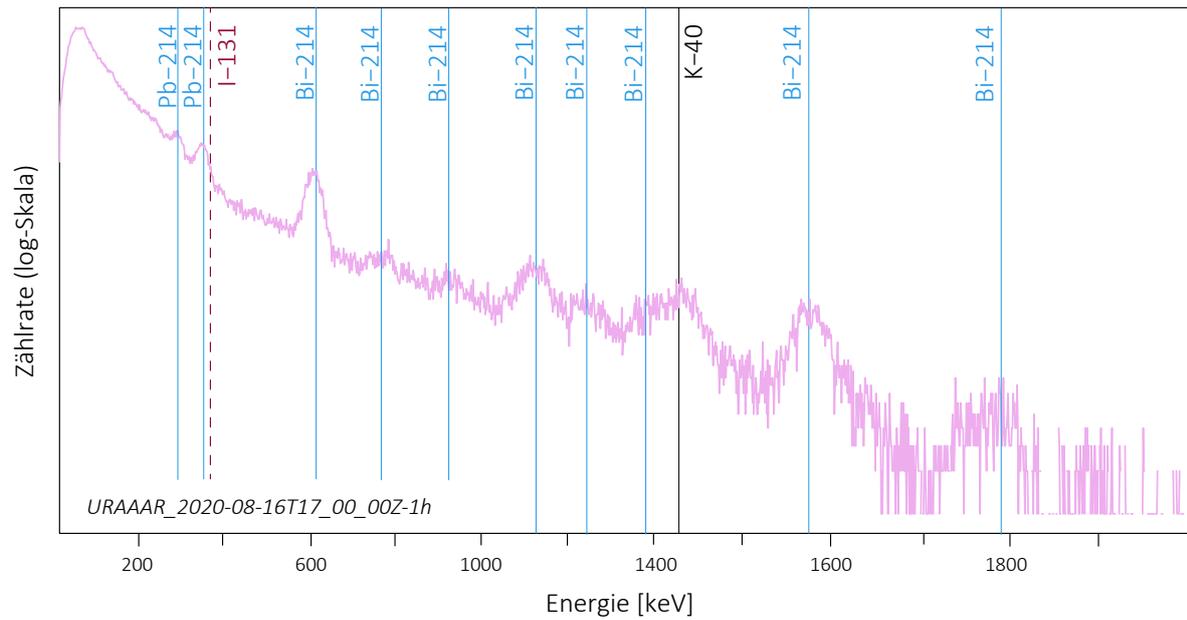
Tabelle 1:
Verfügbarkeit (Uptime) der NaI-Wassersonden 2020

Station	Uptime	Inbetriebnahme
Niederried	99.9%	Juni 2014
Hagneck	99.9%	Juni 2015
Aarau	99.9%	Juni 2014
Laufenburg	97.3%	Januar 2015
Basel	99.9%	Juli 2013

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 beim Fehlen eines einzigen 10-Minuten Wertes kein Tagesmittelwert gerechnet wird. Die NaI-Detektoren des URAnet aqua Messnetzes konnten 2020 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. Einen Alarm (Alarmierung der Sektion URA durch die NAZ) hat die Sonde von Hagneck am 11.7.2020 gegen Mitternacht ausgelöst. Als Ursache konnte rasch die im Abschnitt «Messtechnik» erwähnte falsche Zuordnung des Peakes bei 352 keV festgemacht werden.

Literatur

- [1] Steinmann P. und Estier S., 2015. Radioaktivität in Flusswasser unterhalb KKW: Das neue Messnetz zur kontinuierlichen Überwachung von Aare und Rhein. Aqua & Gas, 10, 66-72.



Figur 2:
 Gammaspektrum der NaI-Sonde bei Aarau bei starkem Einschwemmen von Radonzerfallsprodukten nach einem Gewitterregen (16.8.2020). Der Peak bei 352 keV ist aufgrund des «Fingerabdruckes» der Linien der Radonzerfallsprodukte ^{214}Pb und ^{214}Bi eindeutig dem ^{214}Pb zuordenbar und nicht mit ^{131}I zu verwechseln.

4.6

Tritium-Monitoring in der Aare

Th. Stocker, R. Purtschert, T. Wagner

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

Zusammenfassung

Im Jahr 2020 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 durchgeführt. Im Jahr 2020 wurden die höchsten Tritiumwerte 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 2020 nach Art oder Entnahmeort der Probe

Art oder Entnahmeort der Probe	Anzahl
Aare Mühleberg Rewag	365
Niederschlag Niederwangen	28
Stadtbach Niederwangen	8
Gäbelbach Eymatt	3
Niederschlag Physikalisches Institut	12
Rhein im Unterlauf des KKL	39
Standards/Nulleffekt/Vergleichsmessungen	104
Total: 559	

Probenahmen

Im Jahr 2020 wurden im Rahmen dieses Monitorings die folgenden Standorte beprobt:

- Aare flussabwärts vom KKM (Standort Mühleberg-Rewag, ganzjährig)
- Niederschlag Niederwangen (ganzjährig), Standort 240 m östlich der Firma mb-microtec
- Stadtbach Niederwangen (3 Einzelproben während des Corona-Shutdowns im Frühjahr 2020, alle zwei Wochen ab Herbst 2020)
- Gäbelbach Eymatt (3 Einzelproben während des Corona-Shutdowns im Frühjahr 2020)
- Niederschlag vom Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern (ganzjährig)

Während der Jahresrevision des Kernkraftwerks Leibstadt (KKL) wurden ausserdem Wasserproben 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 2020 gemessenen Proben im Einzelnen.

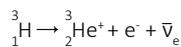
Die täglichen Probenahmen aus der Aare am Standort Mühleberg sowie aus dem Rhein flussabwärts vom KKL erfolgten mit Hilfe von automatischen

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.

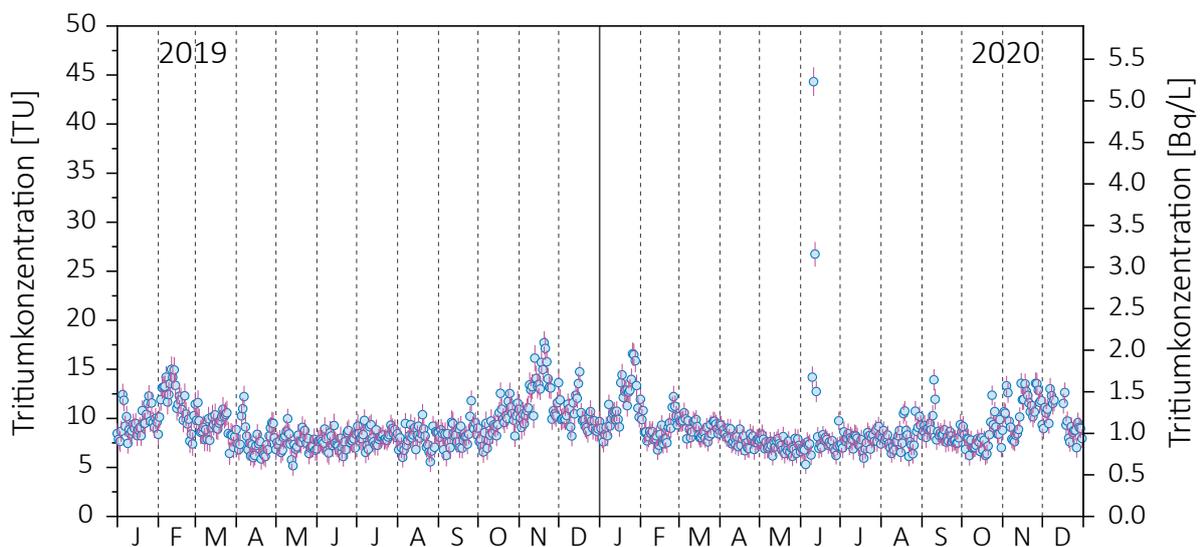
Im Raum Niederwangen wurden einzelne Stichproben aus dem Stadtbach entnommen und gemessen. Seit Herbst 2020 erfolgen diese Probenahmen wieder regelmässig alle zwei Wochen. Der Niederschlag (Regen bzw. Schnee), der unweit der Firma MB Microtec in Niederwangen in einem Regensammler erfasst wird, wird weiterhin alle zwei Wochen gemessen, sofern eine ausreichende Menge Niederschlag vorliegt.

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 (2019 - 2020). Die erhöhten Werte im Juni 2020 sind auf die Entleerung des Torus beim Rückbau zurückzuführen..

Messergebnisse Januar bis Dezember 2020

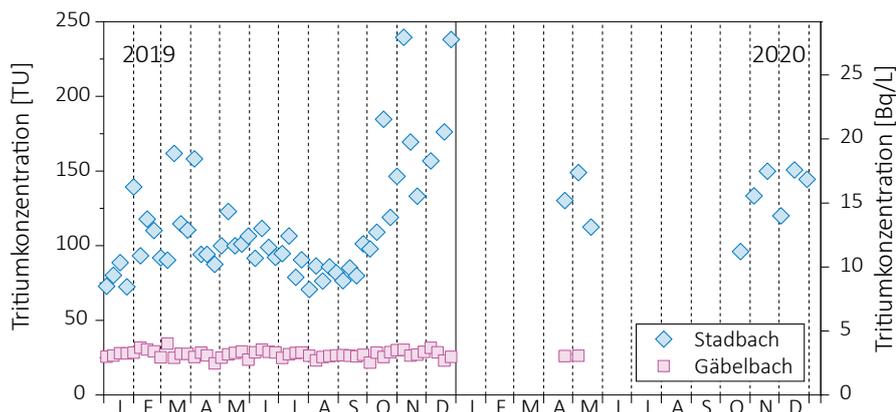
Standort Mühleberg (Aare)

Die Tritium-Messwerte des Wassers vom Mühleberg bewegten sich grösstenteils relativ stabil in einem Band zwischen 5 und 15 TU (entsprechend 0.6 - 2 Bq/L). Deutlich sichtbar sind jedoch hohe Messwerte in der Zeit vom 10. bis 12. Juni 2020. Laut Auskunft von der BKW wurde in diesem Zeitraum der Torus des KKM entleert, da die darin enthaltene Wasservorlage nach der endgültigen Abschaltung nicht mehr benötigt wird. Die abgegebene Wassermenge im Zuge dieser Entleerung betrug 1970 m^3 mit einer mittleren ^3H -Konzentration von 0.13 GBq/m^3 . Bei einer Aareschüttung von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer gleichmässigen Abgabe der Wassermenge über drei Tage hinweg würde dies einer mittleren Tritiumkonzentration von ca. 40 TU entsprechen, was genau im Bereich der gemessenen Werte liegt.

Standorte Niederwangen (Stadtbach, Gäbelbach, Niederschlag)

Im Raum Niederwangen wurden 28 Messungen am lokalen Niederschlag durchgeführt; siehe Figuren 3 und 4. Der absolute Höchstwert von über 4'000 TU wurde an einer Schneeprobe gemessen, die am 03.12.2020 unweit der Firma MB Microtec gesammelt wurde. Ansonsten betragen die Messwerte bei Schnee- oder Regenwasserproben maximal ca. 2'000 TU.

Im Frühjahr 2020 stellte sich die Frage, ob die Tritiumwerte im Raum Niederwangen aufgrund des Shutdowns und der damit verbundenen eingeschränkten industriellen Aktivität der Firma MB Microtec zurückgehen würden. Von

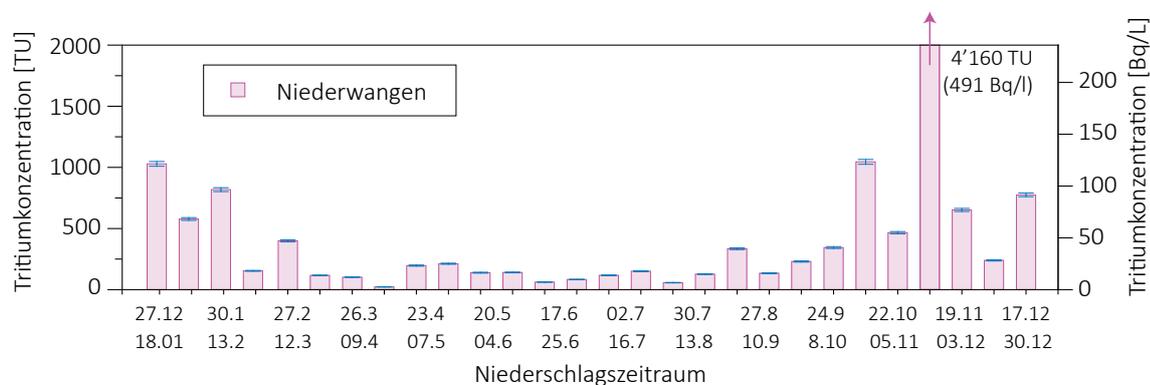


Figur 2: Tritium-Messwerte am Stadtbach Niederwangen sowie am Gäbelbach Eymatt (Einzelproben).

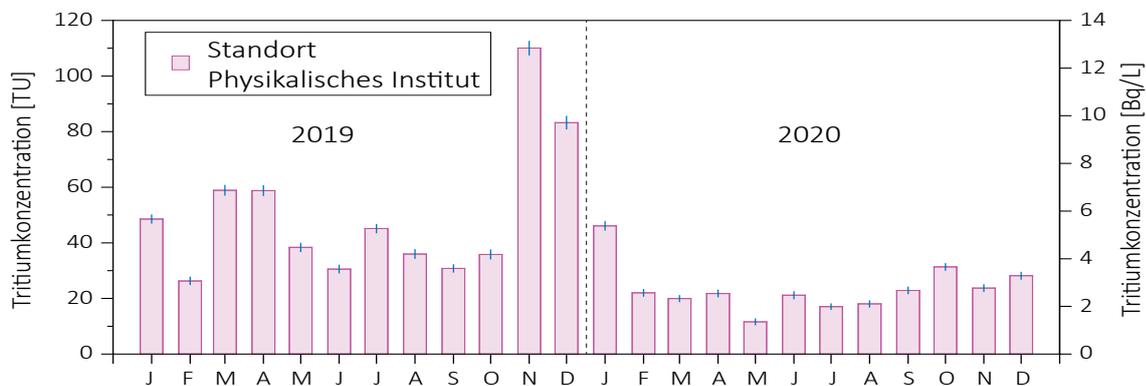
Mitte April bis Mitte Mai 2020 wurden daher einige Stichproben aus dem Stadtbach und dem Gäbelbach entnommen. Entgegen den Erwartungen verharrten die Messwerte aber relativ stabil bei ca. 100 bis 150 TU (Stadtbach) bzw. bei 25 bis 30 TU (Gäbelbach). Die Erklärung für die stabilen Werte fand sich schliesslich auf der Website der Firma MB Microtec (besucht am 28.05.2020):

«Die Firma mb-microtec ag setzt alles daran, dass der eigene Betrieb nicht beeinträchtigt wird. Bis auf weiteres ist nicht absehbar, dass die interne Produktion in der Kapazität reduziert oder eingestellt werden müsste.»

Die Messwerte blieben also stabil, weil auch die industrielle Aktivität der Firma MB Microtec unvermindert fortgesetzt wurde.



Figur 3: Tritium-Messwerte im Regenwasser Niederwangen (Probenahmen alle 2 Wochen).



Figur 4: Tritium-Messwerte des Regenwassers vom Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern (Monatsproben).

Seit Herbst 2020 wird der Stadtbach wieder regelmässig alle zwei Wochen beprobt. Die Messwerte lagen im lang-jährigen Mittel.

Standort Physikalisches Institut, Stadt Bern (Regenwasser)

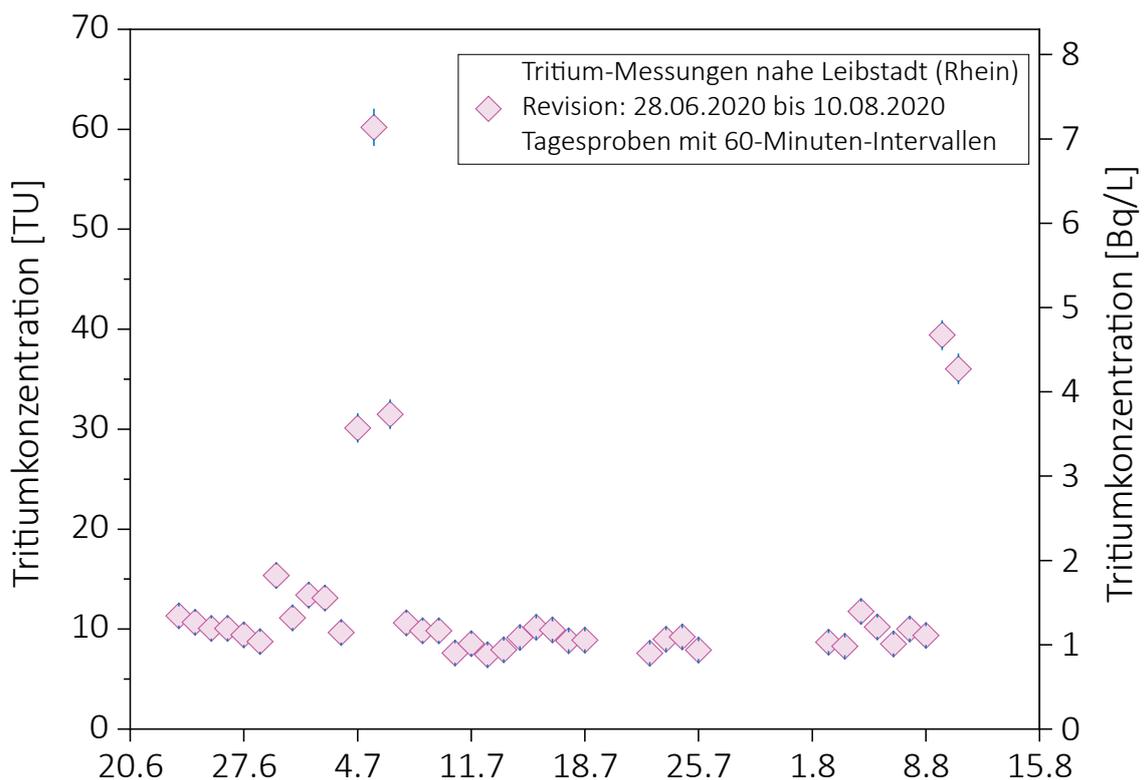
Die Tritiumkonzentration im Niederschlag im Raum Bern ist generell höher als in der Aare und auch höher als in Niederschlägen anderenorts in der Schweiz. Dies ist auf lokale gasförmige Emissionen zurückzuführen. Die im Jahr 2020 gemessenen Proben liegen im Bereich 11 - 46 TU.

Standort Leibstadt (Rhein)

Von Mitte Juni bis Mitte August 2020 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 für den Zeitraum 24.06.2020 bis 10.08.2020 terminiert war. 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. 60 TU ab. Ab dem 07. Juli 2020 hatte sich der Tritiumgehalt des Rheins wieder bei Werten nahe dem Anfangswert stabilisiert (Figur 5). Die fehlenden Messwerte in der zweiten Julihälfte sind auf den hochsommerlich bedingten extrem niedrigen Wasserstand des Rheins zurückzuführen: an einigen Tagen befand sich das Ansaugrohr des Probenehmers oberhalb der Wasseroberfläche, sodass keine Wasserprobe entnommen werden konnte.

Deutlich ist am 10. und 11. August 2020 ein zweiter Peak erkennbar. Dieser ist auf die Revision des Kernkraftwerks Beznau 2 zurückzuführen, welche am 08.08.2020 begonnen hatte.



Figur 5: Tritium-Messwerte im Rhein stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt vor, während und nach dem Revisionsstillstand (30.6.-11.8.). Die erhöhten Werte im August fallen in die Zeit der Revision von KKB-Block 2 (ab 5.8.).

4.7

Radioactivité du sol et de l'herbe

P.-A. Pittet, F. Barraud, L. Pfefferlé, C. Pilloud, P. Froidevaux et M. Straub

Institut de radiophysique, CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

S. Estier, P. Steinmann, A. Gurtner

Section de surveillance de la radioactivité, URA / OFSP, Berne

A. Pregler

Laboratoire Cantonal de Bâle, Kannenfeldstr. 2, Basel

R. Gosteli, J. Corcho, S. Rölli, F. Hauenstein, M. Astner, H. Sahli

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 réalisés en atmosphère dans les années soixante ainsi qu'aux retombées de l'accident de Tchernobyl. L'activité en ^{90}Sr est proche de 0.5 Bq/kg sur le plateau suisse, mais elle est plus élevée dans les régions au relief plus marqué et lorsque l'altitude augmente. Pour les échantillons de sol, les activités sont inférieures à 1 Bq/kg pour le plutonium et l'américium. Le niveau d'activité en ^{137}Cs est plus variable et dépend de la contribution de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl et peut atteindre 193 Bq/kg au Tessin et 20 Bq/kg à l'extrême nord-est de la Suisse, des régions qui ont été plus impactées par les retombées de l'accident, tandis que sur le plateau les valeurs mesurées sont autour de 5 à 10 Bq/kg. Au cours des années, on observe une diminution constante de ces activités.

Les variations observées dans les sols se reflètent au niveau des herbes, avec des activités en ^{90}Sr supérieures dans les herbes de montagne (jusqu'à 12.7 Bq/kg), ainsi qu'au Tessin (valeurs supérieures ^{90}Sr : env. 6 Bq/kg; ^{137}Cs : env. 4 Bq/kg). On observe également que la période de coupe (coupe de printemps, coupe d'automne) est responsable des différences observées dans les activités en ^{90}Sr pour un même site de prélèvement.

Introduction

Le ^{90}Sr et le ^{137}Cs ont été largement dispersés dans l'environnement suite aux essais nucléaires des années cinquante et 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 et les dents (voir chapitre 6.2). 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, mais sera éliminé des organismes beaucoup plus rapidement que le strontium.

Le transfert d'un radioélément entre deux compartiments de l'environnement, par exemple du sol à l'herbe, peut être caractérisé par le facteur de transfert. Ce paramètre est cependant dépendant de plusieurs facteurs, tels que la nature des compartiments (type de sol et espèce de la plante), la concentration des autres éléments compétiteurs (Ca et K) ainsi que la progression de la croissance de la plante, cette dernière étant notablement affectées par les conditions météorologiques (température, pluviosité) [1,2,3]. S'il est difficile de tirer des conclusions de données isolées d'activité, le suivi de son évolution dans le temps et sur plusieurs sites est plus simple à interpréter. Une augmentation du niveau de radioactivité peut être décelée dans un endroit déterminé par comparaison avec les résultats obtenus pour des sites de référence. Ces informations sont particulièrement utiles lors de la surveillance des opérations de démantèlement des installations nucléaires.

Résultats et discussion

Les résultats des mesures pour les sols sont présentés dans le Tableau 1. Les mesures de ^{137}Cs dans le sol montrent que ce radioélément est encore présent particulièrement dans les zones impactées de manière significative par l'accident de Tchernobyl. Ainsi la zone de la Suisse orientale (Arenenberg) présente encore une activité résiduelle de 22 Bq/kg de masse sèche, alors que les sols du reste du plateau suisse dépassent rarement les 10 Bq/kg. Au Tessin, le site de Stabio est particulièrement impacté par le ^{137}Cs de Tchernobyl et présente une activité de 194 Bq/kg. Le niveau d'activité mesuré à proximité des installations nucléaires est très proche de celui déterminé en Suisse romande (CERN et Posieux) et plus faible que celui des sites du nord-est et du Tessin.

Pour le ^{90}Sr , les variations annuelles sont plus importantes que pour le ^{137}Cs mais aucune différence n'est constatée entre les prélèvements effectués à proximités des installations nucléaires et ceux opérés sur les autres sites du plateau, avec une activité inférieure à 1 Bq/kg. Les sols alpins et un sol du Jura, hors Tessin, montrent une activité résiduelle en ^{90}Sr et ^{137}Cs dont l'origine peut être tracée aux essais nucléaires (voir Mürren, Gimmelwald, Fahrni et Diesse). On y mesure des activités qui peuvent atteindre 27 Bq/kg pour le ^{137}Cs et 3.3 Bq/kg pour le ^{90}Sr . Une étude réalisée en 2016 [4] a également mis en évidence la diminution d'activité de ces radioéléments sur ces sites de prélèvement, avec une période apparente de 19 à 26 ans pour le ^{137}Cs et 10 à 14 ans pour le ^{90}Sr . On remarque que la période effective du ^{137}Cs dépend du site de prélèvement. Cette observation a été également décrite pour des sols agricoles en France [5], avec des périodes effectives allant de 3.9 à 27.2 ans et une valeur moyenne de 10.5 ans.

Les activités en Pu et Am sont faibles et du même ordre de grandeur pour tous les sites sur le plateau suisse (valeur maximale en $^{239+240}\text{Pu}$ de 0.206 Bq/kg et en ^{241}Am de 0.088 Bq/kg). A altitude similaire, elles sont plus élevées au Tessin ($^{239+240}\text{Pu}$: 0.609 Bq/kg, ^{241}Am : 0.261 Bq/kg à Stabio); les valeurs augmentent avec l'altitude en montrant des activités légèrement plus importantes sur les sites BE (Mürren, Gimmelwald, Fahrni, Diesse; $^{239+240}\text{Pu}$ env. 0.5 - 1.0 Bq/kg, ^{241}Am env. 0.2 - 0.5 Bq/kg). Pour tous ces points de mesure, le rapport isotopique $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ est proche de 0.45, valeur attribuée aux retombées des essais nucléaires des années soixante.

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 , présent naturellement dans les sols, suivi du ^7Be , qui est formé par l'action du rayonnement solaire sur les couches supérieures de l'atmosphère. Les activités en ^{137}Cs sont présentées dans un intervalle de valeurs minimales et maximales alors que les activités en ^{90}Sr sont présentées de manière individuelle pour la coupe du printemps et celle d'automne. Toutes les activités mesurées pour le ^{137}Cs sont faibles et ne dépassent pas 2.5 Bq/kg, sauf pour le site de Prato Leventina, pour lequel le sol montre également l'activité en ^{137}Cs la plus élevée parmi nos mesures (4.1 Bq/kg).

L'activité en ^{90}Sr varie fortement selon la période de coupe pour un même site de prélèvement. Sur le plateau, le plus grand changement étant observé à Posieux (de 0.66 Bq/kg en été à 2.33 Bq/kg MS en automne), les valeurs observées pour les autres sites de plaine, y compris à proximité des centrales, étant comprises dans cette gamme. Ces différences observées dans l'activité en ^{90}Sr de l'herbe lors des coupes de printemps et d'automne a été déjà discutées précédemment et leur origine attribuée au métabolisme des végétaux qui influence de manière importante l'incorporation de certains éléments (Ca, K) et radioéléments (^{137}Cs et ^{90}Sr) en fonction des périodes de croissance végétale [3]. Pour le ^{90}Sr , l'activité moyenne annuelle sur le plateau est autour de 1 Bq/kg, alors que ces valeurs augmentent avec l'altitude en montrant des activités légèrement plus importantes sur les sites BE (Mürren, Gimmelwald, Fahrni et Diesse). L'activité en ^{90}Sr des herbes prélevées au Tessin se situe entre 3 et 6 Bq/kg.

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 2020 (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	427 ± 32	< 0.6	< 0.5	13.3 ± 1.0	0.36 ± 0.09	0.152 ± 0.010	0.070 ± 0.007
AG (KKB in-situ)	2	337 ± 24			8.2 ± 0.7			
AG (PSI)	1	391 ± 41	< 0.4	< 0.4	13.0 ± 1.4	0.27 ± 0.09	0.172 ± 0.013	0.078 ± 0.007
AG (PSI in-situ)	1	303 ± 31			7.4 ± 0.8			
AG (ZWILAG)	1	405 ± 44	< 0.8	< 0.7	10.5 ± 1.3	0.31 ± 0.11	0.163 ± 0.012	0.074 ± 0.007
AG (ZWILAG in-situ)	1	342 ± 35			7.4 ± 0.8			
AG (Vois. KKL)	4	398 ± 22	< 0.8	< 0.7	12.6 ± 0.8	0.62 ± 0.15	0.201 ± 0.021 m=2 ⁴⁾	0.084 ± 0.010 m=2 ⁴⁾
AG (KKL in-situ)	4	350 ± 18			9.0 ± 0.5			
AG/SO (Vois. KKG)	4	396 ± 22	< 0.8	< 0.7	9.8 ± 0.6	0.54 ± 0.13	0.206 ± 0.016	0.088 ± 0.007
AG/SO (KKG in-situ)	4	335 ± 17			7.1 ± 0.4			
BE (Voisinage KKM) ¹⁾	7	678 ± 27	< 0.7	< 0.6	8.0 ± 0.4	0.52 ± 0.12	0.164 ± 0.011	0.086 ± 0.007
BE (KKM in-situ) ¹⁾	7	514 ± 20			6.0 ± 0.3.0			
BE (Mürren) ²⁾	1	502 ± 42	< 0.2	< 0.3	27.2 ± 3.3	3.30 ± 0.40	1.070 ± 0.030	0.540 ± 0.030
BE (Gimmelwald)	1	296 ± 25	< 0.2	< 0.3	13.9 ± 1.7	2.50 ± 0.50	0.590 ± 0.020	0.290 ± 0.070
BE (Fahrni) ³⁾	1	440 ± 37	< 0.2	< 0.3	13.2 ± 1.6	2.60 ± 0.70	0.510 ± 0.020	0.290 ± 0.020
BE (Diesse/Jura)	1	275 ± 23	< 0.2	< 0.2	16.0 ± 1.9	1.30 ± 0.30	0.460 ± 0.010	0.220 ± 0.020
BL (Sissach)	1	569 ± 26		< 0.1	18.0 ± 0.9	4.44 ± 0.89		
FR (Posieux)	1	404 ± 43	< 0.7	< 0.7	5.4 ± 0.7	0.41 ± 0.12	0.194 ± 0.013	0.087 ± 0.008
FR (Posieux, in-situ)	1	342 ± 35			3.8 ± 0.6			
GE (Vois. CERN)	5	419 ± 20	< 0.7	< 0.6	7.5 ± 0.4	0.21 ± 0.08 m=2 ⁴⁾	0.145 ± 0.017	0.046 ± 0.005
GE (CERN in-situ)	5	409 ± 19			5.0 ± 0.3			
TG (Arenenberg)	1	404 ± 44	< 0.8	< 0.7	22.0 ± 2.4	0.38 ± 0.09	0.156 ± 0.017 m=3 ⁴⁾	0.070 ± 0.008 m=3 ⁴⁾
TG (Arenenberg in-situ)	1	332 ± 34			18.2 ± 1.9			
TG (Güttingen)	1	334 ± 36	< 0.6	< 0.5	16.4 ± 1.7	0.44 ± 0.10		
TG (Güttingen in-situ)	1	288 ± 29			12.1 ± 1.3			
TI (Centovalli) ⁵⁾	1	165 ± 13		< 0.3	157.5 ± 7.7	38.30 ± 7.70		
TI (Prato Leventina)	1	377 ± 20		< 0.2	11.9 ± 0.8	6.50 ± 1.40		
TI (Sessa)	1	644 ± 34		< 0.2	21.1 ± 1.1	12.0 ± 2.40		
TI (Cadenazzo)	1	613 ± 65	< 0.9	< 0.8	63.9 ± 6.5	0.88 ± 0.20	0.112 ± 0.014 m=3 ⁴⁾	0.049 ± 0.006 m=4 ⁴⁾
TI (Cadenazzo – In-situ)	1	606 ± 62			54.6 ± 5.6			
Ti (Caslano)	1	582 ± 61	< 0.6	< 0.5	80.3 ± 8.1	0.45 ± 0.11	0.096 ± 0.012 m=4 ⁴⁾	0.044 ± 0.006 m=4 ⁴⁾
Ti (Caslano – in-situ)	1	573 ± 58			49.9 ± 5.1			
TI (Stabio)	1	638 ± 67	< 0.7	< 0.7	193.9 ± 19.5	1.00 ± 0.21	0.609 ± 0.039 m=3 ⁴⁾	0.261 ± 0.019 m=3 ⁴⁾
TI (Stabio – In situ)	1	583 ± 60			136.1 ± 13.7			

n = nombre d'échantillons;

¹⁾ avec 3 nouveaux sites de collecte d'échantillons depuis 2017 pour la surveillance du démantèlement;

²⁾ alpage (Allmendhubel, 1'900 m);

³⁾ bord des alpes (850 m);

⁴⁾ m = moyenne pour m analyses, détails dans chapitre 7.2 plutonium et américium dans l'environnement;

⁵⁾ Echantillon n'était pas pris à l'endroit habituel mais dans une tourbière à proximité de la prairie.

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 2020 lors de deux saisons 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	192 ± 12	618 ± 35	< 0.9	< 0.8	1.3 ± 0.2	0.31 ± 0.08 ⁴⁾ 1.21 ± 0.27 ⁵⁾
AG (PSI)	2	304 ± 26	469 ± 37	< 1.1	< 0.9	0.6 ± 0.2	0.62 ± 0.13 ⁴⁾ 1.65 ± 0.34 ⁵⁾
AG (ZWILAG)	2	210 ± 19	692 ± 55	< 1.5	< 1.1	1.3 ± 0.2	0.48 ± 0.11 ⁴⁾ 0.91 ± 0.20 ⁵⁾
AG (Voisinage KKL)	8	215 ± 9	630 ± 26	< 1.3	< 1.2	1.3 ± 0.1	0.45 ± 0.10 ⁴⁾ 1.72 ± 0.34 ⁵⁾
AG/SO (Voisinage KKG)	8	191 ± 8	763 ± 31	< 1.4	< 1.1	0.8 ± 0.1	0.62 ± 0.14 ⁴⁾ 1.04 ± 0.21 ⁵⁾
BE (Voisinage KKM) ¹⁾	14	333 ± 11	802 ± 24	< 1.4	< 1.2	0.8 ± 0.1	0.63 ± 0.13 ⁴⁾ 1.09 ± 0.23 ⁵⁾
BE (Lauterbrunnen)	1	10 ± 2.13	480 ± 42	< 0.4	< 0.3	1 ± 0.2	2.3 ± 0.3
BE (Mürren) ²⁾	1	258 ± 41	590 ± 50	< 0.4	< 0.2	< 0.2	9.0 ± 0.9
BE (Gimmelwald)	1	242 ± 38	550 ± 49	< 0.4	< 0.2	0.3 ± 0.1	2.0 ± 0.2
BE (Fahrni) ³⁾	2	152 ± 20	1040 ± 63	< 0.5	< 0.3	0.3 ± 0.1	1.4 ± 0.2 1.8 ± 0.2
BE (Diesse/Jura)	2	124 ± 14	1470 ± 71	< 0.5	< 0.3	0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.1 1.1 ± 0.1
BL (Sissach)	1	105 ± 6	857 ± 43	-	< 0.1	< 0.1	1.12 ± 0.22
FR (Posieux)	2	115 ± 12	1097 ± 85	< 1.6	< 1.2	< 1.4	0.66 ± 0.14 ⁴⁾ 2.33 ± 0.46 ⁵⁾
GE (Voisinage CERN)	4	109 ± 8	653 ± 38	< 1.4	< 1.1	< 1.2	1.21 ± 0.24 ⁵⁾
TG (Güttingen)	2	242 ± 20	847 ± 64	< 1	< 0.8	< 0.8	0.42 ± 0.09 ⁴⁾ 0.73 ± 0.16 ⁵⁾
Ti (Centovalli)	1	44 ± 6	836 ± 45	-	< 0.3	1.0 ± 0.4	2.89 ± 0.58
Ti (Prato Leventina)	1	234 ± 16	851 ± 46		< 0.4	4.1 ± 0.7	3.73 ± 0.75
Ti (Sessa)	1	213 ± 12	876 ± 44	-	< 0.2	0.7 ± 0.2	5.93 ± 1.19
Ti (Cadenazzo)	2	350 ± 27	833 ± 64	< 1.1	< 0.9	1.8 ± 0.4	2.78 ± 0.56 ⁴⁾ 5.23 ± 1.02 ⁵⁾ 4.28 ± 0.84 ⁵⁾
Ti (Stabio)	1	235 ± 25	530 ± 57	< 0.5	< 0.7	2.2 ± 0.5	3.14 ± 0.62 ⁵⁾

n = nombre d'échantillons;

¹⁾ avec 3 nouveaux sites de collecte d'échantillons depuis 2017, programme renforcé pour la surveillance du démantèlement;

²⁾ alpage (Allmendhubel);

³⁾ bord des alpes, 850 m ;

⁴⁾ coupe de printemps;

⁵⁾ coupe d'automne.

Conclusions

Les résultats des mesures de ^{90}Sr et de ^{137}Cs dans les sols et les herbes en Suisse en 2020 indiquent des activités similaires aux années précédentes. Aucune augmentation significative 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 de plaine, centrales nucléaires incluses. L'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl est par contre encore responsable d'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.

Les différences observées dans l'activité en ^{90}Sr de l'herbe lors des coupes de printemps et d'automne peuvent atteindre un ordre de grandeur, ce qui montre qu'il ne faut pas nécessairement interpréter une augmentation d'activité de ce radionucléide dans ce compartiment spécifique comme une élévation parallèle de la radioactivité dans l'environnement.

Références

- [1] Ehlken, S., Kirchner, G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *J Environ Radioact.* 2002, 58, 97–112.
- [2] Guillaume, T. et al., Disparity in ^{90}Sr and ^{137}Cs uptake in Alpine plants: phylogenetic effect and Ca and K availability. *Plant Soil* 2012, 355, 29–39.
- [3] Froidevaux, P. et al., chap. 4.6 de «Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse», 2005, OFSP.
- [4] Corcho-Alvarado, J. A. et al., Long-term behavior of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the environment: Case studies in Switzerland. *J. Environ. Radioact.* 2016, 160, 54–63.
- [5] Roussel-Debel, S. et al., ^{137}Cs in French soils: Deposition patterns and 15-year evolution. *Sci. Total Environ.* 2007, 388–398.

2020

Chapitre Kapitel 5

Radioactivité dans
l'alimentation

Radioaktivität in
Lebensmitteln

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

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

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 2020 rund 270 Lebensmittelproben aus der Schweiz (ohne Spezialkampagnen für Wildschweine) sowie 125 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. Überschreitungen des Grenzwertes für ^{137}Cs wurden in einigen Wildschweinen aus der Jagd in den Kantonen Tessin und Graubünden festgestellt. 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 Gammaskopie 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-herstellender 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), die 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

2020 wurden 142 Milchproben gammaspektrometrisch analysiert. Für ^{137}Cs waren die meisten Werte unterhalb der Nachweisgrenze, die zwischen

0.02 Bq/l und 1 Bq/l lag. Der höchste Wert wurde bei einer Probe aus dem Centovalli festgestellt (15.8 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 2020 in keiner Milchprobe nachgewiesen werden (Nachweisgrenze: <2 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 ^c	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 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 getrocknete 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 H-3, Rn-222 und kurzlebige Radonfolgeprodukte).

Das KL BS, das IRA in Lausanne und das LABOR SPIEZ untersuchten insgesamt 67 Milchproben auf ^{90}Sr . Alle gemessenen Werte waren sehr tief mit einem Maximum von 0.2 Bq/l und einem Median von 0.03 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 19 Getreideproben und 24 Gemüse- und Obstproben aus der Schweiz konnte in einer einzigen Getreideprobe Spuren von ^{137}Cs erkannt werden (Messwert 0.2 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 festgestellten 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 ($n=18$), 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 0.03 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 4.1). 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 2020 ergaben Tritiumkonzentrationen (^3H) von 7 - 221 Bq/l im Destillat (12 Proben; Mittelwert: 55 Bq/l). Die ebenfalls leicht erhöhte ^3H -Aktivität der Milch aus der Umgebung des genannten Betriebes (5 - 11.4 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 feststellen, 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 2020 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 52 von 957 untersuchten Tieren der Fall. Das entspricht wie in den letzten Jahren einer Quote von ca. 5%. Achtundvierzig der Positivbefunde wurden im Labor nachgemessen. Mit zwei Ausnahmen lagen alle Werte über dem Grenzwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg für ^{137}Cs in Wildtieren. Die Ergebnisse im Bereich von 167 bis maximal 6'890 Bq/kg zeigen, dass die Triagemessungen auch Werte über dem Grenzwert zuverlässig erfassen und dass die Rate der falschen Positiven klein ist. Im Kanton Graubünden (südliche Täler) wurde 2020 vom Kantonstierarzt eine ähnliche Kampagne durchgeführt. Kontrollmessungen im Radioaktivitäts-Labor KL GR zeigten in knapp einem Drittel der rund 40 Proben Werte über dem Grenzwert. Das Maximum lag hier bei 5'150 Bq/kg.

Andere Lebensmittel aus der Schweiz

In den 5 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. Keine der 4 untersuchten Fischproben enthielt messbares $^{239+240}\text{Pu}$ oder ^{241}Am . 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.

Neben den schon erwähnten Wildschweinen wurden 37 weitere Wildproben (Hirsch, Reh, Gämse) auf ^{137}Cs untersucht. Mit einem Maximum von 186 Bq/kg Frischgewicht (Mittelwert 25 Bq/kg, Median 16 Bq/kg) war der Grenzwert aus der Tschernobylverordnung hier aber überall eingehalten.

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 125 importierte Lebensmittel geprüft.

Für Proben aus Japan besteht in der Schweiz - gleich wie in der Europäischen Union - seit dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi ein Programm zur Kontrolle beim Import. Das KLBS untersuchte im Berichtsjahr 26 Proben aus Japan (Tee, Sojasaucen, und Seegemüse) auf Gammastrahler. Vier der untersuchten Produkte enthielten Spuren von ^{137}Cs . Der Mittelwert aller Positivproben betrug 0.4 ± 0.3 Bq/kg. Das kurzlebige Isotop ^{134}Cs war in keinem Produkt nachweisbar (<0.5 Bq/kg). ^{90}Sr wurde in 8 der 26 Proben detektiert mit einem Maximalwert von 0.92 ± 0.45 Bq/kg in einer Grünteeprobe. Elf von 26 vom KLBS untersuchte Fische (Import) erwiesen sich als leicht mit ^{137}Cs kontaminiert. Der Mittelwert der gemessenen Aktivitätskonzentrationen für ^{137}Cs lag bei 0.23 ± 0.12 Bq/kg mit einer maximalen Konzentration von 0.49 ± 0.16 Bq/kg in einer Makrele. In keiner der Proben wurde das kurzlebige ^{134}Cs nachgewiesen. Rückstände von ^{90}Sr wurde in 23 der 26 Fische detektiert mit einem Mittelwert von 0.23 ± 0.12 Bq/kg und einer Maximalkonzentration von 0.79 ± 0.16 in einem Lachs. Es wurde kein Zusammenhang zwischen der Art des Fisches und dem Nachweis von künstlichen Radionukliden festgestellt. Weiter untersuchte das KLBS 40 importierte Gewürze. In keiner Probe konnte ^{134}Cs oder ^{137}Cs nachgewiesen werden.

In 34 Gewürzproben konnte ein oder mehrere Thoriumnuklide nachgewiesen werden. Die maximale Konzentration lag bei 16 Bq/kg ^{228}Th in einem Pfeffer. In 35 Proben konnte ^{210}Po mit einem Höchstwert von 12 Bq/kg in einer Gewürzmischung nachgewiesen werden.

Das KLBS untersuchte ebenfalls 13 Proben von Säuglingsnahrung (10 importierte Proben plus 3 Proben aus der Schweiz). In jeder der 13 Proben konnte ^{90}Sr nachgewiesen werden, mit einem Maximalwert von 0.17 ± 0.03 Bq/kg in einer Probe, die in der Schweiz produziert wurde. In drei der 13 Proben konnte ^{137}Cs nachgewiesen werden, mit einem Maximalwert von 2.1 ± 0.03 Bq/kg in einer Probe, die in Kroatien produziert wurde.

Elf vornehmlich aus Osteuropa stammende, vom KLZH analysierte Proben importierter Pilze enthielten im Durchschnitt 16 Bq ^{137}Cs pro kg Frischmasse mit einem Streubereich von <1 bis 76 Bq/kg. Für getrocknete Pilze wurde der Rekonstitutionsfaktor von 5 angewendet, der für Importe aus Fukushima gilt. Zusätzlich untersuchte das KLZH 9 Pilze in Konserven, ebenfalls zum grossen Teil aus Osteuropa. Hier betrug der Höchstwert 2 Bq/kg.

Bewertung und Interpretation

Der Grenzwert für ^{137}Cs der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg) wurde 2020 von 50 Wildschweinproben (Maximum 6'890 Bq/kg) aus der Schweiz überschritten. Bezogen auf die Gesamtzahl untersuchter Proben machen diese Grenzwertüberschreitungen wie in den letzten Jahren ca. 5% aus. Das untersuchte Wildschweinfleisch aus der Jagd ist im Allgemeinen nicht für den Markt bestimmt. Tiere mit ^{137}Cs Gehalten über dem Grenzwert werden konfisziert. Bei anderen Wildproben aus der Schweiz war der Grenzwert stets eingehalten (Mittelwert 25 Bq/kg). Wie erwartet wurden auch in importierten Pilzproben etwas erhöhte ^{137}Cs Werte gemessen (Maximum 76 Bq/kg). Ebenfalls erwartet war die leicht erhöhte Konzentration von ^{137}Cs in einer der Milchproben aus dem Tessin und den Bündner Südtälern (15.8 Bq/l, d.h. wenig über dem Parameterwert für Trinkwasser). Dies ist immer noch eine Folge der Kontamination nach dem Unfall in Tschernobyl. Bei allen anderen Lebensmitteln aus der Schweiz und importierten Lebensmitteln sind die Konzentrationen von künstlichen Radionukliden sehr tief.

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.

2020

Chapitre
Kapitel
6

Radioactivité dans
le corps humain

Radioaktivität
im Menschen

Vertèbres et dents de lait

Wirbelknochen und Milchzähne

6.1

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

P. Froidevaux, P.-A. Pittet, C. Pilloud, F. Barraud, L. Pfefferlé, 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. Cette année, il a été très difficile de prélever des vertèbres dans les instituts de pathologie, car la plupart des autopsies réalisées par ces institutions concernaient des contaminations Covid-19. Nous avons donc analysé le ^{90}Sr dans sept échantillons de vertèbres de cas en attente prélevés vers octobre 2019 et mesurés courant 2020, auxquels nous avons joint quatre cas du Tessin prélevés durant 2020. L'institut de pathologie de Lausanne n'ayant prélevé que trop peu de matériel, les analyses ont porté sur des mesures de ^{210}Po (2x) et de ^{226}Ra (2x), qui nécessitent moins de masse que les analyses de ^{90}Sr . Seuls quatre analyses ont pu être réalisées sur les dents-de-lait, ici également à cause de la forte diminution du nombre de dents récoltées année après année.

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 18 mBq/g Ca dans ces deux types d'échantillons. Les activités en ^{210}Po sont situées entre 10.4 et 27.9 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 29 mBq/g Ca). Les activités en ^{226}Ra sont situées entre 0.7 et 1.3 mBq/g Ca et sont incluses dans la partie basse des valeurs obtenues les années précédentes (moyenne à 1.81 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

L'IRA, sur mandat de l'OFSP, mesure depuis les années soixante le ^{90}Sr dans les vertèbres humaines prélevées lors d'autopsies. Le ^{90}Sr étant un indicateur de la fission nucléaire, il est important de le mesurer dans différents compartiments de l'environnement, de la chaîne alimentaire et de l'homme. 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 plusieurs années déjà,

nous mesurons également le ^{210}Po , un produit issu de la chaîne de désintégration de ^{238}U . 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 $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ va être incorporé dans l'organisme humain par inhalation des produits de filiation du gaz ^{222}Rn présent dans l'air. Une contribution supplémentaire provient également de l'inhalation de fumées de tabac. 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 , ^{226}Ra , qui est un cation alcalino-terreux similaire au calcium, va également cibler spécifiquement la masse osseuse. 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.

Cette année, il a été presque impossible de prélever des vertèbres dans les instituts de pathologie du Tessin et de Lausanne, car la majorité des cas autopsiés présentaient des contaminations au Covid-19. Nous n'avons pas la possibilité de traiter des échantillons biologiques contaminés par des bactéries ou des virus dans notre laboratoire. Nous avons donc déterminé l'activité en ^{90}Sr , qui nécessite au moins 10 g de cendres d'os, dans 6 cas prélevés au Tessin et un cas prélevé dans le canton de Vaud à la fin 2019 (donc non contaminés). Considérant la vitesse de renouvellement biologique de la masse osseuse des vertèbres, équivalent à environ 2 ans, ces cas représentent assez bien la situation 2020, sachant que nous n'avons pas observé de contamination environnementale au ^{90}Sr durant cette période. L'institut de pathologie de Lausanne a pu nous fournir également quatre cas non Covid-19 en 2020, mais malheureusement avec une masse insuffisante pour mesurer le ^{90}Sr . Nous avons donc consacré ces cas à la mesure de ^{210}Po (2x) et ^{226}Ra (2x). L'institut de pathologie de Locarno a pu nous fournir en 2020 quatre cas non Covid-19. Dans deux cas, le ^{226}Ra a également été mesuré. Dans ce rapport, nous reportons également la mesure en ^{90}Sr des dents de lait d'une personne née en 2004 et ayant vécu son enfance dans le canton de Vaud. Toutes les dents de lait ont été conservées indépendamment par ses parents, ce qui permet la mesure d'un cas individuel, au moins dix dents étant nécessaires à l'analyse.

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].

Tableau 1: ^{90}Sr (mBq/g Ca) et ^{210}Po (mBq/g Ca) dans les vertèbres de personnes décédées en Suisse en 2019 et en 2020. Incertitudes pour u (95%).

Année décès	Lieu décès	^{90}Sr (mBq/g Ca)	^{210}Po (mBq/g Ca)
2019	Vaud	8.5 ± 2.2	
	Tessin	7.2 ± 2.5	
		5.4 ± 1.5	
		9.0 ± 2.3	
		15.7 ± 3.9	
		6.7 ± 2.2	
		6.0 ± 1.8	
2020	Tessin	7.0 ± 1.8	
		4.6 ± 1.2	
		12.4 ± 2.9	
		9.2 ± 2.6	
	Vaud		27.9 ± 2.4
			10.4 ± 1.0
Moyenne ± écart-type		8.5 ± 3.2 (n=10)	

Tableau 2: ^{90}Sr (mBq/g Ca) dans les dents de lait d'enfants nés en Suisse entre 2004 et 2007 et mesurées en 2020. 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		^{90}Sr (mBq/g Ca)
	Année(s) d'extraction	Lieu	
2005	2018 - 2020	Zürich	17.3 ± 2.4
2006	2018 - 2020	Zürich	11.4 ± 2.4
2007	2018 - 2020	Zürich	11.0 ± 2.3
2004	a)	Vaud	17.5 ± 5.4 ^{b)}

^{a)} Dents provenant d'un seul enfant né en 2004, extraites durant toute l'enfance et conservées pour être analysées.

^{b)} La valeur de référence de notre base de données pour l'année 2004 est de 13 mBq/g Ca.

Tableau 3: ^{226}Ra (mBq/g Ca) dans les vertèbres de personnes décédées en Suisse en 2020 et mesurées la même année. Incertitudes pour u (95%).

Année décès	Lieu décès	Type	^{226}Ra (mBq/g Ca)
2020	Vaud	vertèbre	0.7 ± 0.3
	Vaud	vertèbre	1.3 ± 0.2
	Tessin	vertèbre	1.2 ± 0.3
	Tessin	vertèbre	0.7 ± 0.2

Résultats et discussion

Les analyses de ^{90}Sr dans les vertèbres humaines n'ont pas montré de valeurs anormales (Tableau 1), et l'activité de ^{90}Sr continue de décroître avec une période biologique d'environ 13 ans, depuis la fin des essais d'armes atomiques dans l'atmosphère des années soixante [5, 6]. En 2020, l'activité moyenne en ^{90}Sr des vertèbres humaines en Suisse était de 8.5 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 82 cas, pour une moyenne à 29.0 mBq/g Ca et un écart-type à 22 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 par inhalation des produits de combustion du tabac contenant ces deux radioéléments, dans le cadre d'un projet de l'OFSP visant à évaluer les doses de rayonnement dues au tabagisme.

Le programme de mesure de ^{90}Sr dans les dents de lait touche probablement à sa fin, car il nous est de plus en plus difficile d'obtenir des tailles d'échantillons suffisantes pour des analyses au niveau d'activité actuelle (< 18 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 l'activité depuis la fin des essais nucléaires en atmosphère, également avec une période biologique d'environ 10 ans [7].

L'OFSP a initié un programme d'assainissement des bâtiments contenant du ^{226}Ra , issu de l'utilisation de peinture au ^{226}Ra par l'industrie horlogère. 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 37 cas, pour une moyenne à 1.73 mBq/g Ca. La valeur minimale est à 0.70 mBq/g Ca et la valeur maximale à 4.58 mBq/g Ca. L'histogramme de la distribution des valeurs (Figure 1) ne montre pas de singularité, avec plus de 85% des valeurs distribuées entre 0.7 et 3.0 mBq/g Ca.

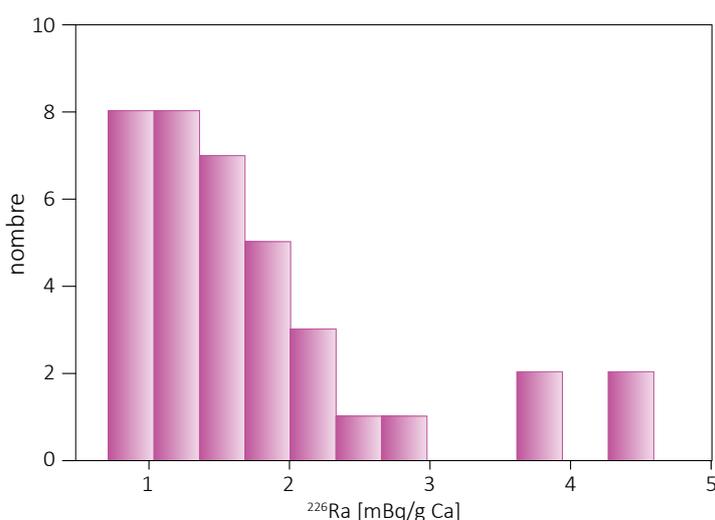


Figure 1 :
Histogramme des valeurs en ^{226}Ra (mBq/g Ca) pour 37 analyses réalisées dans les vertèbres et os cortical prélevés en Suisse entre 2014 et 2020.

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 2020, les activités mesurées (Tableau 3) étaient parfaitement incluses dans l'intervalle des mesures réalisées jusque-là et n'ont pas montré d'exposition au ^{226}Ra autre que par une source naturelle.

Conclusions

Les mesures de radioactivité dans les vertèbres humaines en 2020 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 le plus complexe lorsqu'il s'agit de l'humain. La disponibilité d'échantillons étant restreinte, il est important de pouvoir extraire un maximum d'informations à partir de ces échantillons.

La constitution de bases de données statistiquement représentatives de l'exposition naturelle de la population suisse à ces radioéléments doit permettre la prise de position rapide lors 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.

2020

Chapitre Kapitel 7

Mesures de
nucléides spéciaux

Messung von
Spezialnukliden

Carbone-14, Krypton-85, Argon-37

Plutonium et Américium

Isotopes du plutonium et ^{236}U dans des
échantillons de glace du glacier du Gauli

Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37

Plutonium und Americium

Plutoniumisotopen und ^{236}U in Eisproben des
Gauligletschers

7.1

Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37

Th. Stocker, R. Purtschert, P. Düring und T. Wagner

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

S. Szidat, C. Espic

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

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

Bundesamt für Strahlenschutz, Rosastrasse 9, Freiburg im Breisgau

M. Heule

Paul Scherrer Institut, Villigen PSI

Zusammenfassung

Die Messungen des Gehalts an Kohlenstoff-14 (^{14}C) im Laub von Bäumen aus der Umgebung von Kernkraftwerken (Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg), Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA Bern), des Paul Scherrer Instituts und an verschiedenen Standorten der Stadt Basel wurden 2020 weitergeführt. Als Referenzwert diente hierbei der ^{14}C -Gehalt von Laubbäumen an drei Standorten ohne lokale ^{14}C -Quellen und Verdünnungen, an denen im Jahresverlauf je drei Messungen (im Mai, Juli und Oktober 2020) durchgeführt wurden. Aus diesen neun Messungen resultierte für 2020 der $\Delta^{14}\text{C}$ -Referenzwert $-1 \pm 3\text{‰}$.

Die 84 auf ^{14}C untersuchten Standorte unterscheiden sich um -24‰ (W-42, Basel Rosental Strassenseite) bis maximal $+99\text{‰}$ (Kernkraftwerk Leibstadt, Fullerfeld) von diesem Referenzwert. In der Stadt Basel lagen die Höchstwerte bei 5‰ (E-8A, Stücki-Steg) bzw. 1‰ (W-06, Voltaplatz). Selbst die Maximalwerte entsprechen einer zusätzlichen Strahlendosis für die Bevölkerung von nicht mehr als $1\text{ }\mu\text{Sv}$ ($1\text{ }\mu\text{Sv} = 10^{-6}$ Sievert) in einem Jahr. Im Vergleich zur natürlichen Strahlenbelastung von ca. $4'000\text{ }\mu\text{Sv/a}$ 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 und Biochemie.

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. In diesem Jahr hat dieser Gehalt zum ersten Mal den als Basis für die Radiocarbonatierung 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 $^{14}\text{C}_2$ 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 Basel) und -Verdünnungen (KVA, Industrie, Autobahnen) 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:

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

Tabelle 1:

Messwerte 2020 und Koordinaten der Referenzstationen für Laubmessungen

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

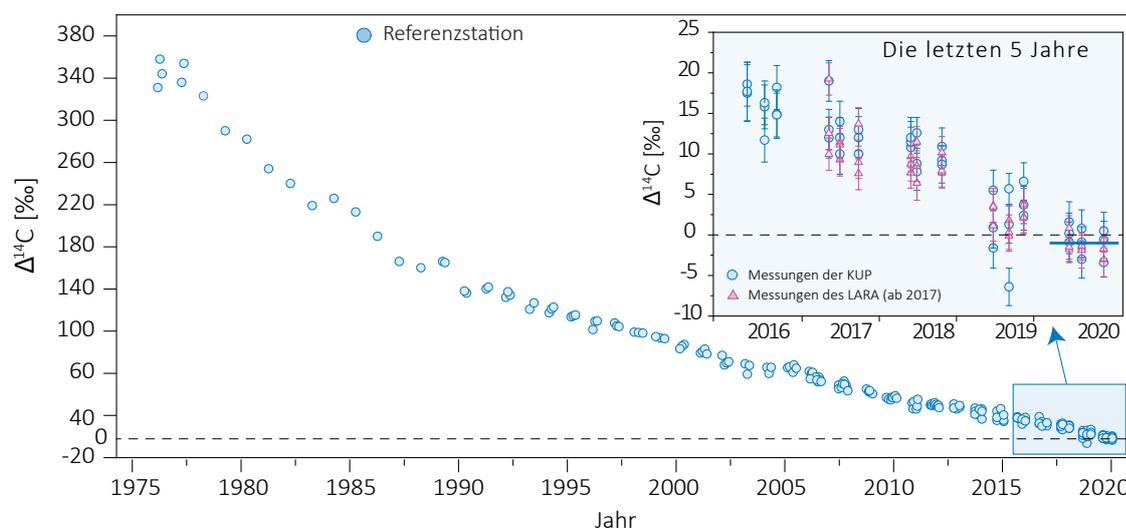
Sinnvoll ist auch ein Vergleich mit ^{14}C -Werten von Laub, welches von Bäumen ohne lokale ^{14}C -Quellen oder -Verdünnungen stammt. Zu diesem Zweck wurden an drei ländlichen Standorten Buchen- bzw. Lindenblätter gesammelt. Ihr ^{14}C -Gehalt wurde bestimmt und nach (2) mit $^{14}\text{A}_0$ verglichen (Figur 1). Aus den resultierenden $\Delta^{14}\text{C}$ -Werten wurde für die Zeit der Hauptprobenahmen 2020 ein Referenzwert für Laub in ungestörter Umgebung definiert. Als Basis hierzu dienten die im Juni, August und Oktober gesammelten Blätter.

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref, 2020}} = -1 \pm 3 [\text{‰}] \quad (3)$$

Die Differenz

$$\text{Netto } \Delta^{14}\text{C} = \Delta^{14}\text{C}_{\text{Probe}} - \Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref, 2020}} \quad (4)$$

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 in der Detailsicht (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 an der Blattkohle (Methode A) im Vergleich zu Messungen am ganzen Blatt (Methode B) Unterschiede von weniger als 4%. An belasteten Standorten können die Unterschiede zwischen den Resultaten der nach den Methoden A und B aufbereiteten Proben jedoch grösser sein.

Bei der Messung am ganzen Blatt wird der gesamte Kohlenstoff erfasst. Diese zwar zeitaufwändigere, aber potenziell genauere Methode B wird vom Radiocarbon-Labor der KUP in der Regel nur für Proben von Standorten verwendet, die in den Vorjahren deutlich höhere Werte zeigten bzw. bei denen ein erhöhtes Interesse am Fortführen der bestehenden Zeitreihen besteht.

Das LARA am Departement für Chemie und Biochemie der Universität Bern 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 2020 gegenüber dem Vorjahr erneut abgefallen. Mit $-1 \pm 3\%$ (gerundeter Mittelwert aller in Tabelle 1 dargestellten Messergebnisse) liegt der Referenzwert um 3% unter dem Wert von 2019.

^{14}C im Umfeld der Schweizer Kernkraftwerke

Gemäss Jahresrückblick des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI [1] wurden die Schweizer Kernkraftwerke im Jahr 2020 sicher betrieben, wobei die Anzahl der meldepflichtigen Vorkommnisse etwas unter dem Durchschnitt der Vorjahre lag.

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 Kernkraftwerkes werden aber auch während des Rückbaus noch einige Jahre fortgesetzt.

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

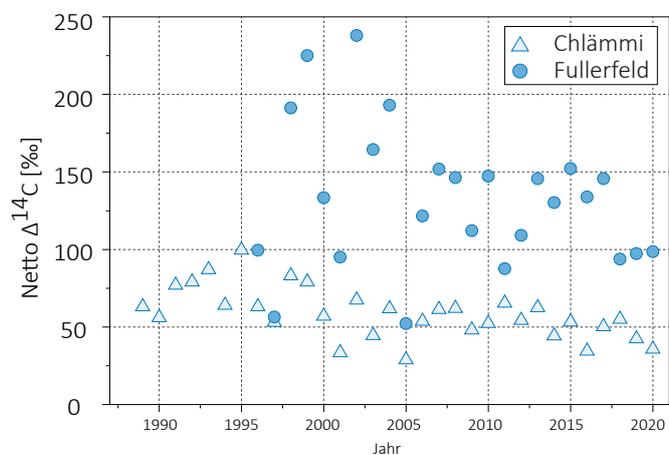
Die Laubprobenahmen im Umfeld der noch im Leistungsbetrieb befindlichen Kernkraftwerke erfolgten im Allgemeinen während oder nach der jeweiligen Jahresrevision, um auch mögliche ^{14}C -Abgaben während des Revisionsstillstands erfassen zu können. Die Messungen erfolgten im Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff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

Kernkraftwerk Leibstadt

Die Probenahme im Umkreis des Kernkraftwerkes Leibstadt (KKL) erfolgte am 04. August 2020 gegen Ende des vom 29. Juni bis 10. August 2020 terminierten Revisionsstillstands. Es wurden Blätter von Laubbäumen an verschiedenen Standorten in beiden Hauptwindrichtungen gesammelt und auf ihren ^{14}C -Gehalt hin untersucht.



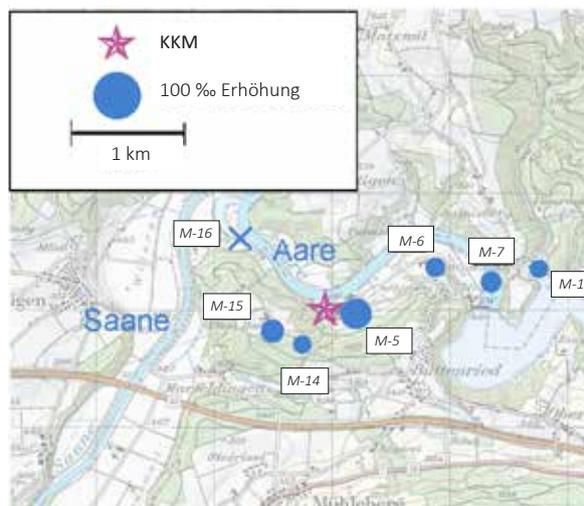
Figur 2: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Leibstadt (KKL) im Jahr 2020. Revisionsabschaltung: 29.06.2020 bis 10.08.2020. Probenahme: 04.08.2020. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



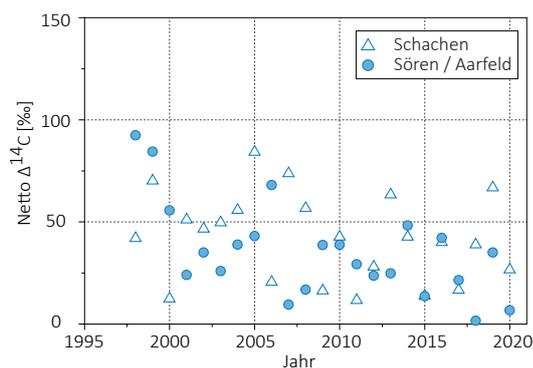
Figur 3: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte nordöstlich (●) und südwestlich (△) des Kernkraftwerkes Leibstadt. Der Standort Fullerfeld wird seit 1996, derjenige von Chlämmi seit 1989 beprobt (Standorte: siehe Figur 2). Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.



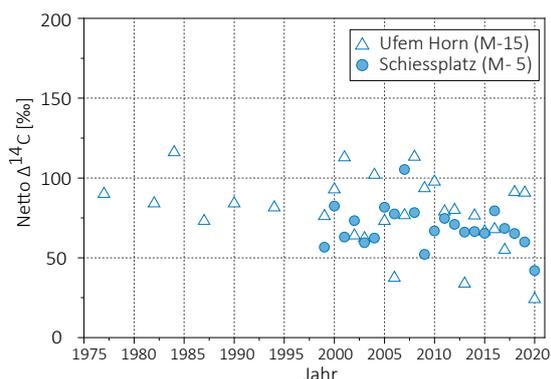
Figur 4: Örtliche Verteilung der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Druckwasserreaktors Gösgen (KKG). Revisionsabschaltung: 06.06.2020 bis 24.06.2020. Probenahme: 24.06.2020. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



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 Messbeginn. Standorte: siehe Figur 6. Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.

Dabei wurden die z. T. seit 1984 geführten Zeitreihen fortgesetzt. Die höchste ^{14}C -Konzentration ergab sich wiederum in ca. 1'000 m Distanz vom KKL in nordöstlicher Richtung am Standort Fullerfeld (Figur 2). In südwestlicher Richtung wies der Standort Chlämme die höchsten Werte auf.

Figur 3 zeigt die gemessenen Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte der Standorte Fullerfeld und Chlämme seit Messbeginn. Es sind dies die beiden Standorte mit den traditionell höchsten Werten in der jeweiligen Windrichtung. 2020 lag der höchste Messwert nordwestlich des KKL bei 99% (Standort Fullerfeld). In südwestlicher Richtung wurde 2020 am Standort Chlämme mit 37% 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 24. Juni 2020 gesammelten Blattproben in der Umgebung des Kernkraftwerkes Gösgen (KKG) dargestellt. Die Messwerte liegen deutlich unter den langjährigen Mittelwerten. Der höchste ^{14}C -Messwert resultierte in diesem Jahr mit einer Erhöhung von ca. 28% am Standort Schachen.

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

Kernkraftwerk Mühleberg

Im Sommer 2020 wurden im Umfeld des mittlerweile ausser Betrieb genommenen Kernkraftwerks Mühleberg (KKM) zwei separate Probenahmen durchgeführt, um zu prüfen, wie sich die Ausserbetriebnahme des KKM auf den ^{14}C -Gehalt des Laubs im Verlauf des Sommers auswirken würde. Die erste Probenahme fand am 14. Mai 2020, die zweite am 10. September 2020 statt. Die zweite Probenahme führte an den meisten Standorten zu etwas niedrigeren Messwerten.

In Figur 6 sind die Ergebnisse der ersten Probenahme dargestellt. Die grösste Erhöhung wurde mit 43‰ am Standort M-5 (Schiessplatz) gemessen. Sämtliche im Jahr 2020 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 2020 liegen unter dem langjährigen Mittel.

Messreihe Ufem Horn

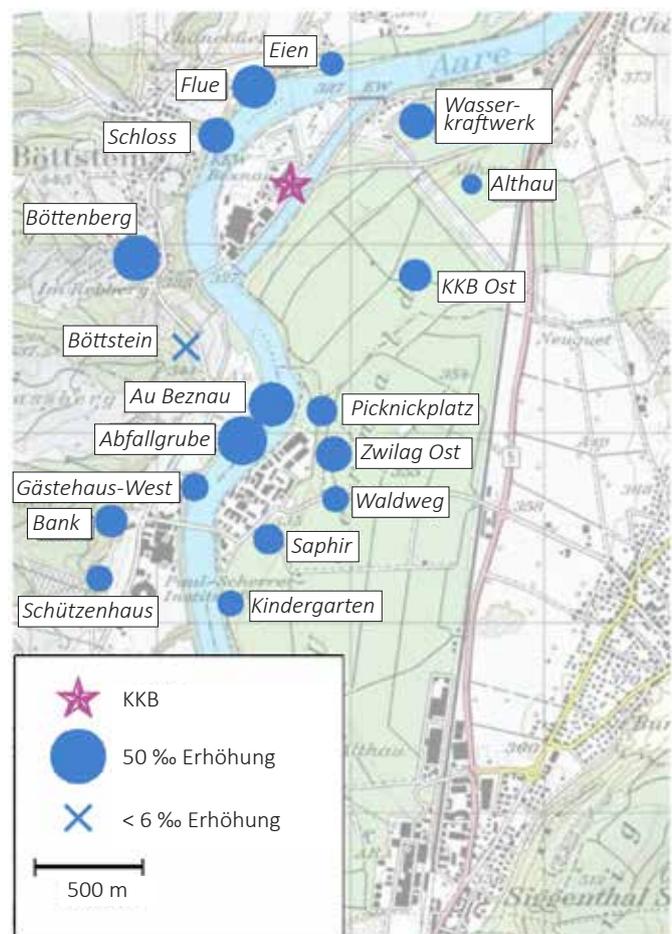
Zusätzlich zu den oben aufgeführten Messungen im Umkreis des KKM wurden von der KUP sechs Monatsproben vom Standort Ufem Horn gemessen, an dem in der Vergangenheit die höchsten Messwerte aufgetreten sind. Die erste Probenahme erfolgte am 15. Mai 2020, die letzte am 08. Oktober 2020. Sämtliche Messwerte lagen im Bereich zwischen 22‰ und 27‰ in guter Übereinstimmung mit den beiden Messungen des LARA (24‰ bzw. 26‰).

Der ^{14}C -Gehalt der beprobten Bäume scheint sich also nach der Einstellung des Leistungsbetriebs relativ rasch auf das Niveau von unbelasteten Standorten zuzubewegen.

Paul Scherrer Institut, Zentrales Zwischenlager Würenlingen, Kernkraftwerk Beznau

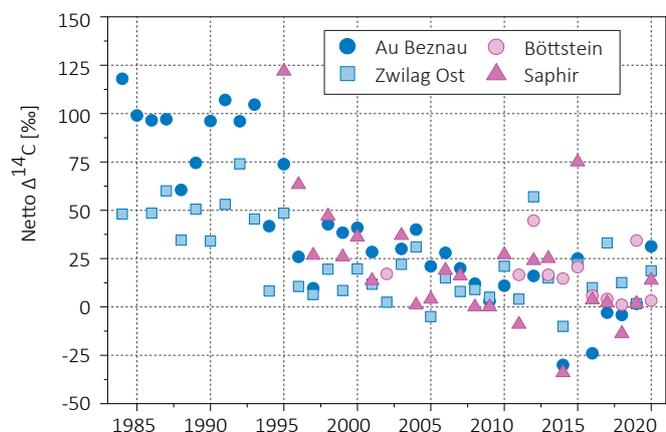
Erstmals wurden die zu diesen Standorten gehörenden ^{14}C -Messungen vollumfänglich im Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff mit AMS (LARA) des Departements für Chemie und Biochemie der Universität Bern durchgeführt. Die Messwerte im Umfeld des PSI und Zwiilag lagen im Jahr 2020 deutlich über den Werten aus den Vorjahren, welche vom PSI gemessen wurden.

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 (ZWIILAG) und des Kernkraftwerkes Beznau (KKB) im Jahr 2020. Revisionsabschaltung KKB I: 17.04.2020 bis 23.05.2020, KKB II: 08.08.2020 bis 18.08.2020. Probenahme: 05.05.2020 (PSI und Zwiilag) bzw. 04.08.2020 (KKB). Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



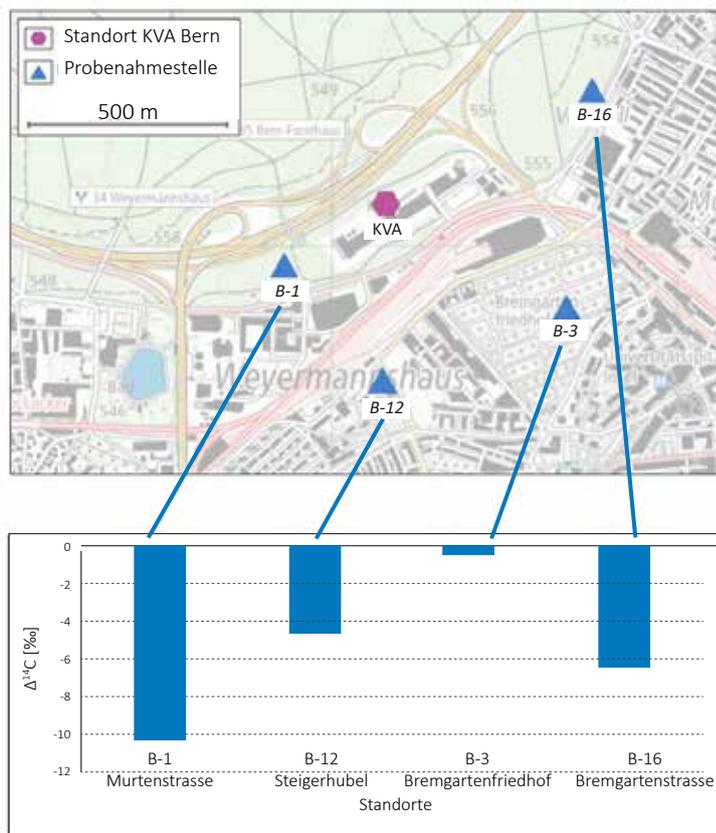
Figur 9:

Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (■▲) und westlich (●●) des PSI/ZWIILAG sowie des Kernkraftwerkes Beznau seit Messbeginn. Standorte: siehe Figur 10. Messungen bis 2016: KUP (Standort Böttstein) und PSI. Messungen ab 2017: LARA (Standort Böttstein) und PSI.

Kehrichtverbrennungsanlagen

In Blättern von Bäumen, die am 27. August 2020 an vier Probenahmestellen im Umfeld der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) Bern Forsthaus gesammelt wurden, konnte keine erhöhte ^{14}C Konzentration festgestellt werden. Sämtliche Messpunkte wiesen Werte auf, die unter dem Referenzwert von -1% lagen. Im Gegensatz zu Blättern, die im Umfeld der Kernkraftwerke gesammelt wurden, findet hier 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 10 sind oben die vier Probenahmestellen und darunter die entsprechenden Messwerte als Verdünnung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen dargestellt.



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

Messungen in der Region Basel-Stadt

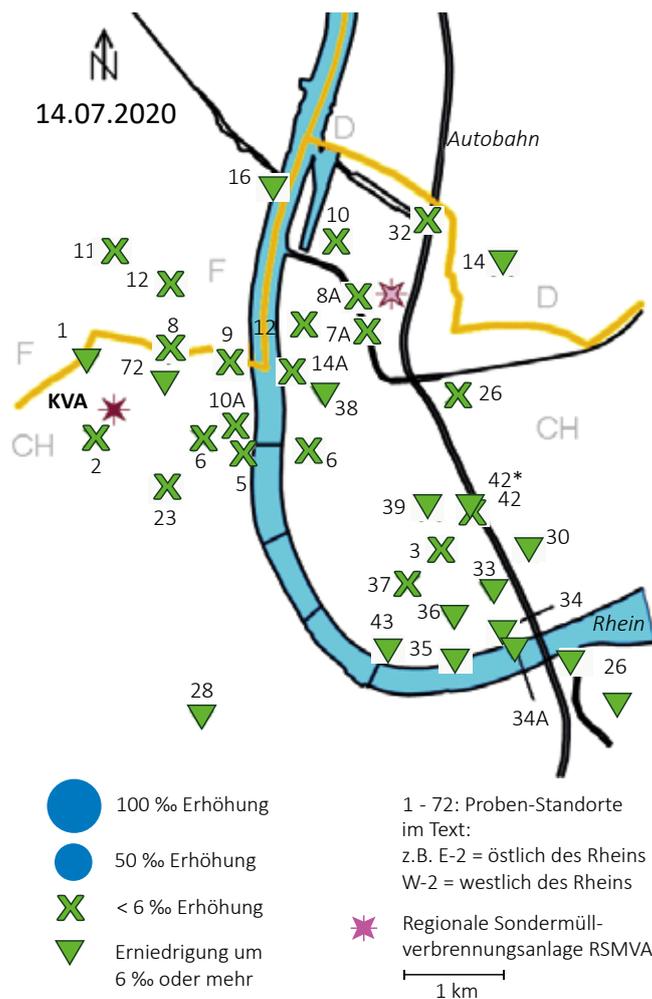
Auch im Jahr 2020 wurden drei Laubprobenahmen in Basel durchgeführt, wobei die Hauptprobenahme im Juli stattfand. Im Westen des Stadtgebiets befinden sich die Standorte im und um das Novartis-Werk St. Johann, im Osten diejenigen um das Areal der Firma F. Hoffmann-La Roche, ganz im Norden diejenigen um das Areal der von der Firma Veolia betriebenen regionalen Sondermüllverwertungsanlage (RSMVA). Die höchsten am 14.07.2020 gemessenen Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte betragen westlich des Rheins 1% (Votaplatz, Standort W-06) und östlich 5% (Stücki-Steg, Standort E-7A). An praktisch allen anderen 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 6% oder mehr (Figur 11, Symbol ▼).

Auch im französischen und deutschen Grenzgebiet nördlich des Novartis-Werks St. Johann bzw. östlich des RSMVA-Verbrennungsofens wurden keine Erhöhungen registriert.

An einigen Standorten wurden Messungen sowohl in der Blattkohle als auch an unverkohltten ganzen Blättern durchgeführt. Die Vergleichswerte sind in Tabelle 2 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.

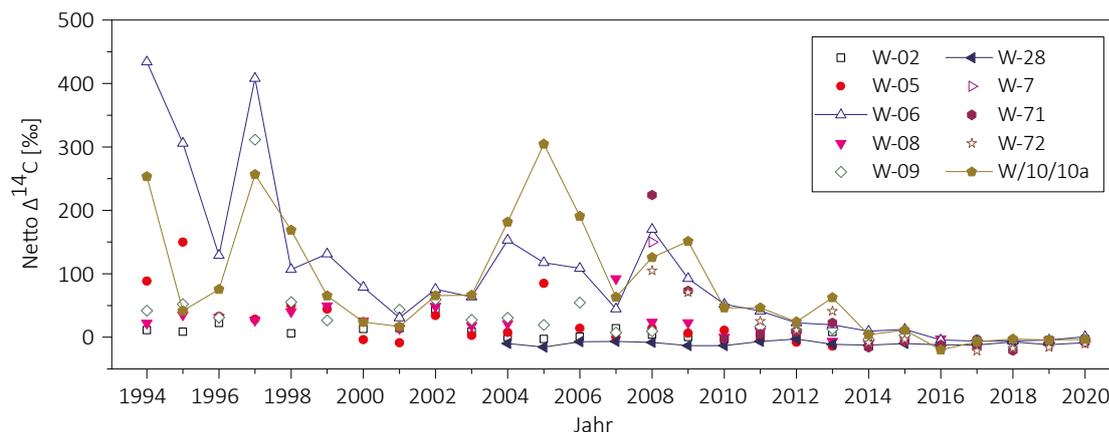
Der Rückgang der ^{14}C -Werte gegenüber früheren Jahren ist darauf zurückzuführen, dass Novartis das benötigte ^{14}C zunehmend von externen Zulieferern bezieht. Im Falle der F. Hoffmann-La Roche AG ist der Rückgang mit durchschnittlich deutlich geringeren Anfangsaktivitäten bei den Synthesen zu erklären. Westlich des Rheins wurden die historischen Netto-Höchstwerte (Standorte W-06 und W-10) bereits seit einigen Jahren nicht mehr erreicht. Dasselbe gilt für die Standorte E-34 und E-36 östlich des Rheins: Hier wurde der 2002 gemessene Höchstwert von 320% (E-36) in den letzten Jahren jeweils deutlich unterschritten.



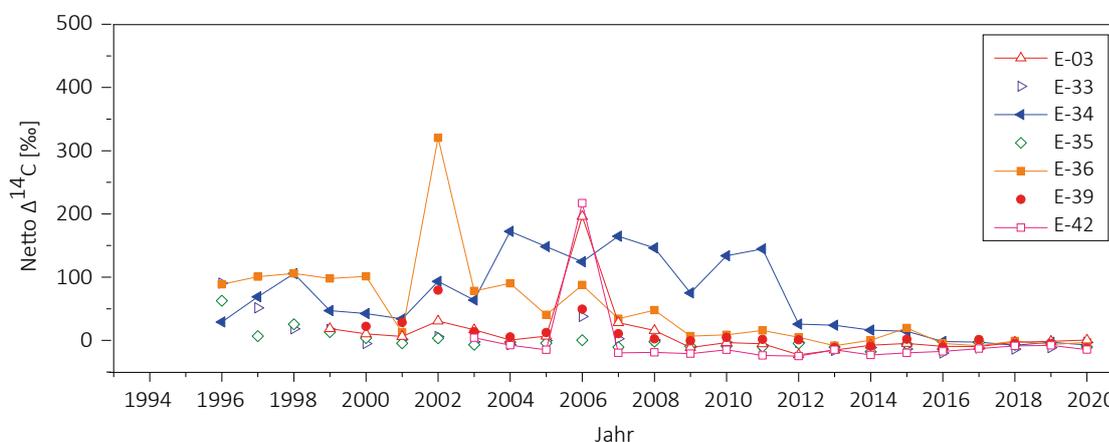
Figur 11 :
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte für Blattproben aus dem Raum Basel.

Tabelle 2:
Im Jahre 2020 gemessene höchste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte von Blättern im Vergleich mit Messungen früherer Jahre (1994 bis 2019) in Basel östlich (E-nn) und westlich (W-nn) des Rheins. Am Standort E-42 wurde vor dem Gebäude (Strassenseite) und hinter dem Gebäude (E-42*, Hofseite) gemessen. W-28 ist stellvertretend für das von ^{14}C -Quellen weitgehend unbeeinflusste Stadtgebiet.

Ort	In der Blattkohle		Im ganzen Blatt	
	2020 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]	1994-2019 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]	2020 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]	2004 - 2019 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]
E-03	2	197 (2006)	-	23 (2007)
E-26	-2	169 (1996)	-	-
E-34	-6	106 (1998)	-4	173 (2004)
E-42	-24	4 (2003)	-	-
E-42*	-12	218 (2006)	-	-
W-06	4	438 (1994)	4	172 (2008)
W-10A	-2	259 (1997)	0	308 (2005)
W-28	-6	-6 (2007)	-8	-8 (2020)
W-71	-8	227 (2008)	-3	75 (2009)
W-72	-13	107 (2008)	-5	115 (2010)



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 Messungen vor, so ist der höchste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert eingetragen.



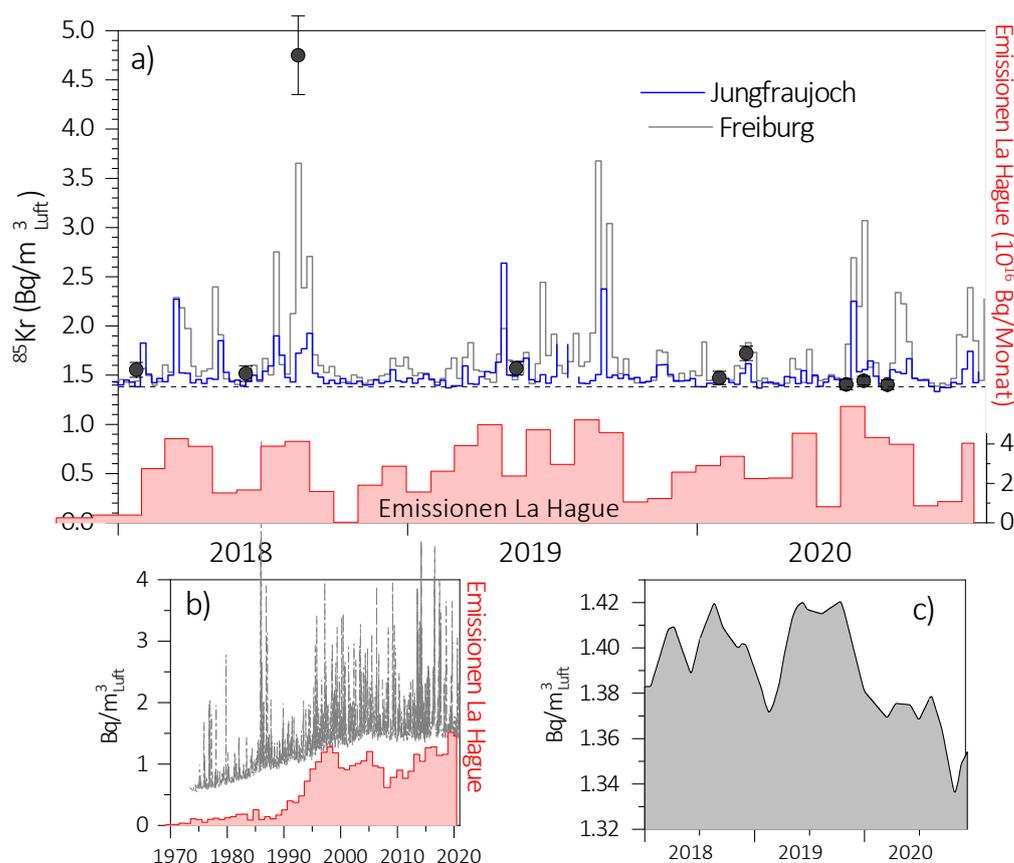
Figur 13: Zeitreihe der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte östlich des Rheins. Liegen von einem Standort mehrere Messungen vor, so ist der höchste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert eingetragen.

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 langen Zeiten 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.

Krypton-85 (^{85}Kr)

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



Figur 14 :

a) Atmosphärische ^{85}Kr -Aktivitätskonzentrationen der Stationen Jungfrauoch (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 Jungfrauoch 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) [4].

c) Basisaktivitätskonzentration berechnet als 2 Monatsmittel der wöchentlich minimalen ^{85}Kr -Werte.

den globalen Freisetzungsraten von ^{85}Kr übertroffen, was zu einem Anstieg der atmosphärischen Basisaktivitätskonzentration führte (Figur 14, kleines Bild).

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 Jungfrauoch (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 1. Halbjahr 2020 wurden wenige und kleine Aktivitätsspitzen gemessen, was auf die reduzierten Emissionen von La Hague zurückzuführen ist. Aktivitätsspitzen und Emissionen nahmen Anfangs der zweiten Jahreshälfte wieder zu. Die Basisaktivitätskonzentration ging im 2020 geringfügig zurück (Fig. 14c), möglicherweise als Folge der globalen COVID-Pandemie. Stichproben von Bernluft, die in wenigen Minuten gesammelt wurden, wurden am Physikalischen Institut der Universität Bern gemessen. Die Resultate bestätigen den Aktivitätsbereich und die zeitliche Abfolge, die in Freiburg oder auf dem Jungfrauoch beobachtet wurden. 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 mBq/m³_{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/2021/01/25/bilanz-2020-pandemie-hatte-keinen-einfluss-auf-die-sicherheit-der-kernanlagen/>, besucht am 15. März 2021
- [2] Bollhöfer, A., Schlosser, C., Schmid, S., Konrad, M., Purtschert, R. and Kraus, 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, L. Pfefferlé, M. Straub
Institut de radiophysique, CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

Résumé

Nous avons mesuré le plutonium (Pu) et l'américium (Am) dans des échantillons de sol, de sédiments, de filtres à air, de poissons, de plantes aquatiques, d'eau de surface et d'eau souterraine. Les résultats sont compatibles avec une contamination provenant essentiellement des retombées des essais nucléaires des années soixante. Ce dépôt est bien fixé dans le sol, comme en attestent les mesures des filtres à air, qui montrent des activités très faibles, mais représentatives de la remise en suspension de particules de sol par le vent. Les mesures des plantes aquatiques prélevées dans les rivières en aval des centrales nucléaires montrent que l'activité présente dans les plantes est probablement liée au dépôt de particules de sédiments enrichis en 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. L'activité en Pu des eaux de rivières prélevées en aval des centrales nucléaires ne dépasse pas 4.5 mBq/m^3 , soit 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 2020 montre que l'activité de l'air (en nBq/m^3) est proportionnelle à la masse de particules de sol présentes sur les filtres (en $\mu\text{g/m}^3$), 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.

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). L'IRA, sur mandat de l'OFSP, mesure depuis plus de vingt ans ces deux radioéléments dans différents compartiments de l'environnement à proximité des centrales nucléaires suisses et dans certains sites de référence. L'image principale que l'on peut tirer de ces mesures est que la présence de Pu et Am dans ces échantillons est essentiellement due aux retombées des essais nucléaires atmosphériques des années soixante avec, parfois, la présence d'ultratraces de Pu et d'Am (parfois aussi ^{244}Cm) dont l'origine peut être attribuée aux rejets des centrales nucléaires ou à

des événements particuliers, comme l'éruption du volcan Eyjafjallajökull en 2010, qui a 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 0.027 et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.42, recalculés pour l'année 2020. On verra au cours de ce rapport 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 particulière-

ment les rivières dans lesquelles elles rejettent des 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.

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].

Résultats et discussion

Le Tableau 1 présente les résultats de mesures obtenus dans les 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

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 2020 (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	0.148 ± 0.015 0.131 ± 0.016	0.0049 ± 0.0023 < LD	0.061 ± 0.006 0.063 ± 0.006 0.060 ± 0.009	0.429 ± 0.059 0.459 ± 0.090	0.033 ± 0.016
Bezau	0.152 ± 0.010	0.0044 ± 0.0015	0.070 ± 0.007	0.462 ± 0.054	0.029 ± 0.010
Cadenazzo	0.110 ± 0.010 0.111 ± 0.013 0.115 ± 0.016	< LD < LD < LD	0.048 ± 0.005 0.054 ± 0.007 0.048 ± 0.006 0.047 ± 0.006	0.420 ± 0.036 0.487 ± 0.087 0.435 ± 0.081	
Caslano	0.093 ± 0.010 0.090 ± 0.012 0.097 ± 0.012 0.105 ± 0.016	< LD < LD < LD < LD	0.050 ± 0.005 0.047 ± 0.006 0.042 ± 0.006 0.037 ± 0.006	0.535 ± 0.078 0.539 ± 0.097 0.430 ± 0.083 0.358 ± 0.080	
Däniken	0.206 ± 0.016	0.0041 ± 0.0018	0.088 ± 0.007	0.427 ± 0.048	0.020 ± 0.010
Güttingen	0.152 ± 0.013 0.161 ± 0.020 0.153 ± 0.017	0.0046 ± 0.0019 < LD < LD	0.070 ± 0.006 0.067 ± 0.007 0.074 ± 0.009	0.458 ± 0.057 0.416 ± 0.066 0.484 ± 0.081	0.030 ± 0.010
Leibstadt	0.199 ± 0.024 0.203 ± 0.018 0.193 ± 0.038	< LD 0.0053 ± 0.0006 < LD	0.080 ± 0.008 0.089 ± 0.011	0.394 ± 0.053 0.461 ± 0.107	0.026 ± 0.005
Meyrin	0.145 ± 0.017	< LD	0.046 ± 0.005	0.317 ± 0.052	
Mühleberg	0.164 ± 0.011	0.0040 ± 0.0015	0.086 ± 0.007	0.524 ± 0.054	0.024 ± 0.009
Posieux	0.193 ± 0.013	0.0049 ± 0.0017	0.087 ± 0.008	0.450 ± 0.051	0.025 ± 0.009
Stabio	0.596 ± 0.032 0.632 ± 0.052 0.598 ± 0.033	0.017 ± 0.003 0.019 ± 0.005 0.021 ± 0.004	0.281 ± 0.020 0.268 ± 0.018 0.232 ± 0.018	0.472 ± 0.042 0.425 ± 0.045 0.388 ± 0.037	0.029 ± 0.006 0.030 ± 0.008 0.035 ± 0.007
Villigen-PSI	0.171 ± 0.013	0.0043 ± 0.0018	0.078 ± 0.007	0.454 ± 0.053	0.025 ± 0.010
Würenlingen	0.163 ± 0.013	0.0058 ± 0.0019	0.073 ± 0.007	0.451 ± 0.053	0.036 ± 0.012
moyenne				0.44 ± 0.04 (n=24)	0.028 ± 0.005 (n=12)

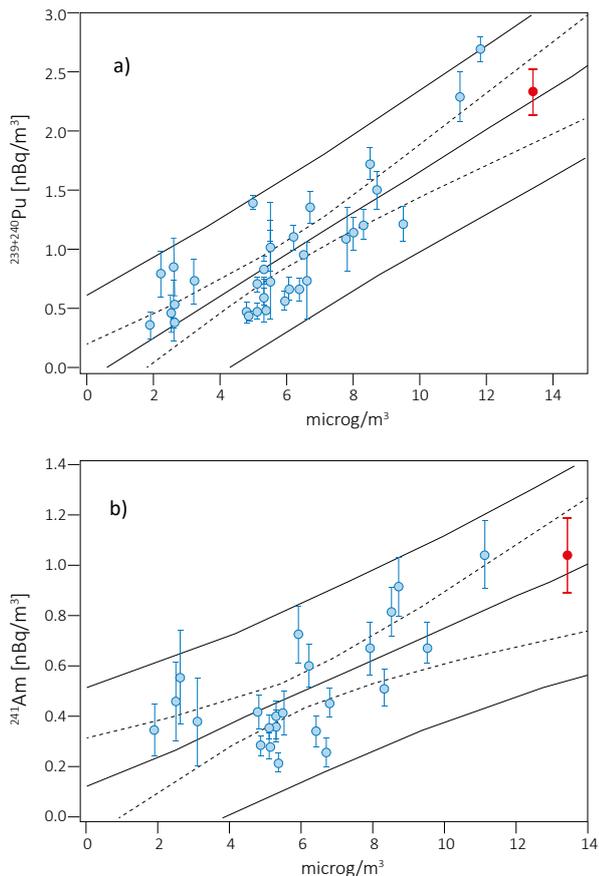


Figure 1 :
 Activité en a) $^{239+240}\text{Pu}$ et b) ^{241}Am , des filtres à air (nBq/m^3) en fonction de la quantité de cendres sur les filtres, exprimée en $\mu\text{g/m}^3$, pour les années 2013-2020 et différentes stations de prélèvement du plateau suisse. En rouge, la valeur d'activité déterminée sur le mélange des filtres à air de Cadenazzo, du CERN, de Güttingen, de Klingnau, de Liebefeld et de Posieux durant les tempêtes de sable du Sahara, du 01.02.2021 au 24.02.2021 (voir encadré ci-contre).

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 2020, ces rapports sont de 0.028 ± 0.005 pour $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et de 0.44 ± 0.04 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 mesures, les valeurs indiquées pour $^{239+240}\text{Pu}$ sont très reproductibles entre les aliquotes de mesures 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 ^{238}Pu pour des activités en $^{239+240}\text{Pu}$ d'environ 200 mBq/kg sol sec. Néanmoins, nous avons pu déterminer ^{238}Pu au-dessus de la limite de détection pour 12 échantillons de sol et le rapport moyen $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ est de 0.028 ± 0.005 , soit très proche de ce qui est attendu pour une contamination provenant uniquement des essais nucléaires des années soixante. Malgré une forte incertitude, ce rapport reste donc un excellent indicateur et nous maintiendrons la mesure de ^{238}Pu dans les sols comme objectif, nonobstant la difficulté de la mesure.

Incursions de sables du Sahara de février 2021¹⁾

L'analyse des 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 a confirmé que celles-ci n'ont pas contribué à un apport significatif de radioactivité dans l'air en Suisse. 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, où 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 mg/m³ (Suisse: 1.9 - 11.8 mg/m³). L'activité en $^{239+240}\text{Pu}$ était de $2.34 \pm 0.20 \text{ nBq/m}^3$ et celle en ^{241}Am de $1.04 \pm 0.15 \text{ nBq/m}^3$. Ces activités s'intègrent parfaitement parmi celles mesurées habituellement en Suisse, comme démontré dans la Figure 1. De plus, les rapports isotopiques $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.035 ± 0.015 et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.45 ± 0.08 sont très représentatifs des retombées des essais nucléaires des années soixante, comme discuté ci-dessus.

¹⁾ Bien que ne se rapportant pas à l'année 2020, les résultats des mesures des filtres aérosols de février 2021 ont été inclus dans ce rapport. Les résultats détaillés figureront également dans le rapport 2021.

Tableau 2:

Activités (nBq/m³) en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu dans des filtres à air de grands volumes collectés en 2020 sur différents sites en Suisse. Incertitudes à 95 %.

Lieu	Volume m ³	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu nBq/m ³	²³⁸ Pu nBq/m ³	²⁴¹ Am nBq/m ³
Klingnau	5'516'539	0.57 ± 0.17	< 0.3	n.m ^{a)}
Posieux	4'551'283	1.09 ± 0.27	< 0.3	n.m
Liebefeld, semestre 1	3'724'306	0.74 ± 0.32	< 0.7	n.m
Liebefeld, semestre 2	3'724'306	0.72 ± 0.31	< 0.6	n.m

a) non mesuré au cause d'un problème technique lors de la séparation chimique.

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 trois stations de prélèvement à haut volume sont présentés dans le tableau 2.

La Figure 1 représente l'activité en nBq/m³ des filtres à air de différentes stations de prélèvement en Suisse de 2013 à 2020, 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. Les données de la Figure 1 confirment que, sur le plateau suisse

où la déposition de radioactivité suite aux essais nucléaires est relativement homogène, l'activité des filtres à air peut être estimée à partir de la quantité de cendres et du volume d'air prélevé.

Comme les années précédentes, le site de Posieux montre une activité en Pu légèrement plus élevée (1.09 nBq/m³) que les autres stations. C'est aussi pour ce site que la quantité de cendres après calcination des filtres à air est la plus élevée (7.8 µg/m³). Contrairement aux années précédentes, le site de Liebefeld présente une activité en Pu similaire pour les deux semestres, malgré une quantité de particules de 5.5 µg/m³ au premier semestre, contre 6.6 µg/m³ lors du second semestre. Les activités sont par contre comparables à celles des années précédentes (0.6-1.3 nBq/m³).

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 2019. L'activité en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu des eaux de surface n'a pas dépassé 4.5 mBq/m³ dans le Rhin à la station de Pratteln, qui, comme les années précédentes, présente l'activité en Pu la plus élevée parmi les stations analysées. L'activité du ²³⁸Pu est restée inférieure à la limite de détection dans tous

Tableau 3:

Activités en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am (mBq/m³) des eaux collectées en Suisse durant l'année 2020. (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	221	1.6 ± 0.7	< 1.4	0.7 ± 0.3	0.43 ± 0.25
	Aar (Hagneck), avril - mai	250	1.4 ± 0.4	< 0.8	< 1.6	
	Aar (Klingnau), mai et juillet	285	2.7 ± 0.5	0.5 ± 0.2	2.2 ± 0.5	0.82 ± 0.25
	Rhin (Pratteln), janvier - février	290	4.5 ± 1.0	< 1.3	2.4 ± 0.5	0.54 ± 0.16
Eau souterraine	Aarberg, 08.07.2020	160	< 1.5	< 1.5	< 1.8	
	Döttingen, 08.07.2020	165	< 1.0	< 1.0	< 1.3	
	Pratteln, 08.07.2020	160	< 1.1	< 1.1	< 1.7	
Eau de pluie	Posieux	1'051	0.82 ± 0.20	< 0.3	0.39 ± 0.09	0.47 ± 0.16
	Mühleberg	1'205	0.59 ± 0.18	< 0.3	0.42 ± 0.09	0.71 ± 0.26
	Leibstadt	1'080	0.48 ± 0.17	< 0.3	0.30 ± 0.08	0.62 ± 0.27

Tableau 4:

Activités (mBq/kg Matières Sèches - MS) en plutonium et américium de différents échantillons aquatiques prélevés en 2020 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), 02.11.2020	14	33 ± 10	< 20	< 30	
	Aar (Klingnau), 13.11.2020	22	45 ± 11	< 15	31 ± 9	0.69 ± 0.26
	Rhin (Pratteln), 13.11.2020	14.5	28 ± 9	< 19	< 30	-
	Aar (Däniken), 02.11.2020	11.2	49 ± 14	< 25	36 ± 12	0.74 ± 0.33
Sédiments	Aar (Hagneck), juin 2020	52	43.4 ± 9.3	< 11	26.5 ± 4.9	0.61 ± 0.17
	Aar (Klingnau), juin 2020	52	51.2 ± 10.4	< 11	19.4 ± 3.5	0.38 ± 0.10
	Rhin (Pratteln), juillet 2020	54	81.1 ± 10.7	< 7	31.8 ± 5.5	0.39 ± 0.08
Poissons	Aar (Däniken), 26.06.2020	45	< 82	< 82	n.m.	
	Rhin (Dogern), 22.10.2020	200	< 1	< 1	< 14	
	Aar (Beznau), 28.06.2020	107	< 15	< 15	n.m.	
	Rhin (Leibstadt), 26.06.2020	54	< 6	< 6	< 3	

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 vient de la contamination provoquée par les retombées des essais nucléaires des années soixante.

Dans les eaux souterraines, l'activité en Pu et en Am est restée inférieure à 1.8 mBq/m³. 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.

D'une manière générale, les résultats 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. Les eaux de pluie ont présenté des activités quantifiables en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et en ²⁴¹Am, avec un rapport d'activité proche, dans les incertitudes de mesures, de ce qui est attendu pour les retombées des essais nucléaires des années soixante (env. 0.60 ± 0.25). L'activité en ²³⁸Pu est restée inférieure à la limite de détection proche de 0.2-0.3 mBq/m³.

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 (14-22 g de masse sèche (MS)) est un obstacle à la quantification systématique de Pu et Am si le rendement de séparation chimique n'atteint pas 65%, ce qui n'est pas toujours le cas dans nos mesures. Comme pour les sédiments, les activités en Pu et Am des plantes aquatiques sont restées proches de celles des années précédentes.

Dans les poissons, aucune activité quantifiable au-dessus de la limite de détection n'a été mesurée. Dans un cas, le faible rendement de séparation chimique a abouti à une limite de détection élevée de 82 mBq/kg de masse sèche. Dans la station de Dogern, l'augmentation de la masse de l'échantillon à 200g MS a réduit la limite de détection à 1 mBq/kg mais n'a toujours pas permis la quantification, ce qui est en soit réjouissant, car cela 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 (<0.650 Bq/kg) de Pu et 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 1.1 nBq/m³. La masse de cendre est un bon estimateur de la quantité 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 4.5 mBq/m³. Pour ces mesures également, le rapport ²⁴¹Am/²³⁹⁺²⁴⁰Pu indique les essais nucléaires des années soixante comme origine de la contamination. Les mesures confirment également 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; 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. 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.

7.3

Bestimmung von Plutoniumisotopen und ^{236}U in Eisproben des Gauligletschers

R. Gosteli, J. Corcho, S. Röllin, F. Hauenstein, M. Astner, H. Sahli

Labor Spiez, Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Spiez

L. Gnägi

ABC Abw Lab 1, Kompetenzzentrum ABC-KAMIR, Spiez

Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie, Bern

G. Juvet

Geographisches Institut, Universität Zürich

Einleitung

Der Gauligletscher im Berner Oberland ist ca. 6 km lang und ca. 1 km breit und bedeckt mit seinen Seitengletschern eine Fläche von knapp 11 km². Bekannt wurde der Gletscher vor allem durch den Flugzeugabsturz vom 18. Nov. 1946 einer amerikanischen Douglas C-53 Dakota mit 8 Passagieren und 4 Besatzungsmitgliedern an Bord. Das Flugzeug setzte unfreiwillig auf einer Höhe von 3'350 m auf dem Gauligrat auf. Sämtliche 12 Passagiere der Unglücksmaschine konnten schliesslich nach 6 Tagen durch die Schweizer Luftwaffe gerettet werden. Das Wrack der C-53 wurde kurz nach der Rettung eingeschneit und ins Eis eingebettet. Das Wrack wurde durch den Eisfluss nach unten transportiert. Zwischen 2012 und 2018 gelangten immer wieder Trümmerteile an die Oberfläche in der Ablationszone des Gletschers auf einer Höhe von ca. 2'500 m (Figur 1). Gemäss ersten Modellrechnungen des Gletscherflusses sollte das ganze Wrack dann erst in den Jahren 2027 bis 2035 ein Kilometer weiter oben zum Vorschein kommen¹.

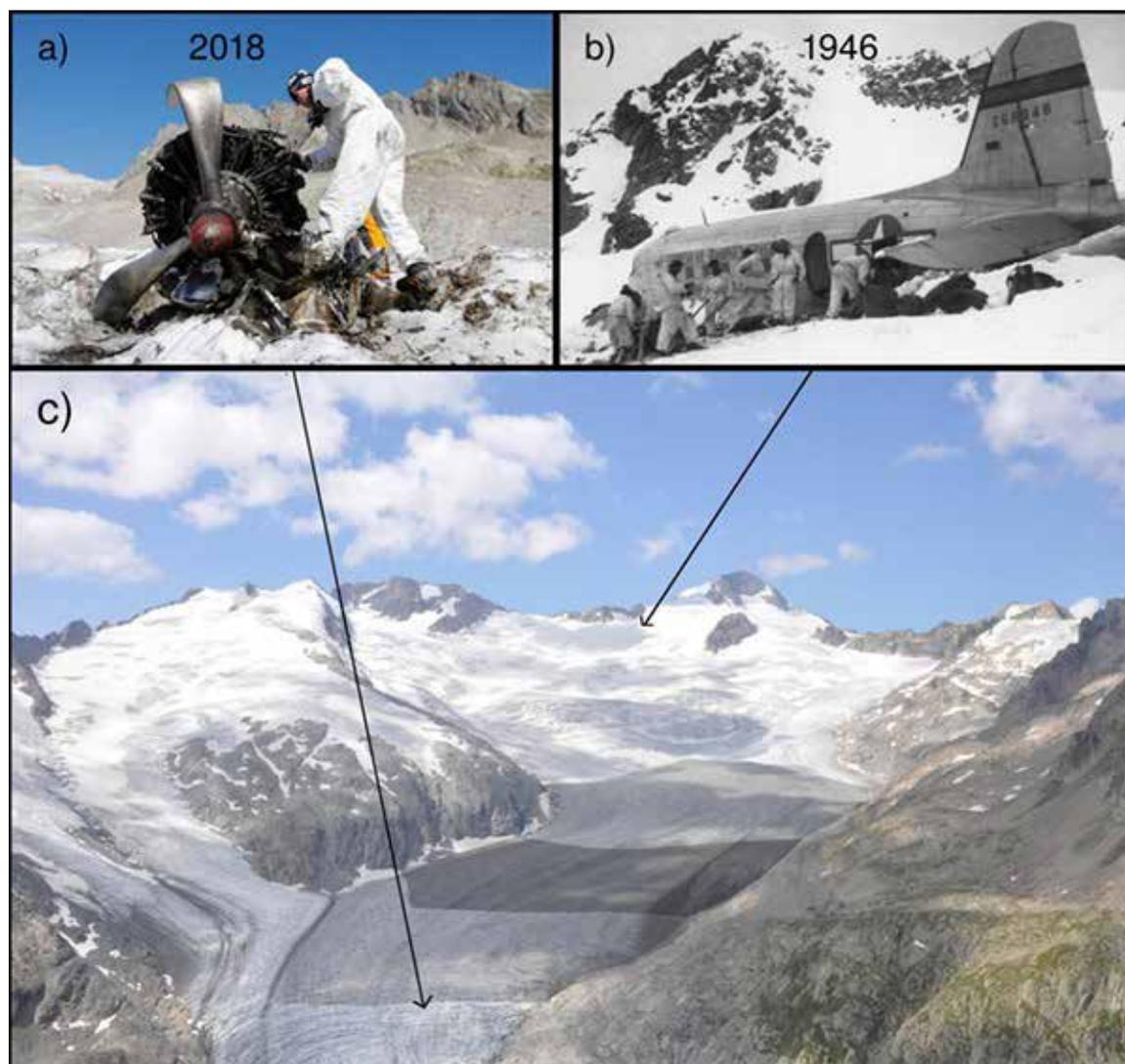
Durch die überirdischen Nuklearwaffentests der 50iger und 60iger Jahre gelangten grosse Mengen an künstlichen Radionukliden in die Atmosphäre. Durch Niederschläge gelangten die Radionuklide in chronologischer Reihenfolge in das Gletschereis. Die erste Periode endete mit einer maximalen Radionuklidkonzentration für 1958 und die

1 (L. Compagno, 2019)

zweite für 1963. Dieses Konzentrationsmuster wurde als Zeitmarker zur Datierung von Oberflächeneis benutzt. Es wurden alle 25 - 50 m eine Probe von ca. 1 kg Oberflächeneis in der Ablationszone über eine Distanz von ca. 2 km genommen. In diesem Bereich wurden gemäss einem ersten Gletscherflussmodell die Radionuklide des Global Fallout der 60iger Jahre vermutet. Plutonium und Uran wurden aufkonzentriert und massenspektrometrisch bestimmt. Anhand der Resultate konnte dann die Modellrechnung des Gletscherflusses angepasst werden.

Probennahme

Im Rahmen des WK 2019 des Abw Lab 1 wurden mehr als 200 Oberflächenproben entlang 5 Linien in der Ablationszone des Gauligletschers genommen. Mit einem Eisflussmodell wurden die Zonen berechnet wo Gletschereis aus den 50iger und 60iger Jahren vermutet wurde. Gemäss diesen Berechnungen wurde im Bereich der Isochronen von 1954-1967 Proben in einem Abstand von 25m entnommen. Weiter oben und weiter unten wurden Proben im Abstand von 50 m entnommen (Figur 1). Die obersten 30 cm vom Schmelzeis wurden zuerst weggekratzt. Danach wurde trockenes Eis ausgebohrt und das zerhackte Eis in 2L Plastikgefässen gesammelt (Figur 2). Das Eis wurde geschmolzen, so dass man pro Probe ca. 1.2 kg Wasser erhielt.



Figur 1 :
 A) Motor und Propeller der Dakota an der Eisoberfläche 2018. B) Dakota während der Rettungsaktion. C) Probenahme-zonen 2019: Proben wurden im Abstand von 25 m (dunkel schattiert) und 50 m (hell schattiert) entnommen (Figur von G. Jouvet, 2020).

Probenvorbereitung

Die Proben wurden mit Salpetersäure angesäuert (pH 1). 50 ml-Aliquote wurden für Tritium- und quantitative Uranbestimmungen entnommen. Die Tritium Aliquote wurden destilliert und mit Flüssigszintillation gemessen. Zum Rest der Proben wurde 60 mg Fe und 300 fg ^{242}Pu als Tracer zugegeben. Pu und U wurden mit einer Eisenhydroxid Kofällung bei pH 6 gefällt. Die Fällung wurde in 4.5 M HNO_3 gelöst und anschliessend Pu und U mit einer TEVA resp. UTEVA Säule nacheinander abgetrennt. Pu und U wurden jeweils mit 20 ml verdünnter Salpetersäure eluiert². Die radiochemischen Ausbeuten lagen nahe bei 100%. Pu und U wurden somit 50 mal aufkonzentriert.

² (S. Röllin, 2020)

Messung mittels ICP-MS

Quantitative ^{238}U Bestimmungen der geschmolzenen Eisproben wurden mit dem Element 2 ICP-MS mit externer Kalibration gemacht. Die Plutonium- und Uranisotopenmessungen wurden mit dem Neptune Multikollektor ICP-MS durchgeführt. Um die Sensitivität zu verstärken, wurden die Proben mit einem Aridus II Desolvator vernebelt. Sämtliche Plutonium Isotope wurden mit SEM Detektoren (Sekundär Elektronen Multiplier) gemessen. Bei den Uranisotopenmessungen wurde ^{234}U und ^{236}U ebenfalls mit SEM Detektoren und ^{235}U und ^{238}U mit Faraday Detektoren gemessen. Die Sensitivität der SEM Detektoren lag bei 150 cps (counts per second) per 1 fg/ml ($1 \text{ fg} = 1.10^{-15} \text{ g}$) ^{242}Pu bei einem Untergrundsignal von ca. 4 cps. Die höchsten ^{239}Pu Signale waren ca. 9'000 cps, was unter Berücksichtigung eines



Figur 2:
 Probennahme mit dem ABC Abw Lab 1, CH-Flugwaffe und Kompetenzzentrum Gebirgsdienst der Armee auf dem Gauligletscher. Pro Probe wurden ca. 2L von trockenem und zerhacktem Eis in Plastikgefässen gesammelt. Die obersten 30 cm Schmelzeis wurde vorher entfernt (Figur von G. Jouvet, 2020).

Aufkonzentrationsfaktors von 50 einer ^{239}Pu Konzentration von $1'100 \text{ fg/kg}$ (2.5 mBq/kg) bezogen auf Gletschereis entspricht. Die Nachweisgrenzen lagen ca. $1'000$ mal tiefer, d.h. bei ca. $1 \mu\text{Bq/kg}$ ^{239}Pu . Die Nachweisgrenze von ^{236}U ist vor allem limitiert durch das Tailing des ^{238}U Signals. Die natürliche Urankonzentrationen der Eisproben lag bei ca. 30 ng/kg ^{238}U im Gletschereis. Die höchsten $^{236}\text{U} / ^{238}\text{U}$ Isotopenverhältnisse lagen bei 10^{-5} , d.h. ca. $1'000$ mal grösser als das Urantailing. Die höchsten ^{236}U Aktivitäten lagen bei $1.5 \mu\text{Bq/kg}$ bezogen auf Gletschereis.

Resultate

Figur 3 und Figur 4 zeigen die ^{239}Pu und ^{236}U Aktivitäten entlang der 5 Linien und als topographische Übersicht. Die Aktivitäten beider Nuklide zeigen ein ähnliches Muster. Die höchste gemessene ^{239}Pu Konzentration lag bei 2.5 Bq/kg . Dies ist ca. drei mal kleiner als die maximale ^{239}Pu Konzentration in Eisbohrkernen vom Colle Gnifetti³. Die kleinsten ^{239}Pu Konzentrationen lagen knapp über der Nachweisgrenze bei $1.4 \mu\text{Bq/kg}$ was 600 ag/kg ($1 \text{ ag} = 1.10^{-18} \text{ g}$) entspricht. Diese Konzentrationen liegen im Konzentrationsbereich wie sie für frischen Schnee auf der Zugspitze ($75 - 2'823 \text{ ag/kg}$)⁴ oder in Wasser vom Val Piora im Tessin ($5 \mu\text{Bq/kg}$) gemessen wurden⁵. Figur 5 zeigt die Aktivitäten von ^{239}Pu , ^{236}U , ^3H entlang der Linie 3. Alle drei Nuklide zeigen eine maximale Konzentration für die Probe 246. Die maximale ^3H Aktivität betrug 44 TU . Unter der Annahme dass das Eis von 1963 stammt, erhält man für den Zeitpunkt der Schneedeponierung $1'020 \text{ TU}$. Dies wäre ca. 3 bis 5 mal kleiner als die für mittlere Breitengrade im Jahr 1963 erwartete ^3H Aktivität.

3 (J. Gabrieli, 2011)

4 (K. Gückel, 2017)

5 (F. Luiser, 2009)

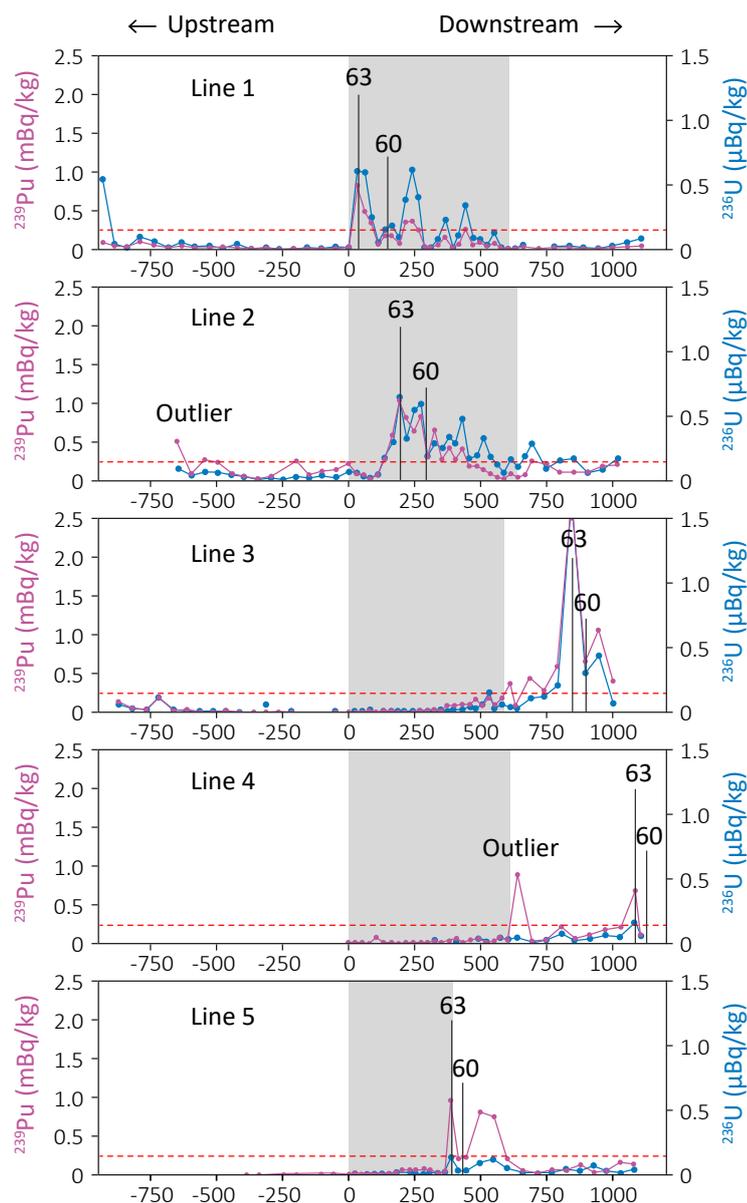
Tabelle 1 zeigt die Aktivitäten von ^{239}Pu , ^{236}U , ^3H und die Isotopenverhältnisse von $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{236}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ für die Proben entlang Linie 3. Die $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ Isotopenverhältnisse lagen im Bereich von $0.14 (\pm 0.01)$ und $0.259 (\pm 0.005)$, mit einem Durchschnittswert von $0.178 (\pm 0.03)$. Dieser durchschnittliche Wert entspricht $0.176 (\pm 0.004)$, dem Isotopenverhältnis von Global Fallout von den Nuklearwaffentests⁶. Die $^{236}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ Isotopenverhältnisse streuten im Bereich von $0.14 - 0.81$, mit einem Durchschnittswert von $0.40 (\pm 0.19)$. Dieser Bereich ist ähnlich den Werten die für den Austfonna Gletscher in Svalbard ($0.18 - 1.4$)⁷ und für den Eastern Tien Shan Gletscher in Zentralasien (0.27 ± 0.09)⁸ gefunden wurde.

Im Gegensatz zu den Tiefenverteilungen anhand von Borkernen ist die Probennahme hier nicht kontinuierlich, d.h. je nach Abstand der Isochoren kann es sein, dass die maximale Konzentration «verpasst» wird. Der Grund für die im Vergleich zu anderen Gletschern kleineren Maximalkonzentrationen könnte auch eine teilweise Auswaschung von Radionukliden sein, da es sich beim Gauligletscher um einen temperierten Gletscher handelt. Das Muster der Aktivitäten hängt stark von der Lage der Isochoren ab. Das kann auch die Ursache der stark streuenden $^{236}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ Isotopenverhältnisse sein, da Uran sich möglicherweise ein bisschen anders als Plutonium verhält. Um den Einfluss von Querkontaminationen zu minimieren, wurden für die Modellrechnungen nur die ^{239}Pu Konzentrationen $> 0.25 \text{ mBq/kg}$ verwendet. Aufgrund der Anzahl der Atomwaffentests erwartet man für die ^{239}Pu Aktivität ein Maximum im Jahr 1963 und ein weniger gut erkennbares Maximum für das Jahr 1958. Es wurde darum neben dem Peak von 1963 das Minimum zwischen den Peaks dem Jahr 1960 zugeordnet. Aus Figur 3 ist zu erkennen, dass die Fliessgeschwindigkeit besonders in der Mitte

6 (P.W. Krey, 1976)

7 (C.C. Wendel, 2013)

8 (C. Wang, 2017)



Figur 3 :

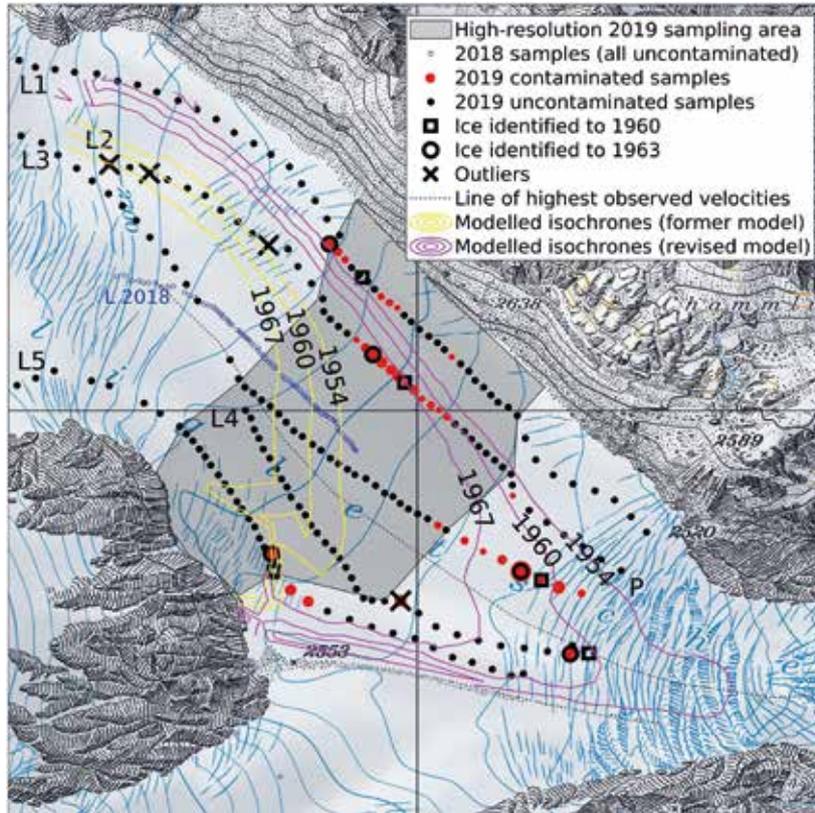
^{239}Pu und ^{236}U Aktivitäten entlang der 5 Linien. Der Nullpunkt der x-Achse wurde auf einer Höhe von 2'640 m.ü.M. gesetzt. Die Aktivitäten sind als Distanz der Messpunkte vom Nullpunkt in Meter aufgetragen. Grau schattiert entspricht der Zone wo Proben alle 25 m entnommen wurden. Vertikal markiert sind die Positionen markiert wo Eis von 1960 und 1963 identifiziert wurde. Die gestrichelte Linie entspricht 0.25 mBq/kg ^{239}Pu (Figur von G. Jouvét, 2020).

des Gletschers viel höher als erwartet ist und die Aktivitätsmaxima darum ausserhalb der Probennahmezone mit 25 m Abstand liegen. Anhand der Zeitmarker wurde das Gletscherflussmodell angepasst. Gemäss der angepassten Modellrechnung wird erwartet, dass der Rumpf der C-53 Dakota bereits in den nächsten Jahren unterhalb der Stelle wo 2018 Trümmerteile gefunden wurde zum Vorschein kommen wird⁹.

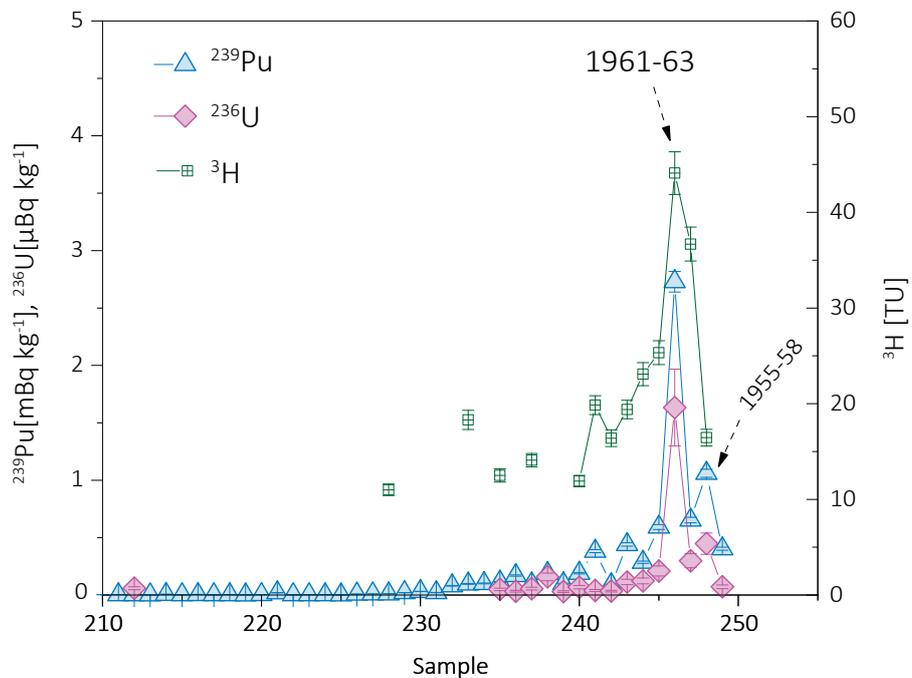
Sämtliche 200 Eisproben wurden vom ABC Abw Lab 1 während dem drei wöchigen WK aufgearbei-

tet und das Plutonium gemessen. Die relativ kleinen Probenmengen von ca. 1 kg pro Probe erleichterten die Probennahme, den Transport sowie das Handling im Labor. Trotzdem lagen die Konzentrationen von ^{239}Pu und ^{236}U für praktisch alle Proben über der Nachweisgrenzen. Um noch tiefere Nachweisgrenzen zu erhalten wurde die Aufkonzentrierungsmethode auch für Wasservolumen bis zu 20 kg erfolgreich getestet. Durch den grösseren Aufkonzentrierungsfaktor konnten so die Nachweisgrenzen nochmals um einen Faktor 20 gesenkt werden.

⁹ (G. Jouvét, 2020)



Figur 4 :
 Topographische Karte des Gauligletschers mit einem Rasterabstand von 1 km. Die 5 Linien der Probennahme 2019 (L1 – L5) sind als schwarze Punkte eingetragen. Zusätzlich sind die Punkte der Probennahme 2018 blau eingetragen. Für Aktivitäten > 0.25 mBq/kg sind die Punkte rot markiert, wobei die Grösse der Punkte der Aktivität entspricht. Grau markiert ist die Zone wo Proben alle 25 m entnommen wurden. P bezeichnet die Stelle wo 2018 Trümmerteile gefunden wurde. Gelb eingezeichnet sind die Isochronen des ursprünglichen Modells und pink die aufgrund der ^{239}Pu Messungen angepassten Modells eingetragen (Figur von G. Jouvét, 2020).



Figur 5 :
 ^{239}Pu , ^{236}U und ^3H Aktivitäten der Proben entlang der Linie 3 (Figur von S. Röllin, 2020).

Tabelle 1 :

²³⁹Pu, ²³⁶U, ³H Aktivitäten und ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu, ²³⁶U/²³⁹Pu Isotopenverhältnisse der Proben von Linie 3. Es wird die erweiterte Unsicherheit (k=2) rapportiert. Die ³H Aktivitäten sind auf das Referenzdatum vom 27.08.2019 korrigiert (Tabelle von S. Röllin, 2020).

Sample	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu	²³⁶ U	²³⁶ U/ ²³⁹ Pu	³ H
	μBq kg ⁻¹	atom ratio	μBq kg ⁻¹	atom ratio	TU
230	31 ± 1	0.14 ± 0.01	0.010 ± 0.003	0.30 ± 0.09	< 9.8
231	21 ± 1	0.19 ± 0.03	0.016 ± 0.005	0.70 ± 0.22	< 9.8
232	81 ± 3	0.21 ± 0.01	0.013 ± 0.004	0.15 ± 0.05	< 9.8
233	97 ± 3	0.184 ± 0.009	0.04 ± 0.01	0.38 ± 0.11	18.3 ± 1.0
234	101 ± 4	0.175 ± 0.007	0.017 ± 0.005	0.16 ± 0.05	< 9.8
235	113 ± 4	0.169 ± 0.009	0.06 ± 0.02	0.51 ± 0.15	12.5 ± 0.7
236	170 ± 6	0.259 ± 0.005	0.03 ± 0.01	0.19 ± 0.06	< 9.8
237	98 ± 4	0.18 ± 0.01	0.07 ± 0.02	0.67 ± 0.20	14.1 ± 0.7
238	187 ± 7	-	0.16 ± 0.05	0.81 ± 0.25	< 9.8
239	99 ± 4	0.178 ± 0.006	0.04 ± 0.01	0.38 ± 0.11	< 9.8
240	190 ± 6	0.209 ± 0.007	0.07 ± 0.02	0.36 ± 0.11	11.9 ± 0.6
241	382 ± 14	0.152 ± 0.006	0.05 ± 0.02	0.14 ± 0.04	19.8 ± 1.0
242	90 ± 4	0.177 ± 0.005	0.04 ± 0.01	0.44 ± 0.13	16.4 ± 0.9
243	440 ± 15	0.169 ± 0.005	0.15 ± 0.05	0.32 ± 0.10	19.4 ± 1.0
244	285 ± 10	-	0.13 ± 0.04	0.43 ± 0.13	23.1 ± 1.2
245	592 ± 21	0.180 ± 0.003	0.26 ± 0.08	0.43 ± 0.13	25.3 ± 1.2
246	2'730 ± 90	0.179 ± 0.003	1.7 ± 0.5	0.59 ± 0.18	44.1 ± 2.2
247	653 ± 24	0.184 ± 0.004	0.4 ± 0.1	0.55 ± 0.17	36.7 ± 1.8
248	1'060 ± 36	0.156 ± 0.002	0.5 ± 0.1	0.44 ± 0.13	16.5 ± 0.9
249	404 ± 14	0.168 ± 0.004	0.10 ± 0.03	0.23 ± 0.07	< 9.8

Literaturverzeichnis

- C. Wang, S. Hou, H. Pang, Y. Liu, H.W. Gäggeler, M. Christl, H.A. Synal. 2017. ²³⁹,²⁴⁰Pu and ²³⁶U records of an ice core from the eastern Tien Shan (Central Asia). *Journal of Glaciology*. 63, 2017, Bde. 929-935.
- C.C. Wendel, D.H. Oughton, O.C. Lind, L. Skipperud, L.K. Fifield, E. Isaksson, S.G. Tims, B. Salbu. 2013. Chronology of Pu isotopes and ²³⁶U in an Arctic ice core. *Science of the Total Environment*. 2013, Bde. 734-741.
- F. Luise, J.A. Corcho Alvarado, P. Steinmann, M. Krachler, P. Froidevaux. 2009. A new method for the determination of plutonium and americium using high pressure microwave digestion and alpha-spectrometry or ICP-SMS. *J Radionanal Nucl Chem*. 281, 2009, <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0004-z>.
- G. Juvet, S. Röllin, H. Sahli, J. Corcho, L. Gnägi, L. Compagno, D. Sidler, M. Schwikowski, A. Bauder, M. Funk. 2020. Mapping the age of ice of Gauligletscher combining surface radionuclide contamination and ice flow modeling. *The Cryosphere*. 2020, S. 4233-4251.
- J. Gabrieli, G. Cozzi, P. Vallelonga, M. Schwikowski, M. Sigl, J. Eickenberg, L. Wacker, C. Boutron, H. Gäggeler, P. Cescon, C. Barbante. 2011. Contamination of Alpine snow and ice at Colle Gnifetti, Swiss/Italian Alps, from nuclear weapons tests. *Atmospheric Environment*. 2011, Bd. 45.
- K. Gückel, T. Shinonaga, M. Christl, J. Tschiersch. 2017. Scavenged ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, and ²⁴¹Am from snowfalls in the atmosphere settling on Mt. Zugspitze in 2014, 2015 and 2016. *Scientific Reports*. 2017, Bd. 7.
- L. Compagno, G. Juvet, A. Bauder, M. Funk, G.J. Church, S. Leinss, M.P. Lüthi. 2019. Modelling the re-appearance of a crashed airplane on Gauligletscher, Switzerland. *Front. Earth Sci*. 7, 2019, Bd. 170.
- P.W. Krey, E. P. Hardy, C. Pachucki, F. Rourke, J. Coluzza, W.B. Benson. 1976. Mass isotopic composition of global fall-out plutonium in soil. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. 1976.
- S. Röllin, H. Sahli, L. Gnägi, J.A. Corcho Alvarado. 2020. Determination of Plutonium and Uranium Radionuclides in Glacier Ice Samples by MC-ICP-MS. *CHIMIA*. 74, 2020, Bd. 12.

2020

Chapitre Kapitel 8

Surveillance des
installations nucléaires :
Emissions et Immissions

Überwachung der
Kernanlagen :
Emissionen und Immissionen

Emissions et Immissions
Dose ambiante et débit de dose ambiante
MADUK
ZWILAG
Installations nucléaires et environnement
CERN - 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



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 2020 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM, endgültige Einstellung des Leistungsbetriebs Ende Dezember 2019) 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 für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Emissionen aus den Kernanlagen: Ergebnisse 2020

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 Jahreslimiten 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 2020. 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 Fuss-

noten 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 24 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 196 Proben eigene gammaskopmetrische Messungen durchgeführt (inkl. Teilnahme an Ringvergleichen zur Sicherstellung der eigenen Messqualität). 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

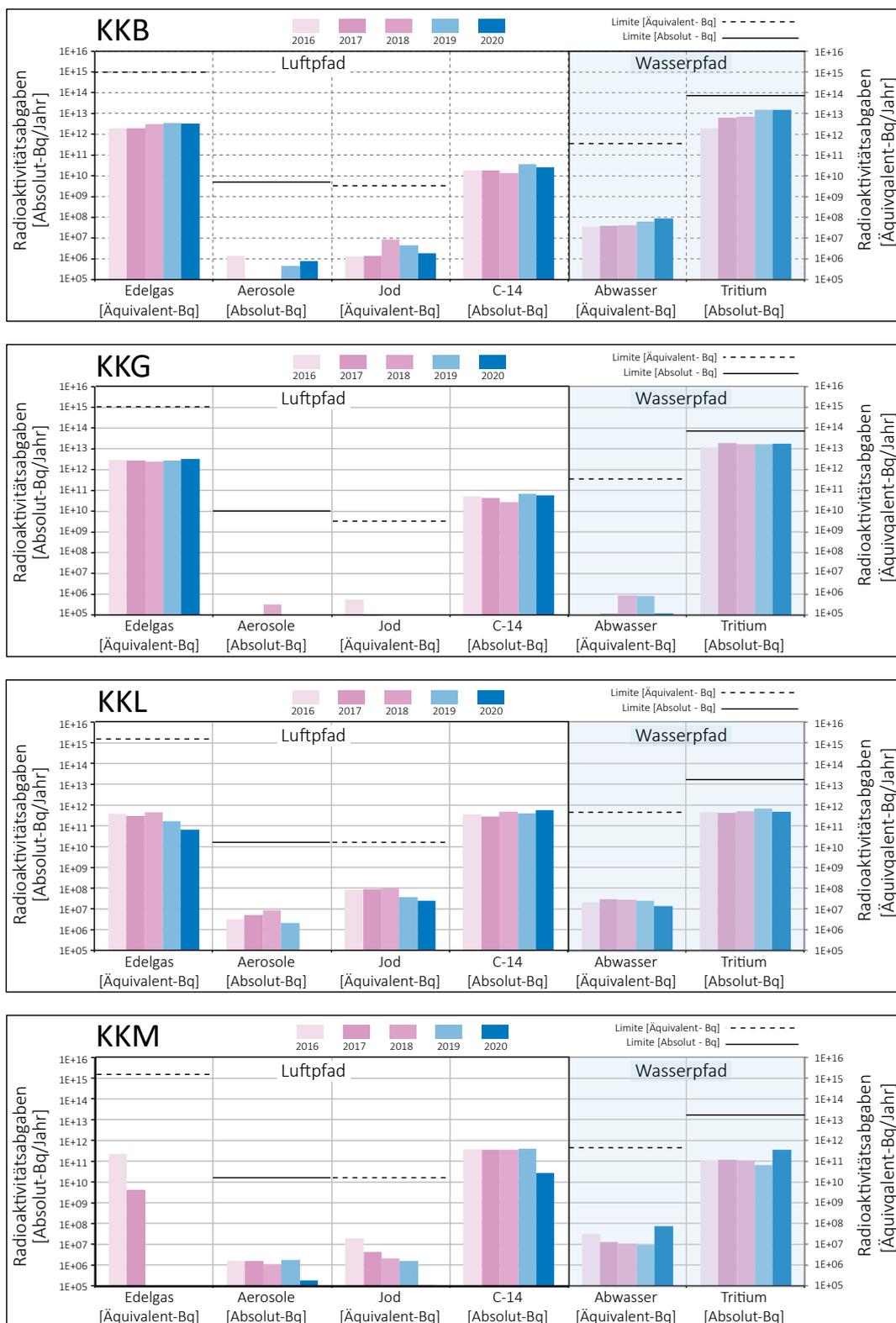


Fig 1.a: Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser ins Flusswasser in den letzten fünf Jahren (2016 bis 2020) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimite. Angegeben ist für die jeweilige Nuklidgruppe und den Abgabepfad die Jahressumme der bei den einzelnen bilanzierenden 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 Abgabelimite notwendigen Edelgase-Abgabeäquivalente wurde in diesen Fällen ein konservatives Nuklidgemisch angesetzt. Das KKL und das KKM bilanzieren die Edelgase dagegen nuklidspezifisch mittels Gamma-Spektrometriemessungen. Die nuklidspezifischen Messungen liegen häufig unterhalb der Nachweisgrenze

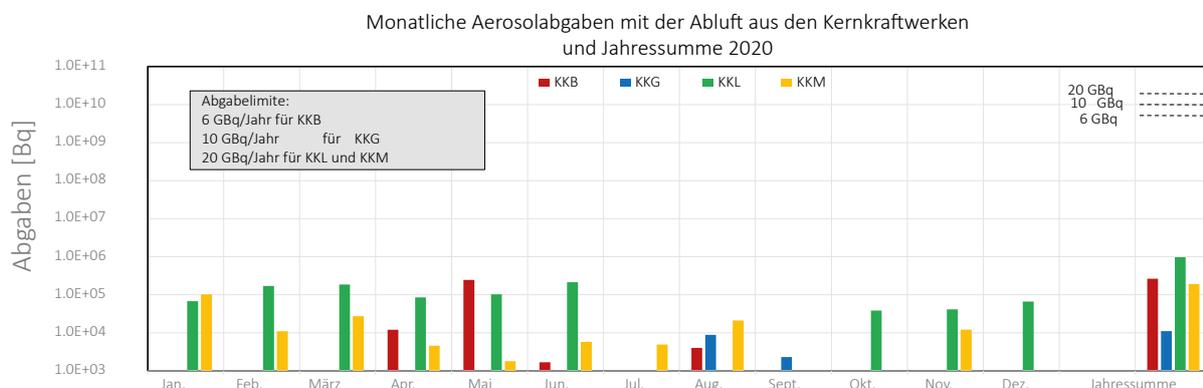
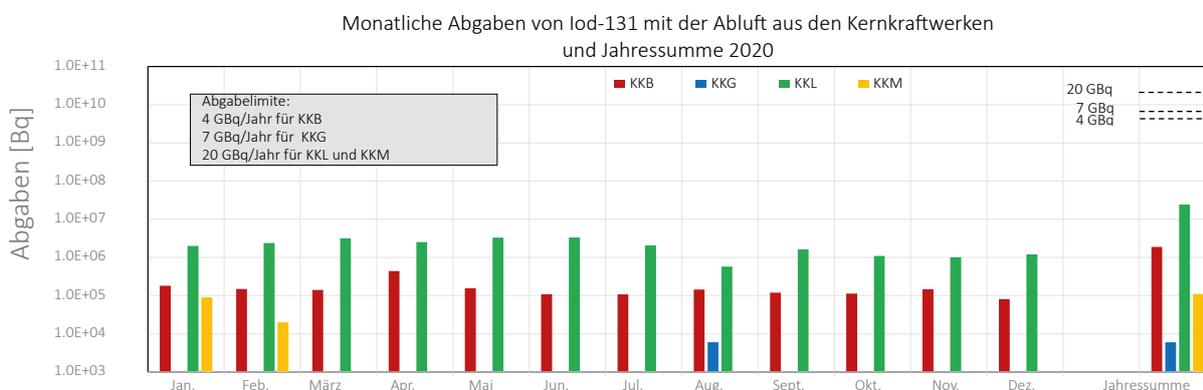
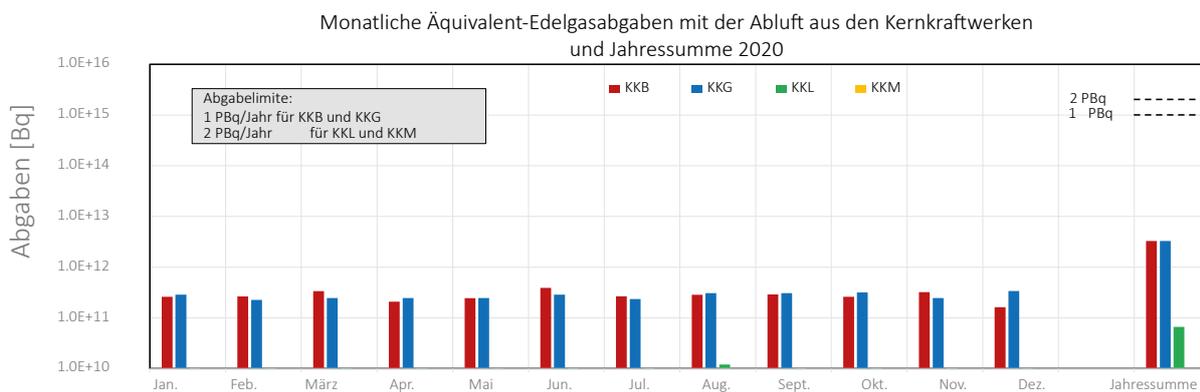
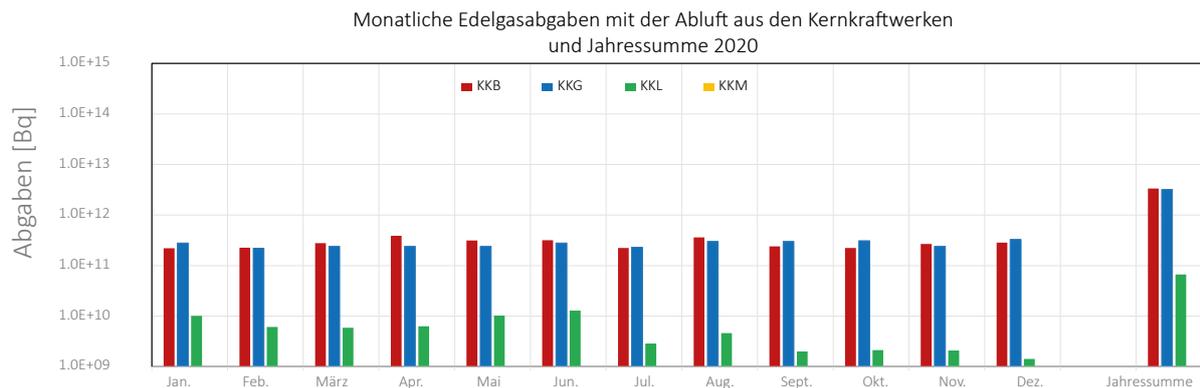
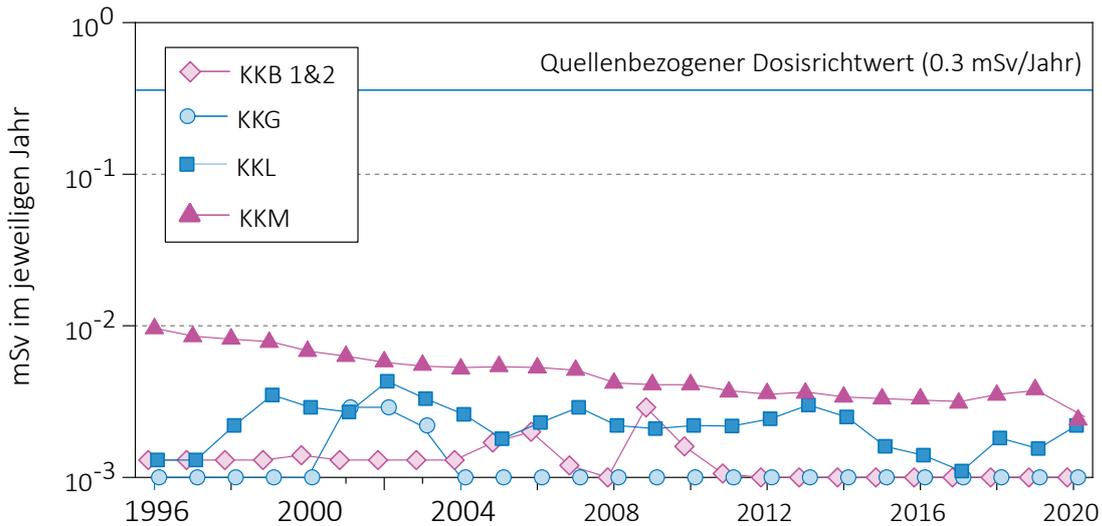


Fig 1.b (Teil 1):
 Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2020 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.



Fig 1.b (Teil 2):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2020 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.



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 2020	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01-16.04; 22.05-31.12 Revisionsstillstand: 17.04-21.05	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01-04.08; 17.08-31.12 Revisionsstillstand: 05.08-16.08	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01-05.06; 24.06-31.12 Revisionsstillstand: 06.06-23.06	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 1.1-29.06; 12.08-31.12 Revisionsstillstand: 30.06-11.08	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019	Siedewasserreaktor	373 MW

Figur 3: Betrieb der Kernanlagen 2020.

tritiumhaltiges Wasser bei den Abgaben erkennbar. Solche Abgaben sind bei den Druckwasserreaktoren systembedingt erforderlich, um den operationellen Strahlenschutz während der Revision zu optimieren. Im Gegensatz zum KKG erfolgen die Tritiumabgaben im KKB über das ganze Jahr verteilt.

Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKG weniger als 0.001 mSv, beim KKB weniger als 0.002 mSv, beim KKM weniger als 0.003 mSv und KKL weniger als 0.005 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2020 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 0.007 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 2020 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 2020 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 4'020 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.7·10 ⁸	8.7·10 ⁷	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.5·10 ¹³	-	7·10 ¹³	21 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	3.3·10 ¹²	3.3·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	7.8·10 ⁵	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	1.9·10 ⁶	1.9·10 ⁶	4·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.6·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0012
Dosis total						<0.001	<0.001	0.0014	
KKG	Abwasser 6'834 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.2·10 ⁶	1.1·10 ⁵	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.8·10 ¹³	-	7·10 ¹³	26 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<3.2·10 ¹²	<3.3·10 ¹²	1·10 ¹⁵	<0.4%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.1·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	6.0·10 ³	6.0·10 ³	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	5.8·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001	
KKL	Abwasser 12'308 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	6.3·10 ⁷	1.4·10 ⁷	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.8·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	2.4 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	6.7·10 ¹⁰	6.6·10 ¹⁰	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.7·10 ⁴	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	2.4·10 ⁷	2.4·10 ⁷	2·10 ¹⁰	0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	5.8·10 ¹¹	-	-	-	0.0022	0.0029	0.0049
Dosis total						0.0022	0.0029	0.0049	
KKM ⁵	Abwasser 4'990 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.7·10 ⁸	7.3·10 ⁷ 3.1·10 ⁶	2.8·10 ¹¹ 1.2·10 ¹⁰	<0.1% <0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.0·10 ¹¹	3.6·10 ¹¹ 4.1·10 ¹⁰	1.4·10 ¹³ 5.9·10 ¹¹	2.6% 7.0%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	-	-	1.4·10 ¹⁵ 1.2·10 ¹²	<0.1% <0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.5·10 ⁵	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0023	0.0023	0.0022
		Iod: ¹³¹ I	1.1·10 ⁵	1.1·10 ⁵	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.8·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total						0.0024	0.0024	0.0024	
ZZL	Abwasser 340 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.4·10 ⁸	6.7·10 ⁷	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	9.2·10 ⁹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-/γ-Aerosole	3.2·10 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	7.3·10 ⁸	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	6.2·10 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 2020 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungslabor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszwischenlager
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft^{1,2} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	-	-	-	-	-
β/γ-Aerosole, ohne Iod	-	-	-	-	1.9·10 ⁴
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	1.3·10 ⁶	-	-	-	-
Tritium als HTO	2.9·10 ⁹	-	-	8.2·10 ⁹	5.6·10 ⁹
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	8.8·10 ⁷	6.7·10 ⁶
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 949 m ³	Abluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	6.0·10 ⁷	-	6.3·10 ⁶
Tritium	-	-	-	1.2·10 ¹⁰	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	1.7·10 ¹⁴	2.2·10 ¹⁰	-	-	1.7·10 ¹⁴	7.0·10 ¹⁴
β/γ-Aerosole, ohne Iod	1.9·10 ¹⁰	5.6·10 ⁶	1.3·10 ⁴	-	1.9·10 ¹⁰	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	7.2·10 ⁷	-	-	-	7.3·10 ⁷	4.4·10 ⁷
Tritium als HTO	1.8·10 ¹²	-	-	-	1.8·10 ¹²	-
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	-	9.5·10 ⁷	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.0064	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	< 0.007
Kind 10j	0.0064	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	< 0.007
Kleinkinder	0.0064	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	< 0.007
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	4.3 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 5.0%	< 5.0%

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2020:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^3H	$1.5 \cdot 10^{13}$	$1.8 \cdot 10^{13}$	$4.8 \cdot 10^{11}$	$4.0 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{10}$	$9.2 \cdot 10^9$
^{22}Na					$1.3 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^6$
^{24}Na	$3.3 \cdot 10^6$					
^{35}S					$2.3 \cdot 10^7$	
^{51}Cr	$3.2 \cdot 10^5$					
^{54}Mn	$1.3 \cdot 10^7$		$3.0 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^8$	$5.7 \cdot 10^4$	$6.2 \cdot 10^5$
^{57}Co					$5.4 \cdot 10^3$	
^{58}Co	$1.7 \cdot 10^7$		$9.5 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^7$		$1.4 \cdot 10^4$
^{60}Co	$9.9 \cdot 10^7$		$5.9 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^8$	$4.9 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^7$
^{65}Zn	$8.6 \cdot 10^4$			$4.0 \cdot 10^7$		
^{67}Ga					$8.7 \cdot 10^4$	
^{89}Sr	$7.0 \cdot 10^5$			$7.4 \cdot 10^6$		
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$1.0 \cdot 10^6$			$3.6 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^6$	$5.1 \cdot 10^5$
^{95}Nb	$5.1 \cdot 10^4$					
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$5.9 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^5$				
^{103}Ru	$4.7 \cdot 10^5$					
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$8.0 \cdot 10^6$					
^{111}In					$4.7 \cdot 10^4$	
^{122}Sb	$1.4 \cdot 10^7$					
^{124}Sb	$1.2 \cdot 10^8$			$1.4 \cdot 10^5$		$1.6 \cdot 10^5$
^{125}Sb	$3.4 \cdot 10^7$			$6.1 \cdot 10^5$		$2.4 \cdot 10^6$
$^{123\text{m}}\text{Te}$	$2.2 \cdot 10^7$	$5.9 \cdot 10^5$				
$^{129\text{m}}\text{Te}$	$1.8 \cdot 10^7$					
^{132}Te	$2.7 \cdot 10^7$					
^{131}I	$5.0 \cdot 10^6$					
^{133}I	$1.8 \cdot 10^5$					
^{134}Cs	$1.6 \cdot 10^6$				$1.2 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^6$
^{137}Cs	$7.2 \cdot 10^7$			$1.3 \cdot 10^6$	$9.7 \cdot 10^6$	$2.2 \cdot 10^8$
^{140}Ba	$4.4 \cdot 10^5$					
^{140}La	$4.6 \cdot 10^5$					
^{141}Ce	$5.7 \cdot 10^4$					
^{144}Ce	$1.7 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^5$				
^{155}Tb					$4.7 \cdot 10^4$	
^{156}Tb					$4.0 \cdot 10^3$	
^{161}Tb					$2.3 \cdot 10^6$	
^{169}Yb					$6.6 \cdot 10^3$	
^{172}Lu					$4.2 \cdot 10^4$	
^{173}Lu					$5.4 \cdot 10^4$	
^{177}Lu					$2.2 \cdot 10^7$	
^{207}Bi					$1.7 \cdot 10^4$	
^{239}Np	$2.0 \cdot 10^6$					
α -Strahler *)	*)	$5.5 \cdot 10^4$	$2.6 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^4$		*)
$^{234/238}\text{U}$					$1.4 \cdot 10^4$	
$^{239/240}\text{Pu}$	$1.8 \cdot 10^4$					
$^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$	$8.8 \cdot 10^4$					$2.7 \cdot 10^3$
^{239}Np						
^{242}Cm	$1.1 \cdot 10^4$					
$^{243/244}\text{Cm}$	$1.2 \cdot 10^5$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2019 bis und mit dem 3. Quartal 2020

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2020:

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	7.4·10 ¹¹	6.0·10 ¹¹	4.9·10 ¹¹	2.4·10 ¹⁰	1.8·10 ¹²	6.2·10 ⁹
¹⁴ C (CO ₂)	2.6·10 ¹⁰	5.8·10 ¹⁰	5.8·10 ¹¹	2.8·10 ¹⁰	9.5·10 ⁷	7.3·10 ⁸
¹¹ C					2.5·10 ¹³	
¹³ N					2.6·10 ¹³	
¹⁵ O					1.1·10 ¹⁴	
¹⁸ F					7.9·10 ¹¹	
²⁴ Ne						
⁴¹ Ar			2.0·10 ⁹		3.7·10 ¹²	
⁸⁵ Kr						
^{85m} Kr	1.2·10 ¹¹					
⁸⁸ Kr	2.0·10 ¹¹					
¹³³ Xe	1.6·10 ¹²		1.7·10 ¹⁰			
¹³⁵ Xe	1.4·10 ¹²		3.4·10 ¹⁰			
^{135m} Xe			1.4·10 ¹⁰			
EG-Aequiv.						
EG: β-total		<3.2·10 ¹²				
Andere						
Iod						
¹²³ I					8.2·10 ⁶	
¹²⁴ I					6.0·10 ⁵	
¹²⁵ I					6.3·10 ⁷	
¹²⁶ I					6.0·10 ⁵	
¹³¹ I	1.9·10 ⁶	6.0·10 ³	2.5·10 ⁷	1.1·10 ⁵		
¹³³ I	9.5·10 ⁶					

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2020:
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					6.1·10 ⁵	
²⁴ Na					3.4·10 ⁸	
³⁹ Cl					1.4·10 ⁶	
⁵⁴ Mn				3.3·10 ⁴		
⁵⁷ Co		2.3·10 ³				
⁶⁰ Co	4.0·10 ³	8.8·10 ³		1.3·10 ⁵	1.1·10 ⁵	9.5·10 ³
⁷⁵ Se					4.0·10 ⁴	
⁷⁷ Br					5.7·10 ⁶	
^{80m} Br					3.8·10 ⁶	
⁸² Br					4.8·10 ⁸	
⁸⁹ Sr			1.4·10 ⁵			
⁹⁰ Sr						
¹⁰³ Ru	2.0·10 ⁵					
¹⁰⁶ Ru	5.8·10 ⁴					
¹²¹ Te					1.6·10 ⁵	
¹³⁷ Cs				1.7·10 ⁴		1.4·10 ⁴
¹⁴⁰ La			1.7·10 ⁴			
¹⁴¹ Ce						
¹⁴⁴ Ce						
¹⁷³ Lu					1.3·10 ⁵	
¹⁸¹ Re					4.6·10 ⁷	
¹⁸² Re					6.2·10 ⁸	
^{182m} Re					9.9·10 ⁶	
¹⁸³ Re					7.3·10 ⁶	
¹⁸² Os					1.8·10 ⁸	
¹⁸³ Os					1.9·10 ⁸	
^{183m} Os					5.6·10 ⁷	
¹⁸⁵ Os					1.3·10 ⁷	
¹⁸⁵ W					1.3·10 ⁸	
¹⁹¹ Os	5.2·10 ⁵					
¹⁹¹ Pt					9.1·10 ⁶	
¹⁹² Au					2.1·10 ⁸	
¹⁹³ Au					1.5·10 ⁸	
¹⁹⁴ Au					4.3·10 ⁶	
¹⁹² Hg					2.9·10 ⁹	
^{193m} Hg					1.2·10 ⁸	
¹⁹⁴ Hg					4.3·10 ⁶	
¹⁹⁵ Hg					1.3·10 ¹⁰	
^{195m} Hg					1.0·10 ⁸	
^{197m} Hg					1.1·10 ⁸	
²⁰³ Hg					6.8·10 ⁶	
Nicht spezifizierte						2.9·10 ⁵
α -Aerosole		4.4·10 ⁴	4.1·10 ³	1.0·10 ⁴		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 der Bewilligung Abgabe radioaktiver Stoffe 6/2018 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv pro Jahr limitiert.

[5] KKM : Bis zum 14. September 2020 war im KKM das Abgabereglement ENSI 11/2288 Rev.1 gültig. Ab dem 15. September 2020 ist das Abgabereglement ENSI 11/2288 Rev.2 gültig. Für die Abgabelimiten gilt die pro rata temporis-Regel, d.h. die Abgabelimiten werden mit dem zeitlichen Anteil der Gültigkeit der Abgabereglemente verrechnet.

8.2

Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

Die Ortsdosis, respektive die Ortsdosisleistung durch externe Strahlung werden bei den Kernanlagen und beim PSI mit dem MADUK-Messnetz (siehe Kapitel 8.3) und mit passiven Dosimetern (Thermolumineszenz-Dosimeter, TLD und Environmental Direct Ion Storage-Dosimeter, EDIS) in der Umgebung sowie am Arealzaun überwacht. Zusätzlich dazu führt das ENSI vierteljährlich stichprobenweise Dosisleistungsmessungen am Arealzaun sowie bei Bedarf spezielle Messkampagnen durch. In der Umgebung der Kernanlagen wurden dabei keine signifikanten Erhöhungen der Ortsdosis festgestellt, welche durch den Betrieb der Anlagen verursacht wurde.

Ergebnisse 2020

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

Beim KKB und KKG wurde am Zaun weder mittels TLD resp. EDIS noch bei den vierteljährlichen Messungen des ENSI eine signifikante Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt. Am Zaun des

KKL wurden bei den vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.16 \mu\text{Sv/h}$ 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 0.02 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 einer Transportbereitstellung von radioaktiven Abfällen 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 0.007 mSv. Am Zaun des PSI wurden bei vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.11 $\mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.008 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 0.004 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 (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und zur Schaffung von Transparenz gegenüber der Öffentlichkeit. Ebenso ermöglicht es das Erkennen von Betriebsstörungen und Unfällen, da Erhöhungen gegenüber den natürlichen Dosiswerten im ENSI automatisch angezeigt werden.

Die Messwerte im Jahr 2020 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren bis auf drei Ausnahmen auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Die erhöhte Ortsdosisleistung von 161 nSv/h vom 28. September 2020 um 08:00 Uhr bei der Station B-11 wurde durch eine erhöhte Edelgasabgabe aus der Anlage SINQ des Paul Scherrer Instituts über die zentrale Fortluftanlage verursacht. An derselben Station verursachte ein defektes Hochdosiszählrohr am 10. Oktober um 22:40 Uhr und am 14. Oktober um 03:10 Uhr erhöhte Ortsdosisleistungswerte. Der erhöhte Wert am 14. Oktober führte zu einer automatischen Alarmierung der Notfallorganisation des ENSI. Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

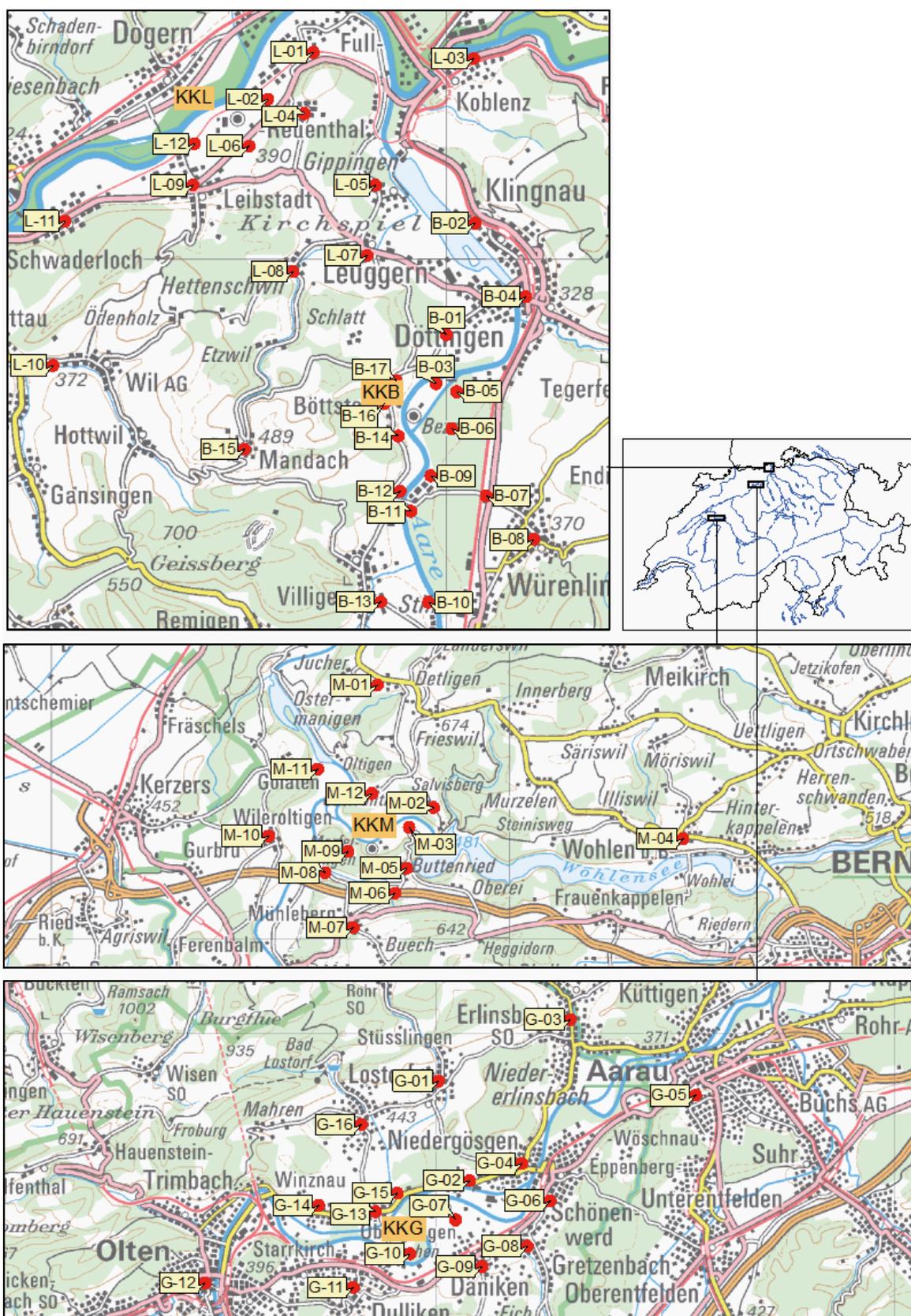
Übersicht

Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) 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 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 Geiger-Müller-Zählrohre in den Sonden ermitteln die Gamma-Dosisleistung im Messbereich von 10 nSv/h (Niederdosiszählrohre) bis 10 Sv/h (Hochdosiszählrohr). Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Zudem erfolgt ein permanenter Datenaustausch mit externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, 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.

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 Zehnminutenmittelwerte der MADUK Stationen abrufbar.



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

Systeminstandhaltung und -ergänzung



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

Im Jahr 2020 wurden rund 40 Messstationen auf den neuen Sondentyp (Figur 2) umgerüstet. Dieser ist mit Solarpanels und zusätzlichen Akkus ausgerüstet und damit unabhängig von einer externen Stromversorgung. An Standorten mit starker Beschattung stösst die Autarkie in den Wintermonaten mit viel Nebel oder Bewölkung an seine Grenzen. An diesen Standorten konnte die bisher genutzte, noch vorhandene Infrastruktur (Kabel, Spannungskonverter) für den Betrieb mit externer Stromversorgung genutzt werden.

Die Messdaten werden primär über das Mobilfunknetz an die Zentrale gesendet. Scheitert die Übertragung via Mobilfunk mehrfach, werden die Daten über das Iridium-Satellitensystem an die Zentrale übermittelt. Diese Funktionalität kann auch gesteuert von der Zentrale getestet werden. Die bisherigen Tests verliefen erfolgreich.

Der Umbau erfolgte mit sehr kurzen Betriebsunterbrüchen von meistens deutlich weniger als einer halben Stunde. Da die neue Messsonde auf denselben Sondenfuss montiert werden kann, musste nur die Sonde getauscht und der neue Datenpfad für diese Messstation in der Zentrale aktiviert werden. Die Aktivierung des neuen Datenpfads konnte grösstenteils automatisiert werden.

Der Umbau der restlichen Stationen auf den neuen Sondentyp ist für 2021 vorgesehen. Das entsprechende Material wurde vollständig Ende 2020 geliefert.

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 permanente Übertragung der Anlageparameter erreichte insgesamt wiederum eine sehr hohe

Verfügbarkeit. Konfigurationsänderungen im Zusammenhang mit dem Übergang in die Stilllegungsphase 1 bei KKM führten zu einem Unterbruch von 2.0 Stunden. Bei KKG wurden zwei Unterbrüche länger als eine Stunde registriert mit einer Gesamtdauer von 2.3 Stunden.

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

Die einzelnen Messstationen arbeiteten auch im Jahr 2020 grösstenteils zuverlässig. Bei der Station M-08 führte eine defekte Messsonde über den Jahreswechsel 2019/2020 zu einem Ausfall der Messungen während 203.5 Stunden. Der Ersatz der Sonde erfolgte erst am 9. Januar, da sich die Kontaktaufnahme mit dem Standortbesitzer schwierig gestaltete.

2020 waren wiederum diverse Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen zu verzeichnen. Die meisten Unterbrüche waren von kurzer Dauer (<4 Stunden). Deren Ursachen konnten nicht immer festgestellt werden. Ein grösserer Unterbruch betraf im Januar gleichzeitig 12 Messstationen aus verschiedenen Messringen während rund 30 Stunden. Ursache war der Ausfall eines Gateways und dessen Redundanz beim Kommunikationsprovider. Bis auf wenige in der Tabelle 1 aufgeführte Ausnahmen konnten die Messdaten nach Ausfall der Kommunikation nachträglich archiviert werden.

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 99.91 %.

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

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
M-08	203.5	203.5	Defekte Messsonde
G-07	3.2	3.2	Blockierter Datenlogger
G-16	31.2	7.8	Ausfall Kommunikation
L-02	31.2	4.7	Ausfall Kommunikation
L-04	14.4	14.4	Blockierter Datenlogger
G-05	5.3	5.3	Blockierter Datenlogger
G-12	88.8	88.8	Defekte Messsonde
L-01	7.2	7.2	Blockierter Datenlogger
G-10	28.8	28.8	Blockierter Datenlogger
M-08	2.0	2.0	Blockierter Datenlogger
G-11	35.0	35.0	Defekte Messsonde
B-12	3.4	3.4	Ausfall 4G-Modem in Messsonde
L-04	1.0	1.0	Defekte Messsonde
G-12	22.7	22.7	Blockierter Prozess in Messsonde

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 im 2020 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. Diese Messungen konnten 2020 wegen eines Defekts des Messgeräts sowie der damit verbundenen lang dauernden Reparatur nicht durchgeführt werden.

Messergebnisse

Im Jahr 2020 wurden insgesamt 13 Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h und eine Überschreitung des Ortsdosisleistungsschwellenwertes von 1'000 nSv/h registriert (Tabelle 2). Davon waren 10 aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen.

Die erhöhte Ortsdosisleistung vom 28. September 2020 um 08:00 Uhr bei der Station B-11 wurde durch eine erhöhte Edelgasabgabe aus der Anlage SINQ über die zentrale Fortluftanlage verursacht, welche das Paul Scherrer Institut für diesen Zeitpunkt meldete.

An derselben Station wurden am 10. Oktober um 22:40 Uhr und am 14. Oktober um 03:10 Uhr erneut Überschreitungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h und am 14. Oktober um 03:10 Uhr auch eine Überschreitung des Ortsdosisleistungsschwellenwertes von 1'000 nSv/h festgestellt. Die Überschreitung des Ortsdosisleistungsschwellenwertes führte auch zu einer unmittelbaren automatischen Alarmierung der Notfallorganisation des ENSI: Die detaillierten Abklärungen zeigten einen Defekt des Hochdosiszählrohres der Messsonde. Das Hochdosiszählrohr wies kurzzeitig eine erhöhte Zählrate auf, während das empfindlichere Niederdosiszählrohr über denselben Zeitraum praktisch konstante Werte lieferte (Figur 3). Die Messsonde an der Messstation B-11 wurde am 14. Oktober um 10:00 Uhr ersetzt. Die Messsonde zeigte auch später (z.B. am 16. Oktober 2020, siehe Figur 3) im Gebäude des ENSI dasselbe Muster in den Zählraten.

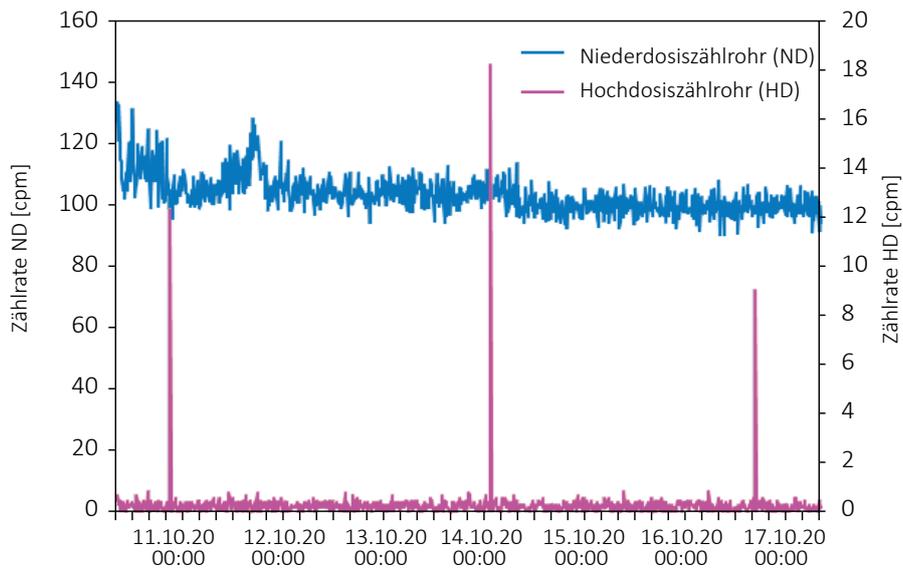
Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

Die Figuren 4 und 5 zeigen die Maxima, die Minima und die Medianwerte der Tagesmittelwerte der jeweiligen Messringe im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke. Bei den Messringen KKB und KKL ist der Einfluss der Umrüstung auf den neuen Sondentyp ersichtlich. Die Unterschiede in der Bandbreite der Messwerte lässt sich durch die etwas unterschiedliche Charakteristik der neuen Messsonden erklären.

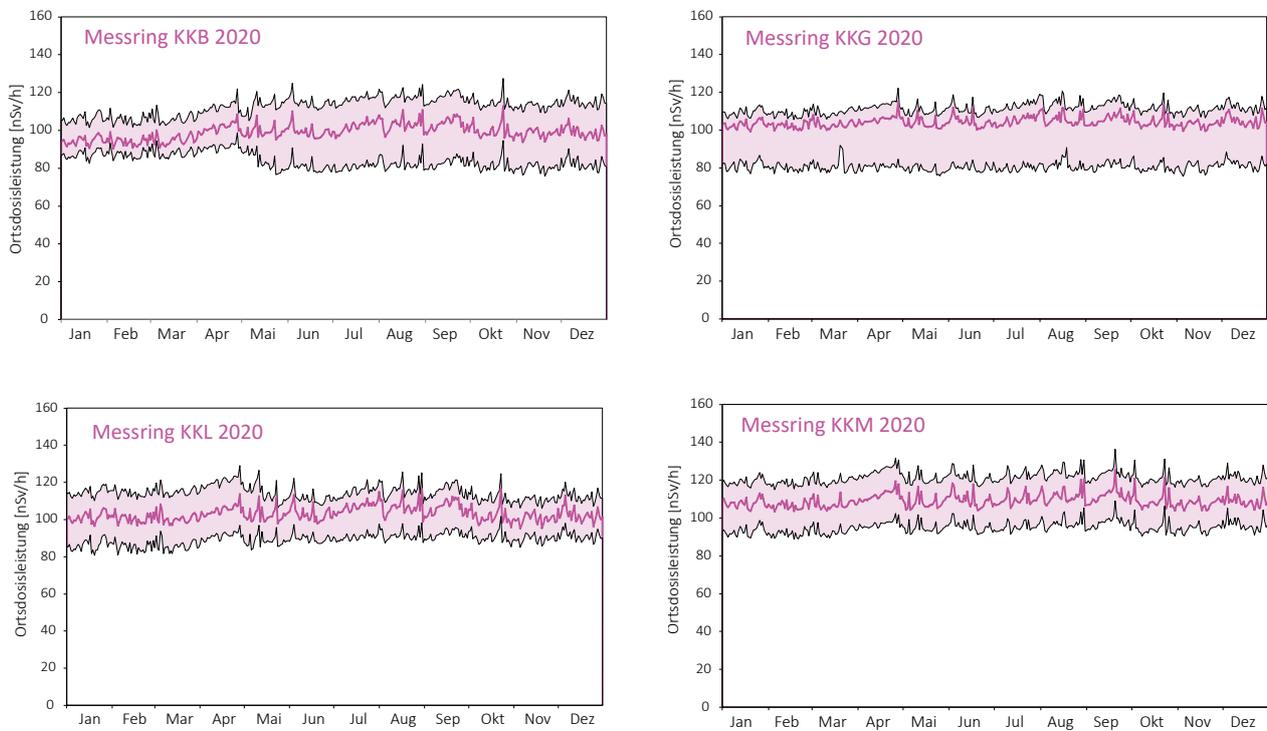
Tabelle 2:

Auflistung der Nettodosisleistungsschwellenwertüberschreitungen im Jahr 2020.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
22.07.2020 20:10	M-04	0.5	61	193
02.08.2020 14:50	M-01	0.2	55	182
02.08.2020 14:50	M-04	0.5	56	174
03.08.2020 16:00	G-05	0.2	52	161
14.08.2020 13:40	G-10	0.2	60	189
16.08.2020 17:40	G-05	0.2	52	151
16.08.2020 18:30	G-06	0.2	57	212
20.09.2020 22:00	M-12	0.2	62	300
20.09.2020 22:20	M-08	0.5	63	315
28.09.2020 08:00	B-11	0.2	59	161
10.10.2020 22:40	B-11	0.2	159	251
14.10.2020 03:10	B-11	0.2	1'311	1'408
06.12.2020 13:20	L-02	0.2	50	151



Figur 3:
 Verlauf der Zählraten des Niederdosiszählrohrs (ND) und des Hochdosiszählrohrs (HD) der Messsonde SN2218, welche bis zum 14.10.2020 um 10:00 Uhr bei der Station B-11 im Einsatz war und sich anschliessend im Gebäude des ENSI befindet.



Figur 4:
 Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2020.

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. 10 - 40 Bq/kg für das Jahr 2020. 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 - 2 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.05 - 0.5 Bq/kg im Jahr 2020. Die konstanten Isotopenverhältnisse von $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.03) und $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.4) zeigen, dass die gemessenen Werte für die Actinide den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 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 300 und 440 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. (Details in [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 Zwiilag angebracht.

Radiochemische Trennmethoden (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-salzsaurer 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 Zwiilag-Areals. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden jeweils ausgewechselt. Im Labor wird die Vaseline-schicht von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen eingeschmolzen. Mittels hochauflösender Gamma-Spektrometrie werden photonen-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 Zwiilag-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10 ml dieser Wasserproben werden für die Tritium-Messung verwendet und grossvolumige Monatsmischproben (ideal 6 Liter) werden für die Langzeit Gamma-Spektrometrie genommen. Gemessen werden anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs , für welches bei den Langzeitmessungen über 2 Tage Nachweisgrenzen von 0.04 Bq/Liter erreicht werden.



Figur 1 : Niederschlagssammler in der Nähe der Zwiilag (Bild: P. Kramer)

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 (^{226}Ra , ^{228}Ra) 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 liegen tiefer als die Nachweisgrenze des verwendeten Messverfahrens. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ liegen derzeit zwischen 0.05 und 0.5 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.1 und 0.3 Bq/kg. In Spuren ist noch ^{238}Pu nachweisbar (0.01 - 0.03 Bq/kg). Bei einzelnen Messungen lagen die Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu unter der Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg. Die Nachweisgrenzen für das Spaltprodukt ^{90}Sr sind etwas höher (< 1 - 3 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für ^{137}Cs (10 - 50 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der Beitrag von Fallout-Cäsium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall. Über die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (im Mittel 0.4) 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 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. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

Weniger aufwändig ist die Auswertung der Staubfangplatten. Mit der monatlichen Kontrolle ist praktisch eine kontinuierliche Überwachung möglich. Seit Beginn der Probennahme lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unter den 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.

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.

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.

Tabelle 1:

Anthropogene Fallout-Isotope in Bodenproben aus der Umgebung der Zwilag (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten fünf Jahre (2016-2020). Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2016	2017	2018	2019	2020
^{90}Sr	< 1 - 2	< 1 - 2	< 1 - 2.5	< 1 - 3	< 1 - 2
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs (1)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	10 - 50	10 - 50	10 - 50	5 - 40	10 - 40
^{238}Pu (2)	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	< 0.005 - 0.03	< 0.005 - 0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8	0.1 - 0.8	0.05 - 0.5
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.05 - 0.3	0.02 - 0.3
^{226}Ra	20 - 30	20 - 30	10 - 24	15 - 30	20 - 30
^{228}Ra	20 - 30	20 - 40	13 - 25	17 - 30	20 - 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.

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 (^{54}Mn , ^{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, gaz, 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'IFSN met également à disposition de l'OFSP un accès direct à son réseau MADUK, mesurant en continu le débit de dose ambiante au voisinage des centrales nucléaires. L'OFSP se doit ensuite de procéder à l'examen critique de l'ensemble de ces données pour

évaluer de manière pertinente l'impact des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce programme de surveillance des immissions au voisinage des installations nucléaires. Le tableau 1 indique les chapitres à consulter pour accéder aux résultats plus détaillés relatifs à un compartiment de l'environnement particulier ou un radionucléide spécifique.

Tableau 1

Tableau récapitulatif indiquant les chapitres du présent rapport à consulter pour accéder aux résultats détaillés de la surveillance du voisinage des installations nucléaires en fonction du compartiment environnemental (milieu) ou du radionucléide d'intérêt.

Milieu/Isotope	Chapitre
Exposition ambiante	8.2 - 8.3
Air/Aérosols (émetteurs γ)	4.1 - 4.2
Précipitations (γ , ^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, seule 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 cas d'un 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

Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que les 4 centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (KKB 1 et 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2020 (voir Chap. 8.1). Comme attendu, les rejets de substances radioactives dans l'air par la centrale nucléaire de Mühleberg ont diminué de façon très importante en 2020, et sont presque nulles pour l'iode par exemple. Par contre, les rejets de substances radioactives dans les cours d'eau ont été supérieurs à ceux déclarés aux cours des années précédentes et ont égalés ceux déclarés par KKB par exemple ; les deux centrales ayant toutefois respectées la valeur cible de 1 GBq pour les rejets liquides.

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population (adulte) avoisinante en termes de doses entre 1981 et 2020. L'augmentation significative de 1986 au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est due à un rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère. A partir des mesures de terre et d'herbe effectuées par la suite par la commission fédérale de surveillance de la radioactivité de l'époque, l'activité rejetée en septembre 1986 avait pu être estimée à 11 GBq (50% de ^{134}Cs , 40% de ^{137}Cs , 7% de ^{60}Co et quelques 3% de ^{65}Zn) et donc inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. Comme le montre la figure 1, l'impact de ce rejet très localisé a constamment diminué depuis. En tenant compte des rejets des années précédentes,

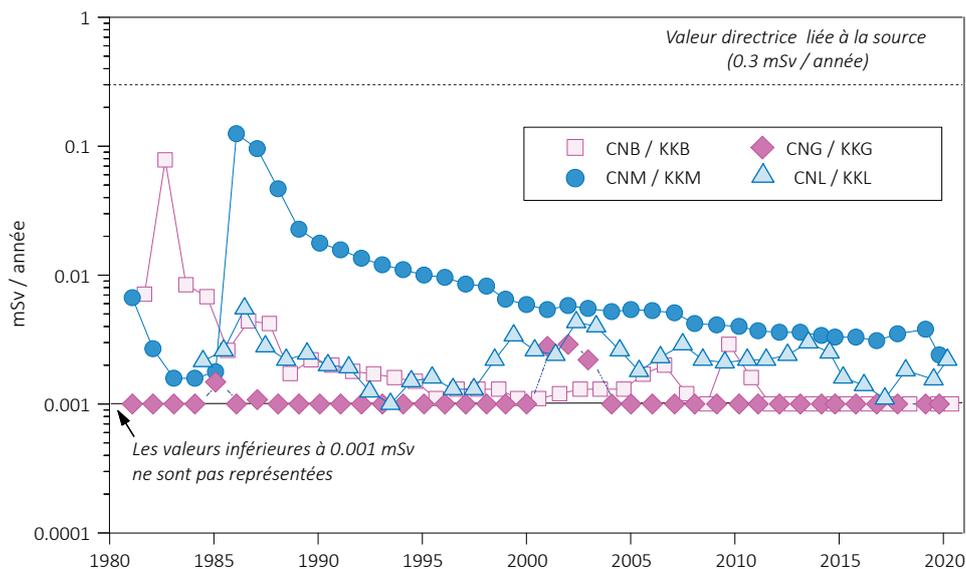


Figure 1: Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2020 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

les doses dues aux émissions des centrales nucléaires reçues par les personnes adultes les plus exposées se sont échelonnées en 2020 entre <0.001 mSv pour KKB et KKG, et env. 0.002 mSv pour KKM et KKL. Pour cette dernière, ces doses atteignent 0.005 mSv par an pour les petits enfants. Pour ces installations, la contribution majeure provient des rejets atmosphériques: essentiellement du ^{14}C pour Leibstadt avec, en plus, à Mühleberg la contribution rémanente des résines rejetées en 1986. Notons que les doses reçues par les personnes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires citées plus haut ont été calculées sur la base des rejets effectifs, en appliquant des modèles de dispersion et en tenant compte des temps de séjour, des habitudes alimentaires et de nombreux paramètres biologiques, physiologiques et environnementaux (voir directive G14 de l'IFSN pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

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. En outre, les installations de stockage des déchets peuvent contribuer à une augmentation de la dose locale à la clôture. Avec l'arrêt de la production à Mühleberg, la contribution de ^{16}N disparaît, toutefois, les travaux de démantèlement, tels que ceux qui ont lieu à KKM, peuvent entraîner des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture. Ceci a été constaté lors d'un contrôle périodique sur site effectué par l'IFSN en 2020 où une valeur instantanée de débit de dose de 0.32 $\mu\text{Sv/h}$ a été mesurée (voir chapitre 8.3). Toutefois, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale de Mühleberg

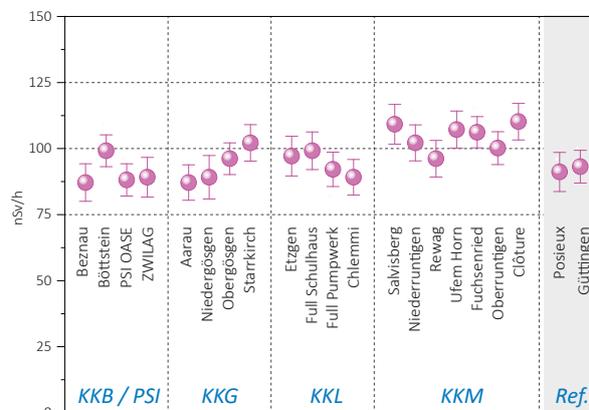


Figure 2: Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2020 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (gris).

a montré une élévation moyenne (calculée sur la base de la valeur trimestrielle mesurée) de la dose ambiante de 0.007 mSv par semaine, après soustraction du bruit de fond naturel.

Toutes ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés. En effet, cet article stipule que la dose ambiante ne doit pas dépasser 0.02 mSv par semaine aux endroits situés à l'extérieur de ces secteurs où peuvent séjourner durablement des membres du public. Cette valeur peut être dépassée jusqu'à 5 fois (0.1 mSv/semaine) dans les endroits où personne ne séjourne durablement, comme c'est le cas à la clôture des centrales nucléaires. Il convient de relever qu'il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne, puisque le temps de séjour n'est pas considéré. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside durant de longues périodes en ces endroits.

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 ont été installés en 2019 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. A noter 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 et d'environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas.

Les doses des neutrons relevées au cours des 2 premiers trimestres 2020 autour du PSI-West étaient presque partout inférieures à la limite de détection ou très faibles. Ceci était attendu puisque les installations étaient à l'arrêt, au moins sur une grande partie de la période. En seconde partie d'année, les doses des neutrons sont parfois plus élevées (valeur maximale de 0.138 mSv/trimestre au 4ème trimestre), mais similaires à celles enregistrées au cours des mêmes périodes des années précédentes. Pour les 3 points autour de SwissFEL, les doses des neutrons sont restées inférieures à la limite de détection ou très faibles pendant toute l'année. Les doses des photons sont restées au niveau de la radiation naturelle dans tous les emplacements du PSI-West en 2020. Autour de SwissFEL, les valeurs sont parfois jusqu'à 1.5 fois plus élevées qu'au PSI West mais restent au niveau de l'irradiation naturelle.

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.

Notons que l'OFSP a décidé de déménager la station URAnet aero de Fribourg vers la localité de Ufem Horn, située au voisinage immédiat de la centrale nucléaire de Mühleberg après sa mise à l'arrêt fin 2019. En effet, les rejets de radioactivité dans l'air qui pourraient éventuellement survenir durant les futurs travaux de démantèlement seraient nettement plus faibles et localisés qu'en phase d'exploitation. Ce changement dans la nature du risque a donc motivé le déménagement de la station, qui a eu lieu en février 2020, soit quelques mois avant le début des travaux effectifs de démantèlement.

Aucun radionucléide d'origine artificielle résultant de l'exploitation des centrales nucléaires n'a pu être mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2020 (voir aussi chapitre 4.2). Par contre, la station de mesure URAnet aero du PSI a mesuré des traces de ^{24}Na dans les aérosols de l'air le 28.09.2020. Ce radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15h) est produit par exemple dans les accélérateurs des centres de recherche. L'évaluation du spectre a montré un signal faible mais significatif provenant de ce radionucléide (voir fig. 1 a,b,c - chap. 4.2) avec une concentration d'activité d'env. 1 mBq/m³ moyennée sur toute la période de collecte, à savoir 12 h. Bien qu'inhabituelles, les activités rejetées sont restées nettement inférieures aux limites de rejet autorisées, aussi bien annuelle qu'à court terme. Cette légère augmentation de la radioactivité dans l'air, de courte durée (env. 10 minutes) et localement limitée, n'a pas eu de conséquences pour la santé. La détection d'une si faible concentration de radioactivité dans l'air par la sonde URAnet montre toutefois l'efficacité du système et son bon état de fonctionnement. Pour plus de détails, le lecteur pourra également consulter le site <https://www.radenviro.ch/fr/detection-de-traces-de-sodium-24-dans-lair-par-un-detecteur-uranet-aero/>.

Les activités du ^{137}Cs enregistrées par URANet en 2020, sont quant à elles restées inférieures à la limite de détection d'env. 4-6 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), puisque la limite de détection de ce dispositif très sensible dédié à la mesure de traces, est de l'ordre de 0.2 µBq/m³ pour ce radionucléide pour un temps de collecte de 7 jours et une mesure en laboratoire de 48h. Dans les filtres HVS de la station de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer, les concentrations de ^{137}Cs ne sont pas distinguées de celles enregistrées sur le site de référence de Güttingen. La valeur maximale de 1 µBq/m³ a été enregistrée en avril 2020, tout comme à Güttingen, et pourrait contenir une contribution due au ^{137}Cs émis par les incendies de forêts qui ont fait rage en Ukraine pendant plusieurs jours à cette période (voir chapitre 4.1).

Des traces de ^{24}Na ont également été sporadiquement mesurées dans les filtres HVS de la station de Klingnau. La concentration maximale mesurée s'élève à 111 ± 43 µBq/m³ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immission dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/m³.

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 généralement entre 0.2 et 1.0 mBq/l par exemple pour le ^{137}Cs .

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 et du ZWILAG sont généralement restées proches de la limite de détection

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2020.

Lieu	Valeur min/max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruntingen * (environs KKM)	< 2.0 - 2.3	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2.0	-
Full (environs KKL) *	< 2.0 - 2.3	-
Beznau (environs KKB) **	< 1.7 - 25.4	9.7
PSI **	< 1.7 - 24.8	-
ZWILAG **	< 1.7 - 5.8	2.8

* mesures OFSP / ** mesures PSI

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 2020 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 99 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Les doses supplémentaires qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales sont ainsi très faibles, de l'ordre de 1 micro-Sv 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 2020 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 2020. 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 confirment les résultats précédents et montrent que les valeurs enregistrées au voisinage des installations nucléaires ne se distinguent pas de celles mesurées sur les sites de référence.

Les denrées alimentaires constituent le prochain maillon susceptible de transférer les radionucléides jusqu'à l'homme. Les résultats des mesures de la radioactivité dans les aliments, coordonnées par l'OFSP en étroite collaboration avec les laboratoires cantonaux, n'ont pas révélé de marquage attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires. Les mesures additionnelles de l'OFSP, en particulier celles du programme germano-suisse au voisinage de Leibstadt dans les produits agricoles et les poissons ont confirmé ce constat, puisqu'aucun émetteur gamma d'origine artificielle, hormis des traces de ^{137}Cs attribuable à d'anciennes contaminations (valeurs voisines des limites de détection), 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.

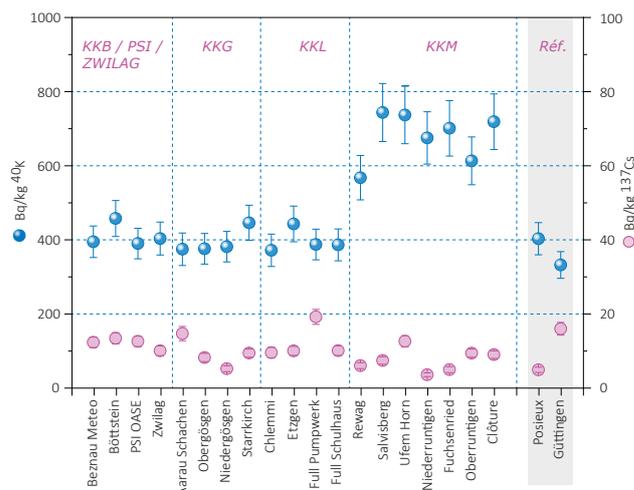


Figure 3:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2020 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisées).

Avant l'arrêt définitif de l'exploitation de la centrale nucléaire de Mühleberg le 20 décembre 2019, l'IFSN, en concertation avec l'OFSP, a renforcé le programme existant de surveillance de la radioactivité dans l'environnement à proximité de KKM pour la période 2017-2019, en particulier dans le milieu terrestre; ce programme complémentaire avait pour objectif de permettre l'évaluation de l'impact radiologique éventuel des travaux de désaffectation de la centrale nucléaire de Mühleberg sur l'environnement et la population avoisinante.

Une description détaillée du programme complémentaire, y compris une évaluation des résultats de mesure, se trouve dans le rapport intitulé «[Point zéro démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg \(CNM\) 2017-2019](#)», publié en avril 2021.

En résumé, les résultats des mesures n'ont mis en évidence aucune indication d'immissions récentes d'actinides ou de produits de fission pouvant être attribués au fonctionnement de la centrale nucléaire de Mühleberg. En effet, les évaluations des rapports isotopiques et la comparaison avec les valeurs de référence usuellement enregistrées sur le plateau suisse permettent de conclure que les radionucléides détectés dans l'environnement proviennent (hormis le tritium) d'anciennes contaminations. Ainsi les actinides et le ^{90}Sr peuvent être attribués aux retombées des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère du milieu du siècle dernier, tandis que les petites quantités de ^{137}Cs encore présentes proviennent également des retombées de l'accident de Tchernobyl en 1986 ainsi que du rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère par la CNM qui a également eu lieu en 1986. Les concentrations des radionucléides spéciaux tels

que le ^{55}Fe et le ^{63}Ni dans les sols et les sédiments sont restées inférieures aux limites de détection. L'origine des traces de ^3H mesurées sporadiquement dans les échantillons de lait n'a pu être déterminée de manière certaine, mais les résultats de mesure montrent qu'il provient très probablement d'autres sources que du fonctionnement de la CNM.

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

Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1 il y a une dizaine d'années, la majeure partie des produits d'activation tels que le ^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co était rejetée dans les eaux fluviales par la centrale de Mühleberg. Mais depuis 2016 les activités rejetées (hors tritium) par cette dernière ont à leur tour significativement baissé à tel point qu'elles étaient depuis 2018 inférieures à celles rejetées par les centrales de Beznau et de Leibstadt. Comme corolaire à cette diminution des rejets, aucune trace de ^{54}Mn ou des isotopes du cobalt n'ont plus été

mesurées dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln depuis 2016. En 2020, les rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de Mühleberg ont été supérieurs à ceux des années précédentes (avec le ^{60}Co et le ^{54}Mn comme isotopes dominants), mais les activités 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.

Le ^{137}Cs , présent dans certains échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin, est essentiellement dû à la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes atomiques des années 60; il n'existe ainsi pas de corrélation, pour cet isotope, entre les activités rejetées par les centrales et les valeurs mesurées dans les eaux.

En revanche, l'augmentation de la concentration journalière de ^3H dans l'eau de l'Aar en aval de la centrale de Mühleberg mesurée par l'Université de Berne en juin 2020 (jusqu'à 5 Bq/l) est directement lié à un rejet autorisé de tritium par la centrale (voir chapitre 4.6). L'université de Berne avait initié un programme de mesure du tritium d'une très grande sensibilité en amont et en aval de la centrale nucléaire de Mühleberg en 2017, pour une durée initiale de 3 ans, qui a été prolongée de 3 années supplémentaires. A noter qu'un tel rejet n'a pas entraîné d'augmentation de la concentration mensuelle moyenne du tritium de l'eau de l'Aar, qui est restée inférieure à 2 Bq/l pendant cette période. Les mesures de surveillance usuelles ne peuvent donc pas mettre en évidence des variations de courte durée d'une si faible ampleur.

De manière générale, les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2020 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-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation des concentrations de tritium dans l'Aar à Brugg et à Klingnau, ainsi que, dans une moindre mesure, dans le Rhin (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants de tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant la révision (voir chapitre 8.1).

Une légère augmentation des concentrations de ^3H semble également avoir été mesurée en janvier dans l'Aar à Klingnau et dans le Rhin à Pratteln, toutefois la méthode de mesure mise en œuvre pour l'analyse du tritium dans ces deux stations est moins sensible (limite de détection de 5 Bq/l) et les valeurs enregistrées étaient légèrement supérieures (6 à 8 Bq/l) à cette limite de détection, avec une grande incertitude. Les valeurs mesurées dans le Rhin à Weil am Rhein sont restées voisines des 2 Bq/l. Les émissions de tritium dans l'Aar par le PSI et la centrale nucléaire de Beznau ont par ailleurs été conformes à la normale pendant cette période (voir chapitre 8.1).

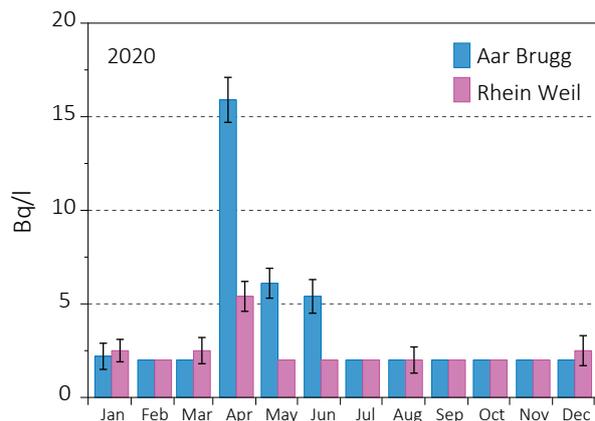


Figure 4: Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2020.

Contrairement à ce qui a été constaté dans les échantillons d'eau, l'augmentation des activités rejetées dans le milieu aquatique par la centrale nucléaire de Mühleberg en 2020 s'est traduit immédiatement par l'apparition de traces sporadiques de ^{54}Mn et de ^{60}Co dans les échantillons de sédiments prélevés à Hagneck, mais également à Klingnau et Pratteln en ce qui concerne le ^{54}Mn . Les activités de ^{54}Mn rejetées dans l'Aar en 2020 proviennent à près de 90% de KKM. Le ^{60}Co , systématiquement décelé par le passé dans les échantillons de sédiments, n'avait pas pu être mesuré en 2019 en raison de la diminution des rejets par KKM.

Le ^{54}Mn et le ^{60}Co sont des produits d'activation qui ne sont pas (ou peu) dissous dans l'eau, mais présents sous forme particulaire (corrosion) dans les effluents liquides. C'est la raison pour laquelle, les traces des rejets liquides sont essentiellement mesurables dans les sédiments. Les activités mesurées sont par ailleurs très faibles et ne présentent pas de risque pour la santé; elles témoignent de l'efficacité des programmes de surveillance mis en œuvre.

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 et près de Wöschnau, dans le lac du barrage de Klingnau ainsi que dans le Rhin, près de Augst, en 2020 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle.

Comme chaque année, un échantillon de plantes aquatiques a été prélevé en 2020 dans chacune des stations de surveillance. Le ^{137}Cs était mesurable dans deux échantillons (Wöschnau: 1.8 Bq/kg, Muttenz: 4.2 Bq/kg). L'échantillon prélevé dans le lac du barrage de Klingnau contenait du ^{131}I (18.3 Bq/kg) très probablement utilisé en médecine (^{131}I produit dans les centrales nucléaires

est accompagnés d'autres radionucléides, tels que le ^{134}Cs et le ^{137}Cs). L'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Döttingen et Pratteln 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.

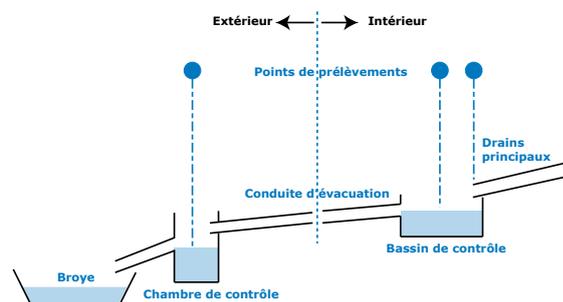


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

En 2020, 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 4h 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 2020. 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 2020

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 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 2020.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2020.

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 n'a pas dépassé la valeur directrice 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 liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour l'ensemble du site PSI/ 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 l'eau de l'Aar et du Rhin ou dans les sédiments 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 et P. Vojtyla

CERN - Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE), Genève

Résumé

Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que, pour 2020, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose effective maximale délivrée aux membres du public Suisse est demeurée inférieure à 0.00002 mSv. Le contrôle des immissions n'a révélé que de faibles traces de radioéléments dans des échantillons prélevés dans les cours d'eau. Aussi, suite au déploiement d'une méthode très sensible de surveillance des immissions du tritium dans l'air du site de Meyrin, des concentrations négligeables de ce radioélément ont été mesurées dans le courant de l'année. 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

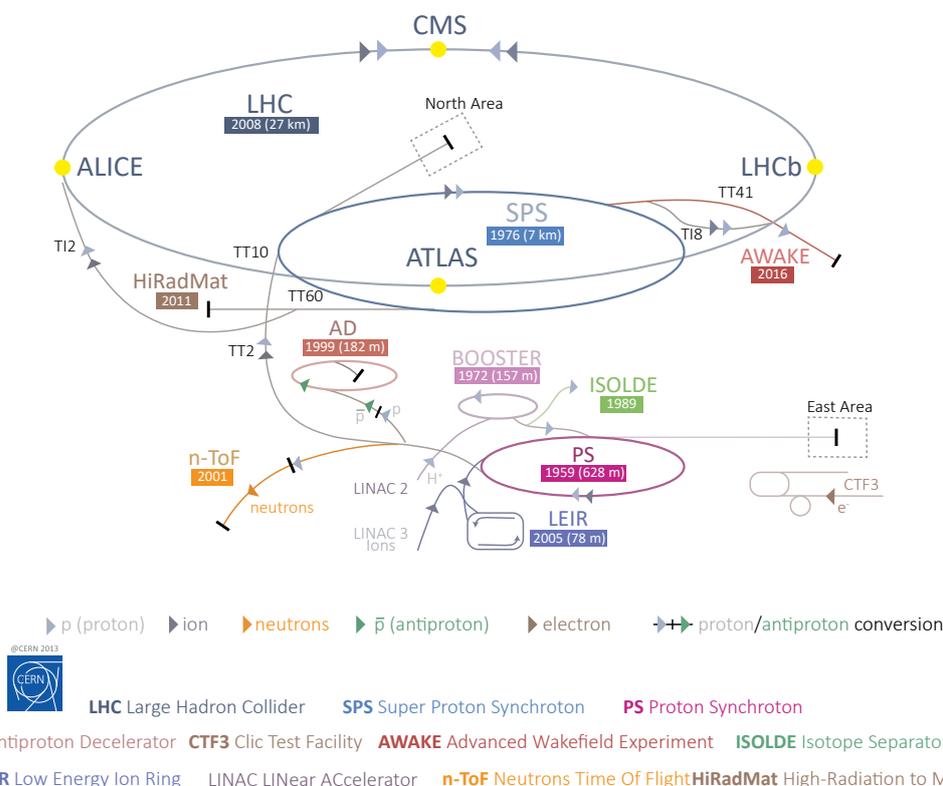


Figure 1:

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 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 2020, 40 stations de ce type étaient en opération. Les points d'extraction d'air, d'où des

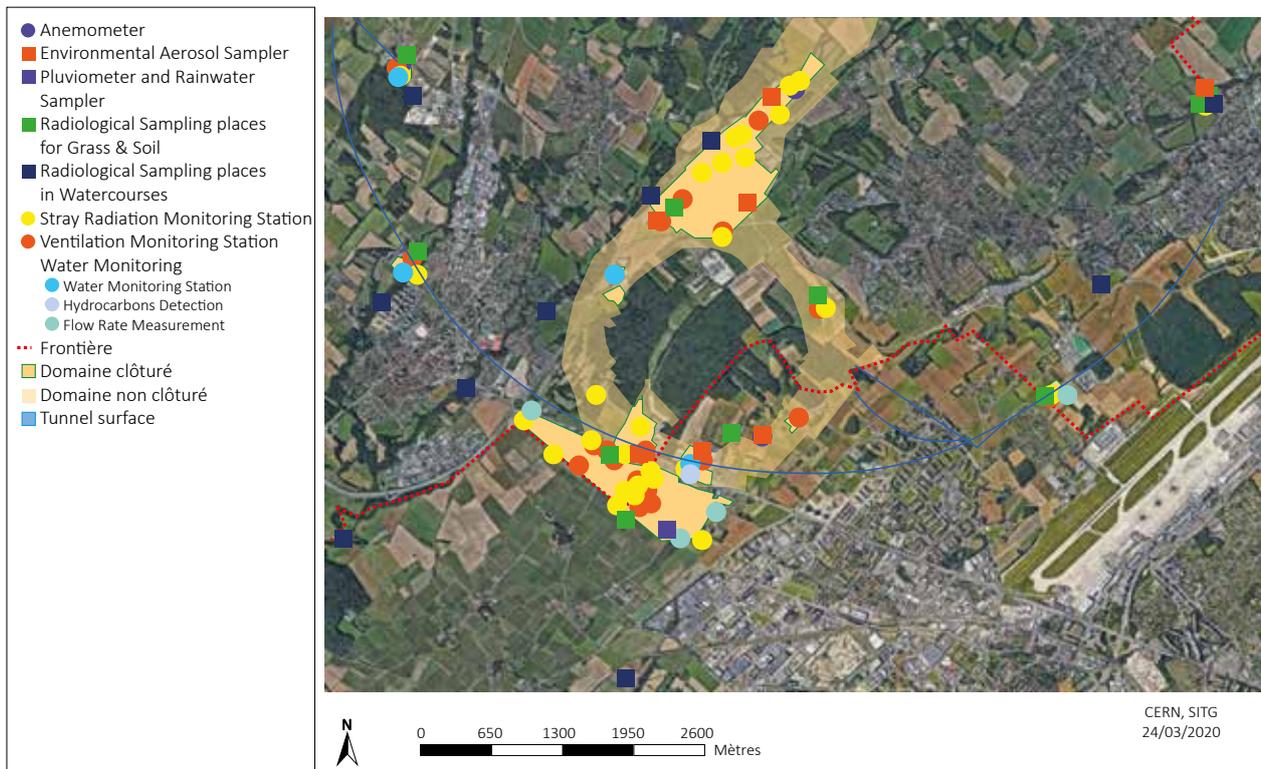


Figure 2:

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

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 2020, 40 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 (13 stations en 2020); 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 l'humidité pour la mesure du tritium dans l'air), des échantillons d'herbe (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 (18 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 2020

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2020

Le deuxième long arrêt du CERN, le Long Shutdown 2 ou simplement LS2, a débuté en décembre 2018 et la remise en service du complexe des accélérateurs s'effectuera progressivement en 2021. Seul le LINAC 4 a fait l'objet d'essais tandis que le groupe de radioprotection a recommencé l'évaporation d'eau tritiée (site de Meyrin).

Comme pour le précédent long arrêt LS1 de 2013–2014, l'impact des activités du CERN durant le LS2 demeure négligeable.

Rayonnement diffusé

Des activités de vérifications radiographiques de soudures ont été détectées à la barrière du site de Meyrin, aux abords d'une zone de passage de véhicules et de piétons côté France, pour un total intégré à l'année inférieur à 1 µSv en termes d'équivalent de dose ambiant.

Tableau 1:

Rejets radioactifs dans l'air en 2020. Le site de Meyrin est attenant à certains sites du SPS et du LHC et ceux-ci sont donc groupés. Les sites combinés sont identifiés par un symbole «&».

Site ou groupe de sites proches (Pays)	Tritium
	GBq
Sites de Meyrin, SPS 6 & LHC 1, SPS 7 & LHC SM18	31.0
SPS BA5	1.4

Tableau 2:

Rejets dans les cours d'eau en 2020.

Origine principale du rejet, Cours d'eau récepteur	Tritium
	GBq
Site de Meyrin, Nant d'Avril (CH)	0.5
Site de Prévessin, Lion (F)	5.5
LHC PA7, Affluent du Marquet (F)	0.02
LHC PA8, Nant (F)	1.5

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère et dans les cours d'eau

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère et dans les cours d'eau, qui concernent le territoire Suisse, sont résumés au Tableau 1 et 2 respectivement. Les rejets dans certains cours d'eaux localisés sur le territoire français sont mentionnés dans ce présent rapport car ils terminent leurs cours dans le lac Léman (Marquet, Nant) ou rejoignent le Rhône (Lion).

Surveillance des immissions

En 2020, le CERN s'est doté de systèmes de prélèvement passifs de l'humidité de l'air, déployés sur le site de Meyrin, en vue de contrôler les immissions de tritium. Les rejets atmosphériques des installations locales ont dérivé en des concentrations mensuelles moyennes de 0.04 Bq/m³, à comparer avec la limite d'immission dans l'air suisse de 2'200 Bq/m³ [2].

Concernant l'environnement aquatique, des traces de radionucléides ont été mesurées dans certains échantillons des cours d'eau récepteurs (Tableau 3). La détection de très faibles traces de tritium dans le Nant de Rebatière (F, mentionné car affluent de la Versoix, CH), juste supérieures aux fluctuations naturelles, peut apparaître comme en contradiction avec le fait qu'aucun rejet de tritium dans ce cours d'eau n'est déclaré dans le Tableau 2. Ceci ne constitue pas une anomalie car le prélèvement effectué dans la rivière est ponctuel tandis que les rejets sont évalués sur la base d'un prélèvement continu, analysé mensuellement.

Comme pour les années précédentes, des traces de ⁵⁴Mn ont été mesurées dans des échantillons de bryophytes et de sédiments prélevés dans le Lion (F). Les bryophytes sont d'excellents bioaccumulateurs de pollution. Alors que la mesure de l'eau de rivière est une valeur instantanée, ces végétaux, qui peuvent être assimilés à des collecteurs, permettent d'identifier des radionucléides ayant été présents dans l'eau.

Aucun autre radioélément d'origine artificielle n'a été détecté dans aucun autre échantillon

Tableau 3:

Concentrations dans les échantillons prélevés dans les cours d'eau en 2020.

Cours d'eau (Date d'échantillonnage)	³ H Bq/l	Bryophytes ⁵⁴ Mn Bq/kg	Sédiments ⁵⁴ Mn Bq/kg
Lion (09.09.2020)	< LD	6.5 ± 4.5	0.2 ± 0.1
Nant (04.09.2020)	7.2 ± 1.1	< LD	< LD
Nant de Rebatière (04.09.2020)	2.1 ± 1.0	< LD	< LD
Nant d'Avril (04.09.2020)	3.2 ± 2.0	< LD	< LD

collecté dans le cadre de la surveillance des immissions. Le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN peut donc être considéré comme très faible.

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du groupe de référence a été calculée à partir des équivalents de dose ambiants mesurés aux barrières du site et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion basé sur les directives [3, 4]. Les membres du public Suisse ont reçu une dose efficace de maximum 0.00002 mSv. Cette dose est estimée sur la base d'un scénario très conservateur d'exposition aux rejets dans le Nant (F), qui rejoint le territoire Suisse.

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 2020 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];
- Les installations du CERN étaient en période de long arrêt ; la dose efficace reçue par les membres du public Suisse est restée négligeable (0.00002 mSv).
- Des radionucléides ont été détectés dans des échantillons prélevés dans 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.

Références

- [1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2017), Annexe 3.
- [3] 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).
- [4] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).

Glossaire

AD	Décélérateur d'antiprotons
AWAKE	Advanced WAKEfiled Experiment
GNGS	CERN Neutrino to Gran Sasso
CLIC	Compact Linear Collider, projet impliquant un collisionneur linéaire
CTF3	CLIC Test Facility, installation de test pour le projet CLIC
HIRADMAT	Hi Irradiation to Materials, tests d'irradiations de matériaux
ISOLDE	Isotope Separator On-Line Device- Séparateur de radio-isotopes en ligne
LEIR	Low Energy Ion Ring, stockage des ions lourds avant leur accélération par le PS
LHC	Large Hadron Collider- Grand collisionneur d'hadrons
LINAC2	Accélérateur linéaire pour les protons, injecteur du PSB
LINAC3	Accélérateur linéaire d'ions lourds, injecteur du LEIR
LINAC4	Accélérateur linéaire pour les protons, en cours de test
MEDICIS	Medical Isotopes Collected from ISOLDE – Isotopes médicaux collectés d'ISOLDE
n-TOF	neutron Time-Of-Flight, expérience impliquant une source de neutrons de spallation
PSB	Proton Synchrotron Booster- accélérateur injecteur pour le PS et pour l'ISOLDE
PS	Synchrotron à protons
SPS	Super synchrotron à protons

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 2020 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Le LHC, mais aussi la majorité des grandes installations du CERN étant à l'arrêt en 2020, aucune trace de radionucléides habituellement produits dans les installations du centre de recherche, n'ont pu être détectées au cours de l'année sous revue, mis à part des traces de ^{22}Na .

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 que la quasi totalité des installations du CERN étaient à l'arrêt pendant l'année 2020; le deuxième long arrêt du CERN, le Long Shutdown 2 (LS2), qui a débuté en décembre 2018, c'est en effet poursuivi en 2020 et la remise en service du complexe des accélérateurs s'effectuera progressivement en 2021. Seul le LINAC 4 a été (partiellement) en service.

Mesures de l'exposition ambiante

Douze sites ont été surveillés en 2020 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 7 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. En raison de la pandémie de COVID, les TLD n'ont pas été changés à la fin du 1^{er} trimestre 2020 et la première période de mesure couvre les mois de janvier à juin (inclus).

Les équivalents de dose ambiants des neutrons et des photons relevés dans les emplacements autour du CERN en 2020 étaient faibles, de l'ordre de l'irradiation naturelle (0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons et environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas). Les doses des neutrons étaient généralement inférieures à la limite de détection, avec quelques valeurs mesurables qui sont toutefois restées faibles.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2020 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 88 et 120 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 106 ± 3 nSv/h; moyenne des sites distants 105 ± 10 nSv/h).

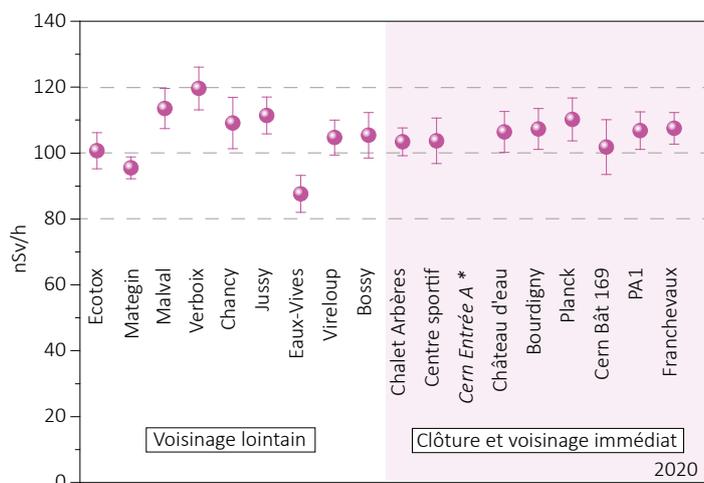


Figure 1: Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2020 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol (* pas de mesure en 2020)

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 2020. 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 4 à 6 mBq/m³ pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2020. 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.

Tableau 1 :

Concentrations du ^7Be mesurées en 2020 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

*Entre la mi-mars et la fin juin, les filtres HVS de la station du CERN ont été changés toutes les deux semaines, le nombre total d'échantillons mesurés en 2020 est donc de 45, contre 50-53 aux autres stations.

Station de collection à haut débit	Valeur min/max (mBq/m ³)	Moyenne (mBq/m ³)
CERN (Meyrin/GE)*	1.2 - 7.5	4.2 ± 1.5
Posieux/FR	2.0 - 8.0	4.7 ± 1.7
Klingnau/AG*	1.2 - 7.7	4.0 ± 1.7
Güttingen/TG	0.9 - 9.0	4.3 ± 1.7
Cadenazzo/TI	0.8 - 8.5	5.0 ± 1.8

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 dans les tunnels du CERN). Cependant, les installations du CERN étant (presque) toutes à l'arrêt, il n'y a pas eu de ^7Be émis par le CERN dans l'atmosphère en 2020. Le tableau 1 ne montre en effet pas de différence notable entre les concentrations de ^7Be mesurées en 2020 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Des traces de ^{22}Na , également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre 0.2 et 1.0 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs (valeur maximale de 0.6 ± 0.2 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) provenant de la remise en

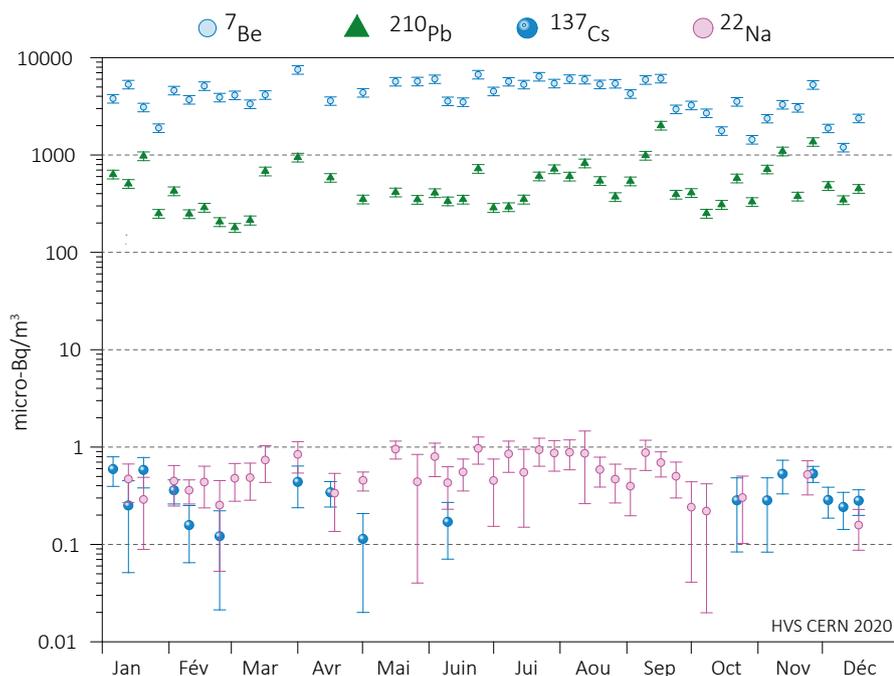


Figure 2 :

Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2020. En raison du semi-confinement, les filtres ont été changés toutes les 2 semaines, entre la mi-mars et la fin juin 2020.

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.

Tout comme en 2019, mais contrairement aux années précédentes, aucune trace de ^{131}I ou de ^{24}Na n'a été mise en évidence dans les filtres aérosols en 2020. Ces radio-isotopes de courte demi-vie sont produits dans les installations du CERN et sont sporadiquement mesurables dans l'environnement quand celles-ci sont en fonction.

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 ne se distinguent pas de celles relevées dans des sites hors de son influence, tel que Posieux/FR. Par contre au point situé à l'intérieur de la clôture (BAT588) des traces de ^{22}Na ont été détectées (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au chapitre 3.1).

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux prélevés

au voisinage proche du centre de recherche ont confirmé ce constat. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioéléments d'origine 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.

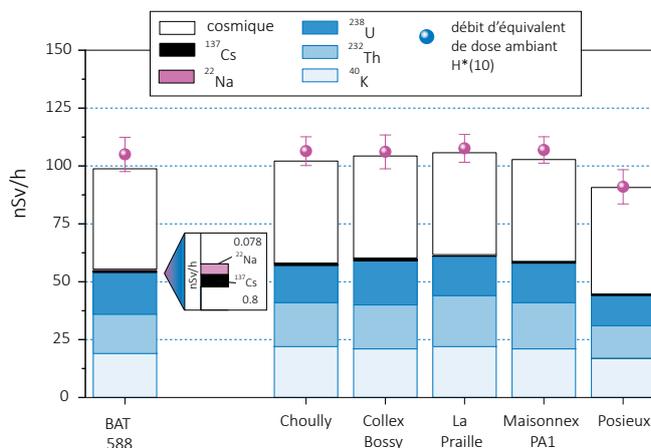


Figure 3 :

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 2020. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

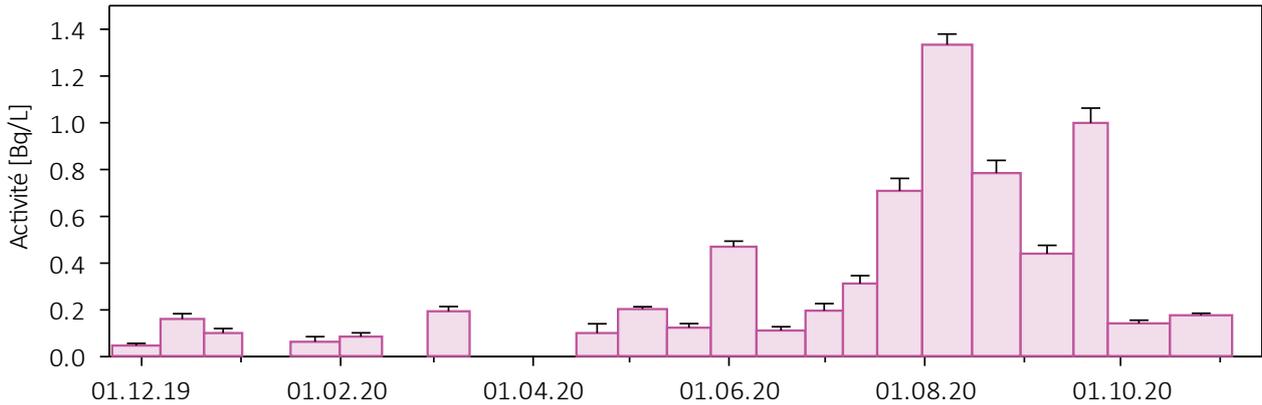


Figure 4 : Activités du ⁷Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'Avril entre novembre 2019 et novembre 2020

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 2020. 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 22 novembre 2019 et le 13 novembre 2020, avec un temps d'intégration de 14 ± 2 jours par échantillon. A noter que les laboratoires de l'Université de Genève ayant été fermés entre le 16 mars et le 8 juin 2020 à cause de la pandémie, certaines analyses ont été reportées de plusieurs semaines, ce qui a pu entraîner la disparition de radioisotopes de courte période.

Les échantillons d'eau sont acidifiés pour éviter toute adsorption d'éléments à la surface des récipients, avant d'être filtrés à 1.2 µm. Les filtres sont séchés à l'air et pesés. Le filtrat est évaporé à sec et le résidu repris dans de l'acide nitrique. Les résultats des mesures sur les eaux et les filtres sont ensuite agrégés pour obtenir un résultat global sur l'eau (eau brute). Les eaux ayant été acidifiées avant traitement, la répartition des radioisotopes entre l'eau et les particules ne correspond plus à celle existant dans la rivière.

1 J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°21 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2019 – Novembre 2020; Département F-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Janvier 2021)

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 0.34 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ⁷Be (1.33 ± 0.05 Bq/l) a été mesurée au mois de septembre 2020.

Le ¹³⁷Cs, 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 trois reprises, avec une valeur maximale de 0.007 ± 0.001 Bq/l. Le ²²Na a été détecté dans trois échantillons (0.003 à 0.005 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 m³/période) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de ⁷Be pour la période 2019-2020 est ainsi de 1'790 MBq/an au minimum et de 2'180 MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent dans la moyenne haute des périodes de mesure précédentes (fig. 5).

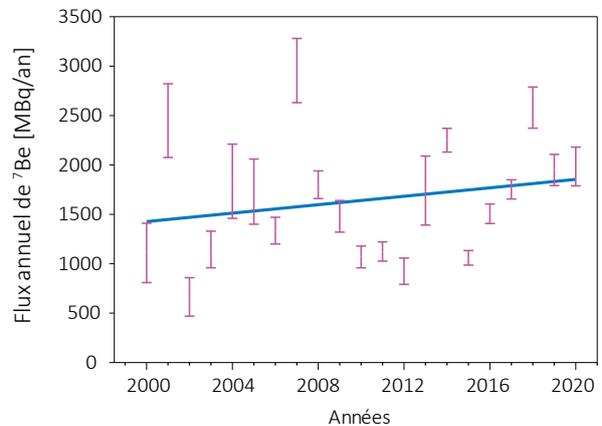


Figure 5 : Estimation des flux annuels minimums et maximums de ⁷Be dans le Nant d'Avril (données Département F-A. Forel)

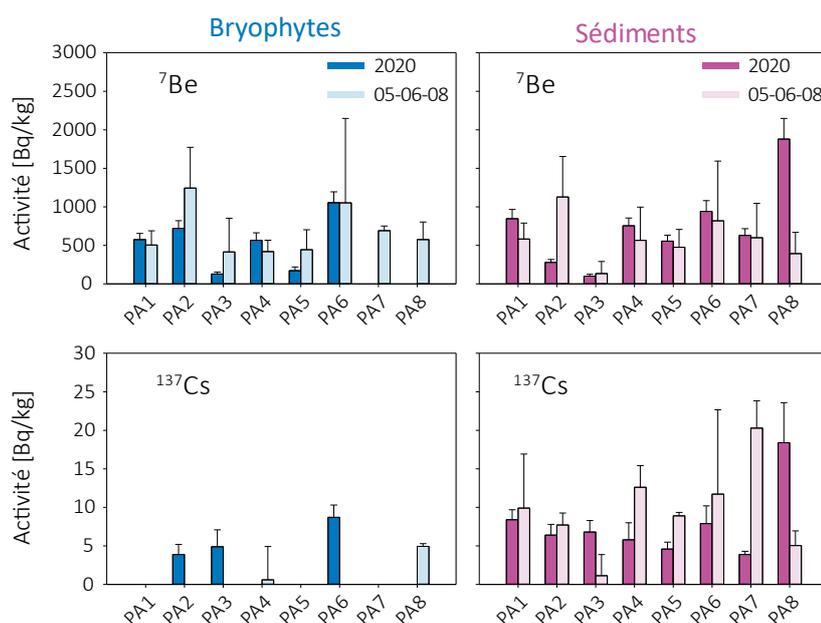


Figure 6 :

Activités du ⁷Be et du ¹³⁷Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8) en 2020 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 avait pas d'échantillon de bryophytes aux points 7 et 8 en 2020.

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ⁷Be et de ¹³⁷Cs dans tous les échantillons avec des activités spécifiques variant respectivement entre 297 et 2'271 Bq/kg, et entre 2.7 et 10.6 Bq/kg.

Les hautes valeurs de ⁷Be mesurées en juin (2'271 Bq/kg) et en août (2'132 Bq/kg) sont les 4^{ème} et 6^{ème} valeurs les plus élevées mesurées depuis 20 ans. Elles restent toutefois deux fois plus basses que le maximum mesuré (4'595 Bq/kg) en 2010.

Aucun radioisotope artificiel parfois observé (⁶⁰Co, ⁵⁷Co, ⁵⁴Mn) par le passé n'a été détecté dans les sédiments au cours de la période de mesure.

Afin de mettre en évidence d'éventuelles augmentations des immissions radioactives dans le milieu aquatique dues au fonctionnement du LHC, des sédiments et des bryophytes sont par ailleurs prélevés une fois par an aux 8 principaux points de rejet des eaux du LHC et analysés par le département F.-A. Forel. Malgré que le LHC ait été à l'arrêt depuis fin mars 2019 et pendant toute l'année 2020, la surveillance a été poursuivie.

Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux points de rejet du LHC (période d'échantillonnage du 24.09 au

16.10.2020), se sont échelonnées entre 102 et 1'880 Bq/kg pour le ⁷Be et entre 3.9 et 18.4 Bq/kg pour le ¹³⁷Cs. Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ⁷Be variant entre 129 et 1'053 Bq/kg et entre 3,9 et 8.7 Bq/kg pour le ¹³⁷Cs, certains sites présentant des valeurs inférieures à la limite de détection. La figure 6 montrent que ces résultats sont comparables à ceux de 2005, 2006 et 2008 alors que le LHC n'était pas encore en fonction (programme point zéro LHC).

En résumé, les résultats du programme de surveillance du Nant d'Avril 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 ¹³⁷Cs. Le ⁷Be est d'origine naturelle et les mesures effectuées ne peuvent pas mettre en évidence une origine anthropique. Le ¹³⁷Cs résulte de l'érosion des sols contaminés par les essais nucléaires dans l'atmosphère et par l'accident de Tchernobyl.

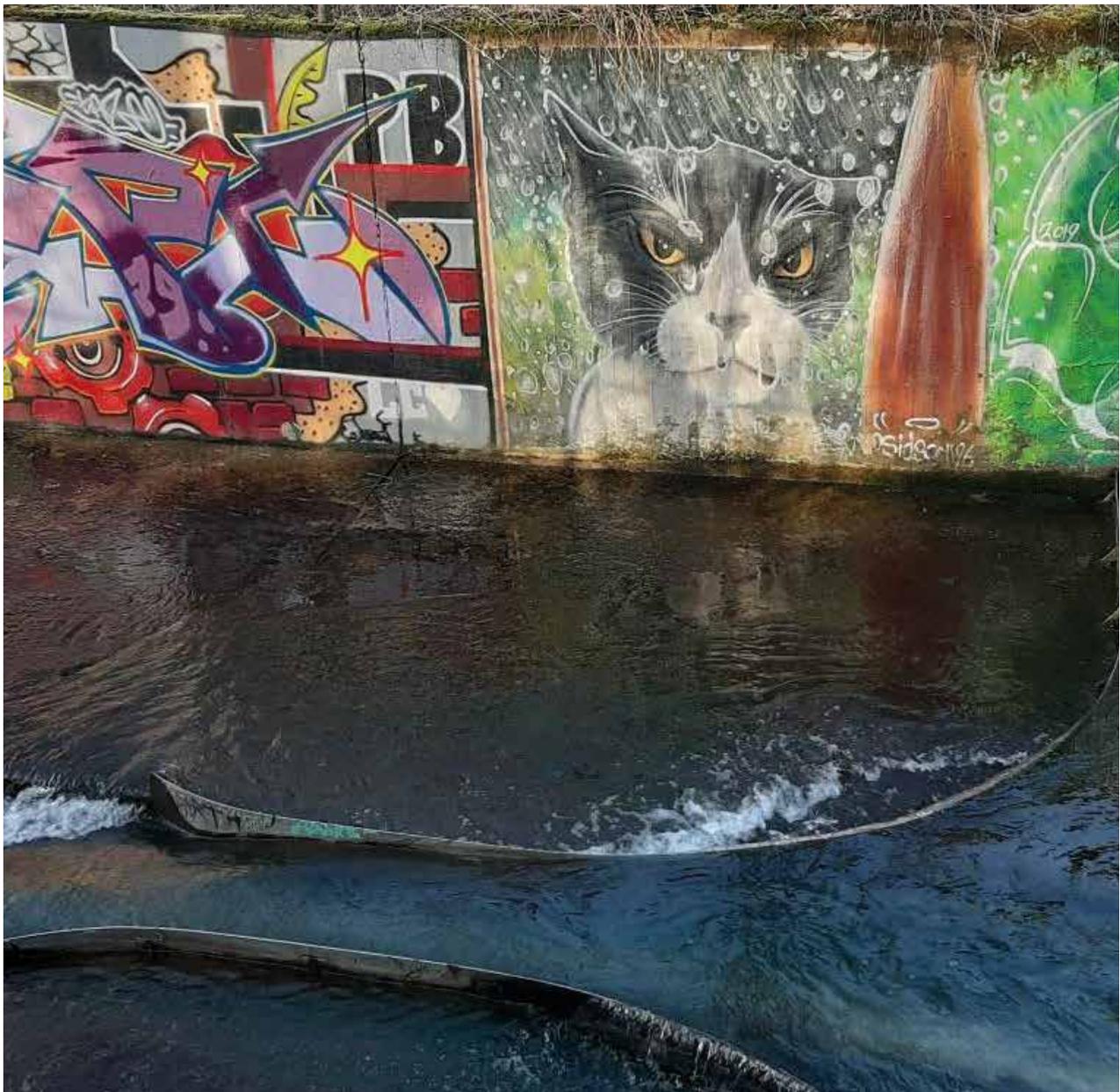
Des traces de ²²Na pouvant provenir du CERN ont été détectées cette année dans les eaux du Nant d'Avril, avec toutefois des valeurs très proches des limites de détection. Les autres radioéléments parfois détectés dans le Nant d'Avril au cours des périodes de surveillance précédente, comme le ⁵⁷Co, le ⁵⁸Co,

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. Ces résultats étaient attendus, étant donné que la quasi-totalité des installations du CERN étaient à l'arrêt.

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 particulièrement faible en 2020, étant donné que la majorité des installations étaient à l'arrêt.

Ainsi contrairement aux années précédentes, les radionucléides de courte demi-vie produits par les installations du CERN et habituellement mesurées dans le cadre du programme de surveillance de la radioactivité dans l'environnement au voisinage du CERN, comme par exemple le ^{24}Na ou le ^{131}I dans l'air, n'ont pu être décelées en 2020. Les 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. En effet, le seul radionucléide supplémentaire détecté a été le ^{22}Na dans le sol (activation des blindages) lors d'une mesure in situ réalisée dans l'enceinte du centre de recherche.



2020

Chapitre Kapitel 9

Industries et hôpitaux Industrien und Spitäler

Emissions des industries
Emissions des hôpitaux
Surveillance au voisinage des industries
Plan d'action Radium

Emissionen der Betriebe
Emissionen der Spitäler
Überwachung in der Umgebung von Industrien
Aktionsplan Radium

9.1

Emissionen der Betriebe

Flavia Danini Fischer

Suva, Abteilung Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz, Bereich Physik/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. Der Einsatz von mit ^{14}C markierten Stoffen hat nach einem Rückgang in den letzten Jahren wieder zugenommen. Sämtliche Abgabelimiten wurden im Berichtsjahr eingehalten.

Überwachte Betriebe

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

Produktionsbetriebe (Total 3 Betriebe)

Radioaktive Stoffe werden benötigt für die Produktion von:

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

Seit 2009 wird keine tritiumhaltige Leuchtfarbe mehr produziert.

Tabelle 1:

Einkauf radioaktiver Stoffe 2010 - 2020.

	Isotope	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	Einheit
Produktionsbetriebe	^3H	12.11	11.26	12.75	7.31	10.54	5.74	4.07	7.53	15.11	10.03	6.31	PBq
	^{14}C	0.26	0.26	0	0	0.07	0	0.74	0.58	0.19	1.33	0.34	TBq
	^{147}Pm	0.07	0	0	0	0	0	0	13.03	5.76	0.07	1.55	TBq
Forschungsbetriebe	^3H	7.4	0.2	7.6	7.6	3.8	7.6	0.2	11.4	18.8	11.4	15.5	TBq
	^{14}C	51.1	35.4	21.3	17.1	41.3	53.9	158.9	76.0	192.6	200.6	132.5	GBq
	^{32}P	0.3	0.3	0.3	0.9	0.5	0.9	0.9	1.4	1.0	1.4	1.6	GBq
	^{35}S	0	0	0	1.4	1.4	2.4	2.4	3.7	2.0	0.8	3.8	GBq
	^{51}Cr	0	0	0	0	0.3	0.1	0	0	0	0	3.2	GBq
	^{125}I	0	0.2	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	14.1	12.1	15.7	16.3	GBq
Analytische Laboratorien	^{125}I	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	GBq

Forschungsbetriebe (Total 40 Betriebe)

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

Medizinisch-analytische Laboratorien (Total 4 Betriebe)

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

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

Resultate

Im Berichtsjahr 2020 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 in einem bewilligten Ofen verbrannt wurden.

Die Tritium-Abgaben der beiden grossen Produktionsbetriebe, sowie die Tritium-Messungen in der Umgebung der Firma RC Tritec AG sind in den Figuren 1a, 1b und 1c 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 beiden grossen Produktionsbetriebe zusammengefasst.

Tabelle 2a :

Abgabe radioaktiver Stoffe an die Abluft während des Jahres 2020 (GBq).

	Abgaben an die Abluft (GBq)		Abgabelimite (GBq)	
	^3H	^{14}C	^3H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	36.0 (org.) 0 (Gas)	3.6	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 2020 (GBq).

	Abgaben an das Abwasser (GBq)		Abgabelimite (GBq)	
	^3H	^{14}C	^3H	^{14}C
Hoffmann-La Roche AG	1.2	0.2	80	40
Novartis Pharma AG	1.9	0.0	300	30

Tabelle 3 :

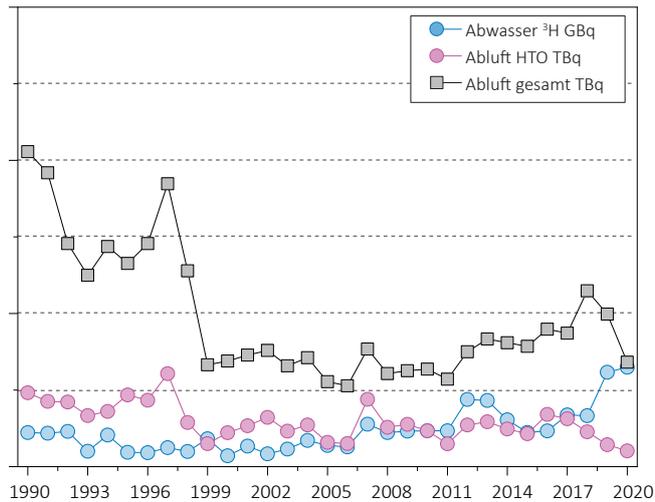
Verbrennung in bewilligtem Ofen (Valorec Services AG, Basel) während des Jahres 2020 (GBq) und weitere Verbrennungen.

	^3H (GBq)	^{14}C (GBq)	^{35}S (GBq)
Verbrennungen Valorec	649.4	43.5	0.0
Bewilligungslimite Valorec	4'000	450	8.0
KVA St. Gallen	425	0.0	0.0
KVA Dottikon	< 1	2.8	0.0

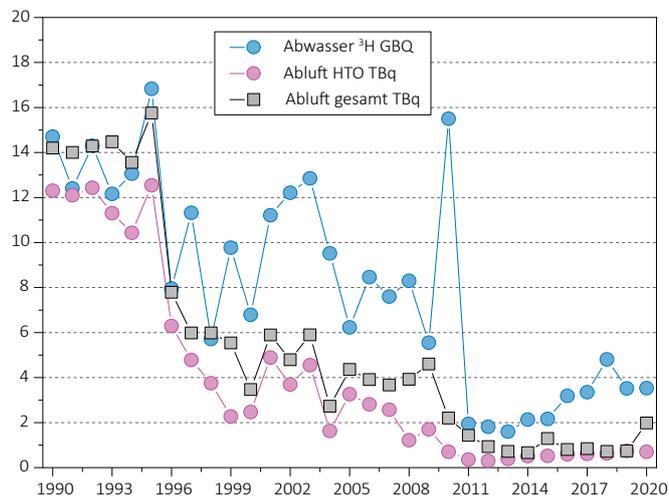
Tabelle 4 :

Jahresabgabelimite der Produktionsbetriebe.

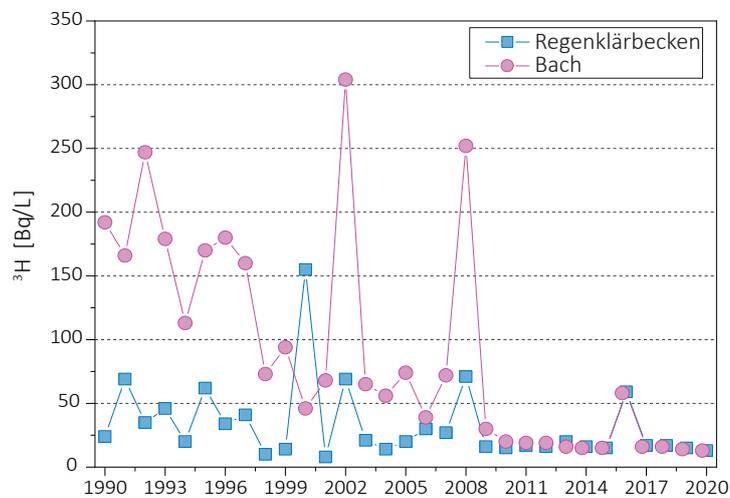
	Abwasser	Abluft	
	^3H	^3H (HT)	^3H (HTO)
MB-Microtec AG, Niederwangen / BE	40 GBq	370 TBq	37 TBq
RC-Tritec AG, Teufen / AR	20 GBq	7.5 TBq	7.5 TBq



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



Figur 1c :
 RC-Tritec AG, Teufen/AR: Umgebungsüberwachung von Tritium.
 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 fällt die starke Zunahme des Lutetium-177-Verbrauchs (^{177}Lu) auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die ^{177}Lu PSMA Therapie, welche zur Behandlung von Patienten mit Prostatakarzinom verwendet wird, gegenüber der Therapie mit Radium 223 (^{223}Ra) deutlich durchgesetzt hat. Da diese Patienten stationiert werden müssen, steigt dadurch auch die Abgabe ans Abwasser an, jedoch aufgrund der geringeren Radiotoxizität gegenüber Jod 131 (^{131}I) nur geringfügig (die Abgaben ans Abwasser werden als ^{131}I äquivalente angegeben). 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 1m 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 der ^{223}Ra werden bei Patienten mit einer Tumorerkrankung zur Schmerzlinderung und Therapie verwendet sowie bei rheumatischen Erkrankungen zur Entzündungshemmung und Schmerzlinderung in Gelenke appliziert. Die Applikation erfolgt ambulant oder stationär je nach medizinischer Indikation und applizierter Aktivität.

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 Abgabelimiten gewährleistet, dass die geltenden Immissionsgrenzwerte in öffentlichen Gewässern zu keiner Zeit überschritten werden. Werden andere Nuklide als ^{131}I über die Abwasserkontrollanlage an die

Tabelle 1:

Applikationen radioaktiver Stoffe zu therapeutischen Zwecken 2020 in MBq.

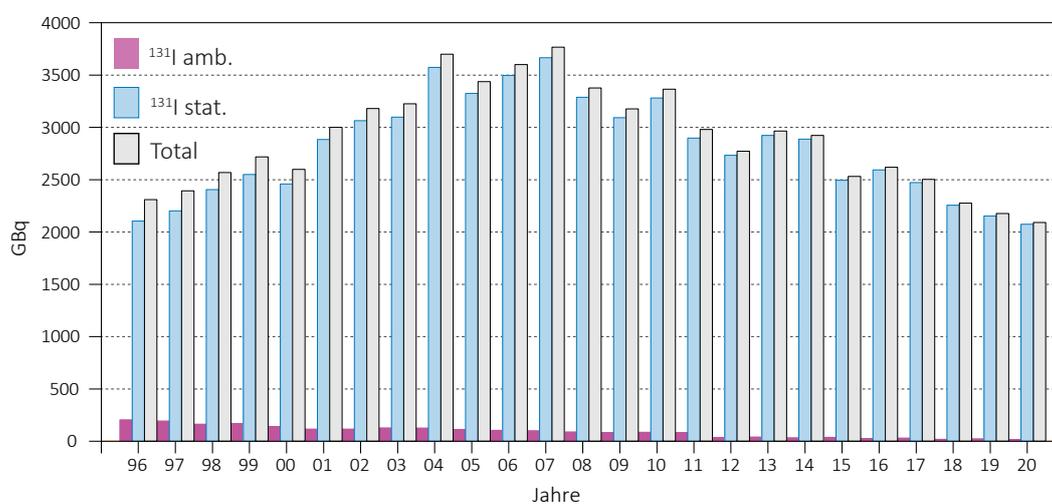
	Spital	^{131}I amb.	^{131}I stat.	^{186}Re	^{169}Er	^{90}Y	^{153}Sm	^{177}Lu	^{223}Ra	^{166}Ho
AG-40.2	Kantonsspital Aarau AG					185			372	
AG-579.2	Kantonsspital Baden AG		46'400	145		8'940		79'500		
BE-32.2	Klinik Linde AG	800								
BE-138.2	Klinik Engeried								64	
BE-284.12	Inselspital		234'487	185	155	4'469		1'114'060	181	
BL-158.2	Kantonsspital Baselland	630				407				
BL-315.2	Kantonsspital Liestal	200							37	
BS-30.2	St. Claraspital	1'589								
BS-350.1	Universitätsspital Basel		292'714	185		16'480		2'301'100	33	50'300
FR-103.2	HFR Hôpital fribourgeois		80'600			4.1			69	
GE-200.3	HUG	195	168'822	75		46'300		1'800	37	
GE-752.3	Hôpital de la Tour	520				148				
GE-1633.1	GRGB Santé SA								12	
GR-54.2	Kantonsspital Graubünden	1'175	52'883	92		1'295	3'000		94	
LU-1.2	Hirslanden-Klinik St. Anna		84'503			40'680		366'642		
LU-527.11	Luzerner Kantonsspital LUKS		52'968	201		24'068			120	
NE-169.6	Hôpital Neuchâtelais	2'251							43	
SG-195.3	Kantonsspital St. Gallen		139'634	74	90	5'150		321'731		
SO-29.6	Bürgerspital Solothurn		27'260			185			71	
TG-46.2	Spital Thurgau AG		32'015	224		370				
TG-53.2	Spital Thurgau AG					610			4	
TI-453.6	Ospedale Regionale Bellinzona e Valli	1'550	111'790			11'250		162'800	130	
TI-482.4	Ospedale Civico	600				1'850				
VD-129.2	Clinique de la Source	3'156							62	
VD-206.2	Hôpital de la Riviera								12	
VD-784.4	Genolier Swiss Medical Network								9	
VD-832.14	CHUV	1'193	152'898			176'205		765'395	27	
VS-125.1	RSV Hôpital du Valais		41'701							
ZH-57.4	Stadtspital Waid	827								
ZH-117.2	Klinik Hirslanden			190	102	69'890			44	
ZH-348.7	Universitätsspital Zürich		163'764	444	222	79'712		446'983	32	
ZH-352.3	Kantonsspital Winterthur	1'892	150'602	182		54'426			180	
ZH-1171.13	Stadtspital Triemli		240'925			21'500			76	
	Schilddrüsen-Praxis Zürich	620								
	Gesamte Schweiz 2020	17'197	2'073'965	1'996	569	564'123	3'000	5'586'011	1'711	50'300

Umwelt abgegeben (^{177}Lu), wird dieser Anteil in ^{131}I Äquivalente umgerechnet und in die Abgabeaktivität mit einbezogen. Die Spitäler sind verpflichtet, die Abgaben radioaktiver Abwässer so gering wie möglich zu halten und dazu laufend organisatorische und technische Optimierungsmassnahmen vorzunehmen.

Tabelle 2:

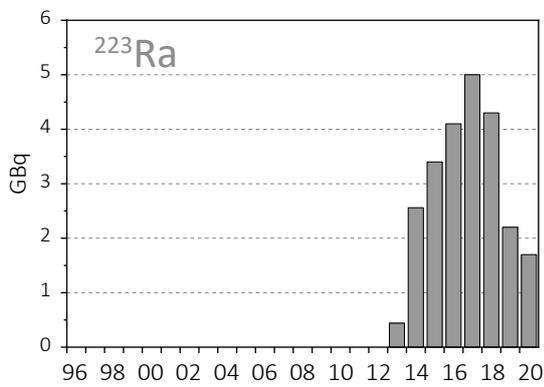
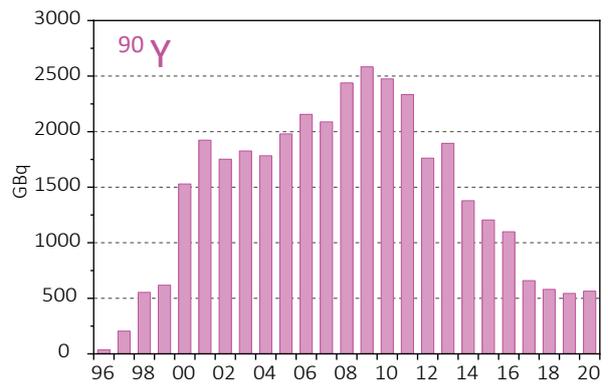
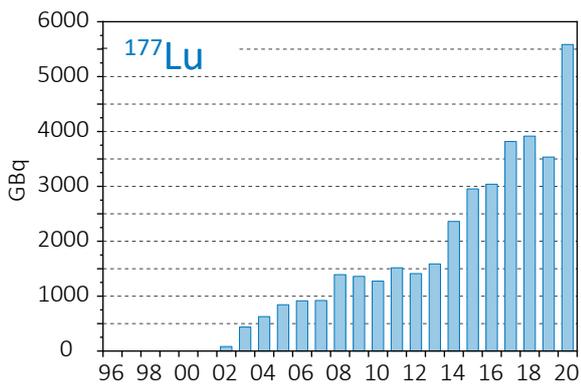
Abgabe von ^{131}I und ^{177}Lu aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2020 in MBq ^{131}I Äquivalent.

Abgabe MBq/Monat Nuklearmedizin	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Total 2020
KS Chur	0.72	0.27		16.55			0.76	5.36		8.93	2.21		34.8
BS Solothurn	14.54	14.62				6.21							35.4
OR Bellinzona					1.00	0.90			1.10		0.30		3.3
KS St. Gallen	1.32	2.13	7.64		1.84	0.73	3.99	4.16		1.81	1.75	39.11	64.5
Triemli Zürich	3.10	1.20	0.90	0.70	1.90	1.80	2.50	3.30	2.70	1.80	2.20	0.90	23.0
HFR Fribourg	1.00	10.00			16.80						1.00		28.8
HU Genève	0.50	5.05		5.70			11.71		5.31		61.66		89.9
RSV Sion	3.78	1.89	0.37	3.46	4.49	3.46	3.78		1.39	0.37			23.0
KS Baden	4.03	3.07	12.15		1.17	3.85		17.08	15.04		1.13	5.69	63.2
CHUV Lausanne						0.50			10.69		9.24	0.10	20.5
US Basel	204	327.7	360.4	320.1	320.6	251.6	346.6	250.4	454.1	322.9	285.6	467.6	3'911.6
KS Winterthur		0.03	0.01	0.05		0.03	0.07		0.02	0.02	0.17	0.66	1.1
US Zürich		78.00		22.60	17.6	8.50							126.7
St. Anna Luzern		1.13	3.80		3.90		17.50			1.50	2.60	4.60	35.0
Insel Bern	10.90	32.97	6.24	2.41	0.74	11.72	8.23	3.33	9.26	5.36	1.82	3.21	96.2
Spital Münsterlingen			17.52	15.09									32.6
Gesamte Schweiz 2020 MBq													4'589.6

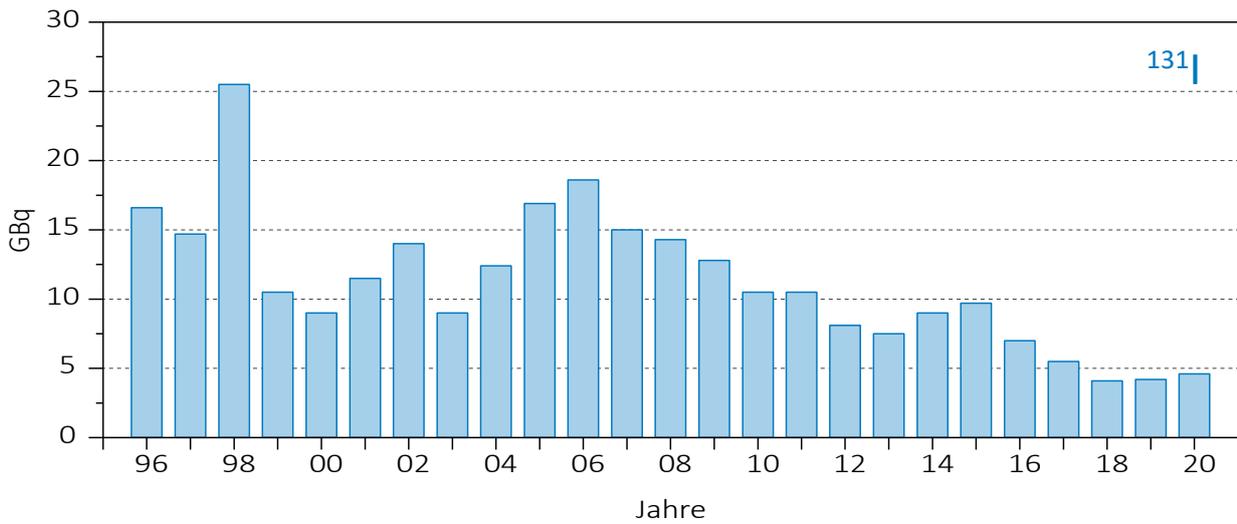


Figur 1:

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 ¹³¹I ans Abwasser in der Schweiz in GBq.

9.3

Surveillance de la radioactivité au voisinage des industries, stations d'épuration et usines d'incinération des déchets

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

Section Radioactivité de l'environnement URA / OFSP Berne

A. Pregler

Kantonaales Labor Basel-Stadt, Basel

M. Brennwald, P Rünzi

Eawag, Dübendorf

Résumé

Les résultats de la surveillance effectuée en 2020 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 présentent une nette tendance à la baisse par rapport aux années précédentes, en raison de la réduction significative des émissions de tritium dans l'air par mb Microtec en 2020. 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 ont été poursuivies comme par le passé, aucun résultat anormal n'a toutefois été mis en évidence.

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.

Tableau 1 :

Tritium dans les précipitations au voisinage des entreprises utilisatrices de ^3H en 2020.

**A Niederwangen, 23 échantillons ont été mesurés pour chaque station en 2020. En effet, en raison du manque de précipitation, il n'y a pas eu d'échantillons entre le 16.03 et 14.4, ni entre le 01.09 et le 15.09.*

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Mediane/moyenne (Bq/l)
Teufen/AR 65 m E Firma RCT	11 - 61	22 / 28
Niederwangen/BE*		
Bauernhaus 300 m SE de l'entreprise	7 - 328	28 / 67
Garage 200 m SW de l'entreprise	< 5 - 196	22 / -
Gemeinde KÖniz 180 m NNW de l'entreprise	13 - 510	45 / 82
Firma Schär 320 m NE de l'entreprise	47 - 1'451	200 / 339

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 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 et de RC Tritec à Teufen/AR. 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.

Les résultats 2020 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 2020, 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, denrées alimentaires) à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier de mb Microtec à Niederwangen. On remarquera toutefois une diminution d'environ 50% des concentrations de tritium enregistrées dans les précipitations collectées à la station Firma par rapport à 2019 (voir figure 1). Ainsi, en 2020, ces concentrations ont atteint une valeur maximale de 1'450 Bq/l en janvier, et une valeur moyenne de 350 Bq/l dans cette station où les concentrations sont généralement les plus importantes. La valeur maximale enregistrée correspond à 7.3% 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).

A Niederwangen, l'activité du ^3H dans l'humidité de l'air est également mesurée deux fois par mois (Fig. 1). Le système de prélèvement de l'humidité de l'air a été modifié fin 2019. Ainsi après une période de test, le barboteur anciennement utilisé a été définitivement remplacé par un piègeur passif. Les valeurs obtenues en 2020 se sont échelonnées entre 1.6 et 16.4 Bq/m³ avec une valeur moyenne de 6.4 Bq/m³. La valeur la plus élevée a été enregistrée début janvier 2020; pour le reste, les valeurs suivent généralement les mêmes tendances à la baisse que celles enregistrées dans les précipitations.

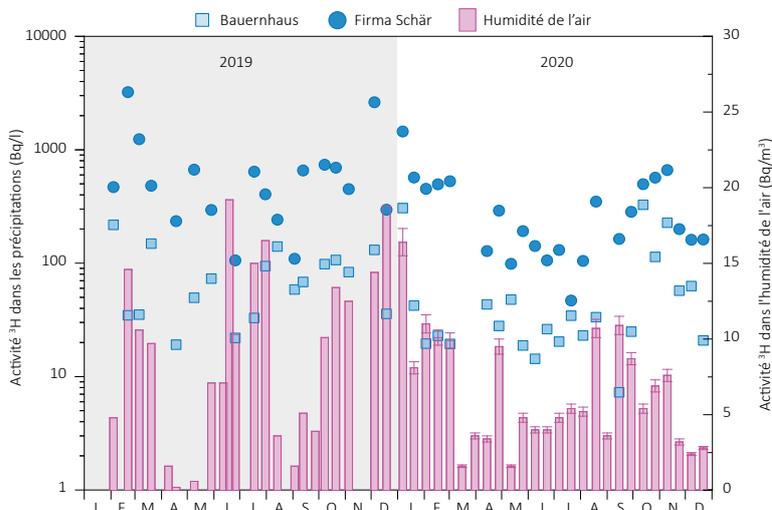


Figure 1 :

Concentrations de tritium enregistrées en 2019 et 2020 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).

Des valeurs plus élevées de tritium ont également été mesurées dans les denrées alimentaires prélevées par le canton de Berne au voisinage de l'entreprise fin août. Les concentrations de tritium dans les distillats des 12 échantillons de fruits et légumes (pruneaux, pommes, poires, salade, etc.) se sont échelonnées entre 7 et 220 Bq/l, avec une valeur médiane de 30 Bq/l. Dans les distillats des échantillons de lait, les concentrations en tritium étaient faibles, entre 5 et 11 Bq/l (3 échantillons). Ainsi les niveaux de tritium mesurés dans les denrées alimentaires sont également nettement plus faibles en 2020 qu'au cours des 3 années précédentes.

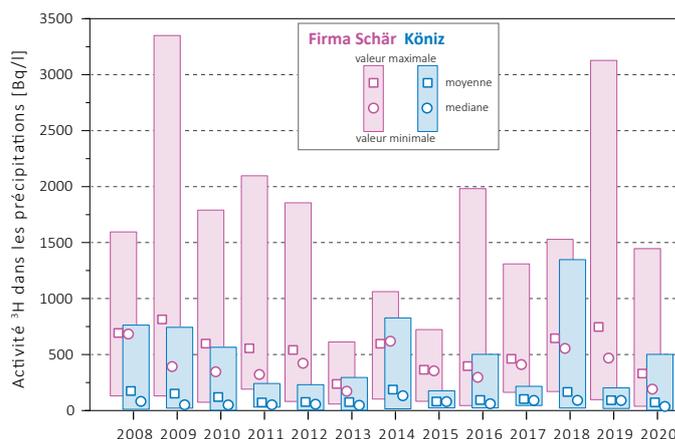


Figure 2 : Valeurs moyennes et médianes annuelles des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations aux stations de Firma et Köniz à Niederrangen entre 2008 et 2020.

La baisse générale des niveaux de tritium mesurés dans les différents compartiments environnementaux s'explique par la diminution significative des émissions de tritium dans l'air par mb Microtec en 2020. Cette réduction des émissions résulte, d'une part, de la diminution de la production en raison de la pandémie, et d'autre part, de la mise en service, fin 2019, d'un nouveau dispositif d'épuration des gaz. L'entreprise s'était en effet engagée fin 2017 à rénover son système de ventilation pour réduire les émissions. L'analyse du rapport entre les «activités manipulées» et les «activités rejetées dans l'environnement par l'air vicié» indique que cette nouvelle installation permet de réduire les émissions, à activité manipulée égale, de près de 30%. L'entreprise a encore d'autres projets pour réduire ses émissions. La SUVA, en tant qu'autorité de surveillance, suit la situation de près.

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. Elle montre la nette diminution des concentrations de tritium mesurées dans l'environnement au voisinage de cette entreprise depuis 2014. Les valeurs 2020 sont à nouveau parmi les plus basses mesurées depuis le début de la surveillance. Ces résultats sont à mettre en relation avec la diminution régulière des rejets dans l'air (voir figure 1b, Chap 9.1) par l'entreprise.

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

Plusieurs laboratoires analysent les eaux des stations d'épuration des agglomérations de Zürich, Bâle, 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 2020.

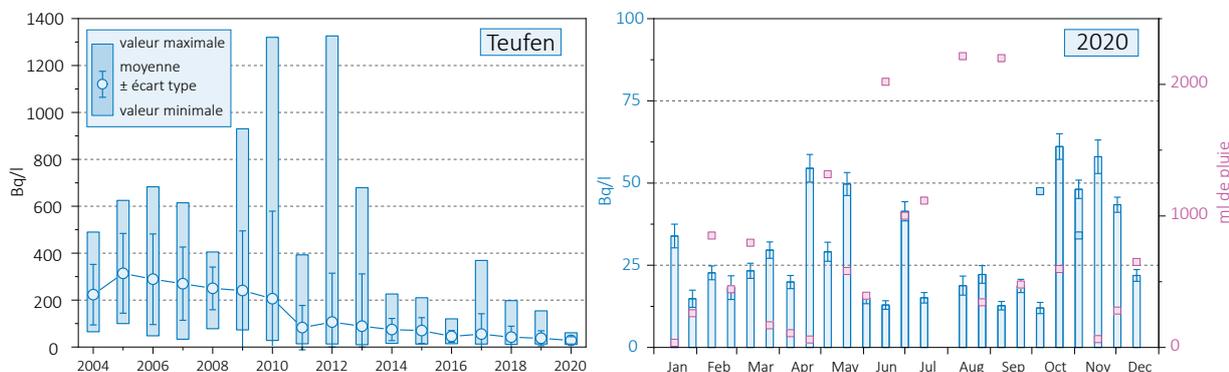


Figure 3 : Concentration du tritium mesurée dans les précipitations de Teufen / AR entre 2004 et 2020.

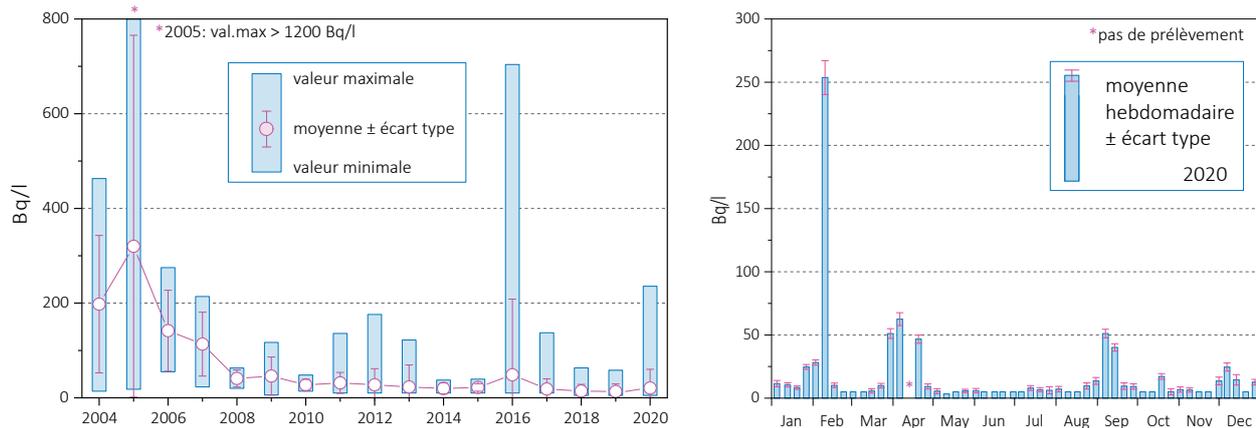


Figure 4 : Concentrations du tritium mesurées dans les eaux de la station d'épuration de La Chaux-de-Fonds entre 2004 et 2020.

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 a mesuré une concentration particulièrement élevée de tritium (833'000 Bq/l) dans un échantillon hebdomadaire. La mesure individuelle de chaque échantillon journalier a révélé une concentration encore jamais atteinte de 2.26 MBq/l pour l'échantillon du 15 janvier 2019. Sur la base de ces résultats, l'activité totale incinérée avait été estimée à env. 700 GBq. L'activité de ^3H incinérée lors de cet incident est plus de 2 fois supérieure à l'activité maximale qui pourrait être légalement incinérée avec l'accord préalable de l'autorité selon l'Art.116 de l'ORaP, si l'entreprise d'incinération était au courant de

la présence de radioactivité dans les déchets reçus. Cet incident et cette élimination illégale vers un centre d'incinération représente une violation de l'ordonnance sur la radioprotection. Par ailleurs, le caractère récurrent de la situation (activité élevée mesurée dans les eaux de lavages après incinération de déchets contenant du tritium) constitue un facteur aggravant, ce qui a conduit l'OFSP à déposer une plainte auprès du ministère public de la confédération en 2020. Une enquête a été ouverte pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs en tant qu'ordures conventionnelles vers l'UVDT de Bâle a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle. En 2020, ce phénomène n'a pas été observé puisqu'aucune valeur supérieure à 2'000 Bq/l de ^3H n'a été mesurée dans les échantillons hebdomadaires. L'OFSP et le laboratoire cantonal de Bâle suivent la situation de près.

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 2 Bq/l, avec une valeur maximale de 8 Bq/l.

Tableau 2 : Tritium (^3H) et ^{131}I dans les eaux de rejet des usines d'incinération et des stations d'épuration (STEP) en 2020.

Ville	Laboratoire	Isotope	Nombre	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)	Moyenne (Bq/l)
STEP Bâle	KL-BS	^{131}I	53	< 0.06 - 1.9	021	-
		^3H	53	< 2.0 - 7.8	-	-
Incinération Bâle	KL-BS	^{131}I	53	0.05 - 1.7	0.29	-
		^3H	53	17 - 1'797	162	310
STEP Berne	Labor Spiez	^{131}I	52	< 0.1 - 0.13	-	-
	URA/OFSP	^3H	12	< 5.0 - 27.5	8.5	-
STEP Bienne	URA/OFSP	^3H	52	< 5.0 - 21.7	-	-
STEP La Chaux-de-Fonds	URA/OFSP	^3H	52	< 5.0 - 254.0	6.8	-
STEP Lausanne	IRA	^{131}I	47	< 0.5	-	-
		^3H	12	< 2.0 - 3.3	-	-
STEP Zürich	EAWAG	^{131}I	52	< 0.1 - 0.22	-	-
	URA/OFSP	^3H	12	< 5.0	-	-

Les concentrations de tritium observées à la STEP de la région de La Chaux-de-Fonds sont généralement restées faibles en 2020, avec toutefois une valeur plus élevée (250 Bq/l) en février. 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; sans atteindre les niveaux de 2016, les valeurs maximales et moyennes de 2020 se situent dans la fourchette supérieure de celles enregistrées au cours des dix dernières années.

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 (valeur maximale de 28 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 2020, les valeurs se sont échelonnées entre 100 et 8'500 Bq/l et n'ont pas présenté de corrélation avec les activités présentes dans les déchets contenant du tritium déclarées par les entreprises autorisées.

A l'usine d'incinération de Bienne, les concentrations hebdomadaires de tritium pour l'année 2020 sont toujours restées inférieures ou voisines de la limite de détection de 5 Bq/l, sauf à la mi-avril, où une valeur de 22 Bq/l a été enregistrée.

La figure 5 montre les concentrations de ^{131}I mesurées entre 2010 et 2020 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

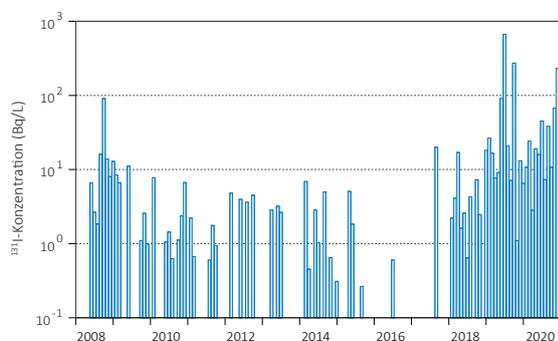


Figure 5 :
Concentrations de ^{131}I (Bq/l) enregistrées dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz de 2008 à 2020 (prélèvement et analyse effectués par l'EAWAG).

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). En conséquence le ^{131}I a été décelé dans tous les échantillons prélevés en 2019 et 2020, contrairement aux années précédentes, avec des concentrations s'échelonnant entre 2 et 231 Bq/l pour 2020.

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 décelés dans 2 échantillons (valeurs de 0.15 Bq/l et 0.22 Bq/l).

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

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)	15.12.2020	non-filtré	7.3 ± 1.3		10.7 ± 1.3
	Tüfentobel (SG)	15.12.2020	non-filtré			3.7 ± 1.1
	Jaberg (BE)	15.12.2020	non-filtré	< 5.0		2.6 ± 1.2
zone industrielle contaminée, eaux souterraines	Waldenburg (BL)	18.11.2020	filtré $< 0.45 \mu\text{m}$	< 5.0	44 ± 4.4	7.2 ± 1.2
		18.11.2020	filtré $< 0.45 \mu\text{m}$	< 5.0	49.8 ± 4.8	65.2 ± 5.2
		18.11.2020	filtré $< 0.45 \mu\text{m}$	< 5.0	6.6 ± 1.9	7.0 ± 1.0
		18.11.2020	filtré $< 0.45 \mu\text{m}$	< 5.0	7.4 ± 1.9	8.0 ± 1.1

limite d'immission. Les échantillons ont été pour la plupart mesurés sans filtrage ce qui constitue une approche conservatrice. 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 plus des eaux de percolation de décharges, des eaux souterraines prélevées sur un site industriel contaminé au radium ont également été analysées. Les résultats sont résumés dans le tableau 3. Ici aussi les valeurs sont faibles, à l'exception d'un échantillon avec une concentration de ^{226}Ra plus élevée atteignant 65 mBq/l. Cette valeur reste toutefois inférieure à la valeur indicative de la dose définie dans l'ordonnance sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douches accessibles au public (OPBD), qui correspond à une concentration de ^{226}Ra de 500mBq/l et qui constitue la grandeur de comparaison pour les échantillons d'eaux souterraines.

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 électrodeposition 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 2020 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 diminution significative par rapport aux années précédentes. Ainsi dans les précipitations collectées au voisinage de la firme mb Microtec, les concentrations de ^3H ont atteint au maximum 7% de la valeur limite d'immissions définie dans l'ORaP pour ce radionucléide dans les eaux accessibles au public. Des valeurs plus élevées de ^3H ont également été mesurées dans les échantillons de denrées alimentaires prélevées à Niederwangen, mais les doses supplémentaires qui résulteraient de la consommation régulière de tels produits (eaux de pluie et légumes) ne dépasseraient pas quelques $\mu\text{Sv}/\text{an}$ et ne présentent donc aucun risque pour la santé.

En janvier 2019, le laboratoire cantonal de Bâle-Ville avait mesuré des concentrations inhabituellement élevées de tritium (env. 2.3 MBq/l dans un échantillon journalier) dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Bâle Ville. L'OFSP a déposé une plainte auprès du ministère public de la confédération à la suite de cet incident, qui n'était pas un événement isolé. En effet, depuis 2003, des pics de concentrations de ^3H , révélateurs de l'incinération d'objets contenant du tritium jetés dans les ordures ménagères, ont régulièrement été observés, mais les concentrations n'avaient jamais atteint les niveaux de 2019. L'enquête est toujours en cours et aucune augmentation anormale des activités de tritium dans les échantillons d'eaux de lavage des fumées n'a été constatée en 2020. Ainsi 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 2020.

9.4

Aktionsplan Radium 2015-2022

M. Palacios, D. Storch

Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Der Bundesrat hat den Aktionsplan Radium 2015 - 2022 verabschiedet, um das Problem der radiologischen Altlasten zu bewältigen, die auf die Verwendung von ^{226}Ra -haltiger Leuchtfarbe in der Uhrenindustrie bis in den 1960er Jahren zurückgehen. Dieses Kapitel zeigt den Stand der Arbeiten der verschiedenen Achsen des Aktionsplans. Aufgrund von COVID-19 mussten die Besuche vor Ort während eines Grossteils des Jahres 2020 eingeschränkt werden. Das BAG wird versuchen, die Verzögerung 2021 mithilfe externer Unterstützung aufzuholen, sofern die Gesundheitslage es zulässt.

Historische Nachforschungen

Nach Artikel 151 der Strahlenschutzverordnung (StSV) führt das Bundesamt für Gesundheit (BAG) ein Inventar der Liegenschaften, die möglicherweise mit ^{226}Ra kontaminiert sind. Dieses Inventar umfasst mittlerweile über 1'000 Liegenschaften und basiert hauptsächlich auf den historischen Nachforschungen der Universität Bern, deren Ergebnisse auf der Webseite www.bag.admin.ch/radium-altlasten (Kapitel «Historische Nachforschung») zu finden sind. 2020 hat das BAG ein externes Ingenieurbüro mit einer ergänzenden historischen Nachforschung in einigen noch fehlenden kantonalen Archiven beauftragt, namentlich jenen von Basel-Landschaft, Genf und Waadt. Die Schlussergebnisse werden bis im Sommer 2021 vorliegen.

Diagnostische Untersuchungen und Sanierung der Liegenschaften

Gemäss Stand am 31. Dezember 2020 sind 752 Liegenschaften (mit insgesamt mehr als 4'300 Wohnungen oder Gewerbelokalen) im Rahmen des Aktionsplans untersucht worden. Eine diagnostische Untersuchung besteht aus der Messung der Dosisleistung auf der gesamten Grundfläche des betroffenen Gebäudes oder der betroffenen Aussenfläche (vgl. Tabelle 1). Wenn in Innenräumen Spuren von ^{226}Ra vorhanden sind, berechnet das BAG anhand

der Dosisleistungen und Expositionsszenarien die zusätzliche Jahresdosis, der sich die Gebäude- Nutzenden aussetzen könnten. Zeigen die Berechnungen, dass der zulässige Grenzwert von 1 Millisievert (mSv) pro Jahr überschritten ist, werden die Räumlichkeiten saniert. Für Aussenflächen liegt der Grenzwert für die Konzentration von ^{226}Ra im Boden bei 1'000 Becquerel pro Kilogramm (Bq/kg).

Von den untersuchten Liegenschaften sind 120 (ca. 16%) sanierungsbedürftig im Sinne von Artikel 153 StSV, betroffen sind 77 Wohnungen oder Gewerbelokale und 77 Aussenflächen. 105 Liegenschaften sind bereits saniert worden oder werden derzeit saniert. Das Sanierungskonzept beinhaltet die Planung, die Beseitigung der Kontamination durch einen spezialisierten Betrieb, die Wiederherstellung des Standards vor Beginn der Arbeiten, die Schlusskontrolle und die Entsorgung der Abfälle. Der Stand der Umsetzung des Aktionsplans zwischen 2015 und 2020 ist der Abbildung 2 zu entnehmen.

Die COVID-19-Pandemie stellte 2020 eine Herausforderung dar: Die Besuche vor Ort wurden zwischen März und Juni 2020 ausgesetzt und anschliessend gestaffelt wiederaufgenommen, um die Risiken für die Mitarbeitenden des BAG und die Bewohnerinnen und Bewohner der Liegenschaften zu minimieren. Ein COVID-19-Schutzkonzept wurde erarbeitet und darin die Vorgehensmodalitäten (z. B. Hygienemassnahmen, Schutzausrüstung, spezifische Absprachen mit den Bewohnerinnen und Bewohnern) präzisiert. Aufgrund der Einschränkungen mussten die Ziele 2020 für die diagnostische Untersuchung von

Tabelle 1 :

Stand des Aktionsplans Radium am 31. Dezember 2020.

	Anzahl untersuchter Liegenschaften	Sanierung		
		nicht notwendig	notwendig	abgeschlossen oder laufend
Kanton BE	246	194	52	47
Kanton NE	313	276	37	31
Kanton SO	111	87	24	22
Andere Kantone	82	75	7	5
Total	752	632	120	105

Liegenschaften nach unten korrigiert werden. Schlussendlich sind 83 von geplanten 150 Liegenschaften untersucht worden. Ausserdem wurden 2020 sieben Liegenschaften saniert. Das BAG hat vorgesehen, den Fokus 2021 auf die Untersuchungen zu legen und dafür auch auf externe Unterstützung zurückzugreifen, um die Verzögerungen aufzuholen. Die erforderlichen Sanierungen werden parallel dazu durchgeführt.

Mischkontaminationen

Das BAG hat bislang 14 ehemalige Industriestandorte identifiziert, bei denen aufgrund einer Radiumkontamination eine Sanierung erforderlich ist. Darüber hinaus hat das BAG chemische Kontaminationen in zehn zusätzlichen, nicht im Kataster der belasteten Standorte erfassten Liegenschaften entdeckt, die ebenfalls eine Radiumsanierung benötigen. Das BAG koordiniert die Sanierung von Parzellen mit Mischkontaminationen fallweise 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. Die Möglichkeiten der Sanierung einer Parzelle sind insbesondere von deren Status im Sinne der Altlastenverordnung (AltV) abhängig. Bei der Entsorgung von Abfällen ist die Einhaltung der Grenzwerte gemäss StSV sowie gemäss Abfallverordnung (VVEA) sicherzustellen. Das BAG hat eine Zusammenarbeit mit dem Labor Spiez für die Analyse von Schwermetallen in ²²⁶Ra-kontaminierten Proben und die Vorbereitung von Auszügen eingerichtet, damit die chemischen Schadstoffe in den Proben in konventionellen Laboren analysiert werden können.

Entsorgung

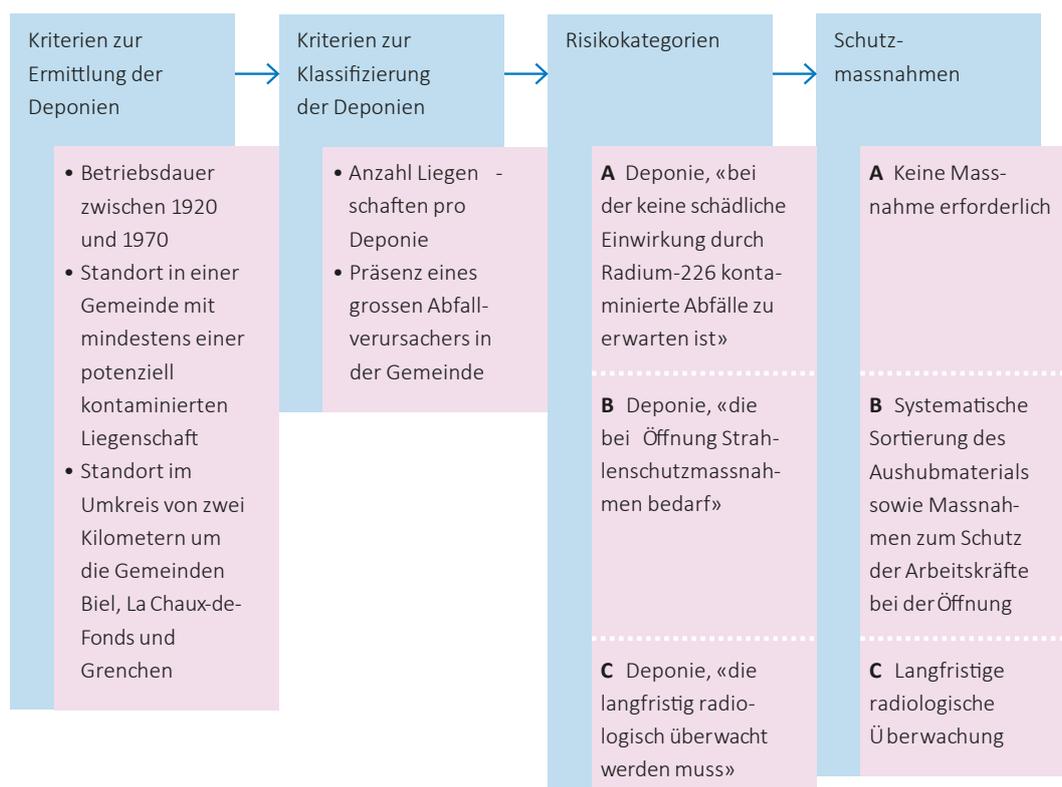
Nach Artikel 114 StSV können schwach kontaminierte inerte Abfälle mit Zustimmung des BAG, des Kantons und des Deponiebetreibers an eine Deponie zur Ablagerung abgegeben werden, sofern ihre maximale spezifische Aktivität von ²²⁶Ra 10'000 Bq/kg nicht überschreitet (d. h. das tausendfache der Befreiungsgrenze von 10 Bq/kg nach StSV). Das BAG hat die Bestimmungen von Artikel 114 StSV in einer 2020 veröffentlichten Wegleitung konkretisiert. 2020 wurden knapp 35 m³ inerte Abfälle im Rahmen des Aktionsplans zur Ablagerung abgegeben.

Gemäss Artikel 116 StSV können schwach kontaminierte brennbare Abfälle mit Zustimmung des BAG und nach Mitteilung an den Kanton in einer Verbrennungsanlage entsorgt werden. Die wöchentlich zur Verbrennung zugelassene Aktivität darf jedoch die tausendfache Bewilligungsgrenze gemäss StSV nicht überschreiten, d. h. 2 MBq für ²²⁶Ra. 2020 wurden über 6'500 Liter brennbare Abfälle im Zusammenhang mit dem Aktionsplan Radium verbrannt. Abfälle, deren Kontamination die genannten Werte übersteigt, gelten als radioaktive Abfälle und werden unter Aufsicht des BAG in das Bundeszwischenlager befördert. 2020 wurden knapp 1'800 Liter Abfälle aus dem Aktionsplan Radium auf diesem Weg entsorgt.

Erfassung und Verwaltung ehemaliger Deponien

Das BAG hat in Zusammenarbeit mit dem BAFU ein Konzept erarbeitet, um aus dem Kataster der belasteten Standorte diejenigen ehemaligen Deponien herauszufiltern, die potenziell mit ²²⁶Ra kontaminierte Abfälle enthalten können, und sie anhand vordefinierter Kriterien in drei Risikokategorien einzuteilen (Fig. 1).

2020 hat das BAG das Konzept allen Kantonen in Konsultation gegeben, die von der Problematik radiumkontaminierter Abfälle in ehemaligen Deponien betroffen sind. Namentlich sind das Bern, Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Freiburg, Genf, Jura, Neuenburg, St. Gallen, Solothurn, Schaffhausen, Waadt, Tessin und Zürich. Die am stärksten betroffenen Kantone (Bern, Genf, Jura, Neuenburg und Solothurn) wurden aufgefordert, für ihren Kanton die Liste der Deponien zu erstellen, die bei Öffnung Strahlenschutzmassnahmen erfordern (Kategorie B).



Figur 1. :
Vorgehen zur Ermittlung und Klassifizierung der Deponien

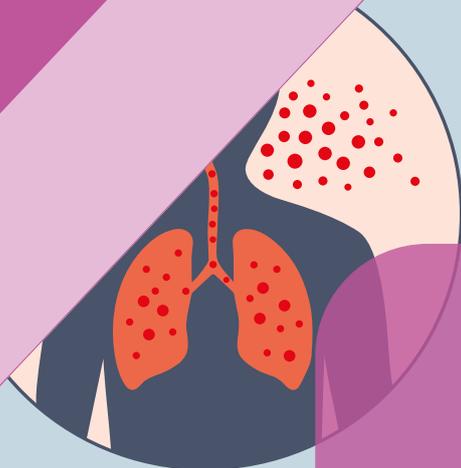
Neben den am stärksten betroffenen Kantonen haben auch Basel-Landschaft und Schaffhausen zum vorgeschlagenen Konzept des BAG Stellung genommen. Insgesamt beurteilen die Kantone die Strategie als sinnvoll und sind damit einverstanden, ihre ehemaligen Deponien gemäss Vorgehensvorschlag einzustufen. Der Kanton Basel-Landschaft ist allerdings der Ansicht, dass die vorgeschlagenen Kriterien aufgrund von Lücken in der historischen Nachforschung in seinem Fall nicht adäquat sind. Die Situation des Kantons Basel-Landschaft wird deshalb neu geprüft, sobald die historische Nachforschung des Ingenieurbüros CSD SA abgeschlossen ist. Kein Kanton hat sich dagegen gewehrt, im kantonalen Kataster bei Deponien der Kategorie B einen Vermerk anzubringen, dass sie möglicherweise mit Radium kontaminierte Abfälle enthalten. Die Kantone haben auch Verbesserungen vorgeschlagen, darunter die Einführung eines Prozesses zur langfristigen Evaluation der Klassifizierungsmethode durch das BAG. Nach der Genehmigung des Konzepts plant das BAG nun, die Umsetzungsmodalitäten in einer Wegleitung zu präzisieren. Dabei sollen namentlich die umzusetzenden Massnahmen bei Öffnung einer Deponie präzisiert sowie die Verantwortlichkeiten für die Kontrollen wie auch für die Entsorgung der Abfälle geklärt werden.

Auf der Grundlage der bereits erhaltenen Listen der Kantone Bern und Jura sind über 100 Deponien der Kategorie B identifiziert worden. Die ausstehenden Listen durften dem BAG Anfang 2021 zukommen. Aufgrund lückenhafter Informationen zu den Betriebsdauern wurden einige Deponien provisorisch in die Kategorie B eingestuft. Sollte bei diesen Deponien eine Öffnung nötig sein, werden zusätzliche Abklärungen vorgenommen, um die fehlenden Informationen zu vervollständigen und gegebenenfalls vor Beginn der Arbeiten eine neue Einstufung vorzunehmen.



Figur 2. :
Radiumuntersuchung im Aussenbereich

2020



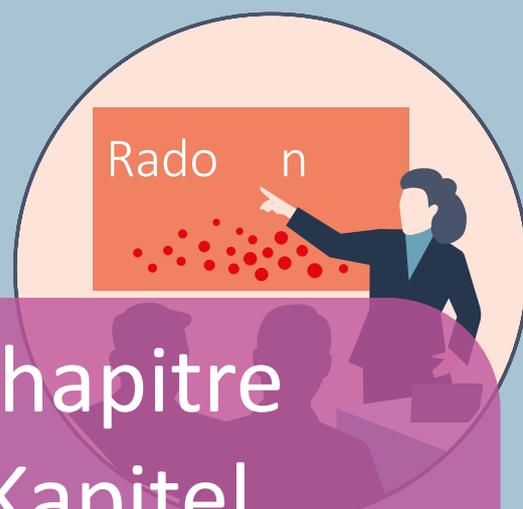
Verantwortlich
BAG, Kantone

Zielpublikum
Bevölkerung

Förderung der
Radonkompetenzen

Plan d'action Radon
Aktionsplan Radon

Radonkompetenz



Chapitre Kapitel 10

Verantwortlich
BAG, Kantone

Zielpublikum
**Radonfachpersonen,
Messstellen, Bau-
fachleute**

Förderung der
Radonkompetenzen
beim Bauen, Messen
und Sanieren



10

Aktionsplan Radon

M. Palacios, D. Storch

Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Der Bundesrat will den Schutz der Bevölkerung vor Radon weiter verbessern.

Im Jahr 2020 hat das Bundesamt für Gesundheit (BAG) eine Bilanz der wichtigsten Ergebnisse des Aktionsplans Radon 2012 – 2020 gezogen und künftige Herausforderungen auf Basis einer 2019 durchgeführten externen Evaluation identifiziert. Für die Jahre 2021 bis 2030 wurde ein neuer Aktionsplan erstellt, den der Bundesrat am 8. Mai 2020 verabschiedet hat.

Rückblick: Aktionsplan Radon 2012 – 2020

Revision der gesetzlichen Bestimmungen

Hauptziel des Aktionsplans Radon 2012 - 2020 war die Harmonisierung der Schweizer Radonschutzstrategie mit internationalen Empfehlungen, insbesondere mit den Normen der Europäischen Union¹, den Publikationen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) und dem Radon-Handbuch der Weltgesundheitsorganisation². Wie die externe Evaluation des Aktionsplans Radon 2012 - 2020³ gezeigt hat, wurde dieses Ziel Anfang 2018 mit dem Inkrafttreten der revidierten Strahlenschutzverordnung (StSV) erreicht. Radon in Gebäuden wird jetzt als «bestehende Expositionssituation» betrachtet, für die ein Referenzwert von 300 Bq/m³ gilt. Weitere Informationen zu den neuen Bestimmungen der StSV finden Sie unter www.ch-radon.ch (gesetzliche Bestimmungen bezüglich

1 COUNCIL DIRECTIVE laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation, Council of the European Union, 2013

2 WHO Handbook on indoor radon, a public health perspective, World Health Organization, 2009

3 Interface Politikstudien Forschung Beratung GmbH, Evaluation des Nationalen Radonaktionsplans 2012 – 2020, Luzern, 2019

Radon). Zudem wurden gewisse Artikel der StSV in der «Wegleitung Radon»⁴ präzisiert.

Erweiterung der Kenntnisse über die Radonexposition

Bisher wurde in etwa 6% aller Gebäude in der Schweiz eine Radonmessung durchgeführt (dies entspricht ca. 150'000 Gebäuden, von denen knapp 10% zwischen 2012 und 2020 gemessen wurden). Diese Messungen decken die gesamte Schweiz ab, sind jedoch in geologisch gefährdeten Regionen wie den Alpen und dem Jura zahlreicher durchgeführt worden. Die revidierte StSV erteilt den Kantonen neue Vollzugsaufgaben, darunter die Durchführung von Radonmessungen und gegebenenfalls Sanierungen in Schulen und Kindergärten. Insgesamt wurden bereits ca. 8'700 Schulen und Kindergärten in der Schweiz gemessen, davon 3'000 zwischen 2018 und 2020. Darüber hinaus wurden spezifische Bestimmungen zum Arbeitnehmerschutz unter Tage eingeführt, um Expositionen mit Dosen von mehr als 10 mSv pro Jahr zu verhindern, ohne dass die Arbeitnehmenden sich einer dosimetrischen Überwachung unterziehen müssen (Übergang zu einer «geplanten Expositionssituation»). Die Radonkarte, die unter www.radonkarte.ch zu finden ist, zeigt die Wahrscheinlichkeit, den Referenzwert von 300 Bq/m³ für die Radonkonzentration zu überschreiten.

4 Bundesamt für Gesundheit, Wegleitung Radon, V2 8.4.2019

tration in Gebäuden zu überschreiten (Figur 1). Sie wird durch den «Radon-Check» ergänzt; mit diesem Tool kann beurteilt werden, ob eine Radonmessung in einem bestimmten Gebäude, auch unter Berücksichtigung der baulichen Eigenschaften, empfehlenswert ist. Zusätzlich ist die Radonkarte in interaktiver Form im Geokatalog von Swisstopo verfügbar⁵.

Förderung des Radonschutzes im Bausektor

Seit 2014 ist die Radonproblematik in der Norm 180 «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereines (SIA) berücksichtigt. Gemäss revidierter StSV sind die Baubewilligungsbehörden verpflichtet, Bauherren über die Radonproblematik bei Neu- und Umbauten zu informieren. Zu diesem Zweck hat das BAG den Behörden in der Wegleitung Radon ein Muster-Informationsblatt zur Verfügung gestellt, das die systematische Umsetzung der in der SIA-Norm 180 festgelegten Radonschutz- Massnahmen empfiehlt. Weiterführende Radonschutzmassnahmen werden angeraten, wenn die Wahrscheinlichkeit einer Referenzwertüberschreitung gemäss Radonkarte über 10% liegt, oder wenn das Gebäude über einen Naturbodenkeller oder erdberührende

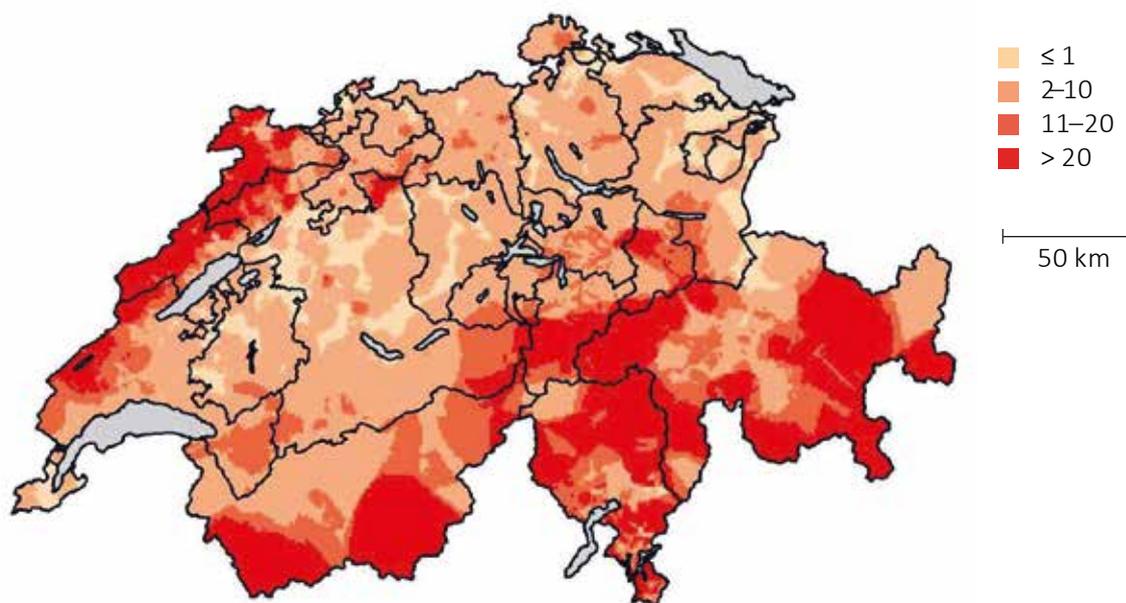
⁵ <https://map.geo.admin.ch/?layers=ch.bag.radon-karte>

Räume mit Personenaufenthalt verfügt. Des Weiteren hat das BAG in Zusammenarbeit mit dem Faktor Verlag AG sowie dem SIA und dem Schweizerischen Verein von Gebäudetechnik- Ingenieuren ein Praxis- handbuch⁶ zum Thema Radon herausgegeben.

Erarbeitung einer effizienten Sanierungsstrategie

Mehr als 10% der in der Schweiz bereits gemessenen Gebäude weisen eine Überschreitung des Referenzwerts von 300 Bq/m³ in mindestens einem Raum mit Personenaufenthalt auf. Gemäss StSV ist die Eigentumerschaft dafür zuständig, die erforderlichen Sanierungsmassnahmen auf eigene Kosten durchzuführen. Das BAG hat in der Wegleitung Radon Empfehlungen zur Dringlichkeit der Sanierung unter Berücksichtigung der Radonkonzentration und der Aufenthaltsdauer herausgegeben. Das vom Faktor Verlag AG veröffentlichte technische Handbuch zum Thema Radon beschreibt die wichtigsten Sanierungsmethoden, die auch anhand von Fallbeispielen illustriert werden. Die externe Evaluation des Aktionsplans Radon hat den aktuellen Mangel an Wissen über die Wirksamkeit und Nachhaltigkeit von Sanierungsmethoden aufgezeigt. Um diese Lücke zu schliessen, hat die Scuola universitaria professionale

⁶ Radon – Praxishandbuch Bau, Faktor Verlag AG, 2018 (unter www.faktor.ch auf Deutsch, Französisch und Italienisch bestellbar, Kosten 48 Franken)



Figur 1 :
Karte mit der Wahrscheinlichkeit (in %), den Radonreferenzwert von 300 Bq/m³ zu überschreiten (BAG, Stand 2018)

Forum Umwelt und Krebs

Am 24. November 2020 hat die Krebsliga Schweiz in Zusammenarbeit mit dem BAG und dem Bundesamt für Umwelt das «Forum Umwelt und Krebs» organisiert, und damit einen Raum für den Dialog über umweltbewusste Krebsprävention geöffnet. Zahlreiche Expert/innen beleuchteten die vielfältigen Beziehungen zwischen Umwelt und Krebs. In vier parallel durchgeführten Workshops haben sich die Teilnehmenden zudem vertieft mit der Gesundheitsrelevanz von Radon, 5G, Glyphosat und endokrinen Disruptoren auseinandergesetzt. Weitere Informationen zu diesem Anlass sind unter www.krebsliga.ch verfügbar.

della Svizzera italiana (SUPSI) das Forschungsprojekt «Radon Mitigation Efficiency (RAME)»⁷ gestartet. Verschiedene Studien^{8,9} weisen auf einen tendenziellen Anstieg der Radonkonzentration in der Innenraumluft hin, wenn in Gebäuden Energiesparmassnahmen (z. B. durch den Austausch von Fenstern) getroffen werden. Die externe Evaluation des Aktionsplans hat deshalb einen Synergiebedarf zwischen Radonschutz und energetischen Massnahmen bei Gebäuden festgestellt, insbesondere im Rahmen des «Gebäudeprogramms».

Einbezug der Radonproblematik in die Ausbildung von Baufachleuten

Seit mehreren Jahren beauftragt das BAG drei regionale Fachstellen mit der Ausbildung und Unterstützung von Radonfachpersonen. Es handelt sich dabei um die SUPSI, die Fachhochschule Nordwestschweiz und die Hochschule für Technik und Architektur in Freiburg. Das BAG hat die Revision der Strahlenschutzgesetzgebung genutzt, um die Ausbildungsanforderungen für Radonfachpersonen gesetzlich zu verankern und eine E-Learning Plattform entwickelt, um die Ausbildung von Radonfachpersonen zu unterstützen. Das BAG veröffentlicht eine Liste der fast 300 in der Schweiz tätigen Radonfachpersonen auf seiner Internetseite¹⁰. Zudem hat es ein Netzwerk aufgebaut, um die Radonproblematik in der Berufs- und Hochschulausbildung im Baugewerbe dauerhaft zu verankern.

Sensibilisierung der Öffentlichkeit für die gesundheitlichen Aspekte von Radon

Das BAG nimmt regelmässig an Konferenzen teil, um verschiedene Zielgruppen für das Thema Radon zu sensibilisieren. So hat es gemeinsam mit der Krebsliga Schweiz bei der Organisation einer Radontagung 2014 und neulich

beim «Forum Umwelt und Krebs» zusammengearbeitet (siehe Kastchen). Das BAG hat auch zu verschiedenen Projekten zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit für Radon beigetragen, darunter zur Entwicklung der JURAD-BAT¹¹ Informationsplattform. Verschiedene Bevölkerungsbefragungen haben gezeigt, dass der Anteil der Bevölkerung, der noch nie von Radon gehört hat, nach wie vor gross ist, auch wenn der Kenntnisstand zwischen 1995 und 2019 von 32% auf 55% gestiegen ist. Die Bemühungen in diesem Bereich sollen daher fortgesetzt werden, insbesondere durch gezielte Informationen für die Immobilienbranche.

Entwicklung von Instrumenten und Methoden

Im Rahmen des Aktionsplans Radon wurde eine Arbeitsgruppe unter der Leitung des eidgenössischen Instituts für Metrologie (METAS) gebildet, um neue standardisierte Protokolle¹² für anerkannte Radonmessungen zu entwickeln. Ein Leitfaden für (nicht anerkannte) Kurzzeitmessungen ist ebenfalls auf der BAG-Website verfügbar. Das BAG führt eine Radondatenbank zur zentralen Erfassung von anerkannten Radonmessungen in Gebäuden. Die Kantone und die anerkannten Messstellen verfügen über einen geschützten Internetzugang zu dieser Anwendung. Darüber hinaus hat das BAG das Institut für Radiophysik (IRA) in Lausanne mit einem Forschungsprojekt zur Vorhersage der Radonkonzentration in Gebäuden beauftragt¹³. Nach der externen Evaluation des Aktionsplans ist es notwendig, diese Bemühungen fortzusetzen, z. B. im Hinblick auf Kurzzeitmessungen sowie die Entwicklung eines Vorhersagetools, um die Radonschutzmassnahmen für die Bevölkerung attraktiver zu machen.

7 <https://radonmitigation.ch>

8 L. Pampuri & al, Effects of buildings refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions Sustainable Cities and Society (42). pp. 100–106, 2018,

9 Yang S. & al., Radon investigation in 650 energy efficient dwellings in Western Switzerland: impact of energy renovation and building characteristics, Atmosphere, 2019

10 www.ch-radon.ch, Beratung durch Radonfachpersonen

11 <https://jurad-bat.net>

12 www.ch-radon.ch, Radonkonzentration messen

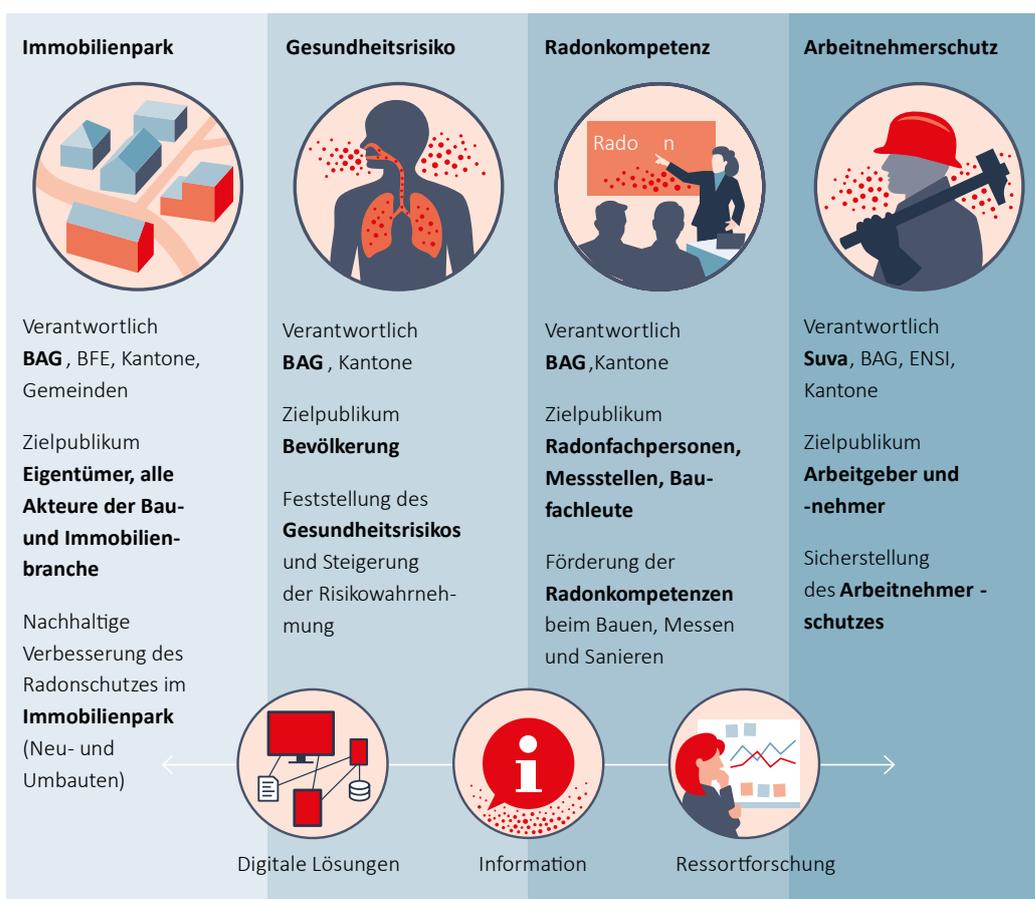
13 Kropat et al., Modeling of geogenic radon in Switzerland based on ordered logistic regression. J Environ Radioact. 2017

Ausblick: Aktionsplan Radon 2021 – 2030

Der Aktionsplan Radon 2021 - 2030¹⁴ wurde auf Basis der Ergebnisse der externen Evaluation sowie der revidierten Strahlenschutzgesetzgebung unter Berücksichtigung internationaler Empfehlungen erarbeitet. Bei diesen Arbeiten war ein Steuerungskomitee federführend, bestehend aus Vertreter/innen der BAG-Abteilungen Strahlenschutz und Chemikalien sowie der Suva. Daneben wurde eine Begleitgruppe geschaffen, die sich aus Vertreter/innen der Kantone, der Suva, des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS), des SIA und des Hauseigentümerverbands zusammensetzt. Anfang 2020 hat das BAG ein Vernehmlassungsverfahren bei den Kantonen und den relevanten Bundesämtern eröffnet.

Am 8. Mai 2020 hat der Bundesrat den Aktionsplan Radon 2021 - 2030 verabschiedet und damit die Stossrichtungen für die nächsten zehn Jahre festgelegt. Dieser neue Aktionsplan soll die bestehende Schutzstrategie verankern und führt gezielte strategische Ziele ein, um einen effektiven Schutz der Bevölkerung vor Radon zu gewährleisten (Figur 2). Dabei soll der Radonschutz im Gebäudebestand nachhaltig verbessert werden, insbesondere durch die Schaffung von Synergien bei energetischen Massnahmen von Gebäuden. Gleichzeitig besteht die Notwendigkeit, die Radonkompetenz bei den Baufachleuten zu erhöhen. Auch die Bevölkerung soll das Gesundheitsrisiko besser verstehen und verstärkt wahrnehmen, damit das Thema Radon an Bedeutung gewinnt. Schliesslich muss der Schutz vor Radon auch am Arbeitsplatz gewährleistet sein, was zum Schutz der Arbeitnehmer/innen beiträgt und sie vor Berufskrankheiten bewahrt.

14 www.bag.admin.ch, Bundesamt für Gesundheit BAG, Strategie & Politik, Politische Aufträge & Aktionspläne, Aktionspläne Radon



Figur 2:
Stossrichtungen des Aktionsplans Radon 2021 – 2030

2020

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

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	M. Schürch, R. Kozel
CERN	CERN, Occupational Health & Safety and Environmen- tal Protection (HSE) unit	Genève	F. Malacrida , P. Vojtyla
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, S. Wüthrich, N. Mosimann, 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. Jäggi, E. G. Yukihara, F. Assenmacher, M. Heule, G. Butterweck
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	G. Peduto	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	Schulklassen Genf Mitarbeiter PSI Zahnärzte, Schulzahnkliniken und pathologische Institute aus verschiedenen Gegenden	Ganzkörpermessungen in Genf (HUG) und am PSI ⁹⁰ Sr-Bestimmungen an Wirbelknochen und Milchzähnen
Emissionen von KKW, Betrieben etc.	Kernanlagen, Forschungsanlagen, etc. Kläranlagen der Agglomerationen Sickerwässer von Deponien	Abluftfilter, Abgas etc. Abwässer aus Spitäler, Deponien, Kehricht-verbrennungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen γ -, α - und ⁹⁰ Sr-Messung

4. Überwachungsbereiche und 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, HUG 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 2021

Weitere Informationen und Bezugsquelle :
BAG, Direktionsbereich Verbraucherschutz, 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 2021

Informations supplémentaires et diffusion :
OFSP, Unité de Direction Protection des consommateurs,
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