

Zeitschrift:	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
Herausgeber:	Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz
Band:	- (2013)
Rubrik:	Überwachung der Kernanlagen : Emissionen und Immissionen = Surveillance des installations nucléaires : émissions et immissions

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz

Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse

Ergebnisse 2013
Résultats 2013



8 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

8 Surveillance des installations nucléaires: Emissions et Immissions



Inhatverzeichnis / Sommaire

8.1 Emissionen aus den Kernanlagen	131
Zusammenfassung	131
Ergebnisse 2013	131
8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen	140
Zusammenfassung	140
Ergebnisse 2013	140
8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)	141
Zusammenfassung	141
Übersicht	141
Systeminstandhaltung und -ergänzung	143
Qualitätssicherung	143
Messergebnisse	144
8.4 Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)	146
Zusammenfassung	146
Einleitung	146
Radiochemische Trennmethoden (Boden)	147
Staubfangplatten	147
Niederschlag	147
Resultate und Diskussion	148
8.5 Les installations nucléaires et l'environnement	149
Résumé	149
Introduction	149
Méthodologie	150
Résultats	151
Situation radiologique du site démantelé de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens	154
Conclusions	155
8.6 Environnement du CERN (mesures OFSP)	156
Résumé	156
Programme de surveillance de l'OFSP	156
Mesures de l'exposition ambiante	157
Mesures dans le milieu atmosphérique	157
Mesures dans le milieu terrestre	158
Mesures dans le milieu aquatique	159
Conclusions	160
8.7 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)	161
Résumé	161
Le CERN	161
Aspects environnementaux	162
Programme de surveillance	163
Résultats 2013	163
Conclusions	166

8.1 Emissionen aus den Kernanlagen

F. Cartier, R. Habegger, A. Leupin

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2013 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB & 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.

Ergebnisse 2013

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1 für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen gemäss ENSI-Richtlinie G14 errechneten Personendosen für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2013. 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 aufgelistet. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitlimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an rund 180 Proben eigene gammastrometrische Messungen durchgeführt (inkl. Teilnahme an Ringvergleichen zur Sicherstellung der eigenen Messqualität). Dabei wurden Aerosol- und Jodfilter sowie Abwasserproben aus den Anlagen stichprobenweise analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

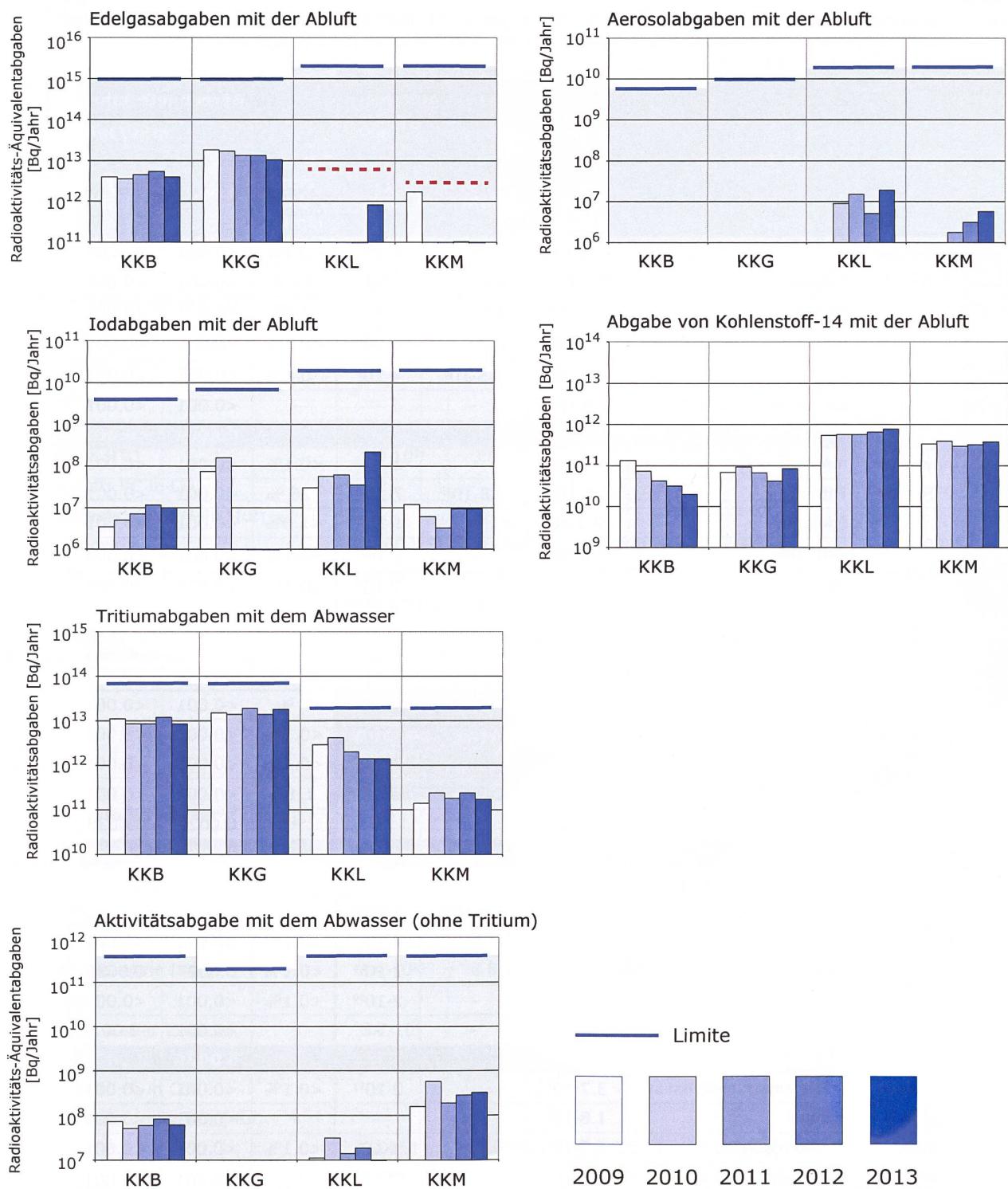
Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für einjährige Kinder in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt gemäss Tabelle 1 unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKG weniger als 0.001 mSv, beim KKB 0.0011 mSv, beim KKM 0.0045 mSv und beim KKL 0.0067 mSv. Die Dosiswerte für zehnjährige Kinder und Erwachsene liegen unterhalb derer von einjährigen Kindern. Somit betragen die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung im Jahr 2013 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts.

Das ENSI berücksichtigt bei den Dosisberechnungen auch die formell nicht limitierten ^{14}C -Abgaben, da diese seit einigen Jahren aufgrund der geringen übrigen Abgaben die Dosis dominieren. Das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C entsteht im Reaktor durch Kernreaktionen von Neutronen mit Stickstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff. Die ^{14}C -Abgaben der Kernkraftwerke sind systembedingt begrenzt, weil die Abgaberate primär von der Reaktorleistung abhängig ist. Die Kernkraftwerke haben in den letzten Jahren die ^{14}C -Abgaben gemessen und nachgewiesen, dass diese mit den Erfahrungswerten aus der Messkampagne vor etwa dreissig Jahren und den in der einschlägigen Literatur angegebenen ^{14}C -Abgabewerten für ähnliche Anlagen korrespondieren. Das KKL führt seit längerer Zeit aus eigener Initiative ^{14}C -Messungen durch. Mitte 1998 wurde die Apparatur des KKL zur Messung von ^{14}C aufgrund der Resultate einer internationalen Vergleichsmessung neu kalibriert, was dazu führte, dass die für Einzelpersonen der Bevölkerung errechnete Dosis seit 1998 etwas höher ist. Das KKG führt seit Ende 2001 Messungen der ^{14}C -Abgaben mit der Abluft durch. Die für Einzelpersonen der Bevölkerung errechnete Dosis der Jahre 2001 bis 2003 werden beim KKG im Nachhinein als um den Faktor 3 zu hoch eingeschätzt, dies aufgrund der Ergebnisse der neuen Kalibrierung der Messapparatur mit zwei diversitären Standards zu Beginn des Jahres 2004. Alle Schweizer Kernkraftwerke haben auch 2013 die ^{14}C - und die ^{3}H -Aktivität in der Abluft gemessen. Der Dosisbeitrag von ^{14}C wurde aus den Messwerten ermittelt.

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 0.006 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen aus den Teilchenbeschleuni-

gern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeföhrten 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.

Im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) erfolgten im Berichtsjahr keine weiteren Einlagerungen von Transport- und Lagerbehältern für hoch- und mittelaktive Abfälle, hingegen wurden in der Konditionieranlage grosse Mengen verschiedensten Materials angeliefert und konditioniert. Bei der Plasmaanlage fand 2013 aus logistischen Gründen nur eine Verbrennungskampagne im Herbst statt. Die für das Jahr 2013 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammenge stellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

**Figur 1:**

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (2009 bis 2013) 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.

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2013 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung.
(Fussnoten siehe Ende Kap. 8.1)

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 3'400 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.9·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	8.6·10 ¹²	8.6·10 ¹²	7·10 ¹³	12 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	4.1·10 ¹²	3.9·10 ¹³	1·10 ¹⁵	0.4%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.2·10 ⁵	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	4.5·10 ⁶	4.5·10 ⁶	4·10 ⁹	0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.0·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0011
		Dosis total					<0.001	<0.001	0.0011
KKG	Abwasser 7'047 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.3·10 ⁶	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.8·10 ¹³	1.8·10 ¹³	7·10 ¹³	26 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<9.3·10 ¹²	<1.0·10 ¹³	1·10 ¹⁵	<1.0%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	9.8·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	2.8·10 ⁵	-	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	8.4·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Dosis total					<0.001	<0.001	0.001
KKL	Abwasser 14'072 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	6.1·10 ⁷	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.4·10 ¹²	1.4·10 ¹²	2·10 ¹³	7 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	2.0·10 ¹²	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.6·10 ⁷	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	2.2·10 ⁸	2.2·10 ⁸	2·10 ¹⁰	1.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	7.7·10 ¹¹	-	-	-	0.0029	0.0038	0.0065
		Dosis total					0.003	0.0039	0.0067
KKM	Abwasser 3'626 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.7·10 ⁹	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.7·10 ¹¹	1.7·10 ¹¹	2·10 ¹³	0.8 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	2.9·10 ¹⁰	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	5.6·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0027	0.0026	0.0025
		Iod: ¹³¹ I	9.3·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.7·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	0.0012	0.0020
		Dosis total					0.0036	0.0038	0.0045
ZZL	Abwasser 367 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.7·10 ⁸	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.8·10 ⁹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-γ-Aerosole	1.2·10 ⁴	-	1·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.5·10 ⁴	-	3·10 ⁷	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	8.3·10 ⁷	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.6·10 ⁹	-	1·10 ¹⁴	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Dosis total					<0.001	<0.001	<0.001

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2013 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung.
(Fussnoten siehe Ende Kap. 8.1)

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 3'400 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.9·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	8.6·10 ¹²	8.6·10 ¹²	7·10 ¹³	12 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	4.1·10 ¹²	3.9·10 ¹³	1·10 ¹⁵	0.4%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.2·10 ⁵	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	4.5·10 ⁶	4.5·10 ⁶	4·10 ⁹	0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.0·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0011
		Dosis total					<0.001	<0.001	0.0011
KKG	Abwasser 7'047 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.3·10 ⁶	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.8·10 ¹³	1.8·10 ¹³	7·10 ¹³	26 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<9.3·10 ¹²	<1.0·10 ¹³	1·10 ¹⁵	<1.0%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	9.8·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	2.8·10 ⁵	-	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	8.4·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Dosis total					<0.001	<0.001	0.001
KKL	Abwasser 14'072 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	6.1·10 ⁷	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.4·10 ¹²	1.4·10 ¹²	2·10 ¹³	7 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	2.0·10 ¹²	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.6·10 ⁷	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	2.2·10 ⁸	2.2·10 ⁸	2·10 ¹⁰	1.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	7.7·10 ¹¹	-	-	-	0.0029	0.0038	0.0065
		Dosis total					0.003	0.0039	0.0067
KKM	Abwasser 3'626 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.7·10 ⁹	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.7·10 ¹¹	1.7·10 ¹¹	2·10 ¹³	0.8 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	2.9·10 ¹⁰	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	5.6·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0027	0.0026	0.0025
		Iod: ¹³¹ I	9.3·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.7·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	0.0012	0.0020
		Dosis total					0.0036	0.0038	0.0045
ZZL	Abwasser 367 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.7·10 ⁸	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.8·10 ⁹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-/γ-Aerosole	1.2·10 ⁴	-	1·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.5·10 ⁴	-	3·10 ⁷	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	8.3·10 ⁷	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.6·10 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 2013 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung - (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungslabor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszivilschenlager
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft^{1,2} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$1.5 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$1.7 \cdot 10^8$	-	-	-	$1.1 \cdot 10^5$
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$3.2 \cdot 10^7$	-	-	-	-
Tritium als HTO	$1.0 \cdot 10^{11}$	$3.0 \cdot 10^7$	-	$4.7 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^{10}$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015
Kind 10j	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015
Kleinkinder	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI ^{1,2}		
	Zentrale Fortluft-anlagen	InjectoR II	C-Labor	Abwasser 1'282 m ³	Abluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$7.4 \cdot 10^7$	-	$1.6 \cdot 10^7$
Tritium	-	-	-	$8.0 \cdot 10^{10}$	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	$1.5 \cdot 10^{14}$	$3.1 \cdot 10^9$	-	-	$1.5 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^{14}$
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$2.4 \cdot 10^{10}$	$2.8 \cdot 10^6$	$6.3 \cdot 10^3$	-	$2.4 \cdot 10^{10}$	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$5.7 \cdot 10^7$	-	-	-	$8.9 \cdot 10^7$	$3.9 \cdot 10^7$
Tritium als HTO	$1.2 \cdot 10^{12}$	-	-	-	$1.3 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.0051	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.006	
Kind 10j	0.0051	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.006	
Kleinkinder	0.0051	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.006	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	3.4%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 4.0%	

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2013: Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben - (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]						
	β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
³ H		$8.6 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^{12}$	$1.7 \cdot 10^{11}$	$8.0 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^9$
⁷ Be						$1.4 \cdot 10^5$	
²² Na						$9.2 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^6$
²⁴ Na		$2.7 \cdot 10^6$					
⁴⁴ Sc						$7.2 \cdot 10^5$	
⁵¹ Cr		$6.1 \cdot 10^4$			$8.6 \cdot 10^7$		
⁵⁴ Mn		$4.7 \cdot 10^6$		$5.7 \cdot 10^6$	$4.6 \cdot 10^8$	$6.2 \cdot 10^4$	
⁵⁷ Co					$1.4 \cdot 10^6$	$2.3 \cdot 10^4$	
⁵⁸ Co		$1.1 \cdot 10^7$		$1.3 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^3$	
⁵⁹ Fe					$1.3 \cdot 10^6$		
⁶⁰ Co		$6.1 \cdot 10^7$	$9.8 \cdot 10^5$	$4.4 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^9$	$8.0 \cdot 10^5$	$9.9 \cdot 10^6$
⁶⁵ Zn		$1.2 \cdot 10^5$		$6.1 \cdot 10^6$	$6.8 \cdot 10^7$		
⁸⁹ Sr		$2.3 \cdot 10^6$			$1.3 \cdot 10^5$		
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y		$5.4 \cdot 10^5$			$5.6 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^7$	
⁹⁵ Nb		$1.5 \cdot 10^5$			$8.8 \cdot 10^5$		
⁹⁵ Zr		$1.7 \cdot 10^4$					
^{99m} Tc		$2.2 \cdot 10^6$	$8.1 \cdot 10^4$				
¹⁰⁶ Ru							$5.5 \cdot 10^6$
¹⁰⁹ Cd			$1.3 \cdot 10^6$				
^{110m} Ag		$7.1 \cdot 10^6$			$6.6 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^4$	
¹¹¹ In						$3.1 \cdot 10^4$	
¹²² Sb		$3.2 \cdot 10^6$					
¹²⁴ Sb		$5.4 \cdot 10^7$			$3.7 \cdot 10^6$		$2.0 \cdot 10^4$
¹²⁵ Sb		$5.8 \cdot 10^7$		$1.1 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^6$	$5.2 \cdot 10^4$	$5.0 \cdot 10^6$
^{123m} Te		$1.6 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^6$				
¹³² Te		$8.3 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^5$				
¹²⁵ I						$1.2 \cdot 10^6$	
¹³¹ I		$2.8 \cdot 10^7$			$3.7 \cdot 10^5$		
¹³² I			$1.8 \cdot 10^5$				
¹³³ I		$1.0 \cdot 10^7$					
¹³⁴ Cs		$6.3 \cdot 10^6$				$4.9 \cdot 10^4$	$3.7 \cdot 10^6$
¹³⁷ Cs		$1.1 \cdot 10^8$		$9.7 \cdot 10^5$	$9.7 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^7$	$3.4 \cdot 10^8$
¹⁴¹ Ce				$1.4 \cdot 10^6$			
¹⁴⁴ Ce		$4.7 \cdot 10^5$					
¹⁶¹ Tb						$2.5 \cdot 10^6$	
¹⁷⁷ Lu						$2.2 \cdot 10^7$	
¹⁹⁵ Au						$4.4 \cdot 10^5$	
²⁰⁷ Bi						$2.1 \cdot 10^4$	
α-Strahler	*)	$1.3 \cdot 10^5$	$4.2 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^4$		*)	
^{234/238} U						$1.4 \cdot 10^5$	
^{239/240} Pu		$2.9 \cdot 10^3$				$2.4 \cdot 10^4$	
²³⁸ Pu/ ²⁴¹ Am		$5.3 \cdot 10^4$				$2.5 \cdot 10^4$	
²⁴² Cm		$6.1 \cdot 10^3$					
^{243/244} Cm		$2.8 \cdot 10^3$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2012 bis und mit dem 3. Quartal 2013

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2013: Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase, Edelgase						
Tritium	$5.9 \cdot 10^{11}$	$6.0 \cdot 10^{11}$	$1.3 \cdot 10^{12}$	$2.1 \cdot 10^{10}$	$1.3 \cdot 10^{12}$	$1.6 \cdot 10^9$
^{11}C					$2.4 \cdot 10^{13}$	
$^{14}\text{C} (\text{CO}_2)$	$2.0 \cdot 10^{10}$	$8.4 \cdot 10^{10}$	$7.7 \cdot 10^{11}$	$3.7 \cdot 10^{11}$		$8.3 \cdot 10^7$
^{13}N					$2.5 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$1.0 \cdot 10^{14}$	
^{18}F					$7.9 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne					$1.3 \cdot 10^{12}$	
^{41}Ar				$8.4 \cdot 10^9$	$4.0 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr					$1.5 \cdot 10^{11}$	
^{85m}Kr	$1.5 \cdot 10^{11}$		$1.2 \cdot 10^{10}$			
^{88}Kr	$2.6 \cdot 10^{11}$	$9.3 \cdot 10^{11}$				
^{133}Xe	$1.9 \cdot 10^{12}$	$7.4 \cdot 10^{12}$	$9.5 \cdot 10^{11}$			
^{135}Xe	$1.8 \cdot 10^{12}$	$9.3 \cdot 10^{11}$	$4.0 \cdot 10^{11}$	$3.9 \cdot 10^9$		
^{135m}Xe			$5.9 \cdot 10^{11}$			
^{138}Xe			$4.2 \cdot 10^{10}$			
EG-Aequiv.				$1.7 \cdot 10^{10}$		
EG: β -total						
Andere						
Iod						
^{123}I					$3.2 \cdot 10^7$	
^{125}I					$5.7 \cdot 10^7$	
^{126}I					$4.0 \cdot 10^4$	
^{131}I	$4.5 \cdot 10^6$	$2.8 \cdot 10^5$	$2.2 \cdot 10^8$	$9.3 \cdot 10^6$		
^{133}I	$2.8 \cdot 10^7$					

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2013: Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{24}Na					$2.3 \cdot 10^5$	
^{38}S					$1.1 \cdot 10^9$	
^{39}Cl					$8.1 \cdot 10^9$	
^{54}Mn			$2.4 \cdot 10^4$	$9.8 \cdot 10^5$		
^{58}Co					$1.1 \cdot 10^6$	
^{60}Co	$6.0 \cdot 10^4$	$6.9 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^3$
^{65}Zn					$2.4 \cdot 10^5$	
^{75}Se					$6.7 \cdot 10^3$	
^{77}Br					$2.5 \cdot 10^6$	
$^{80\text{m}}\text{Br}$					$2.2 \cdot 10^9$	
^{82}Br					$4.4 \cdot 10^8$	
^{89}Sr				$1.4 \cdot 10^6$		
$^{99\text{m}}\text{Tc}$						$1.6 \cdot 10^8$
$^{123\text{m}}\text{Te}$		$1.3 \cdot 10^4$				
^{131}I (Aerosol)			$8.2 \cdot 10^6$	$5.3 \cdot 10^4$		
^{137}Cs	$6.0 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^3$		$1.2 \cdot 10^5$		$1.1 \cdot 10^4$
^{140}Ba			$5.8 \cdot 10^6$	$2.2 \cdot 10^5$		
^{140}La				$3.6 \cdot 10^6$		
^{144}Ce		$1.4 \cdot 10^4$				
^{181}Re					$5.3 \cdot 10^7$	
$^{182\text{m}}\text{Re}$					$1.5 \cdot 10^8$	
^{183}Re					$6.5 \cdot 10^6$	
^{183}Os					$1.8 \cdot 10^8$	
$^{183\text{m}}\text{Os}$					$4.8 \cdot 10^8$	
^{185}Os					$1.5 \cdot 10^7$	
^{185}W					$1.0 \cdot 10^9$	
^{191}Pt					$1.5 \cdot 10^5$	
^{192}Au					$8.0 \cdot 10^8$	
^{194}Au					$4.7 \cdot 10^6$	
^{192}Hg					$5.4 \cdot 10^8$	
$^{193\text{m}}\text{Hg}$					$1.8 \cdot 10^8$	
^{194}Hg					$4.7 \cdot 10^6$	
^{195}Hg					$9.9 \cdot 10^9$	
$^{195\text{m}}\text{Hg}$					$7.5 \cdot 10^7$	
$^{197\text{m}}\text{Hg}$					$8.6 \cdot 10^7$	
^{203}Hg					$6.2 \cdot 10^6$	
Nicht spezifizierte						
α -Aerosole	$1.2 \cdot 10^4$	$5.1 \cdot 10^4$	$5.2 \cdot 10^4$	$7.1 \cdot 10^4$		$1.5 \cdot 10^4$

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

Abwasser: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-LE-Wert von 200 Bq/kg angegeben. Die LE-Werte für die einzelnen Nuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein LE-Wert von 200 Bq/kg entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Ingestions-Dosisfaktor von 5.10^{-8} Sv/Bq. 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-CA-Wert von 2.10^5 Bq/m³ angegeben. Die CA-Werte für die Edelgasnuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein CA-Wert von 2.10^5 Bq/m³ entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Immersions-Dosisfaktor von $4.4 \cdot 10^{-7}$ (Sv/Jahr)/(Bq/m³). 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 Äquivalent-Umrechnung wurde in diesem Fall ein Gemisch von 80% ^{133}Xe , 10% ^{135}Xe und 10% ^{88}Kr angenommen.

Gase: Beim PSI handelt es sich dabei vorwiegend um die Nuklide ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O und ^{41}Ar . 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-CA-Wert von 2.10^5 Bq/m^3 normierten 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. Der Dosisbeitrag der Aerosole, welche im Berichtsjahr abgegeben wurden, ist dem gegenüber vernachlässigbar und liegt in der Größenordnung der anderen schweizerischen Kernkraftwerke.

Iod: Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von ^{131}I 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 ^{131}I -Äquivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben, wobei sich der Gewichtungsfaktor aus dem Verhältnis des Ingestionsdosisfaktors des jeweiligen Nuklides zum Ingestionsdosisfaktor von ^{131}I 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 ^{133}I 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 angegebene

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. + 50%. Abgaben unterhalb 0.1% der Jahresabgabelimite werden vom ENSI als nicht-relevant betrachtet und werden in der Spalte „Normiert“ nicht ausgewiesen (-). Abgaben kleiner tausend 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] Abgabelimiten gemäss Bewilligung der jeweiligen Kernanlage. Die Abgabelimiten wurden so festgelegt, dass die Jahresdosis für Personen in der Umgebung (vgl. Fussnote 3) für die Kernkraftwerke unter 0.3 mSv/Jahr respektive das Zentrale Zwischenlager in Würenlingen (ZZL) unter 0.05 mSv/Jahr bleibt. Für das Paul Scherrer Institut (PSI) sind die Abgaben gemäss Bewilligung 6/2003 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv/Jahr limitiert.

8.2

Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

F. Cartier, A. Leupin

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

Die Ortsdosis, respektive die Ortsdosisleistung durch externe Strahlung werden in der Umgebung der Kernanlagen und des PSI mit dem MADUK-Messnetz (siehe Kapitel 8.3), und mit Thermolumineszenzdosimetern (TLD) in der Umgebung sowie am Arealzaun überwacht. Zusätzlich dazu führt das ENSI vierteljährlich stichprobenweise Dosisleistungsmessungen am Arealzaun sowie bei Bedarf spezielle Messkampagnen durch.

Die gemessenen Werte lagen allesamt unter den Immissionsgrenzwerten für die Direktstrahlung außerhalb des Betriebsareals von 1 mSv pro Jahr für Wohn-, Aufenthalts- und Arbeitsräume und von 5 mSv pro Jahr für andere Bereiche nach Art. 102 Absatz 3 der Strahlenschutzverordnung. Die tatsächlich durch eine Person am Arealzaun akkumulierte, jährliche Dosis aus externer Bestrahlung ergibt sich aus der mittleren Ortsdosisleistung am Arealzaun multipliziert mit der Aufenthaltszeit der Person. Eine Person, die sich während eines Jahres konstant am Arealzaun aufhalten würde, würde eine der Ortsdosis entsprechende Personendosis akkumulieren. Da sich eine Person aus der Umgebungsbevölkerung realistischerweise nur einige wenige Stunden direkt am Arealzaun aufhält, liegt die akkumulierte Personendosis um Faktor 100 bis 1'000 unterhalb der am gleichen Ort ermittelten Ortsdosis.

Ergebnisse 2013

Die Ortsdosisleistung ist im Nahbereich 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. Des Weiteren 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 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.32 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf diesen Momentanwerten am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 2 mSv (ohne natürlichen Untergrund) 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 0.9 mSv.

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen 0.07 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.19 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 1.0 mSv pro Jahr. Die höchste, mit den TLD am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Abzug des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) beträgt 0.9 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 von 0.4 mSv ohne natürlichen Untergrund. Im Jahr 2013 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert ca. 0.2 mSv (ohne natürlichen Untergrund von ca. 0.6 mSv).

Beim KKB, KKG und beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) wurde am Zaun weder mittels TLD noch bei den vierteljährlichen Stichproben des ENSI eine signifikante Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt.

Die Immissionsgrenzwerte für die Direktstrahlung außerhalb des Betriebsareals von 1 mSv pro Jahr für Wohn-, Aufenthalts- und Arbeitsräume und von 5 mSv pro Jahr für andere Bereiche nach Art. 102 Absatz 3 der Strahlenschutzverordnung wurden im Berichtsjahr wiederum von allen Anlagen eingehalten.

8.3

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)

F. Cartier, B. Bucher, R. Habegger

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

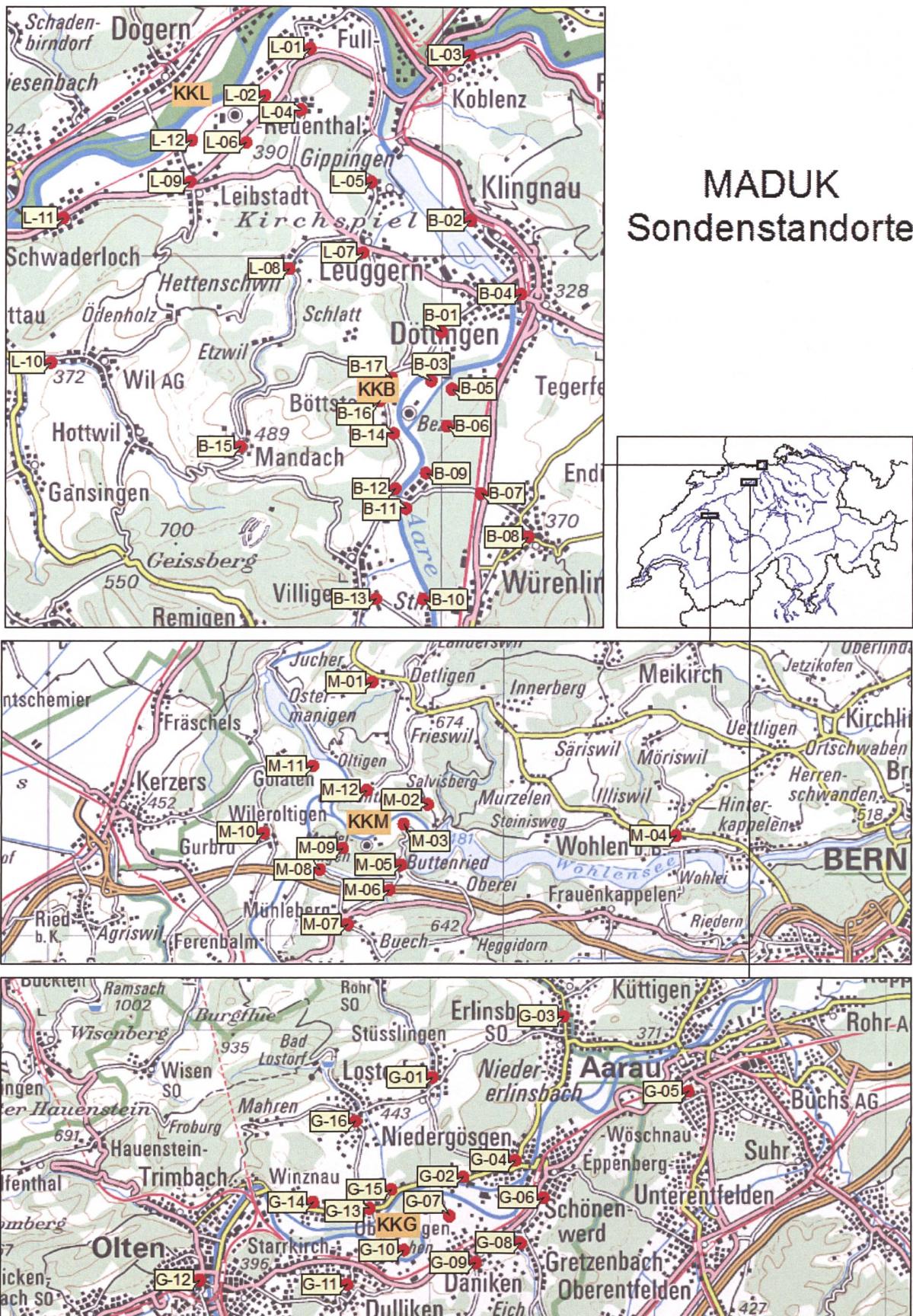
Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von Anlageparametern (ANPA) und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 in den operationellen 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 im ENSI automatisch angezeigt 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.

Die Messwerte im Jahr 2013 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Es wurden keine Dosisleistungserhöhungen festgestellt, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückgeführt werden konnten.

Übersicht

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 66 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). Von den Kernkraftwerken werden Kaminemissionswerte und wichtige Anlagenparameter der Primär- und Sekundäranlage übernommen und in die MADUK-Zentrale geleitet. 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 und ADPIC im ENSI. Die Darstellung (Figur 1) zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.

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



Figur 1:

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

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahre 2013 lief die erneuerte MADUK-Zentrale im Parallelbetrieb zum operativen System. Dabei konnten noch Restfehler eliminiert werden. Gleichzeitig wurde auch die MADUK-Bedienoberfläche auf .NET-Technologie migriert. Die für die Umsetzung des Dosismassnahmenkonzeptes benötigten Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen von ADPIC werden in das MADUK-System übernommen und von diesem in den definierten Formaten an die Partner wie KFÜ Baden-Württemberg und Nationale Alarmzentrale weitergeleitet. Im Rahmen der Gesamtnotfallübung Odysseus konnte das neue System und die neuen Abläufe erfolgreich eingesetzt werden.

In Zusammenarbeit mit Swisscom wurden 35 DSL-Router in den Messstationen durch neue Geräte ersetzt. Die Integration und der Austausch der Geräte verliefen ohne Probleme.

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 werden soll. Mit der Kenngrösse „Systemverfügbarkeit“ wird die Einsatztauglichkeit des Gesamtsystems MADUK beurteilt: Systemstörungen, die zu wesentlichen Nutzungseinschränkungen des Systems geführt haben, werden als Ausfallzeit in Stunden erfasst.

Die permanente Übertragung der Anlageparameter erreichte insgesamt wiederum eine sehr hohe

Verfügbarkeit. Bei KKB1 und KKB2 kam es im ersten und zweiten Quartal aufgrund von angekündigten Arbeiten zu Unterbrüchen von insgesamt 33.2 Stunden. 3.2 Stunden waren auf Umbauarbeiten am Rack der Übertragungsrechner zurückzuführen, zwei Mal 15 Stunden auf das Stoppen der Übertragungsrechner über Nacht wegen Umbauarbeiten an der Stromversorgung. Bei KKG kam es im zweiten Quartal während des Revisionsstillstands aufgrund angekündigter Unterhaltsarbeiten am Anlageninformationssystem zu Unterbrüchen in der Datenübermittlung von 2 und 1.3 Stunden. Bei KKM führte ein Stromunterbruch in der Versorgung des Kommunikationsrechners zum ENSI zu einem Datenunterbruch von 2 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 2013 grösstenteils zuverlässig. Es waren bis auf einen defekten DSL-Router keine wesentlichen Kommunikationsunterbrüche zu verzeichnen. Etwas häufiger als im 2012 kam es zu Ausfällen durch blockierte Datenlogger. Der längste Ausfall war auf ein durchtrenntes Kabel zwischen Messsonde und Datenlogger zurückzuführen. Das Kabel musste in der Folge zwischen Messstation und Sonde ersetzt werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.7 % (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.93 %.

Qualitätssicherung

Die Aufgaben im Bereich der Qualitätssicherung basieren auf dem Qualitätsmanagement-system des ENSI. Dadurch ist gewährleistet, dass alle Aufgaben im Zusammenhang mit dem Betrieb, der Wartung und der Instandhaltung/Erneuerung qualitätsgestützt und nachvollziehbar bearbeitet werden. Die wesentlichen qualitätssichernden Massnahmen werden im Folgenden beschrieben.

In Anlehnung an die „Empfehlungen zur Sicherstellung der Messdatenqualität von Umgebungsdosimetrysystemen“ der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität vom 24. November 2004 werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Messverhalten der Sonden wird zwischen den Eichungen mit

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

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
B-06	13.0	13.0	Blockierter Datenlogger
B-06	30.0	30.0	Blockierter Datenlogger
G-06	2.5	2.5	Defekte Messsonde
L-06	68.0	68.0	Defekter DSL-Router und blockierter Datenlogger
G-07	16.5	16.5	Blockierter Datenlogger
L-01	113.0	113.0	Kabelschaden zwischen Sonde und Datenlogger
B-15	23.1	23.1	Blockierter Datenlogger
L-11	37.5	37.5	Blockierter Datenlogger
G-08	1.1	1.1	Blockierter Datenlogger
B-07	2.3	2.3	Blockierter Datenlogger
L-12	4.0	4.0	Blockierter Datenlogger

halbjährlichen Genauigkeitstests geprüft. Bei den Genauigkeitstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer 460 kBq ^{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 Schwellwerten benutzt. Im Jahr 2013 wurden zwei Funktionsprüfungen durchgeführt. Dabei erfüllten einige Niederdosiszählrohre die Testkriterien nicht. Im Managementhandbuch ist für den Fall einer nicht bestandenen Funktionsprüfung eine Reparatur der Sonde beim Hersteller vorgesehen. Nach Herstellerangabe erfolgt aber bei Erfüllung der Eichkriterien kein Eingriff an der Hardware, sondern es werden nur neue Referenzwerte angelegt. Eine detaillierte Analyse der Daten aus den Funktionsprüfungen der letzten fünf Jahre zeigte zudem einen allgemeinen Trend zu höheren Empfindlichkeiten bei den Niederdosiszählrohren. Wenn sich dieser Trend fortsetzt, werden sich in Zukunft die Fälle nicht bestandener Funktionsprüfungen häufen. Deshalb wird das Testkriterium der Funktionsprüfung dahingehend angepasst, dass ein zu frühes Zuschlagen des Kriteriums verhindert werden kann, die erforderliche Genauigkeit zur Erfüllung der Eichkriterien aber weiterhin sichergestellt ist. Mit diesem Schritt kann die bisherige Funktionsprüfung beibehalten und die Ergebnisse analog zu den bisherigen ausgewertet werden. Bei anhaltendem Trend zu höheren Empfindlichkeiten werden die Sonden mit den grössten Ist/Soll-Abweichungen im Eichlabor des PSI überprüft, um die tatsächlichen Abweichungen bei der Dosisleistungsmessung bestimmen zu können. Aus den Ergebnissen dieser Überprüfung werden dann die weiteren Massnahmen abgeleitet.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden Messungen mittels in-situ-Gammaspektrometrie im Feld durchgeführt. 2013 wurden Messungen bei den Sonden der Messringe Gösgen und Leibstadt durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre. Bei der Station G-15 lag die ^{232}Th Aktivitätskonzentration knapp oberhalb des statistischen Streubereichs von 30%. Bei den Stationen L-05 (^{235}U), G-01 (^{137}Cs), G-02 (^{137}Cs) und L-04 (^{137}Cs) lagen die Aktivitätskonzentrationen unterhalb des statistischen Streubereichs. Die Entwicklung der Messwerte an diesen Standorten wird beobachtet.

Messergebnisse

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

Die jährliche Überprüfungskampagne der NADAM Sonden an den Standorten, an denen auch eine MADUK-Station in Betrieb ist, führte 2013 bei keiner MADUK-Sonde zu wesentlichen Erhöhungen der Messwerte.

In der Tabelle 2 sind alle Ereignisse aufgelistet, bei denen der Nettodosisleistungsschwellwert von 50 nSv/h überschritten wurde. Alle registrierten Erhöhungen waren auf lokal begrenzte Starkreagenzien und deren Washout-Effekte zurückzuführen. Ein Zusammenhang mit dem Betriebsverhalten der Kernanlagen konnte nicht hergestellt werden.

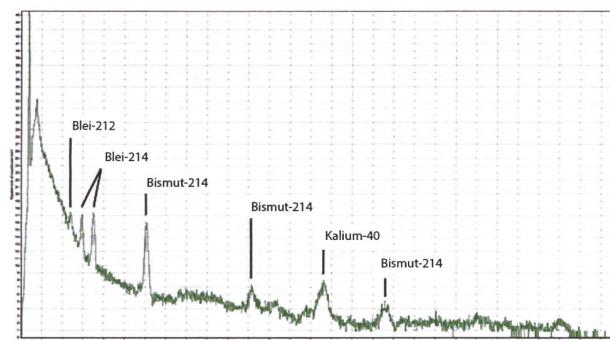
Tabelle 2:

Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2013.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
22.4.2013 22:00	L-06	0.8	63	156
6.05.2013 20:40	B-15	0.2	62	190
6.05.2013 20:40	L-08	0.6	78	196
28.8.2013 15:40	M-04	0.4	56	156
28.8.2013 16:40	G-14	0.4	52	212
6.10.2013 16:50	L-06	0.2	53	157
8.10.2013 17:40	L-06	2.8	179	289
8.10.2013 19:30	L-12	7.2	159	280
9.10.2013 02:10	L-09	0.5	77	197
9.10.2013 04:40	L-12	0.6	69	170
9.10.2013 06:00	L-06	5.5	400	509

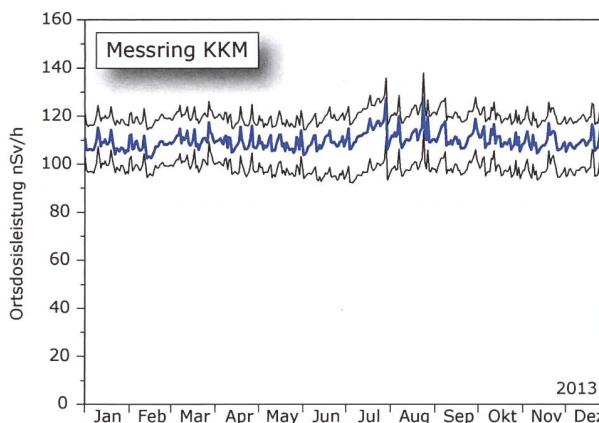
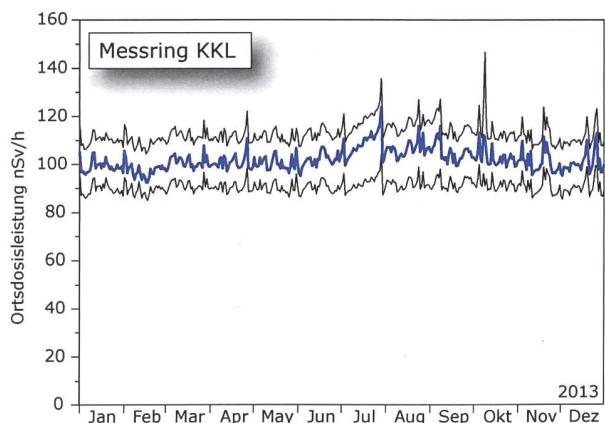
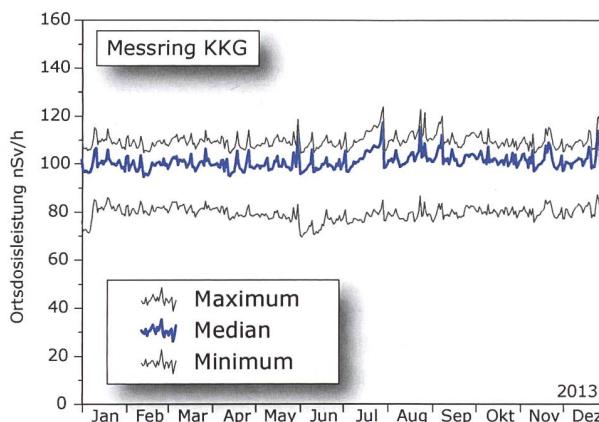
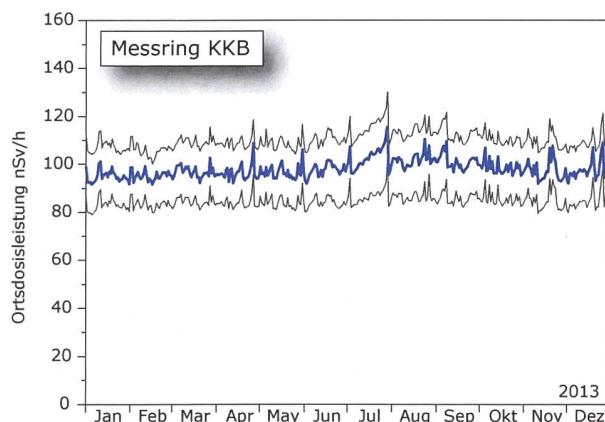
Besonders auffällig waren die Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen vom 8. und 9. Oktober bei den Stationen L-06, L-09 und L-12. Zum Zeitpunkt der Erhöhungen lag eine Schwachwindlage vor und es herrschte Hochnebel. Der Wind (Messung Windrichtung Meteostation 10m) kam durchgehend aus südwestlicher Richtung. Die Stationen mit erhöhten Messwerten lagen nicht in Abwindrichtung des KKL. Die Meteostation Leibstadt (Standort der Station L-06) registrierte am 09. Oktober Niederschlag mit einer maximalen Intensität von 5.5 mm/10min um 08:50. Da die Erhöhungen aussergewöhnlich lange dauerten, konnten am 09. Oktober bei der Station L-06 (vor dem Einfahrtstor Meteostation) zwischen 10:00 und 10:30 mit einem mobilen Gammaspektrometer drei 10-Minuten Spektren erfasst werden. Als Spektrometer wurde ein 1.5" Lanthan-Bromid-Detektor der Firma Envi-

net verwendet. Die Auswertung der Spektren zeigte den natürlichen Ursprung der Dosisleistungserhöhung. Alle gemessenen Spektrallinien zeigten Zerfallsprodukte aus der ^{238}U und ^{232}Th Reihe (Figur 2). Die Spektrallinie bei etwa 35 keV ist auf Röntgenemissionen des im Detektor intrinsisch vorhandenen ^{138}La zurückzuführen. Am unteren Ende des Messbereiches, wo durch die Comptonstrahlung eine erhöhte Zählrate vorhanden ist (<100keV), liegt noch eine visuell sichtbare Erhöhung bei etwa 80 keV. In diesem Energiebereich fallen einige Spektrallinien der Zerfallsreihen ^{238}U und ^{232}Th zusammen. Eine eindeutige Zuordnung zu einem Nuklid ist bei dieser Energieauflösung nicht möglich. Die Erhöhung der Ortsdosisleistung ist auf Washout von Radonfolgeprodukten durch lokalen Niederschlag zurückzuführen. Während den Messungen lagen die Ortsdosisleistungen der Station L-06 zwischen 370 und 301 nSv/h. Bei der Zufahrt nach Leibstadt konnte beobachtet werden, dass der Niederschlag sehr lokal ausfiel. In Leuggern fiel kein Niederschlag, während in Leibstadt feiner, aber intensiver Regen fiel. Die Untergrenze des Hochnebels lag knapp über dem Kühlurm des KKL.

**Figur 2:**

Spektrum am Standort L-06, Meteostation Leibstadt, 09. Oktober 10:10 Uhr.

Die Figuren 3 und 4 zeigen die Maxima, die Minima und die Mediane der Tagesmittelwerte der jeweiligen Messringe im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke.

**Figur 3 und 4:**

Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM.

8.4

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

J. Eikenberg, M. Jäggi, H. Beer, C. Parussudis, I. Zumsteg

Paul Scherrer Institut, 5232 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. Das Vaselin auf den Staubfangplatten wird 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 reiner α - und β -Strahler (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 20 - 60 Bq/kg (2013). Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope ^{90}Sr und $^{239+240}\text{Pu}$ sind ähnlich signifikant. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg auf 1 - 3 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.2 - 0.7 Bq/kg im Jahr 2013. 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. 50 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 20 - 40 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 200 und 400 Bq/kg gemessen.

Einleitung

Das Zwischenlager (ZWILAG AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erstellt 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) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von Kernwaffentests und dem Chernobyl-Ereignis. Seit der Durchführung dieser Studie werden im Routinebetrieb einmal jährlich an 4 Beprobungs-Punkten Waldbodenproben aus der oberen Schicht (0 - 5 cm) erhoben und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades wurden 4 Staubfangplatten an der Umzäunung der ZWILAG angebracht. Diese Platten werden monatlich ausgewechselt und die Konzentrationen Photonen emittierender Radioisotope ^{241}Am , ^{137}Cs bestimmt.

Radiochemische Trennmethoden (Boden)

Nach der Probenerhebung werden die Bodenproben zunächst getrocknet, gesiebt und in ca. 30g schwere Aliquots gesplittet. Vor der Analyse werden ^{243}Am - und ^{242}Pu -Tracer hinzu gegeben. Nach der Nass- und Trockenveraschung wird die Probe in 8 M HNO_3 unter Kochen während 1 Stunde ausgelaugt, so dass die oberflächlich adsorbierten Fallout-Produkte in Lösung gehen. Durch die Zugabe von H_2O_2 (Oxidation) beim Auslaugen, liegt das Plutonium vorwiegend als Pu^{4+} vor. Die Lösung, welche die Fraktionen von Pu, Am und Cm, aber auch U und Th enthält, wird sodann von der festen Phase über Filtration getrennt.

Diese Leach-Lösung wird dann direkt auf eine Anionenaustauscher-Kolonne (Bio-Rad AG 1-X2, 100 - 200 mesh) gegeben und durch Zugabe von HCl und HNO_3 -Waschlösungen werden potentiell bei der α -Spektrometrie interferierende, natürliche Radionuklide abgetrennt (z.B. α -Emission von ^{228}Th und ^{238}Pu bei 5.4 MeV), bevor die Pu-Fraktion durch Reduktion von Pu^{4+} zu Pu^{3+} mit einer HI-Lösung eluiert wird. Die durch die Bio-Rad-Kolonne gelaufene Fraktion mit Am und Cm wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer U/TEVATM-Kolonne zur Retention von U und Th und einer DGATM-Kolonne, die Am und Cm absorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach-salzauren NaNO_2 Lösung. Da Am in sehr geringen 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 und in einer NaSO_4 - NaHSO_4 -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Aktiniden 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 SrSpecTM-Kolonne in 3 M HNO_3 -Medium fixiert und mit verdünnter Salpetersäure eluiert. Das Eluat wird mit der Szintillationsflüssigkeit Ultima Gold™ LLT vermischt und anschliessend im Flüssigkeitszintillations-Spektrometer gemessen.



Figur 1:
Staubfangplatte am Zaun des ZWILAG-Areals.

Staubfangplatten

Die 4 Staubfangplatten, eine pro Himmelsrichtung, befinden sich direkt an der Umzäunung des ZWILAG-Areals. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden jeweils ausgewechselt. Im Labor wird das Vaselin von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen eingeschmolzen. Die anschliessende γ -Messung dauert 15 Stunden. Bestimmt werden u.a. ^{131}I , ^{137}Cs und ^{241}Am .

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 das bei den Langzeitmessungen über 2 Tage Nachweisgrenzen von 0.03 Bq/Liter erreicht werden.

Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) 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. Wie die Tabelle zeigt, liegen die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ derzeit zwischen 0.2 und 0.7 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), während die Werte für das Spaltprodukt ^{90}Sr etwas höher sind (1 - 3 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für ^{137}Cs (20 - 60 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der zusätzliche 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 Aktiniden ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 50 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 20 - 40 Bq/kg und zeigen keinen Trend mit der Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingebaut sind. 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.

Tabelle 1:

Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten Jahre (2009-2013) in Bodenproben Umgebung ZWILAG. Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2010	2011	2012	2013
^{90}Sr	2 - 5	2 - 4	2 - 4	1 - 3
^{134}Cs (1)	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	20 - 70	20 - 70	10 - 80	20 - 60
^{238}Pu	0.01-0.03	0.01-0.03	0.01-0.03	0.01-0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.3 - 0.8	0.2 - 0.7	0.1 - 0.7	0.2 - 0.7
^{241}Am	0.2 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
^{226}Ra	25 - 40	25 - 40	20 - 30	20 - 30
^{228}Ra	20 - 40	20 - 40	20 - 40	20 - 40

(1) Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2010 - 2013 nicht mehr nachgewiesen werden.

Weniger aufwändig ist die Auswertung der Staubfangplatten. Mit der monatlichen Kontrolle ist praktisch eine kontinuierliche Überwachung möglich. Seit Beginn der Probennahme lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unter den Nachweisgrenzen von 0.2 bzw. 0.3 Bq/m². Die tiefe Nachweisgrenze für ^{241}Am von 0.3 Bq/m² ergibt sich aufgrund der Verwendung eines hochauflösenden Gamma-Spektrometers mit Be-Eintrittsfenster.

Bei den Regenwasserproben werden typischerweise ^{3}H -Aktivitäts-Konzentrationen von < 1 - 10 Bq/Liter nachgewiesen, mit der Gammaspektrometrie 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.

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, T. Marti, M. Müller, P. Steinmann

Section radioactivité dans l'environnement, URA / BAG, 3003 BERN

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 (en particulier isotopes du cobalt et ^{54}Mn dans les eaux et les sédiments) de ces installations. La contribution du rayonnement direct a également été détectée en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühleberg. Les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont toutefois restées nettement inférieures aux limites réglementaires et donc, sans danger pour la santé.

Hormis ces quelques exemples, les résultats des mesures environnementales ne se sont pas distingués de 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).

Notons encore qu'aucune valeur élevée de tritium n'a été mesurée dans les eaux du système de drainage de l'ancienne centrale nucléaire de Lucens en 2013. Ces résultats confirment donc que l'augmentation enregistrée début 2012 était le résultat d'un phénomène ponctuel.

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 et de mesures. 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 iodé, 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 , ^{3}H et ^{85}Kr) et du LUBW (Baden-Würtemberg), 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.

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	Ch. 8.2 - 8.3
Air/Aérosols (émetteurs γ)	Ch. 4.1
Précipitations (γ , ^{3}H)	Ch. 4.1
Milieu aquatique	Ch. 4.4
Mesures in situ	Ch. 3.1
Sol et herbe (γ , ^{90}Sr)	Ch. 4.6
Sol (Pu, ^{241}Am)	Ch. 7.2
^{14}C dans les feuillages	Ch. 7.1
Denrées alimentaires	Ch. 5

Les immissions des centrales nucléaires étant par-

fois 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 radio-écologique 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.

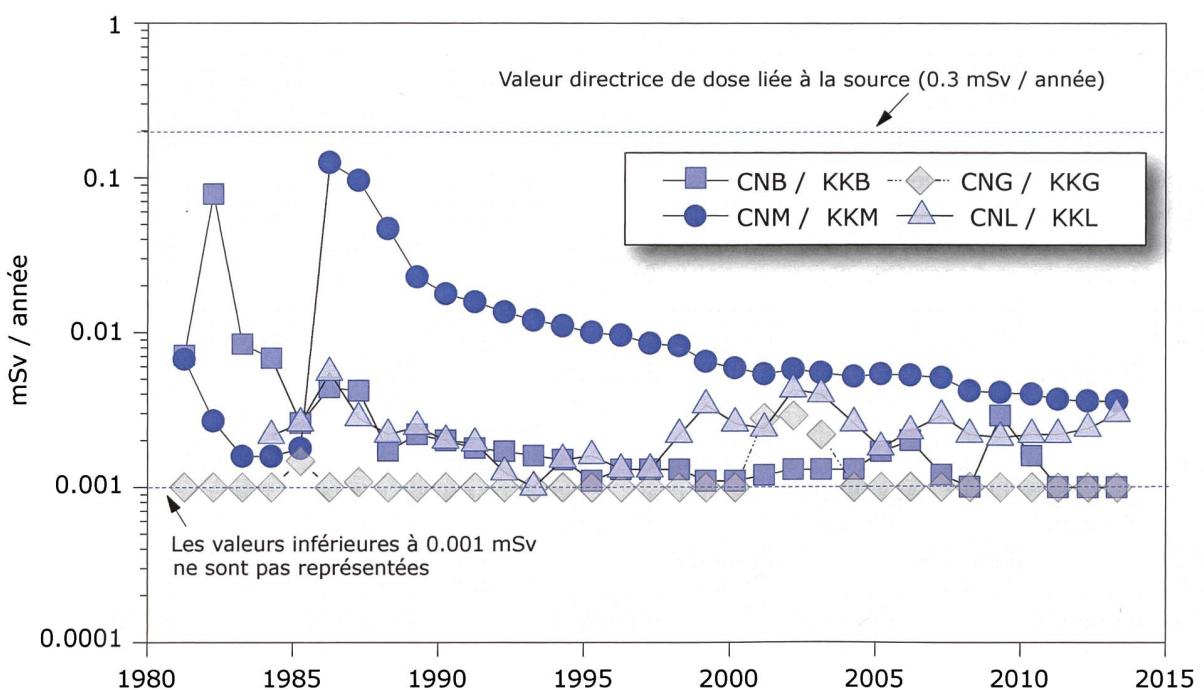


Figure 1:

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 2013 (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.

Résultats

Mesures à la source

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 2013 (voir aussi Chap. 8.1).

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population avoisinante en termes de doses. En tenant compte des rejets des années précédentes, ces dernières se sont échelonnées en 2013 entre 0.001 et 0.007 mSv. La contribution majeure provient des rejets atmosphériques (essentiellement du ^{14}C), avec à Mühleberg une contribution rémanente des résines rejetées en 1986, dont l'impact très localisé a constamment diminué depuis. Les calculs des doses reçues par les personnes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires, qui sont représentées dans la figure 1, ont été effectués 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). Trois catégories d'âge ont par ailleurs été considérées, l'adulte, l'enfant de 10 ans et le petit enfant. La dose représentée correspond à la dose reçue par la catégorie d'âge la plus péjorative.

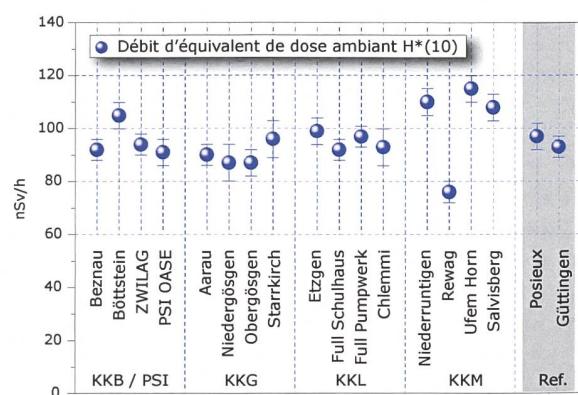


Figure 2:
Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2013 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1 m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante à la clôture et 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 centrales de Leibstadt et de 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 annuelle de 0.9 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel qui s'élève à 0.7 mSv/an). La dose supplémentaire maximale enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt s'élève également à 0.9 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel de 0.6 mSv/an). La valeur limite d'immissions pour le rayonnement direct a ainsi été respecté par toutes les installations en 2013. Rappelons que la valeur limite d'immissions pour le rayonnement direct, en dehors de l'enceinte des entreprises, est fixée à l'Art. 102, alinéa 3 de l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP), à 1 mSv par an dans les locaux d'habitation, de séjour et de travail et à 5 mSv par an dans tout autre endroit. Il convient 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.

L'OFSP effectue également des mesures de débit d'équivalent de dose ambiante $H^*(10)$ à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1 m au-dessus du sol dans un voisinage plus étendu. La figure 2, illustrant les résultats de ces mesures, montre que l'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires ne se distingue pas de manière significative de celle enregistrée à Posieux ou Güttingen, situées hors de leur influence. Il est intéressant de remarquer que les valeurs de débit de dose légèrement plus élevées mesurées sur trois sites des environs de la centrale de Mühleberg sont dues à une concentration plus élevée en ^{40}K (naturel) dans les sols en ces endroits (cf. Figure 3).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La surveillance du milieu atmosphérique comprend l'analyse des précipitations et des aérosols par l'OFSP et le PSI ainsi que des dépôts sur plaques de vaseline par l'exploitant.

Les résultats 2013 des mesures mensuelles des filtres aérosols des environs des centrales nu-

cléaires suisses ainsi que du PSI ont montré la prédominance des radionucléides naturels ^{7}Be et ^{210}Pb , avec des valeurs comprises respectivement entre 1.4 et 5.2 et entre 0.3 et 3.0 mBq/m^3 (mesures OFSP et PSI). Le seul radionucléide d'origine artificielle régulièrement détecté dans l'ensemble des stations est le ^{137}Cs (valeur maximale de $1.6 \pm 0.4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$), provenant de la remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que l'accident de Tchernobyl). Ces concentrations sont comparables à celles enregistrées sur les sites de référence. Des traces de ^{131}I (valeur de $3 \pm 2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) ont par ailleurs été mesurées sur le filtre du voisinage de la centrale de Leibstadt en décembre 2013. En situation normale, l'origine la plus probable du ^{131}I sporadiquement décelé dans les filtres aérosols des stations situées aussi bien aux environs des centrales nucléaires que hors influence, est l'incinération de déchets hospitaliers contenant du ^{131}I , utilisé en médecine nucléaire. Une exception notable est celle du printemps 2011, où du ^{131}I provenant de l'accident de la centrale de Fukushima avait pu être mis en évidence sur l'ensemble des filtres aérosols collectés en Suisse. Par ailleurs, du ^{131}I peut également être décelé au voisinage du CERN dont les accélérateurs, quant ils sont en fonction, produisent ce radioélément.

Aucun autre radionucléide d'origine artificielle n'a été décelé dans les filtres aérosols du voisinage des centrales nucléaires suisses en 2013.

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, le seul émetteur gamma d'origine artificielle dont l'activité spécifique est parfois supérieure à la limite de détection est le ^{137}Cs .

Les résultats des mesures du tritium (^{3}H) dans les échantillons mensuels de précipitations des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. A titre de comparaison, notons que les concentrations de tritium dans les précipitations de la station de référence de Posieux sont restées en 2013 inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l . Les valeurs enregistrées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires de Mühleberg, de Gösgen et de Leibstadt sont ainsi restées proches de celles enregistrées dans des stations de référence situées hors influence de ces installations. A proximité de Beznau, du PSI et du ZWILAG, les concentrations sont généralement restées proches du seuil de détection de 1 à 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs plus élevées. A noter que les maxima enregistrés dans les différentes stations ne présentent pas de corrélation, quand bien même celles-ci sont situées dans un rayon de quelques km seulement. Toutes ces valeurs sont par ailleurs nettement inférieures à la valeur limite d'immission fixée dans l'ordonnance sur la radioprotection pour les eaux accessibles au public (12'000 Bq/l pour le ^{3}H).

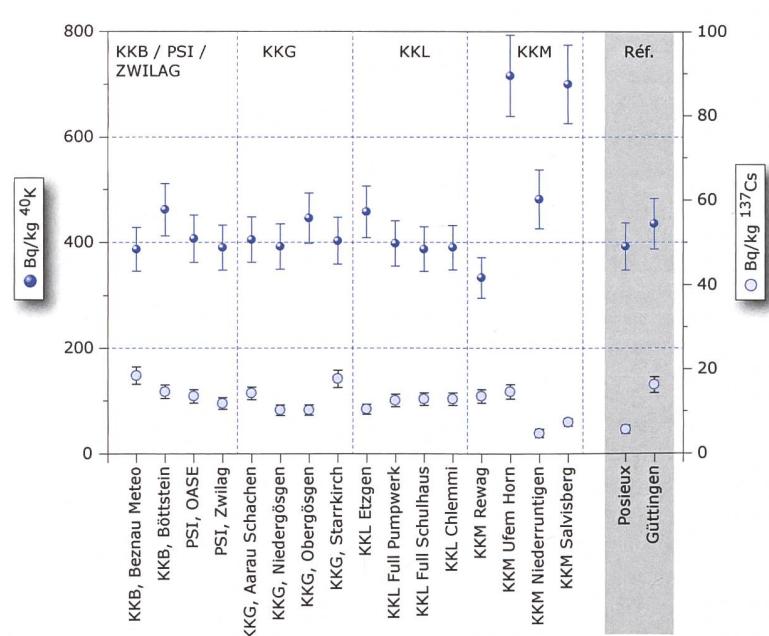


Figure 3:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2 mm) analysés par l'OFSP en 2013 (couche 0 - 5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Gütingen sont représentées à titre de comparaison (grisées).

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2013.

Lieu	Valeur min/ max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruttingen * (environs KKM)	< 2 - 2.6	< 2
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 - 2.2	< 2
Full (environs KKL) *	< 2 - 3.0	< 2
Beznau (environs KKB) **	1.4 - 14.5	5.6
PSI **	< 1.1 - 52.9	3.9
ZWILAG **	< 1.1 - 8.70	1.9

* mesures OFSP / ** mesures PSI

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C . Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Bern, ont ainsi mis en évidence en 2013 une augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 146 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Les doses qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales ne représentent cependant que quelques micro-Sv.

L'intérêt des mesures de ^{14}C se situe aussi dans l'utilisation de ce traceur atmosphérique pour affiner la modélisation de la dispersion atmosphérique.

Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout examiné 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 2013 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 2013.

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 dans le voisinage des installations nucléaires n'ont rien d'anormal par rapport aux autres sites.

Les denrées alimentaires constituent le prochain maillon susceptible de transférer les radionucléides jusqu'à l'homme. Les résultats des mesures de la radioactivité dans les aliments, coordonnées par l'OFSP en étroite collaboration avec les laboratoires cantonaux, n'ont pas révélé de marquage attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires. Les mesures additionnelles de l'OFSP, en particulier celles du programme germano-suisse au voisinage de Leibstadt dans les produits agricoles et les poissons ont confirmé ce constat, puisqu'aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a été décelé dans ces échantillons. Les résultats des mesures de ^{90}Sr effectuées par l'Institut de Radiophysique dans des échantillons de lait et de céréales prélevés au voisinage des centrales nucléaires ainsi que de fruits et légumes prélevés au voisinage de Leibstadt ne se distinguent 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), Klingenau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets en ^{58}Co et ^{60}Co par la centrale de Beznau¹, seules les traces des rejets liquides de la centrale nucléaire de Mühleberg, à savoir principalement le ^{58}Co , le ^{60}Co ainsi que le ^{54}Mn , peuvent aujourd'hui être mis en évidence dans les échantillons d'eau. Les rejets les plus importants ont eu lieu au mois d'août et septembre, pendant la période de révision. Si les activités mesurées pour ces trois radionucléides dans les échantillons d'eau prélevés à Hagneck reflètent généralement bien les

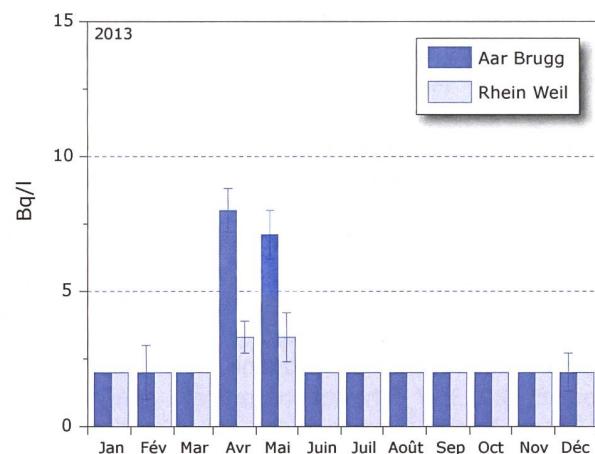


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2013.

¹ L'activité en ^{58}Co , dont Beznau était la principale productrice, rejetée par l'ensemble des centrales nucléaires dans le milieu aquatique a chuté d'un facteur 100 entre 2001 et 2011.

activités rejetées par la centrale de Mühleberg, on observe des différences notables pour le ^{60}Co en octobre et novembre. Les valeurs mesurées à cette période surestiment en effet les rejets effectifs. Cet écart est probablement dû à une plus grande remise en suspension de particules sédimentées, par exemple suite à des travaux réalisés dans le canal de Hagneck.

Comme mentionné plus haut, les activités du ^{60}Co , ^{58}Co et du ^{54}Mn enregistrées dans les eaux de l'Aar, à Klingnau/AG (en aval de KKB), ainsi que dans celles du Rhin, à Pratteln/BL, sont, quant à elles, toutes restées inférieures à la limite de détection.

Le ^{137}Cs , également présent dans les 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 2013 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-mai, 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.

Dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar à Hagneck, les radionucléides tels que le ^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co ainsi que le ^{137}Cs sont clairement mesurables. Si le ^{137}Cs se retrouve également dans tous les échantillons de sédiment de l'Aar, prélevés à Klingnau, et du Rhin, prélevés à Pratteln, le ^{54}Mn et le ^{60}Co n'y sont présents que sous forme de traces sporadiques. Les activités du ^{58}Co sont quant à elles toujours restées inférieures aux limites de détection dans ces échantillons.

En raison de la détection répétée de ^{131}I dans les échantillons de plantes aquatiques prélevées à Hagneck en 2011, l'EAWAG procède depuis au prélèvement et à l'analyse régulier d'échantillons de plantes aquatiques en provenance de cette station. En 2013, 7 échantillons ont été analysés. Du ^{131}I a pu être mis en évidence dans 3 d'entre eux, avec des activités spécifiques comprises entre 5 et 37 Bq/kg. Dans l'échantillon prélevé en septembre, soit en fin de période de révision de la centrale de Mühleberg, des activités significatives de ^{54}Mn (150 Bq/kg m.s.), de ^{58}Co (160 Bq/kg m.s.) et de ^{60}Co (500 Bq/kg m.s.) ont été enregistrées. Ces valeurs restent toutefois inférieures aux valeurs

limites d'exemption définies dans l'ORaP (fixées par exemple à 1'000 Bq/kg pour le ^{60}Co). Dans les 6 autres échantillons de plantes aquatiques, les activités de ces radionucléides sont restées inférieures aux limites de détection de 5 à 10 Bq/kg.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar en aval de KKM, KKG, KKB et KKL en 2013 n'ont pas révélé la présence de radionucléide d'origine artificielle. Le constat est le même pour l'examen des eaux des nappes phréatiques.

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 sur mandat de l'OFSP se résumait, jusqu'à début 2012, au prélèvement de deux échantillons d'eau, l'un dans le bassin de contrôle (BdC) et l'autre dans la chambre de contrôle (CdC) tous les 15 jours environ. Le bassin de contrôle est un bassin de collecte où 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 étaient effectués manuellement par un membre du personnel du dépôt de conservation des objets culturels du Canton de Vaud, qui occupe maintenant l'ancienne grotte des machines. Les échantillons étaient ensuite envoyés à l'Institut de Radiophysique (IRA) à Lausanne chargé des analyses de la radioactivité (émetteurs gamma, tritium (^3H) et ^{90}Sr) sur mandat de l'OFSP.

Suite aux concentrations accrues de tritium enregistrées dans le système de drainage entre fin 2011 et début 2012 (valeur maximale de 230 Bq/l),

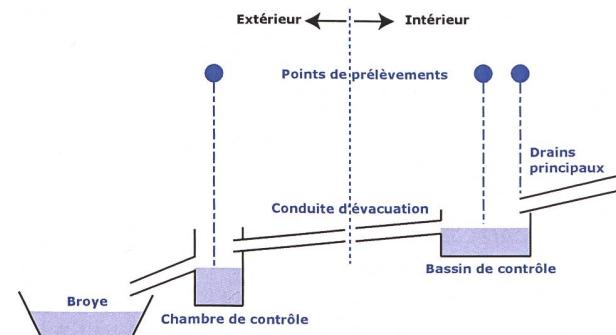


Figure 5:
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

l'OFSP avait pris la décision de renforcer la surveillance du site, notamment au moyen de prélèvements journaliers d'échantillons d'eau en différents points du système de drainage jusqu'à l'installation de 2 collecteurs automatiques début mai 2012. Des programmes supplémentaires de prélèvements et de mesures d'échantillons de l'environnement ont également été organisés. La surveillance complémentaire ayant démontré que l'augmentation enregistrée était due à un phénomène ponctuel et comme aucune valeur élevée n'a plus été enregistrée, un rythme de surveillance normal des eaux du système de drainage a pu être réintroduit dès la fin juin. Les collecteurs automatiques ont, quant à eux, été maintenus (pour les détails concernant cette augmentation et sur les résultats de cette surveillance rapprochée, voir chapitre 8.6 du rapport «Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse 2012»).

En 2013, l'IRA a donc poursuivi ses analyses comme par le passé. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4h aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyé à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2013. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co , ^{131}I , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 1.5 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 2013 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 8.3 ± 1.3 Bq/l et 8.2 ± 1.3 Bq/l respectivement. Elles se situent ainsi en dessous des valeurs moyennes enregistrées au cours de la période 2001 et 2010 (env. 15 Bq/l), ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive.

Pour la mesure du ^{90}Sr , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Deux échantillons collectés dans la CdC (mélange juillet-août et septembre-octobre) ont présenté des activités très légèrement supérieures à la limite de détection de 7 mBq/l (valeur maximale de 8.2 ± 1.6 mBq/l).

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2013.

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 présents dans les rejets liquides 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

Environnement du CERN (mesures OFSP)

S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, T. Marti, M. Müller, P. Steinmann

Section Radioactivité de l'environnement, URA / OFSP, 3003 BERN

J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus

Institut F.-A. Forel, Université de Genève, 10 route de Suisse, 1290 VERSOIX

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par la Commission de Sécurité 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 n'a pas révélé d'impact des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante en 2013. Ce résultat était attendu étant donné que les installations du CERN n'ont pas fonctionné en raison de travaux de maintenance qui ont duré la quasi totalité de l'année.

Programme de surveillance de l'OFSP

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

- Dosimétrie d'ambiance du rayonnement gamma ainsi que des neutrons sur une base trimestrielle (13 dosimètres à thermoluminescence -TLD- évalués par l'IRA (institut de radiophysique - Lausanne) et mesures ponctuelles de l'équivalent de dose ambiant effectuées par l'OFSP sur 9 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants.
- Aérosols : mesure continue alpha/bêta de la station RADAIR avec compensation du rayonnement naturel et spectrométrie gamma hebdomadaire des filtres d'un collecteur à haut débit.
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel, mesure du tritium par l'OFSP).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) et végétaux ainsi que certains produits locaux (comme le ^{3}H dans le vin).

Notons que l'installation ISOLDE n'a pas fonctionné en 2013, le LHC (ainsi que ses injecteurs) a également été mis à l'arrêt fin février 2013 pour une longue période de travaux qui devrait durer environ 2 ans. Malgré cela, la surveillance de la radioactivité dans l'environnement au voisinage du CERN et de ses installations s'est poursuivie comme par le passé.

Mesures de l'exposition ambiante

Les emplacements des TLD, destinés au contrôle de l'exposition ambiante au voisinage du CERN, ont été revus en 2006 déjà afin de pouvoir tenir compte de l'impact éventuel du LHC après sa mise en fonction. Treize sites ont été surveillés en 2013, 5 d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français). En plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée.

Les résultats de ces mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP, ont montré, qu'en 2013, les doses de neutrons et des photons sont restées au niveau de l'irradiation naturelle (0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons et environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas), y compris aux emplacements situés à l'intérieur de la clôture, proches des accélérateurs du CERN ou de leurs injecteurs. Ces résultats étaient attendus, étant donné que les installations étaient à l'arrêt pour maintenance.

A noter toutefois, que des doses de neutrons deux fois plus élevées que la normale ont été enregistrées au troisième trimestre 2013; ce résultat est très surprenant étant donné qu'aucune installation du CERN ne fonctionnait au cours de cette période. Cette augmentation d'un facteur 2 par rapport aux valeurs habituelles a toutefois également été observée aux 2 sites de référence (le premier situé à Meyrin, le second à Lausanne). Le fait qu'autant les bruits de fonds que les sites contrôlés présentent des valeurs accrues indique que c'est l'ensemble de la série de mesure qui a été affectée d'un biais. Mais aucune explication technique n'a pu être trouvée à cette anomalie. Compte tenu des incertitudes

de mesure, les valeurs peuvent tout de même être considérées comme compatibles avec le niveau de l'irradiation naturelle. En définitive, il n'y a pas lieu de croire à une augmentation anormale du niveau de radiation des neutrons suite à ces résultats.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre-octobre 2013 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. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$) dû au rayonnement gamma se sont échelonnées entre 88 et 114 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 99.2 ± 2.6 nSv/h; moyenne des sites distants 101.5 ± 7.9 nSv/h).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau RADAIR située au CERN et mesurant en continu la radioactivité alpha et bêta des aérosols (voir Chap. 4.2) n'a pas signalé d'anomalie en 2013. Depuis 2007, un moniteur d'iode est également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l' ^{131}I gazeux. Aucune valeur supérieure à la limite de détection de 50 - 60 mBq/m³ n'y a été enregistrée.

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). Les installations ayant été à l'arrêt en 2013, une production supplémentaire de ^7Be par le CERN n'est toutefois pas attendue. Le tableau 1 montre que les concentrations de ^7Be mesurées en 2013 dans les filtres aérosols de la station du CERN ne se sont en effet pas distinguées de celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence. Des traces de ^{22}Na , également d'origine naturelle, ont été détectées à plusieurs reprises (valeurs comprises entre 0.1 et 1.0 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, seules des traces de ^{137}Cs ont été mises en évidence en 2013. Ce dernier provient de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl et est décelable partout en Suisse. Les activités de ^{137}Cs dans les filtres HVS de Meyrin n'ont pas dépassé $1.1 \pm 0.3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Ainsi, contrairement aux résultats de 2012, les concentrations de ^{137}Cs dans les filtres HVS de Meyrin n'ont pas dépassé $1.1 \pm 0.3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Ainsi, contrairement aux résultats de 2012, les concentrations de ^{137}Cs dans les filtres HVS de Meyrin n'ont pas dépassé $1.1 \pm 0.3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

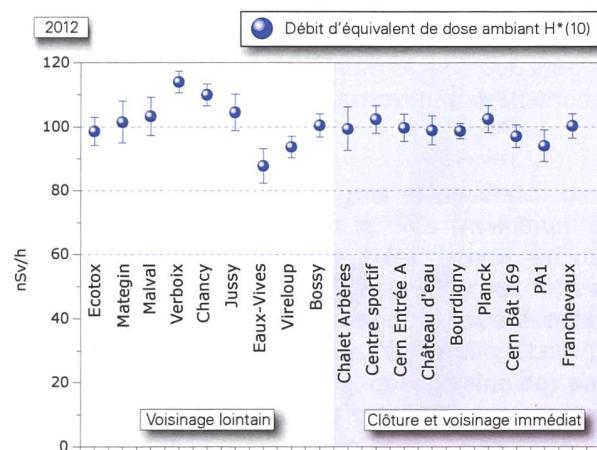
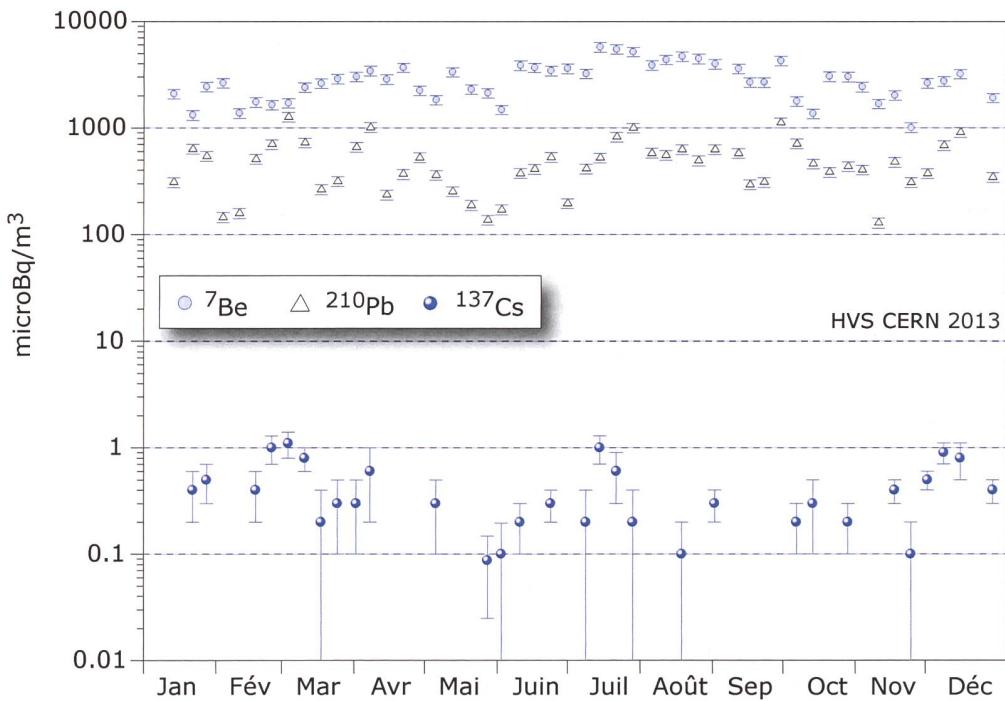


Figure 1:

Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2013 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.

**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 2013.

rement aux années précédentes, aucun radioisotope artificiel attribuable aux activités du CERN, tel que ^{24}Na ou ^{131}I , n'a été mesuré dans les filtres aérosols. A nouveau, ce résultat se conçoit aisément, étant donné que les installations du CERN n'ont pas fonctionné.

Tableau 1:

Concentrations du ^7Be mesurées en 2013 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

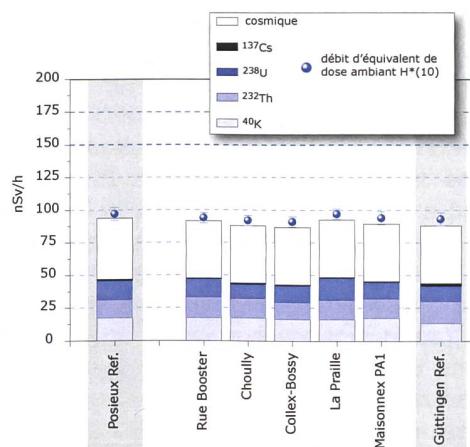
Station de collecte à haut débit	Valeur min/max	Moyenne
	(mBq/m^3)	(mBq/m^3)
CERN (Meyrin/GE)	1.0 - 5.7	2.9
Posieux/FR	1.0 - 5.9	3.1
Klingnau/AG	0.7 - 6.0	2.6
Göttingen/TG	1.0 - 5.8	2.9
Cadenazzo/TI	1.8 - 6.8	3.4

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma in situ permettent de distinguer les contributions d'origine naturelle et artificielle à l'exposition externe du public. Comme attendu, les mesures 2013 n'ont pas indiqué d'apport artificiel attribuable aux activités du CERN: la figure 3 montre en effet que les va-

leurs mesurées au voisinage proche du centre de recherche sont tout à fait comparables à celles relevées dans des sites hors de son influence, tels que Posieux/FR ou Göttingen/TG (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au Chap. 3.1).

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux ont confirmé ce constat. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioé-

**Figure 3:**

Contributions individuelles au débit d'exposition ambiante déterminées par spectrométrie gamma in situ pour les sites voisins du CERN examinés en 2013, et comparaison avec les résultats obtenus à Posieux/FR et Göttingen/TG.

éments 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, à l'exception de rares traces de ^{137}Cs , provenant de l'érosion des sols anciennement contaminés. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l. Ce constat s'applique également aux concentrations de tritium des échantillons mensuels d'eau du Nant d'Avril.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par l'Institut F.-A. Forel à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme pour la période novembre 2012 à novembre 2013 a fait l'objet d'un rapport spécifique¹.

En dehors du ^{40}K et des isotopes des séries primordiales (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th), seuls 2 radioisotopes ont été détectés dans les échantillons d'eau brute (non filtrée) prélevés dans le Nant d'Avril.

Les activités maximales sont celles du ^7Be (maximum de 2.27 ± 0.13 Bq/l), avec une moyenne de 0.39 Bq/l lorsque l'isotope est présent. 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 2012 - 2013 est ainsi de 1'390 MBq au minimum et de 2'090 MBq au maximum et se situe dans la moyenne des périodes de mesure précédentes.

Le deuxième radionucléide mis en évidence dans les eaux du Nant d'Avril est le ^{137}Cs (maximum de 24 mBq/l). Ce radionucléide a été détecté exclusivement sur les particules (mesuré sur les filtres), ce qui montre qu'il est fortement associé à celles-ci, malgré une acidification de l'échantillon. Le ^{137}Cs provient de l'érosion des sols, qui entraîne des particules contaminées par les retombées des essais nucléaires dans l'atmosphère et de la catastrophe de Tchernobyl.

Contrairement aux années précédentes, aucune trace de ^{22}Na n'a été mesurée dans les échantillons bimensuels d'eaux. Comme le ^7Be , le ^{22}Na est produit dans la stratosphère par rayonnement cosmique, mais peut également être produit par les installations du CERN. Très peu de données récentes sont disponibles sur les flux naturels de ^{22}Na . Le fait que ce radionucléide n'ait pu être détecté en 2013, alors que les installations étaient à l'arrêt, tend à confirmer l'hypothèse faite les années précédentes, attribuant l'origine de ce radionucléide dans les échantillons d'eaux du Nant d'Avril aux activités du CERN.

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. Les activités mesurées pour ces deux isotopes sont résumées dans le tableau 2. Pour le ^7Be , celles-ci sont légèrement supérieures à la moyenne des activités enregistrées au cours des 8 dernières années. Notons encore que depuis la période 2004 - 2005, aucune trace de ^{54}Mn , de ^{65}Zn ou des isotopes de cobalt (^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co) n'a plus été détectée dans les sédiments du Nant d'Avril.

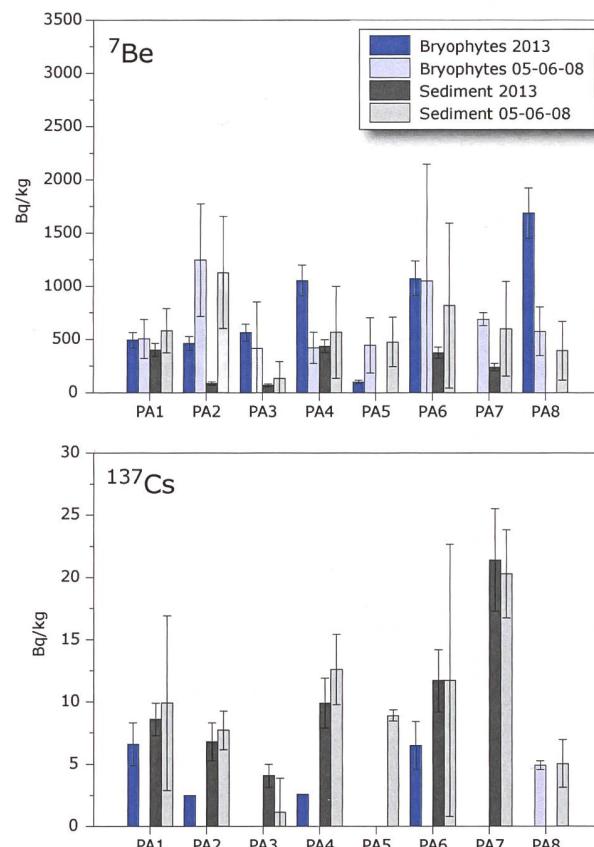


Figure 4:

Activités du ^7Be et du ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC en 2013. Les valeurs 05-06-08 correspondent aux moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées au cours des périodes témoins 2005-2006-2008.

¹ J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus et K. Loizeau, Rapport N°13 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2012 – Novembre 2013 ; Institut F.-A. Forel (Décembre 2013).

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 rejets des eaux du LHC et analysés par l'Institut Forel. Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments se sont échelonnées, en 2013, entre 69 et 437 Bq/kg pour le ^{7}Be et entre 4.1 et 21.4 Bq/kg pour le ^{137}Cs .

Comme attendu, elles sont conformes à celles enregistrées sur les mêmes sites dans le cadre du programme point zéro LHC (voir figure 4). Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^{7}Be variant entre 100 et 1'688 Bq/kg et entre < 2 et 6.6 Bq/kg pour le ^{137}Cs . La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus dans le cadre du programme point zéro LHC (mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008), n'a pas révélé la présence de nouveaux radioisotopes ni une augmentation significative des radionucléides présents. La figure 4 montre que les activités spécifiques de ^{7}Be dans les bryophytes prélevés aux points de rejet PA4 et PA8 dépassent la gamme d'activité enregistrée sur les mêmes sites lors des périodes témoins, sans toutefois dépasser les maximums observés sur les autres sites au cours des mêmes périodes témoins.

En résumé, si l'on exclut le ^{7}Be dont la fraction produite par les installations du CERN est incertaine, aucun radionucléide attribuable aux activités du centre de recherche n'a pu être décelé dans le milieu aquatique en 2013. Les radioéléments produits par les installations du CERN tels que ^{22}Na , ^{65}Zn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , mis en évidence par le passé dans le Nant d'Avril, n'ont en effet été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes durant l'année sous revue.

Tableau 2:

Résumé des résultats des mesures effectuées par l'Institut F.-A. Forel dans les sédiments du Nant d'Avril durant la période novembre 2012 à novembre 2013 (11 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max	Moyenne	Médiane
	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
^{7}Be	316 - 1'779	883	811
^{137}Cs	2.7 - 11.1	7.7	7.9

Conclusions

Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec l'institut F.-A. Forel, a montré que l'impact radiologique du CERN sur l'environnement et la population avoisinante s'est avéré négligeable en 2013. Contrairement aux années précédentes, aucun radionucléide d'origine artificielle attribuable aux activités du CERN (tels que ^{24}Na et ^{131}I dans l'air ou ^{22}Na dans l'eau) n'a pu être mis en évidence malgré la mise en œuvre de techniques de prélèvement et de mesure d'une très grande sensibilité. Ceci s'explique par le fait que les installations du CERN étaient à l'arrêt pour maintenance pendant la quasi totalité de l'année 2013.

8.7

Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)

F. Malacrida, P. Vojtyla

CERN

Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE)

1211 Genève 23

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 l'Organisation a respecté la valeur directrice de 0.3 mSv/a pour l'année 2013. La dose effective délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.00003 mSv, soit < 0.01 % de la valeur directrice. Les concentrations de radionucléides sont restées inférieures à 0.3 % des limites applicables dans tous les échantillons environnementaux. De fait, l'impact radioécologique du CERN a été négligeable.

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

CERN's Accelerator Complex

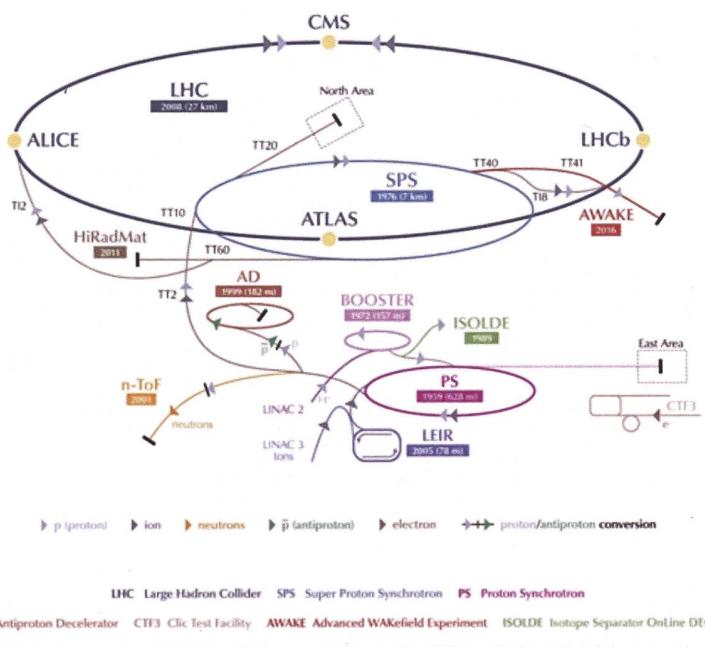


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire en fin de chapitre).

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 lorsque les particules en percutent d'autres ou percutent des cibles fixes, ainsi que lors de l'accélération, de l'extraction et de la collimation des faisceaux. Les accélérateurs sont blindés et les plus puissants d'entre eux sont situés profondément sous terre, de telle manière à ce que seule une fraction infime des rayonnements

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

En termes d'impact environnemental, le risque radiologique induit par des installations mettant en jeu des accélérateurs est très faible. Maintenir un faisceau de particules en orbite requiert une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radio-nucléides produits sont des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités.

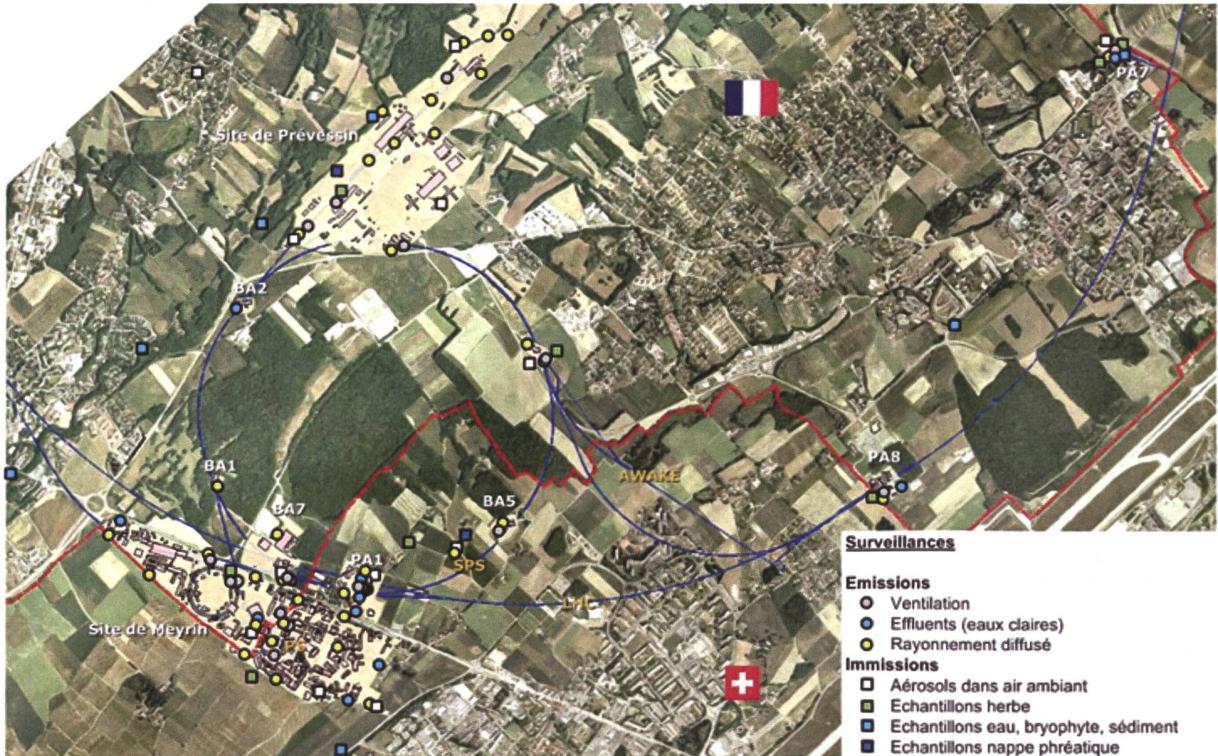


Figure 2:

Région frontalière franco-suisse : sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS) et du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonnage du CERN ; ceux qui concernent le territoire suisse y sont tous représentés, excepté le point de collecte des échantillons de l'Allondon qui est hors-carte.

Pour plus d'information, se référer au site:
<http://environmental-impact.web.cern.ch/environmental-impact/fr/Radiation/Radiation-fr.html>.

Lorsque les accélérateurs sont arrêtés, l'émission atmosphérique de gaz de demi-vies courtes et le rayonnement diffusé cessent. Néanmoins, le béton des tunnels reste sensiblement marqué par son exposition au faisceau; celui-ci contient donc des radionucléides produits par activation. L'eau d'infiltration des tunnels peut donc toujours potentiellement se charger en radionucléides lors de sa percolation, avant d'être évacuée vers les eaux de surface. De la même manière, des traces de radionucléides peuvent être mesurées dans l'air, lorsque par exemple le tritium transfert des parois des tunnels. Aussi, l'installation ISOLDE peut continuer d'émettre des petites quantités d'iode ou de gaz radioactifs qui ont été provisoirement stockés dans des cuves en vue de leur décroissance avant rejet. Seule une fraction des quantités initialement récoltées sont émises. Les quantités impliquées restent donc très faibles, mais cet état de fait implique néanmoins la continuité du programme de surveillance radiologique des émissions de l'Organisation durant les périodes d'arrêt machine.

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 fonction des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance des rayonnements diffusés se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou prédis par des calculs. Chaque station est équipée d'une chambre d'ionisation 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 2013, 41 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 2013, 32 stations étaient en opération. De manière similaire, les points de rejet d'eaux claires sont équipés de stations de surveillance de l'eau (15 stations en 2013). Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vies courtes et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire.

Les niveaux de rayonnements diffusés 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 largement reconnus [1,2]. La surveillance des émissions est complétée par la surveillance des immissions, qui est un processus impliquant la collecte d'échantillons environnementaux et leur analyse en laboratoire. Les résultats doivent corréler avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont corrects. Cette surveillance implique un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (11 stations), des échantillons d'herbe (12 points d'échantillonnage), d'eau, de bryophytes (mousses) et de sédiments dans les cours d'eau (13 points), de l'eau des nappes phréatiques (7 points), ainsi que des échantillons de produits d'agriculture locaux, tels que blé, graines de tournesol, asperges et vin.

Les positions des stations de surveillance des émissions et des rayonnements diffusés 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 2013

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2013

2013 a été une année particulière en termes d'exploitation des accélérateurs. Les chaînes d'injections des complexes du PS et SPS ainsi que le LHC ont été exploités durant une courte période de cinq semaines se terminant à fin février et, durant cette période, seule une partie des zones expérimentales a reçu du faisceau. Les intensités impliquées sont restées relativement faibles comparé aux années précédentes. A partir de cette période et jusqu'en 2014, le CERN procède à de grands travaux avec pour objectif d'augmenter l'énergie des particules dans le LHC et l'intensité des faisceaux. A cette occasion, de nombreuses installations ont subi des travaux de consolidation et d'amélioration. Cette période d'arrêt, nommée Long Shutdown 1 (LS1), va se terminer par un redémarrage progressif des chaînes d'injection dès juin 2014. Le LHC, quant à lui, ne sera exploité qu'à partir de 2015.

Dans le cadre de l'optimisation des installations, d'autres travaux ont été effectués, tel que par exemple le renforcement du blindage du PS, qui permettra de diminuer les niveaux des rayonnements diffusés. La ventilation de cet accélérateur a été rénovée, en vue d'une meilleure maîtrise des

flux d'air et les cheminées remplacées, afin de garantir une meilleure dispersion¹ des émissions atmosphériques. La zone des collimateurs au LHC 7 a été modifiée en vue de mitiger les rejets en gaz de demi-vies courtes. L'arrêt des accélérateurs a aussi permis à l'unité en charge de la surveillance environnementale d'engager la rénovation partielle de son parc de moniteurs.

Rayonnement diffusé

Durant l'opération des accélérateurs en janvier et février, aucun moniteur situé en bordure de site n'a pu mettre en évidence des rayonnements diffusés ; ceci s'explique par les faibles intensités exploitées, comparativement aux années précédentes. Un moniteur neutron localisé en bordure du site de Meyrin a enregistré une dose annuelle nette de 9 μSv , dû à l'utilisation d'une source neutron de calibration. Au vu de la localisation concernée, le public n'est pas impacté par cette dose. Les activités de calibration seront prochainement transférées dans un nouveau hall au blindage optimisé, localisé sur le site de Prévessin (F).

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 1². Dû à la faible hauteur des cheminées ainsi qu'aux courtes demi-vies des radionucléides émis, l'impact, qui est minime, reste local. Les radionucléides se répartissent en quatre catégories : les gaz radioactifs de demi-vie courte ^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , et ^{41}Ar ; l'activité bêta total (majoritairement ^{32}P , ^{33}P) et le tritium (^3H). Les valeurs tritium sont surestimées car elles sont le résultat d'une méthode d'évaluation très conservative. L'impact radiologique du tritium est dans tous les cas négligeable (voir plus loin).

L'expérience ISOLDE a émis de l'iode après l'arrêt du faisceau. Les concentrations sont, par effet de décroissance, retombées en dessous du mBq/m^3 au second semestre ; les quantités d'iode radioactif 124 , 125 , 126 , ^{131}I rejetées s'élèvent à 5 MBq (ne figure pas dans le Tableau 1). La dose reçue par le groupe de population de référence imputable aux émissions d'iode est inférieur à 0.004 μSv . Durant le deuxième semestre, de l'eau contenant du tritium en concentrations inférieures au centième de la limite d'exemption ont été évaporées sur le site de Meyrin.

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. Les radionucléides rejetés se répartissent en trois catégories : (a) le tritium sous forme aqueuse (HTO), (b) l'activité bêta total imputable en grande majorité au ^{22}Na et (c) les rejets d'émetteurs de positrons de demi-vie courte (^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O) ; néanmoins ces derniers n'ont pas été détectés dans les rejets en 2013. Le Tableau 2⁽²⁾ présente les rejets de 2013, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentration supérieure aux limites de détection ont été mesurés.

Surveillance des immissions

Le Béryllium-7 est un radioélément faiblement radiotoxique, produit dans l'air par les particules de haute énergie. Il possède une grande affinité aux aérosols, ce qui permet de l'utiliser comme marqueur de rejets dans l'atmosphère de particules radioactives en suspension dans l'air provenant des accélérateurs (voir Tableau 1). Cependant, ce radioélément est également produit naturellement par les rayonnements cosmiques en atmosphère. Aux latitudes moyennes, la concentration en ^7Be dans l'air varie au cours de l'année, avec des maximums en début d'été et en été, lorsque la tropopause, une couche se situant entre la troposphère et la stratosphère, se rompt. L'air provenant de la stratosphère, riche en radioéléments produits par rayonnements cosmiques, est alors injecté dans la troposphère. Les pluies influencent aussi la concentration naturelle en ^7Be , car elles précipitent les aérosols en suspension dans l'air. La Figure 3 montre la concentration de ^7Be dans l'air ambiant collecté dans deux types de stations : (a) des stations situées autour du CERN pouvant capter des rejets d'accélérateurs et (b) une station de référence très éloignée des accélérateurs (HVS Posieux/FR). Les valeurs mesurées proches et loin des sites du CERN ont toute corrélées, prouvant ainsi que la majeure partie de l'activité en ^7Be mesurée est d'origine naturelle. La mesure de l'échantillonneur d'aérosols à haut volume EAS973 situé au LHC-PA7 a été suffisamment sensible pour détecter le ^{22}Na naturel, aussi produit par rayonnements cosmiques. Les quantités mesurées, soit $< 0.001 \text{ mBq}/\text{m}^3$, correspondent à celles mesurées avant que le LHC ne soit en opération. Les mesures des filtres d'aérosols de la station de ventilation VMS907 du LHC PA7 n'ont pas mis de ^{22}Na en évidence.

¹ Une meilleure dispersion dérive en un impact radiologique plus faible, principalement pour le personnel sur site mais aussi pour la population proche.

² En 2013, les codes des stations ont été modifiés mais les numéros restent identiques (par exemple, PMV907 et PMWS21 sont respectivement devenus VMS907 et WMS021).

Tableau 1:

Rejets radioactifs dans l'air (CERN, 2013).

Origine du rejet	Station	Air rejeté	^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , ^{41}Ar	^7Be aérosol	Bêta aérosol	Tritium
		10^6 m^3				
Anneau principal PS	VMS174	70*	0.05	2	0.4	1.6
PS BOOSTER	VMS175	24*	0.02	4	0.1	0.8
TT10 injection PS-SPS	VMS011	80*	0.09	2	1.1	2.5
ISOLDE	VMS170	80	<LD	<LD	0.01	3
LHC PA7, collimateurs	VMS907	127*	0.08	<LD	<LD	<LD
Evaporation tritium	-**	2*	<LD	<LD	<LD	6.3

* durant l'exploitation de l'installation - ** L'eau est analysée en laboratoire avant son évaporation.

Tableau 2:

Rejets radioactifs dans les cours d'eau (CERN, 2013).

Origine du rejet	Station	Quantité d'eau	Tritium	Bêta/gamma (^{22}Na)	Rejeté dans:
		10^6 m^3	GBq	MBq	
Site de Prévessin, SPS	WMS021	0.38	6.4	37	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	WMS101	2.4	4.5	9.1	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	WMS103	0.30	0.50	8.6	Le Lion (F)
AD infiltration	WS104	0.02	0.06	3.5	STEP*
Site SPS BA6 + site LHC PA1	WMS910	1.3	1.1	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	WMS970	0.01	0.03	0.08	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS**, rejet par le site du LHC PA8	WMS980	0.10	0.40	<LD	Le Nant (F)

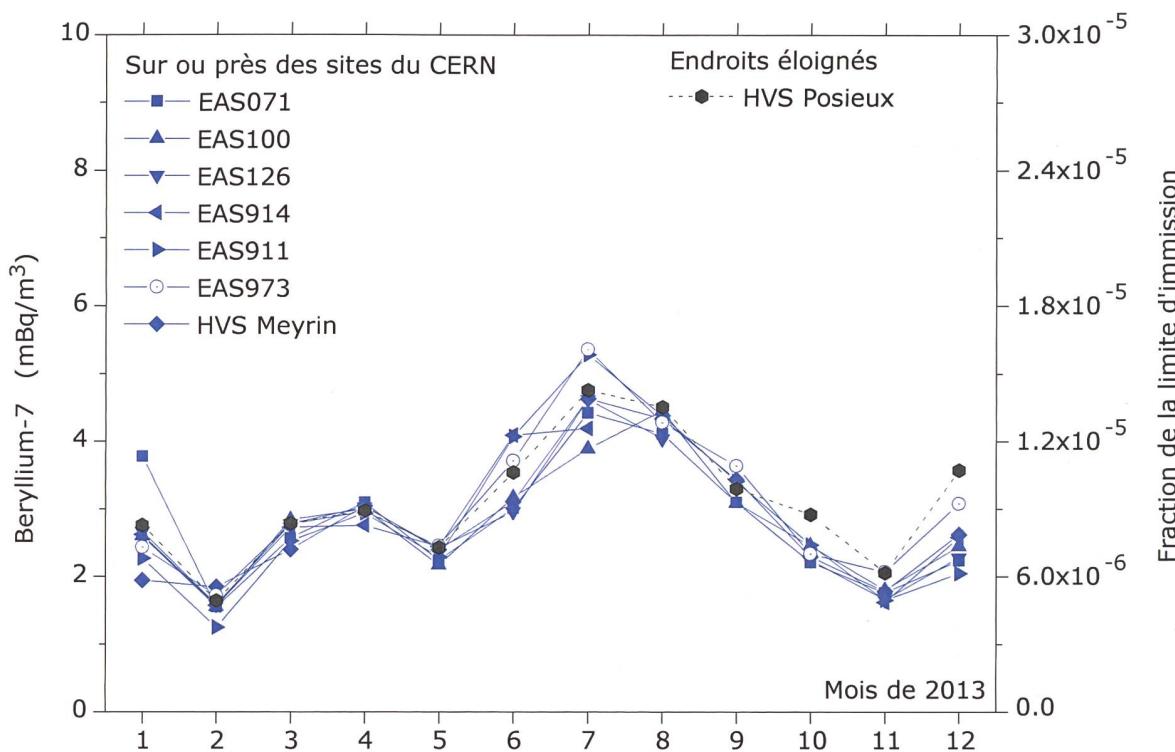
* Station d'épuration d'eau Bois-de-Bay à Satigny/GE - ** Une expérience arrêtée en 2012.

Concernant l'environnement aquatique, des faibles concentrations de ^{54}Mn ont pu être détectées dans deux échantillons de bryophytes (mousses) et dans deux échantillons de sédiments du Lion (F) et de l'Allondon (F/CH), prélevés en aval du point de rejet WMS021 (comparer avec le Tableau 2). L'eau provient des zones expérimentales du CERN. Les concentrations maximales mesurées dans ces échantillons ont été respectivement de 24 ± 2 et $0.1 \pm 0.1 \text{ Bq/kg sec}$ dans les mousses et sédiments. Les bryophytes sont d'excellents bio accumulateurs 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 la rivière le Lion rejoint l'Allondon, qui termine son cours dans le Rhône. Aucun radionucléide provenant des effluents du CERN n'a

pu être mesuré dans le Nant d'Avril, dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches. Cette rivière fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève. En 2013, aucun radionucléide d'origine anthropique n'a pu être mis en évidence [6].

En sus du programme conventionnel de surveillance de l'environnement, des échantillons organiques ont été transmis pour analyses au groupe de radioécologie de l'Institut de Radiophysique, rattaché au Centre Hospitalier Universitaire Vaudois. Des analyses du tritium organiquement lié³ mettent en évidence un très faible marquage de l'environnement immédiat. Les herbes prélevées sur les sites de Meyrin et de Prévessin présentent des concentrations de 1 Bq/kg m.f. (la limite d'exemption du tritium est 200'000 Bq/kg [5]). L'analyse des mousses aquatiques prélevées dans le Nant d'Avril et dans l'Allondon n'a pas mis en évidence de marquage significatif en évidence.

³ Le tritium organiquement lié est la fraction du tritium qui est intégré par une plante, principalement par photosynthèse.

**Figure 3:**

Activités du ^{7}Be mesurées par le biais de 8 stations d'échantillonnage dont 7 sont situées sur ou proches des sites du CERN. EAS71 : Site du SPS BA-7. EAS100 : Site CERN de Meyrin. EAS126 : Proche du PS. EAS914 : Site du LHC PA1. EAS911 : Proche d'une ferme de Meyrin. EAS973 : Échantillonneur CERN à haut débit sur le site du LHC PA7 proche de Collex-Bossy/GE. HVS Meyrin, HVS Posieux : Échantillonneurs OFSP à haut débit, le premier se situant sur le site CERN de Meyrin et le second à Posieux/Fribourg [4].

Aucun radionucléide produit au CERN n'a pu être mis en évidence dans aucun des autres échantillons environnementaux analysés; le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN peut donc être considéré comme négligeable.

Impact radiologique

La dose effective, reçue par les membres du groupe de référence pour le site de Meyrin du CERN en 2013, a été calculée à partir des valeurs d'activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion amélioré basé sur les directives [1,2]. La valeur de dose résultante est de 0.00003 mSv, qui doit être comparée avec la valeur guide pour les membres du public de 0.3 mSv, comme définie en [3] ($<0.01\%$). De fait, en 2013 et comme pour les années précédentes, la dose effective est restée considérablement en dessous des limites réglementaires. La dose effective totale de 0.00003 mSv a consisté essentiellement en rejets de radionucléides gazeux à demi-vie courte (81%). Le groupe de population de référence exposé aux rejets d'effluents liquides dans le Nant d'Avril a reçu une dose inférieure à 0.00001 mSv.

Les contributeurs majeurs sont surveillés en continu, garantissant ainsi un temps de réaction optimal en cas de dégradation de fonctionnement des installations.

Conclusions

1. Les résultats du programme de surveillance effectué par le CERN, combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur directrice de 0.3 mSv/a pour l'année 2013;
2. Des techniques de mesure sensibles ont permis de détecter des radionucléides en faibles concentrations dans certains échantillons environnementaux. Les valeurs de concentration sont néanmoins restées inférieures à 0.3% des limites applicables. De fait, l'impact radioécologique du CERN est négligeable.
3. La dose effective de 0.00003 mSv correspond, à basse altitude, à une demi-heure d'exposition aux rayonnements externes d'origines naturelles.

Références

- [1] Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, HSK-R-41/d (Juli 1997).
- [2] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
- [3] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [4] S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement: Résultats des mesures 2013 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2014).
- [5] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2013), Annexe 3.
- [6] J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus et K. Loizeau, Rapport n° 14 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2012 – Novembre 2013 (2013).

Glossaire

AD	Décélérateur d'antiprotons
AWAKE	Advanced WAKEfield Experiment (en construction, exploitation en 2016)
CLIC	Compact Linear Collider, projet impliquant un collisionneur linéaire
CTF3	CLIC Test Facility, installation de test pour le projet CLIC
HIRAD-MAT	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
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

