

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

2019



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

2019

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 2019.

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 (dieses Jahr per Videokonferenz ...) die Gelegenheit wichtige Fragen und letzte Korrekturen im Plenum zu besprechen.

Das Ergebnis dieses Prozesses für das Jahr 2019 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
	<i>Tâches, résultats, évaluation</i>	12
2	Doses de rayonnements reçues par la population	35
	<i>Radon, doses médicales et naturelles, exposition professionnelles</i>	35
3	Rayonnement externe	39
	<i>Mesures In situ</i>	40
	<i>Réseau NADAM</i>	46
	<i>Mesures d'aéroradiométrie</i>	53
4	Environnement	59
	<i>Radioactivité dans l'air et les précipitations</i>	60
	<i>URAnet aero</i>	65
	<i>Surveillance de l'air avec des avions militaires</i>	70
	<i>Systèmes aquatiques / URAnet aqua / Tritium dans l'Air</i>	75/79/82
	<i>Sol et herbe</i>	88
	<i>Radioactivité naturelle dans les eaux de consommation suisses</i>	93
5	Denrées alimentaires	99
	<i>Lait, céréales, légumes, viandes, chasse, etc.</i>	100
6	Radioactivité dans le corps humain	107
	<i>Mesures du corps entier</i>	108
	<i>Vertèbres et dents de lait</i>	110
7	Mesures de nucléides spéciaux	115
	<i>Carbone 14, Krypton 85, Argon 37</i>	116
	<i>Plutonium et Américium</i>	128
8	Surveillance des installations nucléaires	135
	<i>Emissions et Immissions</i>	136
	<i>Orssdosis und Ortsdosisleistung / MADUK</i>	146 / 148
	<i>ZWILAG</i>	153
	<i>Installations nucléaires et l'environnement</i>	156
	<i>CERN - rejets et environnement (mesures CERN)</i>	164
	<i>CERN- mesures OFSP</i>	170
9	Industries et hôpitaux	177
	<i>Emissions des industries</i>	178
	<i>Emissions des hôpitaux</i>	181
	<i>Surveillance au voisinage des industries</i>	185
	<i>Radionucléides utilisés en médecine dans les STEP</i>	192
	<i>Plan d'action radium</i>	198
10	Plan d'action radon 2012-2020	203
	Annexes	209

Inhaltverzeichnis

1	Umweltüberwachung : Zusammenfassung	20
	<i>Auftrag, Ergebnisse, Beurteilung</i>	21
2	Strahlenexposition der Bevölkerung	32
	<i>Radon, medizinische und natürliche Dosen, berufliche Exposition</i>	32
3	Externe Strahlung	39
	<i>In situ Messungen</i>	40
	<i>Netzwerk NADAM</i>	46
	<i>Aeroradiometrische Messungen</i>	53
4	Umwelt	59
	<i>Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag</i>	60
	<i>URAnet aero</i>	65
	<i>Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen</i>	70
	<i>Aquatische Systeme / URAnet aqua / Tritium in der Aare</i>	71/77/80
	<i>Boden und Gras</i>	86
	<i>Natürliche Radioaktivität im Schweizer Trinkwasser</i>	93
5	Lebensmittel	99
	<i>Milch, Getreide, Gemüse, Fleisch, Wildfleisch, usw.</i>	100
6	Radioaktivität im Menschen	107
	<i>Ergebnisse der Ganzkörpermessungen</i>	108
	<i>Wirbelknochen und Milchzähne</i>	110
7	Messung von Spezialnukliden	115
	<i>Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37</i>	116
	<i>Plutonium und Americium</i>	128
8	Überwachung der Kernanlagen	135
	<i>Emissionen und Immissionen</i>	136
	<i>Ortsdosis und Ortsdosisleistung / MADUK</i>	146 / 148
	<i>ZWILAG</i>	153
	<i>Nukleare Anlagen und Umwelt</i>	156
	<i>CERN - Emissionen und Umwelt (CERN-Messungen)</i>	164
	<i>CERN- BAG-Messungen</i>	170
9	Industrien und Spitäler	177
	<i>Emissionen der Betriebe</i>	178
	<i>Emissionen der Spitäler</i>	181
	<i>Überwachung in der Umgebung von Industrien</i>	185
	<i>Radionukliden aus der Medizin in Abwasserreinigungsanlagen</i>	192
	<i>Aktionsplan Radium</i>	198
10	Aktionsplan Radon 2012-2020	203
	Anhänge	209

Chapitre / Kapitel 1

Surveillance de l'environnement : résumé
Umweltüberwachung : Zusammenfassung

2019

- Tâches et programme de mesure
- Résultats de la surveillance 2019
- Evaluation
- Auftrag und Messprogramm
- Ergebnisse der Umweltüberwachung 2019
- 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 qui en résultent pour la population. Fait partie de cette surveillance générale le suivi des anciennes contaminations dues aux essais nucléaires atmosphériques américains et soviétiques des années 50 et 60 ainsi 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 effectuées 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.

Nouveau réseau automatique de mesure 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 Suisse sont couvertes, le réseau étant toutefois plus dense dans les régions à la fois fortement peuplées et potentiellement 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 son prédécesseur (limite de détection de l'ordre de 1 à 2.5 milli-becquerels par mètre cube (mBq/m^3) pour le césium-137 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.

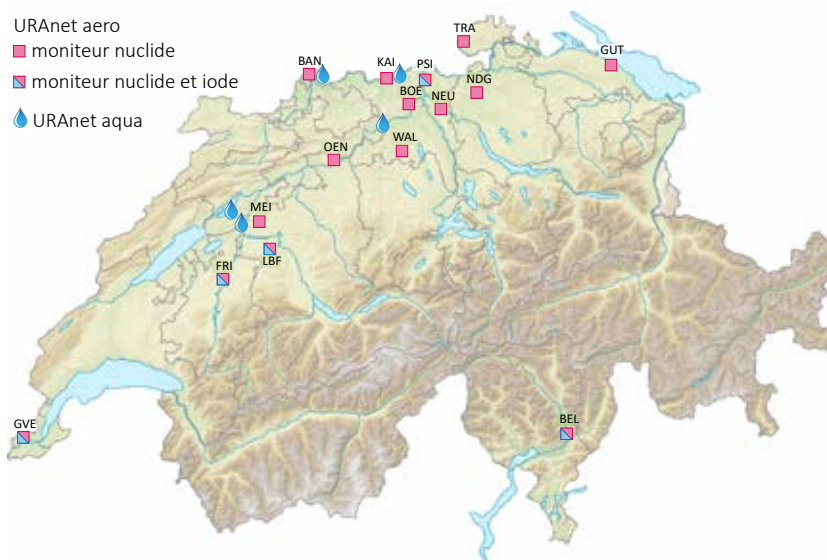


Figure 1:
Réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air (URAnet aero) et dans les cours d'eau (URAnet aqua).

Résultats de la surveillance 2019

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 2019 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 ^{210}Pb .

Dans les précipitations, la radioactivité est principalement liée au ^7Be ainsi qu'au tritium, tous deux produits par le rayonnement cosmique. Pour le tritium, un apport artificiel par les rejets des centrales nucléaires et de certaines industries est également mesurable en différents endroits (voir chapitres consacrés à la surveillance de ces entreprises). Dans les rivières, la teneur en tritium est généralement de quelques Bq/l.

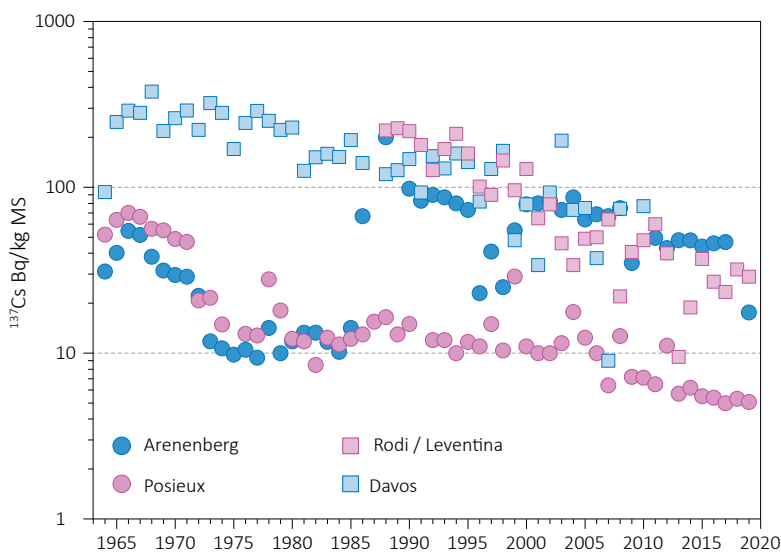


Figure 2:
 ^{137}Cs (en Bq/kg de matière sèche) dans les échantillons de sol de différentes stations de Suisse (1964 - 2019).

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 et 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 4), qui sont absorbés par les plantes à travers leurs racines, ne sont décelables dans l'herbe que sous forme de traces. Leur répartition régionale est similaire à celle enregistrée pour le sol.

Aucune activité de ^{137}Cs supérieure à la limite de détection de 0.4 Bq/kg n'a pu être décelée dans les 19 échantillons de céréales ni dans les 28 échantillons de fruits et légumes prélevés en Suisse en 2019. 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 120 analysés en 2019 ont présenté une activité en ^{137}Cs mesurable: la valeur maximale de 9.1 Bq/l a été enregistrée dans un échantillon prélevé dans les vallées sud des Grisons; de faibles activités, de l'ordre de 1 à quelques Bq/l, ont également été mesurées dans d'autres échantillons de lait provenant de ces régions ainsi que du Tessin. 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 2019 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 66 échantillons de lait par le canton de BS, l'IRA et le laboratoire de Spiez étaient toutes nettement inférieures à 1 Bq/l (ancienne valeur de tolérance selon l'OSEC pour ce radionucléide), avec une valeur maximale enregistrée de 0.69 Bq/l et une valeur médiane de 0.04 Bq/l. Les activités les plus élevées ont été mesurées dans un échantillon produit par des vaches ayant brouté dans les alpages de l'Oberland bernois. 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.

Certains champignons sauvages indigènes, notamment les bolets bais et les pholiotés ridés présentent toujours des valeurs accrues de ^{137}Cs . 74 échantillons de champignons sauvages indigènes provenant des cantons des Grisons et de Glaris ont été analysés par le laboratoire cantonal GR en 2019. Dans quatre échantillons les activités spécifiques de ^{137}Cs étaient supérieures à la valeur maximale de 600 Bq/kg fixée pour ce radionucléide dans l'Ordonnance Tchernobyl. Dans un échantillon (Cortinarius) en provenance des vallées sud des Grisons, cette valeur maximale était même dépassée d'un facteur 5 (3'300 Bq/kg). Cette année encore, le canton du Tessin a poursuivi le contrôle systématique des sangliers chassés sur son territoire mis en place en 2013 en collaboration avec l'OFSP. En 2019, 643 sangliers ont ainsi fait l'objet d'une mesure de tri, réalisée sur place à l'aide d'un instrument dosimétrique. Dans environ 5% des cas, un dépassement de la valeur maximale pour le ^{137}Cs , fixée à 600 Bq/kg selon l'Ordonnance Tchernobyl, a été constatée et les sangliers concernés ont été confisqués par le vétérinaire cantonal.

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 2019, le laboratoire cantonal de Bâle a encore analysé 30 échantillons de denrées alimentaires (thé, épices, sauces, soupes, etc.) en provenance du Japon. Seulement quelques échantillons de thé ont présenté des traces mesurables de ^{137}Cs (env. 1 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, TI, ZH). Ces analyses ont essentiellement porté sur les baies des bois (et produits à base de baies des bois), et les champignons sauvages, qui sont connus pour accumuler davantage le ^{137}Cs . La plupart des 64 échantillons n'ont présenté que de faibles traces de ^{137}Cs , avec sporadiquement quelques valeurs plus élevées notamment dans les champignons (maximum de 59 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 quelques dépassements de la valeur maximale (Ordonnance Tchernobyl) constatés en 2019 pour le ^{137}Cs dans les denrées alimentaires indigènes (sangliers, champignons) sont toujours dus, plus de 30 ans après, aux retombées radioactives consécutives à l'accident de Tchernobyl.

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 2019.

La contribution du rayonnement direct est clairement mesurable en certains points de la clôture des centrales de Mühleberg et Leibstadt. Ainsi, l'évaluation des dosimètres disposés à la clôture de ces centrales a montré une élévation de la dose ambiante annuelle pouvant atteindre 1.3 et 1.2 mSv/an (après soustraction du bruit de fond naturel) resp. pour Mühleberg et Leibstadt. 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 du programme de surveillance des immissions autour des centrales nucléaires ont montré que l'impact de ces dernières sur l'environnement est resté faible en 2019. Les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques, comme, par exemple, des valeurs accrues de ^{14}C dans les feuillages (augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 91 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. Les concentrations de tritium dans les précipitations sont généralement restées faibles.

Suite à la réduction substantielle des rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de Mühleberg depuis 2016, aucune trace de ^{54}Mn , ^{58}Co ou de ^{60}Co n'est aujourd'hui décelable dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, prélevés en aval des centrales nucléaires. Par le passé, de faibles traces de ces radionucléides étaient régulièrement détectées, notamment dans l'Aar à Hagneck, en aval de la centrale de Mühleberg. Le ^{137}Cs présent dans les échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin, provient quant à lui essentiellement de la remobilisation des dépôts de l'accident de Tchernobyl et des essais d'armes atomiques des années 60. Autre conséquence de la réduction de ces rejets d'effluents liquides, aucune trace des isotopes du cobalt n'a pu être mise en évidence en 2019 dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar et dans le Rhin. Ainsi le seul radionucléide indicateur des rejets liquides des centrales nucléaires ayant été décelé dans l'environnement en 2019 est le ^{54}Mn , retrouvé sporadiquement dans les sédiments prélevés à Hagneck et Klingnau.

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 ont montré que les rapports isotopiques $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ observés sont proches de 0.4, 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 mai-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation (env. 10 Bq/l dans l'Aar à Brugg en avril) en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant la période de révision.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval des centrales de Mühleberg, Beznau et Leibstadt en 2019 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle, autre que le ^{137}Cs mesuré en très faible concentration (1 Bq/kg) dans le poisson pêché dans le Rhin, près de Augst. De faibles traces de $^{239+240}\text{Pu}$, resp. de ^{241}Am , voisines de la limite de détection, ont été retrouvées dans les poissons pêchés dans l'Aar en aval de Mühleberg, resp. Beznau. Même si les rapports isotopiques n'ont pu être évalués pour ces échantillons, puisque dans un cas l'américium et dans l'autre le plutonium présentait une concentration inférieure à la limite de détection, les résultats globaux obtenus pour ces radionucléides dans le milieu aquatique laissent supposer une contribution majoritaire des retombées des essais atomiques des années 60.

Par ailleurs l'examen des eaux des nappes phréatiques n'a mis en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle hormis une trace d' ^{241}Am à Pratteln. Les résultats des mesures de la radioactivité dans les denrées alimentaires prélevées au voisinage des centrales nucléaires sont semblables à ceux enregistrés ailleurs sur le Plateau Suisse.

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).

Cependant, même si l'exposition de la population attribuable aux rejets des centrales nucléaires conduit à des doses très faibles par rapport à celles d'origine naturelle ou médicale, le principe d'optimisation demande 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.

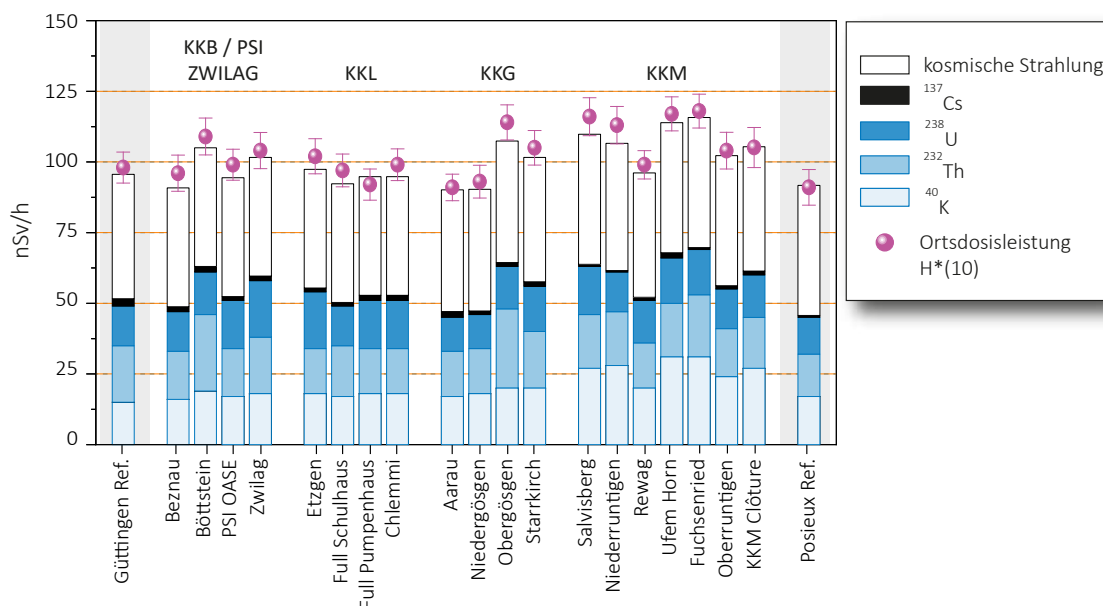


Figure 3:

Contributions individuelles à l'exposition ambiante ($H^*(10)$) attribuables aux différents radionucléides présents sur les sites examinés par l'OFSP en 2019 au voisinage des centrales nucléaires suisses ainsi qu'aux sites de référence de Güttingen et Posieux (gris). 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.

Surveillance des centres de recherche

Les rejets de substances radioactives dans l'environnement par le CERN ont été particulièrement faibles en 2019. En effet, le deuxième long arrêt du CERN (Long Shutdown 2) a débuté en décembre 2018 et s'est poursuivi pendant toute l'année; en conséquence, les activités pouvant avoir un impact radiologique sur l'environnement ont été minimales. Le contrôle par le CERN des émissions de ses installations a 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 2019 n'ont révélé la présence d'aucun radionucléide produit par les accélérateurs du CERN, contrairement aux années précédentes, ou des traces de ²⁴Na ou de ¹³¹I étaient sporadiquement enregistrées. L'impact radiologique du fonctionnement du CERN sur l'environnement et la population avoisinante a donc été particulièrement faible en 2019.

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. Selon l'évaluation de l'IFSN, les rejets effectifs du PSI/ZWILAG ont entraîné en 2019 une dose supplémentaire de 0.010 mSv pour la population avoisinante, soit environ 7% de cette valeur. La quasi-totalité de cette dose provient des rejets de gaz rares de courte période produits dans les accélérateurs de particules de la zone West de l'institut. La surveillance de l'environnement est assurée par le PSI ainsi que par l'OFSP qui effectue des mesures supplémentaires de manière indépendante. Hormis quelques valeurs sporadiquement plus élevées de tritium dans les précipitations, les résultats de la surveillance au voisinage du PSI n'ont pas mis en évidence de marquage de l'environnement dû au fonctionnement des installations du centre de recherche.

Pour les informations détaillées, se référer au chapitre 8.

Tritium dans l'industrie

Certaines entreprises industrielles utilisent également des substances radioactives. Le tritium est le radionucléide le plus utilisé dans ce domaine en Suisse, par exemple pour la fabrication de sources lumineuses au gaz de tritium ou pour la production de marqueurs radioactifs au tritium pour la recherche. Ces entreprises sont tenues de communiquer à l'autorité de surveillance le bilan de leurs émissions.

En 2019, 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 2019, comme au cours des années précédentes, les résultats de cette surveillance ont montré un marquage significatif de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) par le tritium, à proximité immédiate de ces entreprises, notamment à Niederwangen. Les concentrations de tritium enregistrées dans les précipitations à la station Firma, située au voisinage de l'entreprise mb microtec, se sont ainsi élevées en moyenne à 756 Bq/l en 2019, avec une valeur maximale de 3'220 Bq/l entre fin février et début mars. Cette valeur représente 16% de la nouvelle 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 élevées relevées dans les précipitations au cours des dix dernières années. Des valeurs plus élevées de tritium ont également été mesurées dans les distillats de fruits et légumes (pommes, poires, rhubarbe, légumes divers) récoltés fin août au voisinage de l'entreprise, atteignant 370 Bq/l dans le distillat d'un échantillon de pommes et 330 Bq/l dans celui d'un échantillon de rhubarbe. Dans les distillats des échantillons de lait, les concentrations en tritium étaient plus faibles (valeur maximale de 26 Bq/l).

Même si le risque pour la santé lié à la consommation régulière de tels produits (eaux de pluie, lait et légumes) reste très faible, puisque les doses supplémentaires qui en résulteraient seraient inférieures à 10 μ Sv/an, les valeurs mesurées se situent dans la fourchette haute des 10 dernières années. Consciente de cette problématique, l'entreprise s'est d'ailleurs engagée à réduire ses émissions d'ici 2020, en rénovant son système de ventilation. La SUVA et l'OFSP suivent de près l'évolution de ce projet.

Les concentrations de tritium mesurées dans les échantillons hebdomadaires de précipitations de Teufen/AR, au voisinage de l'entreprise RC Tritec, sont quant à elles nettement plus faibles. Avec une valeur maximale de 154 Bq/l et une médiane de 24 Bq/l, les concentrations de tritium mesurées dans les précipitations de Teufen en 2019 sont 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 et prolongé de 3 ans en avril 2019, 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.

Depuis 2014 et jusqu'à fin 2019, 668 bâtiments regroupant près de 3'900 appartements (ou objets commerciaux) ont fait l'objet d'un diagnostic du radium principalement dans les cantons de Neuchâtel, Berne et Soleure, mais aussi dans d'autres cantons tels que Bâle-Campagne, Genève, Jura, Tessin, Vaud et Zurich. En présence de traces de radium dans des locaux intérieurs, l'OFSP évalue la dose annuelle supplémentaire pouvant être reçue par les occupants sur la base des résultats de mesure et de scénarios d'exposition. Ces scénarios ont pour objectif d'exclure, pour tout occupant actuel ou futur, une exposition supérieure à la limite de dose de 1 mSv/an tolérée pour la population suisse. Si le résultat de cette estimation montre que cette valeur peut être dépassée pour l'occupant potentiellement le plus exposé à la présence de radium, alors la décision est prise d'assainir les locaux. Pour les jardins, un assainissement est requis en cas de dépassement de la valeur seuil de 1'000 becquerels par kilogramme (Bq/kg) pour la concentration en radium dans la terre sèche.

Parmi les biens-fonds contrôlés, 113 nécessitent un assainissement lié au ^{226}Ra , ce qui représente 70 appartements (ou objets commerciaux) et 74 jardins. Les assainissements sont déjà terminés (ou en cours) dans 97 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 (61) 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 4 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 74 jardins à assainir s'élèvent en moyenne à 26'500 Bq/kg. Dans un cas, elles avoisinent ponctuellement les 668'200 Bq/kg.

Par ailleurs, l'OFSP a déjà identifié une dizaine d'anciens sites industriels figurant au cadastre des sites pollués au sens de l'OSites qui nécessitent un assainissement lié au ^{226}Ra . Début 2019, l'OFSP a mis en place un nouveau groupe de soutien «pollutions mixtes» avec des représentants de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et de la Suva, afin de rechercher des solutions pour traiter ces cas complexes de pollution chimique et radioactive dans 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 second volet 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. Entre 2018 et 2019, l'OFSP a élaboré une stratégie en collaboration avec l'OFEV permettant de sélectionner les anciennes décharges figurant au cadastre des sites pollués qui pourraient potentiellement contenir des déchets contaminés au ^{226}Ra . Les décharges ainsi sélectionnées sont ensuite classées en trois catégories de risque sur la base de critères prédéfinis. Pour les deux catégories de risque plus élevé, des mesures spécifiques de radioprotection et/ou de surveillance ont été définies et sont à mettre en œuvre, alors que les décharges classées dans la catégorie de risque la plus faible ne nécessitent aucune mesure particulière, même en cas de travaux d'excavation. La stratégie proposée a été présentée aux cantons en 2019, les 3 cantons les plus concernés (Berne, Neuchâtel et Soleure) ayant été plus particulièrement consultés dans le processus d'élaboration du concept.

Pour les informations détaillées, se référer aux chapitres 9.4.

Utilisation de substances radioactives dans les hôpitaux

Les hôpitaux utilisent depuis de nombreuses années de l' ^{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 loin).

D'autres radionucléides comme l' ^{90}Y , le ^{177}Lu et depuis 2013 le ^{223}Ra 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 dépasse depuis 2015 celle du ^{131}I . Après avoir augmenté entre 2013 (premières applications) et 2017, l'utilisation du ^{223}Ra a diminué d'un facteur 2 en 2019. Elle est par ailleurs très faible par rapport à celle d'autres radionucléides. Le ^{166}Ho , utilisé depuis 2018 pour le traitement des tumeurs du foie, a été inclus pour la première fois dans ce rapport annuel. 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 mises en évidence dans les particules en suspension prélevées dans le Rhin à Weil am Rhein.

Pour davantage d'informations, consulter les chapitres 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 désormais 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. Une valeur plus élevée de ^{131}I (670 Bq/l) a été mesurée en 2019 dans les eaux de lavage de l'usine d'incinération de Zürich, indiquant que des déchets contenant du ^{131}I y a été incinéré. Une concentration inhabituellement élevée de tritium, atteignant 833 kBq/l, a été mesurée en janvier 2019 dans l'échantillon hebdomadaire d'eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération (UVTD) de Bâle par le laboratoire cantonal. Sur la base de ces résultats, l'activité totale incinérée est estimée à env. 700 GBq, soit plus du double de l'activité hebdomadaire de ^3H qui pourrait être incinérée avec l'accord préalable des autorités (i.e 300 GBq/semaine selon Art. 116 ORaP), ce qui n'était par ailleurs pas le cas. Ceci représente donc une violation de l'ordonnance sur la radioprotection. Les résultats des mesures du tritium dans les échantillons dans l'environnement réalisées par le laboratoire cantonal de Bâle-Ville et l'OFSP ont montré que les concentrations du tritium sont restées très faibles dans les précipitations et les eaux du Rhin. Il n'y a donc pas eu de risque pour la santé de la population. Des pics de concentrations journalières du ^3H avaient déjà été décelés à plusieurs reprises à l'UVTD de Bâle par le passé, mais jamais de telles valeurs n'avaient été mesurées. Une enquête approfondie est actuellement en cours pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs dans les ordures conventionnelles a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle.

Pour 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.

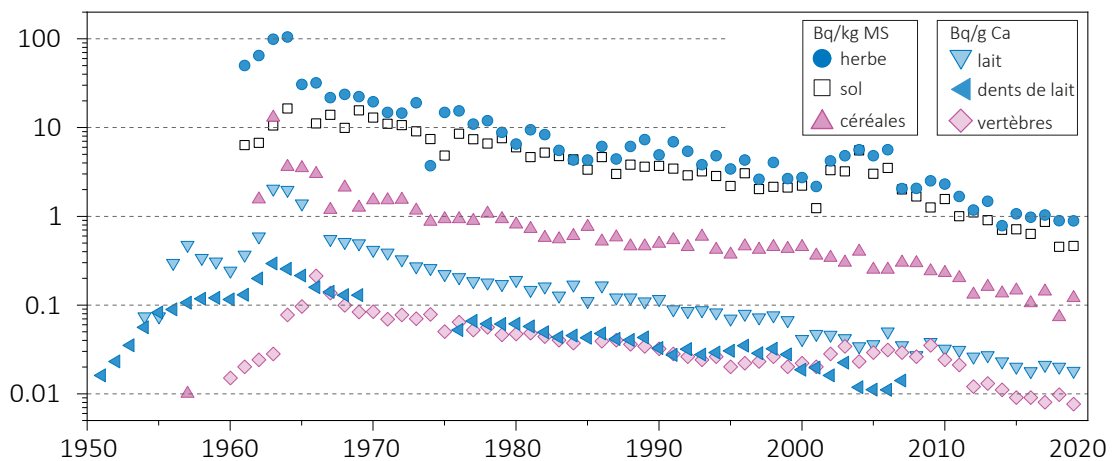


Figure 4:
 ^{90}Sr dans divers échantillons prélevés entre 1950 et 2019.

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 aux chapitres 6.1 et 6.2

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 2019, 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 2019 dans certaines denrées sensibles comme les champignons ou la viande de certains sangliers du Tessin.

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 ^{54}Mn dans les sédiments au voisinage 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 enregistrées dans les précipitations ont ainsi atteint au maximum 16% 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 et des eaux de lavage des fumées des usines d'incinération a révélé que des quantités de ^3H deux fois supérieures à l'équivalent de 1'000 fois la limite d'autorisation (la quantité maximale incinérable avec l'accord de l'autorité) avaient été incinérées en une semaine à la station d'incinération (UVTD) de Bâle, en violation de la législation sur la radioprotection. Bien que les concentrations de ^3H soient restées très faibles dans l'environnement et donc sans conséquence pour la santé de la population, une enquête approfondie est en cours pour déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs dans les ordures conventionnelles a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle.

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, Bern

Auftrag und Messprogramm

Überwachung der Umweltradioaktivität

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. Messungen vor Ort (In-situ-Gammaspektrometrie), welche die auf dem Boden abgelagerte Radioaktivität direkt erfassen, vervollständigen diese Analysen. Mit Untersuchungen der Radioaktivität im menschlichen Körper werden auch Kontrollen am Ende der Kontaminationskette durchgeführt.

Ergänzt wird dieses allgemeine Programm durch Analysen von Stichproben in den Kernanlagen während kontrollierten Abgaben sowie in Abwässern aus Kläranlagen, Deponien und Kehrlichtverbrennungsanlagen.

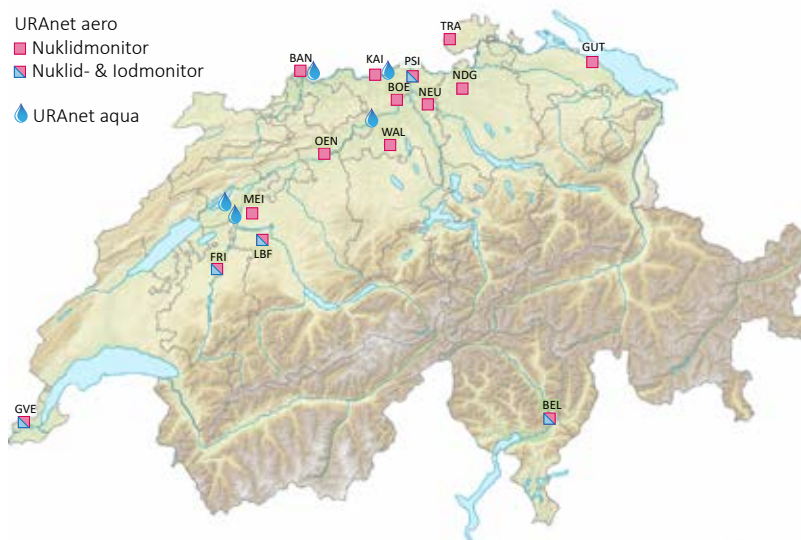
Automatische Messnetze (Figur 1) erfassen die Gamma-Dosisleistung über das ganze Land (NADAM = Alarm- und Messnetz zur Bestimmung der Dosisleistung) sowie speziell in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK = Messnetz in der Umgebung der Kernanlagen zur Bestimmung der Dosisleistung). Die kontinuierliche Überwachung der Radioaktivität der Aerosole und des Flusswassers wird durch die automatischen Messnetz URAnet des BAG sichergestellt: URAnet «aero» für die Überwachung der Luft und URAnet «aqua» für die Überwachung des Flusswassers. Zusätzlich zu den automatischen Messungen werden von Aerosolen, Niederschlägen und Flusswasser kontinuierlich Proben für empfindliche Messungen im Labor entnommen. Die Überwachung von Sedimenten, Erdproben, Gras, Milch und Lebensmitteln (inklusive Importe) erfolgt stichprobenweise. Die Daten werden in einer nationalen Datenbank beim BAG erfasst. Die Messresultate der automatischen Messnetze sowie ein Grossteil der Ergebnisse der Labormessungen sind auf www.radenviro.ch abrufbar. Hingegen werden die Ergebnisse von speziellen Messprogrammen (z.B. Messungen von Wirbelknochen oder Milchzähnen; ^{14}C -Messungen in Baumblättern) zurzeit noch ausschliesslich im hier vorliegenden Jahresbericht publiziert. Die Messprogramme sind vergleichbar mit denjenigen unserer Nachbarländer. Die Methoden für die Probenentnahme und die Messprogramme entsprechen dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Die Qualitätskontrolle erfolgt durch eine regelmässige Teilnahme der Laboratorien an nationalen und internationalen Vergleichsmessungen.

Das neue automatische Messnetz URAnet

Das neue automatische Messnetz zur Überwachung der Radioaktivität in der Luft (URAnet aero) ist seit September 2018 vollständig in Betrieb. Es ersetzt das veraltete RADAIR Messnetz, das nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl aufgebaut wurde. Das neue Messnetz ermöglicht die Identifikation und Quantifizierung der einzelnen im Aerosol vorhandenen Radionuklide (Gammaemitter) und alarmiert, wenn vordefinierte Warnschwellen überschritten sind. Es umfasst, über das ganze Land verteilt, 15 Messsonden (siehe Figur 1). Das Messnetz deckt alle geographischen Regionen ab, ist aber im Einflussbereich der Kernkraftwerke und dort insbesondere in stark besiedeltem Gebiet verdichtet.

Das 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 ^{137}Cs . Diese hohe Empfindlichkeit erlaubt es sehr geringe Konzentrationen von Radioaktivität in der Luft rasch zu erkennen, auch wenn diese noch keine Gefahr für die Gesundheit darstellen, und ermöglicht so, die Abschätzung der Strahlendosis für die Bevölkerung zu verbessern.

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

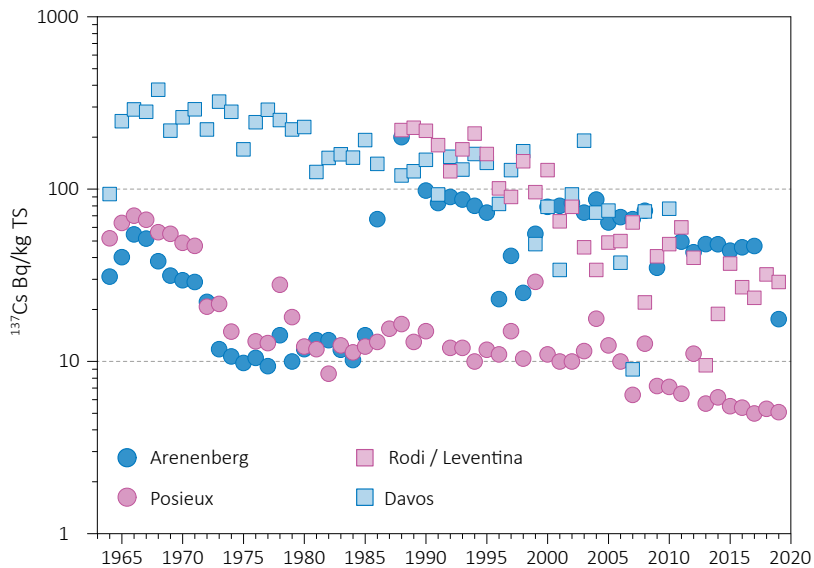


Figur 1: Automatische Messnetze zur Überwachung der Radioaktivität in der Luft (URAnet aero) und im Flusswasser (URAnet aqua).

Ergebnisse der Umweltüberwachung 2019

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

Die Resultate 2019 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 .



Figur 2:
 ^{137}Cs (in Bq/kg Trockenmasse) in Bodenproben verschiedener Stationen der Schweiz (1964 - 2019).

Bei den Niederschlägen ist die Radioaktivität vorwiegend auf ^7Be und Tritium, beides Produkte der kosmischen Strahlung, zurückzuführen. Für das Tritium stellen auch Abgaben aus Kernkraftwerken und gewissen Industriebetrieben weitere Quellen dar (siehe entsprechende Abschnitte zu diesen Betrieben). In den Flüssen beträgt der natürlich bedingte Tritiumgehalt in der Regel nur wenige Bq/l.

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 4), die von den Pflanzen über die Wurzeln aufgenommen werden, sind im Gras nur noch in Spuren vorhanden. Die regionale Verteilung ist dabei ähnlich wie für den Boden.

Weder in den 19 Getreideproben noch in den 28 Obst- und Gemüseproben, die 2019 in der Schweiz entnommen wurden, konnte eine Aktivität von ^{137}Cs oberhalb der Nachweisgrenze von 0.4 Bq/kg nachgewiesen werden. In Kuhmilch blieb der ^{137}Cs -Gehalt meist unter der Nachweisgrenze von 0.02 bis 1 Bq/l, je nach Messlabor. Nur wenige der 120 Milchproben, die im Berichtsjahr analysiert wurden, wiesen eine messbare ^{137}Cs -Aktivität auf: Der Maximalwert von 9.1 Bq/l wurde in einer Probe aus den Bündner Südtälern festgestellt; andere Milchproben aus diesen Tälern sowie aus dem Tessin zeigten ebenfalls geringe Aktivitäten im Bereich von 1 bis wenigen 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 2019 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 66 Milchproben waren alle deutlich unterhalb von 1 Bq/l (ehemaliger FIV-Toleranzwert), mit einem maximal gemessenen Wert von 0.69 Bq/l und einem Medianwert von 0.04 Bq/l. Die höchsten Aktivitäten wurden in einer Milchprobe von Kühen gemessen, die auf Alpweiden im Berner Oberland grasten. Das in der Schweiz gemessene ^{90}Sr wurden durch den Fallout aus den Atomtests in den 1960er Jahren verursacht, wobei die höher gelegenen Regionen, die mehr Niederschläge erhalten, stärker betroffen waren als die Tieflandregionen.

Gewisse einheimische Wildpilze, zum Beispiel Steinpilz oder Zigeuner (Reifpilz), können immer noch erhöhte Gehalte von ^{137}Cs aufweisen. 2019 wurden 74 Proben von einheimischen Wildpilzen aus den Kantonen Graubünden und Glarus vom Kantonalen Labor GR analysiert. In vier Proben lag die spezifische Aktivität von ^{137}Cs über dem Höchstwert der Tschernobyl-Verordnung von 600 Bq/kg. In einer Probe (Cortinarius) aus den Bündner Südtälern wurde dieser Maximalwert sogar um den Faktor 5 (3'300 Bq/kg) überschritten. 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 2019 wurden 643 Wildschweine vor Ort mit einem Dosisleistungsmessgerät ausgemessen. In rund 5% der Fälle wurde der gemäss Tschernobyl-Verordnung auf 600 Bq/kg festgelegte Höchstwert für ^{137}Cs überschritten und die betroffenen Wildschweine wurden vom Kantonstierarzt beschlagnahmt.

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 2019 analysierte das kantonale Laboratorium in Basel 30 Lebensmittelproben (Tee, Gewürze, Saucen, Suppen usw.) aus Japan. Nur wenige Teeproben zeigten messbare Spuren von ^{137}Cs -Aktivität (ca. 1 Bq/kg).

Lebensmittelimporte aus anderen Ländern und speziell aus Osteuropa wurden, wie jedes Jahr, von den kantonalen Laboratorien (BS, TI, ZH) ebenfalls analysiert. Meist handelte es sich dabei um Proben von Wildbeeren (und Produkte aus Wildbeeren), Wildfleisch und Wildpilze – alles Lebensmittel, die bekannt dafür sind ^{137}Cs anzureichern. Die meisten der 64 Proben zeigten nur geringe Spuren von ^{137}Cs . Sporadisch tauchten etwas höhere Werte auf, vor allem in Wildpilzen (Maximum 59 Bq/kg Frischmasse), aber sämtliche Werte blieben deutlich unterhalb des 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.

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 Direktstrahlung). 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 2019 eingehalten haben.

An einigen Stellen der Arealzäune der Kernkraftwerke Leibstadt und Mühleberg ist die Direktstrahlung aus dem Werk gut messbar. Bei diesen Kraftwerken zeigt die Auswertung der am Zaun angebrachten Dosimeter eine Erhöhung der Ortsdosis, die nach Abzug des natürlichen Untergrundes 1.3 (Mühleberg) bzw. 1.2 mSv/Jahr (Leibstadt) erreichen kann. Diese Werte erfüllen die Anforderungen von Art. 79 der StSV zur Begrenzung der Ortsdosis ausserhalb von Kontroll- und Überwachungsbereichen. 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 auch 2019 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 91 Promille in der Umgebung des Kernkraftwerks Leibstadt). Zur Orientierung: Eine zusätzliche ^{14}C -Aktivität von 100 Promille in den Lebensmitteln würde zu einer zusätzlichen jährlichen Dosis von einem Mikrosievert führen. Die Tritiumkonzentrationen im Niederschlag in der Umgebung der Kernkraftwerke sind tief geblieben.

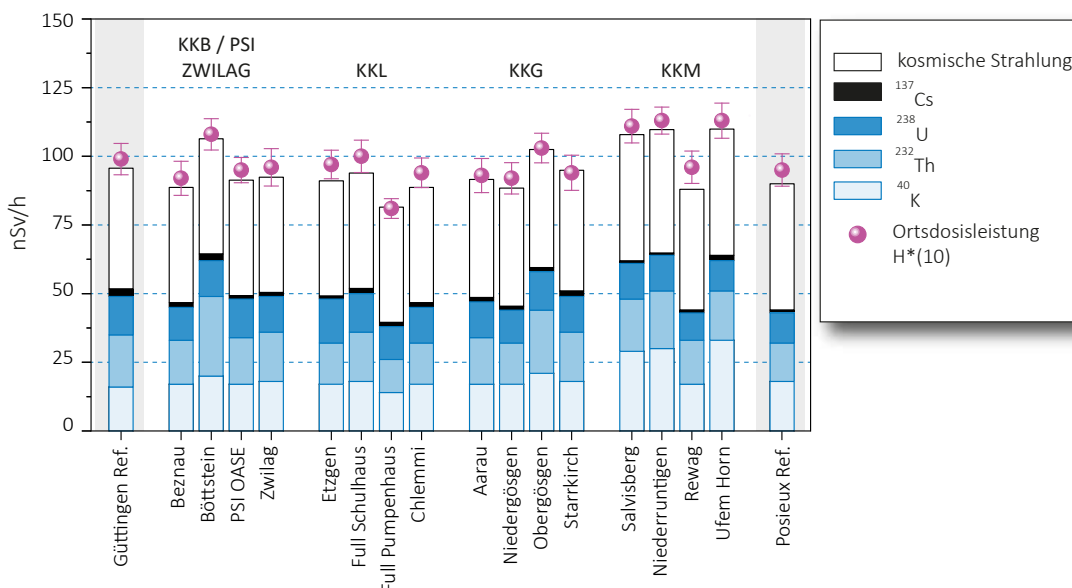
Bedingt durch den deutlichen Rückgang der Abgabe flüssiger radioaktiver Stoffe durch das Kernkraftwerk Mühleberg seit 2016 enthielten die Wasserproben aus Aare und Rhein flussabwärts der Kernkraftwerke 2019 keine messbaren Spuren von ^{54}Mn , ^{58}Co oder ^{60}Co . In früheren Jahren konnten Spuren dieser Radionuklide regelmässig detektiert werden, besonders unterhalb des Kernkraftwerks Mühleberg. 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).

Als weitere Folge der Reduktion der Abgabe flüssiger radioaktiver Stoffe konnten 2019 in den monatlich entnommenen Sedimentproben aus Aare und Rhein keine Spuren von Kobaltisotopen nachgewiesen werden. So war das einzige Radionuklid, das auf flüssige Abgaben aus Kernkraftwerken hinweist und 2019 in der Umwelt nachgewiesen wurde, ^{54}Mn , das sporadisch in bei Hagneck und Klingnau gesammelten Sedimenten gefunden wurde.

Die vom IRA durchgeführten Messungen von $^{239+240}\text{Pu}$ und ^{241}Am an verschiedenen Proben der aquatischen Umwelt (Wasser aus Aare und Rhein, Wasserpflanzen, Sedimente), die stromabwärts der Kernkraftwerke gesammelt wurden, zeigten Isotopenverhältnisse $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ nahe bei 0.4, was auf einen sehr grossen Beitrag des Fallout aus den Atomtests der 1960er Jahre hinweist.

Die Monatsmittelwerte für Tritium in der Aare und im Rhein blieben meist unter der Nachweisgrenze von 2 Bq/l mit Ausnahme der Monate Mai bis Juni, wo wie jedes Jahr in der Aare bei Brugg eine leichte Erhöhung der Werte festgestellt wurde (10 Bq/l im April). Die Ursache ist die Abgabe von Tritium-haltigem Abwasser durch das KKW Gösgen vor der Revision.

Analysen von Fischen aus der Aare und dem Rhein flussabwärts von KKM, KKB und KKL im Jahr 2019 ergaben keine anderen künstlichen Gammastrahler als ^{137}Cs , das in sehr niedriger Konzentration (1 Bq/kg) in im Rhein bei Augst gefangenen Fischen gemessen wurden. Kleine Spuren von $^{239+240}\text{Pu}$, bzw. ^{241}Am , nahe der Nachweisgrenze, wurden in Fischen gefunden, die in der Aare stromabwärts des KKM, bzw. KKB gefangen wurden. Obwohl die Isotopenverhältnisse hier nicht bewertet werden konnten, da entweder Americium oder Plutonium unterhalb der Nachweisgrenze vorhanden war, deuten die Resultate für diese Radionuklide in aquatischer Umgebung in ihrer Gesamtheit darauf hin, dass im Wesentlichen das Fallout aus den Atomtests der 1960er Jahre dafür verantwortlich ist.



Figur 3: Beiträge zur Ortsdosis ($H^*(10)$) durch die verschiedenen Radionuklide, die vom BAG 2019 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 abschätzen (siehe auch Kapitel 3.1).

Die Untersuchung des Grundwassers ergab keine Radionuklide künstlichen Ursprungs mit Ausnahme einer Spur von ^{241}Am in Pratteln. Die Resultate der Radioaktivitätsmessungen in Lebensmitteln aus der Umgebung der Kernkraftwerke sind ähnlich wie jene von Proben aus entfernten Gebieten im Mittelland.

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 3 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, gebietet der Grundsatz der Optimierung, dass die Kontrollen und Studien sorgfältig weitergeführt werden, um die verschiedenen wissenschaftlichen und gesetzlichen Zielsetzungen zu erfüllen 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 Abgaben radioaktiver Stoffe vom CERN an die Umwelt waren 2019 besonders gering. Tatsächlich begann die zweite lange Abschaltung des CERN (Long Shutdown 2) im Dezember 2018 und dauerte das ganze Jahr über an; daher waren die Aktivitäten, die radiologische Auswirkungen auf die Umwelt haben könnten, minimal. Die interne Emissionskontrolle der Anlagen 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 2019 durchgeführten Messungen ergaben keine von den CERN-Beschleunigern produzierten Radionuklide; dies im Unterschied zu den Vorjahren, wo sporadisch Spuren von ^{24}Na oder ^{131}I aufgezeichnet wurden. Die radiologischen Auswirkungen des CERN-Betriebs auf die Umwelt und die umliegende Bevölkerung waren daher 2019 besonders gering.

Die zusätzliche Dosis für die Bevölkerung in der Umgebung von PSI/ZWILAG darf für beide Anlagen zusammen maximal 0.15 mSv/Jahr betragen. Die Auswertungen des ENSI zeigen, dass die tatsächlichen Abgaben des PSI/ZWILAG 2019 zu einer Dosis von 0.010 mSv führen, d.h. 7% des Grenzwertes. 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. Ausser einigen sporadisch auftretenden erhöhten Tritiumkonzentrationen im Regenwasser zeigten die Überwachungsmessungen in der Umgebung des PSI keinen Einfluss der Forschungseinrichtungen auf die Umwelt.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 8.

Tritium aus der Industrie

Auch gewisse Industriebetriebe setzen 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 2019 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 2019 einen signifikanten Einfluss der Tritium-Emissionen auf Umweltproben (Niederschlag und Nahrungsmittel) aus der unmittelbaren Umgebung dieser Industriebetriebe, besonders bei Niederwangen. Dort betrug die Tritiumkonzentration im Niederschlag bei der Station «Firma» (in der Nachbarschaft der Firma mb-microtec) im Mittel 756 Bq/l mit einem Maximum von 3'220 Bq/l zwischen Ende Februar und Anfangs März. Dieser Wert entspricht 7.7% des

in der neuen Strahlenschutzverordnung festgelegten Immissionsgrenzwertes von 20'000 Bq/l für öffentlich zugängliche Gewässer. Diese im Niederschlag gemessenen Werte gehören zu den höchsten der letzten zehn Jahre. Erhöhte Tritiumwerte wurden auch in den Destillaten von Ende August in der Umgebung des Betriebes geernteten Früchten und Gemüse (Äpfel, Birnen, Rhabarber, verschiedene Gemüse) gefunden, mit einem Höchstwert von 370 Bq/l im Destillat einer Apfelprobe und 330 Bq/l im Destillat einer Rhabarberprobe. In Milchproben waren die Tritiumkonzentrationen tiefer, mit einem Maximum von 26 Bq/l.

Obwohl das mit dem regelmässigen Konsum (50 kg /Jahr) solcher Produkte (Regenwasser, Milch und Gemüse) verbundene Gesundheitsrisiko sehr gering bleibt, da die daraus resultierenden zusätzlichen Dosen weniger als 10 Sv/Jahr betragen würden, ist festzuhalten, dass die gemessenen Werte im oberen Bereich der letzten 10 Jahre liegen. Das Unternehmen ist sich dieses Problems bewusst und hat daher ein Projekt in Angriff genommen, um seine Emissionen bis 2020 durch die Renovierung seines Belüftungssystems zu reduzieren. Die SUVA und das BAG verfolgen die Fortschritte dieses Projekts genau.

Die Tritiumkonzentrationen in den wöchentlichen Regenproben von Teufen/AR in der Umgebung der Firma RC Tritec sind deutlich tiefer. Mit einem Maximum von 154 Bq/l und einem Medianwert von 24 Bq/l gehören die dort im Jahr 2019 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 und im April 2019 um 3 Jahre verlängerte Aktionsplan Radium 2015-2022 hat das Ziel, die durch die Verwendung von radiumhaltiger Leuchtfarbe bis in die 1960er Jahre entstandenen Altlasten zu bewältigen.

Seit 2014 bis Ende 2019 wurden in 668 Gebäuden mit rund 3'900 Wohnungen (oder Gewerbelokalitäten) eine Radiumdiagnose durchgeführt, im Wesentlichen in den Kantonen Neuenburg, Bern und Solothurn, aber auch in einigen weiteren Kantonen wie Basel-Land, Genf, Jura, Tessin, Waadt und Zürich. 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 für die dem Radium potenziell am meisten ausgesetzte Person überschritten werden kann, so wird entschieden, die Räumlichkeiten zu sanieren. Gärten sind sanierungsbedürftig, wenn die Radiumkonzentration in der Erde den Grenzwert von 1'000 Becquerel pro Kilogramm Trockengewicht (Bq/kg) übersteigt.

Bei 113 der kontrollierten Liegenschaften wurde ein Sanierungsbedarf bezüglich ²²⁶Ra festgestellt, wobei 70 Wohnungen (oder Gewerbelokale) und 74 Gärten betroffen sind. Bei 97 Liegenschaften ist die Sanierung bereits abgeschlossen. In den zu sanierenden Wohnungen lag die Dosisabschätzung für den meistbetroffenen Bewohner in der Mehrheit der Fälle (61) zwischen 1 und 5 mSv/Jahr. In 8 Wohnungen lag sie in einem höheren Bereich von 5-10 mSv/Jahr, in 4 Wohnungen im Bereich 10-15 mSv/Jahr und in einer Wohnung zwischen 15 und 20 mSv/Jahr. In den Bodenproben der 74 zu sanierenden Gärten betrug der Durchschnitt der gemessenen maximalen Radiumkonzentrationen 26'500 Bq/kg. In einem Fall wurde lokal eine Konzentration von 668'200 Bq/kg gemessen.

Darüber hinaus hat das BAG bereits rund zehn ehemalige Industriestandorte im Kataster der belasteten Standorte gemäss Altlastenverordnung identifiziert, die im Zusammenhang mit ²²⁶Ra sanierungsbedürftig sind. Anfang 2019 richtete das BAG eine neue Unterstützungsgruppe «pollutions mixtes» mit Vertretern des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und der Suva ein, um Lösungen für die Behandlung dieser komplexen Fälle von chemischer und radioaktiver Verschmutzung unter Einhaltung der Strahlenschutz- und Umweltschutzgesetzgebung sowie der Arbeitnehmerschutzvorschriften zu suchen.

Die Überwachung von ehemaligen Deponien mit Verdacht auf radiumhaltige Abfälle bildet einen zweiten 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.

Zwischen 2018 und 2019 hat das BAG in Zusammenarbeit mit dem BAFU eine Strategie 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 umgesetzt werden müssen. Für die niedrigste Risikokategorie sind keine besonderen Maßnahmen erforderlich. Der Strategievorschlag wurde den Kantonen im Jahr 2019 vorgelegt, wobei insbesondere die drei am stärksten betroffenen Kantone (Bern, Neuenburg und Solothurn) bei der Erarbeitung des Konzepts konsultiert wurden.

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 ^{223}Ra zum Einsatz. Während ersteres seit 2010 immer weniger verwendet wird, hat sich die Gesamtaktivität des eingesetzten ^{177}Lu über die letzten 10 Jahre mehr als verdreifacht und übertrifft seit 2015 diejenige von ^{131}I . Nach einem Anstieg zwischen 2013 (erste Anwendung) und 2017 ging die Verwendung von ^{223}Ra im Jahr 2019 um die Hälfte zurück und ist im Vergleich zu anderen Radionukliden gering. Neu in diesem Jahresbericht aufgenommen ist das seit 2018 zur Behandlung von Lebertumoren verwendete ^{166}Ho . 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 Portaldetektoren für Gammastrahler ausgestattet, um jegliche Verbrennung von radioaktiv kontaminierten Abfällen zu verhindern. Mit dem Inkrafttreten der neuen StSV im Jahr 2018 sind die KVAs 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. Im Jahr 2019 wurde im Waschwasser der KVA Zürich ein erhöhter Wert von ^{131}I (670 Bq/l) gemessen, ein Hinweis darauf, dass ^{131}I -haltiger Abfall verbrannt wurde. Im Januar 2019 hat das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt im Abwasser der Rauchgasreinigungsanlage der KVA Basel in einer Wochenmischprobe (Woche 3) eine ausserordentlich hohe Tritiumkonzentration von 833 kBq/L festgestellt. Die daraus abgeschätzte Gesamtaktivität von rund 700 GBq Tritium beträgt mehr als das Doppelte

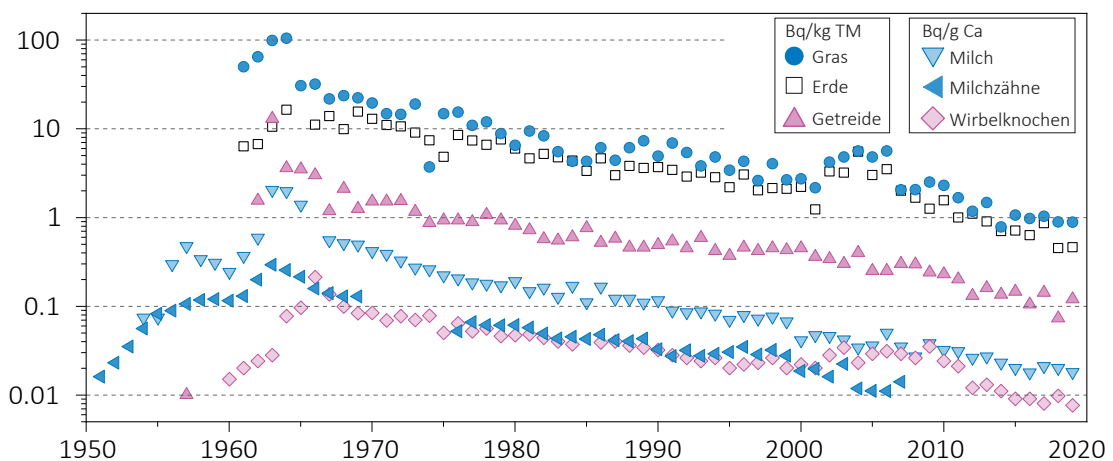
der maximal zustimmungsfähige Wochenabgabe von 300 GBq (StSV Art. 116) und stellt damit einen Verstoß gegen die Strahlenschutzverordnung dar. In Umweltproben haben die vom BAG und vom Kantonalen Laboratorium durchgeführten Messungen keine signifikant erhöhten Tritiumkonzentrationen gezeigt; die Tritiumkonzentrationen im Niederschlag und in den Gewässern des Rheins sind sehr niedrig geblieben. Es bestand also keine Gefahr für die Gesundheit der Bevölkerung. Tritiumspitzen in Waschwasser-Tagesproben waren bei der KVA Basel auch in der Vergangenheit mehrfach festgestellt worden, aber nie wurden so hohe Werte gemessen. Derzeit wird deshalb eine Untersuchung durchgeführt, um festzustellen, ob diese vorschriftswidrige Entsorgung von radioaktivem Abfall in Siedlungsabfällen fahrlässig oder vorsätzlich erfolgte.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 9.3.

Messungen am menschlichen Körper

Die Aufnahme von Radionukliden über die Nahrung lässt sich durch Ganzkörpermessungen (für Gamma-Emitter) und die Analyse des ^{90}Sr -Gehalts in Milchzähnen und Wirbelknochen von Menschen bestimmen. Anhand der Resultate der seit rund 40 Jahren durchgeführten Ganzkörpermessungen am Universitätsspital in Genf ist es möglich das natürlich im menschlichen Körper vorkommende ^{40}K zu quantifizieren: Es findet sich im Mittel in Konzentrationen von rund 56 Bq/kg bei den Frauen und 71 Bq/kg bei den Männern. Die ^{90}Sr -Konzentration in den Wirbelknochen und Milchzähnen liegt heutzutage nur noch bei einigen Hundertstel mBq/g Kalzium (Figur 4). Strontium wird vom menschlichen Körper ebenso wie Kalzium in Knochen und Zähnen eingelagert. Die Wirbelknochen werden als Indikator für die Kontamination des Skeletts herangezogen, weil diese Knochen eine besonders ausgeprägte Schwammstruktur aufweisen und rasch Kalzium über das Blutplasma austauschen. An Wirbelknochen von im laufenden Jahr verstorbenen Personen lässt sich das Ausmass der Kontamination der Nahrungskette mit ^{90}Sr eruieren. Die Milchzähne wiederum bilden sich in den Monaten vor der Geburt und während der Stillphase. Der Strontiumgehalt wird gemessen, wenn der Milchzahn von selbst ausfällt. Er gibt im Nachhinein einen Anhaltspunkt darüber, wie stark die Nahrungskette der Mutter zum Zeitpunkt der Geburt des Kindes kontaminiert war. Die in den Milchzähnen gemessenen Strontiumwerte (Figur 4) sind deshalb nach Geburtsjahr der Kinder aufgeführt. Dies erklärt, weshalb die Kurven zu den Milchzähnen und jene zur Milch beinahe parallel verlaufen.

Für weiterführende Informationen siehe Kapitel 6.1 und 6.2.



Figur 4:
 ^{90}Sr in verschiedenen, zwischen 1950 und 2019 entnommenen Proben (logarithmische Skala).

Beurteilung

In der Schweiz blieben 2019 die Konzentrationen von Radionukliden in der Umwelt sowie die Strahlendosen der Bevölkerung aufgrund künstlicher Strahlenquellen, wie in den Vorjahren, deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten. Das entsprechende Strahlenrisiko kann daher als sehr klein eingestuft werden.

Bei der natürlichen und der künstlichen Umweltradioaktivität bestehen regionale Unterschiede. Die natürliche Radioaktivität wird im Wesentlichen durch die Geologie beeinflusst, aber auch der Anteil der künstlichen Radioaktivität als Folge der Atomwaffenversuche und des Reaktorunfalls von Tschernobyl ist inhomogen über das Land verteilt. Radioaktives ^{137}Cs aus Tschernobyl wurde beispielsweise vornehmlich im Tessin abgelagert und ist dort heute noch immer in vielen Proben messbar. In geringerem Ausmass gab es auch erhöhten 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 2019 in bestimmten Lebensmitteln, wie Wildscheinfleisch aus dem Tessin oder Wildpilze, festgestellten Grenzwertüberschreitungen.

Die Ergebnisse der Umgebungsüberwachung von Kernkraftwerken und Forschungsanstalten sind vergleichbar mit jenen aus früheren Jahren. Auch wenn Spuren von durch diese Betriebe emittierten Radionukliden in der Umwelt nachgewiesen werden können, zum Beispiel ^{14}C in Baumblättern oder ^{54}Mn in Sedimenten in der Nähe 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 unmittelbarer Nähe einen deutlich messbaren Einfluss von Tritium auf die Umwelt (Regen und Lebensmittel). In Niederwangen erreichten die im Regen festgestellten Tritiumkonzentrationen maximal 16% des Immissionsgrenzwertes für Tritium in öffentlich zugänglichen Gewässern. In Lebensmittel aus der Nachbarschaft des Betriebes ist Tritium zwar auch etwas erhöht, ohne aber ein gesundheitliches Risiko beim Konsum dieser Lebensmittel darzustellen. Abgaben von Radionukliden mit dem Abwasser aus Spitälern sind nur sporadisch im Wasser in Kläranlagen grösserer Städte nachweisbar.

Die Überwachung des Wassers aus Kläranlagen und des Waschwassers aus Raugaswaschanlagen zeigte, dass in der KVA Basel Abfälle verbrannt wurden, die die maximal zustimmungsfähige Tritium-Wochenabgaben um mehr als das Doppelte überschritten. Obwohl die Tritiumkonzentrationen in der Umwelt gering blieben und damit keine Folgen für die Gesundheit der Bevölkerung hatten, läuft eine Untersuchung, ob die Entsorgung dieser radioaktiven Abfälle im Siedlungsabfall fahrlässig oder vorsätzlich erfolgte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die zusätzliche Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Nachbarschaft von Kernkraftwerken, Forschungseinrichtungen und Industrien sehr gering geblieben sind. 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.

Chapitre / Kapitel 2

Exposition de la population aux rayonnements ionisants

Strahlenexposition der Bevölkerung

2019

- Radon
- Doses médicales et naturelles
- Exposition professionnelles
- Radon
- Medizinische und natürliche Dosen
- Berufliche Exposition

2.1

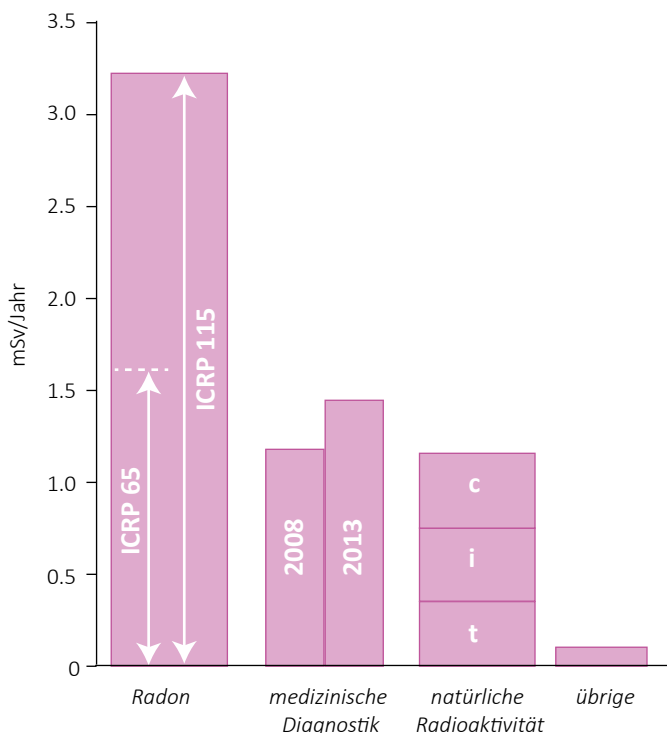
Strahlenexposition der Bevölkerung

P. Steinmann, S. Estier

Sektion Umweltradioaktivität URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Der grösste Anteil an der Strahlenexposition der Bevölkerung stammt vom Radon in Wohn- und Arbeitsräumen sowie von medizinischen Untersuchungen. Die Bevölkerung ist von diesen Strahlungsquellen unterschiedlich stark betroffen. Bei Personen, die beruflich mit Strahlen umgehen, gab es 2019 die meisten erhöhten Werte bei der Augenlinsendosis. Mehrere Personen, die mit Durchleuchtung arbeiten, überschritten den Jahresgrenzwert von 20 mSv.



Figur 1: Durchschnittliche Strahlendosen der Schweizer Bevölkerung [mSv pro Jahr pro Person]. Die Belastung durch Radon muss nach der Beurteilung von 2010 (ICRP 115, 2010) deutlich höher eingeschätzt werden als zuvor (ICRP 65). Der Wert für die medizinische Diagnostik beruht auf der Erhebung von 2008 bzw. auf der Zwischenerhebung von 2013. Die natürliche Exposition setzt sich aus terrestrischer Strahlung (t), Inkorporation (i) und kosmischer Strahlung (c) zusammen. Zu «übrige» gehören Kernkraftwerke und Forschungsanstalten sowie künstliche Radioisotope in der Umwelt.

Strahlendosen der Bevölkerung

Die Strahlenexposition der Bevölkerung wird aus den Strahlendosen natürlicher und künstlicher Strahlenquellen ermittelt. Die drei wichtigsten Ursachen sind das Radon in Wohnungen, die medizinische Diagnostik sowie die natürliche Strahlung (Figur 1). Für alle künstlichen Strahlenexpositionen (ohne Medizin) gilt für die allgemeine Bevölkerung ein Dosisgrenzwert von 1 mSv pro Jahr. Die berufliche Strahlenexposition, insbesondere für Junge und Schwangere, ist durch besondere Bestimmungen geregelt.

Strahlenbelastung durch Radon

Radon-222 und seine Folgeprodukte in Wohn- und Arbeitsräumen liefern den grössten Dosisbeitrag für die Bevölkerung. Diese Nuklide gelangen über die Atemluft in den Körper. Die internationale Strahlenschutzkommission ICRP betrachtet heute das Lungenkrebsrisiko aufgrund von Radon als etwa doppelt so hoch wie in früheren Einschätzungen (ICRP 115, 2010). Folglich muss die durchschnittliche «Radondosis» für die Schweizer Bevölkerung auch nach oben korrigiert werden. Sie beträgt mit den neuen Risikofaktoren etwa 3.2 mSv pro Jahr statt den 1.6 mSv gemäss den alten Dosisfaktoren aus der Publikation ICRP 65. Die Radonbelastung der Bevölkerung ist nicht einheitlich. Der angegebene Mittelwert leitet sich aus der durchschnittlichen Radonkonzentration von 75 Bq/m³ ab.

In ihrer Publikation 137 (2017) schlägt die ICRP einen neuen Dosiskoeffizienten für Arbeitnehmende vor, der auch für die Radonexposition der Bevölkerung in Wohnräumen anwendbar ist. Der UNSCEAR empfiehlt allerdings nach seiner jüngsten Bewertung die Beibehaltung eines Dosiskoeffizienten, der deutlich niedriger ist als derjenige der ICRP. Da die internationalen Empfehlungen nicht geklärt sind, veröffentlicht das BAG weiterhin die durchschnittlichen Radondosen für die Bevölkerung auf der Grundlage der Dosiskoeffizienten in den ICRP-Publikationen 65 und 115.

Bestrahlung durch medizinische Diagnostik

Die Dosis aufgrund medizinischer Anwendungen (Diagnostik) beträgt auf die gesamte Bevölkerung umgerechnet 1.4 mSv/Jahr pro Person (Auswertung der Zwischenerhebung 2013). Dies ist ein Anstieg von 0.2 mSv in fünf Jahren seit der letzten Auswertung (Erhebung 2008; 1.2 mSv/Jahr pro Person). Mehr als zwei Drittel der jährlichen kollektiven Strahlendosis in der Röntgendiagnostik verursachen computertomografische Untersuchungen. Wie beim Radon ist die Belastung durch die medizinische Diagnostik ungleichmässig verteilt: Rund zwei Drittel der Bevölkerung erhalten praktisch keine Dosis, bei einigen wenigen Prozenten der Bevölkerung sind es mehr als 10 mSv.

Terrestrische und kosmische 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 davon ab, wie der Untergrund zusammengesetzt ist. Die Dosis durch kosmische Strahlung beträgt im Mittel etwa 0.4 mSv pro Jahr. Die kosmische Strahlung nimmt mit der Höhe über Meer zu. In 10 km Höhe ist die kosmische Strahlung deshalb rund 100-mal stärker als auf 500 m über Meer. Aus diesem Grund ergibt ein Überseeflug (retour) eine Exposition von typischerweise rund 0.06 mSv. Das Flugpersonal kann eine Dosis von bis zu einigen mSv pro Jahr erhalten.

Radionuklide in der Nahrung und im Tabak

Radionuklide gelangen auch über die Nahrung in den menschlichen Körper und führen zu Dosen von rund 0.35 mSv. Das ^{40}K im Muskelgewebe liefert mit rund 0.2 mSv den grössten Beitrag. Weitere Radionuklide in der Nahrung stammen aus den natürlichen Zerfallsreihen von Uran und Thorium. Auch künstliche Radionuklide kommen in der Nahrung vor; hauptsächlich die Nuklide ^{137}Cs und ^{90}Sr von den Kernwaffenversuchen der 1960er-Jahre und vom Reaktorunfall von Tschernobyl im April 1986. Die regelmässigen Ganzkörpermessungen an Schulklassen ergeben heute Dosen durch aufgenommenes ^{137}Cs von weniger als einem Tausendstel mSv pro Jahr. Bei Rauchern und Raucherinnen führt das Inhalieren von natürlichen Radioisotopen, die im Tabak enthalten sind, zu einer zusätzlichen Strahlendosis. Gemäss neueren Studien liegt der Mittelwert für die effektive Dosis beim Rauchen von einem Paket Zigaretten (20 Stück) täglich bei 0.2 - 0.3 mSv pro Jahr.

Übrige (künstliche) Strahlenquellen

Zu den bisher erwähnten Strahlendosen kommt ein geringer Beitrag von ≤ 0.1 mSv pro Jahr aus den Strahlenexpositionen durch Kernkraftwerke, Industrie, Forschung, Medizin, Konsumgüter und Gegenstände des täglichen Lebens sowie künstliche Radioisotope in der Umwelt. Der radioaktive Ausfall durch den Reaktorunfall von Tschernobyl im April 1986 und die oberirdischen Kernwaffenversuche (1960er-Jahre) machen heute nur noch wenige Hundertstel mSv pro Jahr aus. Die Dosis durch die Ausbreitung von radioaktiven Stoffen nach dem Reaktorunfall in Fukushima 2011 ist in der Schweiz vernachlässigbar. Die Emissionen radioaktiver Stoffe über Abluft und Abwasser aus den Schweizer Kernkraftwerken, dem PSI und dem CERN ergeben bei Personen, die in unmittelbarer Nähe wohnen, Dosen von höchstens einem Hundertstel mSv pro Jahr.

Berufliche Strahlenexposition

Im Berichtsjahr waren in der Schweiz total ca. 104'000 Personen beruflich strahlenexponiert. Etwa zwei Drittel davon arbeiten in der Medizin und 9'300 Personen sind durch ihre Tätigkeit an Bord von Flugzeugen beruflich strahlenexponiert. Im Rahmen seiner Aufsichtstätigkeit untersucht das BAG in den Bereichen Medizin und Forschung alle Ganzkörper- und Augenlinsendosen über 2 mSv im Monat, sowie alle Extremitätendosen über 50 mSv. Die meisten erhöhten Werte gab es bei der Augenlinsendosis, wo mehrere Personen, die mit Durchleuchtung arbeiten, den Jahresgrenzwert von 20 mSv überschritten. Das BAG wird im Jahresbericht zur Personendosimetrie ausführlicher über diese Dosen berichten.

Der Jahresbericht «Dosimetrie der beruflich strahlenexponierten Personen in der Schweiz» wird auf www.bag.admin.ch/dosimetrie-jb publiziert werden.

2.2

Exposition de la population aux rayonnements ionisants

P. Steinmann, S. Estier

Section Radioactivité de l'environnement URA / OFSP, Berne

Résumé

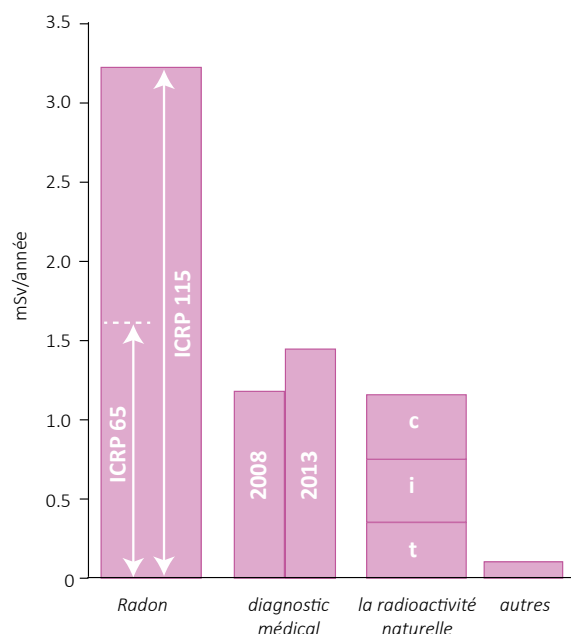
La plus grande partie de l'exposition de la population aux rayonnements est due au radon dans les habitations et sur les lieux de travail, ainsi qu'aux examens médicaux. L'exposition à ces sources varie largement d'un individu à l'autre. La plupart des valeurs élevées enregistrées en 2019 chez les personnes professionnellement exposées aux radiations concernait la dose au cristallin. Plusieurs personnes travaillant dans le domaine de la fluoroscopie ont par ailleurs dépassé la limite annuelle de 20 mSv.

Doses de rayonnement reçues par la population

L'exposition de la population est déterminée à partir des doses de rayonnement provenant de sources naturelles et artificielles. Elle provient principalement du radon dans les habitations, du diagnostic médical et de la radioactivité naturelle (figure 1). La valeur limite de dose due à des expositions artificielles (applications médicales exceptées) est fixée à 1 mSv par an pour la population. L'exposition aux rayonnements dans le cadre professionnel est réglementée par des dispositions spécifiques, en particulier pour les jeunes et les femmes enceintes.

Doses de rayonnement dues au radon

Le radon-222 et ses descendants radioactifs présents dans les habitations et sur les lieux de travail constituent la majeure partie de la dose de rayonnement reçue par la population suisse. Ces radionucléides pénètrent dans le corps par l'air respiré. La CIPR estime que le risque de cancer du poumon dû au radon est environ deux fois plus élevé que lors de son évaluation précédente (CIPR 115, 2010). La dose moyenne de radon à laquelle la population suisse est exposée a donc été corrigée vers le haut. Elle s'élève maintenant à 3.2 au lieu de 1.6 mSv par an, valeur qui avait été calculée sur la base des anciens facteurs de dose de la publication 65 de la CIPR. La dose de rayonnement due au radon n'est toutefois pas la même partout. La dose moyenne est calculée à partir de la concentration moyenne de radon, à savoir 75 Bq/m³.



Figur 1:

Doses moyennes de rayonnement reçues par la population suisse [en mSv/an/ personne]. La dose inhérente au radon est, selon l'évaluation de la CIPR (115, 2010), sensiblement revue à la hausse par rapport à l'estimation de la CIPR 65. La dose induite par le radiodiagnostic médical a légèrement augmenté depuis l'enquête de 2008 (enquête intermédiaire de 2013). La dose provenant de la radioactivité naturelle résulte du rayonnement terrestre (t), de l'incorporation (i) et du rayonnement cosmique (c). La rubrique «autres» englobe les centrales nucléaires, les instituts de recherche ainsi que les radio-isotopes artificiels présents dans l'environnement.

Dans sa publication 137 (2017), la CIPR propose un nouveau coefficient de dose pour les travailleurs qui s'applique également aux situations d'exposition au radon pour le public dans les habitations. Suite à sa dernière évaluation, l'UNSCEAR recommande en revanche de conserver un coefficient de dose nettement inférieur à celui de la CIPR. Les recommandations internationales n'étant pas clarifiées, l'OFSP continue à publier les doses moyennes de radon pour la population sur la base des coefficients de dose des publications 65 et 115 de la CIPR.

Doses dues au diagnostic médical

La dose moyenne reçue par la population par le biais d'applications médicales (diagnostic radiologique) est de 1.4 mSv par an et par personne selon l'évaluation de l'enquête intermédiaire de 2013. Ceci correspond à une augmentation de 0.2 mSv par rapport à l'enquête de 2008. Plus des deux tiers de la dose collective annuelle en radiodiagnostic sont dus aux examens de tomodensitométrie. L'exposition par le diagnostic médical est très inégalement répartie entre les personnes. Environ deux tiers de la population ne reçoit pratiquement aucune dose associée au radiodiagnostic, alors que la dose excède 10 mSv pour un faible pourcentage de la population.

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 par an et dépend de la composition du sol. La dose associée au rayonnement cosmique s'élève en moyenne à 0.4 mSv par an. Ce rayonnement augmente avec l'altitude. Il est environ 100 fois plus élevé à 10'000 mètres d'altitude qu'à 500 mètres. Un vol transatlantique (aller-retour) représente une dose d'environ 0.06 mSv. Pour le personnel navigant, la dose peut atteindre quelques mSv par an.

Aliments et tabac

Des radionucléides naturels sont également assimilés dans le corps humain via l'alimentation et produisent une dose moyenne d'environ 0.35 mSv par an, la part la plus importante provenant du ^{40}K fixé dans les tissus musculaires (environ 0.2 mSv par an). En plus du ^{40}K , les aliments contiennent des radionucléides issus des séries naturelles de l'uranium et du thorium. On y trouve aussi des radionucléides artificiels, principalement du ^{137}Cs et du ^{90}Sr provenant des retombées des essais nucléaires atmosphériques des années 1960 ainsi que de l'accident de Tchernobyl. Les mesures au corps entier régulièrement réalisées sur des collégiens ont montré que les doses liées à l'incorporation de ^{137}Cs étaient inférieures à un millième de mSv par an. Chez les fumeurs, l'inhalation des radionucléides naturels contenus dans le tabac conduit à une dose supplémentaire. D'après les études récentes, fumer un paquet de cigarettes (20) par jour occasionne une dose efficace moyenne s'élevant à 0.2 - 0.3 mSv par an.

Autres sources de rayonnement (artificielles)

Aux doses de rayonnement mentionnées précédemment vient s'ajouter une faible contribution, ≤ 0.1 mSv par an, qui comprend l'irradiation due aux centrales nucléaires, aux industries, à la recherche et à la médecine, aux biens de consommation et aux objets usuels ainsi qu'aux radioisotopes artificiels présents dans l'environnement. Les doses occasionnées par les retombées de l'accident de Tchernobyl et par les essais nucléaires atmosphériques des années 1960, ne représentent plus aujourd'hui que quelques centièmes de mSv par an. Les doses associées à l'accident du réacteur nucléaire de Fukushima sont négligeables en Suisse. Les doses reçues par les personnes habitant à proximité immédiate des centrales nucléaires suisses, du PSI ou du CERN, et qui sont attribuables aux substances radioactives émises par ces installations dans l'air et dans les eaux usées, atteignent au maximum un centième de mSv par an.

Exposition aux rayonnements dans le cadre professionnel

Au cours de l'année écoulée, environ 104'000 personnes ont été professionnellement exposées aux rayonnements en Suisse. Parmi ces personnes, deux tiers travaillent dans le secteur médical et près de 9'300 dans le secteur de l'aviation.

Dans le cadre de ses activités de surveillance dans les domaines de la médecine et de la recherche, l'OFSP examine toutes les doses au corps entier et au cristallin supérieures à 2 mSv par mois, ainsi que toutes les doses aux extrémités supérieures à 50 mSv. La plupart des valeurs élevées ont été identifiées pour la dose au cristallin, plusieurs personnes utilisant la radioscopie ayant en effet dépassé la limite annuelle de 20 mSv.

L'OFSP rendra compte plus en détail de ces doses dans le rapport annuel «Dosimétrie des personnes exposées aux radiations dans l'exercice de leur profession en Suisse», qui sera publié sous: www.bag.admin.ch/dosimetrie-rapports.

Chapitre / Kapitel 3

Rayonnement externe Externe Strahlung

2019

- Mesures in situ & exposition externe
- Réseau NADAM
- Mesures d'aéroradiométrie
- In situ Messungen
- Netzwerk NADAM
- Aeroradiometrische Messungen

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 2019, les mesures de spectrométrie in situ ont essentiellement porté sur le voisinage des installations 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 2019 n'ont signalé aucune valeur susceptible de représenter un risque pour la santé du public.

Introduction

Le réseau NADAM à l'échelle nationale et le réseau MADUK au voisinage des installations nucléaires assurent 24h sur 24 le suivi permanent de l'exposition ambiante en Suisse et signalent des augmentations anormales de celle-ci. Afin de déterminer les compositions individuelles à l'exposition ambiante globale que ces réseaux ainsi que les mesures effectuées avec des dosimètres à thermoluminescence ne permettent pas, les laboratoires mobiles de l'OFSP (Section URA, Berne), de l'IFSN (Brugg), du Laboratoire de Spiez et de l'IRA (Lausanne) utilisent la spectrométrie gamma directe sur site (in situ) souvent liée à des mesures de spectrométrie gamma effectuées en laboratoire sur des échantillons (sol, herbe) qui visent, quant à elles, la détection de traces de radionucléides.

La spectrométrie gamma in situ a l'avantage de permettre l'identification des radionucléides (émetteurs gamma) présents sur le site examiné, de déterminer 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. Les coefficients de conversion permettant la détermination des diverses contributions au débit d'exposition à partir des concentrations radioactives dans le sol ont par contre été revus par rapport à ceux de la publication ICRU 53, car ils ne correspondaient plus aux standards actuels. En effet, la grandeur dosimétrique de référence pour la détermination de l'exposition du public (irradiation externe) est aujourd'hui le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$, exprimé en [nSv/h], et non plus le débit de kerma dans l'air, en [nGy/h]. Les coefficients de conversion actuellement utilisés au laboratoire de l'OFSP sont détaillés plus bas^{2,3}.

Lors d'une mesure sur le terrain, un spectre gamma est enregistré et le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ global est mesuré simultanément sur le site à l'aide d'une chambre d'ionisation. L'analyse du spectre gamma in situ permet tout d'abord d'identifier les différents radionucléides naturels et artificiels présents sur le site puis, en se référant à la publication ICRU 53, de calculer leur concentration radioactive respective dans le sol en [Bq/kg] ou [Bq/m²], si leur distribution dans le profil de 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 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 ²³⁸U et du ²³²Th ainsi que pour le ⁴⁰K et le ¹³⁷Cs, dans le cas d'une distribution 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 (⁴⁰K, séries ²³⁸U et ²³²Th), évaluées pour une distribution homogène de ces radionucléides dans le sol, avec la contribution du rayonnement cosmique calculée à l'altitude du site. Notons que la formule permettant de calculer la contribution du rayonnement cosmique au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ a également du être adaptée par rapport à celle anciennement utilisée pour le débit de kerma dans l'air⁴, et s'écrit :

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

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.

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 ²³⁸U et du ²³²Th ainsi que pour le ⁴⁰K et le ¹³⁷Cs, 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

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

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/kommission-strahlenschutz/stellungnahmen-dosimetrie/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspectrometrie.pdf.download.pdf/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspectrometrie.pdf>

4 Radioprotection, vol. 22 n° 3, pages 231-239, 1987.

Résultats in situ 2019

En 2019, 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) et des centres de recherche (PSI, ZWILAG, CERN) ainsi qu'au Tessin, région de Suisse la plus touchée par les retombées de l'accident de Tchernobyl, conformément au programme de surveillance habituel. Depuis 2017, des mesures complémentaires sont effectuées au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg en vue d'évaluer plus précisément la situation radiologique avant le début des travaux de désaffectation (programme de mesures «Point zéro»), prévus dès le début 2020.

Des mesures par spectrométrie gamma in situ ont également été effectuées sur 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. Quelques points particuliers ont également été examinés en 2019, le col du Susten et les cinq nouveaux emplacements des stations du réseau NADAM. Cette méthode a également été utilisée lors de l'exercice général d'urgence GNU19.

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, 3 et 4 pour les principaux sites suisses examinés en 2019. 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 est également représentée.

La figure 1 montre que les radionucléides détectés au voisinage des centrales nucléaires, du PSI et du ZWILAG ainsi que leur contribution au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ se distinguent généralement peu de ceux enregistrés sur les sites de référence, situés hors influence de ces installations, comme Güttingen ou Posieux. Le seul émetteur gamma d'origine artificielle mis en évidence sur l'ensemble de ces sites en 2019 est le ^{137}Cs .

Les valeurs plus élevées de débit de dose enregistrées au voisinage de la centrale de Mühleberg en particulier à Salvisberg, Niederruntigen, Fuchsenried et Ufem Horn (fig. 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.

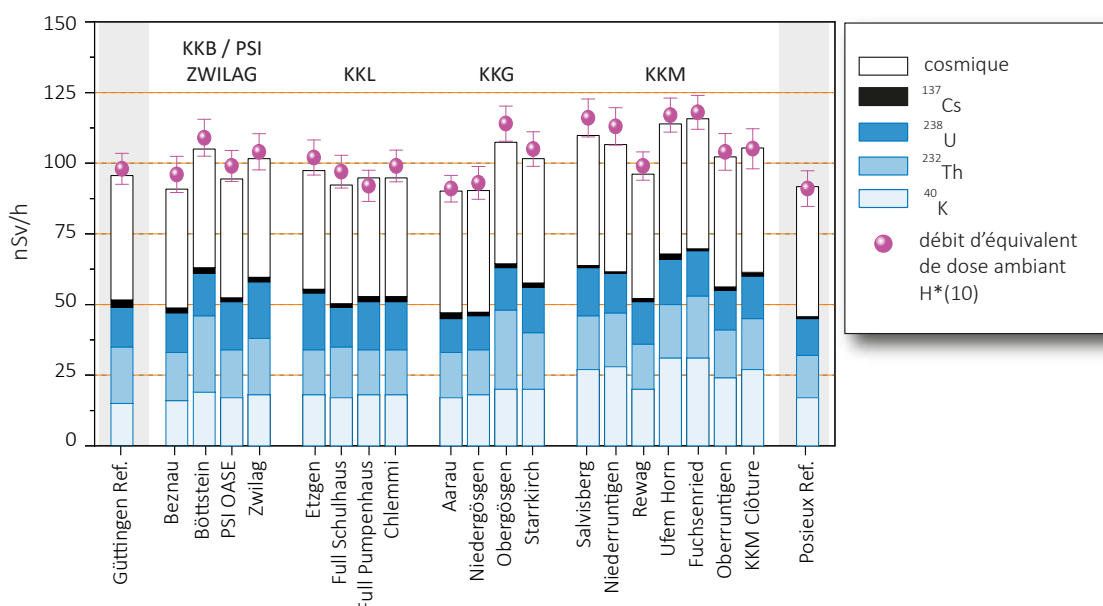


Figure 1 : Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage des centrales nucléaires suisses en 2019 ainsi qu'aux points de référence de Güttingen/TG et Posieux/FR (en gris). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

A noter également que les résultats des mesures effectuées à Rewag (fig. 1) diffèrent de ceux enregistrés par le passé. Les travaux de construction de la citerne d'eau potable (terminés en 2017) ont rendu l'accès à l'ancien point de mesure impossible. Ce point a donc été déplacé d'environ 300 mètres. La composition du remblai déposé sur le site suite aux aménagements diffère de celle du sol originellement présent qui était essentiellement composé de sable. Ceci explique l'augmentation des valeurs de ^{40}K , ^{228}Ac et ^{214}Bi (séries Th/U) par rapport aux résultats des mesures des années précédentes.

La situation radiologique au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg, qui a été mise à l'arrêt fin 2019, est généralement bien connue car le site fait l'objet d'une surveillance régulière depuis le début de la période d'exploitation de la centrale. Toutefois, afin de pouvoir évaluer l'impact radiologique éventuel des travaux de désaffectation, un programme de surveillance renforcé a été initié en 2017 pour une durée de 3 ans avant le début des travaux de démantèlement. Ce programme comprend l'analyse de radionucléides spéciaux, mais également des mesures in situ supplémentaires, sur des sites situés à proximité immédiate de la centrale (fig. 2). 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 2 indique l'emplacement des sept sites examinés en 2019 au voisinage de Mühleberg. En plus de Salvisberg, Rewag, Niederruntigen, Ufem Horn qui font l'objet d'un suivi depuis de nombreuses années, Fuchsenried, Oberruntigen et Clôture KKM sont les trois points supplémentaires mesurés dans le cadre de cette surveillance accrue.



Figure 2: Emplacement des 7 sites de mesure de spectrométrie gamma in situ et de prélèvement de sol et de végétation dans la région de la centrale nucléaire de Mühleberg en 2019.

Comme en 2017 et 2018 aucune différence notable n'a pu être remarquée entre les sites de la surveillance habituelle et les valeurs mesurées aux 3 points supplémentaires (fig. 1). A noter que pour chacun de ces points, un prélèvement annuel de sol et deux prélèvements (printemps et automne) de végétation ont été réalisés (résultat chap 8.5 les installations nucléaires et leur environnement).

La figure 3 montre les résultats des mesures in situ réalisées au voisinage du CERN en 2019. Ces résultats ne se distinguent pas de ceux enregistrés sur le site de référence de Posieux. Notons que pour l'année 2019 aucune trace de ^{41}Ar dans l'air n'a été décelée dans l'enceinte du centre de recherche (BAT 588) contrairement aux années précédentes. Ce gaz rare de courte période (demi-vie de 109.6 minutes) est produit dans les

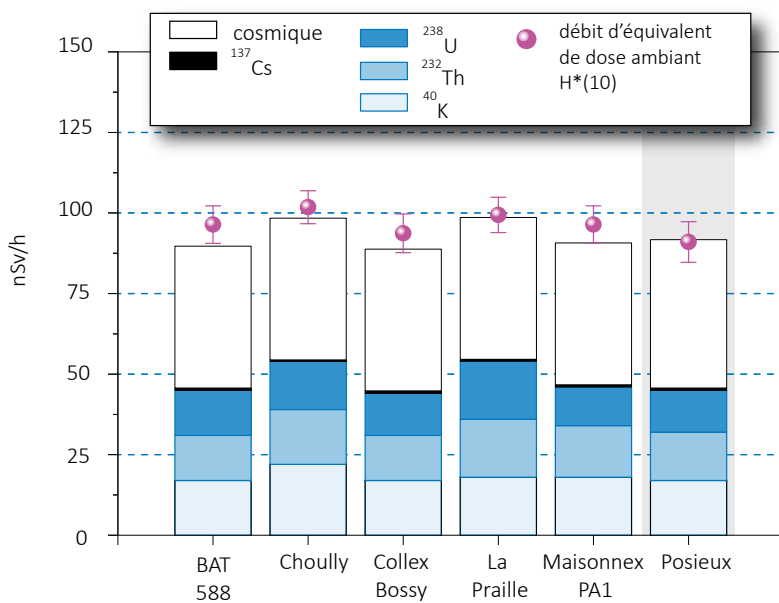


Figure 3: Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2019 au voisinage du CERN ainsi qu'au point de référence de Posieux (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

mis en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle sur ces sites. A noter que le débit d'équivalent de dose le plus élevé a, comme attendu, été mesuré au col du Susten (2'260 m d'altitude) où le rayonnement cosmique⁵ est presque doublé par rapport aux sites de plaine.

⁵ formule de calcul de la contribution du rayonnement cosmique - page 39

accélérateurs du centre de recherche et l'arrêt prolongé des installations du CERN en 2019 explique cette absence.

En plus du suivi des contaminations rémanentes en ¹³⁷Cs au Tessin, un certains nombres de sites supplémentaires ont été examinés en 2019, comme le col du Susten ou encore 5 nouveaux sites NADAM. Dans la mesure du possible, une mesure par spectrométrie gamma in situ est en effet effectuée pour toute nouvelle station NADAM (Cham/ZG, Hallau/SH, Mosen/LU, Thun/BE et Villars-Tiercellin/VD). Le site d'Arenenberg/TG a été également examiné en 2019. Les mesures in situ ainsi qu'un prélèvement de végétation et de sol annuel seront reconduites les années prochaines sur ce site.

La figure 4 montre les résultats des mesures effectuées au Tessin et sur les sites supplémentaires mesurés en 2019. Hormis des traces de ¹³⁷Cs, plus importantes dans le Nord-Est de la Suisse (Güttingen, Arenenberg) en raison de retombées plus importantes de Tchernobyl par rapport à l'ouest ou au centre de la Suisse (Thun, Villars), les résultats des mesures in situ n'ont

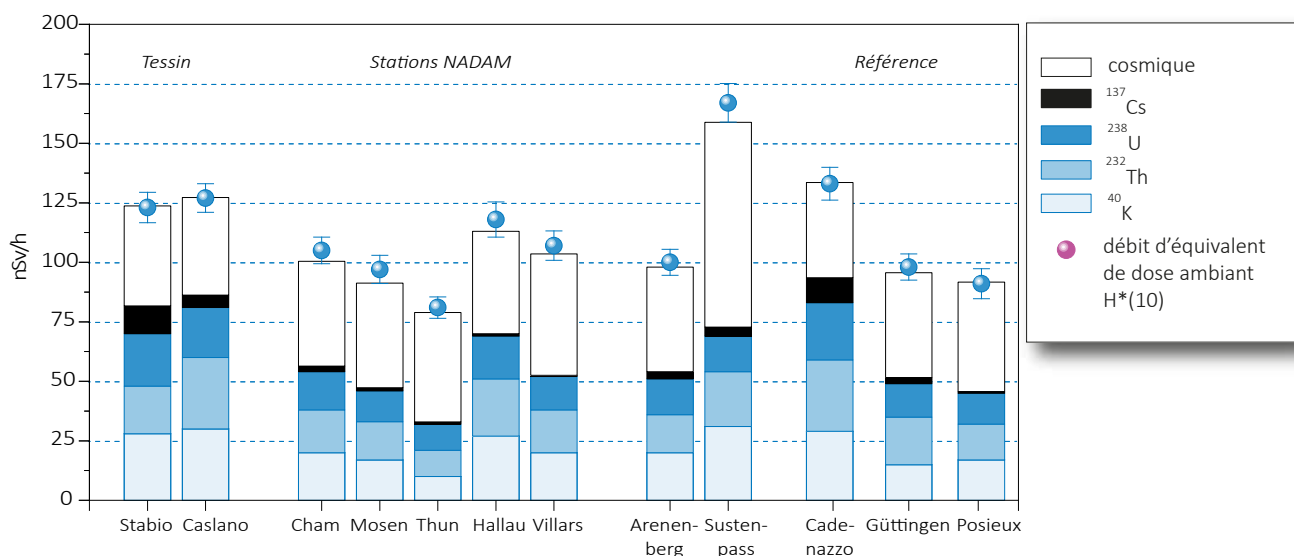


Figure 4: Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2019 au Tessin, aux cinq nouvelles stations NADAM, à Arenenberg et au col du Susten ainsi que sur les trois sites de référence. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

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.).

Notons encore que pour tous les sites examinés, les différences entre reconstruction in situ et mesures globales par chambre d'ionisation sont restées inférieures à 10 %.

Conclusions

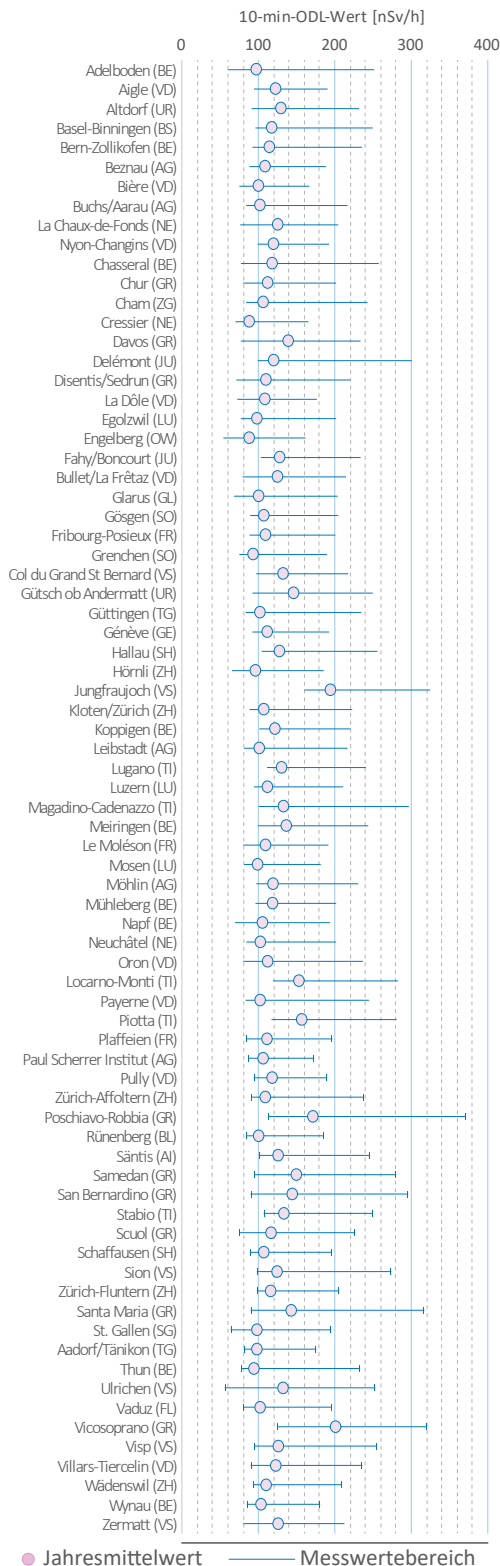
Les mesures de spectrométrie gamma in situ réalisées par l'OFSP en 2019 ont permis de caractériser les sites d'intérêt du point de vue de leur composition en radionucléides gamma et des contributions individuelles au débit d'exposition qui en résultent pour le public. Le champ d'application de ces mesures 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 $\text{H}^*(10)$ 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 danger pour la santé de la population.

3.2

Die automatische Überwachung der Ortsdosisleistung mit NADAM



Adrian Hess, Franziskus Stoffel, Cristina Poretti
 Nationale Alarmzentrale NAZ,
 Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS,
 Guisanplatz 1B, 3003 Bern

Zusammenfassung

Das Netz für die automatische Dosisleistungsalarmierung und -messung (NADAM) dient der grossräumigen und permanenten Überwachung der externen Strahlung in der Schweiz. Es besteht aus 76 über die ganze Schweiz verteilten Stationen, welche in 10-Minuten-Intervallen die γ -Ortsdosisleistung (ODL, $H^*(10)$) messen.

Das NADAM-Netz dient auch als Frühwarnsystem, da jede Überschreitung eines Alarmwerts an die Nationale Alarmzentrale (NAZ) gemeldet wird, zur sofortigen Beurteilung durch die Spezialisten des Fachbereichs Einsatz-Radioaktivität. Bei einem radiologischen Ereignis unterstützt das NADAM-Netz die NAZ bei der Bestimmung des gefährdeten Gebietes und der Definition allfällig anzuordnender Schutzmassnahmen.

Im Jahr 2019 wurden 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. Im Ereignisfall muss die NAZ Behörden warnen und orientieren, Bundesstellen und Kantone informieren und den Kontakt mit internationalen Behörden sicherstellen. Im Bereich «erhöhte Radioaktivität» hat sie besonders umfangreiche Aufgaben. Ein zentrales Element ist die Probenahme- und Messorganisation des Bundes, welche durch die NAZ koordiniert und eingesetzt wird und ihr den Zugriff auf ein umfangreiches Netzwerk von eigenen und fremden Ressourcen ermöglicht. Gemäss der Verordnung über die Nationale Alarmzentrale (VNAZ, SR520.18) betreibt sie dafür unter anderem das NADAM-Messnetz zur ständigen Überwachung der Radioaktivität und als Frühwarnsystem. Eine Überschreitung der Alarmschwelle

Figur 1:
 Jahresmittelwerte und Messwertebereiche der NADAM-Sonden. Der dargestellte Messwertebereich entspricht dem Bereich zwischen dem minimalen und dem maximalen 10 min-Wert der Sonden im Jahr 2019.

(1 mikroSv/h) löst in der NAZ eine Alarmmeldung aus. Dort wird der Wert verifiziert (Ausschluss von technischen Problemen, Überprüfung der meteorologischen Daten und Vergleich mit Nachbarstationen). Bei Bedarf werden weitere Messmittel für Abklärungen vor Ort aufgeboden, zum Beispiel kann die Kantonale Messunterstützung zugunsten der NAZ (KAMU NAZ) für Kontrollmessungen vor Ort aufgeboden werden. Bei einem radiologischen Ereignis kann die NAZ so rasch das gefährdete Gebiet bestimmen, Behörden des betroffenen Kantons orientieren und bei unmittelbarer Gefährdung zudem die Alarmierung und Sofortmassnahmen zum Schutz der Bevölkerung anordnen.

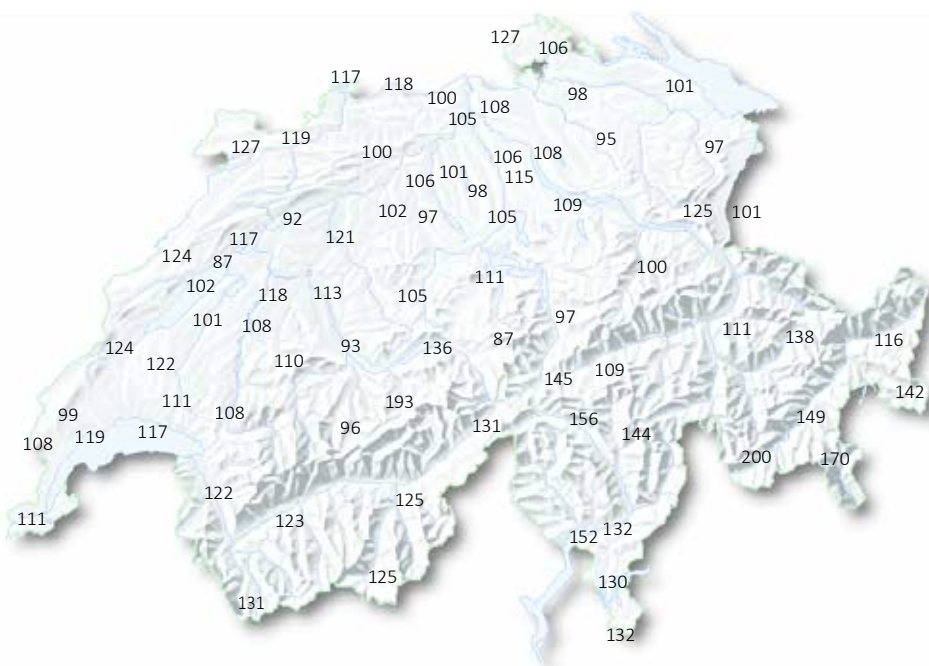
Die permanente Überwachung der externen Strahlung in der Schweiz wird von den 76 über die ganze Schweiz verteilten NADAM-Stationen garantiert. Diese befinden sich bei den Wetterstationen der MeteoSchweiz und liefern alle zehn Minuten Daten zur Ortsdosisleistung (ODL, $H^*(10)$). In Ergänzung zu den ODL-Daten sind damit auch Wetterdaten verfügbar, die wichtige Zusatzinformationen für die Interpretation der Messwerte liefern.

Die Sonden sind mit jeweils drei Geiger-Müller-Zählrohren bestückt, zwei für den Niederdosis- und eines für den Hochdosisbereich. Der Messbereich geht von 10 nSv/h (Nanosievert pro Stunde) bis 10 Sv/h und deckt somit sehr gut den Untergrundbereich bis hin zu Dosisleistungen ab, wie sie z.B. nach einer Nuklearwaffenexplosion zu messen wären.

Im Normalbetrieb werden die Daten 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 im Fall einer Katastrophe die terrestrischen Kommunikationsnetze beeinträchtigt sein könnten.

Die ODL-Werte der NADAM-Sonden werden täglich zweimal auf der Internetseite der NAZ (www.naz.ch) publiziert. Im Ereignisfall oder nach Bedarf kann der Publikationsrhythmus erhöht werden. Unter der Rubrik «Aktuell» können die Stundenmittelwerte der letzten drei Tage sowie die Tagesmittelwerte vom Vortag abgerufen werden.

Im Jahr 2019 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.



Figur 2:
Karte mit den Jahresmittelwerten 2019 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 Engelberg und 200 nSv/h in Vicosoprano im Bergell.

Jahresmittelwerte und Erfahrungsbereiche 2019

Die ODL-Jahresmittelwerte und die Maxima und Minima der 10-Minuten-Werte aller Stationen sind in Figur 1 dargestellt. Im Vergleich mit den Messresultaten des letzten Jahres fällt auf, dass weniger Maximalwerte über 300 nSv/h liegen. Im ausserordentlich trockenen Herbst 2018 hatte es jeweils während oder kurz nach Regenfällen, die auf besonders lange Trockenperioden gefolgt waren, an zehn Standorten ungewöhnlich viele Maximalwerte über diesem Wert gegeben. Im Folgejahr wurde der Wert von 300 nSv/h nun bei einer Sonde (Delémont) gerade erreicht und auf vier Messstationen (Jungfrauoch, Poschiavo Robbia, Santa Maria, und Vicosoprano) überschritten. Damit entsprach 2019 das Auftreten dieser Spitzenwerte, verteilt über einen grösseren Zeitraum vom April bis November, wieder den langjährigen Beobachtungen. Wie gewohnt wurden diese Werte jeweils während oder kurz nach Niederschlägen gemessen, wenn natürlicherweise in der Luft befindliche radioaktive Partikel ausgewaschen und am Boden, d.h. in Sondennähe, deponiert wurden.

Als Erfahrungsbereich einer Station gilt bei der NAZ derjenige Wertebereich, der die Minima und Maxima der Untergrundwerte (vgl. Figur 1) aus den letzten Jahren sicher einschliesst. Der Erfahrungsbereich 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. Dieser Erfahrungsbereich wird für jede Station jährlich überprüft und wo nötig angepasst.

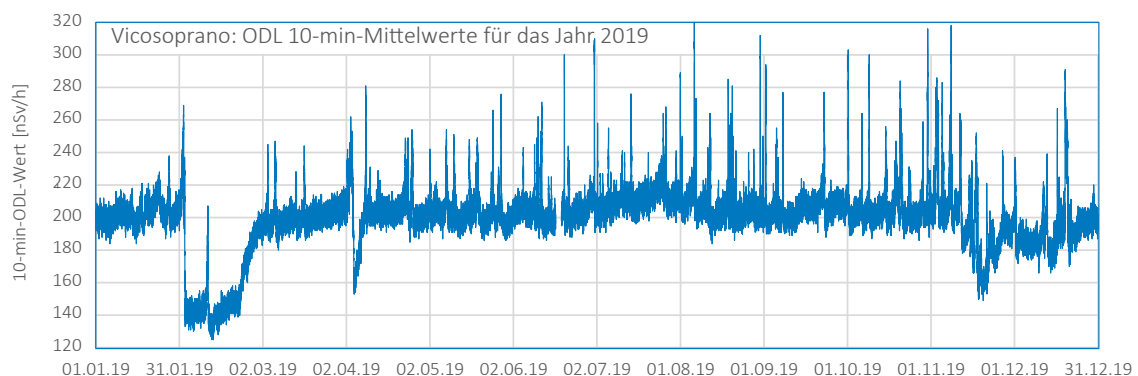
In Figur 2 sind die numerischen Jahresmittelwerte in eine Schweizer Übersichtskarte eingetragen. Die natürlich bedingte Ortsdosisleistung (ODL) wird vom Standort (geologischer Untergrund, Höhe über Meer) und von den meteorologischen Verhältnissen (Regen, Schneedecke) beeinflusst. Die Beiträge der terrestrischen und der kosmischen Strahlung führen zu den regional beobachteten Unterschieden bei den Jahresmittelwerten.

Der geologische Untergrund bestimmt den Beitrag der terrestrischen Strahlung zur ODL. In alpinen Gebieten mit uran- und thoriumhaltigem Gestein ist der Anteil der natürlichen Radioaktivität im Boden höher als z.B. im Mittelland. Dies führt zu einer höheren terrestrischen Strahlung. Ein Beispiel für eine Station mit hohem terrestrischen Beitrag ist Vicosoprano auf 1089 m.ü.M. am Talgrund im Bergell, wo mit 200 nSv/h der höchste ODL-Jahresmittelwert aller NADAM-Stationen gemessen wurde.

Die Höhe des Sondenstandortes über Meer bestimmt den kosmischen Anteil der ODL. Je höher der Messstandort, desto weniger wird die kosmische Strahlung durch die Atmosphäre abgeschwächt, entsprechend grösser wird die Intensität der kosmischen Strahlung. Die Messstation Jungfrauoch liegt auf 3'580 m.ü.M. Die kosmische Strahlung in dieser Höhe führte im Jahr 2019 mit 193 nSv/h zu einem ähnlichen Jahresmittelwert wie in Vicosoprano. An allen anderen Standorten lagen die Jahresmittelwerte unter 175 nSv/h.

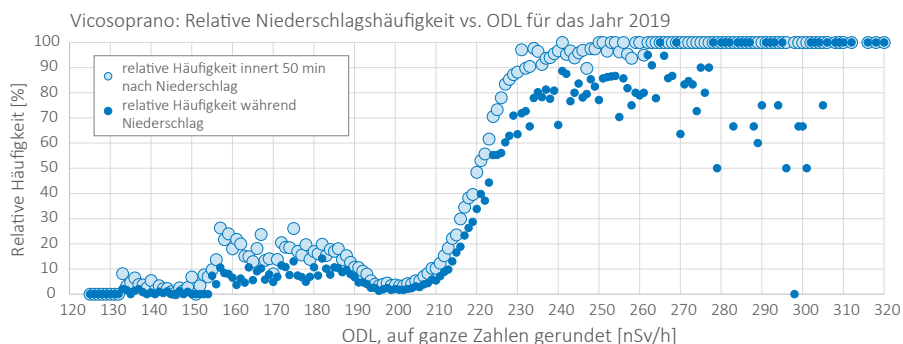
Eine detailliertere Analyse der Station Vicosoprano

Die meteorologischen Verhältnisse bestimmen grösstenteils die Schwankungen des ODL-Verlaufs innerhalb eines Jahres an einem Standort. Figur 3 zeigt als Beispiel den Verlauf der 10 min-ODL-Messwerte der



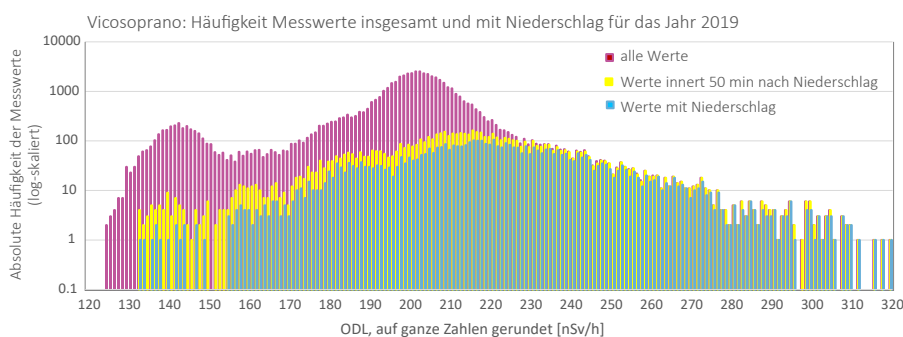
Figur 3:

Zeitverlauf der 10 min-ODL-Werte für die Station Vicosoprano im Jahr 2019. Deutlich sichtbar sind die bis zu 37% unter dem Jahresmittelwert liegenden ODL-Werte im Winter aufgrund der Abschirmung der terrestrischen Strahlung durch die Schneedecke.



Figur 4:

Korrelation zwischen den 10 min-Werten und den Niederschlägen für die Station Vicosoprano im Jahr 2019. Die ODL-Werte über 240 nSv/h korrelieren gut mit Niederschlägen, d.h. in den meisten Fällen traten hohe ODL-Werte gleichzeitig mit Niederschlag auf. Die im Hintergrund mit hellroter Markierung dargestellten Datenpunkte berücksichtigen auch Niederschlag innerhalb der letzten 50 min. In dieser Darstellung wird klar, dass alle Datenpunkte über 262 nSv/h aufgrund von Niederschlag zustande gekommen sind.

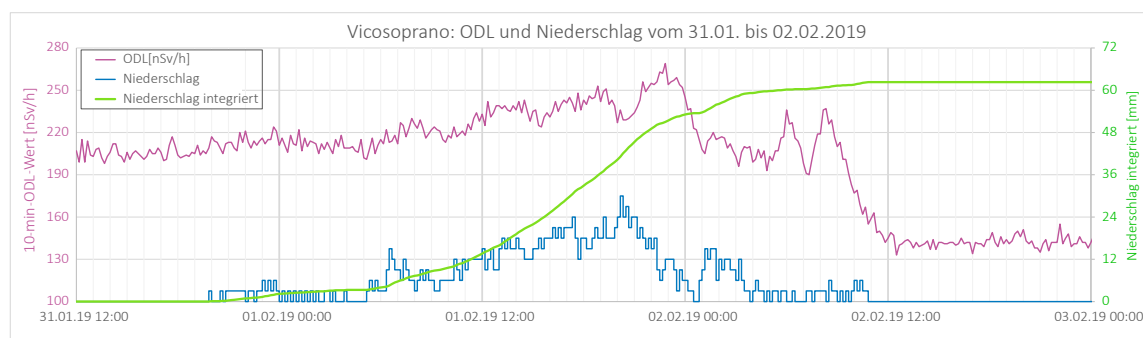


Figur 5:

Verteilung der 10 min-Werte für die Station Vicosoprano im Jahr 2019; rot: alle Messwerte; blau: Messwerte während Niederschlag; gelb: Messwerte innerhalb von 50 min nach erfolgtem Niederschlag. Werte über 230 nSv/h gehen fast immer einher mit Niederschlag.

Station Vicosoprano. Der Jahresmittelwert liegt bei 200 nSv/h. Peaks bis zu 320 nSv/h ergeben sich durch Niederschläge, welche insbesondere nach trockenen Zeitabschnitten zu einer Auswaschung von Partikeln mit natürlich vorkommenden Radionukliden (v.a. Zerfallsprodukte von Radon ^{222}Rn) aus der Atmosphäre und deren Deposition am Boden führen. Umgekehrt erkennt man an tiefen Messwerten bis 125 nSv/h, dass in den Wintermonaten eine Schneedecke die terrestrische Strahlung teilweise abgeschirmt hat. Zwischen dem 17.06. und dem 19.06.2019 sind aufgrund einer Panne bei der Station keine Messdaten vorhanden.

In Figur 4 ist die Korrelation der ODL-Werte mit dem Niederschlag dargestellt. Die dunkelblau aufgetragenen Punkte repräsentieren die relative Häufigkeit, mit der einzelne ODL-Werte zeitgleich mit Niederschlag gemessen wurden. ODL-Werte über 240 nSv/h gehen in den meisten Fällen einher mit Niederschlag.



Figur 6:

Zeitverlauf der ODL 10 min-Mittelwerte, der 10 min Niederschlagssummen und der integrierten Niederschlagsmenge für den Zeitraum vom 31.01. bis 02.02.2019 für die Station Vicosoprano.

Einige Datenpunkte zeigen auch bei höheren ODL-Werten relative Niederschlagshäufigkeiten unter 100%. Um diese zu erklären, wurde zusätzlich die Häufigkeit ermittelt, mit der die ODL-Werte gemessen wurden, wenn innerhalb der letzten 50 min Niederschlag stattgefunden hatte. Diese Datenpunkte sind mit hellroter Markierung im Hintergrund dargestellt. Damit wird klar, dass ODL-Werte über 262 nSv/h, also die ODL-Spitzen in Figur 3, zu 100% mit einer Niederschlagsperiode erklärt werden können. Der Niederschlagseffekt zeigt sich in den maximalen 10 Minuten-Werten vieler Stationen und entsprechend in den Maximalwerten der in Figur 1 gezeigten Wertebereichen. Besonders ausgeprägt zu erkennen war er 2019 an den Standorten Payerne (140% über dem Jahresmittelwert), Thun (150%), Delémont (152%) und Adelboden (160%).

Figur 5 zeigt die absolute Häufigkeitsverteilung der 10 Minuten ODL-Werte in Vicosoprano, wobei die vertikale Diagrammchse logarithmisch skaliert ist. Rot eingezeichnet ist die Verteilung aller ODL-Daten, unabhängig von der Witterung. Der häufigste gemessene ODL-Wert liegt bei 203 nSv/h, ein lokales Maximum ergibt sich bei 142 nSv/h aus zwei Perioden im Februar 2019 (siehe Figur 3) mit Messwerten, die aufgrund der Schneedecke über mehrere Tage auf einem deutlich unter dem häufigsten ODL-Wert liegenden Niveau blieben. Bei 163 nSv/h lässt sich ein schwaches weiteres lokales Maximum erahnen, da aufgrund der kalten Wettersituation Anfang April und Mitte November ebenfalls eine leichte Häufung von Messwerten um diesen Wert verzeichnet wurde. An den blau eingezeichneten Werten erkennt man die unmittelbare Korrelation von Niederschlag mit erhöhter ODL, im Speziellen über 240 nSv/h. Gelb dargestellt ist die Häufigkeit der ODL-Werte, die während oder innerhalb von 50 min nach Niederschlag aufgezeichnet wurden. Diese Daten zeigen, dass die Messwerte im oberen ODL-Bereich ausnahmslos mit Niederschlag erklärt werden können.

Bei eher tiefen ODL-Werten zwischen 130 und 150 nSv/h scheint ebenfalls eine leichte Häufung von Messwerten zu bestehen, die verzögert nach Niederschlag gemessen wurden. Dies lässt sich so interpretieren, dass Schneefall zu einer Schneedecke führt, welche die Radioaktivität aus dem Boden teilweise abschirmt und so im Nachgang zu tieferen Messwerten führt.

Ein Ausschnitt der in Figur 3 gezeigten Messreihe wird in Figur 6 mit der gleichzeitig aufgezeichneten Niederschlagskurve verglichen. Rot eingezeichnet und auf der linken y-Achse skaliert ist der 10 min Mittelwert der ODL in Nanosievert pro Stunde [nSv/h] über den Zeitraum von zweieinhalb Tagen Ende Januar / Anfang Februar 2019. Die 10 min Niederschlagswerte sind als blaue Balken, aufgetragen und auf der rechten y-Achse skaliert.

Zu Beginn der dargestellten Periode liegt die ODL um 200 nSv/h, was typisch ist für den Standort Vicosoprano mit einem vergleichsweise hohen natürlichen Strahlungsuntergrund. Am Abend des 31.01. setzt leichter Niederschlag ein, der einen visuell knapp erkennbaren Anstieg der ODL um ca. 10 nSv/h zur Folge hat. Deutlicher sichtbar ist die erhöhte ODL während der ab dem Morgen des 01.02.2019 zunehmenden Niederschläge. Diese Korrelation rührt daher, dass sich radioaktive Elemente bei trockenem Wetter als Feinstaubpartikel in der Atmosphäre verteilen, die dann bei einsetzendem Niederschlag aus der Luft ausgewaschen und am Boden oder auf der Schneedecke deponiert werden und dort zu kurzfristig erhöhten Werten führen. Ab dem 02.02.2019 führt eine zunehmende Schneedecke zum gegenteiligen Effekt, nämlich zu einer teilweisen Abschirmung der aus dem Boden stammenden Radioaktivität. Dies hat eine reduzierte ODL um 140 nSv/h zur Folge, also deutlich unter dem für Vicosoprano üblichen Bereich liegende Werte.

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

Wenn über kurze 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. Dies kann aufgrund der Schneedecke der Fall sein, welche den terrestrischen Anteil der Strahlung über eine gewisse Dauer teilweise abschirmt. Aufgrund der nur kurz anhaltenden Schneedecke im Winter 2019 liegt der Jahresmittelwert in Vicosoprano nur 1.5 % tiefer als der häufigste Messwert. Dieser Unterschied fällt deutlich geringer aus als im Vorjahr mit 9%. An anderen Standorten war der Unterschied zwischen Jahresmittelwert und häufigstem Wert grösser als in Vicosoprano, auf den Stationen Davos und San Bernardino beträgt er 11% und in Ulrichen sogar 23% (Tabelle 1).

Hält die Schneedecke besonders lange an, kann sie auch den umgekehrten Effekt zur Folge haben, nämlich, dass der häufigste Wert unter dem Jahresmittelwert zu liegen kommt. Dies war im Jahr 2019 in Gütsch ob Andermatt Fall (häufigster Wert 33% tiefer als Jahresmittelwert). In überwiegend schneefreien Gebieten sind der häufigste Messwert und der Jahresmittelwert sehr ähnlich.

Qualitätssicherung und Werterhalt NADAM-Netz

Die Sonden sind vom Hersteller typengeprüft und werden durch die anerkannte Eichstelle des «Institut de Radiophysique» (IRA) des CHUV in Lausanne geeicht. Die Gültigkeit des Eichzertifikats wurde in Absprache mit der METAS für den Gerätetyp IGS 421 B1-H des Herstellers Envinet (Zulassungszertifikat CH-I-13182-01) auf fünf Jahre festgelegt.

Nach der Eichung erfolgt bei MeteoSchweiz in Payerne noch eine Analyse der Eichungsergebnisse. Falls die Abweichung bei Dosisleistungen ≤ 50 mikroSv/h grösser als 7% oder bei Dosisleistungen > 50 mikroSv/h grösser als 15% ist, wird ein Korrektorkoeffizient angewandt. Damit wird sichergestellt, dass die Sonde in 95% der Fälle im Toleranzbereich liegt.

Zudem werden die Sonden jährlich von MeteoSchweiz vor Ort im Feld getestet. Mit diesen Sondentests werden zwei Ziele verfolgt:

- Überprüfen, dass die Sonden im definierten Wertebereich korrekt messen: Bei einer Abweichung von mehr als 7% des gemessenen Wertes vom Sollwert wird die Sonde ausgewechselt. Somit können sich die Dosisleistungswerte von zwei verschiedenen Sonden (verschiedene Seriennummern) am gleichen Standort um höchstens 15 nSv/h unterscheiden. Bei technischen Defekten werden die Sonden ausgewechselt und bei MeteoSchweiz in Payerne im Labor getestet.
- Testen der Meldewege, insbesondere auch die korrekte Auslösung und Übermittlung eines Sondenalarms.

Die NAZ verfügt insgesamt über 116 Sonden für den ortsfesten Betrieb an den 76 NADAM-Standorten. Der grösste Teil davon ist auf den Stationen im Einsatz, einige müssen repariert werden oder befinden sich in der Eichung. Daneben stehen einsatzbereite Ersatzsonden an vier Wartungsstandorten von MeteoSchweiz (Zürich, Payerne, Locarno und Davos) bereit.

Jede Sonde wird mindestens alle 12 Monate geprüft. An den Standorten La-Chaux-de-Fonds, Güttingen und Scuol war nach einem Austausch der Sonde jeweils ein zweiter Test nötig, somit wurden im Jahr 2019 insgesamt 79 Sondentests durchgeführt. Die NADAM-Sonden sind stabil und zuverlässig.

Zusätzlich zu den stationären Sonden besitzt die NAZ 30 mobile NADAM-Sonden, mit denen das Messnetz bei Bedarf punktuell verdichtet werden kann. Die mobilen verfügen über die gleiche Sensorik wie die ortsfesten Sonden, sind aber für einen autarken Betrieb mit Solarpanel und Batterie ausgerüstet und übermitteln die Messdaten über das Mobilfunknetz direkt an die Datenbank der NAZ.

Eine wesentliche Änderung des NADAM-Netzes steht nun für das Jahr 2020 bevor. Die technische Unterstützung durch den Hersteller der bisherigen Sonden ist nicht mehr gegeben und die mobilen Sonden sind nicht mit neuen Mobilfunkstandards kompatibel. Daher müssen alle NADAM-Sonden im Lauf der Jahre 2020 und 2021 ersetzt werden, die mobilen Sonden sogar schon vor Ende 2020. Zusammen mit dem ENSI, das im MADUK-Netz mit dem gleichen Sondentyp die Ortsdosisleistung in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen überwacht, wurde eine WTO-Ausschreibung durchgeführt. Den Zuschlag für die Lieferung der neuen Sonden hat die Firma Bertin GmbH erhalten. Im Jahr 2019 wurden Prototypen der neuen Sonden ausgiebig getestet. Im Laufe des Jahres 2020 werden nun alle mobilen und ein Teil der stationären Sonden der NADAM- und MADUK-Netze durch die anerkannten Eichstellen geeicht und im Feld ersetzt.

Station	Kanton	Datum der Inbetriebnahme	Höhe [m.ü.M.]	Jahresmittelwert [nSv/h]	Häufigster Wert [nSv/h]	Minimum [nSv/h]	Maximum [nSv/h]
Adelboden (ABO)	BE	04.11.09	1322	96	97	61	251
Aigle (AIG)	VD	09.09.09	382	122	116	95	190
Altdorf (ALT)	UR	28.10.09	439	129	128	92	231
Basel-Binningen (BAS)	BS	19.11.09	317	117	114	97	249
Bern-Zollikofen (BER)	BE	30.09.09	554	113	112	93	235
Beznau (BEZ)	AG	19.11.09	327	108	107	89	188
Bière (BIE)	VD	12.01.17	684	99	99	76	166
Buchs/Aarau (BUS)	AG	20.11.09	388	101	100	85	216
La Chaux-de-Fonds (CDF)	NE	17.09.09	1018	124	127	77	204
Nyon-Changins (CGI)	VD	23.09.09	459	119	117	100	192
Chasseral (CHA)	BE	17.09.09	1594	117	125	78	257
Chur (CHU)	GR	09.10.09	557	111	110	81	201
Cham (CHZ)	ZG	29.01.18	442	105	105	85	242
Cressier (CRM)	NE	03.11.16	431	87	86	71	165
Davos (DAV)	GR	08.10.09	1589	138	155	78	233
Delémont (DEM)	JU	03.11.16	439	119	117	100	300
Disentis/Sedrun (DIS)	GR	28.10.09	1197	109	111	72	220
La Dôle (DOL)	VD	23.09.09	1670	108	114	73	176
Egolzwil (EGO)	LU	22.09.10	523	97	90	78	201
Engelberg (ENG)	OW	30.10.09	1035	87	88	55	161
Fahy/Boncourt (FAH)	JU	14.10.09	597	127	125	104	233
Bullet/La Frêtaz (FRE)	VD	24.09.09	1206	124	128	80	214
Glarus (GLA)	GL	02.12.09	518	100	99	69	203
Gösgen (GOE)	SO	20.11.09	381	106	105	90	204
Fribourg-Posieux (GRA)	FR	13.01.17	646	108	107	89	200
Grenchen (GRE)	SO	06.12.10	431	92	90	76	189
Col du Gd-St-Bernard (GSB)	VS	09.09.09	2491	131	144	98	217
Gütsch ob Andermatt (GUE)	UR	01.09.09	2296	145	109	93	249
Güttingen (GUT)	TG	03.12.09	441	101	99	84	234
Genève (GVE)	GE	24.09.09	412	111	109	93	192
Hallau (HLL)	SH	29.01.18	419	127	124	105	255
Hörnli (HOE)	ZH	12.11.09	1133	95	96	66	185
Jungfraujoch (JUN)	VS	29.09.09	3581	193	188	161	324
Kloten/Zürich (KLO)	ZH	24.11.09	427	106	104	89	222
Koppigen (KOP)	BE	13.01.17	484	121	119	102	220
Leibstadt (LEI)	AG	19.11.09	342	100	98	82	216
Lugano (LUG)	TI	21.10.09	273	130	128	112	240
Luzern (LUZ)	LU	05.11.09	455	111	110	95	210
Magadino-Cadenazzo (MAG)	TI	22.10.09	204	132	128	101	296
Meiringen (MER)	BE	06.10.11	590	136	134	100	243
Le Moléson (MLS)	FR	19.08.09	1975	108	113	81	191
Mosen (MOA)	LU	19.01.18	452	98	96	82	181
Möhlín (MOE)	AG	09.09.10	341	118	116	98	230
Mühleberg (MUB)	BE	15.10.09	481	118	117	97	201
Napf (NAP)	BE	05.11.09	1405	105	110	70	193
Neuchâtel (NEU)	NE	10.12.09	485	102	101	85	201
Oron (ORO)	VD	29.02.12	828	111	110	81	236
Locarno-Monti (OTL)	TI	22.10.09	368	152	149	120	282
Payerne (PAY)	VD	13.08.09	490	101	101	84	244
Piotta (PIO)	TI	29.10.09	990	156	158	118	280
Plaffeien (PLF)	FR	14.08.09	1043	110	110	84	197
Paul Scherrer Institut (PSI)	AG	27.07.11	335	105	104	87	173
Pully (PUY)	VD	23.09.09	456	117	120	94	190
Zürich-Affoltern (REH)	ZH	13.11.09	444	108	107	91	238
Poschiavo-Robbina (ROB)	GR	07.10.09	1079	170	164	113	371
Rünenberg (RUE)	BL	20.11.09	612	100	97	84	186
Säntis (SAE)	AI	11.11.09	2503	125	125	101	246
Samedan (SAM)	GR	25.08.09	1710	149	166	95	280
San Bernardino (SBE)	GR	29.10.09	1640	144	161	90	296
Stabio (SBO)	TI	21.10.09	352	132	130	107	250
Scuol (SCU)	GR	27.08.09	1305	116	124	75	227
Schaffhausen (SHA)	SH	04.12.09	439	106	106	89	196
Sion (SIO)	VS	10.09.09	482	123	122	98	274
Zürich-Fluntern (SMA)	ZH	24.11.09	557	115	113	98	205
Santa Maria (SMM)	GR	15.12.11	1385	142	144	90	317
St. Gallen (STG)	SG	12.11.09	777	97	98	64	195
Aadorf/Tänikon (TAE)	TG	03.12.09	539	97	95	81	176
Thun (THU)	BE	29.01.18	570	93	91	78	233
Ulrichen (ULR)	VS	04.11.09	1347	131	171	56	253
Vaduz (VAD)	FL	03.12.09	458	101	99	80	196
Vicosoprano (VIO)	GR	06.02.13	1089	200	203	125	320
Visp (VIS)	VS	11.09.09	640	125	123	95	255
Villars-Tiercelin (VIT)	VD	29.01.18	859	122	121	90	236
Wädenswil (WAE)	ZH	02.12.09	487	109	108	93	209
Wynau (WYN)	BE	15.10.09	423	102	100	85	181
Zermatt (ZER)	VS	11.09.09	1640	125	132	81	212

Tabelle 1:
Jahresmittelwert, häufigster Wert, Minimum und Maximum der NADAM-Stationen
 In der folgenden Tabelle sind die Jahresmittelwerte, die häufigsten Werte, die Minima und Maxima, basierend auf den 10-Min-Werten, für alle NADAM-Stationen im Jahr 2019 aufgeführt.

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 anfangs Juni 2019 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Gösgen (KKG) und Mühleberg (KKM) abgedeckt. Zudem wurden die Messungen innerhalb der Notfallschutzzone 2 des KKG komplettiert. Die Ergebnisse bei den Kernkraftwerken lagen im Bereich der Ergebnisse aus früheren Jahren.

Weitere Messflüge wurden in der Umgebung von Bulle, Köniz und Vevey 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 Neuenburgersee ein Steigflug zur Charakterisierung des neuen Messsystems durchgeführt und von Torre im Tessin bis Chur ein Profil aufgenommen. Die Suche von radioaktiven Quellen wurde über dem ABC-Übungsgelände in Spiez trainiert.

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.

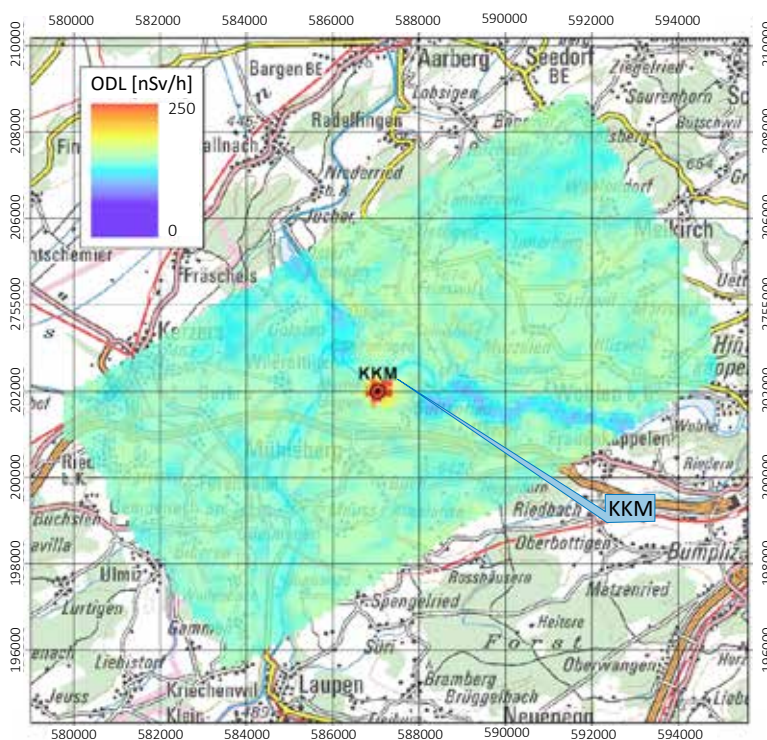
Im Jahre 1994 wurde die Aeroradiometrie in die Einsatzorganisation Radioaktivität des Bundes integriert. Als mögliche Einsatzfälle stehen Transport- und Industrieunfälle mit radioaktivem Material, KKW-Störfälle, Abstürze von Satelliten mit Nuklearreaktoren und «Dirty Bombs» im Vordergrund. Die jährlichen 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%). Dies entspricht ungefähr 20% der natürlichen externen Strahlung.

Mit den Messflügen 2019 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 2019

Vom 3. bis 7. Juni 2019 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Gösgen (KKG) und Mühleberg (KKM) ausgemessen. Im Rahmen der Messflüge 2019 wurden zudem die Messungen innerhalb der Zone 2 des KKG komplettiert. Entlang der Transversale von Torre (TI) bis Chur (GR) wurde ausserdem ein Profil aufgenommen, und über dem Neuenburgersee wurde ein Steigflug zur Charakterisierung des neuen Messsystems durchgeführt.



Figur 1:
Ortsdosisleistung 2019 im Messgebiet KKM..
Kartendaten PK200 © Bundesamt für Landestopografie.

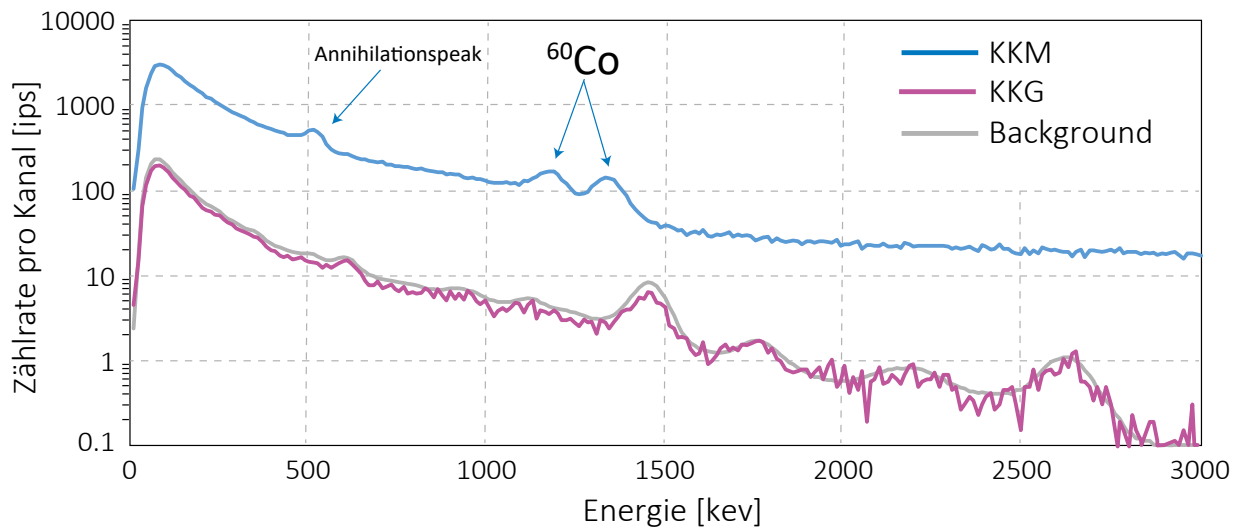
Weitere Messflüge wurden im Zeitraum vom 2. bis 5. September 2019 in der Umgebung von Bulle, Köniz und Vevey absolviert. In derselben Woche wurde ausserdem über dem ABC Trainingsgelände in Spiez die Suche von radioaktiven Quellen trainiert. Die detaillierten Ergebnisse sämtlicher Messungen wurden in einem PSI-Bericht anfangs des Jahres 2020 publiziert (Butterweck et al., 2020).

Die Messresultate in den Messgebieten des KKG und des KKM zeigten ein ähnliches Bild wie in vorangegangenen Messkampagnen. Am Standort des KKM können in der Ortsdosisleistungskarte (Figur 1) erhöhte Messwerte erkannt werden. Diese sind beim KKM mit seinem Siedewasserreaktor hauptsächlich 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).

Zum Zeitpunkt der Messflüge war zudem ein Lagerschacht im Zwischenlager geöffnet. Es wurden konditionierte Abfallgebände mit ^{60}Co in das Zwischenlager transferiert. Entsprechend konnte in den Spektren der Doppelpeak von ^{60}Co detektiert werden (Figur 2).

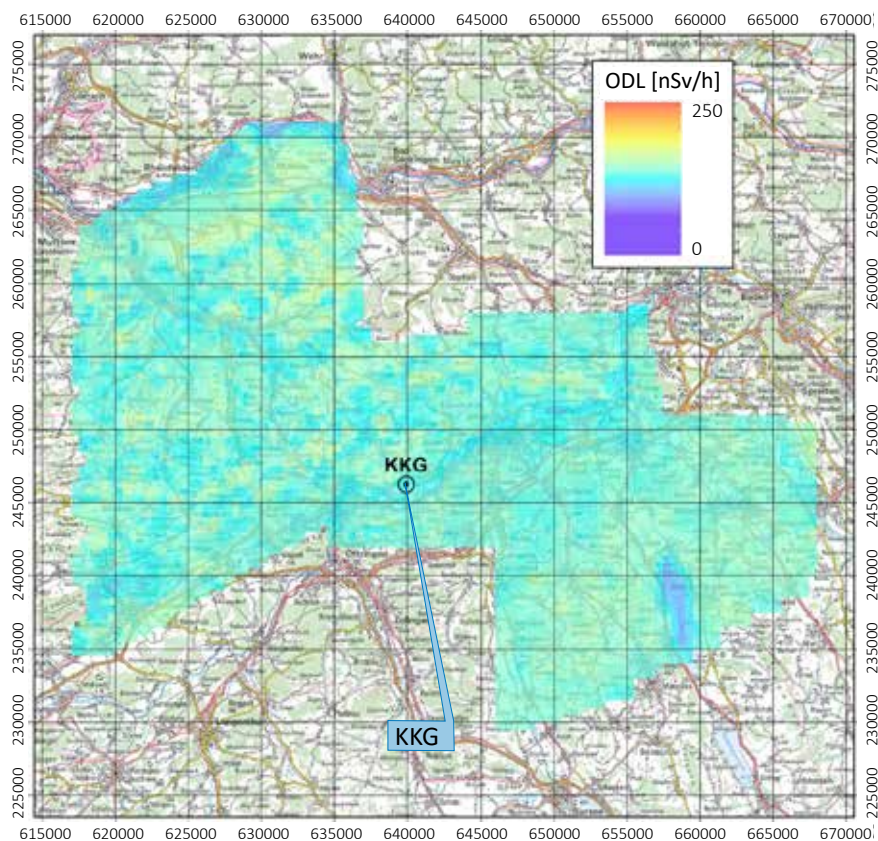
Im Bereich des KKG sind keine besonderen Werte bei der Ortsdosisleistung (Figur 3) zu erkennen. KKG mit seinem Druckwasserreaktor konnte aeroradiometrisch weder aufgrund der Ortsdosisleistung



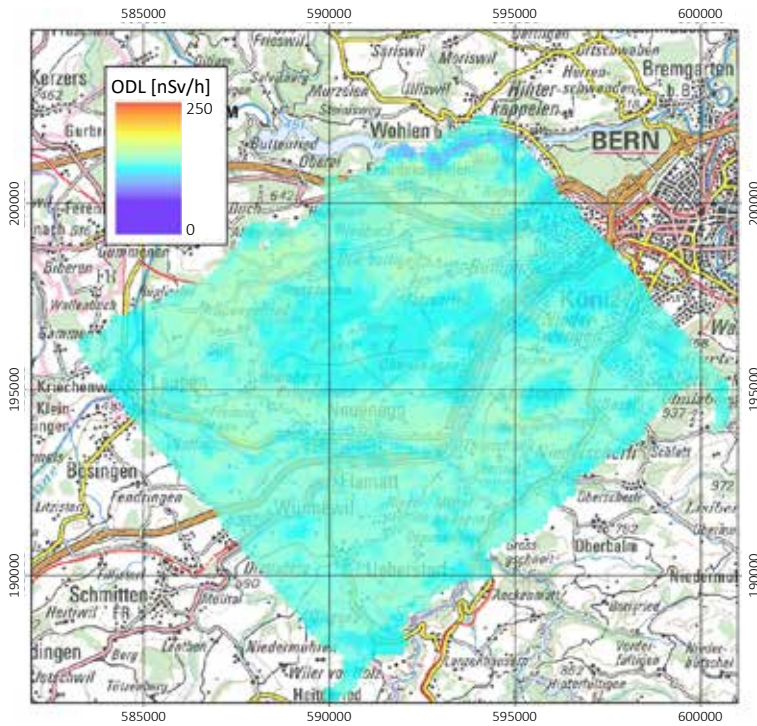
Figur 2:
Gemittelte Spektren im Bereich des Betriebsgeländes KKM, KKG und in der weiteren Umgebung (Background).

(Figur 3) noch aufgrund des MMGC-Verhältnisses erkannt werden. Das MMGC-Verhältnis steht für den Quotient der Zählraten im Energiebereich von 400-1'400 keV und 1'400-3'000 keV. Da die meisten Spaltprodukte Gammastrahlung im Energiebereich unterhalb von 1'400 keV aufweisen, stellt das MMGC-Verhältnis ein empfindliches Instrument zur Lokalisierung künstlicher Radionuklide dar.

Ausserhalb der Betriebsareale der Kernanlagen KKG und KKM sind keine erhöhten Werte erkennbar. Unterschiede sind auf Einflüsse der Topographie wie Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen. Dies



Figur 3:
Ortsdosisleistung im Messgebiet der Zone 2 von KKG. Kartendaten PK100 © Bundesamt für Landestopografie.

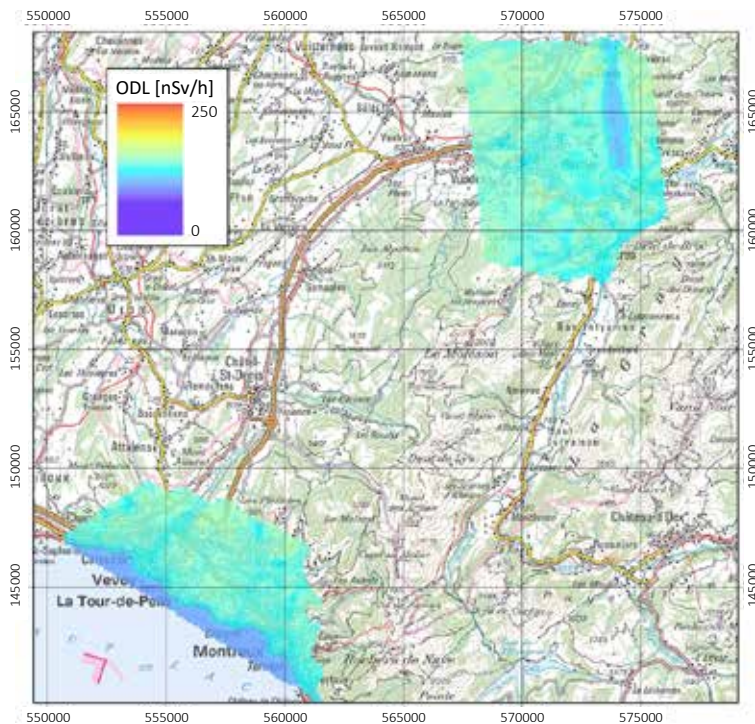


Figur 4:
Ortsdosisleistung 2019 im Messgebiet südwestlich von Köniz bei Bern.
Kartendaten PK100 © Bundesamt für Landestopografie.

gilt auch für das Profil Torre- Chur.

Im Messgebiet der Notfallschutzzone 2 von KKG liegen die Messwerte im erwarteten Bereich. Unterschiede sind auf Einflüsse der Topographie wie Untergrund, Vegetation und Gewässer zurückzuführen. (Figur 3).

Die Messungen über den weiteren Arealen zeigten nur Schwankungen des Gehalts an natürlichen Radionukliden im Boden und die Absorption von terrestrischer Gammastrahlung durch Seen und Flüsse auf. In den Figuren 4 und 5 sind die Ortsdosisleistungskarten in der Umgebung von Köniz (Figur 4), Bulle und Vevey (Figur 5) dargestellt.



Figur 5:
Ortsdosisleistung 2019 in den Messgebieten bei Bulle und Vevey.
Kartendaten PK100 © Bundesamt für Landestopografie.

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., Rybach L., Poretti, C., Maillard, S., Schindler, M., Hofstetter-Boillat, B., Mayer, S., Scharding S., 2020: Aeroradiometric Measurements in the Framework of the Swiss Exercise ARM19. PSI Bericht Nr. 20-01. February 2020. ISSN 1019-0643.

Chapitre / Kapitel 4

Environnement Umwelt

2019

- Aérosols et précipitations
- URAnet Aero
- Surveillance de l'air avec des avions militaires
- Systèmes aquatiques, URAnet Aqua
- Tritium dans l'Aar
- Eaux potables
- Sols et herbe
- Aérosol und Niederschlag
- URAnet Aero
- Überwachung der Luft mit Militärflugzeugen
- Aquatische System, URAnet Aqua
- Tritium in der Aare
- Trinkwasser
- Boden und Gras

4.1

Radioaktivität in der Luft (Aerosol) und im Niederschlag

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

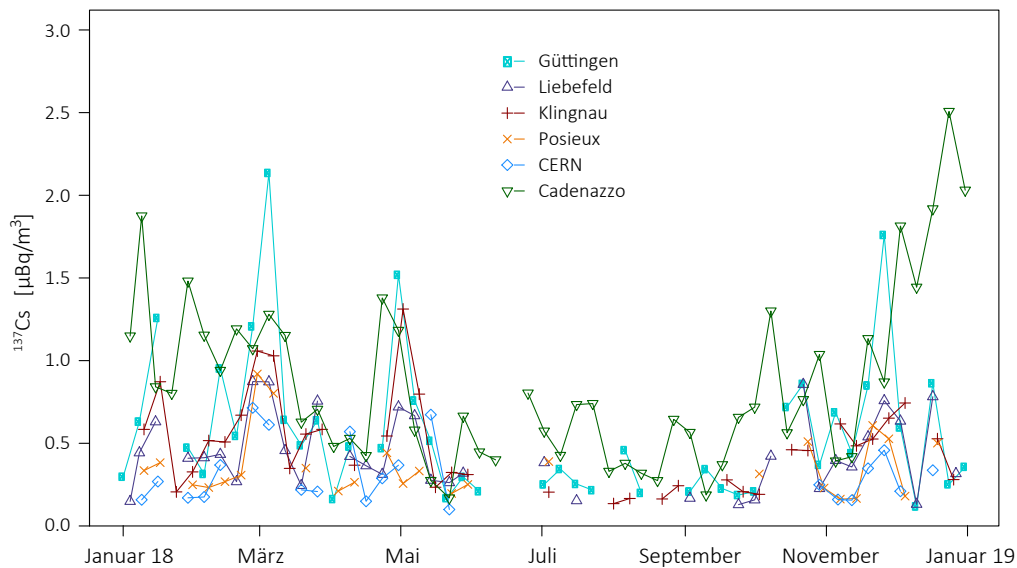
Zusammenfassung

Die Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag zeigte 2019 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 2019 mit Ausnahme von Tritium und sporadisch Spuren von ^{137}Cs keine künstlichen Radionukliden nachgewiesen. In der unmittelbaren Umgebung von Tritium-verarbeitenden Industriebetrieben erreichten die Tritiumwerte im Regenwasser maximal 8% 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 Messung auf einem HPGe-Gammaspektrometer dauert 2 Tage. Diese Messzeit ist notwendig, um eine Nachweisgrenze zu erreichen, mit der auch Spuren von künstlichen Radionukliden detektiert würden. Die Messresultate werden auf www.radenviro.ch und www.bag.admin.ch/hvs 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 im Jahr 2011 nach dem Reaktorunfall in Fukushima oder im beim Ereignis mit ^{106}Ru im Herbst 2017, hat gezeigt, dass für eine glaubwürdige Information der Bevölkerung und als Grundlage für die Behörde 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 filtern und damit entsprechend höhere Nachweisgrenzen haben. Die MV-Sammler sind zur Überwachung der Kernkraftwerke bei Gösgen, Leibstadt, Mühleberg und PSI/Beznau stationiert, wobei der letztgenannte vom PSI betrieben und gemessen wird. Ein weiterer MV-Sammler steht für die Überwachung der freien Atmosphäre in der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauojoch. Die Filter der MV-Sammler werden wöchentlich gewechselt und als Monatsprobe (4 - 5 Filter) gammaspektrometrisch gemessen.



Figur 1 :
¹³⁷Cs Konzentrationen bei allen HVS Stationen für das Jahr 2019.

Künstliche Radioisotope in der Luft

Das einzige regelmässig nachgewiesene künstliche Radioisotop in der Luft war wie in den Vorjahren Cäsium-137 (¹³⁷Cs). ¹³⁷Cs hat eine Halbwertszeit von 30 Jahren und rührt zur Hauptsache immer noch vom Reaktorunfall in Tschernobyl her. Die gemessenen Konzentrationen sind insgesamt sehr gering. Etwas höhere Werte (Maximum 2.5 µBq/m³) wurden 2019 bis im Mai und wieder ab Oktober gemessen (siehe Figur 1). Auch die höchsten Werte sind rund eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert für ¹³⁷Cs von 8.5 Bq/m³. Zu den erhöhten ¹³⁷Cs Konzentrationen, die eher im Winterhalbjahr auftreten, tragen wahrscheinlich das Aufwirbeln von Bodenpartikel in der vegetationsarmen Zeit, sowie das Verbrennen von leicht mit ¹³⁷Cs kontaminiertem Holz zum Heizen, bei. Die stärkere Kontamination der Böden im Kanton Tessin nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl erklärt die meist etwas höheren Werte der Station Cadenazzo. Das radioaktive Natriumisotop ²⁴Na mit einer Halbwertszeit von 15 Stunden kann sowohl natürliche als auch künstliche Quellen haben. Natürliches ²⁴Na wird wie das ⁷Be und ²²Na in der oberen Atmosphäre durch die kosmische Strahlung erzeugt. Künstliches ²⁴Na kann in Beschleunigern erzeugt werden, wie sie z. B. am Cern in Genf oder am PSI in Villigen im Einsatz stehen. Bei HVS CERN und bei HVS Klingnau konnten im Berichtsjahr gelegentlich Spuren von ²⁴Na nachgewiesen werden; im Bereich von 15-120 µBq/m³. 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 ²⁴Na kann die Nachweisgrenze variieren und lag 2019 bei rund einem Siebtel der Messungen bei >1'000 µBq/m³. Die gemessenen ²⁴Na Werte und die Nachweisgrenzen insgesamt liegen allerdings stets deutlich unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 48 Bq/m³.

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)

Geringste Spuren von Jod-131 (¹³¹I) tauchten 2019 in einigen (n=11) HVS Filtern auf; vor allem bei der HVS Station CERN mit einem höchsten Wert von 2.0 µBq/m³. Das auf dem Gelände des CERN gemessene ¹³¹I stammt wohl aus einem Beschleuniger. Bei anderen Stationen ist die Ursache von Spuren von ¹³¹I in dessen

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 2019 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 Alphastrahler ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu und ^{241}Am ergab 0.7 ± 0.07 nano-Becquerel pro m^3 Luft (nBq/m^3) im Winterhalbjahr (2018/2019) und 1.3 ± 0.13 nBq/m^3 im Sommerhalbjahr. Zusätzliche Proben von den Stationen Klingnau und Posieux ergaben als Summe der Alphastrahler zwischen 1.2 und 2.4 nBq/m^3 . Diese Konzentrationen der künstlichen Alphastrahler sind sehr tief und liegen wie beim ^{137}Cs eine Million Mal tiefer als der Immissionsgrenzwert. Curium-244 in den HVS-Mischproben von Klingnau, Posieux und Liebefeld lag unterhalb der Nachweisgrenzen (0.05 bis 0.09 nBq/m^3). Die Resultate der MV-Filter in der Umgebung der Kernkraftwerke werden im Kapitel 8.5 näher besprochen.

Natürliche Radioisotope in der Luft

Die 2019 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 gebil-

Tabelle 2:

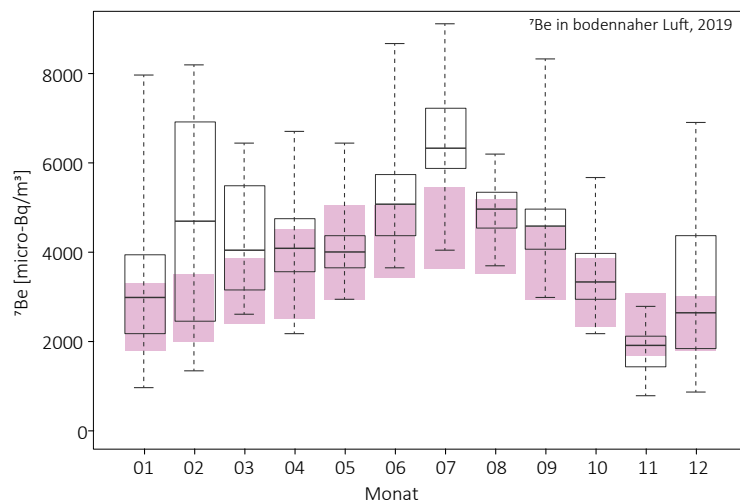
Verteilung der 2013-2018 (Referenz) sowie 2019 in der Schweiz gemessenen ^{210}Pb und ^7Be Aktivitäten in bodennahe Luft. Aktivitätsangaben in mBq/m^3

Kenngrosse	^{210}Pb (Referenz)	^{210}Pb (2019)	^7Be (Referenz)	^7Be (2019)
5%- 95%-Perzentil	0.18 - 1.18	0.15 - 1.02	1.48 - 6.40	1.43 - 7.19
Min - Max	0.07 - 2.76	0.08 - 1.80	0.15 - 8.74	0.80 - 9.08
Mittelwert / Median	0.57 / 0.49	0.51 / 0.46	3.66 / 3.50	4.21 / 4.11
Anzahl Messwerte	1'864	306	1'864	306

dete und deshalb auch zu den kosmogenen Radionukliden gezählt wird. Neunzig Prozent der ^7Be -Werte lagen 2019 zwischen 1.4 und 7.2 mBq/m^3 (Mittelwert = 4.2 mBq/m^3 ; Median = 4.1 mBq/m^3). Dies entspricht den erwarteten Werten (siehe Tabelle 2), wobei der Höchstwert 2019 mit 9.08 mBq/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 2019 gemessenen ^{210}Pb -Konzentrationen lagen zwischen 0.15 und 1.0 mBq/m^3 (Mittelwert = 0.51 mBq/m^3 , Median = 0.46 mBq/m^3). Diese Werte

sind etwas tiefer als die über die vorherigen 6 Jahre gemittelten Pb-210 Aktivitäten (Tabelle 2 und Figur 3). Möglicherweise waren im wiederum sehr warmen 2019 Inversionslagen mit typischerweise erhöhten ^{210}Pb Konzentrationen seltener als in der Vergleichsperiode.

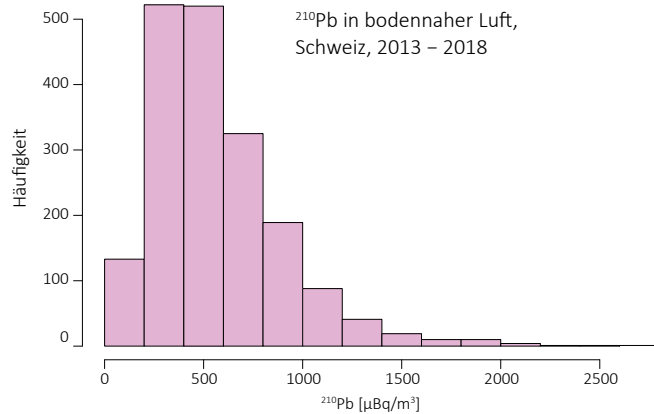
Die Figur 2 zeigt für jeden Monat die Verteilung der ^7Be Konzentrationen aller Stationen im Vergleich mit dem langjährigen Jahresverlauf. Der Jahresverlauf der ^7Be Konzentrationen widerspiegelt das Wettergeschehen, insbesondere die konvektive vertikale Durchmischung der Troposphäre an warmen Sommertagen, wobei ^7Be -reiche Luft aus der obersten Troposphäre an den Boden gelangt. Weitere



Figur 2 :

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

Einflüsse für die ^7Be Konzentration in der Luft sind Niederschlag (Auswaschen von ^7Be) und die kosmische Strahlung. Die kosmische Strahlung war 2019 noch einmal minim höher (+0.4%) als 2018 (IGY Neutron Monitor Junfrauojoch, cosray.unibe.ch). Der Jahresmittelwert 2019 von ^7Be ist mit 4.2 mBq/m^3 leicht höher als im Vorjahr. Diese erhöhten Werte passen zum Ende des Sonnenzyklus 24 (negative Korrelation der kosmischen Strahlung und damit der ^7Be -Produktion mit der Sonnenaktivität). Die auffälligsten Perioden bezüglich ^7Be Luftkonzentrationen waren 2019 Februar/März und Juni/Juli mit deutlich mehr ^7Be als im langjährigen Mittel (Figur 2). Diese Monate waren deutlich wärmer als im langjährigen Durchschnitt und relativ trocken (MeteoSchweiz: Klimabulletin Jahr 2019). Stärkere vertikale Konvektion und wenig Niederschlag erklären so die hohen ^7Be Werte in der bodennahen Luft. Der kalte und nasse Mai 2019 zeichnete für durchschnittliche ^7Be -Werte verantwortlich. Als weiteres natürliches Radioisotop findet sich in den HVS Filtern oft auch ^{40}K . Die Konzentrationen lagen 2019 meist im typischen Bereich von $5 - 20 \mu\text{Bq/m}^3$. Der höchste Wert mit $55 \mu\text{Bq/m}^3$ wurde beim «Sylvesterfilter» gemessen, verursacht durch Kalium aus Feuerwerkskörpern.



Figur 3 :
Histogramm der ^{210}Pb Aktivitäten in bodennaher Luft. 1'864 Messwerte.
Siehe auch Tabelle 2.

Niederschlag

Messungen von Gammastrahlern

Im Berichtsjahr 2019 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, Göttingen TG, Cadenazzo TI, Cernier NE und Davos GR. Für die natürlichen Radioisotope ^7Be und ^{210}Pb waren die Messresultate sehr ähnlich wie im Vorjahr, mit Werten im Bereich $0.0 - 2.3$ (Mittelwert 0.8) Bq/l, respektive $0.01 - 0.30$ (Mittelwert 0.08) Bq/l. In 9 (von 103) Regen- und Schneeproben lag ^{137}Cs knapp über der Erkennungsgrenze (Maximum $1.3 \text{ mBq/l } ^{137}\text{Cs}$). Als Referenzpunkt kann hier der Immissionsgrenzwert aus der Strahlenschutzverordnung von $36 \text{ Bq/l } ^{137}\text{Cs}$ in öffentlich zugänglichen Gewässern herangezogen werden, da bei starken Niederschlägen ein öffentlich zugängliches Gewässer im Wesentlichen durch Regenwasser gespeist sein könnte. Andere künstliche Gammaemitter konnten nicht nachgewiesen werden. Für eine weitere Diskussion dieser Resultate siehe auch Kapitel 8.5.

Tritium-Messungen

Für die monatlichen Sammelproben von Niederschlag der Referenzstationen Posieux, Göttingen, Cadenazzo sowie bei den Stationen Basel-Binningen und La Chaux-de-Fonds lagen die Tritiumkonzentrationen nur zweimal knapp über der Nachweisgrenze von 2 Bq/l : Im Januar bei Basel-Binningen ($3.5 \pm 0.6 \text{ Bq/l}$) und im Mai bei La Chaux-de-Fonds ($3.0 \pm 0.7 \text{ Bq/l}$). Tritium-Messungen an Regenproben aus der Umgebung der Kernkraftwerke KKG, KKL und KKM ergaben ebenfalls Messwerte unterhalb oder knapp über der Nachweisgrenze von $2 - 5 \text{ Bq/l}$. Bei diesen Stationen war der höchste gemessene Wert $5.7 \pm 0.7 \text{ Bq/l}$ (KKL, Februar). Bei den Sammelstationen PSI, KKB und Zwilag ergaben sich 2019 mit Mittelwerten von 21, 11 und 8 Bq/l etwas höhere Werte - vergleichbar mit letztem Jahr. Das höchste Monatsmittel trat im Februar bei der Station PSI auf (100 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 8 und $3'218 \text{ Bq/l}$ Tritium mit einem Mittelwert von 198 Bq/l . Die Höchstkonzentration entspricht rund 16% , der Mittelwert 1% 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 Radioaktivitätsmessungen des vom Bundesamt für Gesundheit betriebenen Messnetz URAnet aero haben im zweiten offiziellen Betriebsjahr keine erhöhte künstliche Radioaktivität in Luftpartikeln festgestellt. In den Spektren konnten keine Peaks nachgewiesen werden, die eindeutig einem künstlichen Radionuklid zugeordnet werden können. Auch die Konzentration von gasförmigem ^{131}I blieb unterhalb der Nachweisgrenze von ca. 90 mBq/m^3 . Somit blieben die Konzentrationen dieser Radionuklide weit unter den in der StSV festgelegten Immissionsgrenzwerten. Hingegen konnten in den Spektren die natürlich vorkommenden Radontöchter aus der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallskette nachgewiesen werden. Ein Vergleich mit den meteorologischen Bedingungen zeigt, dass Höchstwerte in der Aktivitätskonzentration der Radontochter ^{214}Pb bei windstillen Verhältnissen ohne Niederschlag erreicht werden. Diese Höchstwerte sind von Station zu Station verschieden und reichten im Jahr 2019 von 15 Bq/m^3 in Waltersholz/AG bis 35 Bq/m^3 in Bellinzona/TI.

Einführung

Das im Jahr 2018 offiziell in Betrieb genommene Messnetz URAnet aero überwacht die Radioaktivität in der Umgebungsluft. Das Messnetz besteht aus 15 in der ganzen Schweiz verteilten Messstationen, auf denen Aerosolmonitore die Aktivitätskonzentrationen der auf Luftpartikeln gebundenen Radionuklide kontinuierlich messen und diese Messwerte per Mobilfunknetz übertragen. Fünf Messstandorte verfügen zusätzlich über einen Iod-Monitor, der aus dem Vorgängermessnetz RADAIR in URAnet aero integriert wurde. Dieser misst die ^{131}I Aktivitätskonzentration (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 in diesem 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 von 16 bis $18 \text{ m}^3/\text{h}$ um einiges tiefer liegt als bei den HVS (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 je eine Station nördlich des Juras (Basel) und 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.

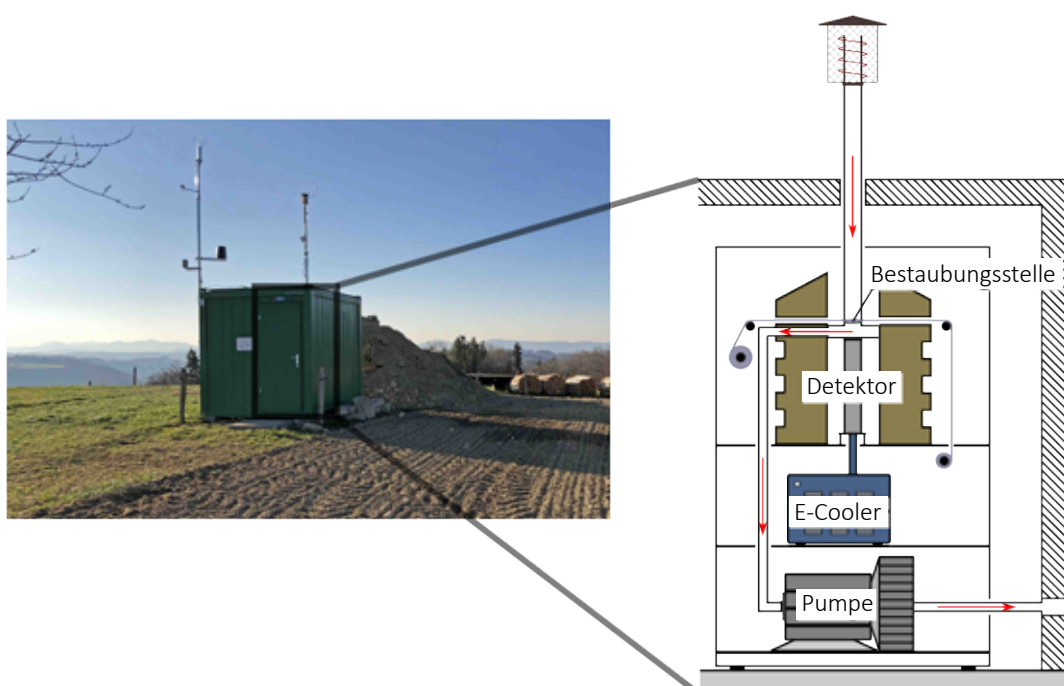
Die Messgeräte sind eingebunden in das SwissMetNet der MeteoSchweiz, welche die Messwerte auf die Server der Sektion Umweltradioaktivität transferiert, von wo aus sie für eine Analyse und gegebenenfalls eine Alarmvalidierung verfügbar gemacht werden. Daneben speichert die MeteoSchweiz alle Messwerte 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).

Messmethodik

Aerosolsammler:

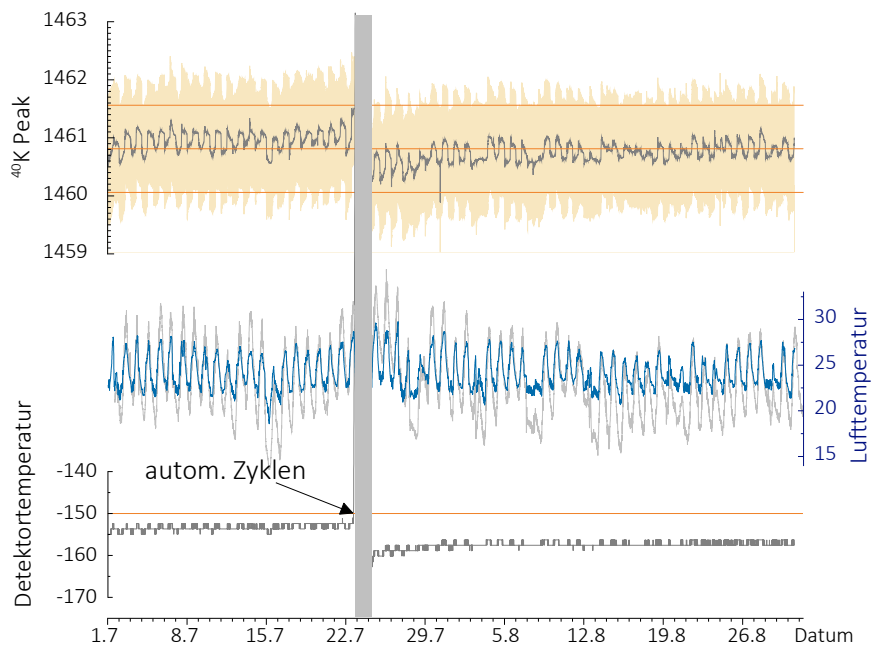
Die Aerosolmonitore - vereinfacht dargestellt in Figur 1 - sind ausgestattet mit einem Reinstgermanium-Detektor mit 15% relativer Effizienz gegenüber einem 3x3" Natriumjodid-Detektor. Zur Abschirmung vor



Figur 1:

Vereinfachtes Schema des Aerosolmonitors. Der Weg der angezogenen Luft ist mit roten Pfeilen angedeutet. Die wesentlichen Elemente des Monitors sowie die Funktionsweise sind im Text erklärt. (Bild der Messstation in Waltersholz/AG. Am Mast neben dem Ansaugkopf befinden sich Wind-, Regen- und Temperatursensoren)

Umgebungsstrahlung ist dieser Detektor in einem runden Blei-Gehäuse installiert. Etwa 1cm über dem Detektor liegt ein Glasfaser-Filterband, durch welches Aussenluft mit einem Durchfluss von 16 bis 18 m³/h gepumpt wird. Als Support des Filterbands wird ein metalliger Messstellenring mit gleichem Durchmesser wie das Bleigehäuse verwendet, welcher im Messbetrieb von vier Schraubenfedern an das Bleigehäuse gepresst und durch O-Ringe abgedichtet wird. Bei der Bestäubungsstelle hat dieser Messstellenring ein Loch von 5cm Durchmesser, bei welchem die angesaugte Luft das Filterband passiert. Das Filterband wird alle 12 Stunden um 10 cm vorgeschoben, so dass wieder eine neue Filterfläche bestaubt wird und die bereits bestaubte Filterfläche ausserhalb des Bleigehäuses zu liegen kommt. Dadurch wird verhindert, dass die weiterhin abklingenden Radionuklide des alten Filters weitere Counts während der Bestäubungszeit des aktuellen Filters verursachen. Bei einem Filterbandvorschub wird den vier Schraubenfedern durch die Druckluft eines Kompressors entgegengedrückt, sodass sich das Filterband durch die entstehende Lücke frei bewegen kann. Das Bleigehäuse verfügt über einen Einlass für die Luftansauglinie und einen Ausgang für den Luftabzug. Eine Kunststoff-Abdeckung, die luftdicht an der Innenseite des Bleigehäuses angebracht ist, liegt



Figur 2:
 Messparameter der Station Bellinzona von Juli bis August 2019. Oben: Gemessene Lage des ^{40}K Peaks im Spektrum (grau) mit der Halbwertsbreite (gelbe Fläche), zusammen mit dem Referenzwert von 1'460.81 keV und der Breite des Suchintervalls von ± 0.75 keV (orange). Mitte: Lufttemperatur in der Umgebung (grau) und nach der Bestäubungsstelle (blau). Unten: Temperatur des Detektors. Die orange Linie zeigt die Schwelle von -150°C für das automatische Zyklen, welche am 22. Juli überschritten wurde. Danach konnten etwa zwei Tage lang keine Messwerte aufgenommen werden, bis der Germaniumkristall wieder abgekühlt war (grau markiert).

zwischen dem Detektor und dem Filterband und trennt somit den Detektor von der Zirkulation der angesogenen Aussenluft.

Die in diesem Setup verwendete Gamma-Spektrometrie mit Germanium-Kristallen erlaubt die Aufnahme von hochaufgelösten Spektren im Energiebereich zwischen 30 und 2'000 keV mit Peak-Halbwertsbreiten zwischen 1 keV und 2.5 keV. Dadurch können die einzelnen Peaks eindeutig den verschiedenen Radionukliden zugeordnet und über die Peak-Fläche die Aktivität bestimmt werden. Nach einem Filterbandvorschub beginnt die Pumpe sofort mit dem Ansaugen von Aussenluft mit 16 bis 18 m^3/h und der Detektor mit der 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 unten präsentierten Werte beziehen sich auf 12-Stunden-Mittelwerte, d.h. die Aktivitätskonzentrationen werden unter der Annahme berechnet, dass seit dem letzten Filterbandvorschub immer eine konstante Aktivitätskonzentration in der Luft vorherrscht.

Die Germanium-Kristalle reagieren sehr sensibel auf Veränderungen in den Umgebungsbedingungen und müssen auf eine Temperatur von unter -150°C gekühlt werden, damit die angelegte Hochspannung keinen Schaden am Detektor verursacht. Da eine Kühlung mit Flüssigstickstoff auf 15 Messstationen nicht praktikabel ist, sind die Detektoren elektrisch durch einen E-Cooler von Ortec gekühlt. Das kontinuierlich Ansaugen von Aussenluft führt jedoch unweigerlich zu Temperaturschwankungen im Messsystem. Aus diesem Grund erfährt die gemessene Lufttemperatur nach dem Filter eine Modulation in Abhängigkeit der Aussentemperatur, wie Figur 2 (mitte) am Beispiel der Messstation von Bellinzona zwischen Juli und August 2019 zeigt. Interessant ist die sehr gute Korrelation zwischen dieser Temperaturschwankung und der gemessenen Lage des ^{40}K Peaks bei 1460.81 keV (Figur 2, oben). Die gemessene Lage weicht aber in der Regel um weniger als 0.5 keV von 1460.81 keV ab und liegt damit gut innerhalb des Suchfensters von ± 0.75 keV. Um zu verhindern, dass der Peak bei einer konstanten längeren Drift aus dem Suchfenster herausläuft, führt das Gerät vor einem Filterbandvorschub eine Neukalibrierung der Energie mit den gemessenen Radontöchtern und ^{40}K durch. Durch diese automatische Regelung stellt das Messsystem sicher, dass die Energie der Gammaquanten über den gesamten Energiebereich auch bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen korrekt und zuverlässig gemessen wird. Damit die 1460.81 keV-Linie in jedem Spektrum vorhanden ist und damit eine Regelung durchgeführt werden kann, wurde eine sehr schwache ^{40}K im System integriert. Auf die Halbwertsbreite haben die beobachteten Schwankungen nur wenig Einfluss.

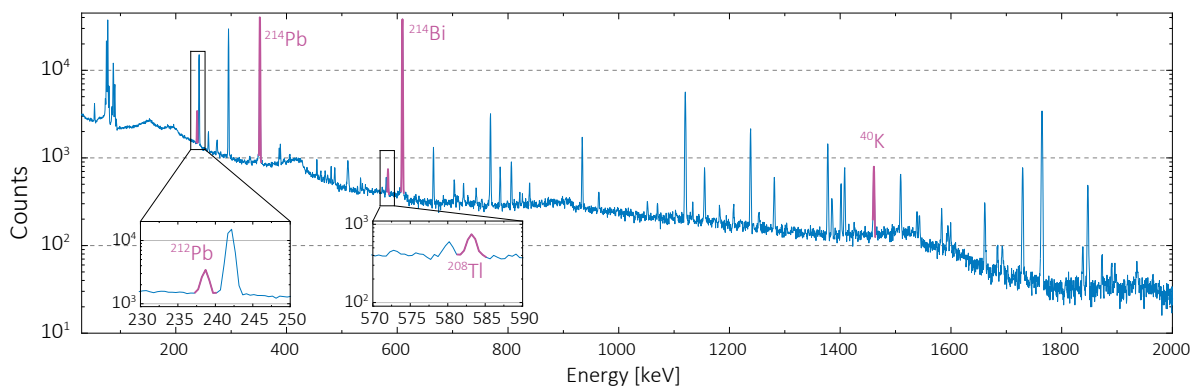
Probleme können jedoch auftreten, wenn die Wärmeisolation eines Detektors nach einigen Betriebsjahren allmählich nachlässt. Erwärmt sich ein Detektor auf -150°C , dann muss zum Schutz des Germanium-Kristalls die Hochspannung heruntergefahren und der Kristall auf Raumtemperatur aufgewärmt und wieder abgekühlt werden (sog. zyklieren, siehe Figur 2, unten). Während dieser Zeit können keine Aktivitätskonzentrationen gemessen werden. Falls ein Detektor wiederholt aufgewärmt werden muss, dann deutet dies auf Probleme der Wärmeisolation hin, die durch den Gerätehersteller behoben werden müssen.

¹³¹I-Monitor:

Die Umgebungsluft wird durch eine Pumpe angesaugt und durch eine zylindrische Kartusche mit AgNO₃-Granulat gezogen. Falls sich ¹³¹I in der Luft befindet, wird dieses am AgNO₃-Granulat adsorbiert und verbleibt damit in der Kartusche. In der Mitte der zylindrischen Kartusche befindet sich ein NaI-Detektor, der die vom adsorbierten ¹³¹I emittierten Gammaquanten bei 364.49 keV registriert.

Messresultate

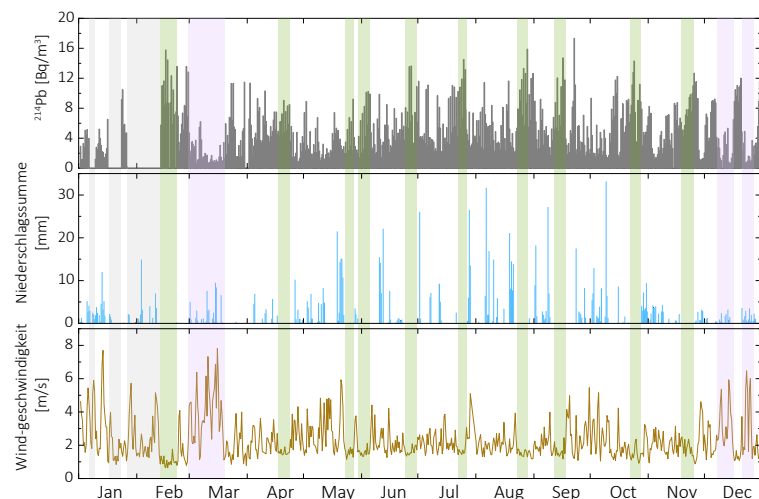
Figur 3 zeigt ein typisches Spektrum gegen Ende der Bestaubungszeit von 12 Stunden. Die Hauptlinien der Radontöchter ²¹⁴Pb und ²¹⁴Bi aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe sind die prominentesten Peaks im Spektrum. Die Hauptlinien von ²¹²Pb und ²⁰⁸Tl aus der Thorium-Zerfallsreihe sind ebenfalls im Spektrum zu finden, ebenso der ⁴⁰K Peak bei 1460.81 keV. Die Hauptlinie von ²¹²Bi – ebenfalls aus der Thorium-Zerfallsreihe – bei 727.3 keV



Figur 3: Gamma-Spektrum der Station Bellinzona vom 6. Juli nach einer Bestaubungszeit von 12 Stunden. Die Hauptlinien der identifizierten Radontöchter ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹²Pb und ²⁰⁸Tl und von ⁴⁰K sind rot hervorgehoben. ²¹²Bi konnte in diesem Spektrum nicht nachgewiesen werden. Alle anderen Linien im Spektrum sind Nebenlinien der Radontöchter ausser dem Annihilationspeak bei 511 keV.

kann aufgrund der geringen Emissionswahrscheinlichkeit nicht immer im Spektrum nachgewiesen werden. Aufgrund der fortlaufenden Bildung von ²¹²Bi und ²⁰⁸Tl auf dem Partikelfilter durch das bereits abgelagerte ²¹²Pb ist es dann auch schwierig, aus diesen kleineren Peaks eine tatsächliche Aktivitätskonzentration von ²¹²Bi und ²⁰⁸Tl in der Luft abzuleiten. Alle anderen (nicht markierten) Peaks im Spektrum sind ausser dem Annihilationspeak bei 511 keV Nebenlinien von den oben genannten Radionukliden.

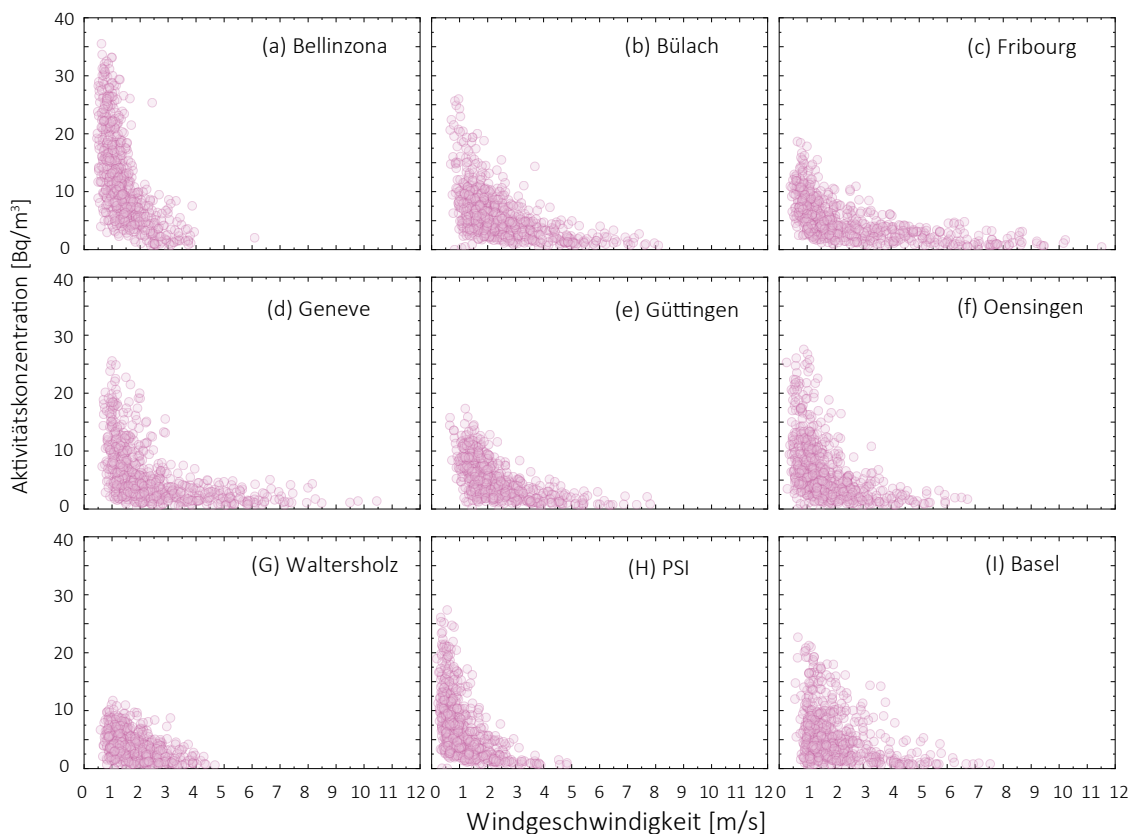
Wie schon im Jahr 2018 konnte auch im Jahr 2019 kein künstliches Radionuklid in den Spektren nachgewiesen werden. In wenigen Spektren kann ein kleiner Peak bei 477.3 keV vom Zerfall des kosmogenen ⁷Be beobachtet werden. Hingegen können die Radontöchter ²¹⁴Pb und ²¹⁴Bi meist bereits nach kurzen Bestaubungszeiten von weniger als einer halben Stunde mit hoher Sicherheit nachgewiesen werden. Ihre Aktivitätskonzentrationen



Figur 4: 12-Stunden Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ²¹⁴Pb (oben) und Windgeschwindigkeit (unten), sowie die 12-Stunden Niederschlagssumme (Mitte) der Messstation Güttingen von Januar bis Dezember 2019. Im Januar und anfangs Februar war das Messgerät teilweise von technischen Problem betroffen, sodass keine Messungen durchgeführt werden konnten (grau markiert). Abschnitte, bei denen während mehrerer Tage hohe Windgeschwindigkeit und Niederschlag gemessen wurden, sind violett hervorgehoben und Abschnitte, bei denen windstille Verhältnisse ohne Niederschlag vorherrschen, sind grün markiert.

sind bestimmt durch die Eigenschaften des Bodens und die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen. Figur 4 zeigt die 12-Stunden Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ^{214}Pb und der Windgeschwindigkeit, sowie die 12-Stunden Niederschlagsmenge in Güttingen zwischen Januar und Dezember 2019. Die Datenlücken im Januar und anfangs Februar aufgrund von technischen Problemen sind in der Figur markiert. Herausgehoben sind Abschnitte, in denen während mehreren Tagen windige und regnerische Verhältnisse (violett), bzw. windstille Verhältnisse ohne Niederschlag vorgeherrscht haben (grün). In ersterem Fall ist deutlich zu erkennen, dass die Radontöchter entweder rasch fortgetragen und mit der freien Troposphäre vermischt oder ausgewaschen werden. Letzteres sind Bedingungen, die meist zu höheren ^{214}Pb Aktivitätskonzentrationen führen, wenn auch nicht zwingend. Mitte April und Ende Mai/anfangs Juni sind die Aktivitätskonzentrationen trotz günstigen Verhältnissen nicht sehr hoch. Im Allgemeinen lässt der Trend aber eine inverse Beziehung zwischen Aktivitätskonzentrationen und Windgeschwindigkeit/Niederschlag vermuten.

Figur 5 zeigt die 12-Stunden-Mittelwerte der ^{214}Pb Aktivitätskonzentration als Funktion der ebenfalls über 12 Stunden gemittelten Windgeschwindigkeit für Güttingen und 8 weitere Messstationen im Jahr 2019. Auf den meisten Stationen zeigt bereits diese Darstellung ohne Berücksichtigung von weiteren meteorologischen Einflüssen wie Niederschlag, Temperaturvariationen oder Inversionsdauern deutlich, dass hohe Windgeschwindigkeiten keine hohen ^{214}Pb Aktivitätskonzentrationen zulassen und vice versa, d.h. hohe ^{214}Pb Aktivitätskonzentrationen können nur bei geringen Windgeschwindigkeiten gemessen werden. Bei wenigen Stationen wie Basel und Waltersholz ist die Beziehung etwas weniger stark ausgeprägt, was aber auch mit den lokalen Bedingungen der Messstation zusammenhängen kann.

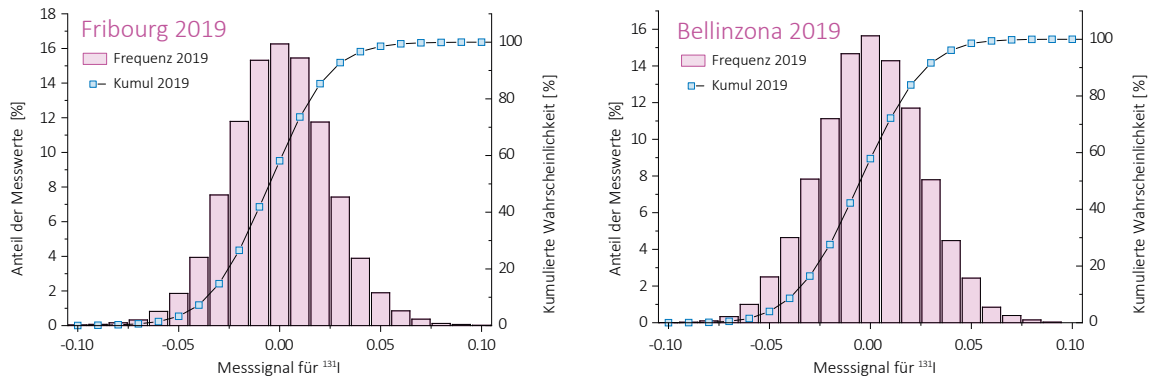


Figur 5:
12-Stunden Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von ^{214}Pb als Funktion der 12-Stunden Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für neun Messstationen.

Die Bodeneigenschaften beeinflussen vermutlich die Maximalwerte, die bei geringen Windgeschwindigkeiten erreicht werden können. In Waltersholz, Güttingen und Fribourg bleiben die ^{214}Pb Aktivitätskonzentration unter 20 Bq/m^3 während in Oensingen, Genf und Bülach über 25 Bq/m^3 und in Bellinzona über 35 Bq/m^3 gemessen werden können. Es gilt zu beachten, dass die Windgeschwindigkeiten jeweils von der nächstgelegenen Meteoschweiz-Messstation gemessen wurden, die sich in wenigen Fällen in unmittelbarer Umgebung befinden (Güttingen, PSI), aber vielfach mehrere Kilometer von der Radioaktivitätsmessstation entfernt sind.

Aus diesem Grund werden anfangs 2020 auf den Stationen in Waltersholz (siehe Figur 1), Kaisten, Neuenhof, Bellinzona, Bözberg eigene Meteostationen in Betrieb genommen. Zudem ist geplant, die Wettermessungen der ETH für die Station in Oensingen zu verwenden, die auf dem benachbarten Feld durchgeführt werden.

Auch bei den fünf ^{131}I Monitoren auf den Stationen in Bellinzona, Genf, Fribourg, Liebefeld und PSI wurde bei keiner Messung im Jahr 2019 die Nachweisgrenze überschritten. Die Histogramme der durchschnittlichen ^{131}I Konzentration gemessen auf den Stationen in Bellinzona und Fribourg in Figur 6, zeigen eine Gaußsche Glockenkurve mit einem Mittelwert von Null. Dies entspricht der erwarteten Verteilung für eine Situation mit ^{131}I Konzentrationen in der Luft unterhalb der Nachweisgrenze



Figur 6:
Histogramm des Messsignal für ^{131}I auf den Stationen in Bellinzona und Fribourg im Jahr 2019.

Schlussfolgerung

Im zweiten offiziellen Betriebsjahr hat sich gezeigt, dass durch die automatischen Regulierungen, die für die sensible Technik der Gamma-Spektrometrie mit Germanium-Kristallen notwendig sind, auch unter anspruchsvollen Bedingungen zuverlässig hochwertige Gamma-Spektren erzeugt werden. In diesen Spektren wurde im Jahr 2019 sowohl von den Aerosolmonitoren wie auch von den ^{131}I Monitoren zwar kein künstliches Radionuklid gefunden, aber die Qualität der Peaks der natürlich vorkommenden Radontöchter bestätigen die Funktionstüchtigkeit der Messgeräte.

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 Aero-solpartikel 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.



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

Sammlung der Proben

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

Die Flughöhe kann vom Auftraggeber gewählt werden. Beispielsweise ist die Probenahme in der Stratosphäre erforderlich, wenn bei einem Ereignis die radioaktive Wolke bis in diese Höhe aufsteigt. Im Normalfall sind 6 Sammelflüge pro Jahr vorgesehen, 2018 waren es ausnahmsweise nur drei. Die Hin- und Rückflüge erfolgen abwechselnd über resp. unter der Tropopause. Die Höhe der Tropopause wird täglich mit einem Ballonflug durch MeteoSchweiz in Payerne ermittelt.

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



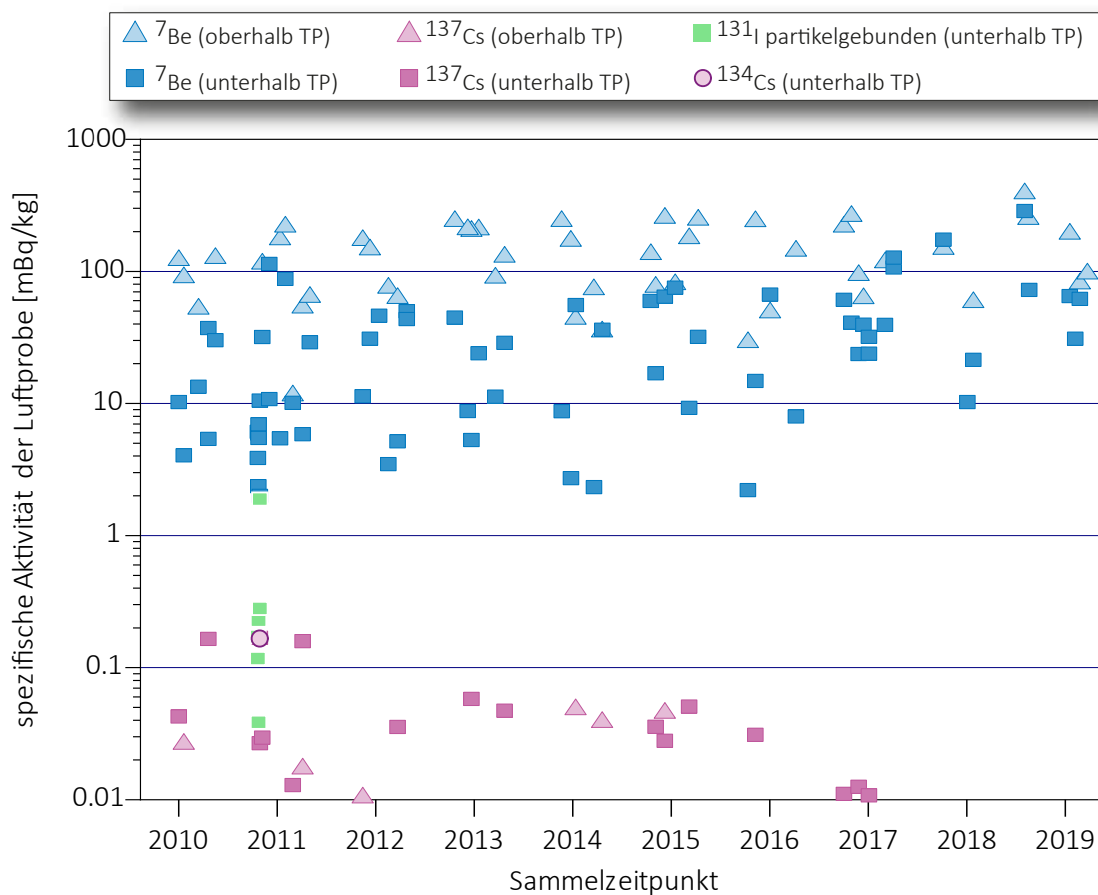
Figur 2: Höhenluftfilter-Aggregate: Detail-Aufnahme eines Sammelgerätes.

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

Messung der Proben

Die Messung erfolgt im Labor mittels hochauflösender 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



Figur 3:
 ^7Be -, ^{134}Cs -, ^{137}Cs - und partikelgebundene ^{131}I - Messwerte in mBq/kg Luft in den Jahren 2010-2019.

den Filtern weitere Untersuchungen durchgeführt werden, z.B. mit radiochemischen oder massenspektrometrischen Verfahren.

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

Die ^{137}Cs -Werte lagen im Jahr 2019 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.

Quellen:

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

4.4

Radioaktivität in aquatischen Systemen

M.S. Brennwald

Eawag, Gruppe Umweltisotope, Abteilung W+T, Dübendorf

P. Rünzi

Eawag, Gruppe Sedimentologie, Abteilung SURF, Dübendorf

M. Zehringer, A. Pregler

Kantonales Labor Basel-Stadt, Basel

Zusammenfassung

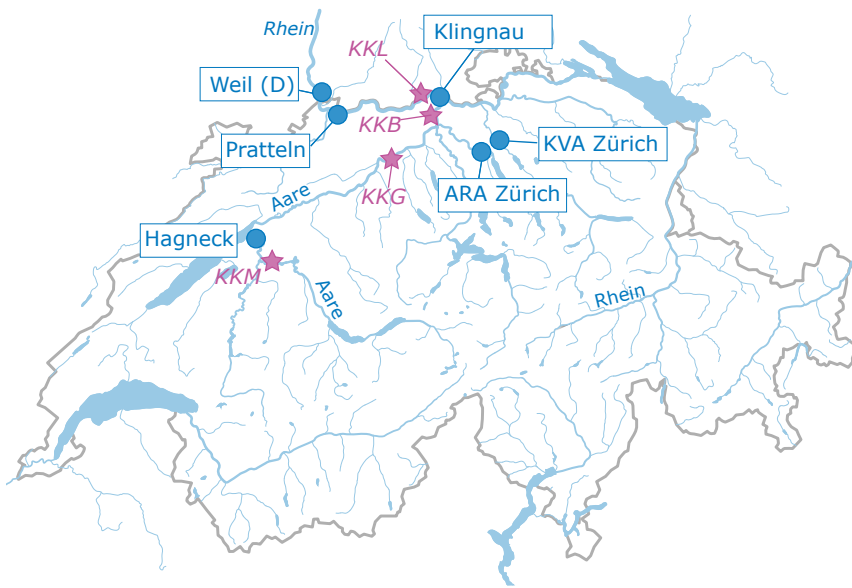
In den Wasserproben von Aare und Rhein wurden 2019 weder ^{54}Mn , ^{58}Co oder ^{60}Co aus Abgaben der Kernkraftwerke Mühleberg, Gösgen, Beznau oder Leibstadt nachgewiesen; diese Radionuklide wurden nur in den Schwebstoffproben von Aare und Rhein gefunden. Vereinzelt wurde ^{137}Cs beobachtet, welches 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 einer Fischprobe vom Rhein bei Augst wurde ^{137}Cs in einer geringen Konzentration gefunden, ansonsten waren keine künstlichen Radionuklide in Fischen oder Wasserpflanzen nachweisbar. Auch in Grundwasserproben wurden keine künstlichen Radionuklide gefunden.

Ziele

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. Eine quantitative Bilanzierung der Frachten ist aufgrund der Radionuklidkonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenzen praktisch nicht mehr möglich.

Methoden

Die kumulierten Radionuklidabgaben der Kernkraftwerke werden 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



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

sich aus dem Produkt der gemessenen Aktivität und der während der Sammelperiode abgeflossenen Wassermenge (Bemerkung: für den monatlichen Abfluss bei Hagneck wurden die Monatsmittelwerte der Jahre 2016 - 2018 eingesetzt, weil das Bundesamt für Umwelt keine Messdaten für 2019 zur Verfügung stellen konnte).

Die Schwebstoffproben werden mit Hilfe von Sedimentfallen als monatliche Sammelproben gewonnen. 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. Die Sediment-, Fisch- und Wasserpflanzenproben werden vor der Analyse gefriergetrocknet. Die spezifische Aktivität dieser Proben wird in Bezug auf das Trockengewicht angegeben.

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). Zudem sammelt das AUE BS bei Weil monatlich Schwebstoff-Stichproben. Dabei wird über Zeiträume von einigen Tagen Rheinwasser aus der Querprofilmischung entnommen und davon die Schwebstoffe abzentrifugiert. Die Schwebstoffe werden gefriergetrocknet, gemahlen und danach vom KLBS gamma-spektrometrisch analysiert. Aus den so bestimmten spezifischen Aktivitäten und dem monatlichen Abfluss bei Basel werden die monatlichen Radionuklidfrachten auf suspendierten Partikeln abgeschätzt. Dabei ist zu beachten, dass diese 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 Eawag beprobt einmal jährlich die Grundwasserströme bei Aarberg (Pumpwerk Römerstrasse II, in der Nähe der Überwachungsstation Hagneck), bei Döttingen (Pumpwerk Unterwald, in der Nähe der Überwachungsstation Klingnau) und im Hardwald bei MuttENZ (Pumpwerk BW16 der Hardwasser AG). Dabei werden die Radionuklide aus 100L Grundwasser analog zu den Flusswasserproben vor der Analyse angereichert und analysiert.

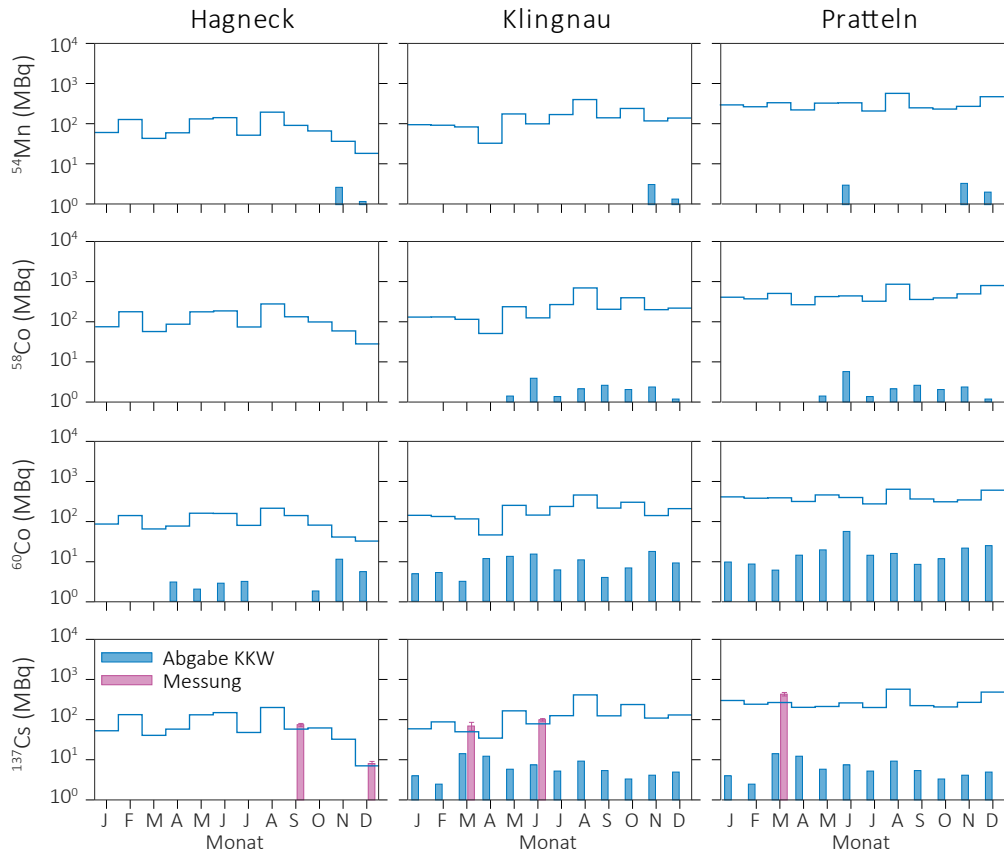
regelmässig Schwebstoffproben gesammelt. Zusätzlich werden einmal jährlich auch Grundwasser-, Fisch- und Wasserpflanzenproben untersucht. Die Aktivitäten der Radionuklide in allen Proben werden an der Eawag mittels Gammaskopimetrie bestimmt.

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 40 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

Ergebnisse

Wasserproben

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.

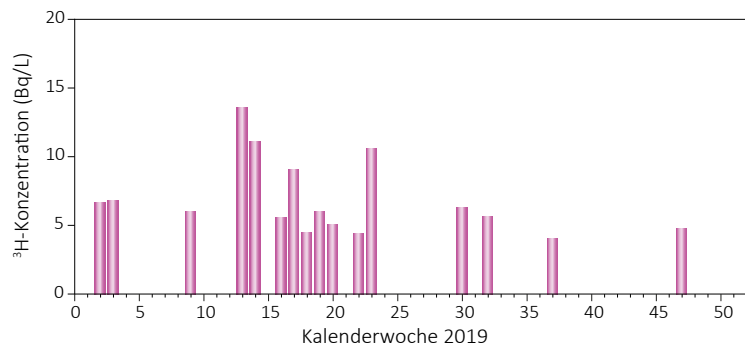


Figur 2 :

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 (blaue Stufenlinie). Die Fehlerbalken zeigen den Standardmessfehler der Fracht.

Die Summe der Radionuklid-Abgaben aus den Kernkraftwerken in die Aare bzw. in den Rhein waren für ^{54}Mn und ^{58}Co bis 2018 vorwiegend durch das Kernkraftwerk Mühleberg dominiert. Im Jahr 2019 beschränkten sich dessen Abgaben aber auf auf verhältnismässig geringe Mengen ^{54}Mn im November und Dezember sowie ^{60}Co (April- Juli, Oktober- Dezember). Die Aktivität von ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs in der Aare ist vorwiegend durch die Abgaben aus den Kernkraftwerken Beznau und Leibstadt bestimmt.

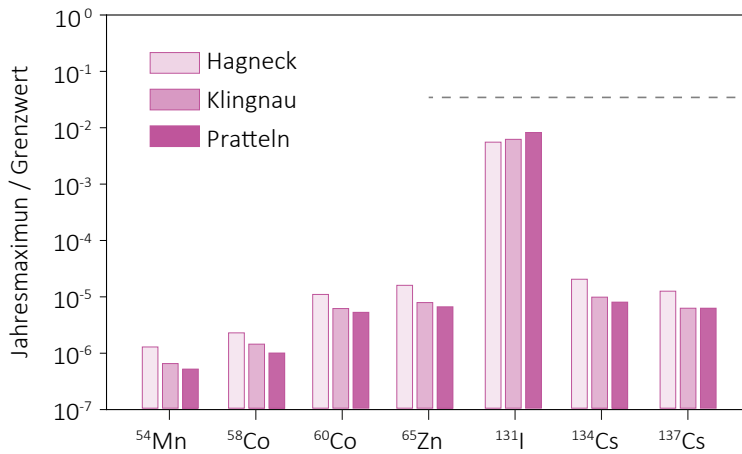
Bei allen drei Stationen (Hagneck, Klingnau und Pratteln) wurde in den Wasserproben aus der Aare und dem Rhein über das ganze Jahr kein ^{54}Mn , ^{58}Co oder ^{60}Co nachgewiesen. In früheren Jahren wurden vereinzelt Spuren dieser Nuklide nahe der Nachweisgrenze gefunden, als die Abgaben aus den KKW noch systematisch höher waren. In den letzten Jahren sind die Abgaben von ^{54}Mn , ^{58}Co oder ^{60}Co aus den KKW jedoch um mehrere Grössenordnungen zurückgegangen (Fig. 4).



Figur 3 :

^3H -Aktivitätskonzentration im Rhein bei Weil am Rhein (D).

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.



Figur 4: 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).

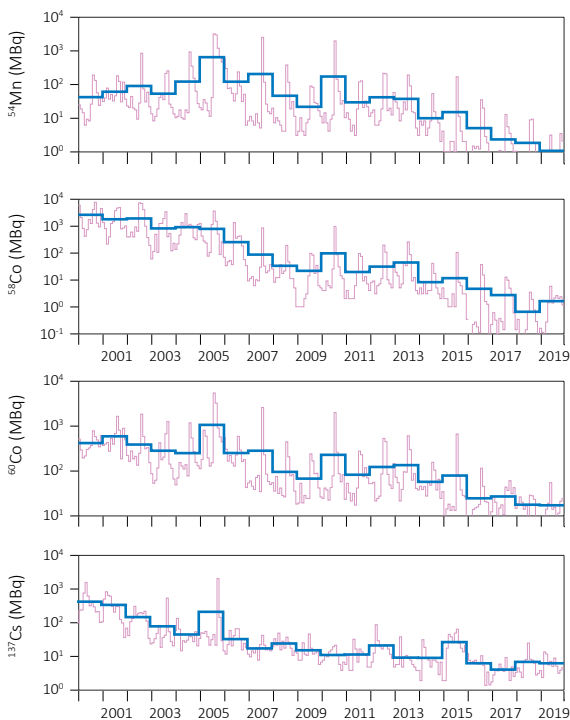
Die ^3H -Aktivität der wöchentlichen Rheinwasserproben von Weil am Rhein (D) ist in Figur 3 dargestellt. Die ^3H -Konzentrationen betragen über das ganze Jahr $<14\text{ Bq/L}$. Bei 70% aller Proben liegen die ^3H -Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze von 2 Bq/L .

Figur 4 zeigt die jährlichen Maxima bzw. die Nachweisgrenzen 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.

Ausser ^{137}Cs wurden keine weiteren künstlichen Radionuklide nachgewiesen, wohl aber natürliche wie ^7Be , ^{40}K und ^{210}Pb .

Langfristige Entwicklung der Radionuklidabgaben und Frachten in Aare und Rhein

Figur 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abgaben von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs aller Kernkraftwerke während den Jahren 2000 - 2019. 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 2014 keine systematische Veränderung erkennbar; danach zeigt sich nochmals ein Trend zu tieferen Abgaben von ^{54}Mn , ^{58}Co und ^{60}Co .



Figur 5: Monatliche Abgaben (inkl. Jahresmittelwert) von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co und ^{137}Cs aus den Kernkraftwerken während 2000 - 2019 (Summe der Abgaben aller Kernkraftwerke).

Im Einklang mit den generell geringeren Abgaben während der letzten Jahre lagen die Messwerte der im Wasser gelösten Radionuklide mit sporadischen Ausnahmen bei ^{137}Cs unterhalb der spezifischen Bestimmungsgrenzen. Deshalb ist wie bereits in den Vorjahren eine Quantifizierung der Jahresgesamtfracht anhand der monatlich überwachten Radionuklidfrachten nicht sinnvoll möglich.

Partikelproben

Die meisten der von den Kernkraftwerken abgegebenen Radionuklidspezies lagern sich an suspendierte Partikel im Wasser an. Der Partikeltransport trägt somit wesentlich zur Verfrachtung der Radionuklide bei. Insbesondere werden Radionuklide durch sedimentierende Partikel aus dem offenen Wasser entfernt. Umgekehrt können Radionuklide durch Resuspension des Sediments auch wieder zurück in die Wasserphase gelangen.

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 (Fig. 6). Die ^{137}Cs -Nachweise werden wie auch bei den Wasserproben auf die Remobilisierung von ^{137}Cs vom Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt. Sporadisch wurde ^{54}Mn (bei Hagneck und Klingnau) gefunden. ^{58}Co , ^{60}Co und ^{65}Zn wurden nicht nachgewiesen.

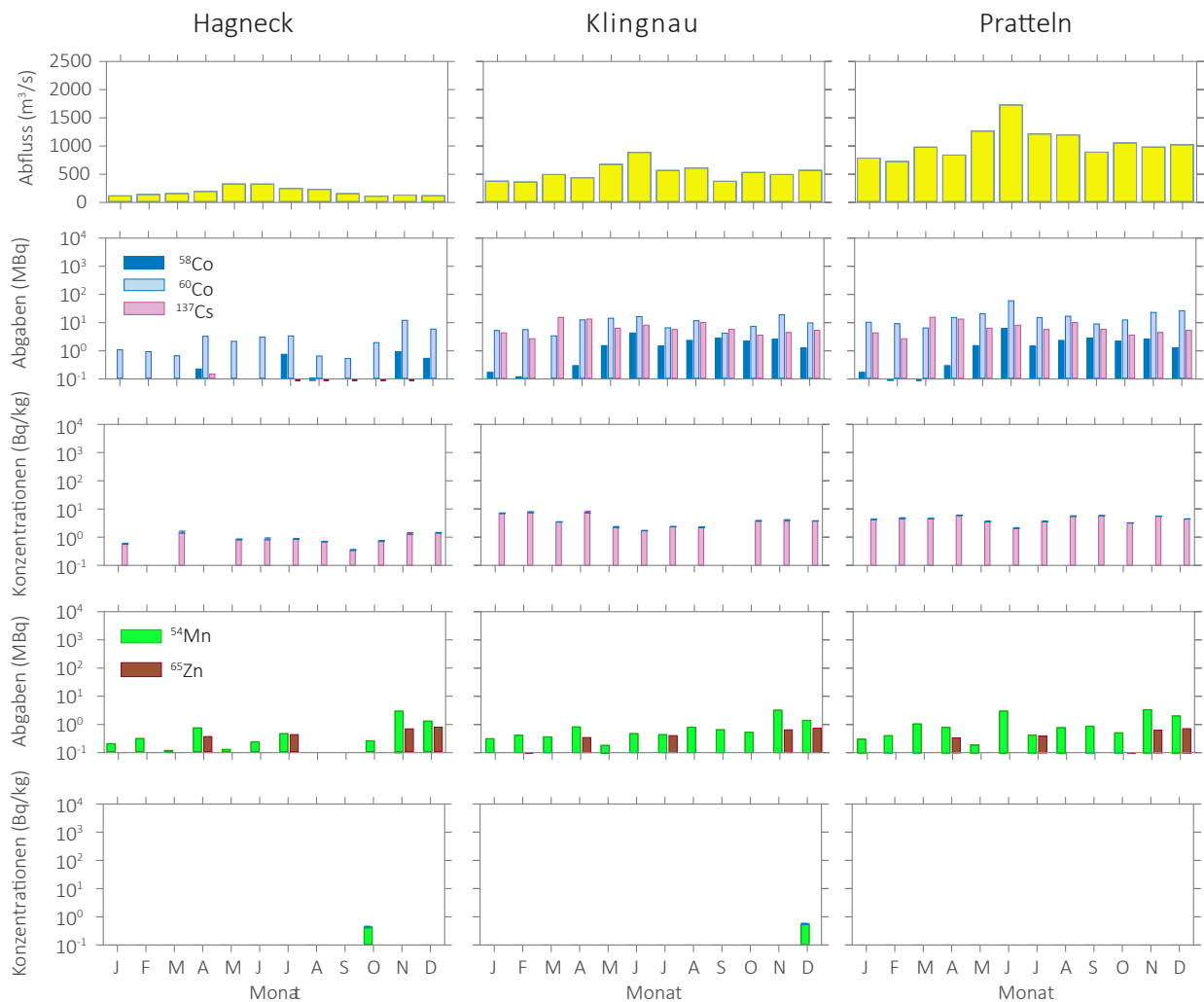
Figur 7 zeigt die aus den Stichproben bei Weil am Rhein (D) abgeschätzten Frachten von ^{54}Mn und ^{137}Cs auf Schwebestoffen. ^{54}Mn wurde sporadisch nachgewiesen. In allen Stichproben wurde ^{137}Cs gefunden, was wiederum primär auf die Remobilisierung von ^{137}Cs aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt wird. ^{58}Co und ^{60}Co wurden nicht nachgewiesen (in Figur 6 nicht gezeigt). 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

Im Jahr 2019 wurden Fische aus der Aare bei Aarberg (gefangen am 19.5.2019), bei Wöschnau (14.8.2019), dem Klingnauer Stausee (5.8.2019) und dem Rhein bei Augst (28.4.2019) analysiert. Bei allen Fischproben wurde natürliches ^{40}K gefunden (641 - 899 Bq/kg). In der Probe von Augst (28.4.2019) wurde eine geringe Konzentration ^{137}Cs gefunden (1 Bq/kg), was auf die Aufnahme von ^{137}Cs aus dem Unfall im KKW Tschernobyl zurückgeführt wird. Ansonsten wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen.

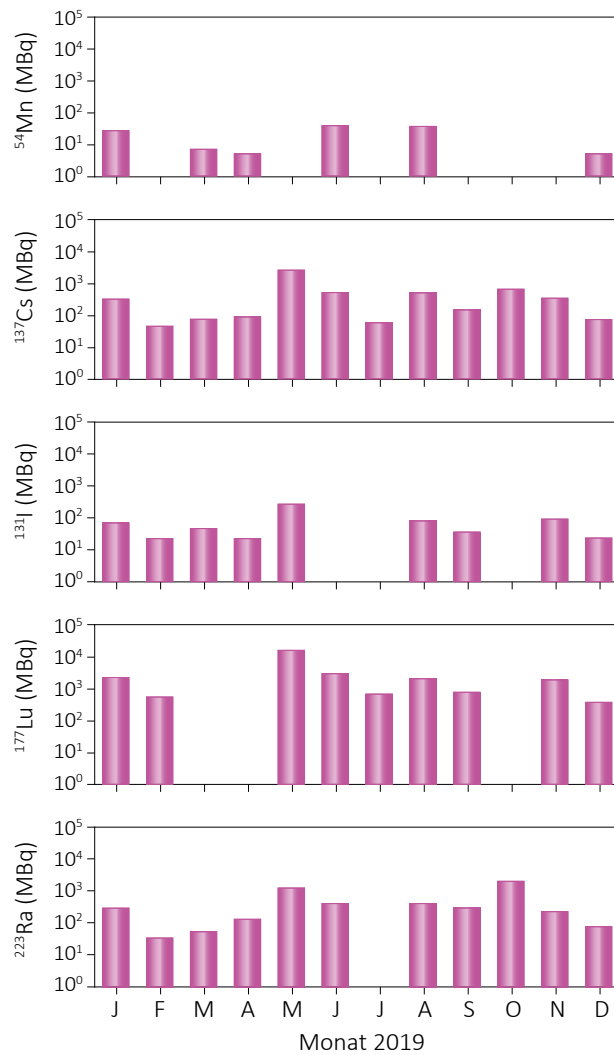
Wasserpflanzen

Am 6.11.2019 wurden Wasserpflanzen oberhalb der Station in Hagneck, im Klingnauer Stausee, und im Rhein bei Schweizerhalle entnommen. In allen Proben wurde natürliches ^{40}K beobachtet (134 - 1'005 Bq/kg), aber keine künstlichen Radionuklide gefunden.



Figur 6:

Spezifische Aktivitäten von ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn und ^{137}Cs in den monatlichen Partikelproben aus den Sedimentfallen bei Hagneck, Klingnau und Pratteln im Vergleich mit dem Abfluss und den kumulierten 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: 0.4 - 1.4 Bq/kg). Die Fehlerbalken zeigen den Standardmessfehler der spezifischen Aktivitäten.



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

Grundwasser

In den Grundwasserproben von Aarberg, Döttingen und Pratteln (6.11.2019) wurden keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen (Bestimmungsgrenzen 0.1 - 4 mBq/L).

4.5

URAnet aqua:

Automatisches Messnetz Flusswassers

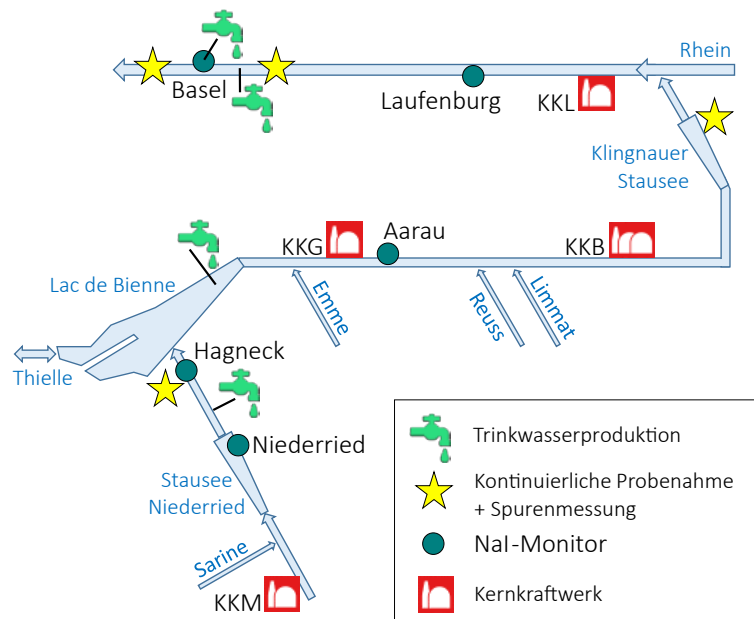
P. Steinmann, M. Müller, S. Estier
Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Die fünf automatischen Natrium-Iodid-Sonden des Messnetzes URAnet aqua messen fortlaufend die Konzentration von Gammastrahlern in Aare und Rhein und übermitteln alle 10 Minuten einen Messwert. Künstliche Radionuklide konnten im Berichtsjahr im Flusswasser nicht nachgewiesen werden. Die Verfügbarkeit der Messsonden war mit praktisch 100% bei allen Sonden sehr hoch.

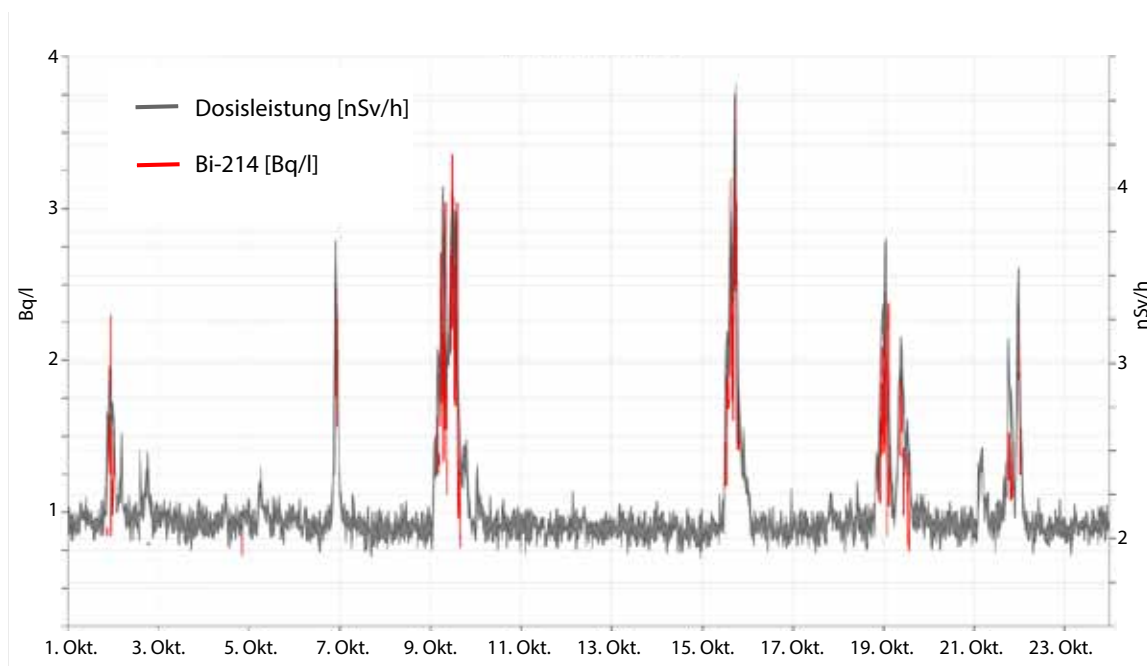
Das Messnetz und seine Aufgaben

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 zwei weitere Sonden installiert (Aarau und Laufenburg). Eine fünfte Sonde überwacht das von IWB Basel für die Trinkwasseraufbereitung aus dem Rhein entnommene Wasser. Auch hier befinden sich also zwei Messsonden zwischen dem letzten Kernkraftwerk und der Entnahme von Wasser. 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.



Figur 1:

Standorte der Nal-Monitore, EAWAG-Stationen für Spurenmessungen (Hagneck, Klingnau und Pratteln), Rheinüberwachungsstation RUS Weil a.Rh., Entnahmestellen für die Trinkwasseraufbereitung aus Bielersee und Rhein (Pratteln und Basel) sowie aus Uferfiltrat (Aare vor Bielersee).



Figur 2:
 Zeitverlauf der Dosisleistung (DL) und der ^{214}Bi Aktivität der Sonde bei Niederried, 1.-23. Oktober 2019. Erhöhungen der DL sind jeweils durch Eintrag von Radonfolgeprodukten verursacht (hier dargestellt: ^{214}Bi).

Für ^{137}Cs , ^{60}Co und ^{131}I ist die untere Meldeschwelle auf 10 Bq/l gesetzt. Eine zweite Schwelle mit Alarmauslösung liegt für ^{137}Cs und ^{60}Co 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, damit der Dosisgrenzwert für Personen aus der Bevölkerung von 1 mSv/Jahr bei der Nutzung des Flusswassers als Trinkwasser eingehalten wird. 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]. Beim Nachweis von 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. Im Spektrum überlagern sich die beiden Linien, da die Auflösung von NaI-Detektoren deutlich schlechter ist als jene der im Labor verwendeten Ge-Kristalle. Zudem ist die Energiekalibrierung bei NaI Kristallen (abhängig von der Temperatur) weniger stabil, so dass die Radontochter ^{214}Pb bisweilen als künstliches ^{131}I identifiziert wird. Während im Flusswasser ausser Radon-Folgeprodukte keine Radionuklide beobachtet wurden, können im Zustrom von Kläranlagen die in der Medizin eingesetzten Radionuklide gut nachgewiesen werden. Beispiele dazu sind in Kapitel 9.5 zu finden.

Verfügbarkeit der Messsonden und Messergebnisse 2019

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. 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. Etwas höher ist der Anteil fehlender Werte bei den auf radenviro.ch publizierten Tagesmittelwerten. Der Grund dafür ist, dass beim Fehlen eines einzigen 10-Minuten Wertes kein Tagesmittelwert gerechnet wird. Die NaI-Detektoren des URAnet aqua Messnetzes konnten 2019 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 (siehe Figur 2).

Tabelle 1:

Verfügbarkeit (Uptime) der NaI-Wassersonden im Jahr 2019

Station	Uptime	Inbetriebnahme
Niederried	99.9%	Juni 2014
Hagneck	99.9%	Juni 2015
Aarau	99.0%	Juni 2014
Laufenburg	99.9%	Januar 2015
Basel	99.9%	Juli 2013

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.

4.6

Tritium-Monitoring in der Aare

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

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

Zusammenfassung

Im Jahr 2019 setzte die Abteilung für Klima- und Umweltphysik (KUP) der Universität Bern das Monitoring von Tritium (^3H) in Fliessgewässern des Kantons Bern fort, welches im Januar 2017 im Auftrag der BKW Energie AG (BKW) und des Kantons Bern sowie mit Unterstützung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) begonnen wurde. Es kamen wieder dieselben Probenahmestationen wie im Vorjahr zum Einsatz. Im Jahr 2019 wurden die höchsten Tritiumwerte im Niederschlag aus dem Raum Niederwangen gemessen.

Hintergrund

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

Probenahmen

Im Jahr 2019 wurde im Rahmen dieses Monitorings Aarewasser an drei Standorten entnommen:

- Aare flussaufwärts vom KKM (Standort Eymatt am Wohlensee, oberhalb Einmündung Gäbelbach)
- Aare flussabwärts vom KKM (Standort Mühleberg-Rewag)
- Aare Wynau (kurz vor dem endgültigen Verlassen der Aare des Kantons Bern)

Tritium wurde auch anhand von Einzelproben im Wasser von drei Referenzstandorten gemessen:

- Aare am Altenbergsteg Bern (monatliche Einzelproben)
- Emme an der Heimiswilbrücke Burgdorf (monatliche Einzelproben)
- Aare Thun (Wochenmischproben bis Mai 2019)

Darüber hinaus wurde auch der Niederschlag, der auf dem Dach des Physikalischen Instituts der Universität Bern gesammelt wurde, in Form von Monatsproben untersucht.

Da sich in Niederwangen, ca. 10 km südwestlich des KKM, mit der Firma MB Microtec einer der grössten Tritiumemittenten der Schweiz befindet, wurden auch im Jahr 2019 Tritium-Messungen im dortigen Niederschlag sowie im Wasser des Stadtbachs in Niederwangen und des Gäbelbachs durchgeführt.

Tabelle 1 enthält Einzelheiten zu den Messungen, die 2019 durchgeführt wurden.

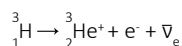
Die täglichen Probenahmen aus der Aare an den Standorten Eymatt und Mühleberg erfolgten mit Hilfe von automatischen Probenehmern vom Typ ISCO 6712, welche in Abständen von je 30 Minuten einige Milliliter Flusswasser in Probeflaschen abfüllen, sodass jede Probeflasche eine Mischprobe eines 24-Stunden-Intervalls enthielt.

Der Standort Thun wurde von August 2018 bis Mai 2019 beprobt, um den Tritiumeintrag der Aare im Oberstrombereich des Grossraums Bern zu bestimmen. So konnte eine Baseline noch vor einer allfälligen Erhöhung des Tritiumgehalts der Aare, die möglicherweise im Grossraum Bern durch das KKM und/oder MB Microtec verursacht wird, etabliert werden. Es wurden Wochenmischproben gemessen, die sich aus jeweils 28 Einzelproben zusammensetzten (4 Proben pro Tag x 7 Tage).

Im Raum Niederwangen wurden wöchentliche Stichproben aus dem Stadtbach entnommen. Der Gäbelbach wurde kurz seiner Einmündung in den Wohlensee in der Nähe des Wohnquartiers Eymatt ebenfalls wöchentlich beprobt. Darüberhinaus wurde auch der Niederschlag in Niederwangen mithilfe eines dort installierten Regensammlers erfasst. Die Intervalle zwischen den Niederschlagsmessungen variierten je nach Niederschlagsmenge. Durchschnittlich hatte sich alle zwei Wochen genügend Niederschlag für eine Messung angesammelt.

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 0.47 Bq/L), womit auch die natürliche Hintergrundaktivität von ^3H im Niederschlag bestimmt werden kann.

Messergebnisse Januar bis Dezember 2019

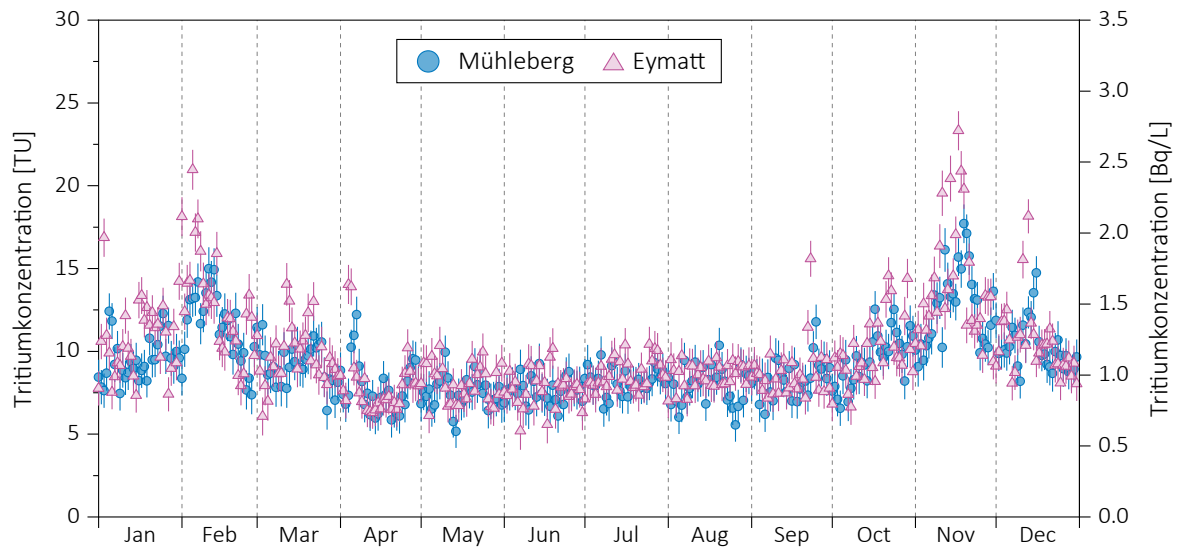
Standorte Eymatt und Mühleberg (Aare)

Die Tritiummesswerte von Wasser der Standorte Eymatt und Mühleberg bewegten sich relativ stabil in einem Band zwischen 5 und 15 TU (entsprechend rund 0.5 - 2 Bq/L). Nur gelegentlich wurden höhere Werte bis maximal 23 TU gemessen, die in der Regel mit einer eher geringen Schüttung der Aare korrelierten. In den Wintermonaten am Anfang und Ende des Jahres sind erhöhte Werte und auch eine grössere Variabilität festzustellen. Die Höchstwerte traten in der Regel zuerst am Standort Eymatt und einige Tage später mit geringer Verdünnung am Standort Mühleberg auf, da das grosse Wasservolumen des dazwischen liegenden Wohlensees als Puffer wirkt.

Tabelle 1:

Tritium-Messungen Januar bis Dezember 2019 nach Art oder Entnahmeort der Probe

Art oder Entnahmeort der Probe	Anzahl
Aare Eymatt	365
Aare Mühleberg Rewag	365
Aare Wynau	52
Aare Thun	21
Referenzstation Aare Kornhausbrücke	12
Referenzstation Emme Heimiswilbrücke	12
Niederschlag Physikalisches Institut	12
Niederschlag Niederwangen	33
Stadtbach Niederwangen	52
Gäbelbach Eymattstrasse	52
Standards/Nulleffekt/Vergleichsmessungen	58
Total: 1'034	



Figur 1 :
Tritium-Messwerte Eymatt und Mühleberg (2019).

Standorte Kornhausbrücke (Aare Bern) und Heimiswilbrücke (Emme Burgdorf)

An diesen beiden Standorten (Figur 2) wurden keine signifikant erhöhten Messwerte festgestellt. Die Werte lagen vor allem am Standort Heimiswilbrücke relativ stabil in einem Band zwischen 6.5 und 9.5 TU. Am Standort Kornhausbrücke war eine etwas grössere Variabilität mit Werten zwischen 5.6 und 9.9 TU zu beobachten.

Standort Wynau (Aare)

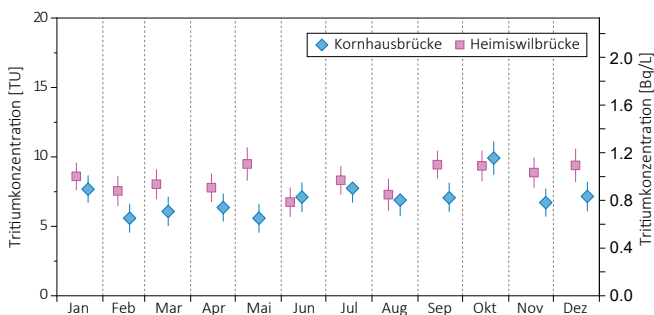
Auch in Wynau (Figur 3) wurden keine erhöhten Werte festgestellt.

Standort Thun (Aare)

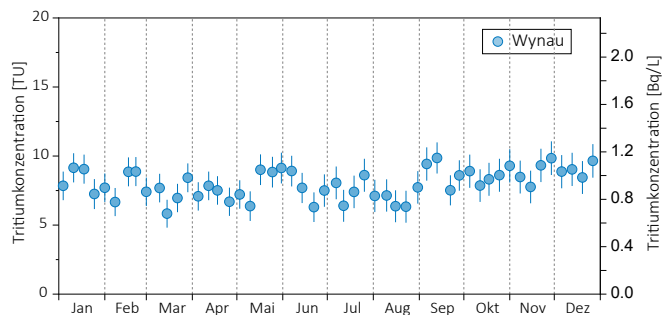
Der Standort Thun (Figur 4) diente von August 2018 bis Mai 2019 als Referenzstation vor einem allfälligen Tritiumeintrag im Raum Bern. Nachdem etabliert werden konnte, dass die Werte generell ca. 1-2 TU tiefer als an den Standorten Eymatt und Mühleberg lagen, wurden die Messungen im Mai 2019 eingestellt.

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. Das liegt an lokalen gasförmigen Emissionen. Die im Jahr 2019 gemessenen Proben liegen im Bereich 30 - 110 TU (Figur 5).



Figur 2 :
Tritium-Messwerte an den Standorten Kornhausbrücke und Heimiswilbrücke (monatliche Einzelproben - 2019).



Figur 3 :
Tritium-Messwerte am Standort Wynau (wöchentliche Einzelproben - 2019).

Standorte Niederwangen (Stadtbach, Gäbelbach, Niederschlag)

Im Raum Niederwangen wurden im Jahr 2019 zusätzlich zu den vom BAG durchgeführten Tritiummessungen (s. Kapitel 9.3) je 52 Messungen im Wasser des Stadtbachs (Schweizer Koordinaten 595'312, 197'140) und des Gäbelbachs durchgeführt (Figur 6). Der höchste Messwert beim Wasser des Stadtbachs lag bei ca. 220 TU, wobei im Sommerhalbjahr deutlich niedrigere Werte als im Winterhalbjahr zu beobachten sind. Das Wasser des Gäbelbachs wies relativ stabile Werte im Bereich zwischen 21 und 31 TU auf.

Darüber hinaus wurden insgesamt 33 Messungen am lokalen Niederschlag in Niederwangen (Schweizer Koordinaten 595'049, 196'717) durchgeführt (Figur 7). Der Höchstwert von annähernd 2'000 TU trat Mitte September auf.

Standort Leibstadt

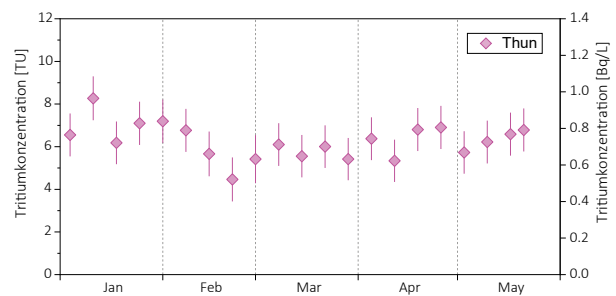
Im Mai/Juni 2019 wurde stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) vorübergehend ein automatischer Probenehmer installiert, um den Tritiumgehalt des Rheins vor, während und nach dem Revisionsstillstand zu ermitteln, welcher für den Zeitraum 03. Juni 2019 bis 03. Juli 2019 terminiert war. Es wurden Tagesproben mit einem Sampling-Intervall von je 60 Minuten entnommen.

Kurz nach Revisionsbeginn zeichnete sich ein deutlicher Anstieg von ca. 10 TU auf annähernd 100 TU ab. Nach ca. drei Wochen hatte sich der Tritiumgehalt wieder bei Werten nahe dem Anfangswert stabilisiert (Figur 8).

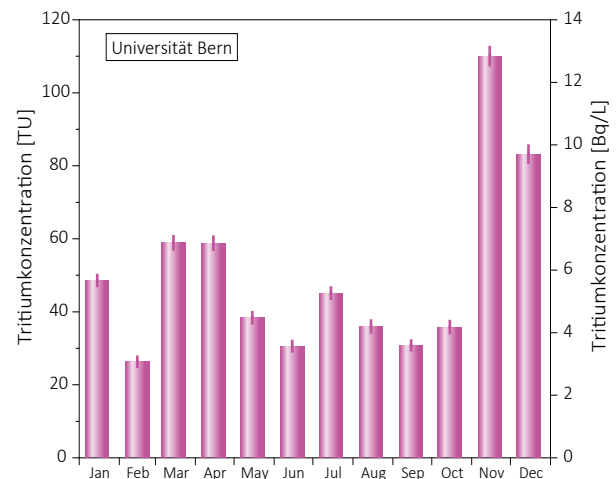
Zusammenfassung der bisherigen Aarewassermessungen

Die seit Messbeginn (1. Januar 2017) gemessenen Tritiumwerte der beiden Aarewasserstationen Eymatt und Mühleberg sind in Figur 9 und 10 dargestellt. In allen drei Jahren konnten Perioden mit um ca. einen Faktor drei erhöhter Aktivität beobachtet werden, die synchron bei beiden Stationen auftraten und auch vergleichbare Amplituden aufwiesen. Die von August 2018 bis Mai 2019 in Thun durchgeführten Messungen weisen darauf hin, dass die Quelle dieser Aktivitätsspitzen im Raum Bern liegen muss. Eine eingehendere Analyse zeigt, dass die Tritiumwerte stark mit der Aareschüttung korrelieren. Die höchsten Tritiumwerte treten bei tiefem Aareabfluss auf (Figur 10). Da dieser bei Frostperioden besonders tief ist, treten die Aktivitätsspitzen gehäuft in der kalten Jahreszeit auf. Eine Korrelationsanalyse ergibt, dass ein Teil der Variation auf einen diffusen, zeitlich konstanten Tritiumeintrag, etwa über das Grundwasser, von 1 TBq/Jahr zurückzuführen ist.

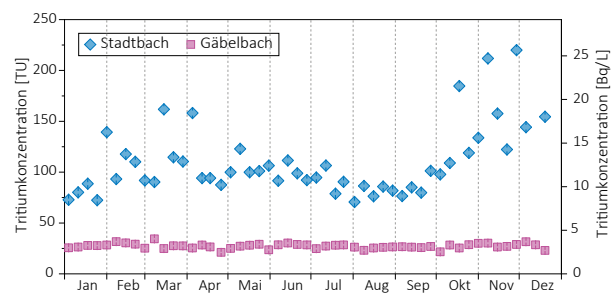
Figur 9 zeigt die bisherigen hochauflösenden Messungen an den Standorten Eymatt und Mühleberg seit Messbeginn Anfang Januar 2017.



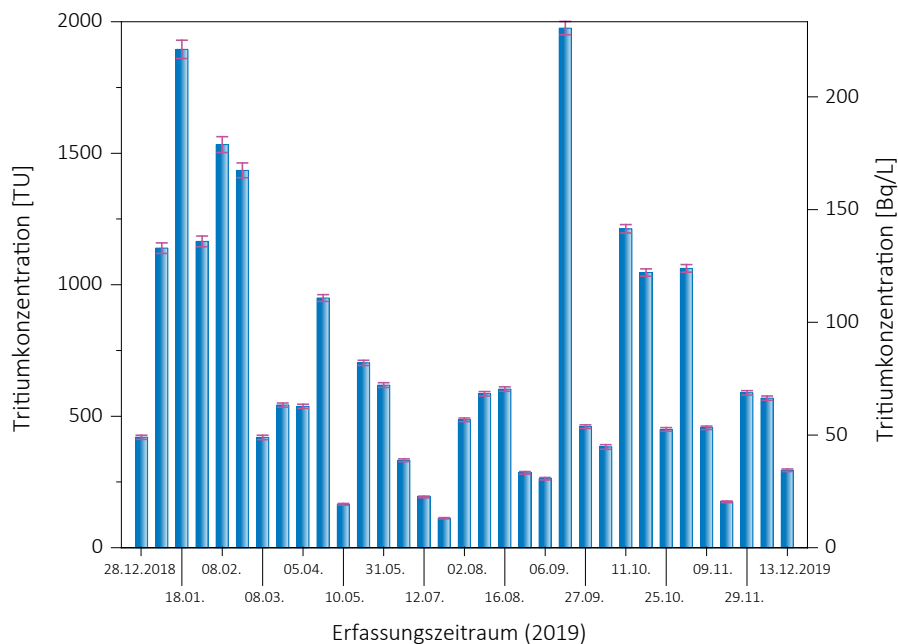
Figur 4: Tritium-Messwerte am Standort Thun (Wochenmischproben).



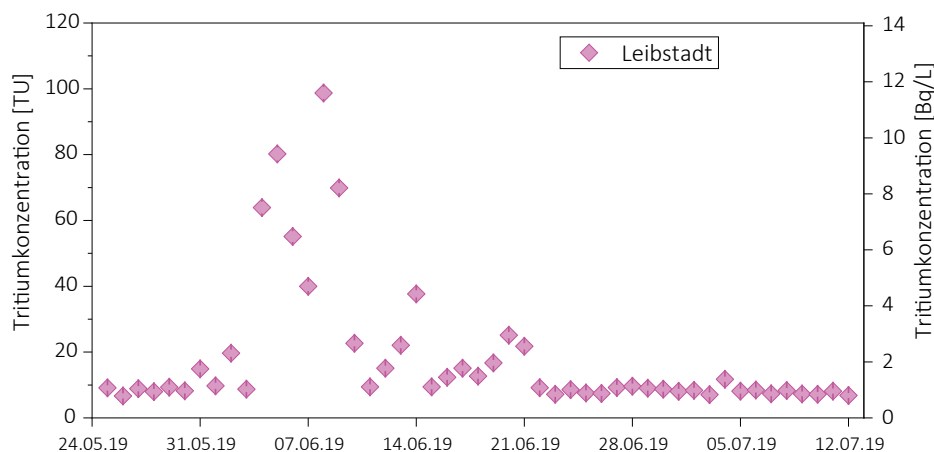
Figur 5: Tritium-Messwerte von Regenwasser des Physikalischen Instituts der Universität Bern (Monatsproben - 2019).



Figur 6: Tritiummesswerte am Stadtbach Niederwangen und am Gäbelbach Eymatt (wöchentliche Einzelproben).



Figur 7:
Tritiummesswerte im Regenwasser Niederwangen (Probenahme jeweils nach ausreichender Niederschlagsmenge).

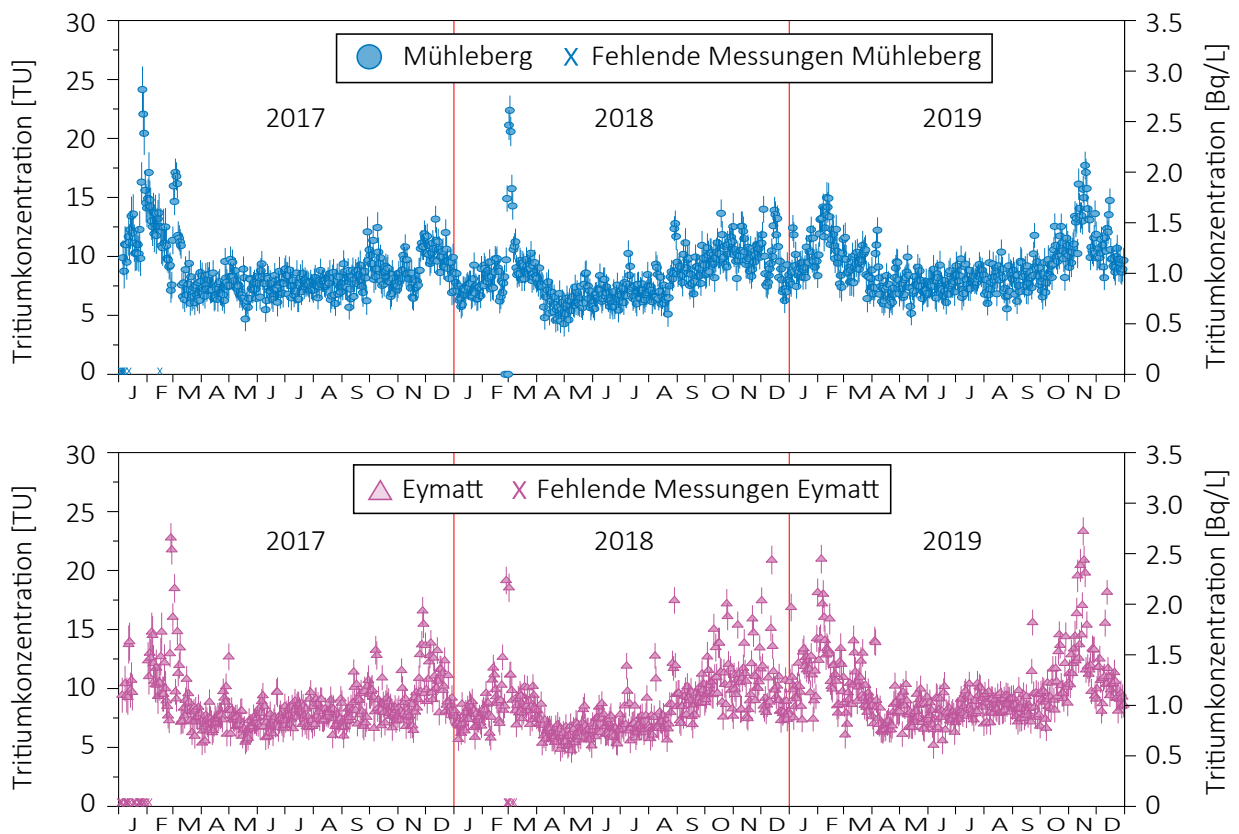


Figur 8:
Tritiummesswerte im Rhein stromabwärts vom Kernkraftwerk Leibstadt vor, während und nach dem Revisionsstillstand.

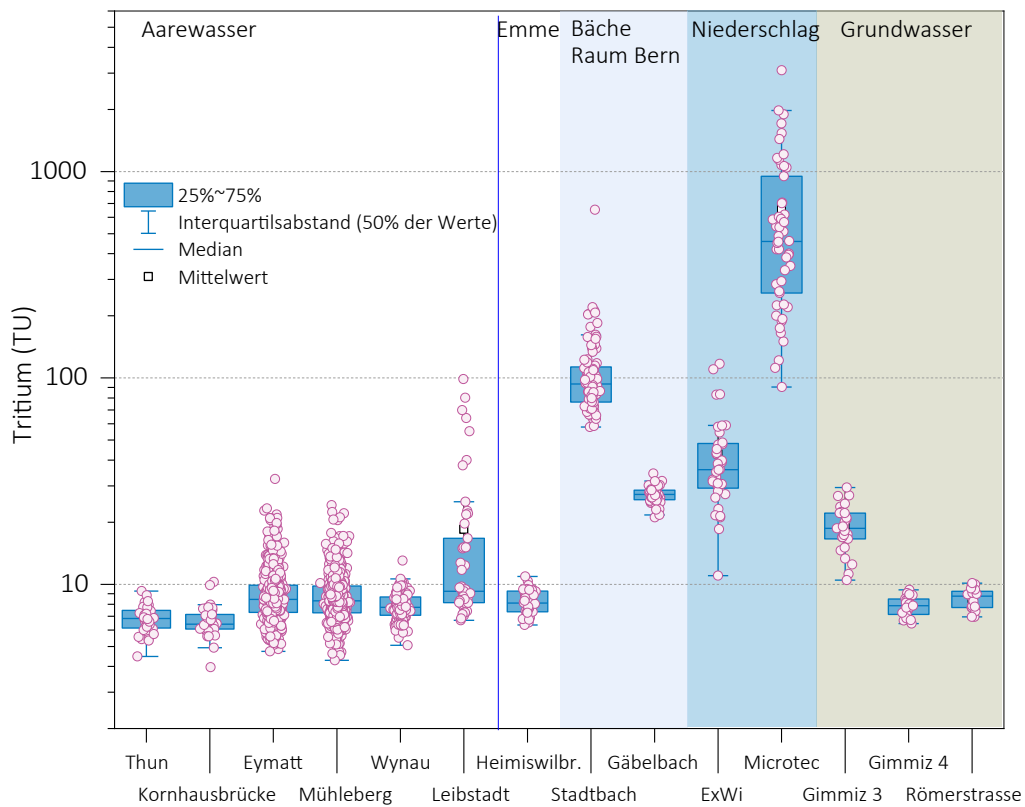
Überblick über sämtliche Messungen Januar 2017 bis Dezember 2019

Figur 10 zeigt einen Überblick über 2'777 Messungen, die an der KUP in den Jahren 2017, 2018 und 2019 durchgeführt wurden. Demnach beträgt der natürliche Tritiumgehalt der Aare gemessen bei Thun ca. 7 TU. Ähnliche Werte werden auch noch kurz vor Bern bei der Kornhausbrücke beobachtet. Bei der Eymatt sowie nach dem KKW Mühleberg liegen die Tritiumwerte auf vergleichbarem Niveau leicht höher. Das KKW Mühleberg kann demnach als Hauptemittent ausgeschlossen werden. Der Tritiumanstieg und auch die erhöhte Variabilität sind auf gasförmige Emissionen von der Firma Microtec zurückzuführen.

Die höchsten Werte in der Aare wurden jeweils bei tiefem Pegelstand beobachtet. Bei Wynau sind die Tritiumwerte wieder leicht tiefer. Der Einfluss der Firma Microtec wird insbesondere im Stadtbach und in den Niederschlägen bei Niederwangen deutlich, wo Tritiumgehalte von weit über 1'000 TU vorkommen. In geringerem Ausmass ist der etwas weiter entfernte Gäbelbach betroffen. Grundwasser-Messstellen, die mehrheitlich von Aarewasser gespeist werden (Gimmiz 3 und Römerstrasse) zeigen entsprechende Tritiumkonzentrationen von unter 10 TU. Bei Gimmiz 3 ist der Anteil von lokalem Niederschlag und damit der Tritiumgehalt entsprechend höher.



Figur 9: Überblick über die bisherigen hochauflösenden Messungen an Standorten Eymatt und Mühleberg seit Messbeginn.



Figur 10: Überblick über 2'777 Tritiummessungen der KUP in den Jahren 2017, 2018 und 2019.

4.7

Radioactivité du sol et de l'herbe

P-A. Pittet, P. Froidevaux, F. Barraud, L. Pfefferlé, F. Bochud

Institut de radiophysique, CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

S. Estier, P. Steinmann, A. Gurtner

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

M. Zehringer, A. Pregler

Laboratoire Cantonal de Bâle, Kannenfeldstr. 2, Basel

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

Labor Spiez, Office fédéral de la protection de la population, Spiez

Résumé

Nous avons prélevé des échantillons de sol (0 - 5 cm) et d'herbe sur différents sites en Suisse, notamment aux abords des centrales nucléaires, et mesuré leurs niveaux d'activité. Dans certains cas, des mesures de spectrométrie gamma in-situ ont également été réalisées. Les résultats montrent que l'activité artificielle dans le sol et l'herbe est restée faible et est principalement due aux retombées des essais d'armes atomiques réalisées en atmosphère jusque dans les années soixante ainsi qu'aux retombées de l'accident de Tchernobyl.

Une attention particulière a été apportée au site de la centrale de Mühleberg, dont le fonctionnement a été stoppé à fin 2019. Les prélèvements ont été effectués sur sept sites et ont fait l'objet d'analyses indépendantes pour le strontium-90 (^{90}Sr), le plutonium et l'américium. Cela permettra de mettre en évidence une éventuelle contamination de l'environnement lors des opérations de démantèlement.

Introduction

Le ^{90}Sr et le ^{137}Cs ont été largement dispersés dans l'environnement suite aux essais nucléaires des années soixante ainsi que lors de l'accident de Tchernobyl en 1986. Ces radioéléments sont les deux principaux produits de fission à durée de vie moyenne (environ 30 ans) et ont un comportement chimique proche de deux éléments impliqués dans les cycles vivants, le calcium (pour le strontium) et le potassium (pour le césium). Par exemple, le ^{90}Sr est facilement transféré du sol aux plantes, puis tout au long de la chaîne alimentaire, et pourra finalement se trouver dans les tissus osseux et les dents [1]. Le ^{137}Cs va aussi passer du sol aux végétaux et rejoindre la chaîne alimentaire. Au contraire du ^{90}Sr , il se retrouvera principalement dans les tissus musculaires des vertébrés et sera éliminé plus rapidement que le strontium.

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 variables, telles 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 végétale, cette dernière étant notablement affectée par les conditions météorologiques (température, pluviosité) [2,3,4].

Une surveillance régulière des installations nucléaires a été mise en place depuis le début de leur exploitation et la situation radiologique de leur voisinage est bien connue. Toutefois, un programme de surveillance renforcé a débuté en 2017 pour la centrale de Mühleberg [5] qui a été mise à l'arrêt à fin 2019. Ce programme comprend l'analyse indépendante de chaque échantillon provenant des 7 sites de prélèvement. Ceci permettra d'estimer l'impact radiologique éventuel des travaux de démantèlement.

Résultats et discussion

Les résultats des mesures pour les sols sont présentés dans le Tableau 1. La présence du ^{90}Sr et des actinides Pu et Am est principalement due aux retombées des essais nucléaires atmosphériques des années soixante. Cette déposition ayant été amenée au sol par les précipitations, les régions connaissant une pluviosité plus importante montrent les activités les plus élevées. Ainsi, les activités en ^{90}Sr sont dans une gamme de 0.1 à 0.6 Bq/kg sur le plateau suisse tandis que des valeurs supérieures à 1 Bq/kg peuvent être observées au Tessin ou sur les sites alpins. La même tendance est observée pour les actinides, avec des activités inférieures à 0.3 Bq/kg pour le plutonium et à 0.15 Bq/kg pour l'américium sur le plateau suisse, alors que ces valeurs augmentent avec l'altitude, le point de prélèvement le plus élevé (alpage de l'Allmendhubel) montrant les activités les plus importantes. Les rapports $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ proches de 0.46 (voir le chapitre 7.2, mesures de plutonium et d'américium) confirment que cette contamination est due aux essais nucléaires des années soixante.

La situation est plus complexe dans le cas du ^{137}Cs , car le passage du nuage radioactif émis lors de l'accident de Tchernobyl en 1986 a provoqué une déposition supplémentaire dont la répartition géographique n'est pas uniforme. De fortes précipitations s'étant produites au Tessin lors du passage du nuage, c'est dans cette région que les dépôts les plus importants ont eu lieu et que les plus fortes activités sont toujours mesurées. Pour le ^{60}Co et le ^{134}Cs , deux radioéléments produits artificiellement dans les réacteurs nucléaires, aucune activité supérieure à la limite de détection n'a été observée. Enfin, c'est pour le ^{40}K , un des trois isotopes constituant le potassium naturel, que l'activité observée est la plus élevée.

Les mesures de radioactivité dans l'herbe sont rapportées dans le Tableau 2. On constate que la radioactivité de l'herbe est dominée par le ^{40}K , suivi du ^7Be , qui est formé par l'interaction du rayonnement cosmique (protons), produit en particulier par le soleil, avec les couches supérieures de l'atmosphère. Les activités en ^{60}Co et ^{134}Cs sont restées inférieures à la limite de détection. L'activité en ^{90}Sr de l'herbe peut varier fortement selon la période de coupe pour un même site de prélèvement, l'incorporation de certains éléments (Ca, K) et radioéléments (^{137}Cs et ^{90}Sr) étant dépendante de la croissance végétale [4]. Toutefois, l'activité de l'herbe est principalement fonction de celle du sol, les valeurs les plus importantes étant observées au Tessin ou en altitude, tandis que pour les échantillons collectés sur le plateau, les activités en ^{90}Sr ne dépassent pas 3 Bq/kg. La même tendance est observée pour le ^{137}Cs , dont les activités les plus élevées sont mesurées au Tessin.

Le programme renforcé de surveillance du voisinage de la centrale de Mühleberg, avec une analyse distincte pour 7 sites de prélèvement, a débuté en 2017. Les mesures de 2017 et 2018 ont montré que pour les sols, les activités en ^{90}Sr , Pu et Am étaient dans la gamme des valeurs observées pour les sols prélevés sur le plateau, les différences observées d'un site à l'autre illustrant la disparité du dépôt consécutif aux essais nucléaires et potentiellement certaines activités agricoles, comme le labourage en profondeur. Les nouvelles mesures effectuées pour les échantillons collectés en 2019 (Tableau 3) confirment ces résultats, avec les activités les plus faibles pour Niederruntingen. L'activité en ^{90}Sr des herbes est du niveau de celle observée pour les autres échantillons collectés sur le plateau suisse (Tableau 2). Un rapport spécifique sur l'ensemble des résultats des mesures réalisés par les différents instituts impliqués dans ce programme renforcé 2017-2019 au voisinage de la centrale de Mühleberg sera publié en 2020.

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 2019
(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	420 ± 32	< 0.7	< 0.6	13.6 ± 1.1	0.44 ± 0.08	0.167 ± 0.016	0.079 ± 0.007
AG (KKB in-situ)	2	346 ± 36			9.9 ± 1.3			
AG (PSI)	1	380 ± 41	< 0.7	< 0.6	9.8 ± 0.6	0.38 ± 0.08	0.135 ± 0.015	0.055 ± 0.005
AG (PSI in-situ)	1	322 ± 33			7.2 ± 0.9			
AG (ZWILAG)	1	409 ± 14	< 0.9	< 0.7	11.1 ± 0.8	0.61 ± 0.09	0.170 ± 0.015 0.172 ± 0.014	0.080 ± 0.009 0.073 ± 0.006
AG (ZWILAG in-situ)	1	349 ± 36			8.4 ± 1.0			
AG (Vois. KKL)	4	395 ± 21	< 0.7	< 0.6	11.0 ± 0.6	0.29 ± 0.07	0.188 ± 0.017	0.074 ± 0.008
AG (KKL in-situ)	4	345 ± 36			8.2 ± 1.0			
AG/SO (Vois. KKG)	4	439 ± 23	< 0.7	< 0.6	11.0 ± 0.6	0.48 ± 0.09	0.235 ± 0.021 0.235 ± 0.015	0.099 ± 0.018 0.109 ± 0.007
AG/SO (KKG in-situ)	4	366 ± 38			8.4 ± 1.0			
BE (Voisinage KKM) ¹⁾	7	645 ± 35	< 0.7	< 0.6	8.0 ± 0.5	0.45 ± 0.15 ⁴⁾	0.148 ± 0.055 ⁵⁾	0.069 ± 0.025 ⁶⁾
BE (KKM in-situ) ¹⁾	7	526 ± 54			5.8 ± 0.8			
BE (Mürren) ²⁾	1	550 ± 47	< 0.3	< 0.3	9.4 ± 1.1	2.3 ± 0.3	0.37 ± 0.01	0.15 ± 0.04
BE (Gimmelwald)	1	311 ± 26	< 0.2	< 0.3	14.6 ± 1.8	3.1 ± 0.5	0.61 ± 0.02	0.22 ± 0.05
BE (Fahrni) ³⁾	1	440 ± 37	< 0.2	< 0.3	10.8 ± 1.3	2.8 ± 0.5	0.43 ± 0.01	0.20 ± 0.05
BE (Diesse/Jura)	1	450 ± 39	< 0.3	< 0.3	13.2 ± 1.6	1.0 ± 0.2	0.45 ± 0.01	0.16 ± 0.04
BL (Sissach)	1	472 ± 15	-	< 0.1	15.0 ± 1.0	3.4 ± 0.7		
FR (Posieux)	1	413 ± 45	< 0.5	< 0.7	5.1 ± 0.8	0.46 ± 0.12	0.180 ± 0.018 0.210 ± 0.013	0.088 ± 0.021 0.087 ± 0.006
FR (Posieux, in-situ)	1	329 ± 34			3.6 ± 0.6			
GE (Vois. CERN)	5	436 ± 46	< 0.6	< 0.5	5.7 ± 0.7	0.13 ± 0.04	0.110 ± 0.009 0.112 ± 0.010	0.049 ± 0.006 0.043 ± 0.008
GE (CERN in-situ)	5	357 ± 39			3.3 ± 0.6			
TG (Arenenberg)	1	429 ± 45	< 0.6	< 0.5	17.6 ± 1.9	0.56 ± 0.09	0.127 ± 0.015 0.122 ± 0.011	0.061 ± 0.008 0.053 ± 0.006
TG (Arenenberg in-situ)	1	384 ± 40			15.8 ± 1.7			
TG (Güttingen)	1	316 ± 34	< 0.7	< 0.6	16.7 ± 1.8	0.56 ± 0.08	0.175 ± 0.019 0.166 ± 0.015	0.087 ± 0.009 0.075 ± 0.008
TG (Güttingen in-situ)	1	294 ± 31			13.5 ± 1.5			
TI (Centovalli)	1	762 ± 26		< 0.3	121.0 ± 4.0	9.4 ± 1.9		
TI (Prato Leventina)	1	504 ± 21		< 0.3	29.0 ± 1.0	5.7 ± 1.2		
TI (Malcantone)	1	365 ± 14		< 0.2	157.0 ± 5.0	6.1 ± 1.2		
TI (Cadenazzo)	1	673 ± 70	< 0.6	< 0.6	81.0 ± 8.2	1.02 ± 0.12	0.127 ± 0.018 0.118 ± 0.010	0.078 ± 0.011 0.052 ± 0.006 0.061 ± 0.008
TI (Cadenazzo – In-situ)	1	573 ± 59			54.5 ± 5.6			
Ti (Caslano)	1	605 ± 63	< 0.7	< 0.6	23.1 ± 2.4	0.33 ± 0.08	0.116 ± 0.017 0.121 ± 0.013 0.122 ± 0.010	0.066 ± 0.008 0.050 ± 0.006 0.059 ± 0.007
Ti (Caslano – in-situ)	1	589 ± 60			27.3 ± 2.9			
TI (Stabio)	1	634 ± 66	< 0.6	< 0.5	94.5 ± 9.5	0.40 ± 0.08 0.40 ± 0.07	0.431 ± 0.033 0.433 ± 0.028	0.200 ± 0.016 0.198 ± 0.012
TI (Stabio – In situ)	1	550 ± 56			61.0 ± 6.2			

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⁾ Préalpes (850 m).

⁴⁾ Valeur moyenne et écart-type pour 7 analyses. ⁵⁾ Valeur moyenne et écart-type pour 15 analyses. ⁶⁾ Valeur moyenne et écart-type pour 14 analyses.

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 2019 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	293 ± 32	683 ± 74	< 1.2	< 1.1	<1.2	0.45 ± 0.05 ⁴⁾ 0.89 ± 0.10 ⁵⁾
AG (PSI)	2	364 ± 39	733 ± 81	< 0.8	< 0.8	<0.8	0.58 ± 0.07 ⁴⁾ 0.75 ± 0.08 ⁵⁾
AG (ZWILAG)	2	326 ± 36	742 ± 83	< 2.3	< 1.7	<0.9	0.72 ± 0.09 ⁴⁾ 1.50 ± 0.15 ⁵⁾
AG (Voisinage KKL)	8	377 ± 40	725 ± 78	< 1.2	< 1.1	1.0 ± 0.5	0.71 ± 0.08 ⁴⁾ 1.52 ± 0.17 ⁵⁾
AG/SO (Voisinage KKG)	8	249 ± 28	813 ± 88	< 1.5	< 1.1	<1.3	0.66 ± 0.07 ⁴⁾ 1.68 ± 0.17 ⁵⁾
BE (Voisinage KKM) ¹⁾	14	278 ± 31	889 ± 96	< 1.5	< 1.1	<1.3	0.47 ± 0.22 ⁴⁾ 1.27 ± 0.63 ⁵⁾
BE (Lauterbrunnen)	1	8 ± 2	450 ± 40	< 0.4	< 0.3	0.5 ± 0.1	1.12 ± 0.13
BE (Mürren) ²⁾	1	420 ± 65	980 ± 83	< 0.4	< 0.3	<0.3	2.46 ± 0.29
BE (Gimmelwald)	1	143 ± 23	720 ± 61	< 0.4	< 0.3	0.4 ± 0.1	2.23 ± 0.26
BE (Fahrni) ³⁾	2	353 ± 50	1'115 ± 95	< 0.4	< 0.3	<0.4	1.64 ± 0.19 ⁴⁾ 0.94 ± 0.11 ⁵⁾
BE (Diesse/Jura)	2	235 ± 35	1'080 ± 96	< 0.4	< 0.3	<0.3	0.39 ± 0.05 ⁴⁾ 2.76 ± 0.32 ⁵⁾
BL (Sissach)	1	220 ± 9	725 ± 27		< 0.2	<0.2	0.64 ± 0.13
GE (Voisinage CERN)	4	101 ± 13	607 ± 68	< 1.4	< 1.1	<1.3	1.36 ± 0.13 ⁵⁾
FR (Posieux)	2	163 ± 19	1'045 ± 113	< 1.6	< 1.2	<1.3	0.59 ± 0.08 ⁴⁾ 1.14 ± 0.13 ⁵⁾
TG (Güttingen)	2	171 ± 21	786 ± 87	< 1.8	< 1.3	<1.4	0.92 ± 0.10 ⁴⁾ 0.65 ± 0.11 ⁵⁾
TI (Centovalli)	1	415 ± 15	720 ± 23		< 0.1	44.0 ± 2.0	1.83 ± 0.37
TI (Prato Leventina)	1	59 ± 2	566 ± 19		< 0.7	0.4 ± 0.1	0.07 ± 0.01
TI (Malcantone)	1	118 ± 6	624 ± 22		< 0.2	1.6 ± 0.3	1.02 ± 0.15
TI (Cadenazzo)	2	222 ± 24	926 ± 99	< 1.0	< 0.8	<0.8	0.24 ± 0.06 ⁴⁾ 5.31 ± 0.41 ⁵⁾ 5.77 ± 0.47 ⁵⁾
Ti (Stabio)	1	41 ± 6	714 ± 77	< 1.0	< 0.9	0.9 ± 0.4	1.36 ± 0.13 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⁾ Préalpes, 850 m; ⁴⁾ coupe de printemps; ⁵⁾ coupe d'automne.

Tableau 3:

Activités en ^{90}Sr , Pu et Am dans des sols (0 - 5 cm, fraction < 2 mm) et en ^{90}Sr dans les herbes, prélevés en 2019 sur sept sites autour de Mühleberg (Bq/kg matière sèche).

Site	$^{239} + ^{240}\text{Pu}$	^{241}Am	^{90}Sr (sol)	^{90}Sr (herbe)	
				printemps	automne
Rewag	0.146 ± 0.017 0.182 ± 0.013	0.084 ± 0.014 0.077 ± 0.007	0.43 ± 0.09	0.21 ± 0.04	0.88 ± 0.11
Salvisberg	0.155 ± 0.015 0.159 ± 0.015 0.163 ± 0.011	0.064 ± 0.010 0.077 ± 0.007	0.34 ± 0.08	0.40 ± 0.06	2.37 ± 0.22
Ufem Horn	0.143 ± 0.015 0.164 ± 0.012	0.067 ± 0.011 0.073 ± 0.006	0.61 ± 0.12	0.69 ± 0.09	1.89 ± 0.17
Niederruntigen	0.053 ± 0.009 0.063 ± 0.008 0.070 ± 0.008	0.042 ± 0.011 0.028 ± 0.003 0.030 ± 0.006	0.18 ± 0.05	0.43 ± 0.07	0.59 ± 0.14
Oberruntigen	0.226 ± 0.022 0.244 ± 0.016	0.097 ± 0.007 0.119 ± 0.011	0.55 ± 0.09	0.75 ± 0.10	1.14 ± 0.12
Fuchsenried	0.116 ± 0.014	0.051 ± 0.006	0.51 ± 0.09	0.61 ± 0.06	1.13 ± 0.15
Clôture KKW	0.158 ± 0.022 0.182 ± 0.013	0.070 ± 0.006 0.093 ± 0.009	0.55 ± 0.11	0.23 ± 0.04	0.87 ± 0.11
Plateau suisse (min-max) ¹⁾	0.053 - 0.244	0.028 - 0.119	0.13 - 0.61	0.45 - 0.92	0.65 - 1.68

¹⁾ Selon les tableaux 1 et 2.

Conclusions

Les mesures de la radioactivité dans les sols et les herbes en Suisse en 2019 présentent des valeurs similaires aux années précédentes. Aucune augmentation d'activité n'a été constatée, ni aux abords des centrales nucléaires, ni dans les sites de référence. Les sites de montagne et certains sites du Tessin présentent des activités en ^{90}Sr et en ^{137}Cs supérieures à celles mesurées sur les sites du plateau, centrales nucléaires incluses. Un marquage assez important en ^{137}Cs dans des échantillons de sol et d'herbe de certains sites de prélèvement du Tessin et de Suisse orientale est encore observé plus de trente ans après l'accident de Tchernobyl.

Le programme de surveillance renforcé de la centrale de Mühleberg a été poursuivi dans le but de déceler un éventuel impact des travaux de démantèlement.

Références

- [1] voir chapitre «Mesures de ^{90}Sr , de ^{210}Po et de ^{226}Ra dans les vertèbres et de ^{90}Sr dans les dents de lait».
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Froidevaux, P. et al., chap. 4.6 de «Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse», 2005, OFSP.
- [5] Estier, S. et al., chap. 3.1 de «Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse», 2017, OFSP.

4.8

Natürliche Radioaktivität im Schweizer Trinkwasser

Heinz Surbeck
Nucfilm GmbH

Abstract

Since 2017 Switzerland has new regulations concerning natural radionuclides in drinking water. They are very close to the ones in force in the EU. Clear limits for relevant natural radionuclides have been replaced by rather vague «parametric values» and an «indicative dose». This has led to a general confusion at the Federal and the Cantonal environmental radioactivity labs about how to enforce the new regulations. What has to be monitored, how often and by what analytical methods? Do we have enough data about the situation in Switzerland? Do we need a large screening or are there criteria for a targeted search? To answer these questions all available data have been pooled (Surbeck 2019). Data left after a critical review have been used for frequency distributions and maps. It has turned out that natural radionuclides are not a general problem in Swiss drinking water. Hot spots are concentrated in some regions and can well be explained by the local geology. Thus there is no need for a «blind» screening. A targeted search, based on the geology is all we need. Concerning the analytical methods, Total-Alpha and Total-Beta measurements are out of date since many decades. They are also unreliable and give wrong results about the ^{228}Ra contribution to the ingested dose. Only nuclide specific analytical methods can be recommended. Other recommendations are that all bottled waters should be considered drinking water, complying with the same limits and that ingestion doses from radon should not be neglected.

Zusammenfassung

Radioaktivität im Trinkwasser untersteht in der Schweiz seit 2017 neuen gesetzlichen Regelungen. Von den bisherigen Grenzwerten für natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Inhalts- und Fremdstoff-Verordnung wurde der (chemische) Höchstwert für das Uran ($30 \mu\text{g/l}$) übernommen und je ein Richtwert für das Radon (100Bq/l) und die Ingestionsdosis ($100 \mu\text{Sv/Jahr}$) eingeführt (Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen, TBDV).

Für die Planung des Vollzugs wäre es nützlich, die aktuelle Situation bezüglich dieser Höchst- und Richtwerte zu kennen. Es gibt in der Schweiz zwar ziemlich viele Messungen der natürlichen Radionuklide in Trinkwässern, aber die Daten befinden sich verstreut bei verschiedenen Aemter, Laboratorien des Bundes, der Kantone und bei privaten Laboratorien. Eine Zusammenfassung und eine gesamtschweizerische Beurteilung haben bisher gefehlt.

Das BAG hat deshalb einen Bericht dazu in Auftrag gegeben (Surbeck 2019) .

Für den Bericht wurden die vorhandenen Daten zur natürlichen Radioaktivität im Trinkwasser der Schweiz gesichtet, beurteilt und der Zusammenhang mit geologischen regionalen Faktoren aufgezeigt. Aufgrund der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Vorschlag gemacht, ob und wenn ja welche Regionen ausgeschieden werden können, in denen die Parameterwerte für natürliche Radioaktivität mit grosser Wahrscheinlichkeit eingehalten sind. Ebenso wurden jene Gebiete bezeichnet, in denen zusätzliche Messungen sinnvoll sind.

Der vorliegende Beitrag ist eine Kurzfassung dieses Berichtes.

Deutlich erhöhte Werte für natürliche Radionuklide im Trinkwasser sind in der Schweiz selten. Es besteht kein dringender Handlungsbedarf, aber in einigen Gebieten wäre es sinnvoll aufgrund geologischer Kriterien gezielt zusätzliche Messungen, insbesondere nuklidspezifische Analysen durchzuführen.

Die schweizweit 3% der Proben, die über dem Richtwert für das ^{222}Rn und die 0.4% die über dem Höchstwert für das Uran liegen sind nicht gleichmässig über die ganze Schweiz verteilt. Überschreitungen und deutlich erhöhte Werte wurden vorwiegend im Wallis, in der Surselva, den Bündner Südtälern, dem Tessin und in einem SW-NO verlaufenden Streifen im westlichen Mittelland gefunden. Auffällig ist auch eine Häufung erhöhter Radonwerte in einem Gebiet zwischen Aarau, Brugg und Laufenburg.

Beim ^{226}Ra und dem ^{228}Ra sind es ebenfalls vorwiegend diese Gebiete, in denen erhöhte Werte gefunden wurden. Auffällig sind auch erhöhte ^{226}Ra -Werte in den Kantonen JU, BS und BL. Für eine klare Aussage für den Rest der Schweiz gibt es aber zu wenige Messungen der beiden Nuklide. Beim ^{228}Ra fehlen insbesondere Messungen mit einer genügend tiefen Nachweisgrenze.

Die erhöhten Werte für die natürlichen Radionuklide in den erwähnten Gebieten lassen sich mit der lokalen Geologie weitgehend erklären. Es gibt auch eine deutliche Korrelation mit der terrestrischen Dosisleistung.

Es gibt keine Hinweise darauf, dass Altlasten aus der Uhrenindustrie für erhöhte ^{226}Ra Konzentrationen oder uranhaltige Phosphatdünger für erhöhte Urankonzentrationen im Trinkwasser verantwortlich sein könnten.

Es konnten nur sehr wenige Zeitreihen gefunden werden, die aber zeigen, dass die zeitlichen Variationen beträchtlich sind, bis zu einem Faktor 10. Hot-spots sollten daher über mindestens ein Jahr regelmässig beprobt werden, bevor irgendwelche Massnahmen ergriffen werden. Die Zeitreihen zeigen auch, dass die Proben direkt an den Quelfassungen genommen werden sollten. Bei Proben aus dem Trinkwassernetz ist häufig nicht klar woher das Wasser stammt.

Beim ^{210}Pb und ^{210}Po gibt es kaum Daten mit einer genügend tiefen Nachweisgrenze. Sporadisch und nicht reproduzierbar wurden Werte bis 20 mBq/l gemessen.

Schweizweit wird bei etwa 0.5% der Proben die Richtdosis von 100 $\mu\text{Sv}/\text{Jahr}$ überschritten. Überschreitungen und deutlich erhöhte Werte beschränken sich auf die erwähnten Gebiete.

Bei den Proben, bei denen mehrere der Radionuklide gemessen wurden sind kaum Korrelationen zu erkennen, bestenfalls eine leicht positive Korrelation zwischen ^{222}Rn und Uran. Die aufgrund der Geochemie der natürlichen Radionuklide auch zu erwartende bestenfalls schwache Korrelation bedeutet, dass es nicht möglich ist, aus der Messung des ^{222}Rn oder des Urans auf die Aktivitätskonzentrationen von ^{226}Ra und ^{228}Ra zu schliessen.

Es gibt aber eine deutliche räumliche Korrelation. Gebiete mit hohen ^{222}Rn Konzentrationen weisen generell auch erhöhte Uran- und ^{226}Ra -Konzentrationen auf. Das bedeutet, dass es sinnvoll ist Quellen innerhalb eines Radius von etwa 10 km um einen hot-spot genauer anzusehen. Hot-spot heisst hier $\geq 20 \text{ Bq/l}$ für das ^{222}Rn , oder $\geq 10 \mu\text{g/l}$ für das Uran, oder $\geq 20 \text{ mBq/l}$ für das ^{226}Ra oder $\geq 10 \text{ mBq/l}$ für das ^{228}Ra . Das entspricht etwa dem 90%-Wert der Häufigkeitsverteilung.

Auch wenn die Datenlage für einige Gebiete der Schweiz (Kantone Bern, Zürich und Thurgau) unbefriedigend ist, machen flächendeckende zusätzliche Messungen wenig Sinn. Sowohl die Gebiete mit klarem Risiko für erhöhte Werte als auch die Gebiete mit schlechter Datenlage, aber potentielltem Risiko sind bekannt. Für diese Gebiete wird empfohlen, aufgrund geologischer Kriterien gezielt nach weiteren Hot-spots zu suchen und die bekannten mit jährlichen Probenahmen weiter zu verfolgen.

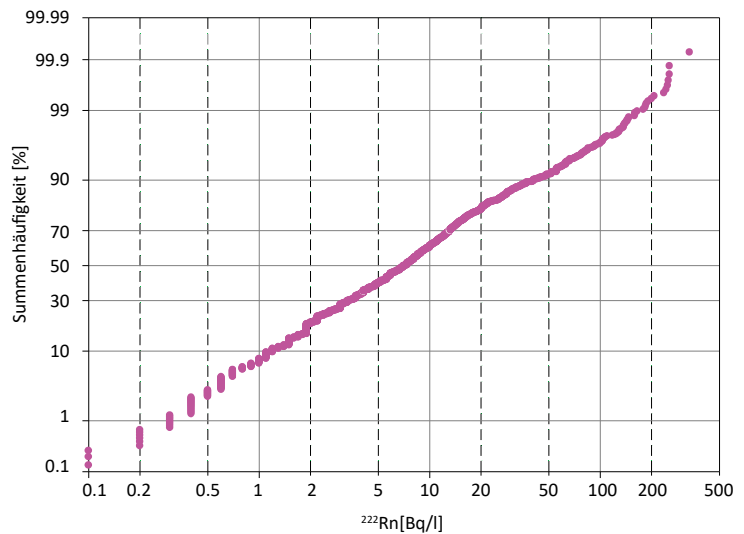
Seit 2016 gelten für in Verkehr gebrachte Quellwässer die gleichen Anforderungen wie für Trinkwässer. Gemäss BLV gilt das aber nicht für «natürliche Mineralwässer». Mineralwässer wurden trotzdem mit in den Bericht aufgenommen, da sie ja auch Quellwässer sind. Es wird empfohlen, die entsprechende Verordnung so zu ändern, dass alle Getränke die Anforderungen für Trinkwässer erfüllen müssen. Das würde auch den Vollzug wesentlich erleichtern.

Gemäss geltendem Recht wird bei der Bestimmung der Ingestionsdosis das ^{222}Rn nicht berücksichtigt. Es wird empfohlen das zu ändern, da die Jahresdosen insbesondere für Kinder nicht vernachlässigbar sind. Es wird auch empfohlen, dass das Kantonale Laboratorium Basel-Stadt (KL-BS) als Kompetenzzentrum der Kantone weiterhin nuklidspezifische Analysen der natürlichen Radionuklide im Wasser durchführt. Die Sektion Überwachung der Radiaktivität (URA) des BAG sollte ergänzend zu den Routinemessungen des KL-BS gezielte Messkampagnen durchführen und neue Messmethoden entwickeln, insbesondere für die schwierig zu messenden Nuklide ^{228}Ra , ^{210}Pb und ^{210}Po . Sowohl das KL-BS als auch das URA verfügen über Fachkräfte mit einer Ausbildung in Geologie, die die Kantone bei der gezielten Probenahme unterstützen können.

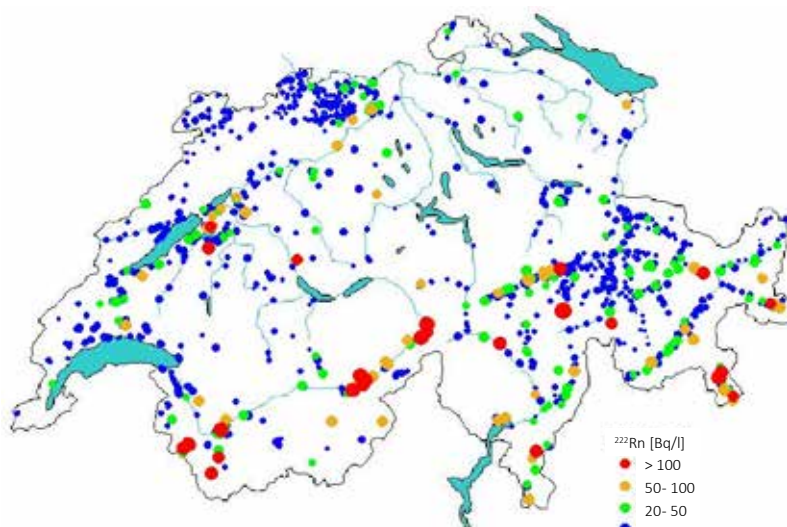
Resultate

Nach der kritischen Durchsicht von rund einem Dutzend Datenbanken lagen noch knapp 6'000 glaubwürdige Messwerte für Trinkwässer vor, bei denen auch die Koordinaten des Probenahmeortes ausfindig gemacht werden konnten. Für die Häufigkeitsverteilungen und für die Karten wurden nur Wässer berücksichtigt, die entweder früher als Trinkwasser genutzt wurden, aktuell genutzt werden oder genutzt werden könnten. Die als Mineralwasser in Verkehr gebrachten Quellwässer werden im ausführlichen Bericht in einem separaten Kapitel behandelt.

Die Figuren 1 und 2 zeigen am Beispiel des ^{222}Rn wie die Daten aufgearbeitet wurden. Für Figur 3 wurden alle 5'910 Messwerte verwendet und die relative Konzentration folgendermassen berechnet: $^{222}\text{Rn}[\text{Bq/l}]/20$, $\text{U}[\mu\text{g/l}]/10$, $^{226}\text{Ra}[\text{mBq/l}]/20$ und $^{228}\text{Ra}[\text{mBq/l}]/10$. Das entspricht etwa einer Normierung mit dem 90%-Wert der Häufigkeitsverteilung. Bei relativen Konzentrationen von 2 bis 5 ist mit einzelnen Überschreitungen der Höchst- oder Richtwerte zu rechnen. Bei Werten über 5 sind Überschreitungen sehr wahrscheinlich.



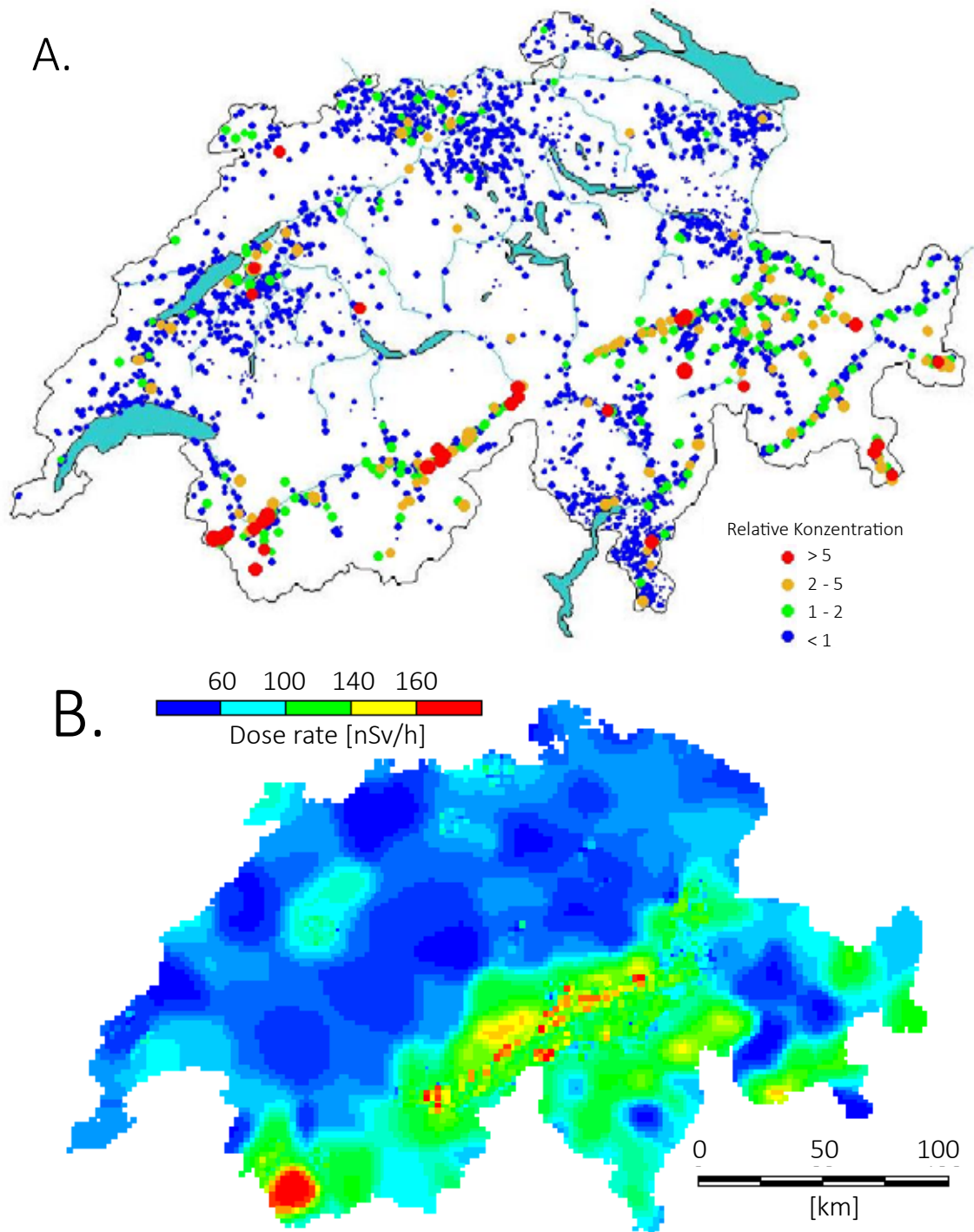
Figur 1:
Häufigkeitsverteilung der Radonkonzentrationen in Schweizer Trinkwässern.
 $n = 1'454$



Figur 2:
Räumliche Verteilung der Radonkonzentrationen in Schweizer Trinkwässern. $n = 1'454$

Bei den Proben, bei denen mehrere der Radionuklide gemessen wurden sind kaum Korrelationen zu erkennen, bestenfalls eine leicht positive Korrelation zwischen ^{222}Rn und Uran. Die aufgrund der Geochemie der natürlichen Radionuklide auch zu erwartende bestenfalls schwache Korrelation bedeutet, dass es nicht möglich ist, aus der Messung des ^{222}Rn oder des Urans auf die Aktivitätskonzentrationen von ^{226}Ra , ^{228}Ra zu schliessen.

Es gibt aber eine deutliche räumliche Korrelation. Gebiete mit hohen ^{222}Rn Konzentra-



Figur 3 :

A) relative Konzentrationen für ^{222}Rn , U, ^{226}Ra und ^{228}Ra , $n = 5'910$.

B) Karte der terrestrischen Dosisleistung (Rybach et al. 1995, Referenz siehe Surbeck 2019), hinterlegt mit einer Gewässerkarte.

tionen weisen generell auch erhöhte Uran- und ^{226}Ra -Konzentrationen auf. Das bedeutet, dass es sinnvoll ist, Quellen innerhalb eines Radius von etwa 10 km um einen Hot-spot genauer anzusehen. Hot-spot heisst hier $\geq 20\text{Bq/l}$ für das ^{222}Rn , oder $\geq 10\ \mu\text{g/l}$ für das Uran, oder $\geq 20\ \text{mBq/l}$ für das ^{226}Ra oder $\geq 10\ \text{mBq/l}$ für das ^{228}Ra . Das entspricht etwa dem 90%-Wert der Häufigkeitsverteilung.

Die 3% der Proben, die über dem Richtwert für das ^{222}Rn und die 0.4% die über dem Höchstwert für das Uran liegen sind nicht gleichmässig über die ganze Schweiz verteilt. Überschreitungen und deutlich erhöhte Werte sind vorwiegend im Wallis, in der Surselva, den Bündner Südtälern, dem Tessin und in einem SW-NO

verlaufenden Streifen im westlichen Mittelland zu finden. Auffällig ist auch eine Häufung erhöhter Radonwerte in einem Gebiet zwischen Aarau, Brugg und Laufenburg.

Beim ^{226}Ra und dem ^{228}Ra sind es ebenfalls vorwiegend diese Gebiete, in denen erhöhte Werte gefunden wurden. Auffällig sind erhöhte ^{226}Ra -Werte in den Kantonen JU, BS und BL. Für eine klare Aussage für den Rest der Schweiz gibt es aber viel zu wenige Messungen der beiden Nuklide, beim ^{228}Ra fehlen insbesondere Messungen mit einer genügend tiefen Nachweisgrenze.

Wenn alle verfügbaren Daten über die Konzentrationen natürlicher Radionuklide im Grundwasser der Schweiz, nicht nur Daten für Trinkwasser genutzt werden ergibt sich ein ziemlich klares Bild der Herkunft erhöhter Konzentrationen natürlicher Radionuklide.

Die mit Abstand höchsten Konzentrationen sind in Gebieten zu finden, in denen die Wässer mit Sedimenten des Permokarbons, insbesondere dem Verrucano oder den stark metamorphen Randzonen der kristallinen Massive in Kontakt waren. Aufgrund der zahlreichen kleineren Uranvererzungen und uranhaltigen Kohlen, die in diesen Gebieten gefunden wurden ist das auch nicht weiter erstaunlich. Das betrifft das Wallis, die Surselva, die Bündner Südtäler und das Tessin.

Die meist sauerstoffarmen Wässer aus dem Dogger können deutlich erhöhte ^{226}Ra Konzentrationen aufweisen. Der als Stauer wirkende Dogger enthält fossiles organisches Material in dem Uran angelagert sein kann. Die anoxischen Verhältnisse begünstigen eine Mobilisierung des Tochterproduktes Radium. Das könnte der Grund für die erhöhten Werte in den Kantonen JU, BS und BL sein.

Es gibt keine Hinweise darauf, dass Altlasten aus der Uhrenindustrie für erhöhte ^{226}Ra Konzentrationen oder uranhaltige Phosphatdünger für erhöhte Urankonzentrationen im Trinkwasser verantwortlich sein könnten.

Wässer aus der Übergangszone zwischen der Unteren Süsswassermolasse (USM) und der Oberen Meeresmolasse (OMM) zeigen häufig erhöhte Uran- und Radonkonzentrationen. Uranhaltige Fossilien und Kohlen belegen eine deutliche Urananreicherung in dieser Übergangszone. Das ist in einem SW-NO verlaufenden Streifen im westlichen Mittelland zu finden.

Die Gebiete mit deutlich erhöhten ^{222}Rn -, U- oder ^{226}Ra -Werten zeigen meist auch deutlich erhöhte Werte bei der terrestrischen Dosisleistung (Fig. 3).

Seit einigen Jahren ist auch bekannt, dass erhöhte Uran-Konzentrationen in Wässern aus drainierten Moor-gebieten im Mittelland zu finden sind. Hier hat seit der letzten Eiszeit eine Anreicherung des Urans an absterbendem organischem Material statt gefunden. Durch die Drainagen im 19. und 20. Jahrhundert wurde Sauerstoff zugeführt und damit das Uran remobilisiert. Dazu gibt es aber erst für zwei Standorte Untersuchungen, beim Oberlauf des Lyssbaches bei Münchenbuchsee und im Gebiet zwischen dem Mt.Vully und dem Broyekanal.

Interessant sind auch die leicht erhöhten Uranwerte bei als Trinkwasser aufbereitetem Wasser aus dem Genfersee. Der Grund dafür ist, dass die Rhone erhebliche Mengen Uran, vor allem aus dem Unterwallis in den Genfersee transportiert.

Referenz

■ Surbeck, H., 2019, Natürliche Radioaktivität im Schweizer Trinkwasser, Bundesamt für Gesundheit, Bern
Link via BAG homepage : www.bag.admin.ch/ura-jb--> weitere Berichte: Natürliche Radioaktivität im Schweizer Trinkwasser

Chapitre / Kapitel 5

Radioactivité dans l'alimentation Radioaktivität in Lebensmitteln

2019

- 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

M. Zehringer, 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, F. Bochud

Institut de Radiophysique, Lausanne

G. Ferreri, A. Gurtner

Sektion Umweltradioaktivität, URA/BAG, Bern

Zusammenfassung

Insgesamt wurden 2018 rund 270 Lebensmittelproben aus der Schweiz (ohne Spezialkampagnen für Wildschweine) sowie 89 importierte Lebensmittel auf Radioaktivität untersucht. Die Analysen fanden im Rahmen des BAG Probenahmeplans, von kantonalen Messkampagnen und von Spezialprogrammen statt. In den Hauptnahrungsmitteln waren wie erwartet Spuren von ^{137}Cs , ^{90}Sr und Tritium als anthropogene Radionuklide nachweisbar. Bei rund 5% der untersuchten Wildschweine lag der ^{137}Cs -Gehalt über dem Grenzwert. Bei drei einheimischen Pilzen war der Grenzwert für ^{137}Cs überschritten. Bei allen anderen Proben – Lebensmittelproben aus der Schweiz sowie importierte Lebensmittel – waren die festgestellten Konzentrationen von künstlichen Radionukliden sehr tief.

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

Messprogramm

Die Radioaktivität von Lebensmitteln wird von den Bundesstellen und den kantonalen Laboratorien gemeinsam überwacht. Die am häufigsten angewandten Untersuchungsmethoden sind Gammaskpektrometrie sowie ^{90}Sr - und Tritium-Analytik. Der Probenahmeplan des BAG umfasst Messungen an den Hauptnahrungsmitteln Milch, Getreide und Gemüse. Die untersuchten Proben stammen sowohl aus der Umgebung von Kernanlagen und Tritium-verarbeitender Industrie als auch aus davon entfernten Standorten. Darüber hinaus messen einige Kantone weitere Lebensmittel wie einheimische oder importierte Wildpilze, Früchte, Gewürze etc. Seit dem Reaktorunfall in Fukushima 2011 besteht für Lebensmittelimporte aus Japan ein spezielles Überwachungsprogramm mit Messungen von Stichproben. Informationen zu den Messungen der KL finden sich auch in deren Tätigkeitsberichten (siehe www.kantonschemiker.ch).

Höchstwerte für Lebensmittel

Die wichtigsten Höchstwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für Radioaktivität in Lebensmittel gelten in der Schweiz die Tschernobyl-Verordnung, die Verordnung über Trinkwasser, Bäder und Duschanlagen (TBDV), 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).

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)	(-) ^a	(125)	(125)	(750)	(7'500)
	TBDV AK	-	4.9	-	-	-	-
Summe der Iod-Isotope insbesondere ¹³¹ I	VHK HG	(150)	(-) ^a	(500)	(500)	(2'000)	(20'000)
	TBDV AK	-	6.2	-	-	-	-
Summe Plutonium- und Transplutoniumisotope	VHK HG	(1)	(-) ^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)	(-) ^a	(1'000)	(1'000)	(1'250)	(12'500)
	Japan HG	50	10	50	10 ^b	100	100
	TBDV AK	-	11	-	-	-	-
³ H, ²²² Rn	TBDV PW	-	100	-	-	-	-
Gesamtdosis ^c	TBDV PW	-	0.1 mSv/a ^c	-	-	-	-
Uran (²³⁸ U)	TBDV HW	-	0.37	-	-	-	-

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

TBDV: Trink-, Bade- und Duschwasserverordnung mit Parameterwerten (PW) und daraus abgeleitete Konzentrationen (AK). Eine Überschreitung erfordert weitere Abklärungen. Der Höchstwert (HW) für Uran basiert auf der chemischen Toxizität.

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

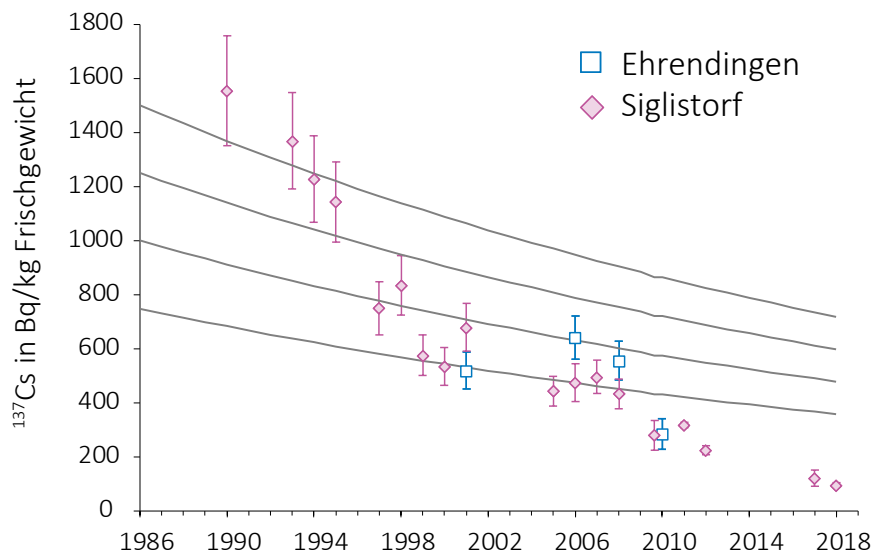
HW: Höchstwerte.

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 2.10.2018 gelten Höchstgehalte der VHK nicht für Trinkwasser. Da die Werte für Trinkwasser aus der TBDV aber nicht den Status eines Höchstgehaltes haben, ist diese neue Regelung problematisch und wird überarbeitet.

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

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



Figur 1:
 ^{137}Cs in Zigeunerpilzen aus Siglistorf und Ehrendingen (AG). Dargestellt sind die Aktivitäten zur Zeit der Probenahme. Die gestrichelten Linien zeigen die erwartete Abnahme aufgrund des radioaktiven Zerfalls. Bis und mit 2012 sind Messwerte von Zigeuner-Pilzen gezeigt, für 2017 und 2018 jeweils ein Maronenröhrling. Der Standort ist im Berichtsjahr einer Rodung zum Opfer gefallen.

Ergebnisse der Überwachung der Lebensmittel aus der Schweiz

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

2019 wurden 120 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 einem Bündner Südtal festgestellt (9.1 Bq/l). Spuren von einem bis wenigen Bq/l ^{137}Cs konnten in einigen weiteren Proben aus den Bündner Südtälern und dem Tessin nachgewiesen werden. Diese minim 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 2019 in keiner Milchprobe nachgewiesen werden (Nachweisgrenze: meist <2 Bq/l). Das KL BS, das IRA Lausanne und das LABOR SPIEZ untersuchten insgesamt 66 Milchproben auf ^{90}Sr . Alle gemessenen Werte lagen unter 1 Bq/l (ehemaliger Toleranzwert der FIV) mit einem Maximum von 0.69 Bq/l und einem Median von 0.04 Bq/l. Am meisten ^{90}Sr wurde in Milch von auf einer Alp im Berner Oberland gefütterten Kühen gemessen. Da die Ablagerung von ^{90}Sr während den 60er Jahren in Höhenlagen stärker war, lässt sich dieses Resultat erklären.

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

In 19 Getreideproben und 28 Gemüse- und Obstproben aus der Schweiz konnten keine Spuren ^{137}Cs nachgewiesen werden (Nachweisgrenzen typischerweise 0.4 Bq/kg). Die Hälfte der Proben stammte aus der Umgebung der Kernkraftwerke, die andere Hälfte aus entfernten, von den Kernkraftwerken nicht beeinflussten Gebieten. Ein Unterschied zwischen diesen beiden Probengruppen konnte nicht festgestellt werden. Konzentrationen von <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=16), sowohl aus der Umgebung von Kernkraftwerken als auch aus entfernten Gebieten, variierten zwischen 0.05 und 0.24 Bq/kg mit einem Medianwert von 0.14 Bq/kg. Diese tiefen Werte sind noch Spuren der Kontamination mit ^{90}Sr aus den Atombombentests in den frühen 60er-Jahren und auch sie liegen klar unter dem Toleranzwert der ehemaligen FIV von 1 Bq/kg. Sechs Gemüse- und Obstproben aus der Umgebung des KKL zeigten ^{90}Sr -Gehalte zwischen 0.01 und 0.07 Bq/kg Frischgewicht. In 8 Vergleichsproben vom Markt in Lausanne lagen die ^{90}Sr -Gehalte mit Werten von 0.01 bis 0.24 Bq/kg Frischgewicht im gleichen Bereich wie jene aus der Umgebung des KKL.

¹³⁷Cs in Wildpilzen

Im Berichtsjahr wurden vom KL GR 74 Pilzproben aus den Kantonen Graubünden (70) und Glarus (4) gamma-spektrometrisch untersucht. Bei drei Proben war der Grenzwert der Tschernobyl-Verordnung von 600 Bq/kg Frischgewicht mässig überschritten (670 bis 980 Bq/kg); bei einer Probe aus einem Bündner Südtal deutlich überschritten (Schleierlinge (*Cortinarius*) mit 3'300 Bq/kg Frischgewicht). Insgesamt liegt die Belastung der gemessenen Wildpilze mit einem Medianwert von 8 Bq/kg Frischgewicht und einem Mittelwert 124 Bq/kg deutlich unter dem Grenzwert. Die Zeitreihe mit Pilzen aus Siglistorf, welche sehr schön den Rückgang der ¹³⁷Cs Belastung an diesem Standort aufzeigte, konnte leider nicht fortgesetzt werden: Der Wald am Standort wurde gerodet! Hier- pro memoria- noch einmal die Abbildung mit dem Stand von letztem Jahr (Figur 1). Die Tatsache, dass der ¹³⁷Cs Gehalt in den Pilzen stärker abnimmt, als vom radioaktiven Zerfall her erwartet (siehe gestrichelte Linien), erklärt sich durch eine Auswaschung eines Teils des Cäsiums in tiefere Bodenschichten.

Tritium (³H) in Obst und Milch

Die in der Umgebung der Firma mb-microtec in Niederwangen gemessenen erhöhten Tritiumwerte im Niederschlag (siehe Kapitel 4.1) werden durch die genehmigten Abgaben an die Umwelt verursacht. 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 im August 2019 ergaben Tritiumkonzentrationen (³H) von 28 - 371 Bq/l im Destillat (12 Proben; Mittelwert: 127 Bq/l). Die ebenfalls leicht erhöhte ³H-Aktivität der Milch aus der Umgebung des genannten Betriebes (12 - 26 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 zwei Werte >5 Bq/l Tritium nachgewiesen werden (5.4 und 9.9 Bq/l). Die in den Obst- und Milchproben festgestellten Tritiumkonzentrationen liegen unterhalb des ehemaligen FIV-Toleranzwerts für Tritium von 1'000 Bq/l.

¹³⁷Cs in Wildschweinen

Der Kanton Tessin hat in Zusammenarbeit mit dem BAG 2019 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 33 von 643 untersuchten Tieren (5%) der Fall. Mit einer einzigen Ausnahme lagen alle Werte über dem Grenzwert aus der Tschernobylverordnung von 600 Bq/kg für ¹³⁷Cs in Wildtieren. Die Ergebnisse im Bereich von 604 bis maximal 4'316 Bq/kg zeigen, dass bei der Triagemessungen auch Werte nur knapp über dem Grenzwert erfasst werden und dass die Rate der «falschen Positiven» klein ist.

Andere Lebensmittel aus der Schweiz

In den 5 jährlich untersuchten Fischproben aus Aare und Rhein wurde beim einem Fisch aus dem Rhein Spuren von ¹³⁷Cs festgestellt (1 Bq/kg), nicht aber bei den anderen (<1 Bq/kg). In diesen Proben werden auch die Aktinide Plutonium, Americium und Curium gemessen. Ein anderer Fisch aus dem Rhein enthielt messbares ^{239/240}Pu (0.5 mBq/kg) und bei einem Fisch aus der Aare konnte ²⁴¹Am nachgewiesen werden (1.5 mBq/kg). Diese Werte bedeuten kleinste Spuren, 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.

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 94 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 KL BS untersuchte im Berichtsjahr 30 Proben aus Japan (Tee, Getreideprodukte, Würzen, Saucen, Suppen und andere) auf Gammastrahler. Dabei konnten nur in einigen getrockneten Tees noch ¹³⁷Cs Spuren um 1 Bq/kg oder weniger nachgewiesen werden. Neunundzwanzig von den KL ZH und TI gemessene, aus Europa und China stammende Proben importierter Pilze enthielten im Durchschnitt 8 Bq ¹³⁷Cs pro kg Frischmasse. Vier Proben zeigten etwas höhere Werte (26 - 59 Bq/kg ¹³⁷Cs). Die KL ZH und BS haben 30 Proben importierter Beeren und Beerenkonfitüren analysiert: Drei Probe enthielten messbares ¹³⁷Cs (17 - 34 Bq/kg), bei allen anderen war der ¹³⁷Cs-Gehalt kleiner als die Nachweisgrenze von 2 Bq/kg. Alle Werte für Pilze und Beeren liegen klar unterhalb der Höchstgrenze von 600 Bq/kg ¹³⁷Cs aus der Tschernobyl-Verordnung.

Bewertung und Interpretation

Der Grenzwert für ^{137}Cs der Tschernobyl-Verordnung (600 Bq/kg) wurde 2019 von 3 Pilzproben (Maximum 3'300 Bq/kg) und 33 Wildschweinproben (Maximum 4'316 Bq/kg) aus der Schweiz überschritten. Bezogen auf die Gesamtzahl untersuchter Proben machen die Grenzwertüberschreitungen 4% (Pilze) beziehungsweise 5% (Wildschweine) 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. Der ^{137}Cs -Mittelwert aller untersuchten Pilzproben beträgt 124 Bq/kg. Bei allen anderen Lebensmitteln aus der Schweiz und bei importierten Lebensmitteln sind die Konzentrationen von künstlichen Radionukliden sehr tief. Dies zeigt beispielsweise der Vergleich mit den Toleranzwerten der ausser Kraft gesetzten Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV), die alle gut eingehalten sind. 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 wie Wildpilzen oder gewissen Meeresfrüchten zu einer zusätzlichen Dosis in der Grössenordnung von 0.1 mSv/a führen.

Chapitre / Kapitel 6

Radioactivité dans le corps humain Radioaktivität im Menschen

2019

- Mesures du corps entier
- Vertèbres et dents de lait
- Ergebnisse der Ganzkörpermessungen
- Wirbelknochen und Milchzähne

6.1

Ergebnisse der Ganzkörpermessungen

E. G. Yukihiro

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit, Paul Scherrer Institut, Villigen-PSI

S. Estier

Sektion Umweltradioaktivität, URA / BAG, Bern

Zusammenfassung

Das PSI ermittelte in diesem Jahr 10 ^{137}Cs -Messwerte über der Nachweisgrenze von ca. 60 Bq, die aber zu keinen radiologisch relevanten Folgedosen führten. Die ^{137}Cs -Aktivitäten für die anderen 467 am PSI durchgeführten Messungen lagen unterhalb der Nachweisgrenze.

Ziel der Messungen

Am PSI werden Ganzkörpermessungen zur Überwachung der beruflich strahlenexponierten Personen dieses Institutes eingesetzt. Bei Ereignissen mit Verdacht auf Inkorporation radioaktiver Stoffe können auch Personen der Bevölkerung gemessen werden. Seit 40 Jahren wurden in Genf Gymnasiastinnen und Gymnasiasten gemessen, mit dem Ziel die Radioaktivität bis zum letzten Glied der Nahrungskette überwachen zu können und Angaben zur Verteilung natürlicher und künstlicher Radionuklide in der Bevölkerung zu erhalten. Leider musste dieses jährliche Messprogramm 2013 beendet werden, da es immer schwieriger wurde die Schüler für diesen freiwilligen Beitrag zu gewinnen. Ab 2014 wurde deshalb Messungen an Studentinnen und Studenten der höheren Fachschule für Gesundheit in Genf aufgenommen, welche aber nicht mehr jährlich, sondern alle 2 bis 3 Jahre durchgeführt werden.

Messmethode

Für die Ganzkörpermessungen wird am PSI ein Reinstgermanium-Detektor in einer speziell abgeschirmten Messkammer (mit Blei- und Eisenabschirmung) eingesetzt. Die Messung einer Person dauert in der Regel etwa 7 Minuten für die routinemässigen Überwachungsmessungen am PSI. Die Kalibrierung erfolgt mittels eines personenähnlichen Phantoms bekannter Aktivität. 2019 musste der Reinstgermanium-Detektor repariert werden und, weshalb ein Teil der Überwachung mit einem NaI:TI Triagemessplatz durchgeführt wurde.

Ergebnisse und Interpretation der ^{137}Cs -Messungen

Im Rahmen der Inkorporationsüberwachung am PSI in Villigen werden bei ausgewählten beruflich strahlenexponierten Personen in der Regel jährlich zweimal eine Ganzkörpermessung durchgeführt.

2019 wurden 296 Personen zu total 477 Ganzkörpermessungen aufgeboten. Bei 10 Personen wurden ^{137}Cs -Messwerte über der Nachweisgrenze von ca. 60 Bq festgestellt, die aber zu keinen radiologisch relevanten Folgedosen führten. Vergleichbare Messwerte lassen sich bei den betroffenen Personen über die letzten Jahre nachverfolgen. Die maximale ^{137}Cs -Ganzkörperaktivität betrug ca. 199 Bq, die gemäss der Standardinterpretation in der Verordnung über die Personendosimetrie eine vernachlässigbare, effektive Folgedosis von <6 Mikrosievert ergibt. Dieser Wert ist dreissig mal kleiner als die typische, natürliche Folgedosis durch ^{40}K im Körper (siehe unten).

^{40}K Kalium-Gehalt des Körpers

Da ^{40}K ein Gamma-Strahler ist, kann es bei der Ganzkörpermessung ohne zusätzlichen Aufwand mitgemessen werden.

Das in der Natur vorkommende Kalium besteht zu 11.67% aus dem radioaktiven Isotop ^{40}K . Kalium befindet sich vor allem im Muskelgewebe und damit ist der Kalium-Gehalt proportional zur Muskelmasse. Da bei Männern der Anteil Muskelgewebe am Gesamtkörpergewicht grösser ist als bei Frauen, haben die Männer einen höheren Kalium-Gehalt als Frauen. Der durchschnittliche ^{40}K -Gehalt beträgt (gemäss älteren Publikationen) bei 20 - 30-jährigen Männern ca. 4'500 Bq und bei gleichaltrigen Frauen ca. 3'000 Bq und nimmt danach bis zum Alter von 70 Jahre um etwa 10 bis 20 Prozent ab.

Aus den langjährigen Ganzkörpermessungen an Gymnasiasten (16 - 21-jährige) und Studenten 21 - 28-jährige aus Genf (von 1974 bis 2015: 720 Messwerte an jungen Frauen und 722 Messwerte an jungen Männern) kann die Häufigkeitsverteilung des Kalium-Gehaltes bestimmt werden. Im Durchschnitt ergibt sich bei den untersuchten Gymnasiasten/Studenten bei den jungen Frauen ein Mittel von 1.83 g Kalium (20- 80%-Perzentile: 1.64 - 2.04 gK) pro kg Körpergewicht (entsprechend 3'300 Bq) und bei den jungen Männer 2.29 g K (20 - 80%-Perzentile: 2.10 - 2.50 gK) pro kg Körpergewicht (entsprechend 4'900 Bq). Man stellt eine Erhöhung der durchschnittlichen ^{40}K -Aktivität im Körper von ca. 10% über den letzten zehn Jahren fest. Diese ist direkt auf die Zunahme des durchschnittlichen Körpergewichts der Gymnasiasten zurückzuführen.

Die tägliche Kaliumzufuhr beträgt etwa 3.3 g d.h. rund 100 Bq ^{40}K . Die durchschnittliche Jahresdosis durch das natürliche ^{40}K beträgt bei den untersuchten Gymnasiasten und Studenten etwa 0.19 mSv (0.17 bei den Frauen und 0.21 bei den Männern). Gemittelt über alle Altersgruppen liegt der Wert infolge Abnahme des K-Gehaltes mit dem Alter etwas tiefer, gemäss UNSCEAR: 0.17 mSv/Jahr. Da bei diesen Messreihen auch Grösse und Gewicht der untersuchten Personen erfasst wurden, konnte aus den Daten abgeleitet werden, dass der Kalium-Gehalt mit zunehmendem Body-Mass-Index (BMI = Gewicht/Grösse² [kg/m²]) leicht abnimmt. Das hängt damit zusammen, dass der BMI proportional zum Anteil Fettgewebe ist und damit umgekehrt proportional zur Muskelmasse und somit zum Kalium-Gehalt.

6.2

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, F. Bochud
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. 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 12 et 75 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 1.5 et 2.4 mBq/g Ca et ne diffèrent pas significativement 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]. ^{210}Pb va être incorporé dans l'organisme humain par inhalation des produits de filiation du gaz ^{222}Rn présents dans l'air (aérosols). Une contribution supplémentaire provient également de l'inhalation de fumées de tabac. Une proportion importante de ^{210}Pb est également incorporée par ingestion de nourriture, spécialement les fruits de mer. La mesure de ^{226}Ra dans les os humains est réalisée dans le but de déterminer une valeur de référence pour la population suisse. Ce travail est effectué notamment en regard des contaminations potentielles liées aux héritages radiologiques de l'industrie horlogère. Comme le ^{90}Sr , le ^{226}Ra , qui est un 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.

Dans ce rapport, nous allons discuter en détail les résultats obtenus depuis presque 15 ans dans la mesure de ^{210}Po dans des vertèbres prélevées à l'autopsie. Cette base de données nous permet d'avoir une vision large de l'impact dosimétrique de ce radioélément et de le discuter en relation avec un autre projet de l'OFSP dont nous sommes partenaire et qui concerne la radioactivité, et en particulier le ^{210}Pb et le ^{210}Po , dans le tabac. 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 de ^{226}Ra et ^{223}Ra est décrite en détail dans la référence [4].

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 2019, l'activité moyenne en ^{90}Sr des vertèbres humaines en Suisse était de 7.7 mBq/g Ca. Ces faibles valeurs se traduisent par une incertitude souvent supérieure à 25% 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 80 cas, pour une moyenne à 29.6 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.

En 2019, les valeurs mesurées s'échelonnaient entre 12.1 et 74.8 mBq/g Ca, ce qui montre une dispersion assez large des valeurs. Ces différences indiquent que 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 .

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

Année décès	Lieu décès	^{90}Sr (mBq/g Ca)	^{210}Po (mBq/g Ca)
2019	Vaud	5.3 ± 1.5	
		5.2 ± 0.7	39.8 ± 3.1
		7.4 ± 1.1	
		9.2 ± 1.5	74.8 ± 6.5
		7.5 ± 1.4	
	9.2 ± 1.8		
	Tessin	7.6 ± 1.7	12.4 ± 1.1
		5.5 ± 1.2	
		8.6 ± 1.5	
		12.0 ± 2.0	
8.9 ± 2.0			
		5.4 ± 1.8	12.1 ± 1.1
			32.3 ± 3.0
Moyenne ± écart-type		7.7 ± 2.0	

Tableau 2:
 ^{90}Sr (mBq/g Ca) dans les dents de lait d'enfants nés en Suisse entre 2004 et 2007 et mesurées en 2019. 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%).

Naissance		Année(s) d'extraction	^{90}Sr (mBq/g Ca)
Année	Lieu		
2004	Vaud (Echallens) ^{a)}	durant l'enfance ^{a)}	18.0 ± 5.0 ^{b)}
2004-2005	Zürich	2016 - 2019	17.0 ± 3.0
2006	Zürich	2016- 2019	10.0 ± 3.0
2007	Zürich	2016- 2019	10.0 ± 3.0

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

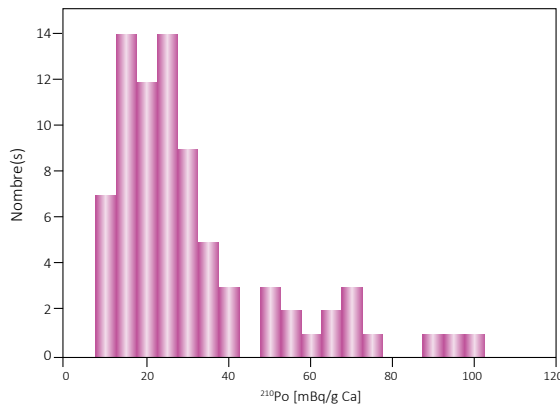
^{b)} La valeur de référence de notre base de données pour l'année 2004 est de 13 mBq/g Ca.

Tableau 3:
 ^{226}Ra (mBq/g Ca) dans les vertèbres de personnes décédées en Suisse en 2018 et mesurées la même année. Incertitudes pour u(95%).

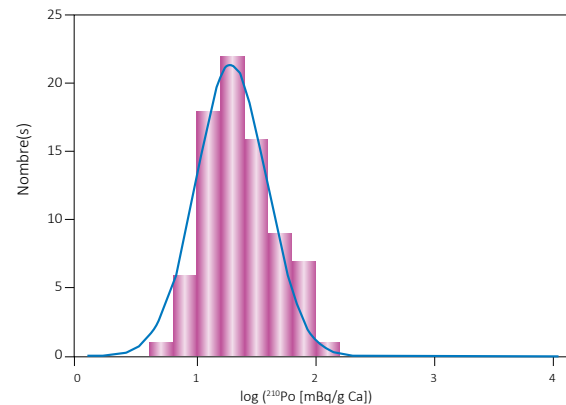
Année décès	Lieu décès	Type	^{226}Ra (mBq/g Ca)
2019	Tessin	vertèbres	1.5 ± 0.9
	Vaud	vertèbres	1.8 ± 0.6
	Vaud	vertèbres	2.4 ± 0.9
	Vaud	vertèbres	1.8 ± 0.6

Une analyse plus détaillée de notre base de données de valeurs de ^{210}Po dans les vertèbres humaines montre une distribution de type log-normale des valeurs (Figures 1a et 1b).

Sur la base de cette analyse, la distribution est centrée sur une valeur de 19.6 mBq/g Ca. 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.



Figur 1a:
Histogramme des valeurs ($n=80$) de ^{210}Po montrant une distribution de type log-normale des valeurs.



Figur 1b:
Distribution log des activités ajustée par une distribution normale centrée sur la valeur 1.293 et d'écart-type 0.42

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 (< 20 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 .

Pour l'année de naissance 2004 - 2005, pour laquelle il n'est plus envisageable d'obtenir encore des dents de lait (enfant > 16 ans), nous avons groupé les dents en provenance de Zürich pour obtenir un échantillon de taille suffisante. 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 33 cas, pour une moyenne à 1.82 mBq/g Ca.

La valeur minimale est à 0.73 mBq/g Ca et la valeur maximale à 4.58 mBq/g Ca. Nous n'avons pas observé de différence entre l'activité en ^{226}Ra contenue dans les vertèbres (os trabéculaire) et les fémurs ou les os de la mâchoire (os cortical), ce qui montre que le ^{226}Ra est introduit dans l'organisme comme élément alcalino-terreux similaire au calcium, probablement principalement par la nourriture (boisson comprise). En 2019, 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 2019 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 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] Leggett, RW. An age-specific kinetic model for lead metabolism in human. *Env. Health Perspect.* 1993, 101, 598-616.
- [2] Schrag et al. Dating human skeletal remains using a radiometric method: Biogenic versus diagenetic ^{90}Sr and ^{210}Pb in vertebrae. *Forensic Sci.Int.* 2012, 220, 271–278.
- [3] Froidevaux et al. Retention half times in the skeleton of plutonium and ^{90}Sr from above-ground nuclear tests: A retrospective study of the Swiss population. *Chemosphere*, 2010, 80, 519-524.
- [4] Straub et al. Determination of ^{226}Ra at low levels in environmental, urine, and human bone samples and ^{223}Ra in bone biopsy using alpha-spectrometry and metrological traceability to $^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ra}$ or ^{226}Ra . *Anal. Chim. Acta*, 2018, 1031, 178-184
- [5] Froidevaux and Haldimann. Plutonium from Above-Ground Nuclear Tests in Milk Teeth: Investigation of Placental Transfer in Children Born between 1951 and 1995 in Switzerland. *Env. Health Perspect.* 2008, 116, 1731-1734.
- [6] Froidevaux et al. Long-Term Effects of Exposure to Low-Levels of Radioactivity: a Retrospective Study of ^{239}Pu and ^{90}Sr from Nuclear Bomb Tests on the Swiss Population. In «Nuclear Power- Operation, Safety and Environment», book edited by Pavel Tsvetkov, ISBN 978-953-307-507-5, Published: September 6, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0. Chapter 14, Open Acces.
- [7] Froidevaux et al. ^{90}Sr in deciduous teeth from 1950 to 2002: The Swiss experience. *Sci. Total. Environ.* 2006, 367, 596-605.

Chapitre / Kapitel 7

Mesures de nucléides spéciaux
Messung von Spezialnukliden

2019

- Carbone 14, Krypton 85, Argon 37
- Plutonium et Américium
- Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37
- Plutonium und Americium

7.1

Kohlenstoff-14, Krypton-85, Argon-37

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

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

S. Szidat und 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

M. Saurer, A. Gessler

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

Zusammenfassung

Die Messungen des Gehalts an Kohlenstoff-14 (^{14}C) im Laub von Bäumen aus der Umgebung von Kernkraftwerken (Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg), Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA Bern), des Paul Scherrer Instituts und an verschiedenen Standorten der Stadt Basel wurden 2019 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, Juni und Oktober 2019) durchgeführt wurden. Aus diesen neun Messungen resultierte für 2019 der $\Delta^{14}\text{C}$ -Referenzwert $2 \pm 3\%$.

Die 90 auf ^{14}C untersuchten Standorte unterscheiden sich um -20% (W-72, Basel Brenntag) bis maximal $+102\%$ (Kernkraftwerk Leibstadt, Fullerfeld) von diesem Referenzwert. In der Stadt Basel lagen die Höchstwerte bei 11% (E-74, Wiesensteg) bzw. 1% (W-10A, Novartis St. Johann). Selbst die Maximalwerte entsprechen einer zusätzlichen Strahlendosis für die Bevölkerung von nicht mehr als $1 \mu\text{Sv}$ ($1 \mu\text{Sv} = 10^{-6}$ Sievert) in einem Jahr. Im Vergleich zur natürlichen Strahlenbelastung von ca. $4'000 \mu\text{Sv/a}$ 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 wurden in der Regel an einem der beiden Radiocarbonlabore der Universität Bern durchgeführt: im ^{14}C -Labor der Klima- und Umweltp Physik (KUP) des Physikalischen Instituts und/oder im Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff mit AMS, LARA (AMS: accelerator mass spectrometry) des Departements für Chemie und Biochemie. Ausnahmen sind erwähnt.

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 erreicht:

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

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

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:

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

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 2019 ein Referenzwert für Laub in ungestörter Umgebung definiert. Als Basis hierzu dienten die im Juni, August und Oktober gesammelten Blätter.

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref, 2019}} = 2 \pm 3 [\text{‰}] \quad (3)$$

Die Differenz

$$\text{Netto } \Delta^{14}\text{C} = \Delta^{14}\text{C}_{\text{Probe}} - \Delta^{14}\text{C}_{\text{Ref, 2019}} \quad (4)$$

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

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

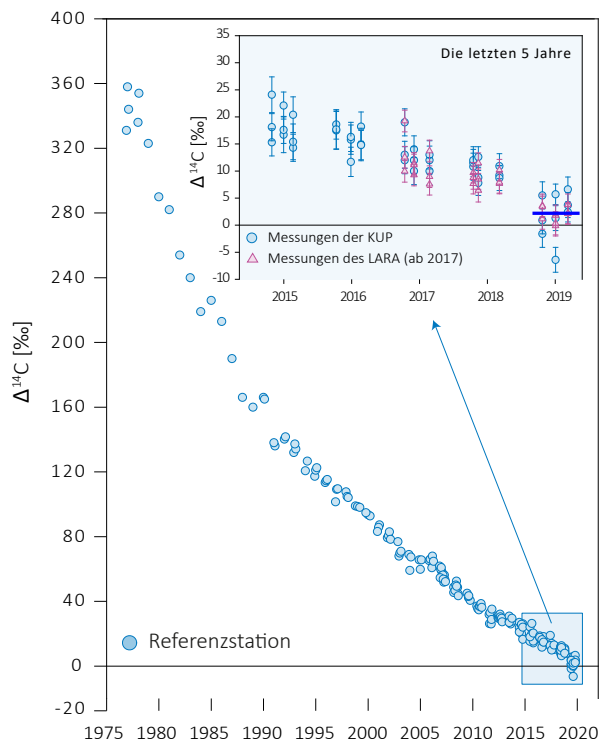
Es kommen zwei unterschiedliche Methoden zur Anwendung:

- *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.

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



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 Detailansicht (ab 2017): Messungen des LARA.

Tabelle 1:

Messwerte 2019 und Koordinaten der Referenzstationen für Laubmessungen.

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

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 2019 gegenüber dem Vorjahr erneut abgefallen. Mit $2 \pm 3\text{‰}$ (gerundeter Mittelwert aller in Tabelle 1 dargestellten Messergebnisse) liegt der Referenzwert um 8‰ unter dem Wert von 2018.



Figur 2: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Leibstadt (KKL) im Jahr 2019. Revisionsabschaltung: 03.06.19 bis 03.07.19. Probenahme: 27.05.19 und 16.09.19. Dargestellt sind die jeweils höchsten Messwerte beider Messungen. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.

^{14}C im Umfeld der Schweizer Kernkraftwerke

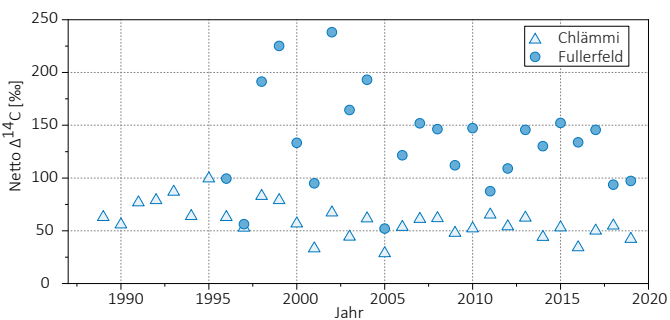
Gemäss Jahresrückblick des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI [1] wurden die Schweizer Kernkraftwerke im Jahr 2019 sicher betrieben. Am Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) kam es zu insgesamt drei automatischen Schnellabschaltungen, und zwar am 24. April, 12. Mai und 28. Dezember 2019. Die drei Vorkommnisse hatten laut ENSI eine geringe Bedeutung für die nukleare Sicherheit.

Darüber hinaus wurde am 20. Dezember 2019 mit dem Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) erstmals in der Schweiz ein Kernkraftwerk endgültig aus dem Leistungsbetrieb genommen. Rückbau und Stilllegung sollen im Jahr 2034 abgeschlossen sein. Die entsprechenden ^{14}C -Messungen sollen auch während des Rückbaus noch einige Jahre fortgesetzt werden.

Die Laubprobenahmen im Umfeld der Kernkraftwerke erfolgten im Allgemeinen während oder nach der Jahresrevision der entsprechenden Kraftwerke, um auch mögliche ^{14}C -Abgaben während des Revisionsstillstands erfassen zu können. Eine Ausnahme bildet das KKM, da dort im Jahr 2019 wegen der anstehenden Stilllegung kein Revisionsstillstand stattgefunden hat.

Zusätzlich erfolgte eine Luftprobenahme beim Kernkraftwerk Gösgen zu Beginn der Revision zu einem Zeitpunkt, als der Überdruck des Reaktordruckgefässes abgelassen wurde. Mit diesen Luftproben sollte eine Abschätzung der punktuellen Maximalmissionen an $^{14}\text{CO}_2$ wie auch $^{14}\text{CH}_4$ ermittelt werden.

Mit Ausnahme der Messungen im Umfeld des Paul Scherrer Instituts und des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen (ZWILAG), welche vom Paul Scherrer Institut



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.

durchgeführt wurden, erfolgten die Messungen jeweils 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

Im Sommer 2019 wurden im Umkreis des Kernkraftwerks Leibstadt (KKL) zwei separate Probenahmen durchgeführt: je eine vor und eine nach dem für den Zeitraum vom 03. Juni 2019 bis 03. Juli 2019 terminierten Revisionsstillstand. Es wurden Blätter von Laubbäumen an verschiedenen Standorten in beiden Hauptwindrichtungen gesammelt und auf ihren ^{14}C -Gehalt hin untersucht. 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 Chlämli die höchsten Werte auf. Es konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Probenahme und dem ^{14}C -Gehalt der Blätter festgestellt werden.

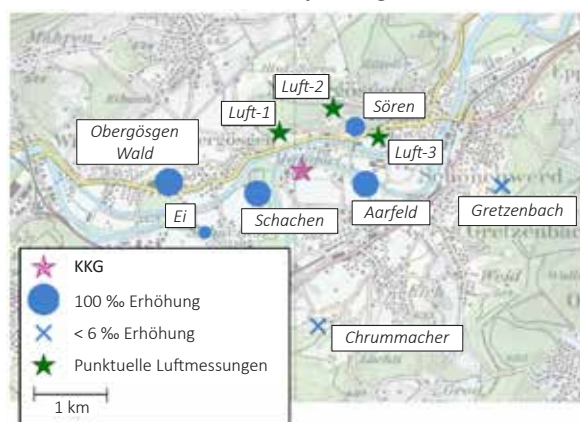
Figur 3 zeigt die gemessenen Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte der Standorte Fullerfeld und Chlämli seit Messbeginn. Es sind dies die beiden Standorte mit den traditionell höchsten Werten in der jeweiligen Windrichtung. 2019 lag der höchste Messwert nordwestlich des KKL bei 102‰ (Standort Fullerfeld). In südwestlicher Richtung wurde 2019 am Standort Chlämli mit 45‰ der höchste Wert gemessen. Der grösste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert seit Messbeginn beträgt 238‰ und stammt vom Standort Fullerfeld (2002).

Kernkraftwerk Gösgen

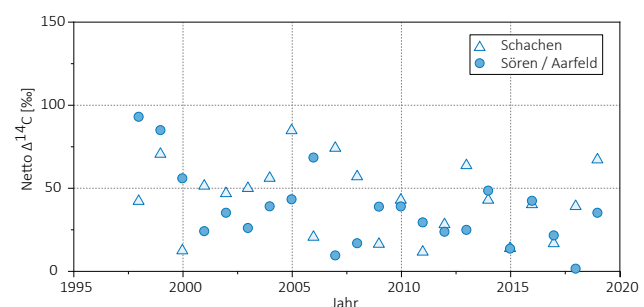
In Figur 4 sind die Resultate der am 25. Juni 2019 gesammelten Blattproben in der Umgebung des Kernkraftwerks Gösgen (KKG) dargestellt. Sämtliche Messwerte liegen nahe bei den langjährigen Mittelwerten bzw. darunter. Die höchsten ^{14}C -Messwerte resultierten in diesem Jahr mit einer Erhöhung von ca. 80‰ am Standort Obergösgen Wald.

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.

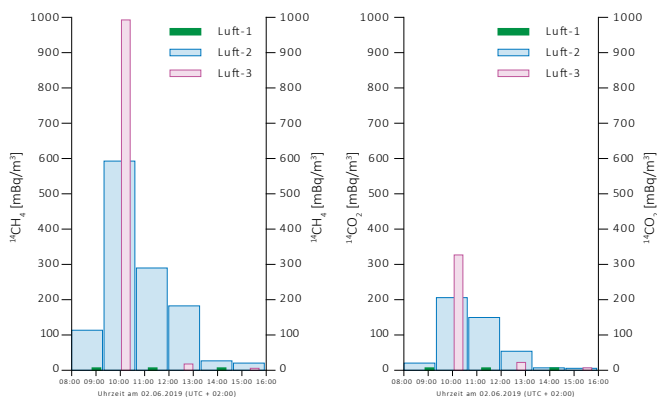
Zu Beginn der Revision von KKG wurden während 8 Stunden insgesamt 18 Luftproben von je ~100L an fünf Standorten in der Umgebung des Kraftwerks gesammelt, um punktuelle Maximalaktivitäten von radioaktivem Methan ($^{14}\text{CH}_4$), $^{14}\text{CO}_2$ und ^{37}Ar zu ermitteln. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Überdruck aus den Reaktordruckgefäss abgelassen und daher die grösste Emission radioaktiver Gase erwartet. Figur 6 zeigt den Verlauf der Messwerte für drei Standorte, die sich etwa 1 km vom Abluftkamin entfernt in Windrichtung befanden. Die weiteren Messungen, welche hier nicht gezeigt werden, erfolgten an einem Standort entgegen der Windrichtung zur Ermittlung der Hintergrundwerte der Aktivitätskonzentrationen und an einem Standort in etwa 5 km Entfernung windabwärts. Der Hauptstandort Luft-2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Emissionen für $^{14}\text{CH}_4$ und $^{14}\text{CO}_2$, während die Ergebnisse der anderen beiden Standorte Luft-1 und Luft-3 belegen, dass die bodennahe Entwicklung der Emissionen durch den Hauptstandort sehr gut repräsentiert wird.



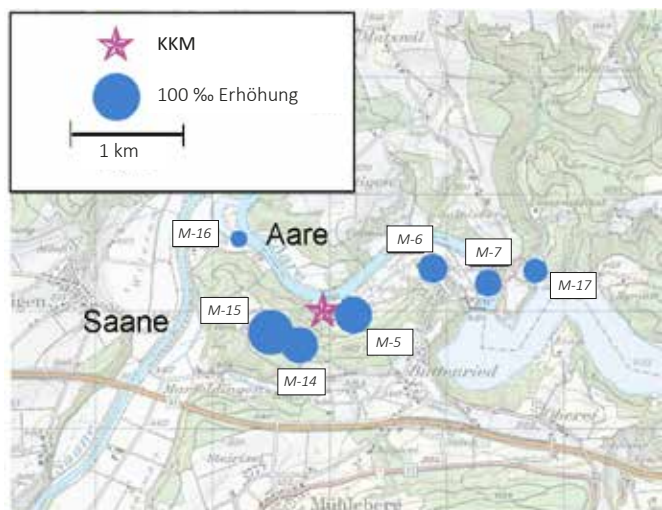
Figur 4: Örtliche Verteilung der Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Druckwasserreaktors Gösgen (KKG). Revisionsabschaltung: 01.06.2019 bis 22.06.2019. Probenahme: 25.06.2019. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen. Siehe Figur 6 für Angaben zu den punktuellen Luftmessungen, welche zu Beginn der Revision am 02.06.2019 durchgeführt wurden.



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 6: Aktivitätskonzentrationen von $^{14}\text{CH}_4$ (links) und $^{14}\text{CO}_2$ (rechts) von Luftproben, welche am 02.06.2019 bei KKG an drei Standorten windabwärts des Abluftkamins gesammelt wurden (siehe Figur 4). Am Standort Luft-2 wurden 6 Proben über eine Zeit von je 75 Minuten, an den Standorten Luft-1 und Luft-3 je 3 Proben über eine Zeit von je 20 Minuten genommen. Alle Aktivitätskonzentrationen wurden um ihre Hintergrundwerte reduziert.



Figur 7: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Siedewasserreaktors Mühleberg (KKM) im Jahr 2019. Revisionsabschaltung: keine (endgültige Abschaltung des Reaktors am 20.12.2019). Probenahme: 05.07.2019. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.

Im Mittel wurden für Luft-2 über die 8-stündige Kampagne 201 mBq/m^3 $^{14}\text{CH}_4$ und 74 mBq/m^3 $^{14}\text{CO}_2$ beobachtet. Dies entspricht einem Aktivitätsverhältnis von 2.7 für die beiden ^{14}C -haltigen Gase; etwa 73% der gasförmigen ^{14}C -Emissionen erfolgten in Form von Methan, welches sich bevorzugt in Druckwasserreaktoren bildet aufgrund der chemisch reduzierenden Bedingungen dieses Reaktortyps. Die $^{14}\text{CH}_4$ -Emissionen sind jedoch radiologisch nicht von Bedeutung, da Methan – anders als Kohlendioxid – nicht direkt über Photosynthese von Pflanzen und somit in die Nahrungskette aufgenommen wird. Die mittlere $^{14}\text{CO}_2$ -Aktivitätskonzentration von 74 mBq/m^3 entspricht einer Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Erhöhung von ca. 1'700‰. Diese sehr hohen punktuellen Maximalaktivitäten können aber nur marginal zur Gesamtdosis beigetragen haben. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass der Messwert der Blattproben für Sören, welche in unmittelbarer Nähe zu den Luftprobenahmestellen gegen Ende der Revisionsarbeiten gesammelt wurden, niedriger war als für Obergösgen Wald und Schachen, welche am Tag der Luftprobenahme entgegen der Windrichtung zum Abluftkamin lagen.

Kernkraftwerk Mühleberg

Figur 7 zeigt die Verteilung der Messwerte um das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM). Die grösste Erhöhung wurde am Standort M-5 (Schiessplatz) mit 91‰ gemessen. Die 2019 gemessenen Proben liegen unter den seit Messbeginn im Jahr 1977 registrierten Höchstwerten. Der mit 116‰ höchste Wert stammt aus dem Jahr 1984.

In Figur 8 sind die seit Messbeginn jährlich gemessenen höchsten Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte aufgeführt. Die Messwerte aus dem Jahr 2019 liegen in der Bandbreite des langjährigen Mittels.

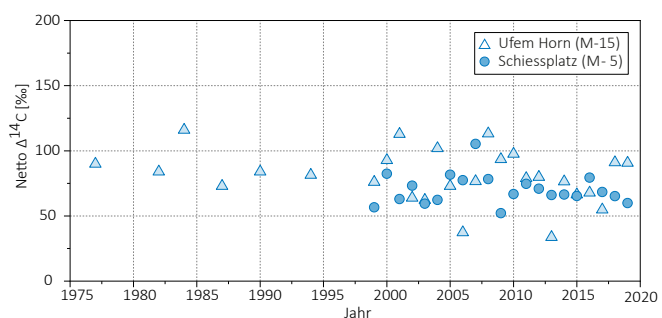
Messreihe Liebefeld/Ufem Horn

Erstmals wurde ein und derselbe Baum an zwei verschiedenen Standorten beprobt: zum einen an einem relativ unbelasteten Standort in einem stark begrünten Wohnquartier (Liebefeld-Gartenstadt, unweit des Bundesamtes für Gesundheit) und zum anderen am Standort Ufem Horn beim Kernkraftwerk Mühleberg. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

Aus einer in einem grossen Topf gepflanzten Kastanienfrucht wuchs über mehrere Jahre hinweg ein Roskastanienbaum (Aesculus) auf eine Höhe von ca. 2 Metern heran (Figur 9).

Eine Beprobung des Baumes im Herbst 2017 ergab einen Netto ^{14}C -Wert von -4‰, d. h. eine geringe Verdünnung gegenüber dem damaligen Referenzwert von 12‰ (siehe «Suess-Effekt» weiter oben).

Im Frühjahr 2018, noch vor dem Austreiben des Laubs, wurde der Baum samt Topf an den Standort Ufem Horn verfrachtet, wo er den Sommer über verblieb und während der Wachstumsphase das dortige CO_2 für seinen Stoffwechsel verwendete. Eine Beprobung des Baumes im Herbst 2018



Figur 8: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (●) und westlich (△) des Kernkraftwerkes Mühleberg seit Messbeginn. Standorte: siehe Figur 7. Messungen bis 2016: KUP. Messungen ab 2017: LARA.

ergab einen Netto ^{14}C -Wert von 64%, d. h. es wurde ein unmittelbarer Anstieg auf fast denselben Wert beobachtet, wie ihn auch die bereits seit langem an diesem Standort wachsenden Buchen aufwiesen (siehe Figuren 7 und 8).

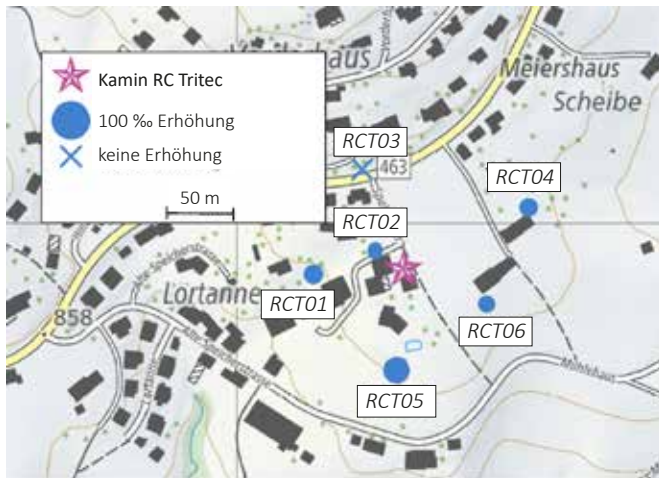
Das Jahr 2019 verbrachte der Baum wieder an seinem ursprünglichen Standort im Liebefeld. Die Messwerte kehrten wieder auf das ursprünglichen Netto ^{14}C -Niveau zurück (-4%).

Im Hinblick auf die Stilllegung und den Rückbau des KKM sind daher im Jahr 2020 am Standort Ufem Horn signifikant tiefere Werte zu erwarten als während des Betriebs, da nach dem Einstellen des Leistungsbetriebs im KKM kein ^{14}C mehr produziert wird. Diese Erwartung soll im Jahr 2020 anhand der regulären Messungen überprüft werden.

RC Tritec AG

Die RC Tritec AG mit Sitz in Teufen AR ist ein schweizweit führender Anbieter von Beta-Quellen, einschliesslich ^{14}C . Erstmals seit Ende der 1990er Jahre wurden von der KUP wieder Laubbäume im Umkreis des Unternehmens beprobt und auf ihren ^{14}C -Gehalt hin untersucht. In Figur 10 sind die Probenahmestellen auf und in der Nähe des Firmenareals dargestellt.

An fünf der sechs beprobten Standorte wurden geringfügig erhöhte Werte im Vergleich zu den unbelasteten Referenzstationen gemessen, wobei die Erhöhung zwischen 19 und 44% betrug. Am Standort RCT03, welcher sich an einer stark frequentierten Hauptstrasse befindet, wurde keine Erhöhung festgestellt. An diesem Standort gleicht der Suess-Effekt (zur Erläuterung siehe weiter oben) allfällige Erhöhungen des ^{14}C -Gehalts mehr als aus.



Figur 10:
Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Unternehmens RC Tritec.
Probenahme: 25.06.2019. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.

erhöhten Werte festgestellt.

In Figur 12 sind Zeitreihen der Standorte aufgeführt, für die historisch gesehen die höchsten Messwerte ermittelt wurden. Alle hier dargestellten Messungen ausser dem Standort Böttstein (Symbol \odot) erfolgten durch das PSI.

Kehrichtverbrennungsanlagen

In Blättern von Bäumen, die am 12. August 2019 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 2% lagen. Im Gegensatz zu Blättern, die im Umfeld der Kernkraftwerke gesammelt wurden, findet hier im Stadtgebiet eine

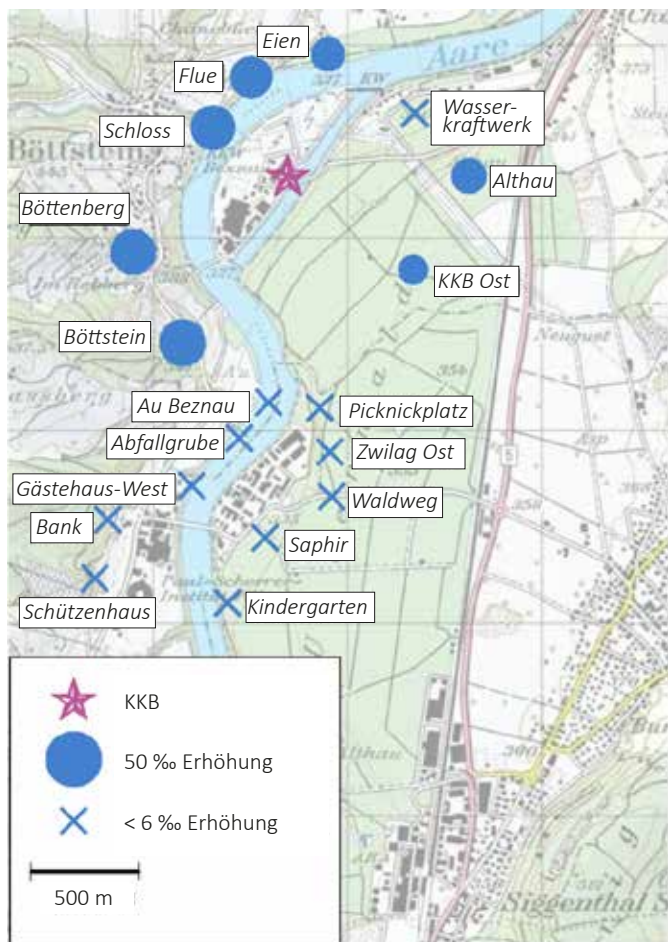


Figur 9:
Rosskastanie als mobile Messstation 2017 bis 2019.

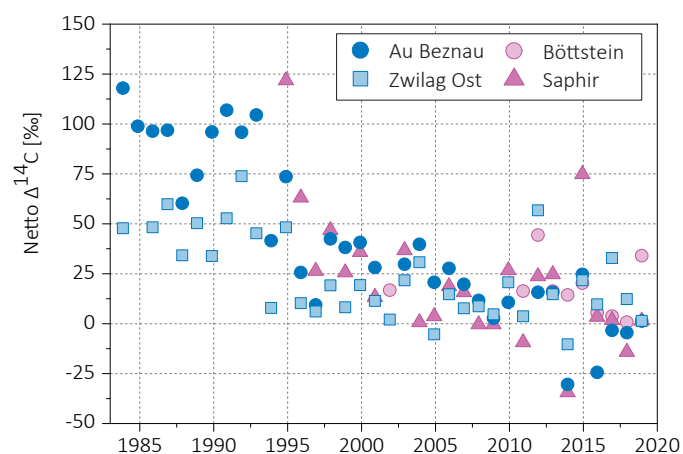
Paul Scherrer Institut, Zentrales Zwischenlager Würenlingen, Kernkraftwerk Beznau

Die zu diesen Standorten gehörenden ^{14}C -Messungen in den Blattproben wurden am Paul Scherrer Institut (PSI) bzw. im Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff mit AMS (LARA) des Departements für Chemie und Biochemie der Universität Bern durchgeführt: Messungen der Standorte Eien, Althau, KKB Ost, Böttstein, Flue, Schloss, Böttenberg erfolgten am LARA, die restlichen Messungen am PSI.

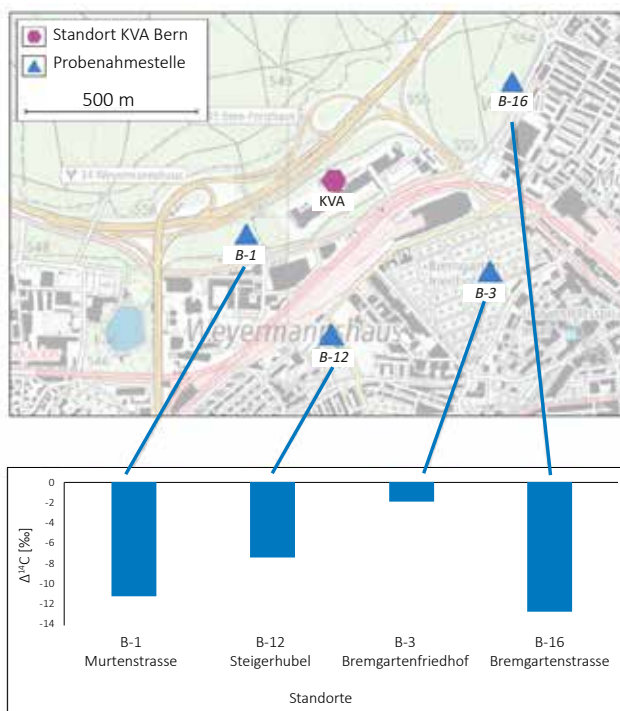
Im Kernkraftwerk Beznau (KKB) sind seit März 2018 wieder beide Reaktorblöcke im Betrieb. Im Jahr 2019 wurden höhere Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte gemessen als im Vorjahr. Im Umfeld des PSI und Zwilag wurden keine



Figur 11: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte in der Umgebung des Paul Scherrer Instituts (PSI), des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen (ZWILAG) und des Kernkraftwerks Beznau (KKB) im Jahr 2019 (M. Heule, PSI, in Zusammenarbeit mit der Universität Bern). Revisionsabschaltung KKB I: 03.05.2019 bis 09.06.2019, KKB II: 16.08.2019 bis 20.09.2019. Probenahme: 16.09.2019. Die Kreisflächen sind proportional zur Erhöhung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen.



Figur 12: Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Höchstwerte östlich (■▲) und westlich (●○) des PSI - ZWILAG sowie des Kernkraftwerkes Beznau seit Messbeginn. Standorte: siehe Figur 11. Messungen bis 2016: KUP (Standort Böttstein) und PSI. Messungen ab 2017: LARA (Standort Böttstein) und PSI.



Figur 13: Probenahmestellen und $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte bei der KVA Bern.

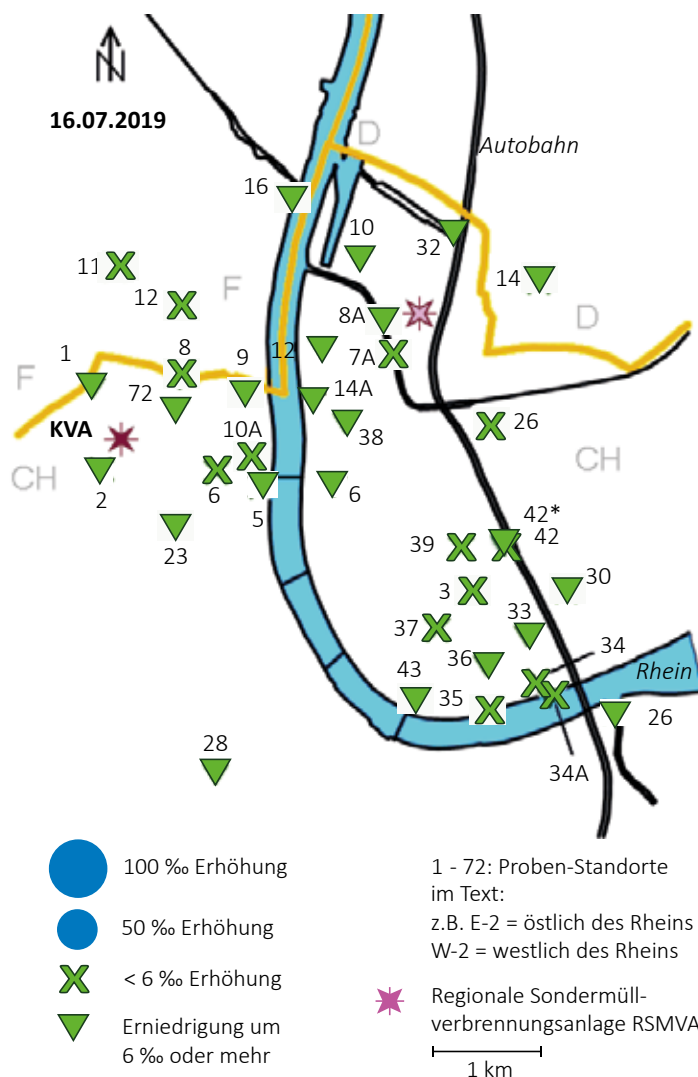
Verdünnung (oder Absenkung) der ^{14}C -Konzentration gegenüber den Referenzstationen statt. Dies ist eine Folge der Abgase von ^{14}C -freien, fossilen Brenn- und Treibstoffen, welche von den Bäumen aufgenommen werden (siehe «Suess»-Effekt weiter oben).

In Figur 13 sind oben die vier Probenahmestellen und unten die entsprechenden Messwerte als Verdünnung gegenüber den unbelasteten Referenzstationen dargestellt.

Messungen in der Region Basel-Stadt

Auch im Jahr 2019 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 regionalen Sondermüllverbrennungsanlage (RSMVA). Die höchsten am 16.07.2019 gemessenen Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte betragen westlich des Rheins 1‰ (Novartis Bau 27, Standort W-10A) und östlich -2‰ (Solitude, Standort E-34). Allfällige Erhöhungen der $^{14}\text{CO}_2$ -Konzentration werden also durch den «Suess»-Effekt an den meisten Standorten mehr als kompensiert, sodass praktisch überall eine Verdünnung der $^{14}\text{CO}_2$ -Konzentration relativ zu den unbelasteten Referenzstationen festgestellt wurde.

Auch im französischen und deutschen Grenzgebiet nördlich des Novartis-Werks St. Johann bzw. östlich der RSMVA wurden keine Erhöhungen registriert. An zahlreichen Standorten wurden aufgrund des «Suess»-Effekts Erniedrigungen um 6‰ oder mehr ermittelt (Figur 14, Symbol ▼).

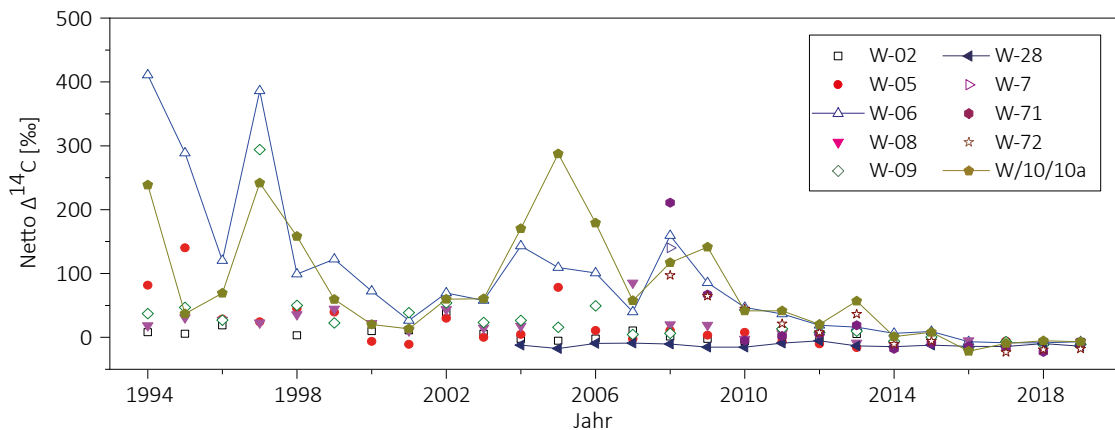


Figur 14:
 Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte für Blattproben aus dem Raum Basel.

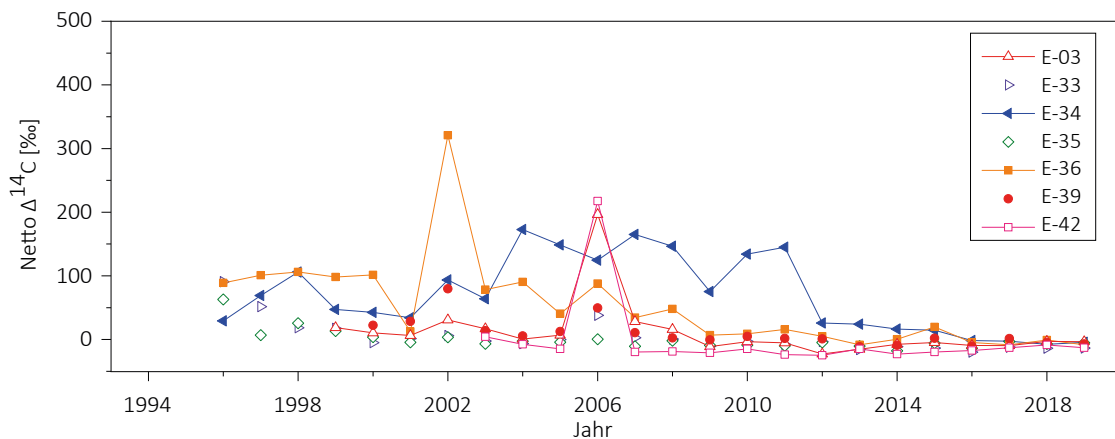
Table 2:

Im Jahre 2019 gemessene höchste Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Messwerte von Blättern im Vergleich mit Messungen früherer Jahre (1994 bis 2018) am Standort 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 unbeeinflusste Stadtgebiet.

Ort	In der Blattkohle		Im ganzen Blatt		
	2019 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]	1994-2018 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]	2019 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]	2004 - 2018 Höchster Netto $\Delta^{14}\text{C}$ -Wert [‰]	
E-03	-3	197 (2006)	-	23	(2007)
E-26	-5	169 (1996)	-	-	
E-34	-2	106 (1998)	-2	173	(2004)
E-42	-10	4 (2003)	-	-	
E-42*	-8	218 (2006)	-	-	
W-06	-2	438 (1994)	-1	172	(2008)
W-10A	-6	259 (1997)	1	308	(2005)
W-28	-11	-6 (2007)	-11	-13	(2013)
W-71	-5	227 (2008)	-6	75	(2009)
W-72	-14	107 (2008)	-12	115	(2010)



Figur 15:
 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 16:
 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.

Im Juni, August und Oktober wurden an einigen Standorten sowohl in der Blattkohle als auch an unverkohlten ganzen Blättern Messungen durchgeführt (siehe weiter oben). Die Vergleichswerte sind in Tabelle 2) dargestellt.

Die Figuren 15 und 16 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.

Edelgas-Radionuklide

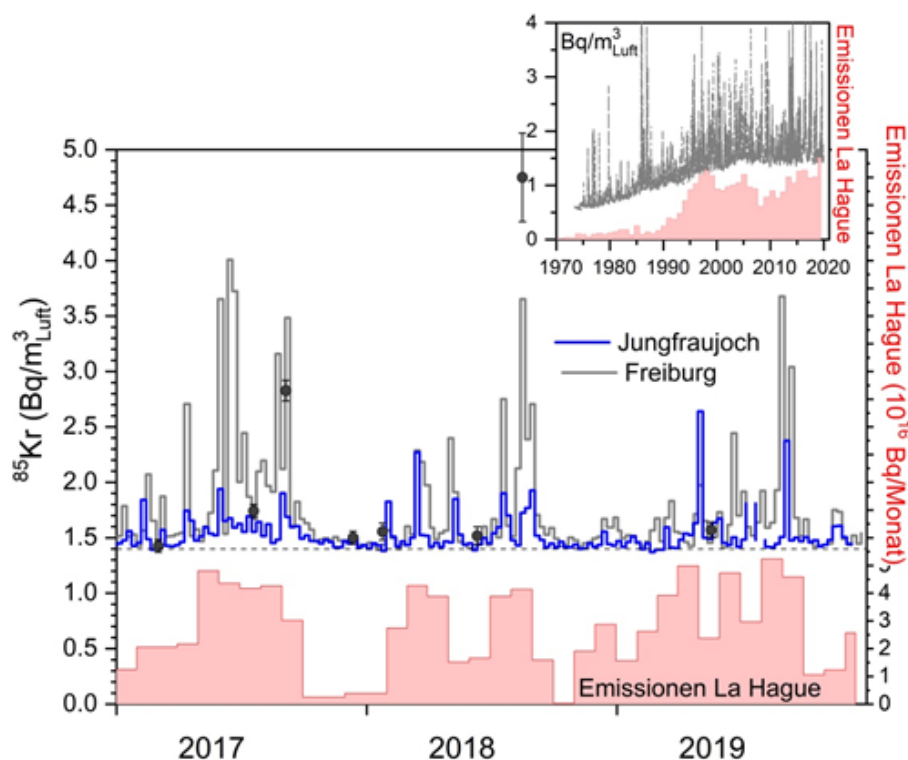
Die beiden Edelgas-Radionuklide Krypton-85 und Argon-37 werden in der Atmosphäre auf natürliche Weise nur in sehr geringen Mengen produziert. ^{85}Kr , freigesetzt bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstäben, konnte sich wegen der vergleichsweise langen Halbwertszeit von 10,76 Jahren und den lange Zeit zunehmenden Emissionsraten über die letzten 40 Jahre in der Atmosphäre anreichern. Zurzeit verharrt die Aktivitäts-

konzentration 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 10.76 ± 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 17). Durch radioaktiven Zerfall nimmt das atmosphärische Inventar jährlich um 6.2% ab. Diese Reduktionsrate wurde lange Zeit von den globalen Freisetzungsraten von ^{85}Kr übertroffen, was zu einem Anstieg der atmosphärischen Basisaktivitätskonzentration führte (Figur 17, kleines Bild).

In der letzten Dekade ist eine Stabilisierung bei einer Konzentration von $1.4\text{-}1.5 \text{ Bq}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$ in Mitteleuropa zu beobachten. ^{85}Kr wird an kumulativen Wochenproben gemessen, die auf dem Jungfrauoch (JFJ) gesammelt und im Edelgaslabor des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) in Freiburg im Breisgau analysiert werden [2] (Figur 17). Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Werte von Freiburg im Breisgau 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 [3]. Wegen der erhöhten Lage der Station JFJ wird diese Station aber weniger von bodennahen Emissionen beeinflusst und weist Aktivitätsspitzen geringerer Amplitude auf.



Figur 17:

Atmosphärische ^{85}Kr Aktivitätskonzentrationen der Stationen Jungfrauoch (3500 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]. Kleines Bild: Langzeitmessreihe der ^{85}Kr -Aktivitätskonzentration an der Station Freiburg i. Br. gemessen am BfS. Zum Vergleich ist auch der Verlauf der Emissionsraten der Aufbereitungsanlage von La Hague dargestellt (rote Balken in Einheiten von 10^{16} Bq) [3].

In der Berichtsperiode 2019 wurde eine maximale Aktivitätskonzentration von 3.7 Bq/m³_{Luft} in Freiburg gemessen. Der Ende April gemessene höchste Wert auf dem Jungfrauoch lag bei 2.6 Bq/m³_{Luft} und überstieg damit den zur selben Zeit beobachteten Wert in Freiburg. Diese seltene Situation tritt nach schneller Erwärmung nach Inversionslagen ein. Dabei können bodennahe Luftschichten, die mit ⁸⁵Kr von La Hague angereichert sind, vertikal bis in grössere Höhen transportiert werden. Tatsächlich wurde die Aktivitätsspitze auf dem Jungfrauoch nach einer Periode mit erhöhten Emissionen in La Hague beobachtet. Im Herbst konvergierten die Messwerte jeweils wieder gegen den Basiswert, was auf eine verringerte Aufarbeitungsaktivität hindeutet. Die durch den ⁸⁵Kr-Untergrundpegel verursachte jährliche effektive Dosis beträgt ca. 11 nSv/Jahr ($8 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq m⁻³ Jahr [4]) und ist damit gering in Relation zur Strahlenbelastung von etwa 3.2 mSv verursacht durch natürlich vorkommendes Radon.

Stichproben, genommen in wenigen Minuten und gemessen am Physikalischen Institut der Universität Bern, bestätigen den Aktivitätsbereich und die zeitliche Abfolge der Beobachtungen in Freiburg und auf dem Jungfrauoch.

Argon-37 (³⁷Ar)

³⁷Ar 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.

Während Revisionsarbeiten des Kernkraftwerkes Gösgen im Juni 2019 konnten in Abwindrichtung und einer Distanz von ca. 1'000 m vom Fortluftkamin ³⁷Ar-Konzentrationen von bis zu 100 mBq/m³_{Luft} beobachtet werden (Tabelle 3). Im Vergleich zu ⁸⁵Kr sind die Aktivitätskonzentrationen von ³⁷Ar nochmals um den Faktor 10 geringer als die Basisaktivität von ⁸⁵Kr und führen deshalb zu keiner zusätzlichen Strahlenbelastung.

Tabelle 3:
Am 2.6.2019 in Abwindrichtung vom Kernkraftwerk Gösgen gemessene ³⁷Ar-Aktivitäten.

³⁷ Ar (mBq/m ³ _{Luft})		
28.2 ± 4.5	92.9 ± 10	42.6 ± 6

Referenzen

- [1] <https://www.ensi.ch/de/2020/01/22/bilanz-2019-sicherer-betrieb-der-schweizer-kernanlagen-gewahrleistet>, besucht am 15. Februar 2020
- [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] Data provided by Orano La Hague
- [4] ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41 (Suppl.). Table C.1., p. 61

7.2

Mesures de plutonium et d'américium dans l'environnement

P. Froidevaux, P.-A. Pittet, L. Pfefferlé, F. Barraud, F. Bochud

Institut de radiophysique, CHUV, Grand Pré 1, Lausanne

Résumé

Nous avons mesuré le Pu et l'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 ne présentent pas d'activité en Pu et Am mesurable au-dessus de la limite de détection de la méthode, à l'exception de deux échantillons, l'un positif au Pu (5.1 mBq/kg ms) et l'autre positif à ^{241}Am (1.4 mBq/kg ms). Les activités en Pu des eaux de rivières prélevées en aval des centrales nucléaires ne dépassent pas 7.0 mBq/m³, soit des valeurs très proches de celles mesurées les années précédentes. L'analyse détaillée des données en Pu disponibles pour les filtres à air entre 2013 et 2019 montre que l'activité de l'air (en nBq/m³) est proportionnelle à la masse de particules de sol présentes sur les filtres (en µg/m³), ce qui confirme que l'activité dans l'air provient uniquement de la resuspension de particules de sol, et qu'il n'y a pas eu de contamination aérienne supplémentaire durant cette période.

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.

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 challenge. 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, provenant des essais nucléaires encore présent dans la stratosphère, jusque dans les couches basses de l'atmosphère [1]. L'intégration des dépôts de Pu et Am, dus aux essais nucléaires, dans le sol donne des rapports isotopiques de $^{238}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.027 et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.40, recalculés pour l'année 2019. 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 particulièrement 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 obtenus dans la mesure des sols échantillonnés sur l'ensemble du territoire suisse, avec une focalisation sur les sites aux environs des centrales nucléaires suisses. En vue du démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg, sept sites spécifiques autour de la centrale ont été échantillonnés et analysés indépendamment. Les activités sont très proches de celles obtenues les années précédentes et ne montrent pas de marquage autre que par les retombées des essais nucléaires des années soixante. La mesure du rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et du rapport isotopique $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ permet de déterminer l'origine de la contamination par comparaison avec les mêmes rapports des retombées des essais nucléaires des années soixante. Ces rapports doivent être proches de 0.029 pour $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et de 0.46 pour $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ si on attribue la contamination aux retombées radioactives des essais nucléaires. Le rapport $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ évolue avec le temps car ^{241}Am est issue de la désintégration de ^{241}Pu (émetteur bêta non mesuré dans cette étude, de période 14.4 ans) et, selon les équations de Bateman, atteindra son maximum pour les retombées des essais nucléaires des années soixante, vers 2035. 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.

Cette année, nous avons fait un effort particulier pour quantifier ^{238}Pu dans chaque échantillon de sol, et répété les analyses un certain nombre de fois 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 sont très reproductibles entre les aliquotes de mesures de 50 g chacun. On constate toutefois que les activités de ^{238}Pu , dont les valeurs sont très basses et proches de 5 mBq/kg ms de sol, sont entachées d'une incertitude voisine de 50%. Celle-ci se reporte sur le rapport $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, qui devient très incertain. Néanmoins, la moyenne des rapports $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ pour 25 mesures avec ^{238}Pu quantifiable au-dessus de la limite de détection est de 0.029, 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.

S'il n'y a pas d'émission de radioactivité dans l'atmosphère, par exemple lors de situations accidentelles, l'activité en Pu et Am des filtres à air reflète la remise en suspension de particules de sol par abrasion par le vent.

La Figure 1 représente l'activité en nBq/m³ des filtres à air de différents sites de 2013 à 2019, 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.

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 2019 (incertitudes à 95%).

Lieu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu Bq/kg MS	²³⁸ Pu Bq/kg MS	²⁴¹ Am Bq/kg MS	²⁴¹ Am/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²³⁸ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
Gösgen (Däniken)	0.235 ± 0.021 0.235 ± 0.015	0.0067 ± 0.0030 0.0053 ± 0.0018	0.099 ± 0.018 0.109 ± 0.007	0.422 ± 0.085 0.463 ± 0.043	0.029 ± 0.012 0.022 ± 0.007
Arenenberg	0.121 ± 0.022 0.127 ± 0.014 0.122 ± 0.011	0.0049 ± 0.0019	0.061 ± 0.008 0.053 ± 0.006	0.502 ± 0.111 0.418 ± 0.068	0.040 ± 0.016
Beznau	0.167 ± 0.016	0.0048 ± 0.0025	0.079 ± 0.007	0.474 ± 0.063	0.029 ± 0.015
Cadenazzo	0.098 ± 0.015 0.132 ± 0.024 0.127 ± 0.018 0.118 ± 0.010	0.0030 ± 0.0013	0.078 ± 0.011 0.052 ± 0.006	0.795 ± 0.166 0.393 ± 0.087	0.026 ± 0.011
CERN (Meyrin)	0.110 ± 0.009 0.112 ± 0.010	0.0037 ± 0.0015	0.043 ± 0.008 0.049 ± 0.006	0.387 ± 0.078 0.440 ± 0.063	0.033 ± 0.014
Güttingen	0.154 ± 0.022 0.175 ± 0.019 0.166 ± 0.015	0.0058 ± 0.0028 0.0056 ± 0.0022	0.087 ± 0.009 0.075 ± 0.008	0.567 ± 0.100 0.431 ± 0.066	0.033 ± 0.017 0.034 ± 0.014
Leibstadt	0.188 ± 0.017	0.0057 ± 0.0030	0.0074 ± 0.008	0.396 ± 0.054	0.030 ± 0.013
Mühleberg, Rewag	0.146 ± 0.016 0.182 ± 0.013	0.0057 ± 0.0030	0.084 ± 0.014 0.077 ± 0.006	0.573 ± 0.115 0.421 ± 0.050	0.031 ± 0.011
Mühleberg, Salvisberg	0.155 ± 0.015 0.158 ± 0.015 0.163 ± 0.011	0.0046 ± 0.0020 0.0053 ± 0.0030 0.0039 ± 0.0020	0.064 ± 0.010 0.075 -0.006 0.077 ± 0.008	0.413 ± 0.075 0.470 ± 0.060 0.470 ± 0.058	0.030 ± 0.014 0.033 ± 0.015 0.024 ± 0.002
Mühleberg, Ufem Horn	0.143 ± 0.015 0.164 ± 0.012	0.0032 ± 0.0014	0.067 ± 0.011 0.073 ± 0.061	0.469 ± 0.090 0.444 ± 0.049	0.020 ± 0.009
Mühleberg, Niederruntigen	0.053 ± 0.009 0.063 ± 0.008 0.070 ± 0.008	0.0024 ± 0.0014	0.042 ± 0.011 0.028 ± 0.003 0.030 ± 0.006	0.801 ± 0.249 0.443 ± 0.077 0.434 ± 0.091	0.039 ± 0.024
Mühleberg, Oberruntigen	0.226 ± 0.022 0.244 ± 0.016	0.0065 ± 0.0026 0.0060 ± 0.0006	0.097 ± 0.007 0.119 ± 0.010	0.433 ± 0.054 0.488 ± 0.054	0.029 ± 0.012 0.025 ± 0.002
Mühleberg, Clôture	0.157 ± 0.022 0.182 ± 0.013	0.0046 ± 0.0002	0.070 ± 0.006 0.093 ± 0.009	0.447 ± 0.073 0.510 ± 0.062	0.025 ± 0.002
Mühleberg, Fuchsenried	0.116 ± 0.013	0.0032 ± 0.0019	0.051 ± 0.006	0.439 ± 0.071	0.028 ± 0.017
Posieux	0.180 ± 0.018 0.210 ± 0.013	0.0051 ± 0.0030 0.0046 ± 0.0016	0.088 ± 0.020 0.087 ± 0.006	0.491 ± 0.124 0.412 ± 0.039	0.029 ± 0.014 0.022 ± 0.008
Villigen (PSI)	0.135 ± 0.015	0.0052 ± 0.0030	0.055 ± 0.005	0.407 ± 0.060	0.039 ± 0.021
Würenlingen (ZWILAG)	0.128 ± 0.031 0.169 ± 0.015 0.172 ± 0.014	0.0050 ± 0.0022 0.0054 ± 0.0021	0.080 ± 0.009 0.073 ± 0.006	0.623 ± 0.147 0.429 ± 0.053	0.030 ± 0.013 0.031 ± 0.013
Caslano	0.116 ± 0.017 0.117 ± 0.019 0.121 ± 0.013 0.122 ± 0.010	0.0040 ± 0.0005	0.066 ± 0.008 0.049 ± 0.006	0.568 ± 0.063 0.417 ± 0.083	0.033 ± 0.003
Stabio	0.386 ± 0.052 0.430 ± 0.032 0.433 ± 0.028	0.0115 ± 0.0035 0.0136 ± 0.0006	0.200 ± 0.015 0.198 ± 0.012	0.517 ± 0.080 0.461 ± 0.045	0.027 ± 0.009 0.032 ± 0.003
moyenne				0.46 ± 0.06 (n=36)	0.029 ± 0.005 (n=25)

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.

L'activité en ^{241}Am est également quantifiable sur les filtres à air (Tableau 2). Le rapport isotopique $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ moyen de 0.45 ± 0.06 nBq/m³, proche de la valeur 0.46 obtenue cette année sur les sols de Suisse, confirme que ce radioélément provient également de la remise en suspension de particules de sol. Dans deux échantillons de filtres à air (Klingnau et Liebefeld, semestre II), ^{238}Pu était également quantifiable, avec un rapport $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0.040 et 0.036, soit proche de la valeur attendue de 0.029 pour les sols, confirmant la resuspension de particules de sol comme source de l'activité des filtres à air.

En 2019, l'OFSP a abandonné les collecteurs de bas débit, autrefois présents sur les sites de Mühleberg et de Leibstadt. Comme les années précédentes, le site de Posieux montre l'activité en Pu la plus élevée (1.21 nBq/m³). C'est aussi pour ce site que la quantité de cendres après calcination des filtres à air est la plus élevée (> 8 µg/m³). De manière similaire aux années précédentes, le site de Liebefeld présente une activité en Pu plus élevée lors du deuxième semestre, car le prélèvement est effectué principalement durant la saison sèche. La quantité de particules remises en suspension est de 6.7 µg/m³, contre seulement 5.9 µg/m³ pour la saison humide.

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 2018. L'activité en $^{239+240}\text{Pu}$ des eaux de surface n'a pas dépassé 7.0 mBq/m³ (Rhin, Pratteln). L'activité du ^{238}Pu est restée inférieure à la limite de détection dans tous les cas.

Dans les eaux souterraines, l'activité en Pu est restée inférieure à 3 mBq/m³. Toutefois, pour les eaux souterraines, seuls 105 litres ont été collectés, ce qui ne suffit en général pas à mesurer le Pu au-dessus de la limite de détection avec une méthode radiométrique comme la spectrométrie alpha (utilisée dans ce travail). De manière assez surprenante, ^{241}Am a pu être quantifié dans l'eau souterraine collectée à Pratteln, et avec une activité environ deux fois supérieure à celle des eaux de surface. Toutefois, les eaux souterraines sont prélevées ponctuellement, et l'activité mesurée n'est pas moyennée sur une période donnée.

D'une manière générale, les résultats montrent qu'il est nécessaire de prélever au moins 200 litres d'eau pour être en mesure de déterminer les activités en $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am avec une sensibilité suffisante pour des mesures par spectrométrie alpha. Nous recommandons ainsi qu'un volume d'au moins 200 litres soit collecté par site en 2020.

Tableau 2:

Activités (nBq/m³) en $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am des filtres à air de grands volumes collectés en 2019 en Suisse. Les filtres hebdomadaires sont rassemblés pour former un échantillon annuel pour les mesures de plutonium et d'américium, ou dans certains cas, un échantillon semestriel (incertitudes à 95%).

Lieu	Volume m ³	$^{239+240}\text{Pu}$ nBq/m ³	^{238}Pu nBq/m ³	^{241}Am nBq/m ³	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$
Klingnau	5'681'997	0.71 ± 0.07	0.029 ± 0.012	0.28 ± 0.05	0.40 ± 0.08
Posieux	4'820'667	1.21 ± 0.13	< 0.07	0.51 ± 0.07	0.42 ± 0.08
Liebefeld, semestre 1	3'791'161	0.57 ± 0.08	< 0.06	0.25 ± 0.06	0.44 ± 0.12
Liebefeld, semestre 2	3'999'703	1.36 ± 0.13	0.049 ± 0.023	0.72 ± 0.11	0.53 ± 0.10
				moyenne	0.45 ± 0.06

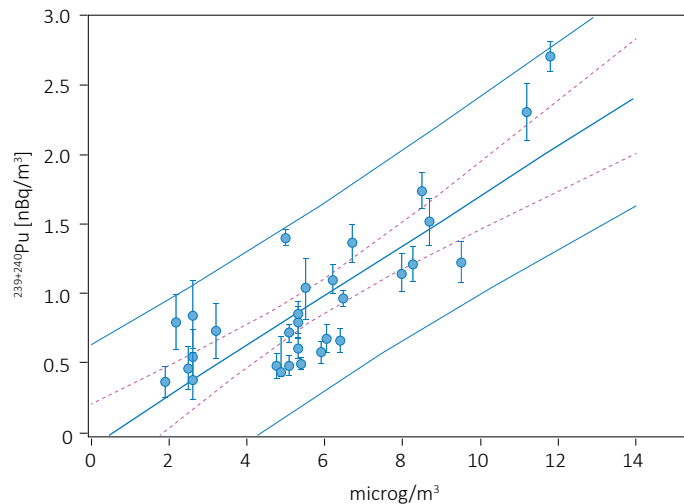


Figure 1 : Activité en $^{239+240}\text{Pu}$ des filtres à air (nBq/m³) en fonction de la quantité de cendres sur les filtres à air exprimée en µg/m³, pour les années 2014-2019 et différents sites du plateau suisse.

Tableau 3:

Activités (mBq/m³) en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am des eaux collectées en Suisse durant l'année 2019. (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, 26.09.2017-28.09.2018	240	1.6 ± 0.8	< LD	1.6 ± 0.5	1.00 ± 0.61
	Aar (Hagneck), janvier	205	6.6 ± 1.4	< LD	2.1 ± 0.8	0.32 ± 0.14
	Aar (Klingnau), mai-juin	360	1.7 ± 0.9	< LD	1.5 ± 0.7	0.89 ± 0.61
	Rhin (Pratteln), mars	205	7.0 ± 1.4	< LD	1.2 ± 0.5	0.18 ± 0.08
Eau souterraine	Aarberg, 06.11.2019	105	< 2	< 2	< 2	< LD
	Döttingen, 06.11.2019	110	< 1.5	< 1.5	< 1.3	< LD
	Pratteln, 06.11.2019	105	< 3	< 3	3.6 ± 1.2	< LD
Eau de pluie	Posieux	749	2.1 ± 0.5	< LD	n.m. ^{a)}	
	Mühleberg	802	1.5 ± 0.5	< LD	n.m. ^{a)}	
	Leibstadt	749	0.6 ± 0.3	< LD	n.m. ^{a)}	

^{a)} problème lors de l'électrodéposition des sources alpha

Tableau 4:

Activités (mBq/kg Matières Sèches - MS) en plutonium et américium de différents échantillons aquatiques prélevés en 2019 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), 06.11.2019	14	45 ± 9	< LD	11 ± 4	0.24 ± 0.10
	Aar (Klingnau), 06.11.2019	31	60 ± 9	< LD	21 ± 4	0.36 ± 0.09
	Rhin (Pratteln), 06.11.2019	20	46 ± 9	< LD	19 ± 4	0.39 ± 0.12
Sédiments	Aar (Hagneck), janvier	50	19.7 ± 3.3	< LD	9.3 ± 2.8	0.47 ± 0.16
	Aar (Klingnau), juin	50	63.8 ± 8.8	< LD	28.9 ± 7.0	0.45 ± 0.13
	Rhin (Pratteln), mai	50	29.2 ± 4.9	< LD	n.m.	
			38.0 ± 8.7	< LD	14.4 ± 4.5	0.38 ± 0.14
			50.3 ± 8.7	< LD	11.5 ± 3.4	0.22 ± 0.07
Poissons	Aar (Däniken), 14.08.2019	13	< LD			
	Rhin (Dogern), 17.07.2019	130	< LD	< LD	< LD	< LD
	Aar (Mühleberg), 19.05.2019	75	5.1 ± 1.5	< LD	< LD	< LD
	Aar (Bezau), 05.08.2019	115	< LD	< LD	1.4 ± 0.6	< LD
	Rhin (Leibstadt), 16.07.2019	100	< LD	< LD	< LD	< LD

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 plantes aquatiques et les sédiments (phase suspendue) de rivière. Les valeurs d'activité obtenues sont très proches de celles mesurées en 2018 pour ces deux types d'échantillons. Les rapports isotopiques ²⁴¹Am/²³⁹⁺²⁴⁰Pu observés sont proches de 0.40 (0.38, n=7), indiquant dans ce cas également une contribution très majoritaire des retombées des essais nucléaires des années soixante. Pour tous les échantillons, ²³⁸Pu est resté en dessous des limites de détection.

Dans les poissons, seules des traces de ²⁴¹Am (Bezau) et de ²³⁹⁺²⁴⁰Pu (Mühleberg) ont été mesurées. Il est essentiel d'augmenter la masse collectée si l'on désire pouvoir quantifier ces radioéléments dans tous les échantillons de poissons car, malgré des rendements chimiques supérieures à 80 % dans l'analyse de Am, seule une activité a pu être quantifiée.

Conclusions

Les mesures de Pu et Am effectuées dans ce travail ont montré la persistance, à un niveau d'activité très faible ($< 0.433 \text{ Bq/kg}$) 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 1.36 nBq/m^3 . Le rapport isotopique moyen $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ des filtres à air est identique à celui des sols, dans les limites des incertitudes de mesures, ce qui confirme que l'origine de la contamination est liée aux essais nucléaires des années soixante et à la remise en suspension de particules de sol. Ce fait est encore confirmé par la normalisation de l'activité des filtres à air par rapport à la masse de cendre obtenue après calcination des filtres. 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 7.0 mBq/m^3 . Pour ces mesures également, le rapport $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ indique les essais nucléaires des années soixante comme origine de la contamination. Les mesures confirment également qu'il est nécessaire de collecter plus de 200 litres 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 à l'exception de traces de ^{241}Am et Pu dans deux échantillons. 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 radio-toxiques. Une augmentation significative de ces radioéléments dans l'environnement, liée aux activités de l'industrie nucléaire, devrait être ainsi facilement détectée.

Remerciements

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

Références

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

Chapitre / Kapitel 8

Surveillance des installations nucléaires :
Emissions et Immissions
Überwachung der Kernanlagen :
Emissionen und Immissionen

2019

- Emissions et Immissions
- Dose locale et débit de dose local
- 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 2019 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr. Zusätzlich zum permanenten Probenahme- und Messprogramm wurde durch das PSI in den Jahren 2017 bis 2019 speziell für das KKM vor dessen Ausserbetriebnahme ein Spezialmessprogramm für Spezialnuklide wie ^{55}Fe , ^{63}Ni und Aktinide durchgeführt. Die Untersuchung zeigt, die radiologisch sehr geringe Belastung der Böden um das Kernkraftwerk Mühleberg.

Emissionen aus den Kernanlagen: Ergebnisse 2019

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 2019. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c gegeben. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für die meistbetroffenen Personen (nur Erwachsene) über die letzten 20 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 194 Proben eigene gammaspektrometrische Messungen durchgeführt (inkl. 10 Proben von 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 tritiumhaltiges Wasser bei den Abgaben erkennbar. Solche Abgaben sind bei den Druckwasserreaktoren

systembedingt erforderlich, um den operationellen Strahlenschutz während der Revision zu optimieren. Im Gegensatz zum KKG erfolgen die Tritiumabgaben im KKB über das ganze Jahr verteilt.

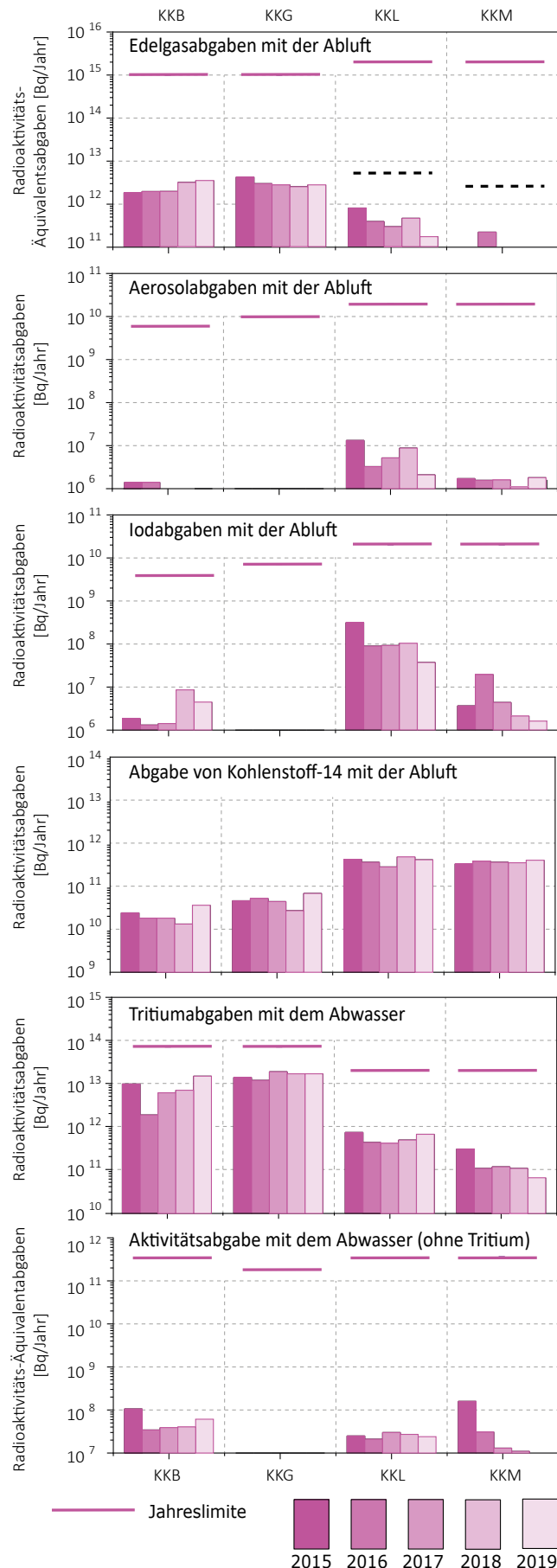
Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKB und KKG weniger als 0.001 mSv, bei KKL und KKM etwa 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2019 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 0.010 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen 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.

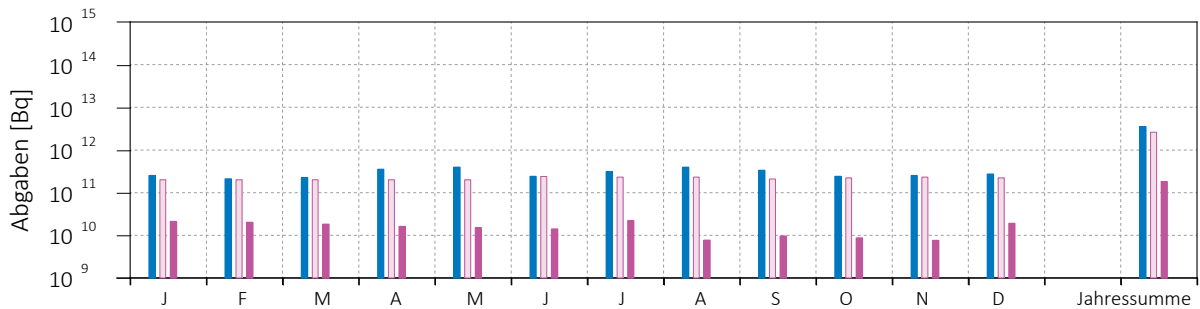
Die für das Jahr 2019 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

Fig 1.a:
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser ins Flusswasser in den letzten fünf Jahren (2015 bis 2019) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten.

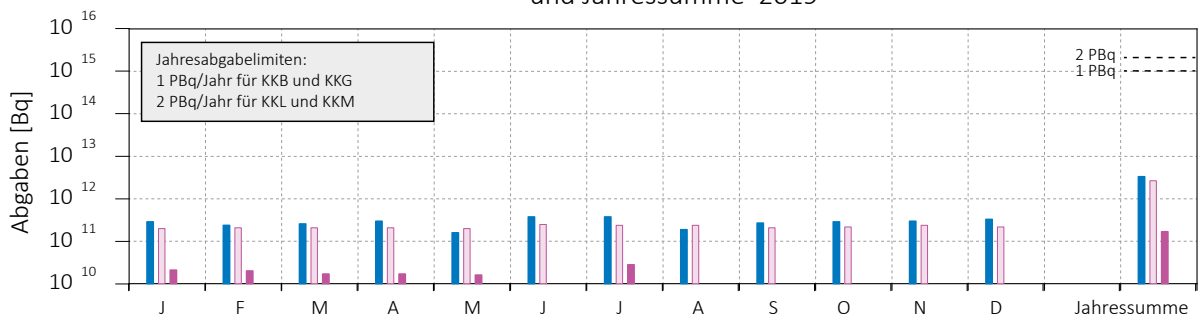
Angegeben ist für die jeweilige Nuklidgruppe und den Abgabepfad die Jahressumme der bei den einzelnen bilanzierenden Messungen durch die Kernkraftwerke ausgewiesenen Aktivitätsabgaben. Die Edelgasbilanzierung im KKB und im KKG basiert auf Beta-Totalmessungen. Für die Umrechnung in die für den Vergleich mit den Abgabelimiten notwendigen Edelgas-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. Die gestrichelten Linien bei KKL und KKM stellen eine abgeschätzte obere Grenze der tatsächlichen Abgaben dar, falls die Edelgasaktivitäten jeweils knapp unterhalb der Nachweisgrenze liegen würden..



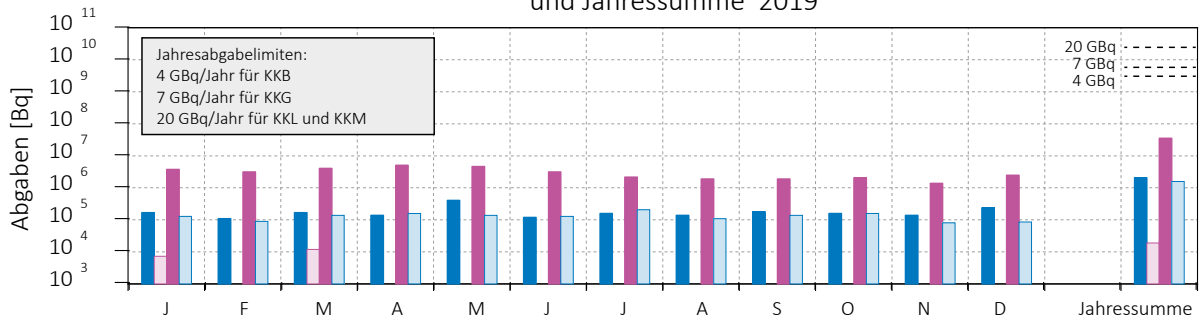
Monatliche **Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2019



Monatliche **Äquivalent-Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2019



Monatliche **Abgaben von Iod-131** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2019



Monatliche **Aerosolabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2019

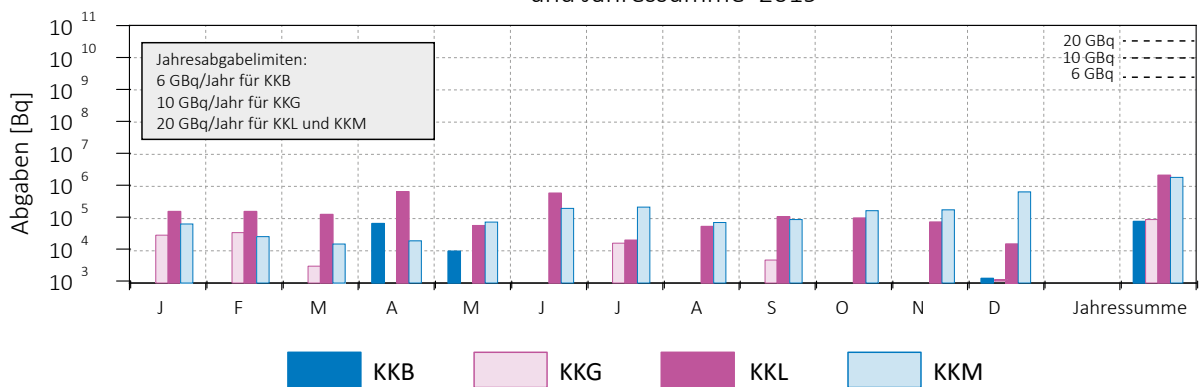


Fig 1.b (Teil 1):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2018 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.

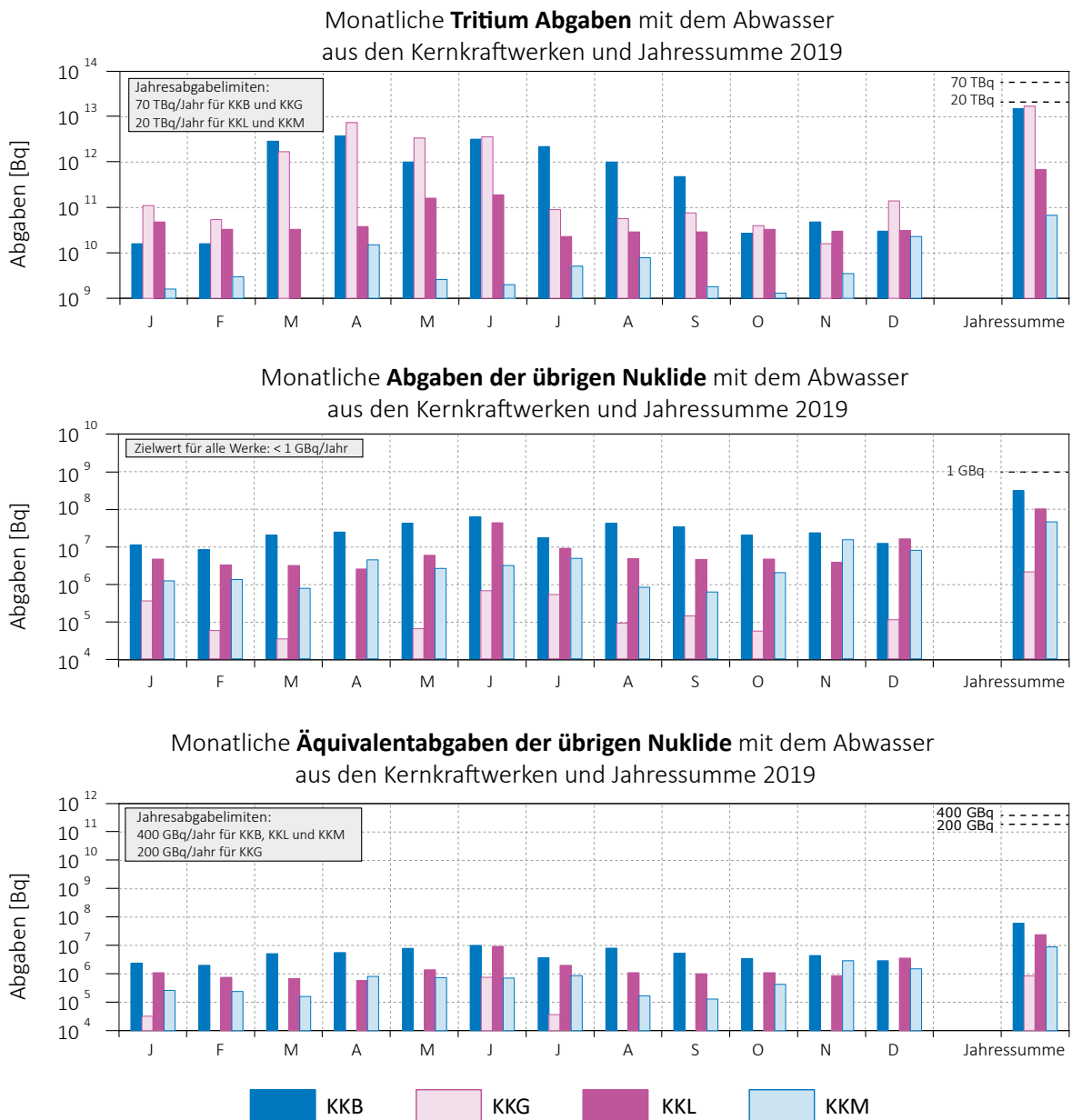
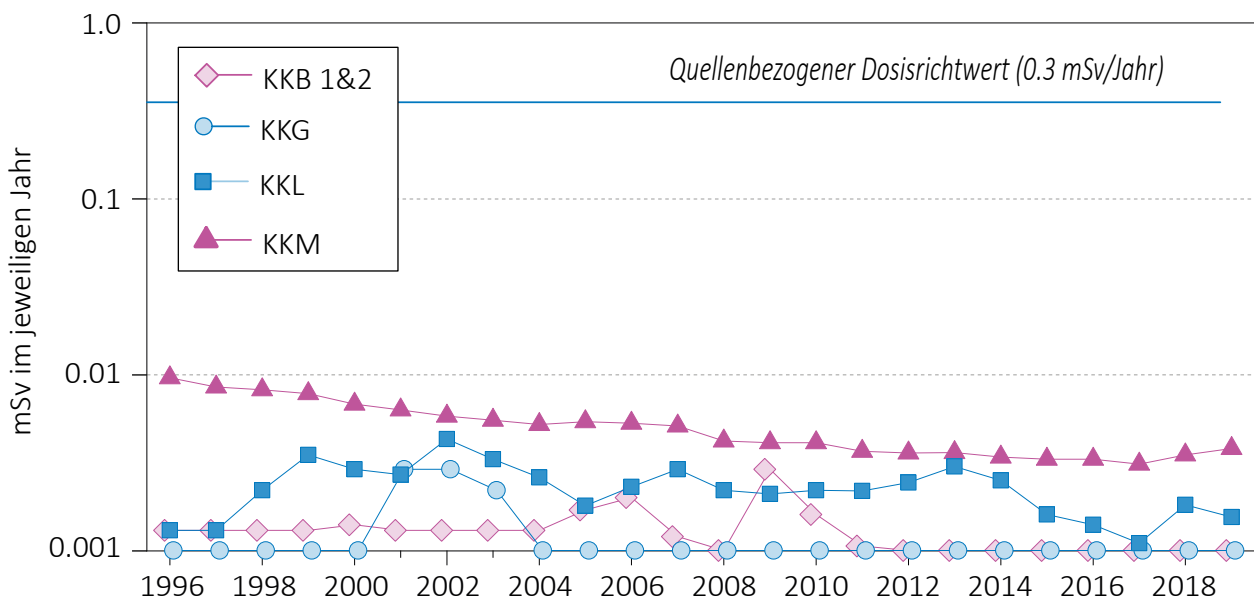


Fig 1.b (Teil 2):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2018 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 nicht dargestellt.

Anlage/Block	Betrieb 2019	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01-03.05; 09.06-31.12. Revisionsstillstand: 03.05-09.06.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01-10.08; 20.09-31.12. Revisionsstillstand: 10.08-20.09.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01-02.06; 23.06-31.12. Revisionsstillstand: 02.06-23.06.	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 01.01-03.06; 03.07-31.12. Revisionsstillstand: 03.06-03.07.	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Leistungsbetrieb: 01.01-20.12. Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019	Siedewasserreaktor	373 MW

Figur 3:

Betrieb der Kernanlagen 2019.

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2019 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	Normiert ^{1,2}	Limiten ⁴	Prozent der Limite	mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr		Erw.	10j Kind	1j Kind
KKB1 + KKB2	Abwasser 4'200 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.1·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.5·10 ¹³	1.5·10 ¹³	7·10 ¹³	21%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	3.4·10 ¹²	3.4·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	4.7·10 ⁵	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	2.1·10 ⁶	-	4·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.6·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0018
Dosis total						<0.001	<0.001	0.0018	
KKG	Abwasser 7'362 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.1·10 ⁶	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.7·10 ¹³	1.7·10 ¹³	7·10 ¹³	25 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<2.6·10 ¹²	<2.7·10 ¹²	1·10 ¹⁵	<0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	9.1·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	1.9·10 ⁴	-	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	6.8·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001	
KKL	Abwasser 13'746 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.0·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	6.8·10 ¹¹	6.8·10 ¹¹	2·10 ¹³	4 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	1.8·10 ¹¹	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	4.9·10 ⁵	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	3.6·10 ⁷	3.6·10 ⁷	2·10 ¹⁰	0.2 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.1·10 ¹¹	-	-	-	0.0016	0.0021	0.0035
Dosis total						0.0016	0.0021	0.0035	
KKM	Abwasser 1'483 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.5·10 ⁷	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	6.7·10 ¹⁰	6.7·10 ¹⁰	2·10 ¹³	0.4%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	-	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.8·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0024	0.0024	0.0023
		Iod: ¹³¹ I	1.6·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.0·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	0.0013	0.0022
Dosis total						0.0034	0.0037	0.0045	
ZZL	Abwasser 307 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.1·10 ⁸	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.9·10 ⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-γ-Aerosole	2.5·10 ⁵	-	1·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	9.9·10 ³	-	3·10 ⁷	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.8·10 ⁸	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.9·10 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 2019 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	4.1·10 ¹¹	-	-	-	-
β/γ-Aerosole, ohne Iod	7.4·10 ⁵	-	-	-	2.2·10 ⁴
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	4.7·10 ⁴	-	-	-	-
Tritium als HTO	2.3·10 ¹⁰	-	-	1.3·10 ¹⁰	6.6·10 ⁹
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	1.8·10 ⁸	9.7·10 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 1075 m ³	Abluft	Aequivalentabgaben
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	6.5·10 ⁷	-	1.8·10 ⁷
Tritium	-	-	-	3.6·10 ¹⁰	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	2.4·10 ¹⁴	4.1·10 ¹⁰	-	-	2.4·10 ¹⁴	1.0·10 ¹⁵
β/γ-Aerosole, ohne Iod	1.2·10 ¹⁰	1.0·10 ⁷	7.6·10 ³	-	1.1·10 ¹⁰	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	1.4·10 ⁸	-	-	-	1.4·10 ⁸	8.2·10 ⁷
Tritium als HTO	3.1·10 ¹²	-	-	-	3.1·10 ¹²	-
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	-	1.9·10 ⁸	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.010	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.010	
Kind 10j	0.010	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.010	
Kleinkinder	0.010	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.010	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	6.7 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%		< 7.0%

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2019:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid β/γ-Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
³ H	1.5·10 ¹³	1.7·10 ¹³	6.8·10 ¹¹	6.7·10 ¹⁰	2.6·10 ¹⁰	4.9·10 ⁹
²² Na					1.5·10 ⁵	3.4·10 ⁵
²⁴ Na	4.1·10 ⁶					4.9·10 ⁴
⁵⁴ Mn	3.0·10 ⁶		4.0·10 ⁶	6.3·10 ⁶	1.6·10 ⁵	4.1·10 ⁵
⁵⁷ Co		2.5·10 ⁴			3.2·10 ⁴	
⁵⁸ Co	1.5·10 ⁷		1.8·10 ⁶	2.5·10 ⁶		2.1·10 ⁴
⁶⁰ Co	7.4·10 ⁷		9.8·10 ⁷	3.3·10 ⁷	3.3·10 ⁵	9.4·10 ⁶
⁶⁵ Zn	4.1·10 ⁴			2.1·10 ⁶	3.2·10 ⁴	
^{69m} Zn		3.8·10 ⁴				
⁸⁹ Sr	5.5·10 ⁵		1.0·10 ⁵	1.2·10 ⁵		
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1.0·10 ⁶	5.7·10 ⁵		1.9·10 ⁵	7.0·10 ⁶	7.8·10 ⁴
⁹⁹ Mo	2.8·10 ⁴					
^{99m} Tc	3.0·10 ⁴				1.6·10 ³	
¹⁰³ Ru	7.3·10 ⁴					
^{110m} Ag	4.9·10 ⁶					
¹¹¹ In					1.5·10 ⁴	
¹²² Sb	2.5·10 ⁶					
¹²⁴ Sb	8.7·10 ⁷					3.1·10 ⁶
¹²⁵ Sb	2.4·10 ⁷					3.2·10 ⁷
^{123m} Te	1.5·10 ⁷	1.5·10 ⁶				
¹³² Te	1.2·10 ⁶					
¹²⁵ I					6.5·10 ³	
¹³¹ I	3.4·10 ⁶					
¹³³ I	4.5·10 ⁵					
¹³³ Ba					3.4·10 ³	
¹³⁴ Cs	7.8·10 ⁵				1.1·10 ⁵	3.5·10 ⁶
¹³⁷ Cs	7.7·10 ⁷	3.2·10 ⁴		6.8·10 ⁵	2.0·10 ⁷	2.6·10 ⁸
¹⁴¹ Ce	2.2·10 ⁴					
¹⁶¹ Tb					9.5·10 ⁶	
¹⁷² Lu					2.0·10 ⁴	
¹⁷³ Lu					8.3·10 ³	
¹⁷⁷ Lu					2.3·10 ⁷	
²⁰⁷ Pb					4.0·10 ³	
α-Strahler	*)	< 8.7·10⁴	9.5·10⁴	6.3·10⁵		*)
^{234/238} U					3.7·10 ⁴	
^{239/240} Pu	5.5·10 ⁴				1.8·10 ⁴	
²³⁸ Pu/ ²⁴¹ Am	1.9·10 ⁵				1.8·10 ⁴	
²³⁹ Np						
²⁴² Cm	1.1·10 ⁴					
^{243/244} Cm	4.2·10 ⁵					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2018 bis und mit dem 3. Quartal 2019

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft (Gase, Edelgase und Iod) 2019:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]						
	β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase, Edelgase							
Tritium		6.0·10 ¹¹	6.1·10 ¹¹	5.3·10 ¹¹	4.3·10 ¹⁰	3.1·10 ¹²	1.9·10 ⁹
¹⁴ C (CO ₂)		3.6·10 ¹⁰	6.8·10 ¹⁰	4.1·10 ¹¹	4.0·10 ¹¹	1.9·10 ⁸	4.8·10 ⁸
¹¹ C						3.8·10 ¹³	
¹³ N						3.9·10 ¹³	
¹⁵ O						1.6·10 ¹⁴	
¹⁸ F						1.2·10 ¹²	
²⁴ Ne						9.0·10 ⁹	
⁴¹ Ar						5.7·10 ¹²	
⁸⁵ Kr						4.1·10 ¹¹	
^{85m} Kr		1.2·10 ¹¹					
⁸⁸ Kr		2.2·10 ¹¹					
¹³³ Xe		1.7·10 ¹²		4.1·10 ¹⁰			
¹³⁵ Xe		1.4·10 ¹²		8.1·10 ¹⁰			
^{135m} Xe				5.6·10 ¹⁰			
EG-Aequiv.							
EG: β-total			< 2.6·10 ¹²				
Andere							
Iod							
¹²³ I						2.4·10 ⁷	
¹²⁵ I						1.2·10 ⁸	
¹³¹ I		2.1·10 ⁶	1.9·10 ⁴	3.8·10 ⁷	1.6·10 ⁶		
¹³³ I		1.2·10 ⁷					

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

Abwasser: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-Immissionsgrenzwert für Gewässer (IG_{Gw,ref}-Wert) von 10 Bq/l angegeben. Die Berechnung der IG_{Gw}-Werte für die einzelnen Nuklide ist dem Anhang 7 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Die unnormierte Summe der Abwasserabgaben ist in der Spalte «Messung» angegeben.

Edelgase: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-Immissionsgrenzwert für die Luft (IG_{Lf,ref}-Wert) von 2·10³ Bq/m³ angegeben. Die Berechnung der IG_{Lf}-Werte für die Edelgasnuklide ist dem Anhang 7 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Die unnormierte Summe der Edelgasabgaben ist in der Spalte «Messung» angegeben.

Beim KKG wird für die Bilanzierung der Edelgase eine β-total-Messung durchgeführt; für die Aequivalent-Umrechnung wurde in diesem Fall ein Gemisch von 80 % ¹³³Xe, 10 % ¹³⁵Xe und 10 % ⁸⁸Kr angenommen.

Gase : Beim PSI handelt es sich dabei vorwiegend um die Nuklide ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O und ⁴¹Ar. Deren Halbwertszeiten sind kleiner als zwei Stunden. Hier ist für die einzelnen Abgabestellen und das gesamte PSI die Summe der Radioaktivität dieser Gase und Edelgase ohne Normierung auf einen Referenzwert angegeben. Für die Gesamtanlage wird zusätzlich auch die auf den Referenz-IG_{Lf,ref}-Wert von 2·10³ Bq/m³ normierte Abgabe aufgeführt.

Aerosole: Hier ist in jedem Fall die Summe der Radioaktivität ohne Normierung auf einen Referenzwert angegeben. Der Dosisbeitrag von Aerosolen mit Halbwertszeiten kleiner 8 Tagen ist bei den Kernkraftwerken vernachlässigbar.

Beim KKM ergibt sich der Hauptbeitrag zur Dosis durch die Strahlung der abgelagerten Aerosole, die im Jahre 1986 durch eine unkontrollierte Abgabe in die Umgebung gelangten. Die Abnahme des dadurch verursachten Dosisbeitrags über die Jahre ist in der Figur 2 deutlich erkennbar. Der leichte Anstieg in 2018 ist auf die Einführung neuer Dosisfaktoren für die externe Bodenstrahlung zurückzuführen. Der Dosisbeitrag der Aerosole, welche im Berichtsjahr abgegeben wurden, ist demgegenüber vernachlässigbar und liegt in der Grössenordnung der anderen schweizerischen Kernkraftwerke.

Iod : Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von ¹³¹I limitiert; somit ist bei den bilanzierten Abgaben nur dieses Iod-Isotop angegeben.

Beim PSI, bei dem andere Iod-Isotope nachgewiesen werden, ist die Abgabe für die einzelnen Abgabestellen und die Gesamtanlage als Summe der Aktivität der gemessenen Iod-Nuklide angegeben. Für die Gesamtabgabe wird zudem auch ein ¹³¹Iod-Aequivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben, wobei sich der Gewichtungsfaktor aus dem Verhältnis des Ingestionsdosisfaktors des jeweiligen Nuklides zum Ingestionsdosisfaktor von ¹³¹I ergibt. Die Ingestionsdosisfaktoren sind der StSV entnommen. Für die Berechnung der Jahresdosis werden sowohl für die KKW wie für das PSI immer sämtliche verfügbaren Iod-Messungen verwendet, d.h. es ist beispielsweise für KKB auch der Beitrag von ¹³³I berücksichtigt.

Kohlenstoff ^{14}C : In den Tabellen ist der als Kohlendioxid vorliegende Anteil des ^{14}C , der für die Dosis relevant ist, angegeben. Die für ^{14}C angegebenen Werte basieren bei allen Werken auf aktuellen Messungen.

[2] Die **Messung der Abgaben** erfolgt nach den Erfordernissen der Reglemente «für die Abgaben radioaktiver Stoffe und die Überwachung von Radioaktivität und Direktstrahlung in der Umgebung des...» jeweiligen Kernkraftwerkes resp. des ZZL oder PSI. Die Messgenauigkeit beträgt ca. $\pm 50\%$. Abgaben unterhalb 0.1% der Jahresabgabelimite werden vom ENSI als nicht-relevant betrachtet und werden in der Spalte «Normiert» nicht ausgewiesen (-). Abgaben kleiner als 1'000 Bq werden in der Tabelle 3 nicht aufgeführt.

[3] Die **Jahresdosis** ist für Personen berechnet, die 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- entsprechend einer Dosis, die durch natürliche externe Strahlung in ca. zehn Stunden akkumuliert wird- werden in der Regel nicht angegeben. Beim PSI wird die Jahresdosis der Gesamtanlage als Summe über die Abgabestellen gebildet.

[4] **Abgabelimite** gemäss Bewilligung der jeweiligen Kernanlage. Die Abgabelimite wurden so festgelegt, dass die Jahresdosis für Personen in der Umgebung (vgl. Fussnote 3) für die Kernkraftwerke unter 0.3 mSv/Jahr respektive das Zentrale Zwischenlager in Würenlingen (ZZL) unter 0.05 mSv pro Jahr bleibt. Für das Paul Scherrer Institut (PSI) sind die Abgaben gemäss Bewilligung 6/2013 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv pro Jahr limitiert.

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2019:
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
^7Be					$3.6 \cdot 10^5$	
^{24}Na					$1.9 \cdot 10^8$	
^{38}S					$1.7 \cdot 10^8$	
^{39}Cl					$4.4 \cdot 10^9$	
^{51}Cr		$4.6 \cdot 10^4$		$2.5 \cdot 10^5$		
^{54}Mn				$1.9 \cdot 10^5$		
^{57}Co		$4.6 \cdot 10^3$				
^{58}Co			$3.7 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^5$		
^{59}Fe				$6.5 \cdot 10^3$		
^{60}Co	$6.8 \cdot 10^4$		$4.6 \cdot 10^5$	$5.8 \cdot 10^5$	$8.9 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^3$
^{65}Zn				$1.1 \cdot 10^5$		
^{77}Br					$3.3 \cdot 10^6$	
$^{80\text{m}}\text{Br}$					$1.8 \cdot 10^8$	
^{82}Br					$7.8 \cdot 10^8$	
^{89}Sr			$1.4 \cdot 10^5$			
^{90}Sr						
$^{99\text{m}}\text{Tc}$					$7.4 \cdot 10^5$	
^{103}Ru	$4.0 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$				
^{121}Te					$4.7 \cdot 10^4$	
$^{123\text{m}}\text{Te}$		$3.0 \cdot 10^3$				
^{125}Sb				$5.0 \cdot 10^5$		
^{131}I (Aerosol)			$1.6 \cdot 10^6$			
^{134}Cs						
^{137}Cs	$6.9 \cdot 10^3$			$3.8 \cdot 10^3$		$2.3 \cdot 10^3$
^{141}Ce		$3.3 \cdot 10^3$				
^{144}Ce		$3.2 \cdot 10^4$				
^{181}Re					$6.8 \cdot 10^7$	
^{182}Re					$4.0 \cdot 10^8$	
$^{182\text{m}}\text{Re}$					$5.1 \cdot 10^5$	
^{183}Re					$9.4 \cdot 10^6$	
^{182}Os					$2.2 \cdot 10^8$	
^{183}Os					$2.5 \cdot 10^8$	
$^{183\text{m}}\text{Os}$					$1.8 \cdot 10^8$	
^{185}Os					$1.6 \cdot 10^7$	
^{191}Os	$3.9 \cdot 10^5$					
^{191}Pt					$1.5 \cdot 10^7$	
^{192}Au					$2.4 \cdot 10^9$	
^{193}Au					$3.5 \cdot 10^8$	
^{194}Au					$4.3 \cdot 10^4$	
^{192}Hg					$2.0 \cdot 10^9$	
$^{193\text{m}}\text{Hg}$					$3.2 \cdot 10^8$	
^{194}Hg					$4.3 \cdot 10^4$	
^{195}Hg					$2.1 \cdot 10^9$	
$^{195\text{m}}\text{Hg}$					$1.4 \cdot 10^8$	
$^{197\text{m}}\text{Hg}$					$1.6 \cdot 10^8$	
^{203}Hg					$8.5 \cdot 10^6$	
Nicht spezifizerte						$2.5 \cdot 10^5$
α -Aerosole	$3.9 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^4$	$3.8 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^4$		$9.9 \cdot 10^3$

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 2019

Die Ortsdosisleistung ist im Nahbereich (beispielsweise am Arealzaun) der Siedewasserreaktoren in Mühleberg und 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.

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen etwa $0.08 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.22 \mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 1.2 mSv resultieren. Die vom KKM ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben für das Berichtsjahr nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von ca. 0.7 mSv eine Dosiserhöhung von etwa 1.3 mSv.

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.19 \mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 1.1 mSv pro Jahr. Die höchste, mit den EDIS (Environmental Direct Ion Storage-Dosimeter) am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) beträgt 1.2 mSv.

Auf Grund der stichprobenweise vom ENSI gemessenen Ortsdosisleistung am Zaun des Paul Scherrer Instituts, Areal Ost ergibt sich hochgerechnet auf ein Jahr eine Ortsdosis (nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) von 0.3 mSv. Im Jahr 2019 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes ca. 0.2 mSv.

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

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.

Spezialnuklide in Böden in der Umgebung des KKM

In seinem Gutachten zum Stilllegungsprojekt des KKM sah das ENSI in Absprache mit dem BAG für den Zeitraum von drei Jahren vor Beginn der Stilllegungsarbeiten eine Erweiterung des existierenden Messprogramms in der Umgebung des KKM für Spezialnuklide wie ^{55}Fe , ^{63}Ni , ^{90}Sr und Aktiniden (Umgebungsüberwachungsprogramm plus) zur Ermittlung des Zustandes vor Aufnahme der Stilllegungsarbeiten vor. Dieses erweiterte Messprogramm wurde in den Jahren 2017 bis 2019 im Auftrag des ENSI durch die Radioanalytik des Paul Scherrer Instituts (PSI) durchgeführt. Dabei wurden sechs Standorte in der Umgebung des Kernkraftwerks Mühleberg sowohl gammaspektrometrisch wie hinsichtlich der genannten Spezialnuklide (^{55}Fe , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu und ^{241}Am) halbjährlich beprobt und untersucht. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und der Messresultate kommt das PSI zu folgenden Schlussfolgerungen:

«Es zeigte sich, dass die Böden rund um das Kernkraftwerk Mühleberg radiologisch sehr sauber sind. Kurzlebige Nuklide wie das ^{134}Cs (Anm.: aus dem Chernobyl-Reaktorunfall) sind praktisch komplett abgeklungen, das Niveau der Aktinide wie Pu-Isotope ist allgemein tief und die ^{90}Sr Messwerte nähern sich ebenfalls den Nachweisgrenzen. Sogar ^{137}Cs ist im Mittel nur noch mit 6 Bq/kg präsent.

Aus den Auswertungen der Isotopenverhältnisse wird plausibel, dass die gefundenen Aktinide auf die atmosphärischen Kernwaffentests zurückzuführen sind und die geringen Mengen an ^{137}Cs und das teilweise gefundene ^{90}Sr sehr wahrscheinlich noch aus dem Chernobyl-Reaktorunfall stammen. Derart tiefe Spuren von künstlichen Nukliden bilden ein sehr tiefes Hintergrundniveau, vor dem bereits geringfügige zusätzliche radiologische Immissionen (Anm. während des Rückbaus des KKM) zu messen sein würden.

Es konnten bei den untersuchten Nukliden keine Hinweise auf jüngere Immissionen von Aktiniden oder Spaltprodukten gefunden werden und auch keine Hinweise auf einen lokalen Einfluss durch den Betrieb des Kernkraftwerks Mühleberg. Dies stimmt mit der laufenden Überwachung anderer Kernkraftwerke in der Schweiz überein. Während die Kraftwerke im Rahmen ihrer Eigen- und Fremdüberwachung ihre Emissionen fortlaufend messen und auch publizieren, sind auf der Immissionsseite in den Böden keine messbaren Einflüsse im Vergleich zu Standorten fernab der Kernkraftwerke festzustellen.»

Die vom PSI zusammengestellten Resultate geben zusätzlich zum routinemässigen Umgebungsüberwachungsprogramm des BAG einen sehr guten Überblick über den radiologischen Zustand der Umgebung des KKM vor der Aufnahme der Stilllegungsarbeiten und können bei Verdacht auf allfällige Abgaben während der Arbeiten als Referenz herangezogen werden. Die detaillierten Resultate des PSI werden zusammen mit weiteren Resultaten der anderen Stellen, die am Messprogramm ebenfalls beteiligt waren, in einem separaten Bericht bis Ende 2020 veröffentlicht.

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

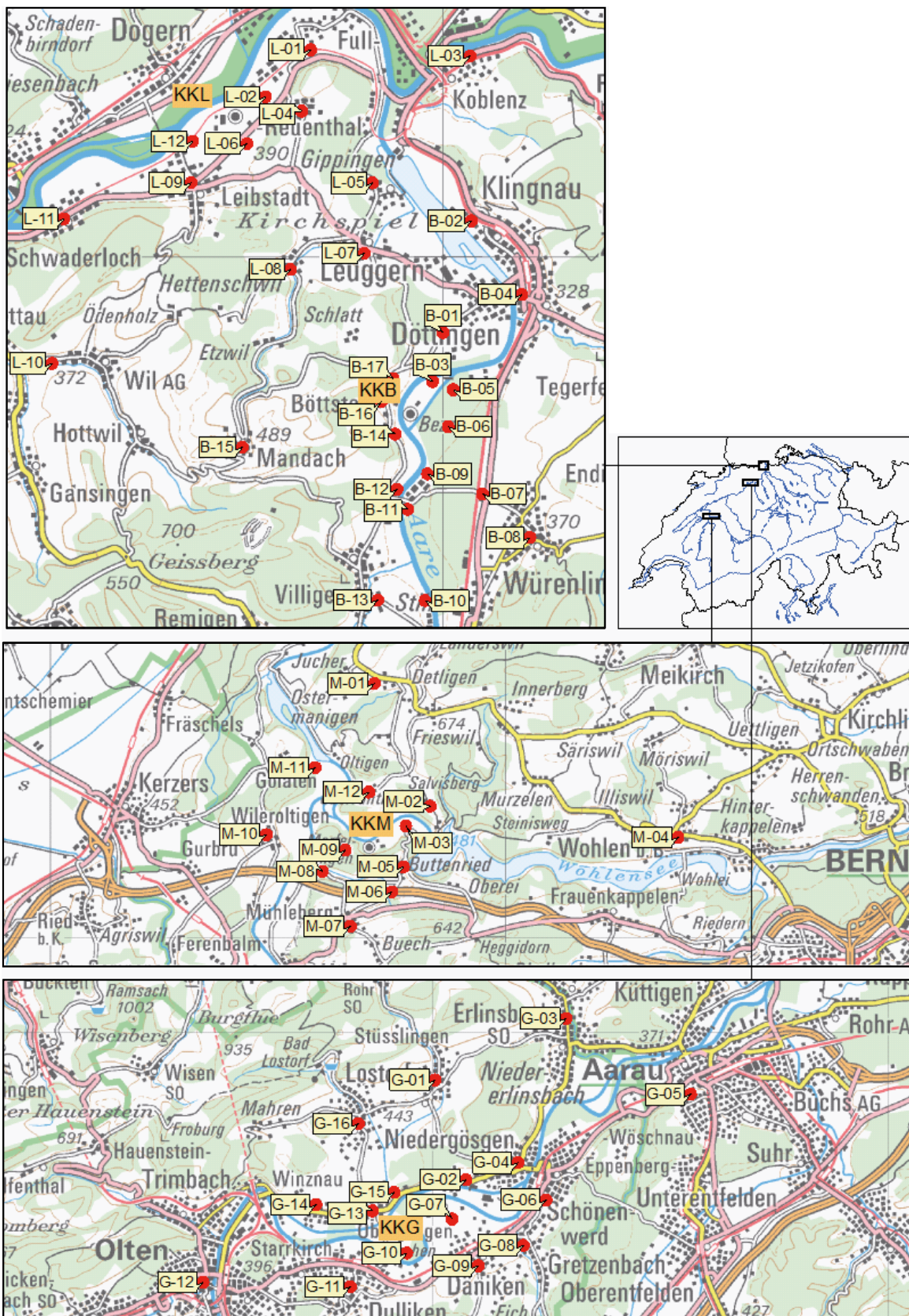
Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und zur Schaffung von Transparenz gegenüber der 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 2019 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren bis auf eine Ausnahme (Station B-12) auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Bei der Station B-12, die sich beim Paul Scherrer Institut befindet, wurde am 30. Juli um 07:40 Uhr eine einzelne Schwellwertverletzung registriert. An der Meteostation am PSI wurde zu diesem Zeitpunkt kein Niederschlag registriert. Der erhöhte Messwert ist sehr wahrscheinlich auf Emissionen aus der Fortluftanlage des PSI West zurückzuführen, die bei bestimmten Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung an den Stationen B-11 und B-12 gemessen werden können.

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 dem ENSI automatisch gemeldet werden. Bei einem Störfall unterstützt MADUK die Notfallorganisation bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke (Figur 1). 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).



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

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. Des Weiteren sorgen verschiedene Subsysteme für den Datenaustausch mit externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM (Notfallwerkzeug zur Analyse der Anlageparameter) und JRODOS/LASAT (Notfallwerkzeug zur Dosisprognose in der Umgebung) im ENSI.

Die Daten von MADUK können mittels einer speziellen Software auf bestimmten Windows-Arbeitsplatzrechnern im ENSI und in den Kernkraftwerken visualisiert werden. Auf der Internetseite www.ensi.ch unter Notfallschutz/Messwerte Radioaktivität sind alle seit 1994 archivierten Tages-, Stunden- und Zehnminutenmittelwerte der MADUK Stationen abrufbar.

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahr 2019 wurden Erweiterungen beim Treiber für die Übernahme der Ausbreitungsrechnungen von JRODOS vorgenommen, um den Notfallschutzpartnern zusätzliche Informationen zur Verfügung stellen zu können. Bei den ANPA-/EMI-Daten wurden die übertragenen Parameter um Temperatur und Füllstand der Brennelementelagerbecken erweitert.

Im zweiten Quartal wurden die Prüfmuster der neuen Messsonden geliefert. Diese wurden auf die Einhaltung der Spezifikationen getestet. Gleichzeitig wurden die Messwertzentralen für die neuen Messsonden eingerichtet und im Zusammenspiel mit den Prüfmustern erfolgreich in Betrieb genommen. Ende November konnte die Freigabe für die Serienproduktion der Messsonden erfolgen. Die Prüfmuster wurden durch das METAS erfolgreich geeicht. Die erste Teillieferung der Messsonden ist für das erste Quartal 2020 vorgesehen. Ende 2019 ging auch noch der Treiber für die Übernahme der Messdaten in das bestehende MADUK-System in den Probetrieb.

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.

Tabelle 1:

Auflistung der Störungen bei den MADUK-Messstationen.

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
G-03	154.3	154.3	Defektes Netzteil
L-11	101.5	25.0	Defektes Netzkabel aufgrund Umbauarbeiten
B-01	93.0	14.5	Defektes Netzteil
G-09	128.7	55.5	Umbau am Standort
G-05	13.5	13.5	Defekte Messsonde
L-04	90.0	90.0	Defekte Messsonde
B-06	15.0	15.0	Blockierter Datenlogger
L-06	11.0	11.0	Arbeiten am Stromnetz
M-08	130.3	130.3	Defekte Messsonde

Die permanente Übertragung der Anlageparameter erreichte insgesamt wiederum eine hohe Verfügbarkeit. Im Berichtsjahr führten geplante Unterhaltsarbeiten seitens der Werke zu einem Unterbruch von 34.8 Stunden bei KKL. Ein Konfigurationsfehler bei der Integration neuer Datenpunkte für KKM führte auf Seiten des ENSI zu einem Unterbruch von 1.6 Stunden. Bei KKG wurden sieben Unterbrüche länger als eine Stunde registriert mit einer Gesamtdauer von 11.2 Stunden. Keiner der Unterbrüche dauerte länger als drei Stunden.

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Störungen an den Messstationen mit Störungsdauer, permanentem Datenverlust und Ursache der Störung.

Die Stationselektronik lief auch im 2019 grösstenteils zuverlässig. Die Station G-03 fiel aufgrund eines defekten Netzteils über die Weihnachtstage und Neujahr 2018/2019 aus. Die Reparatur konnte erst anfangs Januar 2019 ausgeführt werden. Es verbleibt eine Datenlücke von 154.3 Stunden im Jahr 2019.

2019 waren wiederum diverse Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen von insgesamt 1'486.8 Stunden zu verzeichnen, deren Ursachen nicht immer festgestellt werden konnten. Davon entfielen 1'407.7 Stunden auf die Station L-11. Dort wurde im Zuge der Abschaltung des analogen Telefonnetzes auf einen Router via Mobilfunknetz migriert. Wie sich im Betrieb zeigte, war das Mobilfunksignal aber häufig für einen stabilen Betrieb zu schwach. Deshalb wurde anfangs Dezember die Station wieder auf einen Festnetzanschluss migriert. Eine Störung beim Provider führte bei den Stationen L-06 und L-12 zu einem Kommunikationsunterbruch von 1.5 Stunden. Bei den Stationen B-14, B-16, B-17, L-10 und M-10 waren Unterbrüche unbekannter Ursache von insgesamt 13.1 Stunden zu verzeichnen. Ein umgestürzter Baum beschädigte die Kommunikationsleitung der Station B-14. Die Reparatur konnte nach 41.5 Stunden abgeschlossen werden. Eine Störung in der Infrastruktur des Providers führte zu Kommunikationsunterbrüchen bei B-07 von 3.7 Stunden, bei B-17 von 3.3 Stunden und bei L-11 von 3.2 Stunden. Ein Stromausfall in Böttstein verursachte Unterbrüche zu den Stationen B-14, B-16 und B-17 während 2 Stunden. Bei allen Kommunikationsstörungen konnten die Daten nachträglich lückenlos archiviert werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.6% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.98%.

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. Die wesentlichen qualitätssichernden Massnahmen werden im Folgenden beschrieben.

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Ansprechvermögen der Sonden wird zwischen den Eichungen mit halbjährlichen Funktionstests geprüft. Bei den Funktionstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer ^{137}Cs -Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten produziert und mit Sollwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunktionskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellenwerten benutzt. Im Jahr 2019 wurden an jeder Sonde zwei Funktionsprüfungen durchgeführt. Bei den Funktionsprüfungen erfüllten alle Sonden, inklusive die Reservesonden, die Prüfkriterien.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme wurden auch im Jahr 2019 Messungen mittels In-Situ-Gammaspektrometrie bei den Sonden der Messringe Gösgen und Leibstadt durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre. Ausser ^{137}Cs vom Fallout der Atombombentests und des Tschernobyl-Unfalls konnten keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen werden.

Messergebnisse

Im Jahr 2019 wurden insgesamt 13 Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h registriert (Tabelle 2). Davon waren 12 aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen

Tabelle 2:

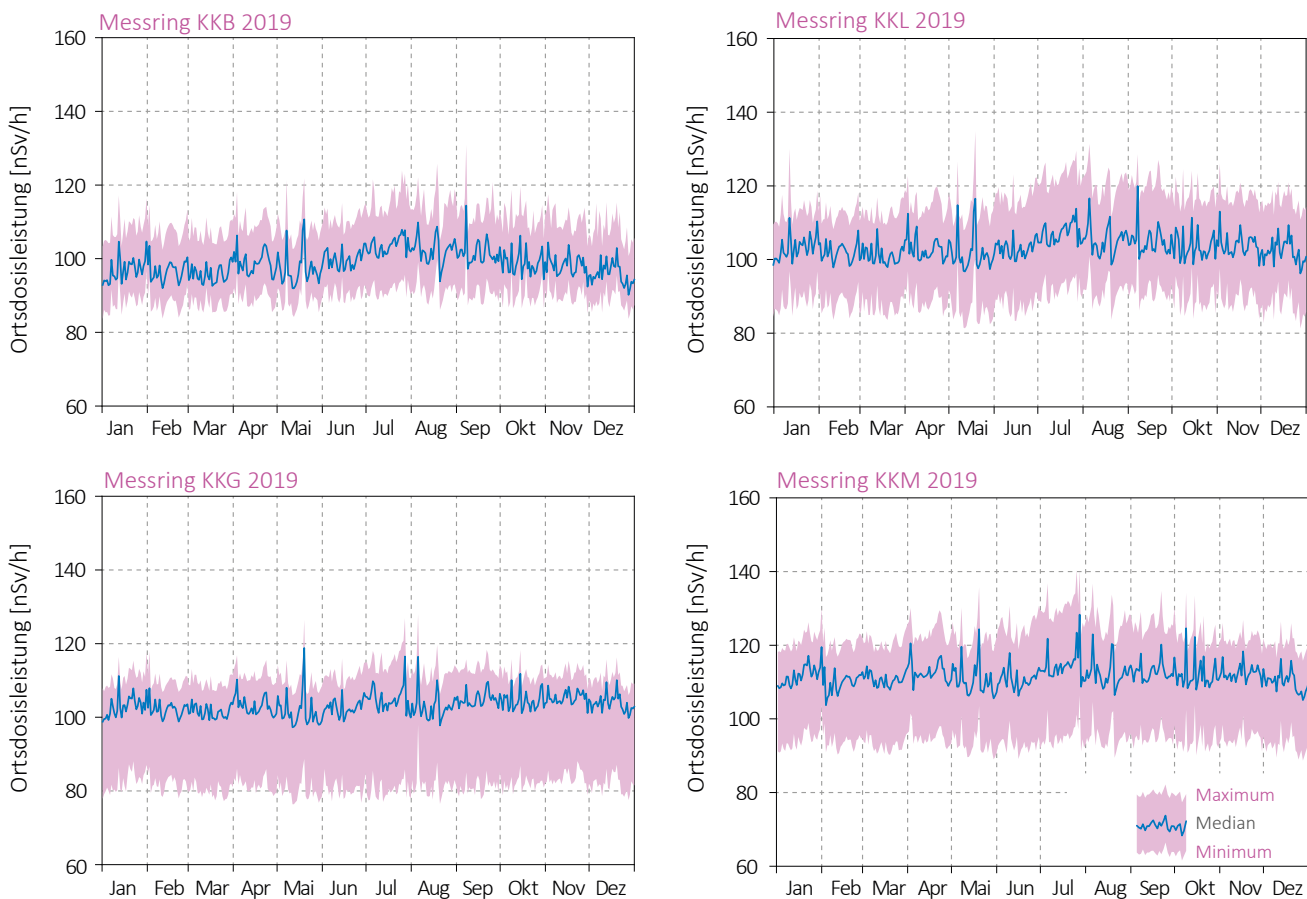
Auflistung der Nettodosisleistungsschwellenwertüberschreitungen im Jahr 2019.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
07.01.2019 07:50	L-02	1.2	61	158
10.05.2019 21:30	B-02	0.2	51	152
28.07.2019 03:20	M-01	0.2	51	180
28.07.2019 05:10	L-06	0.5	54	161
28.07.2019 05:20	G-10	0.2	52	160
28.07.2019 05:50	L-12	0.2	52	164
28.07.2019 06:50	G-15	0.5	68	161
28.07.2019 07:10	G-07	0.2	51	193
30.07.2019 07:40	B-12	0.2	53	159
30.07.2019 20:40	M-01	0.2	53	167
10.08.2019 05:30	G-08	0.2	50	169
20.08.2019 18:20	L-06	0.7	64	195
20.08.2019 18:30	L-02	0.2	61	183

Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen. Zum Zeitpunkt der Erhöhung bei der Station B-12 am 30. Juli um 07:40 Uhr zeichnete die Niederschlagsmessung am Standort PSI keinen Niederschlag auf. Die Station B-11, welche sich ebenfalls auf dem PSI-Areal befindet, zeigte zum Zeitpunkt der Schwellenwertverletzung keine Erhöhung der Messwerte. Der erhöhte Messwert ist sehr wahrscheinlich auf Emissionen aus der Fortluftanlage des PSI West zurückzuführen, die bei bestimmten Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung an den Stationen B-11 und B-12 gemessen werden können. Auf Grund fehlender Messwerte für die Windsituation am Standort PSI (nur Prognosedaten vorhanden) ist eine abschliessende Aussage über die Ursache der Erhöhung nicht möglich.

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

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



Figur 2:
Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2019.

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. 5 - 40 Bq/kg für das Jahr 2019. 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-Bombentests in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf 1 - 3 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.1 - 0.8 Bq/kg im Jahr 2019. 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 deutlich, dass die gemessenen Werte für die Aktiniden den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 10 - 30 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 250 und 350 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 bis Anfang der 1960er Jahre und der Chernobyl-Reaktorkatastrophe im Jahr 1986. Seit der Durchführung dieser Studie zur Beweissicherung werden im Routinebetrieb einmal jährlich an 4 Erhebungsorten Waldbodenproben aus der oberen Schicht (0 - 5 cm) erhoben und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades wurden zusätzlich 4 Staubfangplatten entlang der Umzäunung des ZWILAG angebracht. .

Radiochemische 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.



Figur 1 :
Staubfangplatten, welche im Labor mit frischer Vaseline-Beschichtung vorbereitet sind, bereit zur Montage an den Sammelstationen (Bild: P. Kramer).

Na_2SO_4 - NaHSO_4 -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Actinoiden verwendet wird. Nach der Elektrodeposition werden die 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, einedampft und in 2 ml Toluolsulfonsäure gelöst. Die Lösung wird mit der Szintillationsflüssigkeit Ultima Gold™ LLT vermischt und anschliessend im Flüssigszintillations-Spektrometer gemessen.

Staubfangplatten

Die 4 Staubfangplatten, eine pro Himmelsrichtung, befinden sich entlang der Umzäunung des ZWILAG-Areals. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden jeweils ausgewechselt. Im Labor wird die Vaseline 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 14-tägigen Turnus wird das in diesem Zeitraum anfallende Niederschlagswasser aus dem Niederschlagssammler beim ZWILAG-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10 ml dieser Wasserproben werden für die Tritium-Messung verwendet und grossvolumige Monatsmischproben (ideal 6 Liter) werden für die Langzeit Gamma-Spektrometrie genommen. Gemessen werden anthropogene Radionuklide, wie ^{137}Cs für welches bei den Langzeitmessungen über 2 Tage Nachweisgrenzen von 0.04 Bq/Liter erreicht werden.

Diese Leach-Lösung wird auf eine DGA™- 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 mit Am und Cm wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer U/TEVA™-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+Cm werden anschliessend eingedampft, kalziniert und in einer

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 0.1 und 0.8 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). Es wurde bei einer einzelnen Messung festgestellt, dass ^{238}Pu unter die Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg gefallen war. 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-Caesium 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 Actinoiden 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 Probenahme 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 Beintrittsfenster.

Bei den Regenwasserproben werden typischerweise ^3H -Aktivitäts-Konzentrationen von 5-15 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 0.03 Bq/Liter.

Tabelle 1:

Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten Jahre (2015-2019) in Bodenproben Umgebung ZWILAG. Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2015	2016	2017	2018	2019
^{90}Sr	1 - 3	1 - 2	< 1 - 2	< 1 - 2.5	< 1 - 3
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs ⁽¹⁾	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	10 - 60	10- 50	10- 50	10- 50	5 - 40
^{238}Pu ⁽²⁾	0.01 -0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.005- 0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.1- 0.7	0.2- 0.8	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8	0.1 - 0.8
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.05 - 0.3
^{226}Ra	20 - 30	20 - 30	20 - 30	10 - 24	15 - 30
^{228}Ra	20 - 40	20 - 30	20 - 40	13 - 25	17 - 30

⁽¹⁾ Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2015-2019 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 nicht mehr nachgewiesen werden.

⁽²⁾ Einzelne ^{238}Pu -Resultate beginnen die Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg zu erreichen.

Literaturliste

- [1] Eikenberg, J., Bajo, S., Hitz, J., Beer, H., Gann, C., Wyer, L und Ziegler, J. (2002) Spezialnuklid-Analysen für die Beweissicherung ZWILAG AG 1997-2001: Abschlussbericht der Immissionsmessungen. PSI-Bericht Nr. 02-15.
- [2] UNSCAER (2000), Sources and effects of ionising radiation. Report to the General Assembly, Volume 1, Annex C, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

8.5

Les installations nucléaires et l'environnement

S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller, P. Steinmann
Section radioactivité dans l'environnement, URA / OFSP, Berne

Résumé

Les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, mises en œuvre dans le cadre de la surveillance de la radioactivité au voisinage des centrales nucléaires ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques (^{14}C dans les feuillages) et des rejets liquides (^{54}Mn dans les sédiments) de ces installations. A noter qu'avec la diminution des activités rejetées dans l'Aar par la centrale de Mühleberg, les isotopes du cobalt ou le ^{54}Mn ne sont plus mesurables dans les eaux de l'Aar et du Rhin. 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, de l'ordre de quelques micro-Sv au maximum, 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'influence 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.

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.

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 de 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 2019 (voir Chap. 8.1).

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population (adulte) avoisinante en termes de doses entre 1981 et 2019. 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

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

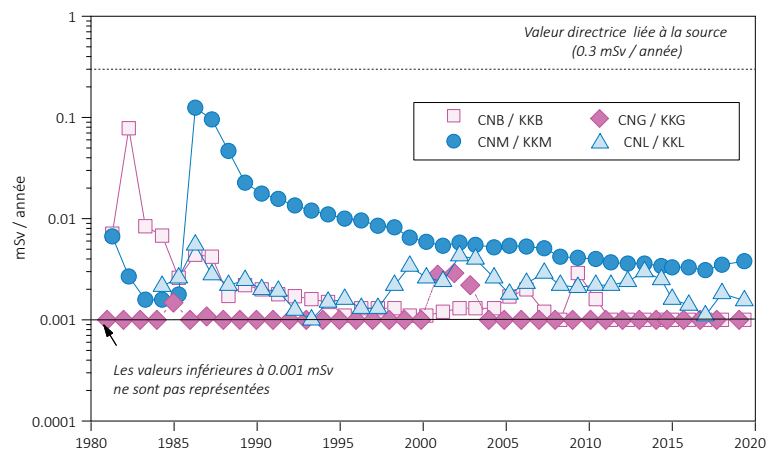


Figure 1:

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 2019 (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.

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, les doses dues aux émissions des centrales nucléaires reçues par les personnes adultes les plus exposées se sont échelonnées en 2019 entre < 0.001 mSv pour KKB et KKG, env. 0.002 mSv pour KKL et env. 0.003 pour KKM. Dans le cas des petits enfants (< 1 an), ces doses atteignent env. 0.0035 mSv par an au voisinage de KKL et 0.0045 mSv par an pour KKM. 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).

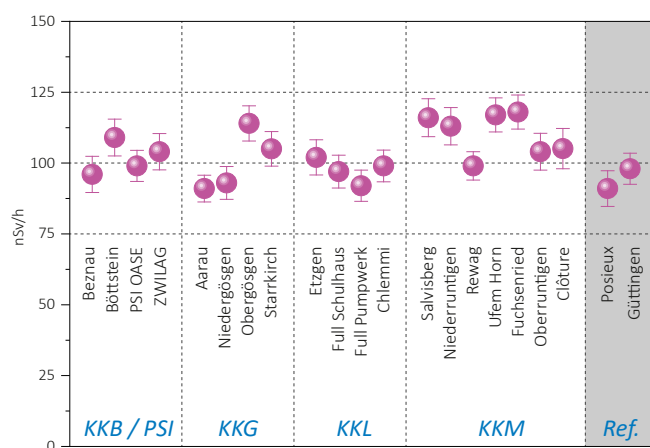


Figure 2: Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2019 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (gris).

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. Les résultats de cette surveillance ont mis en évidence une contribution clairement mesurable du rayonnement direct en certains points de la clôture des réacteurs à eaux bouillantes, à savoir, Leibstadt et Mühleberg, ainsi que, dans une moindre mesure, au PSI (voir Chapitre 8.2). A Mühleberg, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation de la dose ambiante annuelle de 1.3 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel qui s'élève à 0.7 mSv/an). La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint 1.2 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel de 0.6 mSv/an). 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 en-

droits 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.

Par ailleurs, une dosimétrie d'ambiance du rayonnement des neutrons et des gammas est 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. 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 2019 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. En seconde partie d'année des valeurs non nulles ont par contre été enregistrées, mais restant faibles (valeur maximale de 0.036 mSv/trimestre). 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 de PSI-West en 2019. Autour de SwissFEL, les valeurs sont environ 1.5 fois plus élevées qu'à PSI West mais restent au niveau de la radiation ambiante.

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.

Après une année de transition, où les nouvelles stations du réseau automatique de mesure de la radioactivité dans l'air URAnet aero et les anciens collecteurs d'air à moyen débit (FWP) situés à proximité des centrales nucléaires étaient simultanément en service, ces derniers ont été démontés début 2019. La surveillance de la radioactivité dans l'air dans le rayon d'influence des centrales nucléaires est donc, depuis 2019, 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, qui a été mise en arrêt le 20 décembre 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 n'a pu être mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2019 (voir aussi chapitre 4.1). Les activités du ^{137}Cs sont en effet restées inférieures à la limite de détection d'environ 1 mBq/m^3 (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 $0.2 \mu\text{Bq/m}^3$ 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. Par contre, comme les années précédentes, des traces de ^{24}Na , un radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15h) produit par exemple dans les accélérateurs de particules des centres de recherche, ont également été sporadiquement mesurées dans les filtres HVS de cette station. La concentration maximale mesurée s'élève à $340 \pm 50 \mu\text{Bq/m}^3$ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immissions dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/m^3 .

Les activités des émetteurs gamma d'origine artificielle dans les échantillons de pluie collectés aux environs des centrales nucléaires de Mühleberg, Leibstadt, Gösgen et Beznau ainsi que ceux du voisinage du PSI et du ZWILAG sont toutes restées inférieures aux limites de détection, qui se situent entre de 0.2 à 1.0 mBq/l par exemple pour le ^{137}Cs .

Tableau 2:

Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2019.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)
Niederruntigen * (environs KKM)	< 2 - 2.3	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 - 2.4	-
Full (environs KKL) *	< 2 - 5.7	-
Beznau (environs KKB) **	4.9 - 31.3	9.8
PSI **	< 1.7- 100	5.0
ZWILAG **	< 1.7- 21.0	5.8

* mesures OFSP / ** mesures PSI

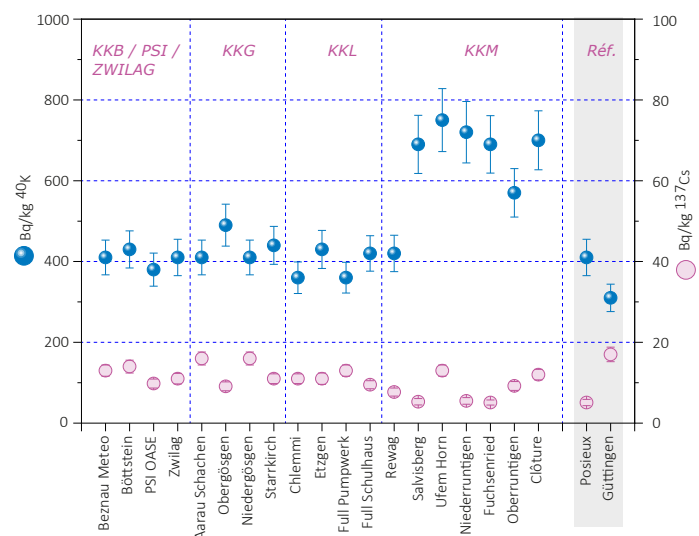


Figure 3:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2019 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisées).

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 de l'ordre de 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs légèrement plus élevées, notamment au voisinage du PSI. Des concentrations mensuelles de tritium voisines de 100 Bq/l ont ainsi été mesurées au voisinage du PSI en février et octobre 2019. Ces valeurs sont significativement plus élevées que celles habituellement mesurées dans les stations référence, mais n'ont que peu d'impact radiologique puisque qu'une telle concentration ne représente que 0.5% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ORaP à 20'000 Bq/l pour le ^3H dans les eaux accessibles au public.

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 2019 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 102 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt et de 91 pour mille aux environs de la centrale de Mühleberg. 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.

Un programme particulier de prélèvements et de mesures d'échantillons d'air a par ailleurs été conduit par l'Université de Berne au début de la révision de la centrale nucléaire de Gösgen, au moment du relâchement de la suppression de la cuve du réacteur. L'objectif de ces mesures étaient de fournir une estimation de l'émission maximale en $^{14}\text{CO}_2$, mais également en méthane radioactif, à savoir $^{14}\text{CH}_4$. Ainsi, pendant 8 heures, 18 échantillons d'air au total ont été prélevés en 5 endroits différents, au voisinage de la centrale. Les résultats montrent que les émissions de ^{14}C dans l'air sous forme de méthane sont bien supérieures à celles sous forme de dioxyde de carbone (73%, 27% resp). Cependant, les émissions de ^{14}C sous forme de méthane n'ont que peu de conséquences radiologiques, car le méthane - contrairement au dioxyde de carbone - n'est pas directement absorbé par les plantes via la photosynthèse et n'est donc pas absorbé dans la chaîne alimentaire. Les résultats détaillés de ce programme sont à consulter au chapitre 7.1

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 2019 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 2019. 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.

Afin de pouvoir évaluer l'impact radiologique éventuel des travaux de désaffectation de la centrale nucléaire de Mühleberg qui débuteront en 2020, un programme de mesures complémentaires a été initié en 2017 par l'IFSN et l'OFSP pour une durée de 3 ans. La situation radiologique au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est généralement bien connue étant donné que le site fait l'objet d'une surveillance régulière depuis le début de la période d'exploitation de la centrale. Toutefois, des radionucléides spéciaux, qui n'ont jamais ou sporadiquement été analysés dans les échantillons environnementaux en régime d'exploitation sont susceptibles d'être émis ou de devenir prépondérants au cours des travaux de désaffectation. Ce programme comprend donc l'analyse de radionucléides spéciaux (^{55}Fe , ^{63}Ni , émetteurs alpha, ^3H) dans le milieu terrestre (sol, denrées alimentaires) et aquatique (sédiments), mais également des mesures in situ supplémentaires, sur des sites 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 plus localisé dans un périmètre restreint.

Les résultats des mesures réalisées entre 2017 et 2019 par le PSI sur mandat de l'IFSN ont fait l'objet d'un rapport qui a été transmis à l'IFSN début 2020. Les conclusions de ce rapport sont résumées au chapitre 8.2.

Les résultats complets des mesures «Point zéro Désaffectation» réalisées par le PSI, l'IRA, l'OFSP et le laboratoire cantonal de Berne feront l'objet d'un rapport séparé en 2020.

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.

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 sont depuis 2018 inférieures à celles rejetées par les centrales de Beznau et de Leibstadt. En 2019, les rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de KKM ont été encore plus faibles (avec le ^{60}Co et le ^{54}Mn comme isotopes dominants). Comme corolaire à cette diminution des rejets, et comme au cours des deux années précédentes, aucune trace de ^{54}Mn ou des isotopes du cobalt n'a pu être mise en évidence en 2019 dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln.

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.

Les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2019 dans les eaux de l'Aar à Brugg/AG ainsi que celles du Rhin prélevées près de Weil/D, en aval de Bâle, 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 (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen, avant la révision.

Les résultats des mesures journalières de très bas niveau du tritium dans les eaux de l'Aar en amont et en aval de Mühleberg effectuées par l'Université de Berne pour une durée de 3 ans avant le début des travaux de désaffectation de la centrale sont détaillés au chapitre 4.6.

Comme conséquence de la diminution importante des rejets d'effluents liquides, en particulier par la centrale de Mühleberg, aucune trace des isotopes du cobalt n'a été retrouvée dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar et le Rhin en 2019. Ces derniers étaient pourtant systématiquement mesurés dans ce type d'échantillon par le passé. Ainsi, hormis le ^{137}Cs , présent dans pratiquement tous les échantillons de sédiment de l'Aar et du Rhin et qui provient essentiellement de la remise en suspension d'anciennes contaminations, seules des traces sporadiques de ^{54}Mn ont pu être mises en évidence dans les sédiments prélevés à Hagneck ainsi qu'à Klingnau, en 2019.

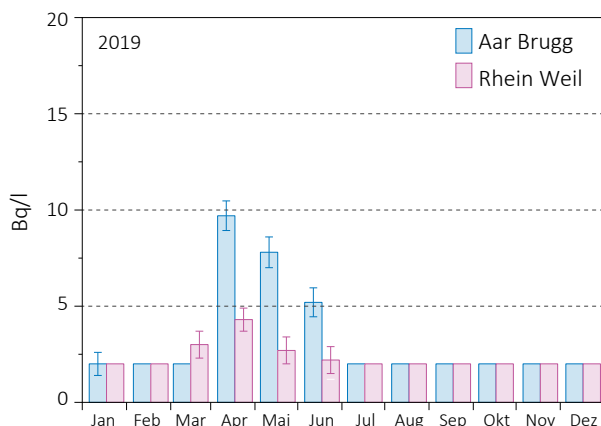


Figure 4: Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2019.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval de KKM, KKB et KKL en 2019 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle, autre que le ^{137}Cs mesuré en très faible concentration (1 Bq/kg) dans le poisson pêché dans le Rhin, près de Augst.

Comme chaque année, un échantillon de plantes aquatiques a été prélevé en 2019 dans chacune des stations de surveillance. Contrairement aux années précédentes, aucun radionucléide d'origine artificielle n'a été décelé dans ces échantillons. Le constat est le même pour l'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Döttingen et Pratteln.

Notons finalement que 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, sédiments, poissons, plantes aquatiques) collectés en aval des centrales nucléaires ont montré que les rapports isotopiques $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ observés sont proches de 0.4, indiquant une contribution très majoritaire des retombées des essais nucléaires des années 60 (voir chapitre 7.2).

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.

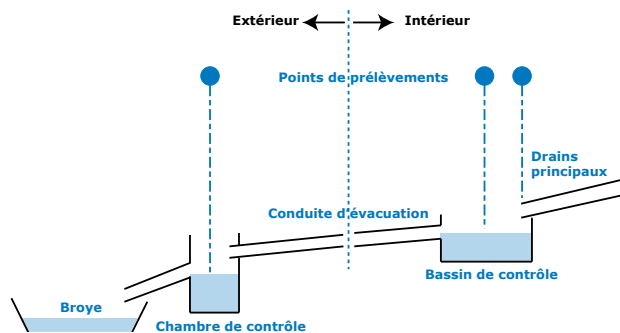


Figure 5 : Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

En 2019, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4 heures aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyée à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2019. Les résultats montrent en effet que les activités de ^{60}Co , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.2 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 2019 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 7.0 ± 2.8 Bq/l et 6.3 ± 1.8 Bq/l respectivement. Une valeur légèrement plus élevée, atteignant 14.7 ± 0.7 Bq/l (soit le double de la valeur habituellement mesurée) a été enregistrée dans l'échantillon prélevé dans le BdC en octobre. Dans l'échantillon prélevé à la même période dans la CdC, l'activité spécifique du tritium était de 10.7 ± 0.5 Bq/l. Les valeurs enregistrées le mois suivant étaient à nouveau conformes à la normale. Cette très légère augmentation n'est toutefois pas comparable à celles enregistrées fin 2011 et début 2012 (jusqu'à 230 Bq/l), qui avaient nécessité la mise en place d'un programme spécifique. A cette exception près, les valeurs mesurées sont en constante diminution depuis le début de la surveillance en 2001, ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive (demi-vie de 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 8 mBq/l n'a été mise en évidence en 2019.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2019. 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, du ^{14}C issu des rejets atmosphériques et des produits d'activation (^{54}Mn) présents dans les rejets liquides dans les sédiments témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations dans l'année sous revue.

Même si les expositions du public, du fait 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 2019, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose efficace délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.00006 mSv, soit 0.02% de la limite; il conviendra de noter que les installations du CERN étaient pratiquement toutes à l'arrêt durant l'année. Cette dose négligeable a été induite par les rejets de radioéléments dans les cours d'eau. A l'exception de quelques échantillons prélevés dans deux cours d'eau, aucun radioélément n'a été détecté dans le cadre du programme de surveillance des immissions. Le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN a donc été particulièrement faible.

CERN's Accelerator Complex

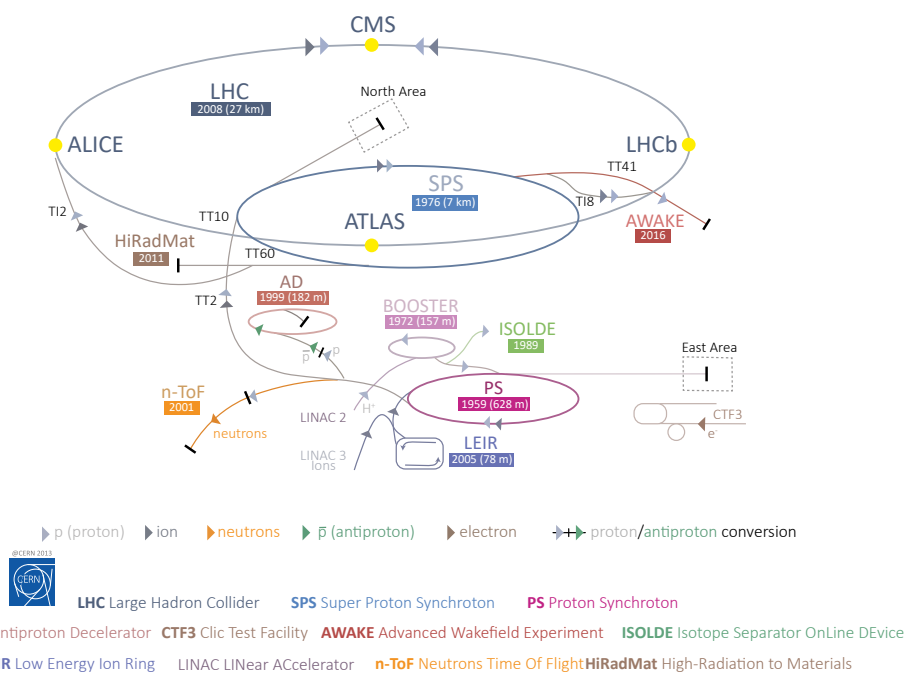


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire en fin de chapitre).

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 dif-

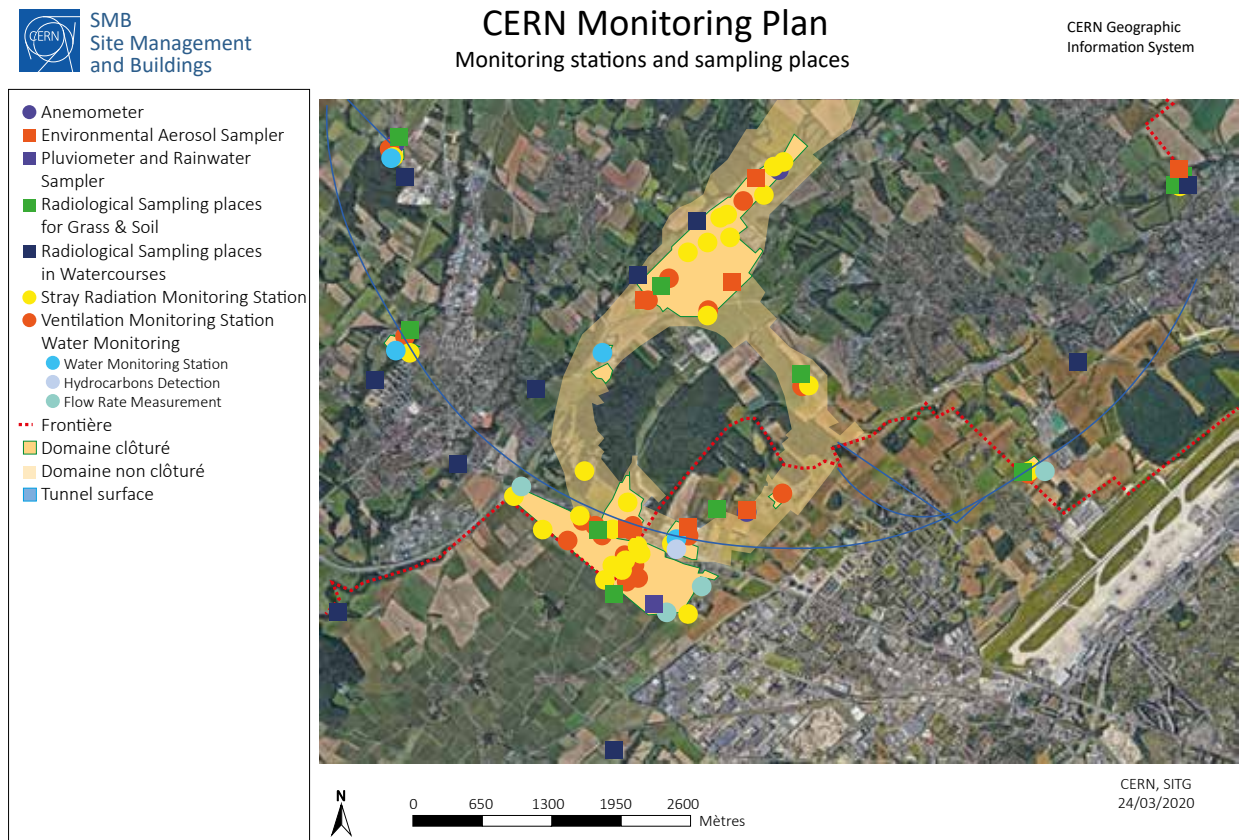


Figure 2:

Région frontalière franco-suisse: sites de Meyrin et de Préveessin 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.

fusé. 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 (voir Figure 2).

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 requière une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radionucléides produits sont principalement des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités. Pour plus d'information, se référer au site: voisins.web.cern.ch/fr/radiation.

Lorsque les accélérateurs sont arrêtés, l'émission atmosphérique de gaz de courtes demi-vies 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 ainsi potentiellement se charger en radionucléides lors de sa percolation, avant d'être évacuée vers les eaux de surface. De la même manière, des traces de radionucléides peuvent être mesurées dans l'air, lorsque par exemple le tritium dégaze des composantes précitées. 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 2019, 40 stations de ce type étaient en opération. Les points d'extraction d'air, d'où des substances radioactives peuvent être émises, sont équipés de stations de surveillance qui mesurent en continu les radionucléides gazeux à demi-vie courte et échantillonnent les aérosols sur des filtres périodiquement analysés en laboratoire. En 2019, 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 2019); 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 corrélérer avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont adéquats. Cette surveillance implique également un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (13 stations), 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 (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 2019

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2019

Le deuxième long arrêt du CERN, le Long Shutdown 2 ou simplement LS2, a débuté décembre 2018, tandis que la remise en service du complexe des accélérateurs s'effectuera progressivement fin 2020.

En 2019, les activités pouvant avoir un impact radiologique sur l'environnement étaient minimes. Le LINAC 4 a fait l'objet de tests avec de faibles intensités de faisceau. En parallèle, l'installation MEDICIS a effectué des séparations d'isotopes produits par d'autres organisations, tandis que certaines activités impliquant des tirs radiographiques sur sites ont été menées.

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

Rayonnement direct

Les installations étant à l'arrêt et le LINAC 4 faisant l'objet de tests à faibles intensités, les niveaux de rayonnement diffusé sont restés nuls. Cependant, d'autres activités impliquant des tirs radiographiques effectués en dehors des heures ouvrées ont conduit à une petite augmentation du débit de dose gamma à la barrière du site de Meyrin, en zone de faible passage. L'équivalent de dose ambiante intégré à l'année est de 1 μ Sv, tandis que la dose efficace reçue par le public est négligeable.

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère qui concernent le territoire suisse sont résumés au Tableau 1. Peu après l'arrêt des accélérateurs, certaines installations continuent à rejeter de faibles quantités (a) d'émetteurs bêta, (b) de tritium sous forme vapeur (HTO) ainsi que (c) de certains éléments volatiles tels que les isotopes de l'iode, représentés par I^{131} . Cette dernière catégorie est produite par irradiation de cibles composées d'éléments lourds, telles qu'exploitées par les expériences ISOLDE et n-TOF. Noter qu'en règle générale, après un temps d'arrêt de quelques semaines, les installations ne rejettent plus que de faibles quantités de tritium sous forme vapeur qui diffuse des composantes.

Rejets de substances radioactives dans les cours d'eau

Les effluents du CERN sont rejetés dans plusieurs cours d'eau qui rejoignent finalement le bassin du lac Léman ou le Rhône. Cependant, l'impact des rejets dans chaque cours d'eau doit être déterminé spécifiquement, car les membres du public ne peuvent être exposés aux immissions dans plusieurs cours d'eau à un moment donné. Durant un long arrêt, les radionucléides rejetés se répartissent en deux catégories :

- le tritium sous forme aqueuse (HTO) (a)
- le ^{22}Na (b)

Le Tableau 2 présente les rejets de 2019, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés.

Tableau 1:

Rejets radioactifs dans l'air en 2019.

Origine du rejet	Bêta aérosol	Tritium	^{131}I
	MBq	GBq	MBq
PS BOOSTER	< LD	3.6	< LD
ISOLDE via MEDICIS*	< 0.01	4.0	< LD
ISOLDE	< 0.01	3.4	< 0.01
Anneau principal PS	< LD	4.1	< LD
n-TOF	< LD	0.1	< LD
East Area	< LD	< 0.01	< LD
TT10 injection PS-SPS	< LD	7.4	< LD
SPS BA5	< LD	2.0	< LD
HIRADMAT	< LD	3.9	< LD

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

Tableau 2:

Rejets radioactifs dans les cours d'eau en 2019.

Origine du rejet	Tritium	^{22}Na	Rejeté dans:
	GBq	MBq	
Site de Prévessin, SPS	14	3.4	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	0.08	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	0.04	< LD	Le Lion (F)
Site SPS BA6 + site LHC PA1	0.07	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	0.25	< LD	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS, rejet par le site du LHC PA8	4.1	< LD	Le Nant (F)

Surveillance des immissions

Le programme de surveillance des immissions induites par les rejets atmosphériques n'a mis aucun radioélément d'origine artificielle en évidence.

Concernant l'environnement aquatique et comme pour les années précédentes, des radionucléides ont été mesurés dans des échantillons ponctuels prélevés dans deux rivières. L'échantillon ponctuel d'eau de la rivière le Nant (F) contenait du tritium à hauteur de 2.2 ± 1.3 Bq/l, une valeur faible, mais sensiblement plus élevée que moyennes usuellement mesurées dans les rivières suisses. Les échantillons de bryophytes et de sédiments prélevés dans le Lion (F) contenaient du ^{54}Mn en concentrations respectives de 30 ± 4 Bq/kg et 0.5 ± 0.3 Bq/kg (masses sèches). 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 radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les autres échantillons d'eau, de bryophytes et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collectés en septembre. Bien que les radionucléides aient été mesurés dans des échantillons provenant du territoire français, ils sont mentionnés dans ce présent rapport car le Lion (F) rejoint l'Allondon (F/CH), qui termine son cours dans le Rhône (CH/F), tandis que le Nant (F) est un affluent du Gobé-Vengeron (F/CH) qui se déverse dans le lac Léman (CH). Le Nant d'Avril (CH), dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches, fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève, mandaté par l'Office Fédéral de la Santé Publique (se référer au chapitre 8.7).

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 ambiante mesurés aux barrières du site et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion amélioré basé sur les directives [3, 4]. La dose efficace estimée de manière conservatrice à 0.00006 mSv est induite par des rejets tritium dans Le Nant (F).

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 2019 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 négligeable de 0.00006 mSv reçue par les membres du public a été induite par des rejets de tritium dans les cours d'eau.
- Des radionucléides ont été détectés dans des échantillons prélevés dans deux rivières. Les valeurs de concentration sont restées inférieures aux limites d'immission applicables [2]. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN est très faible.

Références

- [1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (état au 01.02.2019), 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, Bd Carl-Vogt 66, 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 2019 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 2019, 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.

Programme de surveillance de l'OFSP

L'OFSP surveille l'environnement du CERN de manière indépendante par les mesures suivantes (territoire suisse uniquement, à l'exception de la dosimétrie d'ambiance):

- Dosimétrie d'ambiance du rayonnement gamma ainsi que des neutrons sur une base trimestrielle (12 dosimètres à thermoluminescence-TLD- évalués par l'IRA) et mesures instantanées de l'équivalent de dose ambiant effectuées par l'OFSP sur 9 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants.
- Air: 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; mesure en continu de l'iode-131 gazeux.
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel, mesure du tritium par l'OFSP).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) et végétaux ainsi que certains produits locaux (comme le ^3H dans le vin).

A noter qu'une grande partie des installations du CERN étaient à l'arrêt pendant l'année 2019 (2^{ème} long arrêt technique du Grand collisionneur de hadrons - LHC). Seuls le LINAC 4 et l'installation MEDICIS ont été (partiellement) en service.

Mesures de l'exposition ambiante

Treize sites ont été surveillés en 2019, 5 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.

Les mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP, ont montré que les doses des photons enregistrées au cours de l'année 2019 correspondaient partout à l'irradiation naturelle (environ 0.2 mSv par trimestre), résultat attendu en cette période de long arrêt technique des installations. Les doses des neutrons, sont quant à elles, généralement restées inférieures à la limite de détection ou étaient faibles avec de grandes incertitudes.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2019 sur 9 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 83.5 et 108 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 98 ± 6 nSv/h; moyenne des sites distants 98 ± 7 nSv/h).

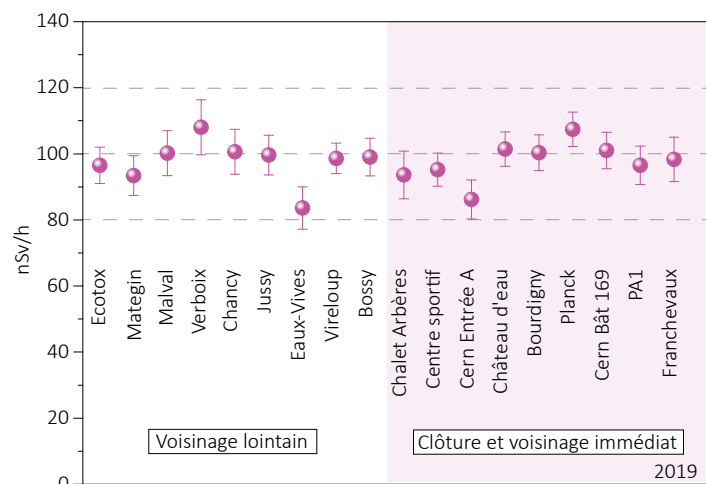


Figure 1: Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2019 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.

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 2019. 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 2 à 5 mBq/m³ pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2019. Le moniteur dédié à la surveillance de l' ^{131}I sous forme gazeuse n'a révélé aucune valeur supérieure à la limite de détection de 50 - 60 mBq/m³.

Les résultats des mesures hebdomadaires des filtres aérosols à haut débit (HVS) du CERN ont confirmé, comme les années précédentes, la prédominance des radioéléments d'origine naturelle, tels que ^7Be et ^{210}Pb (cf figure 2). Le cas du ^7Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production dans les tunnels du CERN). Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ^7Be mesurées en 2019 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 entre 0.1 et 0.9 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que

Tableau 1 :

Concentrations du ^7Be mesurées en 2019 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

Station de collection à haut débit	Valeur min/max	Moyenne
	(mBq/m ³)	(mBq/m ³)
CERN (Meyrin/GE)	1.1 - 7.3	4.1 ± 1.5
Posieux/FR	0.8 - 7.6	4.4 ± 1.7
Klingnau/AG*	0.8 - 7.2	3.7 ± 1.5
Güttingen/TG	1.0 - 7.6	3.9 ± 1.5
Cadenazzo/TI	0.8 - 8.6	4.8 ± 2.0

de l'accident de Tchernobyl ont, comme partout en Suisse, été détectées à plusieurs reprises, mais les activités sont restées très faibles (valeur maximale de $0.9 \pm 0.4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

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

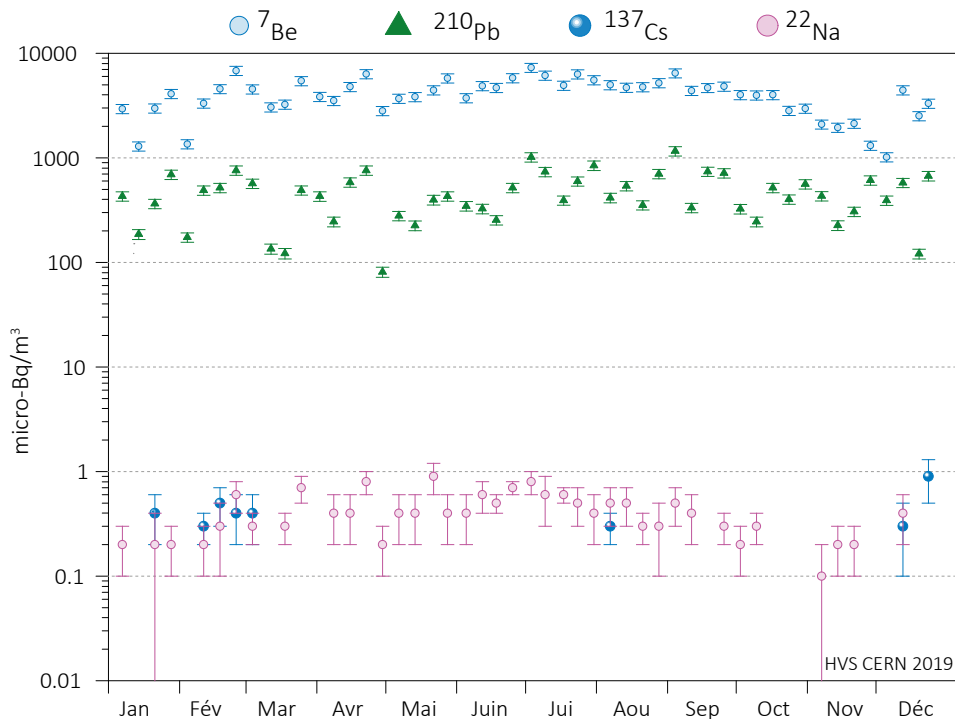


Figure 2 :
Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2019.

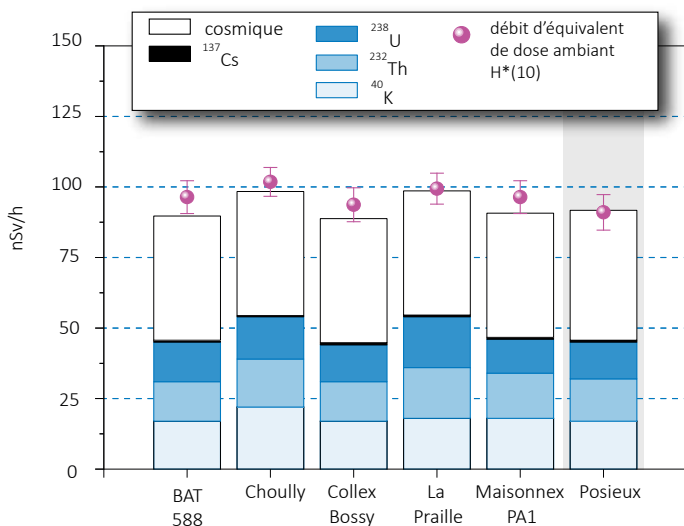


Figure 3 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2019. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma in situ permettent de distinguer les contributions d'origines 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 (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.

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 2019, en dehors de traces sporadiques de ^{137}Cs (maximum de 1 ± 0.5 mBq/l). 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 mené 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.

Vingt-six 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 30 novembre 2018 et le 21 novembre 2019, avec un temps d'intégration de 11 à 16 jours par échantillon.

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

Dans les échantillons d'eau brute, outre les radioisotopes géogènes, le ^7Be est le principal radioisotope détecté (figure 4). Son activité moyenne (lorsque l'isotope est présent) pour la période couverte par le rapport s'est élevée à 0.24 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ^7Be (0.64 ± 0.02 Bq/l) a été mesurée au mois de juin 2019.

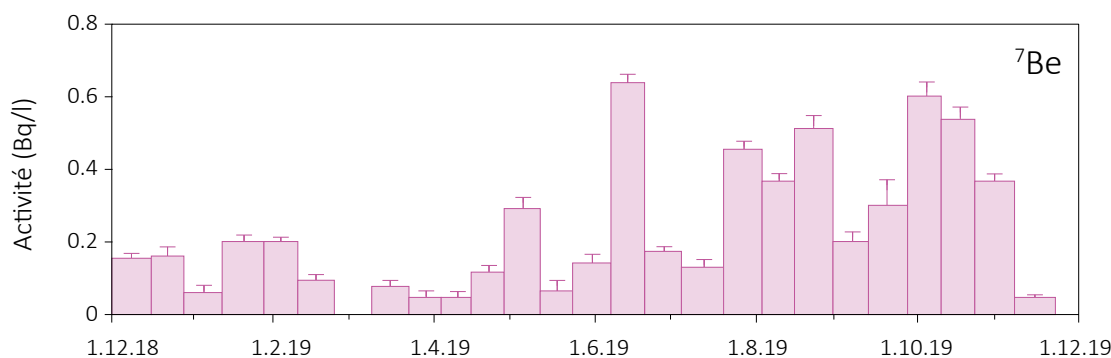


Figure 4 :

Activités du ^7Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'Avril entre décembre 2018 et novembre 2019.

Le ^{137}Cs , issu des tests nucléaires dans l'atmosphère et de l'accident de la centrale de Tchernobyl, n'a été mesuré sur les particules qu'à deux reprises ($0,002 \pm 0,001$ Bq/l) avec des activités très proches des limites de détection. Le ^{22}Na parfois mesuré dans les eaux du Nant d'Avril, n'a pas été détecté au cours de l'année sous revue. Par ailleurs, les mesures du tritium effectuées par l'OFSP dans les échantillons mensuels du Nant d'Avril n'ont pas mis en évidence de concentrations supérieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

L'échantillonnage des eaux ayant été réalisé en fonction du débit, il est possible d'estimer le flux d'un isotope en multipliant les débits (exprimés en $\text{m}^3/\text{période}$) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de ^7Be pour la période 2018-2019 est ainsi de 1'791 MBq/an au minimum et de 2'016 MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent dans la moyenne haute des périodes de mesure précédentes (fig. 5).

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^7Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons avec des activités spécifiques variant respectivement entre 382 et 1'319 Bq/kg, et entre 5.0 et 9.3 Bq/kg. Aucun radioisotope parfois observé (^{60}Co , ^{57}Co , ^{54}Mn) par le passé n'a été détecté dans les sédiments au cours de la période de mesure.

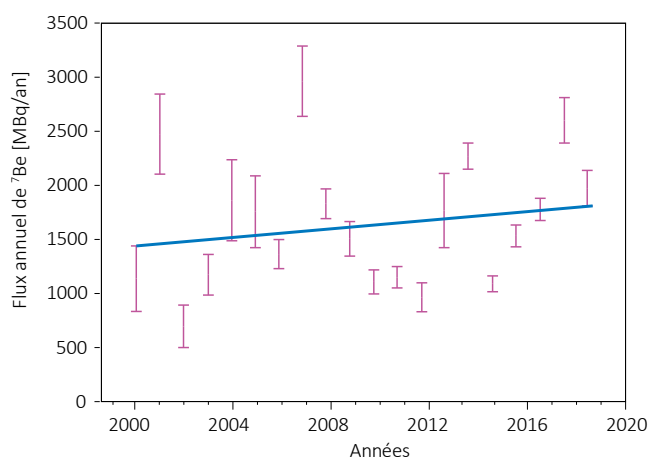


Figure 5 :
Estimation des flux annuels minimum et maximum de ^7Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

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 début 2019, 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 23.09.2019 au 25.10.2019), se sont échelonnées entre 121 et 1'150 Bq/kg pour le ^7Be et entre 4.5 et 15.8 Bq/kg pour le ^{137}Cs .

Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^7Be variant entre 224 et 1'332 Bq/kg. Le point PA6, qui montrait en 2018 une forte activité (3'353 Bq/kg), est cette année dans les valeurs mesurées les années précédentes (519 Bq/kg). L'activité spécifique du ^{137}Cs était quant à elle presque toujours inférieure à la limite de détection, à l'exception d'un seul site, où une valeur de 6.7 Bq/kg a été mesurée.

La figure 6 montrant 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 ^{137}Cs . Le ^7Be est d'origine naturelle et les mesures effectuées ne peuvent pas mettre en évidence une origine anthropique. Le ^{137}Cs résulte de l'érosion des sols

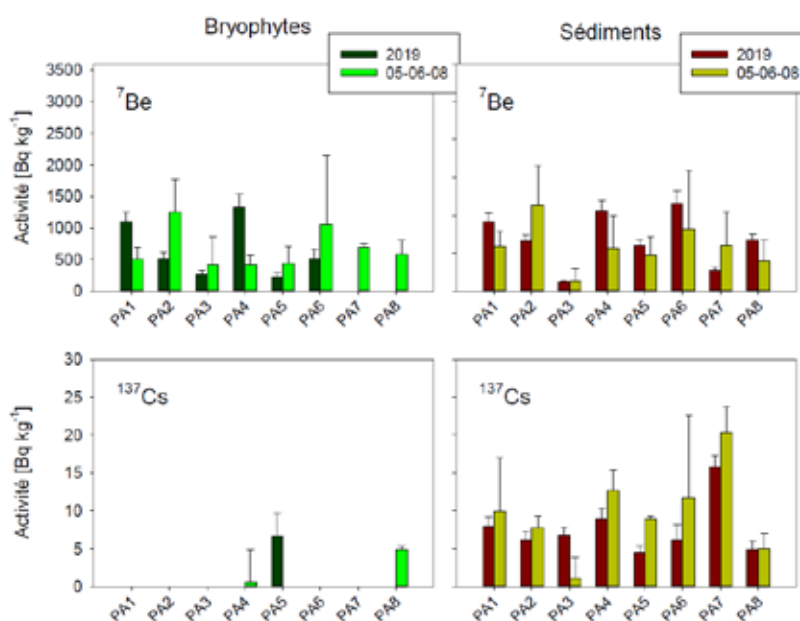


Figure 6 :
Activités de ^7Be et de ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8) en 2019 comparées aux valeurs moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008 (valeurs 05-06-08), avant la mise en service du LHC. Il n'y a pas d'échantillon de bryophytes aux points 7 et 8.

contaminés par les essais nucléaires dans l'atmosphère et par l'accident de Tchernobyl. Aucun radioélément provenant du CERN n'a été détecté cette année. Les radioéléments parfois détectés dans le Nant d'Avril au cours des périodes de surveillance précédentes, comme le ^{22}Na ou certains isotopes du cobalt (^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co) n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes mesurés pour contrôler les immissions dues au 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 2019, étant donné que la majorité des installations étaient à l'arrêt.

Ainsi contrairement aux années précédentes, aucune trace de certains radionucléides 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 2019. Les résultats des mesures dans l'air, le milieu terrestre ou encore les eaux et sédiments du Nant d'Avril ne se sont ainsi aucunement distingués de ceux enregistrés dans les stations de mesures de référence, situées hors influence du centre de recherche.

Chapitre / Kapitel 9

Industries et hôpitaux Industrien und Spitäler

2019

- Emissions des industries
- Emissions des hôpitaux
- Surveillance au voisinage des industries
- Radionucléides dans les stations d'épuration des eaux usées (médecine)
- Plan d'action radium
 - Emissionen der Betriebe
 - Emissionen der Spitäler
 - Überwachung in der Umgebung von Industrien
 - Radionukliden in Abwasserreinigungsanlagen (Medizin)
 - Aktionsplan Radium

9.1

Emissionen der Betriebe

Flavia Danini Fischer

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

Zusammenfassung

Der Einkauf von radioaktiven Stoffen sowohl in den Produktionsbetrieben wie auch in den Forschungsbetrieben variiert im Allgemeinen stark je nach Auftragslage und Forschungsschwerpunkt. Der Einsatz von mit ^{14}C markierten Stoffen hat nach einem Rückgang in den letzten Jahren wieder zugenommen. Sämtliche Abgabegrenzen 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 2009 - 2019.

	Isotope	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	Einheit
Produktionsbetriebe	^3H	11.26	12.75	7.31	10.54	5.74	4.07	7.53	15.11	10.03	6.31	7.58	PBq
	^{14}C	0.26	0	0	0.07	0	0.74	0.58	0.19	1.33	0.34	0.35	TBq
	^{147}Pm	0	0	0	0	0	0	13.03	5.76	0.07	1.55	15.26	TBq
Forschungsbetriebe	^3H	0.2	7.6	7.6	3.8	7.6	0.2	11.4	18.8	11.4	15.5	22.8	TBq
	^{14}C	35.4	21.3	17.1	41.3	53.9	158.9	76.0	192.6	200.6	132.5	207.3	GBq
	^{32}P	0.3	0.3	0.9	0.5	0.9	0.9	1.4	1.0	1.4	1.6	2.1	GBq
	^{35}S	0	0	1.4	1.4	2.4	2.4	3.7	2.0	0.8	3.8	3.5	GBq
	^{51}Cr	0	0	0	0.3	0.1	0	0	0	0	3.2	3.8	GBq
	^{125}I	0.2	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	14.1	12.1	15.7	16.3	17.5	GBq
Analytische Laboratorien	^{125}I	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	GBq

Tabelle 2a :

Abgabe radioaktiver Stoffe an die Abluft während des Jahres 2019 (GBq).

	Abgaben an die Abluft (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	³ H	¹⁴ C	³ H	¹⁴ C
Hoffmann-La Roche AG	79.8 (org.) 0 (Gas)	6.1	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 2019 (GBq).

	Abgaben an das Abwasser (GBq)		Abgabelimiten (GBq)	
	³ H	¹⁴ C	³ H	¹⁴ C
Hoffmann-La Roche AG	5.3	0.03	80	40
Novartis Pharma AG	0.8	0	300	30

Tabelle 3 :

Verbrennung in bewilligtem Ofen (Valorec Services AG, Basel während des Jahres 2019 (GBq).

	³ H (GBq)	¹⁴ C (GBq)	³⁵ S (GBq)
Verbrennungen in Ofen	968.4	76.9	0.1
Bewilligungslimite	4'000	450	8.0

Tabelle 4 :

Jahresabgabelimiten der Produktionsbetriebe.

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

Forschungsbetriebe (Total 38 Betriebe)

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

Medizinisch-analytische Laboratorien (Total 6 Betriebe)

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

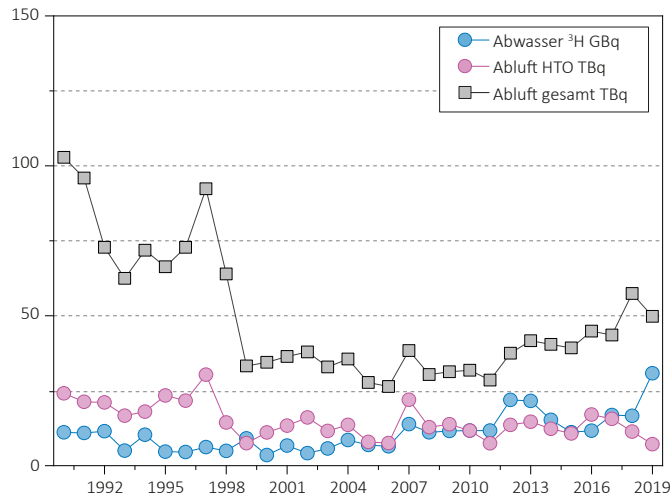
In Tabelle 1 sind bei der Sparte der Produktionsbetriebe auch die für den Handel eingekauften radioaktiven Stoffe aufgeführt (¹⁴⁷Pm).

Resultate

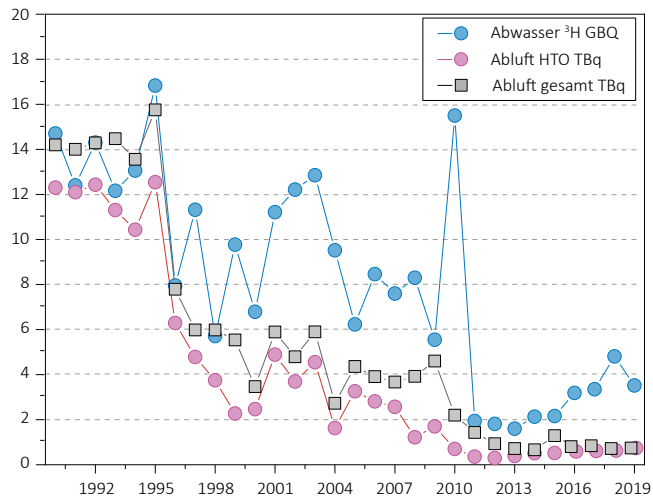
Im Berichtsjahr 2019 haben sämtliche Betriebe die Abgabelimiten eingehalten. In den Tabellen 2a und 2b sind die Jahresabgabewerte der Basler Chemie an die Abluft und das Abwasser mit den entsprechenden Abgabelimiten zusammengefasst. Der Synthesebetrieb bei Novartis wurde im Verlauf von 2016 eingestellt. Dies führte dazu, dass in diesem Betrieb keine Abgaben an die Abluft mehr gemessen wurden. Die bei Novartis aufgeführten Abgaben an das Abwasser resultierten hauptsächlich aus dem Rückbau der Syntheselabors. 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 Abgabelimiten ins Abwasser abgeleitet.

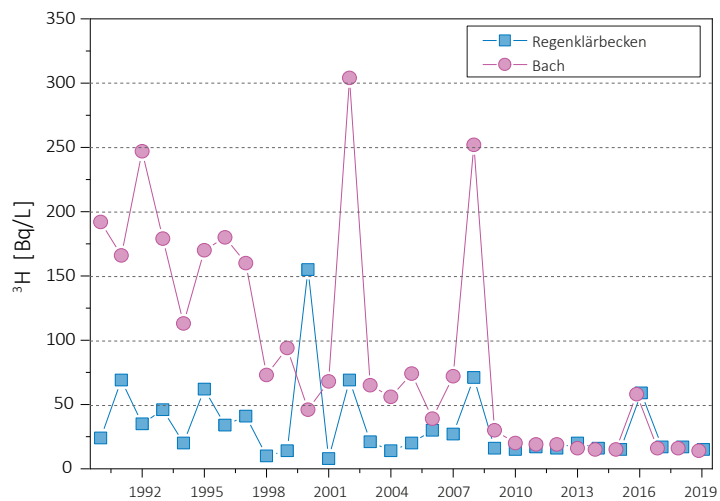
Die Emissionsmessungen werden durch den Betrieb durchgeführt und durch Kontrollmessungen der Suva überprüft. Die Proben der Umgebungsüberwachung werden von der Suva analysiert. In Tabelle 4 sind die bewilligten Jahresabgabelimiten der beiden grossen Produktionsbetriebe zusammengefasst.



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

Der Umsatz gegenüber dem vergangenen Jahr der zur Therapie verwendeten Radionuklide in den nuklearmedizinischen Instituten ist durchwegs leicht rückläufig. Der Umsatz des Alpha-Strahlers Radium-223 (^{223}Ra), welcher zur Behandlung von Patienten mit Prostatakarzinom verwendet wird, wurde praktisch halbiert, da diese Therapie langsam durch ^{177}Lu PSMA abgelöst wird. Seit 2018 wird zur Behandlung von Lebertumoren nebst ^{90}Y zusätzlich ^{166}Ho verwendet. Dieses Radionuklid wird im Berichtsjahr erstmals in der Statistik erwähnt. Die Abgabe von Radionukliden ans Abwasser aus stationären Behandlungen bleibt gegenüber dem Vorjahr konstant. 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

Jod-131 (^{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. 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 , ^{177}Lu oder ^{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.

Tabelle 1:
Applikationen radioaktiver Stoffe zu therapeutischen Zwecken 2019 in MBq.

	Spital	^{131}I amb.	^{131}I stat.	^{186}Re	^{169}Er	^{90}Y	^{177}Lu	^{223}Ra	^{166}Ho
AG-40.2	Kantonsspital Aarau AG			75		370		288	
AG-579.2	Kantonsspital Baden AG	800	71'840	74	111	555	29'400	72	
BE-32.2	Klinik Linde AG	1'200							
BE-138.2	Klinik Engeried							39	
BE-284.12	Inselspital		276'879		98	3'320	345'100	208	
BL-158.2	Kantonsspital Baselland					925			
BL-315.2	Kantonsspital Liestal	2'437				187		42	
BS-30.2	St. Claraspital	386				8'120		18	
BS-350.1	Universitätsspital Basel		283'494	370		19'480	2'361'278	80	37'850
FR-103.2	HFR Hôpital fribourgeois	200	72'500	248		932		40	
GE-200.3	HUG	386	160'704			57'943		37	
GE-752.3	Hôpital de la Tour					152		18	
GE-1633.1	GRGB Santé SA					152		18	
GR-54.2	Kantonsspital Graubünden	1'234	68'617	45	37	1'480		95	
LU-1.2	Hirslanden-Klinik St. Anna		124'456	70		39'297			
LU-527.11	Luzerner Kantonsspital LUKS					22'470		190	
NE-169.6	Hôpital Neuchâtelois	371				190		95	
SG-195.3	Kantonsspital St. Gallen		197'023	185		2'035	121'572	0	
SO-29.6	Bürgerspital Solothurn		26'390			555		60	
TG-46.2	Spital Thurgau AG, Münsterlingen		24'358	186				17	
TG-53.2	Spital Thurgau AG, Frauenfeld				37	777			
TI-453.6	Ospedale Regionale Bellinzona e Valli	5'800	105'030			20'050	118'400	159	
TI-482.4	Ospedale Civico	600			37	2'220			
VD-129.2	Clinique de la Source	3'428						47	
VD-784.4	Genolier Swiss Medical Network							60	
VD-832.14	CHUV		149'159	160		150'601	294'540	91	
VS-125.1	RSV Hôpital du Valais		39'551						
ZH-57.4	Stadtspital Waid	633				171			
ZH-117.2	Klinik Hirslanden			74	37	60'900	0	81	
ZH-348.7	Universitätsspital Zürich		207'452	222	74	65'641	265'043	88	
ZH-352.3	Kantonsspital Winterthur	5'503	123'812			57'560		121	
ZH-1171.13	Stadtspital Triemli	400	221'439			27'998		249	
ZH-4221.1.1	Schilddrüsen-Praxis Zürich	250							
	Gesamte Schweiz 2019	23'627	2'152'704	1'709	431	544'081	3'535'333	2'213	37'850

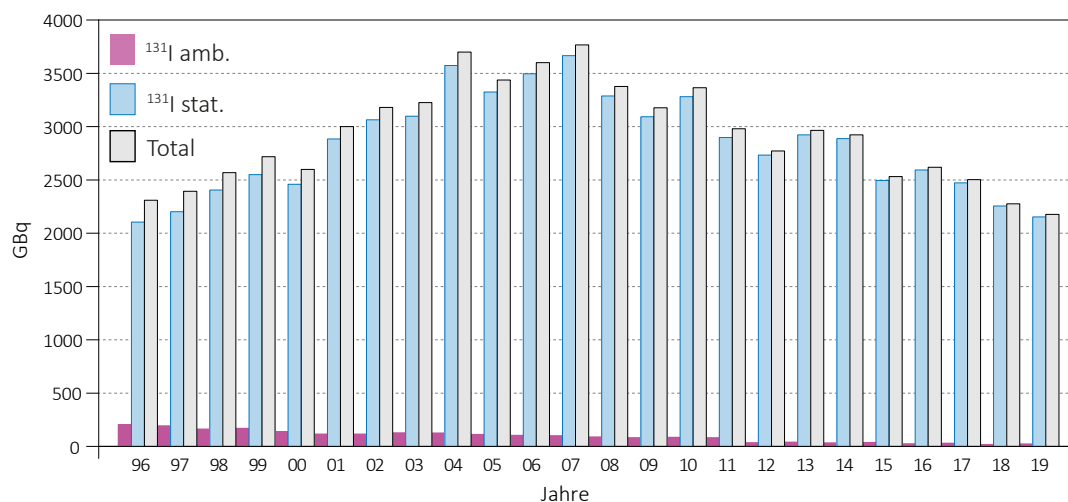
Abgabe radioaktiver Stoffe ans Abwasser

Die für einen Betrieb bewilligte Abgabeaktivität radioaktiver Stoffe ans Abwasser richtet sich nach Art. 24 Abs. 2 der Strahlenschutzverordnung. Danach darf die Aktivitätskonzentrationen in öffentlich zugänglichen Gewässern im Wochenmittel die in Anhang 7 StSV festgelegten Immissionsgrenzwerte für Gewässer (IGGw) nicht überschreiten. Die in der Praxis durch das BAG bewilligte Abgabelimite für ^{131}I beruht auf den Angaben bezüglich der gesamten Abwassermenge des jeweiligen Betriebs und der zusätzlichen Verdünnung in der Abwasserkläranlage. Die Einhaltung der oben erwähnten Abgabelimiten gewährleistet, dass die geltenden Immissionsgrenzwerte in öffentlichen Gewässern zu keiner Zeit überschritten werden. Werden andere Nuklide als ^{131}I über die Abwasserkontrollanlage an die Umwelt abgegeben (^{90}Y , ^{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:

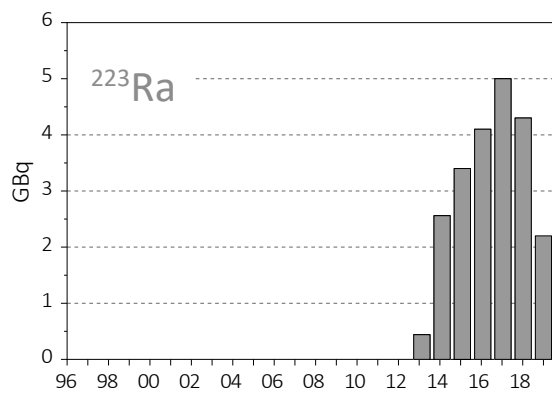
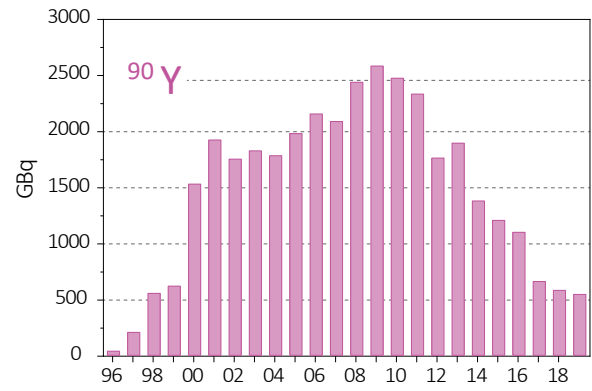
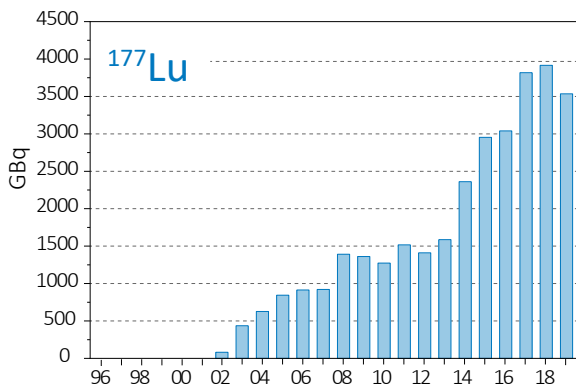
Abgabe von radioaktiven Stoffen aus Abwasserkontrollanlagen ans Abwasser 2019 in MBq ^{131}I -Äquivalenten.

Abgabe MBq/Monat Nuklearmedizin	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Total 2019
KS Chur		1.7			2.9	3.6		5.0			10.8		24.0
BS Solothurn	9.5						0.5						10.1
OR Bellinzona	6.6	0.1						5.4			4.2	3.8	20.1
KS St. Gallen	8.3	12.8	29.8	3.6	1.2	0.7	4.6	9.0		3.1	5.9	22.9	101.8
Triemli Zürich	3.0	0.7	1.6	0.8	0.8	0.3	0.2	1.4	0.4	1.2	1.0	2.0	13.4
HFR Fribourg							2.3						2.3
HU Genève	1.0		13.9		2.0		0.8	66.1					83.8
RSV Sion	0.5				0.7	5.7	0.0		1.5	0.7	4.1	6.2	19.3
KS Baden	0.5	0.5	0.1	0.1		11.9	3.2		18.5	0.0	1.2		36.1
CHUV Lausanne	0.2						0.1						0.3
US Basel	237.0	270.0	264.0	418.0	254.0	191.0	238.0	342.0	330.0	425.0	251.0	364.0	3584.0
KS Winterthur			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0		5.5
US Zürich			0.0	12.0				77.9		10.8		57.1	157.8
St. Anna Luzern			1.3		5.5		0.3		2.4	15.7		12.0	37.1
Insel Bern	6.7	6.6	0.5	5.6	7.5	2.7	7.0	5.7	2.5	13.8		7.5	66.1
Gesamte Schweiz 2018 MBq													4'161.7

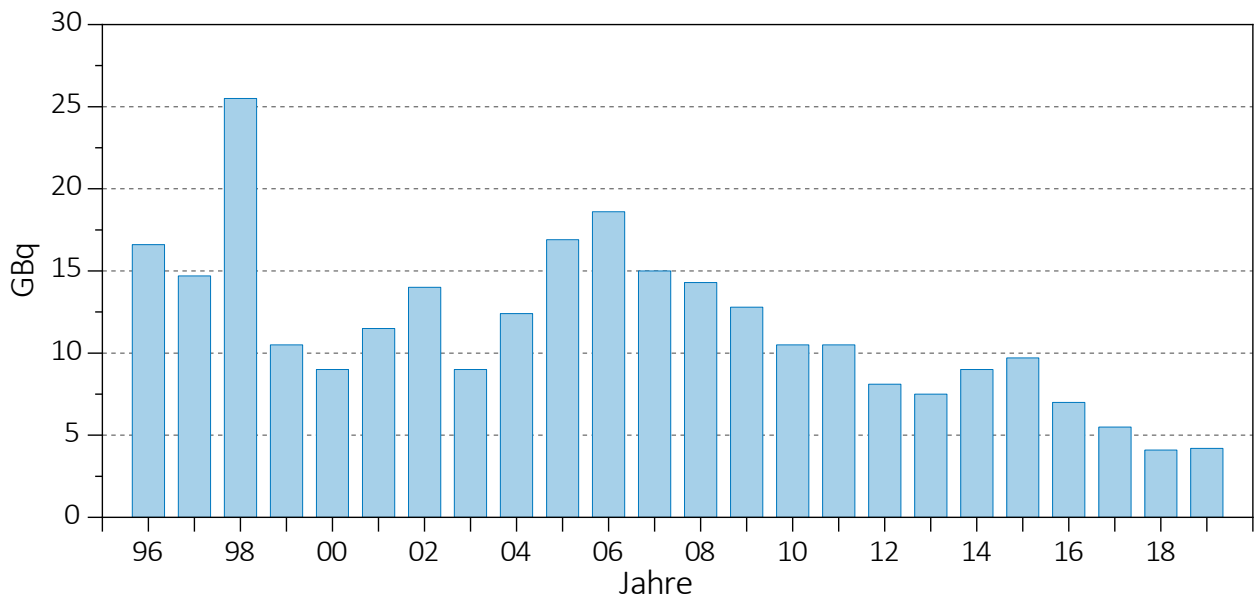


Figur 1:

Umsatz an ^{131}I zu therapeutischen Zwecken in GBq



Figur 2:
Umsatz weiterer Therapie-Nuklide in GBq.



Figur 3:
Abgabe von radioaktiven Stoffen ans Abwasser (in GBq ¹³¹I-Äquivalenten).

9.3

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

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

Section Radioactivité de l'environnement URA / OFSP Berne

A. Pregler, M. Zehringer

Kantonaies Labor Basel-Stadt, Basel

M. Brennwald, P. Rünzi

Eawag, Dübendorf

Résumé

Les résultats de la surveillance effectuée en 2019 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. En effet, les concentrations enregistrées dans les précipitations prélevées entre fin février et début mars au voisinage de l'entreprise mb microtec ont atteint 3'220 Bq/l, soit environ 16% de la nouvelle limite d'immissions pour le tritium dans les eaux accessibles au public. Des valeurs plus élevées de tritium ont également été mesurées dans les denrées alimentaires prélevées au voisinage de l'entreprise. Les doses supplémentaires qui en résultent pour la population avoisinante sont toutefois restées faibles.

Une concentration inhabituellement élevée de tritium, atteignant 833 kBq/l, a été mesurée en janvier 2019 dans l'échantillon hebdomadaire d'eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération (UVTD) de Bâle par le laboratoire cantonal. Sur la base de ces résultats, l'activité totale incinérée est estimée à env. 700 GBq, soit deux fois plus que les activités hebdomadaires maximales de tritium qui pourraient être incinérées selon l'ORaP. Les résultats des mesures du tritium dans les échantillons de l'environnement réalisées par le laboratoire cantonal de Bâle-Ville et par l'OFSP ont montré que les concentrations de tritium sont restées très faibles dans les précipitations et les eaux du Rhin. Il n'y a donc pas eu de danger pour la population avoisinante. Toutefois, une enquête approfondie est actuellement en cours pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs dans les ordures conventionnelles a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle.

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 tenu 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 2019.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Mediane/moyenne (Bq/l)
Teufen/AR 65 m E Firma RCT	13 - 154	24 / 37
Niederwangen/BE*		
Bauernhaus 300 m SE de l'entreprise	19 - 218	71 / 81
Garage 200 m SW de l'entreprise	8 - 148	70 / 70
Gemeinde KÖniz 180 m NNW de l'entreprise	27 - 211	99 / 101
Firma Schär 320 m NE de l'entreprise	106 - 3'218	476 / 756

* A Niederwangen, 18 échantillons ont été mesurés pour chaque station en 2019. En effet, en raison du manque de précipitation, il n'y a pas eu d'échantillons en janvier, ni pour les périodes du 09 au 18 avril, du 12 au 26 juin, du 27.09 au 08.10, ainsi que du 22.11 au 05.12.2019.

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 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 2019 sont résumés dans le tableau 1. A titre de comparaison, notons que les concentrations mensuelles de tritium mesurées dans les précipitations à la station de référence de Posieux sont restées, en 2019, très proches ou inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

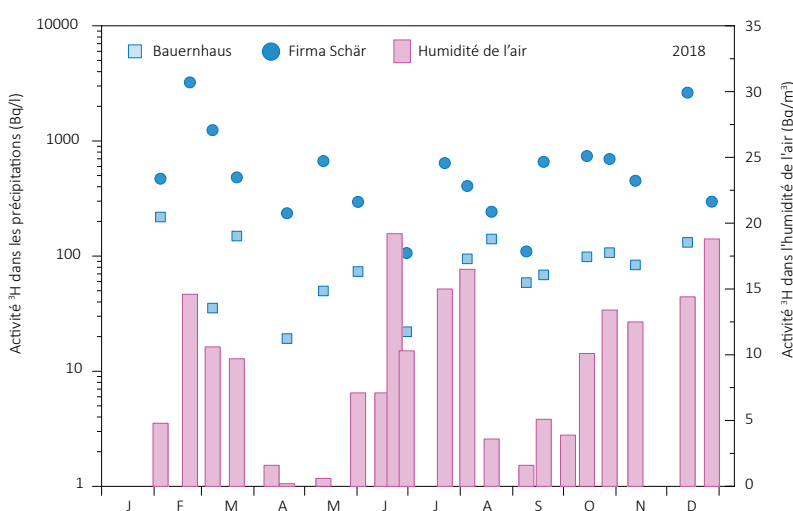


Figure 1 : *Activité du tritium dans les précipitations (Bq/l) et dans l'humidité de l'air (Bq/m³ d'air) enregistrées en 2019 à Niederwangen/BE.*

La surveillance mise en œuvre au voisinage des entreprises utilisatrices de tritium a révélé, comme par le passé, un marquage significatif de l'environnement (précipitations, denrées alimentaires) à proximité immédiate de ces entreprises, en particulier de mb Microtec à Niederwangen. La figure 1 présente les concentrations de tritium enregistrées en 2019 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).

Entre fin février et début mars 2019, une concentration maximale en tritium de 3'220 Bq/l a été enregistrée dans les précipitations prélevées à la station de collecte «Firma». Il s'agit de la valeur la plus élevée mesurée au voisinage de cette entreprise au cours des dix dernières années. Elle représente 16%¹ de la nouvelle

valeur limite d'immissions fixée à 20'000 Bq/l pour ce radionucléide dans les eaux accessibles au public. Malgré cela, les rejets en tritium de mb Microtec dans l'environnement sont restés semblables à la normale

¹ La valeur limite d'immission pour le tritium est passé de 12'000 Bq/l à 20'000 Bq/l dans la nouvelle ORaP; cette valeur est dérivée sur la base d'une valeur cible de dose de 0.3 mSv et une consommation annuelle d'eau présentant une activité égale à la valeur limite d'immissions

à cette période, et donc nettement inférieurs aux valeurs limites de rejet. En outre, les concentrations en tritium mesurées dans les précipitations collectées dans les trois autres stations (SE, SW et NNW) sont restées extrêmement faibles au cours de la même période. On peut donc en conclure que des conditions météorologiques particulières (vent unidirectionnel) sont à l'origine des concentrations plus élevées. De manière générale, les concentrations enregistrées en 2019 à Firma se situent parmi les plus élevées mesurées au cours des 10 dernières années, alors qu'elles se situent dans les valeurs moyennes à basses à la station de Köniz (voir figure 2). A titre indicatif, notons que la consommation régulière pendant un mois (soit 54 l) d'une eau ayant une concentration de 3'200 Bq/l conduirait à une dose supplémentaire de l'ordre de 3 μ Sv.

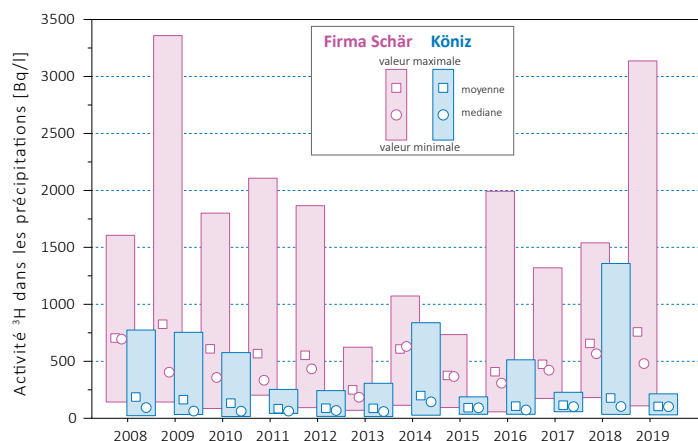


Figure 2 :
Valeurs moyennes et médianes annuelles des concentrations de tritium mesurées dans les précipitations aux stations de Firma et Köniz à Niederwangen entre 2008 et 2019.

A Niederwangen, l'activité du ^3H dans l'humidité de l'air est également mesurée deux fois par mois (Fig. 1). Les valeurs obtenues en 2019 se sont échelonnées entre 0.2 et 19 Bq/m³ avec une valeur moyenne de 9.1 Bq/m³. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées fin juin ainsi que fin décembre-début janvier. Ces valeurs ne présentent pas de corrélation directes avec les résultats des mesures dans les précipitations.

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, atteignant 370 Bq/l dans le distillat d'un échantillon de pommes et 330 Bq/l dans celui d'un échantillon de rhubarbe. Dans les distillats des 10 autres échantillons de fruits et légumes récoltés (pommes, poires, rhubarbe, légumes du jardin), les concentrations se sont échelonnées entre 28 et 150 Bq/l. Dans les distillats des échantillons de lait, les concentrations en tritium étaient plus faibles, situées entre 13 et 26 Bq/l (3 échantillons). Bien que ces valeurs maximales soient en diminution par rapport à celles mesurées en 2017, au cours de laquelle une valeur maximale de 667 Bq/l avait été mesurée dans le distillat d'un échantillon de rhubarbe, elles restent supérieures aux niveaux habituellement enregistrés au cours de la période 2008-2015.

Même si ces valeurs ne représentent pas de risque pour la santé de la population avoisinante, puisque les doses supplémentaires qui résulteraient de la consommation régulière de tels produits ne dépasseraient pas 1 à 2 μ Sv/an, elles se situent dans la fourchette haute des dix dernières années. Consciente de cette problématique, l'entreprise s'est d'ailleurs engagée à réduire ses émissions d'ici 2020, en rénovant son système de ventilation. La SUVA et l'OFSP suivent de près les résultats de ce projet.

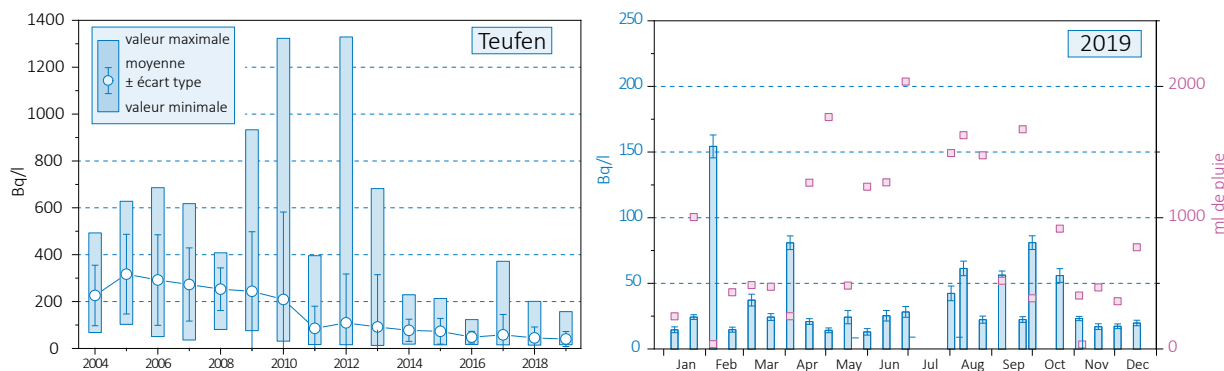


Figure 3 :
Concentration du tritium mesurée dans les précipitations de Teufen / AR entre 2004 et 2019.

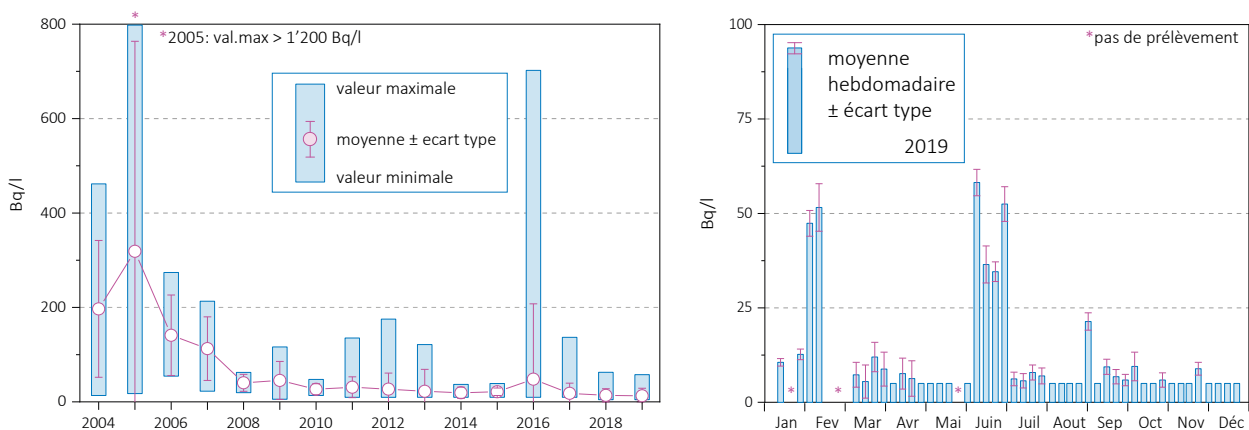


Figure 4 : Concentrations du tritium mesurées dans les eaux de la station d'épuration de La Chaux-de-Fonds entre 2004 et 2019.

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 2019 figurent parmi les plus faibles 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 2019.

Depuis 2016, le laboratoire cantonal de Bâle a renoncé aux mesures journalières du tritium dans les eaux de lavage des fumées de l'Usine de Valorisation Thermique des Déchets de Bâle (UVDT IWB). Un mélange

Tableau 2 : Tritium (^3H) et ^{131}I dans les eaux de rejet des usines d'incinération et des stations d'épuration (STEP) en 2019.

Ville	Laboratoire	Isotope	Nombre	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)	Moyenne (Bq/l)
STEP Bâle	KL-BS	^{131}I	50	< 0.1 - 0.9	-	-
		^3H	50	< 0.2 - 6.3	-	-
Incineration Bâle		^{131}I	51	0.1 - 2.5	0.3	0.4
		^3H	51	35 - 830'000	223	16'787
STEP Berne	Labor Spiez	^{131}I	51	< 0.1 - 0.1	-	-
	URA/OFSP	^3H	11	5.0 - 37.0	9.1	15
Incineration Bienne	URA/OFSP	^3H	52	< 5.0 - 46.5	-	-
STEP La Chaux-de-Fonds	URA/OFSP	^3H	48	< 5.0 - 58.0	5.6	-
STEP Lausanne	IRA	^{131}I	51	< 1.0	-	-
		^3H	11	< 2.0 - 3.0	-	-
STEP Zürich	EAWAG	^{131}I	52	< 0.1 - 0.2	-	-
	URA/OFSP	^3H	13	< 5.0	-	-
Incineration Zürich	EAWAG	^{131}I	12	1.1 - 667	17	95

des échantillons journaliers est maintenant analysé chaque semaine. En janvier 2019, le laboratoire cantonal de Bâle-Ville a mesuré une concentration inhabituellement élevée de tritium (833'000 Bq/l) dans l'échantillon hebdomadaire (semaine 3) d'eaux de lavage des fumées de l'UVDT. Il a alors mesuré individuellement chaque échantillon journalier, conformément à la procédure prévue. Une concentration jamais encore atteinte de 2'260'000 Bq/l (2.26 MBq/l) a ainsi été relevée dans l'échantillon du 15 janvier 2019. Sur la base

de ces résultats, l'activité totale incinérée est estimée à env. 700 GBq. Selon l'Art.116 de l'ORaP, des déchets contenant du tritium peuvent être incinérés avec l'accord de l'autorité délivrant les autorisations si les activités hebdomadaires ne dépassent pas 1'000 fois la limite d'autorisation, i.e au total 300 GBq (LA HTO = 0.3 GBq). L'activité de ^3H incinérée lors de cet incident est donc plus de 2 fois supérieure à l'activité incinérable admissible légalement, ce qui représente une violation de l'ordonnance sur la radioprotection; sans compter que l'autorité n'avait pas donné son accord préalable. Les mesures effectuées par l'OFSP et le laboratoire cantonal de Bâle dans l'environnement n'ont pas révélé d'augmentation significative de la concentration de tritium: tant dans l'eau de pluie collectée à Binningen, à proximité de l'UVDT IWB, que dans l'eau du Rhin prélevée en aval de l'UVTD, les valeurs mesurées de tritium à cette période sont restées très faibles. Il n'y a donc pas eu de danger pour la santé de la population.

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 et 2017, mais jamais de telles concentrations n'avaient été mesurées. Malgré les recherches menées à l'époque par la SUVA en collaboration avec l'OFSP et le laboratoire cantonal de Bâle-Ville, son origine n'avait malheureusement pas pu être éclaircie. La combustion de montres ou d'autres objets contenant du tritium (peinture luminescente), qui auraient été jetées dans les ordures ménagères, avaient alors été suspectées. Le caractère récurrent de la situation constitue un facteur aggravant et une enquête approfondie est actuellement en cours 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.

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 12 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 2019, les valeurs se sont échelonnées entre 100 et 13'700 Bq/l et n'ont pas présenté de corrélation avec les activités présentes dans les déchets contenant du tritium déclarés par les entreprises autorisées.

Les concentrations de tritium observées à la STEP de la région de La Chaux-de-Fonds sont restées faibles en 2019. 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, à l'exception toutefois de l'année 2016. A l'usine d'incinération de Bienne, les concentrations hebdomadaires de tritium pour l'année 2019 sont toujours restées inférieures ou voisines de la limite de détection de 5 Bq/l, sauf fin mai-début juin, où une valeur voisine de 50 Bq/l a été enregistrée. A la STEP de Werdhözli à Zürich, aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être décelé dans les échantillons hebdomadaires d'eaux prélevés et mesurés par l'EAWAG, à l'exception du ^{131}I décelés dans 4 échantillons (valeurs comprises entre 0.15 Bq/l et 0.24 Bq/l).

La figure 5 montre les concentrations de ^{131}I mesurées entre 2009 et 2019 dans les échantillons d'eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz à Zürich par l'EAWAG. Un mélange mensuel d'eaux de lavage est prélevé et mesuré par spectrométrie gamma. A noter qu'il a été constaté fin 2017 qu'un raison d'un manque de coordination ces échantillons avaient été prélevés pendant plusieurs années après le passage d'une cartouche filtrante dans l'installation de traitement de l'usine d'incinération. Ce filtre élimine le charbon actif utilisé dans le traitement des eaux usées et par conséquent probablement les radionucléides présents dans

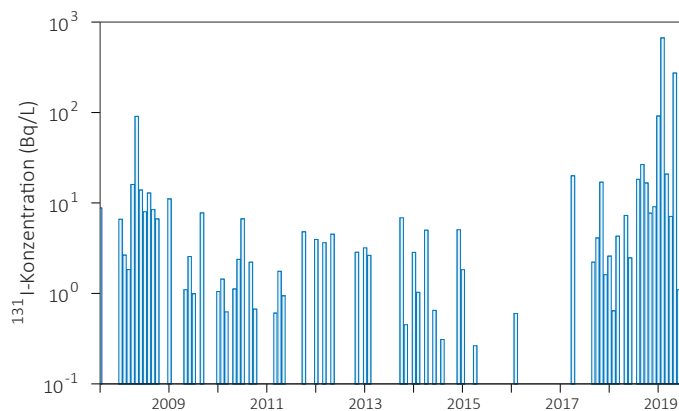


Figure 5 :
Concentrations de ^{131}I (Bq/l) enregistrées dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Hagenholz de 2008 à 2019 (prélèvement et analyse effectués par l'EAWAG).

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, contrairement aux années précédentes, avec des concentrations s'échelonnant entre 1 et 670 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 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 un peu plus de 100 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 500 mBq/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 analy-

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

Type d'échantillon	Lieu	Date	Remarque	^{226}Ra [mBq/l]
décharges, eaux de percolation	Härkingen (SO)	24.03.2017	non-filtré	5.0 ± 0.7
		20.02.2019	non-filtré	3.9 ± 0.7
		06.12.2019	non filtré	7.2 ± 1.2
		06.12.2019	filtré <0.45 μm	7.2 ± 1.4
	Türliacher (BE)	29.05.2017	non-filtré	13.2 ± 1.8
		19.01.2019	non-filtré	7.9 ± 1.2
	Tüfentobel (SG)	20.01.2019	non-filtré	3.7 ± 0.8
Jaberg (BE)	13.12.2019	non filtré	17.5 ± 2.3	
	13.12.2019	filtré <0.45 μm	10.2 ± 1.3	
zone industrielle contaminée, eaux souterraines	Waldenburg (BL)	09.11.2017	non-filtré- valeur min.	5.3 ± 1.1
		09.11.2017	- valeur max.	103 ± 10
		09.11.2017	- moyenne (n=7)	23

sés avec une méthode mise au point par l'Institut de Radiophysique (IRA) à Lausanne. Cette méthode comprend l'ajout du traceur ^{229}Th (^{225}Ra) suivi par une séparation chimique, une électrodéposition sur disque d'argent de la fraction Ra et la mesure par spectrométrie alpha sur détecteur PIPS. Les résultats des mesures réalisées par l'IRA à l'aide de cette méthode sont résumés dans le tableau 3.

Conclusions

Les résultats des mesures effectuées en 2019 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. Dans les précipitations, les concentrations en ^3H ont atteint au maximum env. 16% de la valeur limite d'immissions définie dans l'ORaP pour le tritium dans les eaux accessibles au public et des valeurs plus élevées de ^3H ont également été mesurées dans les échantillons de denrées alimentaires. Même si ces valeurs ne représentent pas un risque pour la santé de la population avoisinante, puisque les doses supplémentaires qui résulteraient de la consommation régulière de tels produits (eaux de pluie et légumes) ne devraient pas dépasser $10\ \mu\text{Sv}/\text{an}$, elles se situent dans la fourchette haute des 10 dernières années. Consciente de cette problématique, l'entreprise s'est d'ailleurs engagée dans un projet visant à réduire ses émissions d'ici 2020.

En janvier 2019, le laboratoire cantonal de Bâle-Ville a mesuré des concentrations inhabituellement élevées de tritium dans les eaux de lavage des fumées de l'usine d'incinération de Bâle. Même si des pics de concentrations de tritium avait déjà été enregistrés par le passé, jamais de telles valeurs n'avaient été constatées. L'activité totale incinérée a en effet été estimée à 700 GBq sur la base des résultats de mesure, soit deux fois plus que l'équivalent des 1'000 LA (= 300 GBq) qui pourraient être incinérés (avec l'accord préalable des autorités) par semaine selon l'ORaP. Les mesures réalisées dans l'environnement ont montré qu'il n'y a pas eu de danger pour la santé de la population, toutefois cet incident a conduit à une violation de la l'Ordonnance sur la radioprotection et une enquête est en cours pour tenter de déterminer si l'élimination de ces déchets radioactifs dans les ordures conventionnelles a eu lieu par négligence ou de manière intentionnelle.

9.4

Messung von Radionukliden aus der Medizin mit NaI-Sonden in Abwasserreinigungsanlagen

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

Zusammenfassung

Die in der Medizin eingesetzten Radionuklide ^{177}Lu und ^{131}I (Gammaemitter für Radiotherapie), ^{111}In und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (Gammaemitter für SPECT) sowie ^{18}F und ^{68}Ga (Positron-Emitter für PET) wurden 2019 über längere Zeiträume kontinuierlich mit NaI-Detektoren in Abwasserreinigungsanlagen gemessen. Die festgestellten Aktivitätskonzentrationen von ^{131}I waren durchwegs tief, da der Immissionsgrenzwert für dieses Radionuklid tief ist und es deshalb in Spitälern in Abklingtanks zurückgehalten wird. Für ^{177}Lu , das durch seinen höheren Immissionsgrenzwert in grösseren Aktivitätskonzentrationen abgegeben werden darf, konnte die Kalibrierung der NaI-Sonde mit Labormessungen von am Sondenstandort erhobenen Proben bestätigt werden. Ein Anstieg der von der Sonde gemessenen Gesamtdosisleistung ist meist die Folge einer Erhöhung der Konzentration von Radonfolgeprodukten im Abwasser (Einschwemmung durch Regenwasser), kann aber auch $^{99\text{m}}\text{Tc}$ oder PET-Radionuklide anzeigen.

Gammaemittierende Radionuklide in der Medizin

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

Tabelle 1:
Im Abwasser mit NaI-Sonden nachweisbare Radionuklide aus der Medizin.

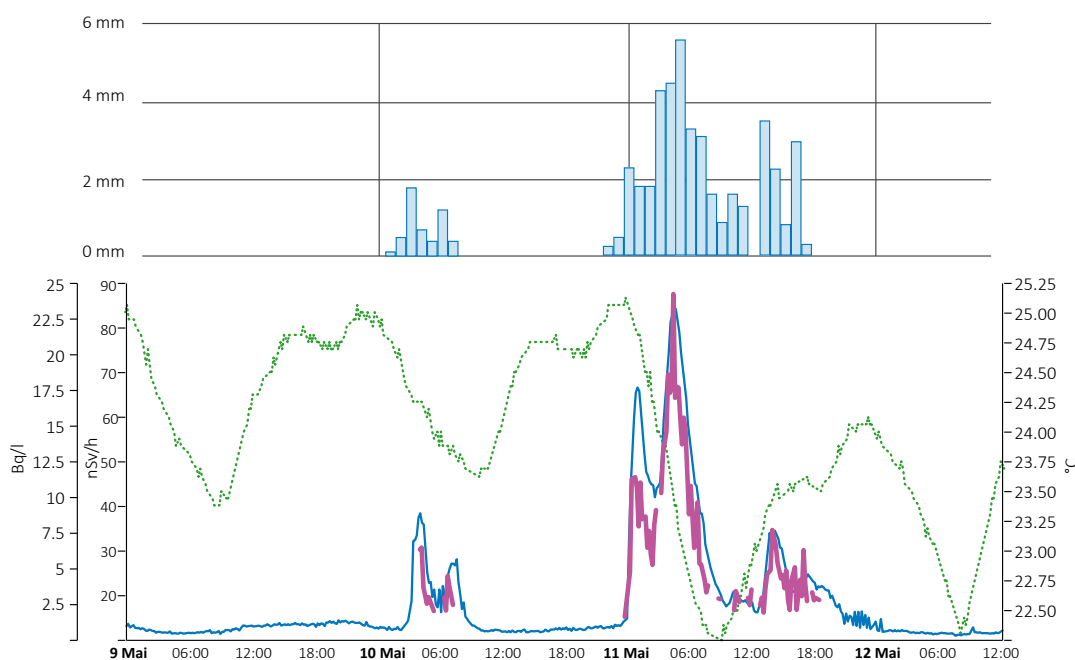
Isotop ¹	Halbwertszeit	Photonenenergie [keV] ²	jährliche Anwendung Schweiz
^{18}F	1.8 Stunden	511 (194%)	ca. 17 TBq (PET)
^{67}Ga	3.3 Tage	~9 (50%), 93 (38%), 184 (21%)	nicht mehr verwendet
^{68}Ga	1.3 Stunden	511 (178%), 1077 (3.2%)	ca. 1 TBq (PET)
^{123}I	13.2 Stunden	159 (83%), ~27 (71%)	ca. 0.3 TBq (SPECT)
^{125}I	59.4 Tage	~27 (113%)	selten als Radiopharmazeutikum; in Forschungsanlagen
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.0 Stunden	140.5 (89%)	ca. 30 TBq (SPECT)
^{111}In	2.8 Tage	171 (91%), 245 (94%), ~23 (78%)	ca. 12 GBq (SPECT)
^{131}I	8.0 Tage	364.5 (81%), 637 (7.1%), 284 (6.1%)	ca. 2 TBq (Therapie)
^{153}Gd	240 Tage	~41 (96%), 97.4 (29%), 103 (21%)	nicht verwendet in der Nuklearmedizin
^{166}Ho	26.8 Stunden	~41 (8.1%), 80.6 (6.6%)	ca. 38 GBq (Therapie)
^{177}Lu	6.6 Tage	208 (10%), 113 (6.2%)	ca. 4 TBq (Therapie)
^{201}Tl	3.0 Tage	~70 (74%), ~82 (20%), 167 (10%)	ca. 17 GBq (SPECT)
^{223}Ra	11.4 Tage	~82 (39%), 269 (14%)	ca. 75 GBq (Therapie)

¹ In dieser Arbeit nachgewiesene Isotope sind fett gedruckt.

² Maximal drei Emissions-Linien sind angegeben; mit '~' sind $\text{K}\alpha_{1,2}$ oder $\text{K}\beta_{1,2}$ Doppellinien gekennzeichnet (jeweils mittlere Energie der beiden Linien); in Klammer steht die Emissionswahrscheinlichkeit.

Kontinuierliche Messungen mit NaI-Sonden in Abwasserreinigungsanlagen

In den ersten Monaten 2019 wurde eine NaI-Sonde in der Abwasserreinigungsanlage (ARA) der ProRhenio AG in Basel in einem Becken mit genügend Wassertiefe (>1m auf allen Seiten) zwischen Rechen/Sandfang und Vorklärbecken installiert. Der typische Durchfluss dieser ARA schwankt von 0.4 bis 1.8 m³/s. Ab April war diese Sonde im Zulauf der ARA des Consorzio Depurazione Acque del Bellinzonese e della Riviera (CDABR) in Giubiasco im Einsatz. Aufgrund von Unterbrüchen in der Datenübertragung kam es mehrfach zu mehrtägigen Datenverlusten, weil auf der Sonde selber nur beschränkter Speicherplatz vorhanden ist.



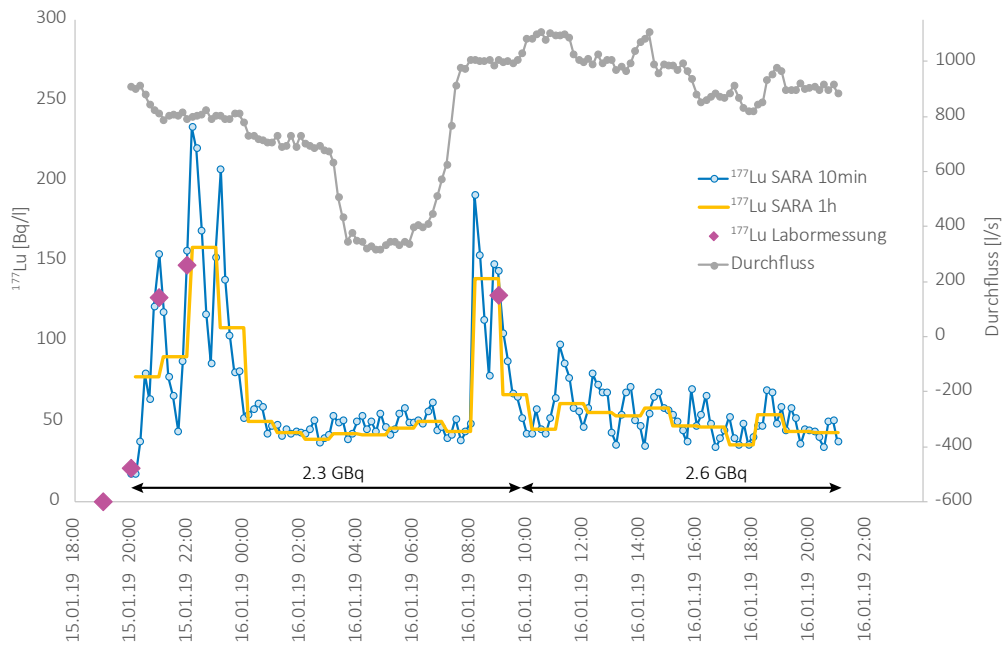
Figur 1 :

Oben: Niederschlag (Daten MeteoSchweiz); unten: Temperatur (grün, gepunktet), Dosisleistung (blau) und falsche ¹³¹I Konzentration (rot, fett: ²¹⁴Pb-Peaks bei 351.9 keV fälschlich als ¹³¹I interpretiert) in der ARA. Während der dargestellten Zeitperiode waren keine künstlichen Radionuklide im Abwasser nachweisbar.

Die eingesetzte Sonde vom Typ SARA Water (Envinet GmbH) misst mit einem 3-Zoll NaI(Tl)-Kristall im Energiebereich zwischen ca. 40 keV und 2'700 keV. Die Sonde ist vom Hersteller kalibriert und wird jährlich mit einer ¹³⁷Cs-Quelle auf Konstanz geprüft. Die Sonde nimmt 10-Minuten Spektren auf, wertet diese aus und übermittelt die Ergebnisse an eine Datenzentrale. Die Nachführung der Energiekalibrierung beruht auf dem ⁴⁰K-Peak von in der Sonde eingebautem KCl. Im allgemeinen funktioniert diese Nachführung der Energiekalibrierung gut. Bei starker Erhöhung von Radonfolgeprodukten kommt es aber vor, dass der ⁴⁰K-Peak nicht mehr erkennbar ist und sich die Energiekalibrierung verschiebt. In dieser Situation wird typischerweise der ²¹⁴Pb-Peak bei 351.9 keV als ¹³¹I (364.5 keV) und der ²¹⁴Bi-Peak bei 609 keV als ¹³⁷Cs (661 keV) interpretiert wird, wobei ersteres auch bei korrekter Energiekalibrierung vorkommen kann. Als Beispiel dazu zeigt die Figur 1 die Entwicklung verschiedener Parameter bei einem Regenereignis. Durch die Kanalisation gelangt Regenwasser in die ARA und führt dort zum Absinken der Temperatur in Abweichung vom normalen Tagesgang der Temperatur. Gleichzeitig schwemmt der Regen Radonfolgeprodukte ein und verursacht damit einen starken Anstieg der Dosisleistung. Die falsche ¹³¹I-Kurve (in Wirklichkeit ²¹⁴Pb) folgt der Dosisleistung.

Überprüfung der Sondenkalibrierung für ¹⁷⁷Lu durch Labormessungen

Luthetium-177 ist seit einigen Jahren das in der Schweiz– gemessen an der eingesetzten Aktivität– meistverwendete Isotop für die Radiotherapie. Verglichen mit dem ebenfalls häufig eingesetzten ¹³¹I ist es weniger radiotoxisch und kann deshalb in höheren Aktivitätskonzentrationen abgegeben werden, die von der Sonde gut messbar sind (Immissionsgrenzwert für Gewässer: 307.7 Bq/l). Im Januar 2019 wurden während einer

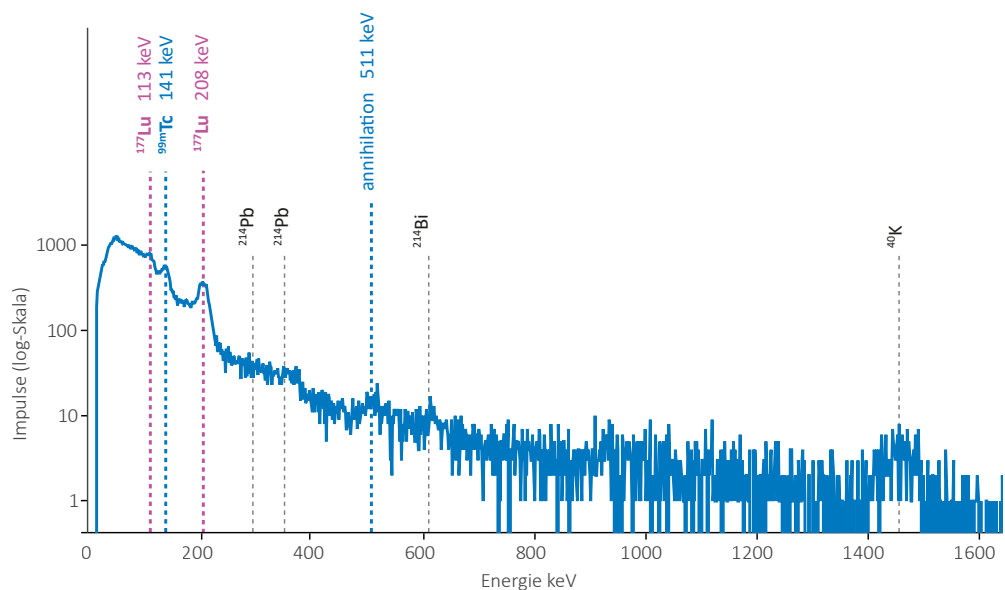


Figur 2 :
 Zeitverlauf der ^{177}Lu -Konzentration im Abwasser der ARA Basel während einer Abgabe durch das Universitätsspital Basel. Blau sind die 10-Minutenmesswerte und als gelbe Linie die Werte aus den aufsummierten Stunden-Spektren dargestellt. Die Roten Rhomben entsprechen den im Labor mit HPGe-Gammaspektrometrie gemessenen Konzentrationen.

angekündigten Abgabe von ^{177}Lu durch das Universitätsspital Basel beim Standort der NaI-Sonde in der ARA Basel mehrere Probenahmen durchgeführt, um die Messwerte der Sonden mit Labormessungen vergleichen zu können. Wie die Figur 2 zeigt, stimmen die Laborresultate sehr gut mit den von der Sonde ermittelten Konzentrationen überein, die auf der von der Firma voreingestellten Kalibration beruhen.

Die Abgabe von 2.3 GBq ^{177}Lu fand am 15.1.2019 um 18 Uhr statt. Ab 20 Uhr konnten in der ARA erhöhte ^{177}Lu Konzentrationen und gegen 22 Uhr die maximale Konzentration von 233 Bq/l gemessen werden.

NaI-Spektrum ARA Basel, 15.1.2019



Figur 3 :
 10-Minuten Spektrum von Abwasser in der ARA während der Abgabe von ^{177}Lu aus dem Universitätsspital Basel. Die gemessene ^{177}Lu Aktivitätskonzentration entspricht dem höchsten während der Abgabe gemessenen Wert von 233 Bq/l.

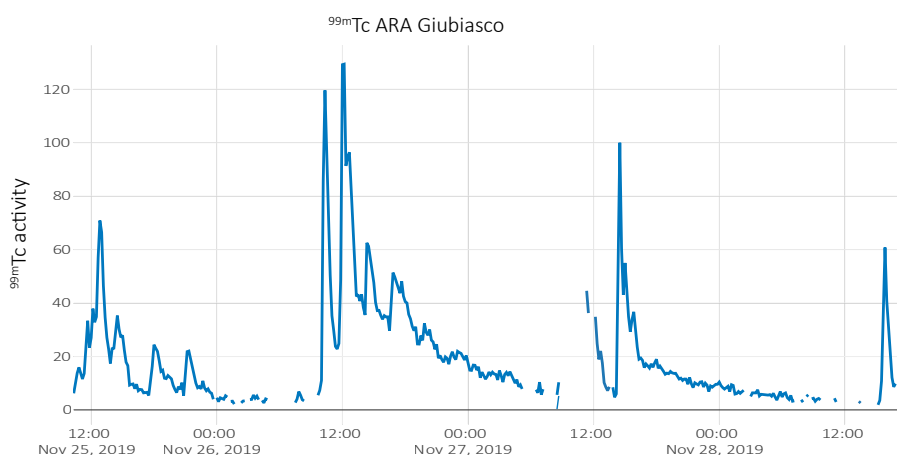
Die Ausgangskonzentration von ^{177}Lu im entleerten Tank betrug 460 kBq/l. Dieses Wasser hat also die ARA mit einer rund 2'000 fachen Verdünnung erreicht. Die ^{177}Lu -Konzentrationen blieben nach Mitternacht erhöht und am Morgen des 16.1. wurde ein 2. Peak beobachtet, ohne dass weiteres ^{177}Lu abgegeben wurde.

Berechnet man die Gesamtaktivität von ^{177}Lu , die die Sonde passiert hat, indem man das Produkt aus Durchflussmenge und Aktivität für die 10-Minuten-Messungen aufsummiert, so entspricht die vom Spital abgegebene Aktivität der Zeit vom Beginn der Erhöhung bis kurz nach dem Maximum des zweiten Peaks (siehe Figur 2). Berechnet man auf gleiche Weise die Gesamtaktivität für den zweiten Teil des in Figur 2 dargestellten Verlauf, ergibt sich eine zusätzliche Aktivität von 2.6 GBq. Erklärungsansätze für dieses Überschätzen der Aktivität sind Radionuklide im Rücklaufwasser aus der Schlammbehandlung, das in den Zulauf des Vorklärbeckens mit der Sonde geleitet wird; Totwasser im Vorklärbecken, welches nur verzögert ausgespült wird und auch ein Memory-Effekt durch Anlagerung von Schlamm mit Radionukliden direkt auf der Sonde kann nicht ausgeschlossen werden. Der zweite Peak am Morgen des 16.1. beruht vermutlich auf der Remobilisierung von Radionukliden in der Kanalisation durch die morgendliche, höhere Wasserfracht. Die Sondenmessungen geben also in erster Linie Auskunft über den Zeitverlauf und die relative Höhe von Radionuklidabgaben. Für eine belastbare Bestimmung der abgegebenen Aktivitäten müssten die Strömungsverhältnisse und das Verhalten der Radionuklide in der ARA wesentlich detaillierter untersucht werden.

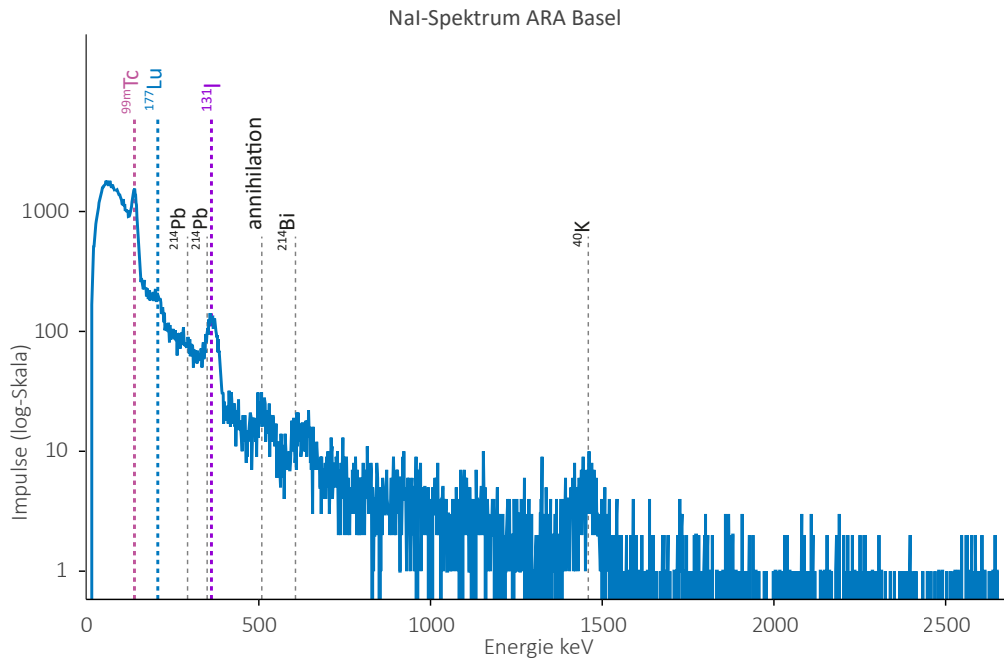
Ein während der diskutierten Abgabe aufgenommenes Spektrum ist in Figur 3 dargestellt. Die beiden stärksten Gamma-Linien von ^{177}Lu sind klar erkennbar und die stärkere davon bei 208 keV wird von der Sonde korrekt identifiziert und ausgewertet. Als weiteres Radionuklid ist im Abwasser auch $^{99\text{m}}\text{Tc}$ vorhanden.

Technetium-99m und ^{131}I

Die ^{99}Mo -Tochter $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist ein häufig für SPECT-Aufnahmen verwendetes Radionuklid. Aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von 6 Stunden ist eine Rückhaltung in speziellen Tanks im Spital nicht nötig. Deshalb kann $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in der ARA vergleichsweise häufig nachgewiesen werden und kann dort auch zu einer Erhöhung der Gesamtdosisleistung beitragen. Ein typischer Zeitverlauf von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in der ARA Guibiasco ist in Figur 4 dargestellt. Jeweils am Nachmittag ist die Konzentration erhöht mit mehreren deutlich erkennbaren Spikes. Der Untergrund des Spektrums beim $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Peak bei 140.5 keV ist deutlich höher als beim ^{177}Lu -Peak bei 208 keV (Figur 3). Wie gut in diesem Falle die von der Sonde ermittelte Konzentration mit Labormessungen übereinstimmen, konnte wegen der kurzen Halbwertszeit (und der vergleichsweise langen Dauer zwischen Probenahme und Messung) nicht zufriedenstellend untersucht werden.

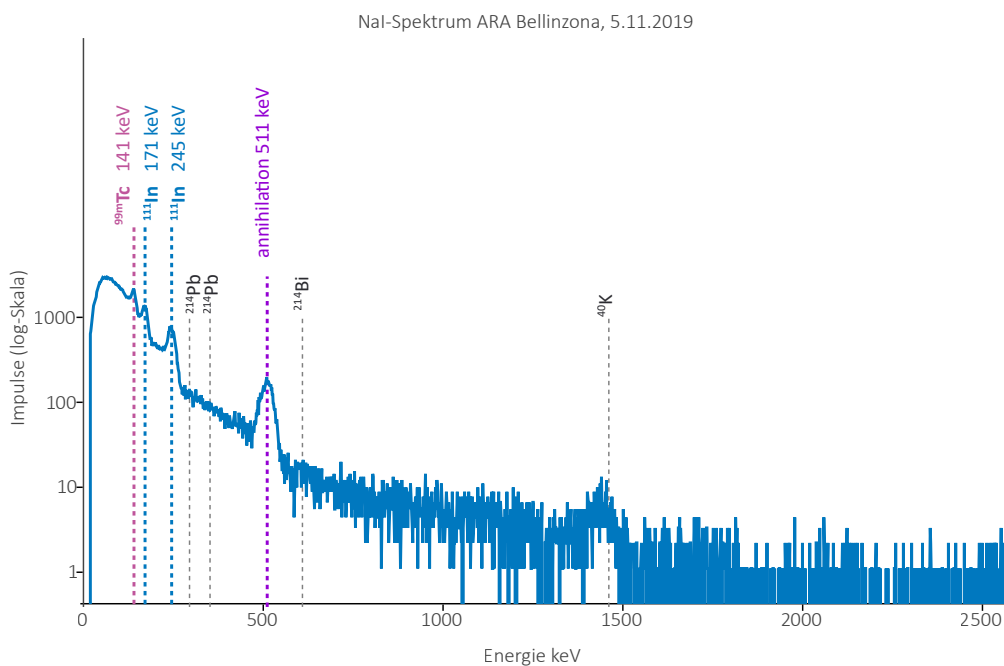


Figur 4 :
Zeitverlauf von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ im Einlauf der ARA Basel. Das gemessene $^{99\text{m}}\text{Tc}$ stammt aus Abgaben des Universitätsspitals Basel. Die höchsten Konzentrationen werden jeweils um die Mittagszeit beobachtet. Das darauf folgende Tailing mit mehreren Konzentrationsspitzen kann das verzögerte Ausspülen der Radioaktivität aus der Kanalisation widerspiegeln, wobei auch die Zirkulation in der ARA (Durchmischung, Aufenthaltszeiten, Rückspülwasser) einen Einfluss hat. Diese Vorgänge wurden hier nicht genauer untersucht.



Figur 5:
Spektrum mit deutlichen ^{99m}Tc - und ^{131}I -Peaks. Die Zuordnung des ^{131}I -Peaks ist eindeutig, da die Konzentration an Radontöchtern (^{214}Pb , ^{214}Bi) tief ist.

Das in der Radiotherapie häufig eingesetzte ^{131}I wird in Spitälern wie ^{177}Lu in Abklingtanks gelagert bis die Abgabelimite für die Aktivität eingehalten ist. Weil für ^{131}I die Abgabelimite tief ist (Immissionsgrenzwert für Gewässer: 6.7 Bq/l), ist die Konzentration in der ARA nur selten oberhalb der Nachweisgrenze der Sonde (ca. 1 Bq/l). Ein Spektrum mit den beiden Isotopen ^{99m}Tc und ^{131}I findet sich in Figur 5.



Figur 6:
10-Minuten Spektrum aus der ARA in Giubiasco. Der Annihilationspeak ist von ^{18}F verursacht, das in PET-Untersuchungen eingesetzt wird.

PET Radionuklide und ^{111}In

In der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) kommen kurzlebige Radionuklide zum Einsatz, insbesondere ^{18}F , ^{13}N und ^{68}Ga . Die Halbwertszeit von ^{13}N ist mit 10 Minuten so kurz, dass nicht zu erwarten ist, dass es in der ARA noch nachgewiesen werden kann. Hingegen sind ^{18}F (1.8 Stunden) und ^{68}Ga (1.3 Stunden) ausreichend stabil, um nach der Abgabe im Spital bis in die ARA zu gelangen und sich dort mit dem Annihilationspeak bei 511 keV seiner Beta-plus-Zerfälle bemerkbar zu machen. Eine Unterscheidung dieser beiden Isotope ist theoretisch durch den Gammapeak von ^{68}Ga bei 1067 keV möglich. Der Peak ist aber schwach und wurde in den hier präsentierten Messungen nie erkannt. Der Annihilationspeak im Spektrum in Figur 6 ist aufgrund des fehlenden Gammapeaks bei 1067 keV sowie dem häufigeren Einsatz (^{68}Ga macht zur Zeit maximal 5% der angewendeten Aktivität von ^{18}F aus) und der längeren Halbwertszeit von ^{18}F eher diesem zuzuordnen. Weiter sind in diesem Spektrum die beiden SPECT-Radionuklide ^{111}In (2 Gammalinien) und wiederum $^{99\text{m}}\text{Tc}$ nachweisbar.

Verdankung

Die Installation der Sonde und die Probenahmen wurden von Mitarbeitern des Consorzio Depurazione Acque del Bellinzonese e della Riviera (CDABR) in Giubiasco sowie der ProRheno AG in Basel mit Unterstützung von Th. Marti (MARTI solutions) durchgeführt. Wir danken R. Menz für Auskunft zu den Abgaben des Universitätsspital Basel, R. Frei für Erklärungen zur Funktionsweise der ARA Basel sowie R. Hesselmann für Hinweise zu den Radioisotopen und Korrekturen.

9.5

Aktionsplan Radium 2015-2022

M. Palacios, D. Storch

Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Niemand sollte in der Schweiz über längere Zeit einer hohen ^{226}Ra -Kontamination, die auf frühere Tätigkeiten der Uhrenindustrie zurückgeht, ausgesetzt sein. Aus diesem Grund hat der Bundesrat an seiner Sitzung vom 10. April 2019 die Verlängerung des Aktionsplans Radium um weitere drei Jahre beschlossen. Somit können die fast 1'000 Liegenschaften (Gebäude und Gärten), die als potenziell mit ^{226}Ra kontaminiert identifiziert wurden, bis 2022 untersucht und gegebenenfalls saniert werden. Dieses Kapitel zeigt den Stand der Arbeiten der verschiedenen Achsen des Aktionsplans. Von den 668 bislang bereits kontrollierten Gebäuden wiesen 113 ein für die Bewohnerinnen und Bewohner inakzeptables Expositionsniveau auf und müssen saniert werden. Bis heute wurden bereits 97 Gebäude saniert.

Verlängerung des Aktionsplans Radium

Im Kontext des Aktionsplans Radium erteilte das Bundesamt für Gesundheit (BAG) dem Historischen Institut der Universität Bern 2016 einen Rechercheauftrag: Ziel war es, die Liegenschaften zu ermitteln, in denen bei Tätigkeiten der Uhrenindustrie bis in die 1960er-Jahre ^{226}Ra verwendet wurde. Die Universität Bern identifizierte rund 1'000 potenziell kontaminierte Liegenschaften; bei der Ausarbeitung des Aktionsplans war diese Zahl noch auf 500 geschätzt worden.

Aus diesem Grund drängte sich eine Verlängerung des Aktionsplans um drei Jahre auf, damit die Gesamtheit der Liegenschaften geprüft und allenfalls saniert werden kann. Der Bundesrat hat an seiner Sitzung vom 10. April 2019 diese Verlängerung genehmigt und zusätzliche 4 Millionen Franken für die Jahre 2020–2022 zur Verfügung gestellt. Das BAG hatte in einem Bericht den Stand der Arbeiten des Aktionsplans Radium am 31. Dezember 2018 aufgezeigt. Der Bericht ist verfügbar unter: www.bag.admin.ch/radium-altlasten. Die am stärksten betroffenen Kantone (Bern, Solothurn und Neuenburg), die bereits für den Zeitraum 2015–2019 einen freiwilligen Beitrag leisteten, haben ihre weitere Unterstützung zugesichert. Auch die Uhrenindustrie unterstützt die Verlängerung des Aktionsplans mit einem freiwilligen finanziellen Beitrag.

Stand der diagnostischen Untersuchungen

Eine diagnostische Untersuchung besteht aus der Messung der Dosisleistung auf der gesamten Grundfläche des betroffenen Gebäudes oder der betroffenen Aussenfläche. 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 für die Schweizer Bevölkerung zulässige Grenzwert von 1 Millisievert (mSv) pro Jahr überschritten ist, werden die Räumlichkeiten saniert. Gärten sind sanierungsbedürftig, wenn die Konzentration von ^{226}Ra in der Erde den Grenzwert von 1'000 Becquerel pro Kilogramm (Bq/kg) übersteigt.

Bislang wurden bei 668 Liegenschaften mit insgesamt fast 3'900 Wohnungen (oder Gewerbelokalen) diagnostische Messungen durchgeführt. 113 dieser Liegenschaften müssen saniert werden; dies entspricht 74 Wohnungen (oder Gewerbelokalen) und 74 Aussenflächen. Fast 90% der sanierungsbedürftigen Gebäude sind Wohngebäude. In den meisten Fällen lag die berechnete effektive Dosis in den Innenräumen zwischen 1 und 10 mSv/Jahr. Bei fünf Gebäuden wurde jedoch eine Dosis zwischen 10 und 17 mSv/Jahr festgestellt. Die maximalen gemessenen ^{226}Ra -Werte in Bodenproben von zu sanierenden Gärten lagen durchschnittlich bei 26'500 Bq/kg. In einem Fall wurden punktuell Werte von gegen 670'000 Bq/kg gemessen. Der Stand des Aktionsplans am 31. Dezember 2019 ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1:
Stand des Aktionsplans Radium am 31. Dezember 2019.

	Stand der diagnostischen Messungen	Ergebnisse der diagnostischen Messungen		Stand der Sanierung
	Anzahl durchgeführter Messungen	Anzahl Fälle ohne Sanierungsbedarf	Anzahl Sanierungsfälle	Anzahl Sanierungen abgeschlossen (oder laufend)
Kanton BE	212	161	51	47
Kanton NE	281	247	34	28
Kanton SO	98	77	21	19
Andere Kantone	77	70	7	3
Total	668	555	113	97

Sanierungsarbeiten

97 Liegenschaften sind bereits saniert worden oder werden derzeit saniert. Das Sanierungskonzept beinhaltet die Planung, die Beseitigung der Kontamination, die Wiederherstellung, die Schlusskontrolle und die Entsorgung der Abfälle. Mit einer Innenraumsanierung soll eine Senkung der effektiven Dosis für die Bewohnerinnen und Bewohner auf 1 mSv/Jahr erreicht werden. Für die Aussenflächen wird eine Konzentration von weniger als 1'000 Bq/kg im Boden angestrebt. Ziel ist es, die Kontaminationen so stark wie möglich zu verringern und an jedem Punkt eine Umgebungs-Äquivalentdosisleistung von weniger als 100 Nanosievert pro Stunde (nSv/h) netto zu erreichen.

Entsorgung

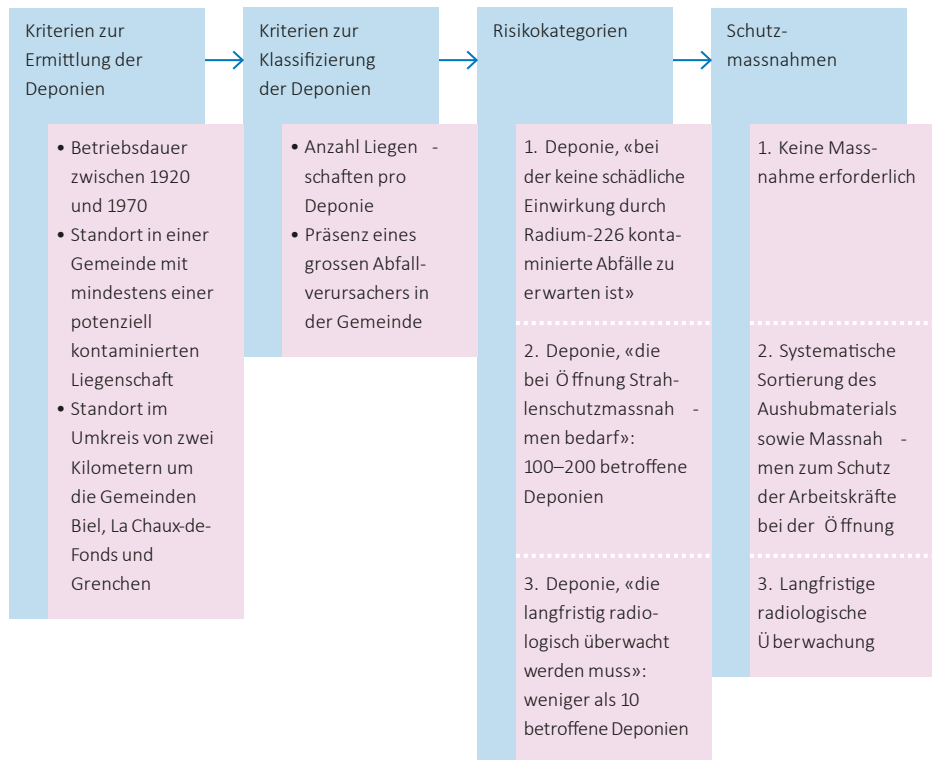
Gemäss Artikel 116 StSV können schwach kontaminierte brennbare Abfälle mit Zustimmung des BAG und nach Mitteilung an den Kanton in einer Verbrennungsanlage entsorgt werden. Die wöchentlich zur Verbrennung zugelassene Aktivität darf jedoch die tausendfache Bewilligungsgrenze gemäss StSV nicht überschreiten, d. h. 2 MBq für ^{226}Ra . Zwischen 2015 und 2019 wurden bereits über 160 m³ brennbare Abfälle verbrannt.

Schwach kontaminierte inerte Abfälle können gemäss Artikel 114 StSV mit Zustimmung des BAG, des Kantons und des Deponiebetreibers an eine Deponie zur Ablagerung abgegeben werden, sofern ihre maximale spezifische Aktivität das Tausendfache der Befreiungsgrenze nicht überschreitet. Diese liegt bei 10 Bq/kg für ^{226}Ra . Im Rahmen des Aktionsplans wurden bereits über 2'000 m³ inerte Abfälle zur Ablagerung abgegeben.

Abfälle, deren Kontamination die genannten Werte übersteigt, werden unter Aufsicht des BAG in das Bundeszwischenlager nach Würenlingen befördert. Bislang wurden knapp 2 m³ Abfälle aus dem Aktionsplan auf diesem Weg entsorgt.

Problematik Mischkontaminationen

Das BAG hat rund zehn ehemalige Industriestandorte identifiziert, bei denen aufgrund einer ^{226}Ra -Kontamination eine Sanierung erforderlich ist. Diese sind allerdings bereits im Kataster der belasteten Standorte gemäss Altlasten-Verordnung aufgeführt. Anfang 2019 hat das BAG eine neue Unterstützungsgruppe «Mischkontaminationen» aufgebaut, in der auch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und die Suva vertreten sind. Die Gruppe soll – unter Berücksichtigung der Strahlenschutz- und der Umweltschutzgesetzgebung sowie der Vorschriften zum Schutz der Arbeitskräfte – Lösungen für den Umgang mit komplexen Fällen chemischer und radiologischer Mischkontaminationen finden.



Figur 1:
 Vorgehen zur Ermittlung und Klassifizierung der Deponien nach Risiko bezüglich ²²⁶Ra.

Die Unterstützungsgruppe hat bereits ein Pilotprojekt dazu ausgewertet. Es ging um die Sanierung mehrerer benachbarter mit ²²⁶Ra kontaminierter Parzellen im Kanton Neuenburg, die gleichzeitig durch organische Chlorverbindungen und Schwermetalle kontaminiert waren. Das Steuerungskomitee und der betroffene Kanton haben das Projekt genehmigt. Die Dekontaminierung nahm rund zwei Monate in Anspruch (Figur 2).

Mit dem Labor Spiez wurde eine Zusammenarbeit initiiert, um die Aktivität bei mit ²²⁶Ra kontaminierten Proben zu senken. Somit können die chemischen Schadstoffe dieser Proben in konventionellen Laboren analysiert werden. Darüber hinaus können inerte radioaktive Abfälle mit chemischen Kontaminationen im Laufe von 2020 gemäss den gesetzlichen Vorgaben im Bundeszwischenlager entsorgt werden.



Figur 2:
 Dekontaminierungsarbeiten auf einer mischkontaminierten Parzelle.

Überwachung ehemaliger Deponien

2018-2019 hat das BAG in Zusammenarbeit mit dem BAFU eine Strategie erarbeitet, um aus dem Kataster der belasteten Standorte diejenigen ehemaligen Deponien herauszufiltern, die potenziell mit ²²⁶Ra kontaminierte Abfälle enthalten könnten. Die so ausgewählten Deponien werden anhand festgelegter Kriterien in drei Risikokategorien eingeteilt. Figur 16 zeigt das Vorgehen zur Ermittlung und Klassifizierung der Deponien.

2019 hat das BAG diese Strategie den drei am stärksten betroffenen Kantonen vorgestellt: Bern, Neuenburg und Solothurn. Währenddessen war die Klassifizierung der ehemaligen Deponien noch im Gang. Bei Deponien, die gemäss ihrer Einstufung Strahlenschutzmassnahmen bei Öffnung erfordern, muss in den kantonsinternen Katastern der belasteten Standorte ein entsprechender Vermerk erfasst werden, damit die Information erhalten bleibt. Die radiologische Überwachung von Altdeponien ist langfristig und wird in die Grundaufgaben des BAG mit einbezogen.

Chapitre / Kapitel 10

RADON

2019

- Plan d'action radon 2012 - 2020
- Aktionplan Radon 2012 - 2020

10

Aktionsplan Radon 2012 - 2020

M. Palacios, D. Storch

Radiologische Risiken, Abteilung Strahlenschutz, Bern

Zusammenfassung

Nach dem Inkrafttreten der revidierten Strahlenschutzverordnung (StSV) Anfang 2018 hat das Bundesamt für Gesundheit (BAG) zusammen mit den Hauptbeteiligten einige gesetzliche Bestimmungen in einer «Wegleitung Radon» konkretisiert. Gleichzeitig wurde der Aktionsplan Radon 2012–2020 extern evaluiert. Die Erkenntnisse dieser Evaluation und die revidierten Bestimmungen der StSV bilden die Grundlage für die künftige Strategie beim Radonschutz.

Wegleitung Radon

Die Wegleitung Radon konkretisiert die Anforderungen aus der StSV und entspricht dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Sie ist unter www.ch-radon.ch verfügbar.

2019 wurden neue Kriterien zur Priorisierung von Radonmessungen in die Wegleitung aufgenommen. Diese berücksichtigen die Wahrscheinlichkeit, den Radonreferenzwert von 300 Bq/m³ zu überschreiten (gemäss Radonkarte, Figur 1) sowie gewisse bauliche Eigenschaften. Darüber hinaus stellt das BAG auf seiner Website (www.radonkarte.ch) ein interaktives Tool zur Verfügung, mit dem Privatpersonen prüfen können, ob eine Radonmessung in einem bestimmten Gebäude empfohlen ist.

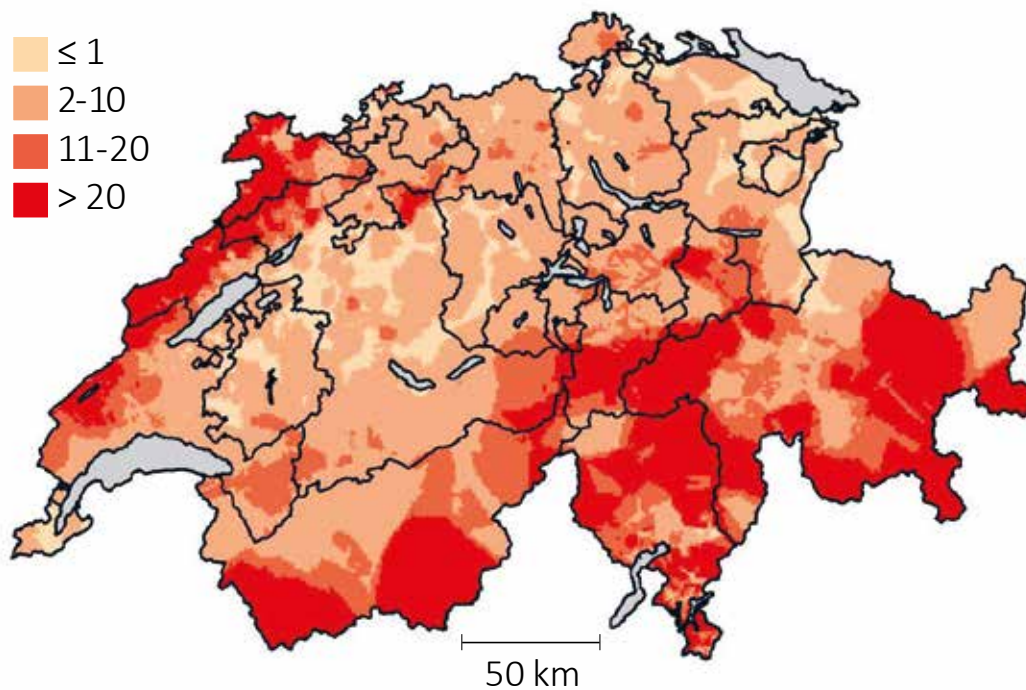
Ausserdem wird den Baubewilligungsbehörden im Anhang der Wegleitung eine Vorlage für ein Informationsblatt zu Radon bei Neu- und Umbauten zur Verfügung gestellt. Es wird empfohlen, die Massnahmen bezüglich Radonschutz aus der Norm 180 «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) konsequent umzusetzen. Liegt die Wahrscheinlichkeit, den Referenzwert zu überschreiten, über 10% oder verfügt das Gebäude über einen Naturbodenkeller oder erdberührende Räume mit Personenaufenthalt, sind weiterführende Radonschutzmassnahmen notwendig.

Evaluation des Aktionsplans

Radon 2012–2020

Um die Strategie zum langfristigen Radonschutz in der Schweiz umzusetzen, hat der Bundesrat den nationalen Aktionsplan Radon 2012-2020 verabschiedet. Da der Aktionsplan das Ende seiner Laufzeit bald erreicht, hat das BAG die Firma Interface in Luzern mit einer externen Evaluation beauftragt. Die Evaluation hat ge-

zeigt, dass wichtige Ziele erreicht wurden, darunter namentlich die Revision der StSV. Diese gewährleistet, dass die Kantone in allen Schulen und Kindergärten Radonmessungen durchführen. Zudem sieht sie vor, dass Bauherrinnen und Bauherren im Rahmen von Baubewilligungsverfahren auf die Radonproblematik aufmerksam gemacht werden. Trotz dieser wichtigen Grundlagenarbeiten ist der Aktionsplan noch nicht ausreichend umgesetzt. Es braucht ein verbessertes Monitoring der Sanierungen, wobei Synergien mit anderen Programmen genutzt werden müssen, zum Beispiel mit energetischen Gebäudesanierungen. Auch in den Bereichen Radonmessungen und Bauvorschriften wurden nicht alle Ziele erreicht. Die Evaluation umfasste auch eine Befragung der Bevölkerung zu deren Radon-Kenntnissen. Fast 1'000 Personen nahmen an der Online-Befragung der Firma Demoscope teil, die im Mai 2019 publiziert wurde. Ähnliche Befragungen wurden bereits 1995 und 2008 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser drei Umfragen zeigen, dass der Anteil der Personen, die noch nie von Radon gehört haben, nach wie vor gross ist – auch wenn sich der Kenntnisstand tendenziell verbessert hat (siehe Figur 1). Von den Personen der Befragung von 2019, die angaben, Radon zu kennen, war jedoch jede vierte (26%) der Meinung, dass Radon keine Gefahr für die Gesundheit darstellt. Dies macht deutlich, dass das Risikobewusstsein der Bevölkerung betreffend Radon gesteigert werden muss. Der Evaluationsbericht ist auf der Website des BAG verfügbar (www.bag.admin.ch > Das BAG > Publikationen > Evaluationsberichte Chemikaliensicherheit und Strahlenschutz).

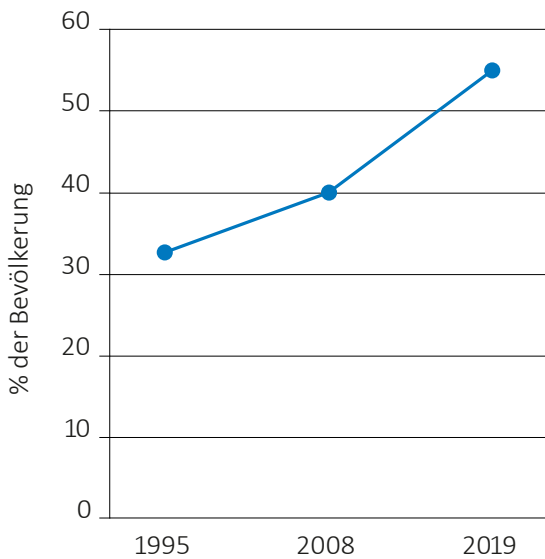


Figur 1 :

Karte mit Angaben zur Wahrscheinlichkeit in Prozent, dass der Referenzwert von 300 Bq/m³ überschritten wird (BAG, Stand 2018).

Künftige Strategie zum Radonschutz

Das BAG erarbeitet derzeit einen neuen Aktionsplan Radon für den Zeitraum 2021-2030. Es stützt sich dabei auf die Ergebnisse der Evaluation und die revidierte StSV und berücksichtigt die internationalen Richtlinien. Bei der Planung der künftigen Strategie ist ein Steuerungskomitee federführend, bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern der BAG-Abteilungen Strahlenschutz und Chemikalien sowie der Suva. Daneben wurde eine Begleitgruppe geschaffen, die sich aus Vertreterinnen und Vertretern der Kantone, der Suva, des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport, des SIA und des Hauseigentümergebietes zusammensetzt. 2020 wird ein breites Vernehmlassungsverfahren lanciert, insbesondere bei den Kantonen.



Figur 2:
Entwicklung des Kenntnisstandes zum Thema Radon bei der Bevölkerung

Weitere Projekte 2019

Aus- und Weiterbildung

Das BAG beauftragt seit einigen Jahren drei regionale Radonfachstellen mit der Aus- und Weiterbildung und der Unterstützung der Radonfachpersonen. Diese Fachstellen sind die Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI), die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) und die Hochschule für Technik und Architektur Freiburg (HEIA-FR). 2019 hat das BAG eine Arbeitsgruppe mit diesen drei Fachstellen ins Leben gerufen, welche die Ausbildung der Radonfachpersonen harmonisieren soll. Ziel ist es, die Gleichwertigkeit der Ausbildung in der ganzen Schweiz zu gewährleisten und gleichwohl regionalen Besonderheiten Rechnung zu tragen. Die drei Fachstellen haben sich auch bereit erklärt, künftig das E-Learning-Tool des BAG zu verwenden, das in den Sprachen Deutsch, Französisch und Italienisch zur Verfügung stehen wird. Auf dieser Grundlage erstellt das BAG 2020 ein Ausbildungskonzept. Mit den angebotenen Kursen konnten 2019 an der SUPSI und der FHNW fast 50 neue Radonfachpersonen ausgebildet werden.

Das Projekt «Radon mitigation efficiency (RAME)»

Die SUPSI hat Anfang 2019 im Auftrag des BAG das Projekt «Radon mitigation efficiency (RAME)» lanciert. Das Projekt soll die langfristige Wirksamkeit von Radonsanierungen beurteilen, die in fast 150 Gebäuden durchgeführt wurden, sodass die Eigentümerinnen und Eigentümer nötigenfalls zusätzliche Korrekturmaßnahmen ergreifen können. Mithilfe des Projekts können ausserdem die Sanierungsmethoden identifiziert werden, bei denen die langfristige Wirksamkeit nicht garantiert ist, und Lösungen zur Abhilfe gesucht werden. Die Studienergebnisse werden 2020 vorliegen.



Figur 3:
Projekt RAME: Überprüfung der langfristigen Wirksamkeit der Radonsanierungen

Annexes Anhänge

2019

- 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	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, 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. Gosteli, N. Mosimann, H. Sahli
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturs- schutz, 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. Yukihiro, 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, M. Zehringer, A. Pregler	Kantonales Laboratorium Kannenfeldstr. 2, Postfach, 4012 Basel
FR	C. Ramseier	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	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	P. Huber	Kantonale Lebensmittelkontrolle Greibenhof, Werkhofstr. 5, 4509 Solothurn
TG	C. Spinner	Kantonales Laboratorium Spannerstr. 20, 8510 Frauenfeld
TI	M. Jermini	Laboratorio Cantonale Via Mirasole 22, 6500 Bellinzona
NW / OW / SZ / UR	D. Imhof	Laboratorium der Urkantone Postfach 363, 6440 Brunnen
VD	C. Richard	Service de la consommation et des affaires vétérinaires 155, ch. des Boveresses, 1066 Epalinges
VS	E. Pfammatter	Laboratoire Cantonal Rue Pré-d'Amédée 2, 1950 Sion
ZG	M. Fricker	Amt für Lebensmittelkontrolle Postfach 262, 6312 Steinhausen
ZH	M. Brunner, S. Reber	Kantonales Labor Postfach, 8032 Zürich
LI	W. Burtcher	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-Aerosolsammer Jungfraujoch URAnet: Aerosolwarnnetz 15 Stellen on-line-Messung mit Datenfernübertragung ⁸⁵ Kr-Messungen an Luftproben vom Jungfraujoch	Aerosolsammler und High-Volume-Sampler: kontinuierliche Sammlung auf Aerosolfiltern mit γ -Spektrometrie im Labor: Nachweisgrenze für ¹³⁷ Cs: 1 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 Spitälern, Deponien, Kehrriechverbrennungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen γ -, α - und ⁹⁰ Sr-Messung

4. Überwachungsbereiche und Kompetenzzentren

Bereich:	überwacht wird:	Kompetenzzentren ¹⁾ :
Atmosphäre	Aerosole, Niederschläge ¹⁴ C, Edelgase	URA (BAG) inkl. URAnet / RADAIR UniBE
Deposition	Boden, Bewuchs, in-situ ⁹⁰ Sr- und Alpha-Messung	URA (BAG), IRA und LABOR SPIEZ
	Aeroradiometrie	ENSI, NAZ
Aquatisches Milieu	Gewässer, Fische, Sedimente Grund- und Quellwasser, Deponien	EAWAG, Institut Forel, LABOR SPIEZ, URA BAG
Lebensmittel	Milch, Getreide, Gemüse, Wild, Pilze, etc.	Kantonale Laboratorien, URA, IRA, LABOR SPIEZ
Dosis	α- und n-Dosen	PSI, IRA
	automatische Dosiswarnnetze	NAZ (NADAM), ENSI (MADUK)
menschliche Körper	Ganzkörpermessungen ⁹⁰ Sr in Knochen und Zähnen	PSI, 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 2020

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 2020

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