

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:	- (2017)
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: 16.02.2026

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

Chapitre / Kapitel 8

Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Surveillance des
installations nucléaires:
Emissions et Immissions

8.1

Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

R. Habegger, A. Leupin, J. Löhle

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2017 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Emissionen aus den Kernanlagen Ergebnisse 2017

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1a für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Figur 1b enthält eine Aufschlüsselung der Abgaben der Kernkraftwerke nach Monat für die limitierten radioaktiven Abgaben. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen gemäss ENSI-Richtlinie G14 errechneten Personendosen für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2017. 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. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für die meistbetroffenen Personen (nur Erwachsene) über die letzten 20 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 183 Proben eigene gammaspektrometrische Messungen durchgeführt (inkl. Teilnahme an Ringvergleichen zur Sicherstellung der eigenen Messqualität). Dabei wurden Aerosol- und Jodfilter sowie Abwasserproben aus den Anlagen stichprobenweise analysiert.

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Abgaberegelmente eingehalten werden.

Bei der monatlichen Aufschlüsselung der radioaktiven Abgaben aus den Werken (vgl. Figur 1b) ist bei den flüssigen Abgaben beim KKG die jährlich jeweils vor dem Revisionsstillstand (siehe Figur 3) durchgeführte Verwerfungsaktion für tritiumhaltiges Wasser bei den Abgaben erkennbar. Solche Abgaben sind in den Druckwasserreaktoren systembedingt erforderlich, um den operationellen Strahlenschutz während der Revision zu optimieren. Im Gegensatz zum KKG erfolgen die Tritiumabgaben im KKB über das ganze Jahr verteilt. Zu Beginn des Jahres 2017 hat das KKB die Bilanzierung von aerosolförmigen Abgaben über den Luftpfad von einer Beta-Totalmessung auf gammaspektrometrische Auswertung umgestellt. Für das Jahr 2017 wurden keine künstlichen Nuklide über der Nachweisgrenze nachgewiesen. Die Messwerte der Vorjahre sind hauptsächlich auf natürliche Radionuklide zurückzuführen, welche bei einer Beta-Totalmessung nicht unterschieden werden können. Parallele Analysen mittels Gammaspektrometrie in den Vorjahren zeigten sehr selten künstliche Radionuklide.

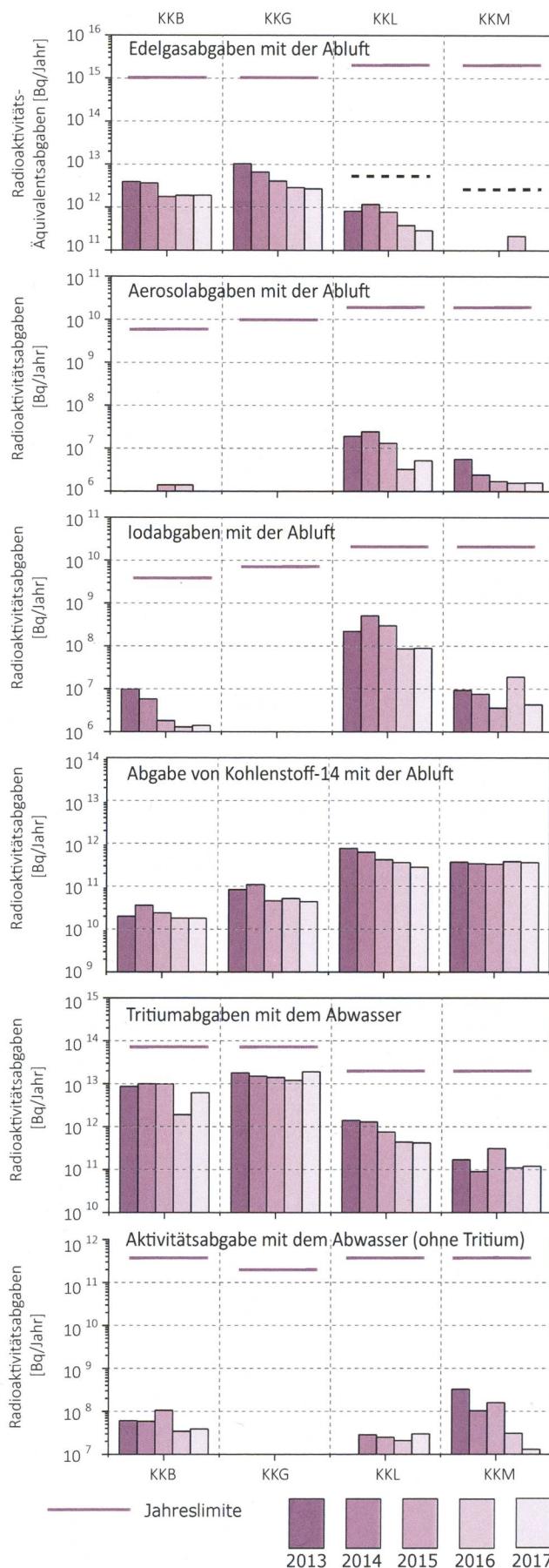
Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren bei KKG und KKB weniger als 0.001 mSv, beim KKL etwa 0.002 mSv und beim KKM etwa 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2017 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Fig 1.a:

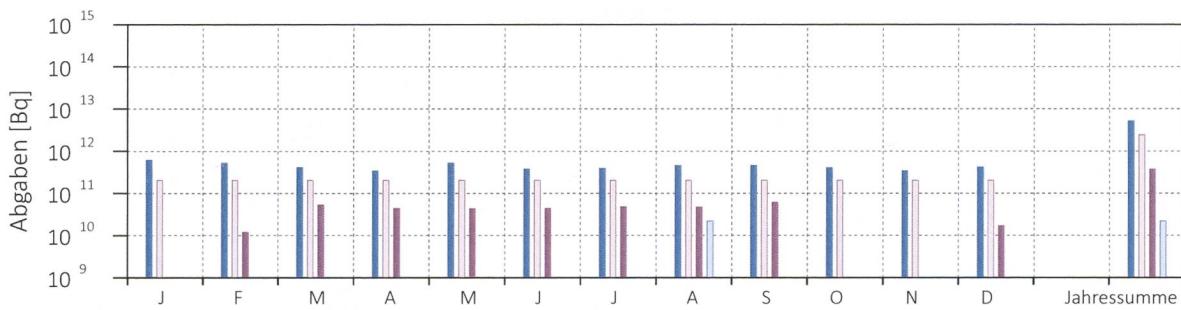
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2013 bis 2017) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten.

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 nukleidspezifisch mittels Gamma-Spektrometriemessungen. Die nukleidspezifischen 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.

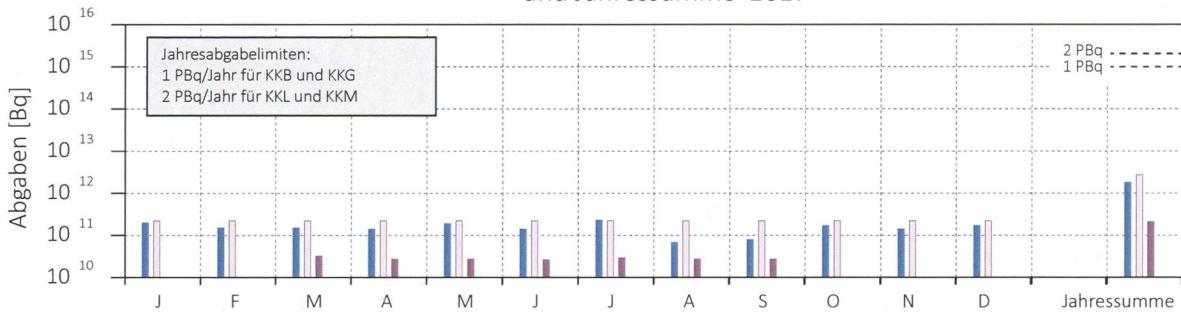
Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.



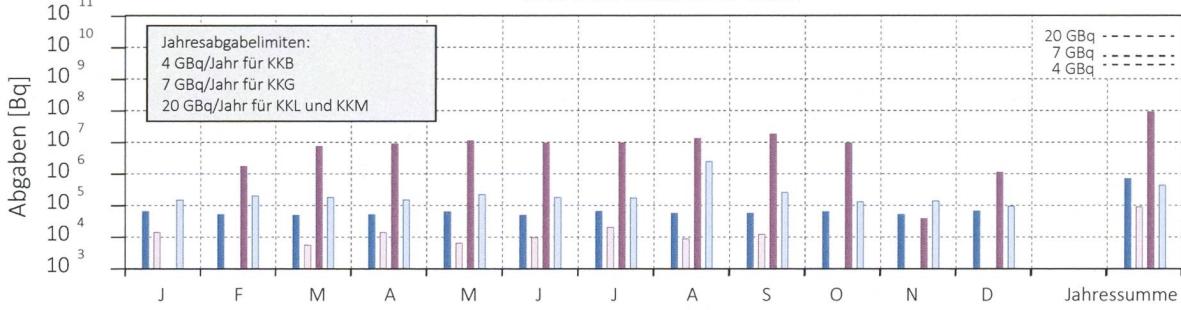
Monatliche **Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2017



Monatliche **Äquivalent-Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2017



Monatliche **Abgaben Iod-131** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2017



Monatliche **Aerosolabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2017

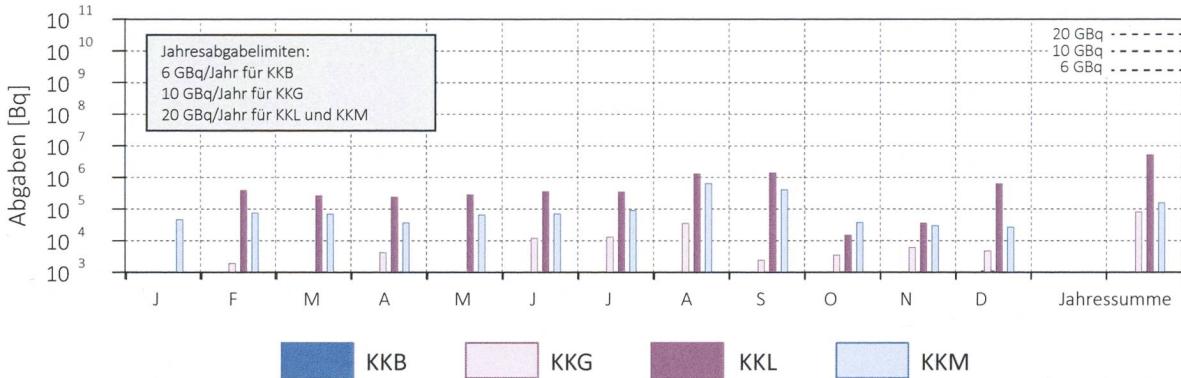


Fig 1.b (Teil 1):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2017 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.

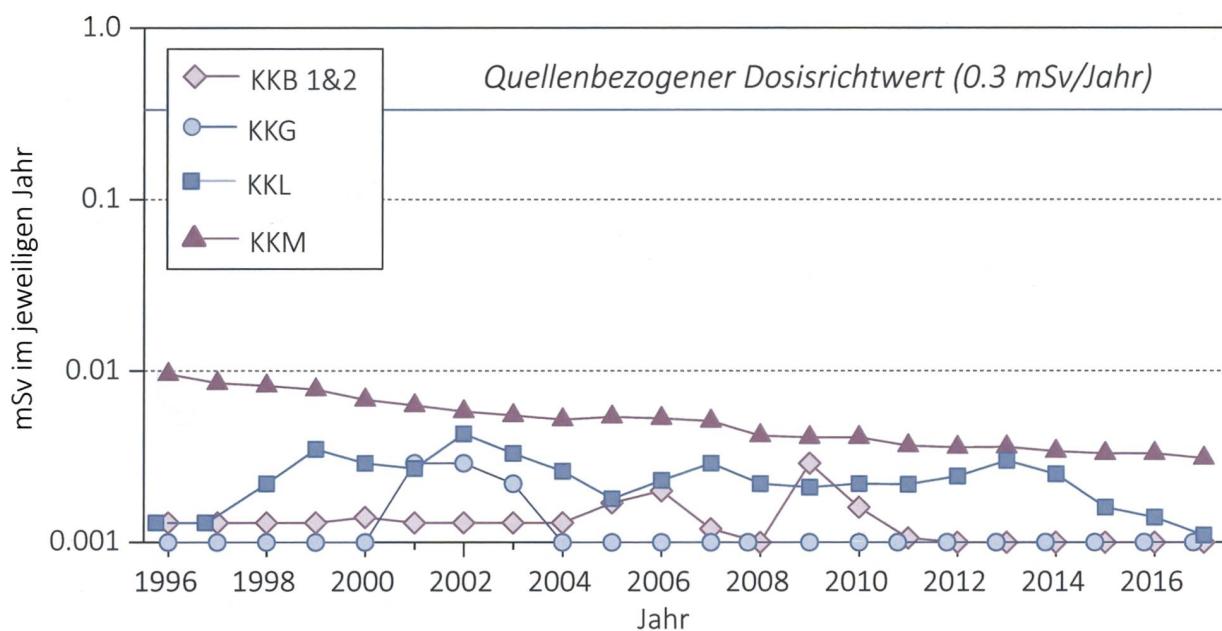
8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen



Fig 1.b (Teil 2):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2017 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.

Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von weniger als 0.007 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen aus den Teilchenbeschleunigern 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 Einlagerungen von 3 Transport- und Lagerbehältern mit Brennelementen aus dem KKL. In der Konditionieranlage wurden grosse Mengen verschiedensten Materials angeliefert und konditioniert. Bei der Plasmaanlage fanden 2017 zwei Verbrennungskampagnen statt. Die für das Jahr 2017 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.



Figur 2:

Berechnete Dosen für die meistbetroffenen Personen (Erwachsene) in der Umgebung der schweizerischen KKW, d.h. eine erwachsene Person, die sich dauernd am kritischen Ort aufhält, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort bezieht und nur Trinkwasser aus dem Fluss unterhalb des jeweiligen Kernkraftwerks konsumiert. An diesem Ort ist der Dosisbeitrag durch die Direktstrahlung aus den Kernkraftwerken vernachlässigbar. Werte kleiner als 0.001 mSv werden in der Figur nicht dargestellt.

Anlage/Block	Betrieb 2017
KKB/Block 1	Kein Leistungsbetrieb, Stillstand
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 1.1.-4.8.; 7.8.-18.8.; 27.9.-31.12. Stillstand: 4.8.-7.8. Revisionsstillstand: 18.8.-27.9.
KKG	Leistungsbetrieb: 1.1.-4.6.; 29.6.-31.12. Revisionsstillstand: 4.6.-29.6.
KKL	Leistungsbetrieb: 20.2.-18.9.; 18.12.-31.12. Stillstand: 1.1.-20.2. Revisionsstillstand: 18.9. – 18.12.20.2
KKM	Leistungsbetrieb: 1.1.-13.8.; 7.9.-31.12. Revisionsstillstand: 13.8.-7.9.

Figur 3:

Betrieb der Kernanlagen 2017.

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2017 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung. (Fussnoten siehe Text)

Ort	Medium	Art der Abgaben ¹	Bilanzierte Abgaben ²				Berechnete Jahresdosis ³		
			Messung	Normiert ^{1,2}	Limiten ⁴	Prozent der Limite	mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr		Erw.	10j Kind	1j Kind
KKB1 + KKB2	Abwasser 3'400 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.4·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	5.9·10 ¹²	-	7·10 ¹³	9 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	5.2·10 ¹²	1.9·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.2 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	-	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	6.9·10 ⁵	-	4·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.8·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKG	Abwasser 6'805 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.7·10 ⁶	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.9·10 ¹³	-	7·10 ¹³	27 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<2.4·10 ¹²	<2.7·10 ¹²	1·10 ¹⁵	<0.3 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	8.2·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	9.1·10 ⁴	-	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.4·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKL	Abwasser 14'147 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.7·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.2·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	2 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	3.7·10 ¹¹	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	5.2·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	8.9·10 ⁷	8.9·10 ⁷	2·10 ¹⁰	0.4 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.8·10 ¹¹	-	-	-	0.0011	0.0014	0.0023
	Dosis total						0.0011	0.0014	0.0024
KKM	Abwasser 2'508 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.1·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.2·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	0.6 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	2.2·10 ¹⁰	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.6·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0023	0.0022	0.0021
		Iod: ¹³¹ I	4.3·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.6·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	0.0012	0.0020
	Dosis total						0.0031	0.0034	0.0041
ZZL	Abwasser 436 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.8·10 ⁸	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	2.3·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-γ-Aerosole	3.2·10 ⁵	-	1·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	8.4·10 ³	-	3·10 ⁷	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.0·10 ⁸	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.2·10 ¹⁰	-	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 2017 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Pro-teus	Forschungs-labor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundes-zwischen-lager
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft^{1,2} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$7.1 \cdot 10^9$	-	-	-	-
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$1.0 \cdot 10^8$	-	-	-	$2.8 \cdot 10^4$
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$1.9 \cdot 10^4$	-	-	-	-
Tritium als HTO	$8.3 \cdot 10^{10}$	-	-	$9.5 \cdot 10^{11}$	$8.1 \cdot 10^9$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$5.4 \cdot 10^6$	-	-	$1.4 \cdot 10^8$	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.0003	< 0.00015
Kind 10j	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.0003	< 0.00015
Kleinkinder	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.0003	< 0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	0.2%	< 0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI ^{1,2}		
	Zentrale Fortluftanlagen	Injektor II	C-Labor	Abwasser 1'237 m ³	Abluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$4.4 \cdot 10^7$	-	$3.3 \cdot 10^6$
Tritium	-	-	-	$1.1 \cdot 10^{11}$	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	$1.7 \cdot 10^{14}$	$4.4 \cdot 10^8$	-	-	$1.7 \cdot 10^{14}$	$3.7 \cdot 10^{14}$
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$1.2 \cdot 10^{10}$	$1.4 \cdot 10^6$	$2.2 \cdot 10^4$	-	$1.2 \cdot 10^{10}$	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$5.1 \cdot 10^7$	-	-	-	$5.1 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^7$
Tritium als HTO	$1.4 \cdot 10^{12}$	-	-	-	$2.5 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kind 10j	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kleinkinder	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	4.0 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 5.0%	

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2017:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben
(Fussnoten siehe Text).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^3H	$5.9 \cdot 10^{12}$	$1.9 \cdot 10^{13}$	$4.2 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$2.3 \cdot 10^{10}$
^7Be					$1.4 \cdot 10^7$	
^{22}Na					$6.4 \cdot 10^4$	$6.3 \cdot 10^5$
^{24}Na	$3.5 \cdot 10^4$					
^{44}Sc					$1.3 \cdot 10^4$	
^{46}Sc					$9.9 \cdot 10^4$	
^{51}Cr	$6.6 \cdot 10^5$		$3.3 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^7$		
^{54}Mn	$1.9 \cdot 10^6$		$8.3 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^7$	$2.3 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^6$
^{56}Co					$1.7 \cdot 10^4$	
^{57}Co	$5.3 \cdot 10^3$				$1.6 \cdot 10^5$	
^{58}Co	$1.6 \cdot 10^7$	$4.4 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^7$	$7.0 \cdot 10^4$	
^{60}Co	$1.1 \cdot 10^8$		$1.5 \cdot 10^8$	$5.9 \cdot 10^7$	$7.8 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^7$
^{65}Zn	$1.2 \cdot 10^6$		$3.6 \cdot 10^6$	$3.1 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^4$	
^{75}Se					$2.4 \cdot 10^4$	
^{82m}Rb					$1.6 \cdot 10^4$	
^{83}Rb					$5.0 \cdot 10^4$	
^{88}Y					$2.4 \cdot 10^4$	
^{89}Sr	$3.2 \cdot 10^5$			$9.5 \cdot 10^4$		
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$1.4 \cdot 10^6$			$2.6 \cdot 10^5$		
^{95}Nb	$1.6 \cdot 10^5$	-				
^{99m}Tc			$1.6 \cdot 10^4$			
^{109}Cd			$6.1 \cdot 10^5$			
^{110m}Ag	$5.8 \cdot 10^6$				$3.2 \cdot 10^3$	
^{111}In					$8.9 \cdot 10^4$	
^{122}Sb	$6.4 \cdot 10^5$					
^{124}Sb	$1.9 \cdot 10^7$				$3.4 \cdot 10^5$	
^{125}Sb	$2.5 \cdot 10^7$		$3.4 \cdot 10^5$			$3.0 \cdot 10^7$
^{123m}Te	$1.3 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$				
^{132}Te		$2.4 \cdot 10^5$				
^{131}I	$3.0 \cdot 10^4$	$6.3 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^6$			
^{132}I		$4.4 \cdot 10^5$				
^{133}Ba					$2.9 \cdot 10^5$	
^{134}Cs	$1.8 \cdot 10^6$				$1.3 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^7$
^{137}Cs	$4.8 \cdot 10^7$	$5.6 \cdot 10^4$	$6.6 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^6$	$4.2 \cdot 10^8$
^{153}Sm					$6.8 \cdot 10^3$	
^{155}Tb					$1.0 \cdot 10^4$	
^{161}Tb					$2.7 \cdot 10^6$	
^{172}Lu					$2.1 \cdot 10^5$	
^{173}Lu					$8.2 \cdot 10^4$	
^{177}Lu					$1.7 \cdot 10^7$	
^{185}Os					$3.7 \cdot 10^4$	
^{195}Au					$1.7 \cdot 10^5$	
^{207}Bi					$2.7 \cdot 10^4$	
α-Strahler	*)	$1.2 \cdot 10^6$	$3.1 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^4$		*)
$^{234}/^{238}\text{U}$					$2.4 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^3$
$^{239}/^{240}\text{Pu}$	$4.3 \cdot 10^3$					
$^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$	$4.3 \cdot 10^4$				$1.4 \cdot 10^3$	
^{239}Np					$5.4 \cdot 10^4$	
^{242}Cm	$1.4 \cdot 10^4$					
$^{243}/^{244}\text{Cm}$	$1.0 \cdot 10^5$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2016 bis und mit dem 3. Quartal 2017

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2017:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben
(Fussnoten siehe Text).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase, Edelgase						
Tritium	$3.1 \cdot 10^{11}$	$5.9 \cdot 10^{11}$	$3.2 \cdot 10^{11}$	$3.4 \cdot 10^{10}$	$2.5 \cdot 10^{12}$	$4.2 \cdot 10^{10}$
$^{14}\text{C}(\text{CO}_2)$	$1.8 \cdot 10^{10}$	$4.4 \cdot 10^{10}$	$2.8 \cdot 10^{11}$	$3.6 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^8$	$2.0 \cdot 10^8$
^{11}C					$2.5 \cdot 10^{13}$	
^{13}N					$2.6 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$1.1 \cdot 10^{14}$	
^{18}F					$8.3 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne					$1.2 \cdot 10^{12}$	
^{41}Ar					$5.2 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr					$7.1 \cdot 10^9$	
^{85m}Kr	$5.5 \cdot 10^{10}$					
^{87}Kr			$1.7 \cdot 10^8$			
^{88}Kr	$9.6 \cdot 10^{10}$					
^{133}Xe	$4.4 \cdot 10^{12}$		$5.1 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^{10}$		
^{135}Xe	$6.6 \cdot 10^{11}$		$1.1 \cdot 10^{11}$	$3.4 \cdot 10^9$		
^{135m}Xe			$2.0 \cdot 10^{11}$			
^{138}Xe			$8.9 \cdot 10^8$			
EG-Aequiv.						
EG: β -total		$< 2.4 \cdot 10^{12}$				
Andere						
Iod						
^{123}I					$3.5 \cdot 10^7$	
^{124}I					$6.6 \cdot 10^4$	
^{125}I					$1.6 \cdot 10^7$	
^{131}I	$6.9 \cdot 10^5$	$9.1 \cdot 10^4$	$8.9 \cdot 10^7$	$4.3 \cdot 10^6$		
^{133}I	$3.8 \cdot 10^6$					

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

[1] Bei der Art der Abgaben resp. den Bilanzier-ten 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 im Jahre 2017 gültigen Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein LE-Wert von 200 Bq/kg entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Ingestions-Dosisfaktor von $5 \cdot 10^{-8}$ 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 $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ angegeben. Die CA-Werte für die einzelnen Nuklide sind dem Anhang 3 der im Jahre 2017 gültigen Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ 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 Aequivalent-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 $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ 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. Die Abnahme des dadurch verursachten Dosisbeitrags über die Jahre ist in der Figur 2 deutlich erkennbar. Der Dosisbeitrag der Aerosole, welche im Berichtsjahr abgegeben wurden, ist demgegenüber vernachlässigbar und liegt in der Größenordnung der anderen schweizerischen Kernkraftwerke.

Iod : Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von ^{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 -Aequivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben, wobei sich der Gewichtungsfaktor aus dem Verhältnis des Ingestionsdosisfaktors des jeweiligen Nuklides zum Ingestionsdosisfaktor von ^{131}I ergibt. Die Ingestionsdosisfaktoren sind der im Jahre 2017 gültigen 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 angegebenen Werte basieren bei allen Werken auf aktuellen Messungen.

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

[3] Die Jahressdosis 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 Jahressdosis der Gesamtanlage als Summe über die Abgabestellen gebildet.

[4] Abgabelimiten gemäss Bewilligung der jeweiligen Kernanlage. Die Abgabelimiten wurden so festgelegt, dass die Jahressdosis 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 6/2013 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv/Jahr limitiert.

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2017:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben
(Fussnoten siehe Text).

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{24}Na					$8.6 \cdot 10^5$	
^{38}S					$1.6 \cdot 10^9$	
^{39}Cl					$1.5 \cdot 10^{10}$	
^{51}Cr	$3.0 \cdot 10^4$					
^{54}Mn			$1.1 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^5$		
^{57}Co		$3.5 \cdot 10^3$				
^{58}Co		$3.8 \cdot 10^3$		$2.2 \cdot 10^5$		
^{60}Co			$4.1 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^6$	$8.7 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^3$
^{65}Zn				$4.1 \cdot 10^4$		
^{77}Br					$3.4 \cdot 10^6$	
^{80m}Br					$3.4 \cdot 10^9$	
^{82}Br					$7.3 \cdot 10^8$	
^{89}Sr			$5.3 \cdot 10^5$			
^{95}Nb					$4.5 \cdot 10^3$	
^{99m}Tc					$2.4 \cdot 10^7$	
^{110m}Ag						
^{123m}Te		$1.7 \cdot 10^4$				
^{125}Sb						
^{131}I (Aerosol)	$6.3 \cdot 10^3$	$3.5 \cdot 10^6$				
^{134}Cs						
^{136}Cs						
^{137}Cs			$1.2 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^4$		$2.6 \cdot 10^4$
^{140}Ba			$4.3 \cdot 10^5$			
^{140}La			$6.2 \cdot 10^5$			
^{141}Ce		$8.6 \cdot 10^3$				
^{144}Ce		$1.3 \cdot 10^4$				
^{181}Re					$7.1 \cdot 10^5$	
^{182}Re					$1.9 \cdot 10^8$	
^{182m}Re					$7.7 \cdot 10^6$	
^{183}Re					$1.2 \cdot 10^7$	
^{182}Os					$2.4 \cdot 10^8$	
^{183}Os					$2.3 \cdot 10^8$	
^{183m}Os					$4.2 \cdot 10^8$	
^{185}Os					$1.2 \cdot 10^8$	
^{185}W					$1.6 \cdot 10^9$	
^{191}Pt					$3.6 \cdot 10^6$	
^{192}Au					$1.1 \cdot 10^9$	
^{193}Au					$1.7 \cdot 10^8$	
^{194}Au					$1.5 \cdot 10^7$	
^{192}Hg					$7.7 \cdot 10^8$	
^{193m}Hg					$2.5 \cdot 10^8$	
^{194}Hg					$1.5 \cdot 10^7$	
^{195}Hg					$2.8 \cdot 10^9$	
^{195m}Hg					$1.0 \cdot 10^8$	
^{197m}Hg					$1.3 \cdot 10^8$	
^{203}Hg					$1.2 \cdot 10^7$	
Nicht spezifizierte						$2.9 \cdot 10^5$
α -Aerosole	$2.9 \cdot 10^3$	$4.3 \cdot 10^4$		$2.0 \cdot 10^4$		$8.4 \cdot 10^3$

8.2

Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, 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 passiven Dosimetern (ThermolumineszenzDosimeter, TLD, und Environmental Direct Ion Storage-Dosimeter, EDIS) in der Umgebung sowie am Arealzaun überwacht. Zusätzlich dazu führt das ENSI vierteljährlich stichprobenweise Dosisleistungsmessungen am Arealzaun sowie bei Bedarf spezielle Messkampagnen durch. In der Umgebung der Kernanlagen wurden dabei keine signifikanten Erhöhungen der Ortsdosis festgestellt, welche durch den Betrieb der Anlagen verursacht wurde.

Ergebnisse 2017

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

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen etwa 0.08 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.2 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 1.1 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 etwa 0.8 mSv.

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.14 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.7 mSv pro Jahr. Die höchste, mit den TLD am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Abzug des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) beträgt 0.7 mSv.

8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

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 0.3 mSv ohne natürlichen Untergrund. Im Jahr 2017 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert ca. 0.24 mSv (ohne natürlichen Untergrund von ca. 0.6 mSv).

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

Beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) konnte weder aus den stichprobenweise durchgeföhrten Dosisleistungsmessungen noch aufgrund der am Zaun positionierten TLD eine signifikante Erhöhung der Ortsdosisleistung festgestellt werden.

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 von allen Anlagen eingehalten.

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

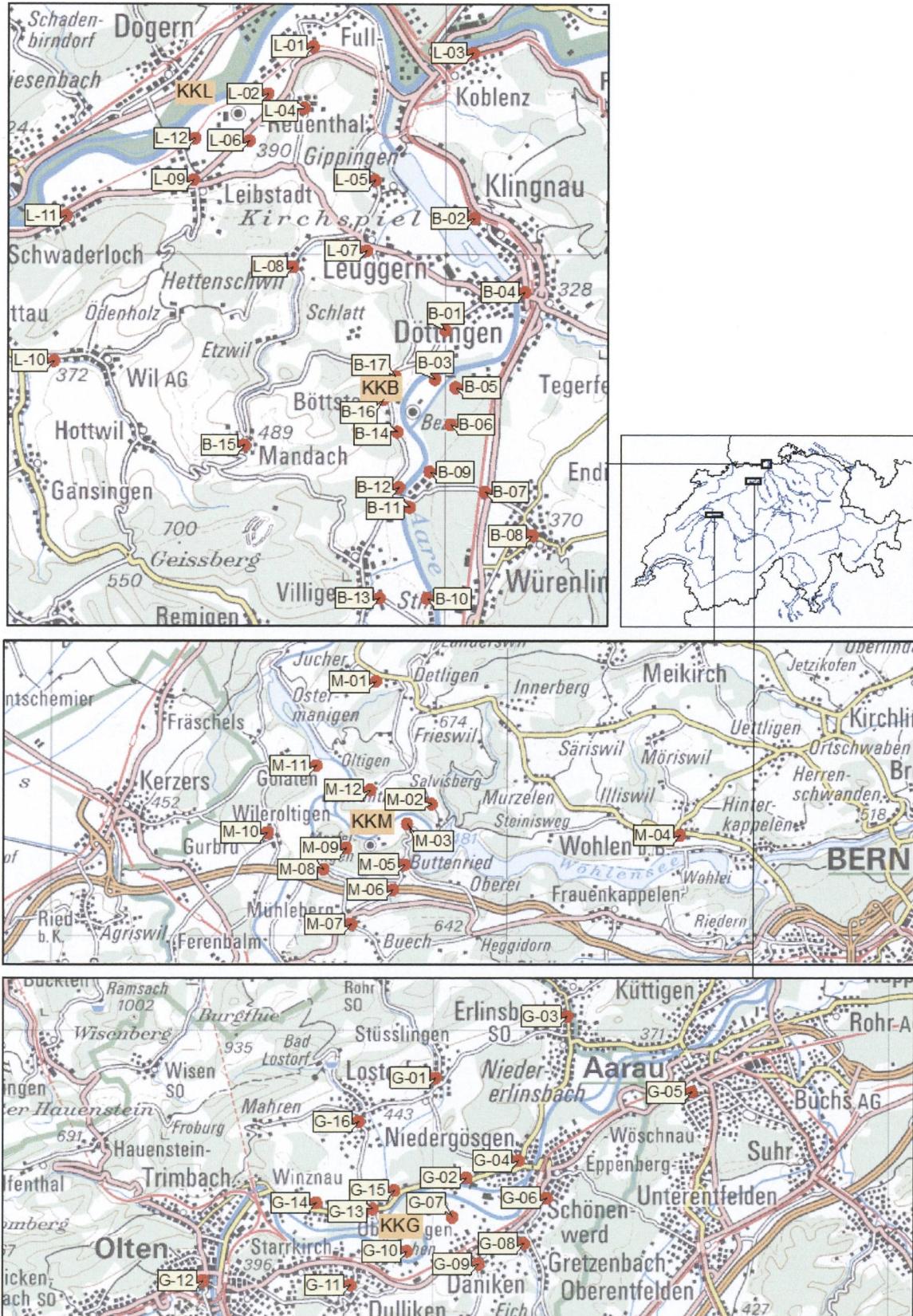
Das MADUK-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und gegenüber der Öffentlichkeit. Ebenso ermöglicht es das Erkennen von Betriebsstörungen und Unfällen, da Erhöhungen gegenüber den natürlichen Dosiswerten im ENSI automatisch angezeigt werden.

Die Messwerte lagen auch im Jahr 2017 im erwarteten Rahmen. Alle registrierten Erhöhungen waren bis auf eine Ausnahme auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Bei der Station G-05 wurden am 29. August erhöhte Werte registriert, die aufgrund des Werteverlaufs auf ein Testmuster bei Durchstrahlungsprüfungen schliessen liessen. Abklärungen bei der SUVA zu möglichen Durchstrahlungsprüfungen im fraglichen Gebiet lieferten kein Ergebnis.

Übersicht

Das MADUK-System 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. Erhöhungen gegenüber den natürlichen Dosisleistungswerten werden im ENSI automatisch angezeigt. Bei einem Störfall unterstützt MADUK die Notfallorganisation bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 71 Messstationen zählen kann. Die Geiger-Müller-Zählrohre in den Sonden ermitteln die Gamma-Dosisleistung im Messbereich von 10 nSv/h (Niederdosiszählrohre) bis 10 Sv/h (Hochdosiszählrohr). Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Des Weiteren sorgen verschiedene Subsysteme für den Datenaustausch mit den externen und internen Partnern (Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM und JRODOS/LASAT im ENSI). Die Figur 1 zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.



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

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

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahr 2017 wurde die Hardware der Überwachungs- und Alarmierungsrechner ersetzt und das Betriebs- sowie das Datenbanksystem auf den aktuellen Stand gebracht. Zudem wurde die Alarmierung auf eine neue Plattform migriert, da die analoge Telefonie in Kürze ausser Betrieb genommen wird. Im Weiteren wurde eine Auslegeordnung bei den Tools für Kartendarstellungen in der MADUK-Applikation vorgenommen, um die Strategie für die künftige Entwicklung der Bedienoberfläche festzulegen.

Systemverfügbarkeit und Störungen

Die Systemverfügbarkeit ist bei MADUK von besonderer Bedeutung, da das System eine kontinuierliche Überwachung gewährleisten muss, die auch von der Öffentlichkeit wahrgenommen wird. Mit der Kenngrösse «Systemverfügbarkeit» wird die Einsatztauglichkeit des Gesamtsystems MADUK beurteilt: Systemstörungen, die zu wesentlichen Nutzungseinschränkungen des Systems geführt haben, werden als Ausfallzeit in Stunden erfasst.

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

Station	Störungs-dauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
B-01	4.5	4.5	Blockierter Datenlogger
B-17	12.0	12.0	Blockierter Datenlogger
M-10	91.8	91.8	Blockierter Datenlogger
B-15	1.1	1.1	Blockierter Datenlogger
L-01	68.0	68.0	Defekte Messsonde
B-15	18.8	18.8	Defekte Speicherkarte
G-03	1.3	1.3	Blockierter Datenlogger
B-01	2.0	2.0	Blockierter Datenlogger
B-15	1.5	1.5	Blockierter Datenlogger
B-07	2.7	2.7	Blockierter Datenlogger
M-05	2.2	2.2	Blockierter Datenlogger
G-07	7.3	7.3	Blockierter Datenlogger
B-04	2.0	2.0	Ersatz Akku
L-06	7.7	7.7	Blockierter Datenlogger
L-09	22.3	22.3	Defektes Kabel zwischen Sonde und Datenlogger
L-09	1.3	1.3	Blockierter Datenlogger
L-06	64.2	64.2	Defekte Messsonde
G-14	1.2	1.2	Blockierter Datenlogger

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Störungen an den Messstationen mit Störungsdauer, permanentem Datenverlust und Ursache der Störung. Die Störungen mit einer Dauer länger als einen Tag waren jeweils am Wochenende zu verzeichnen. Die Störungsbehebung erfolgte jeweils zum frühesten möglichen Zeitpunkt.

Die Stationselektronik lief auch im 2017 grösstenteils zuverlässig. Es wurde wie bereits im Jahr 2016 festgestellt, dass nach kurzen Kommunikationsunterbrüchen Datenlogger blockierten.

2017 waren wiederum diverse Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen von insgesamt 79.3 Stunden zu verzeichnen, deren Ursachen nicht immer festgestellt werden konnten. Bei der Station M-11 führte eine defekte Kommunikationsleitung zu einem Unterbruch von 353.2 Stunden. Bei allen Kommunikationsstörungen konnten die Daten nachträglich lückenlos archiviert werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.5 %. Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.94 %.

Qualitätssicherung

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

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJP über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Messverhalten der Sonden wird zwischen den Eichungen mit halbjährlichen Funktionstests geprüft. Bei den Funktionstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer ^{137}Cs -Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten produziert und mit Sollwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunktionskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellwerten benutzt. Im Jahr 2017 wurden eine Funktionsprüfung und eine Feldeichung der Messsonden durchgeführt. Bei der Funktionsprüfung erfüllten alle Sonden die Prüfkriterien. Bei der Feldeichung konnten alle Messsonden geeicht werden.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme wurden auch im Jahr 2017 Messungen mittels in-situ-Gamma-Spektrometrie bei den Sonden der Messringe Gösgen und Leibstadt durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre. Ausser ^{137}Cs vom Fallout der Atombombentests und des Tschernobyl-Unfalls konnten keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen werden.

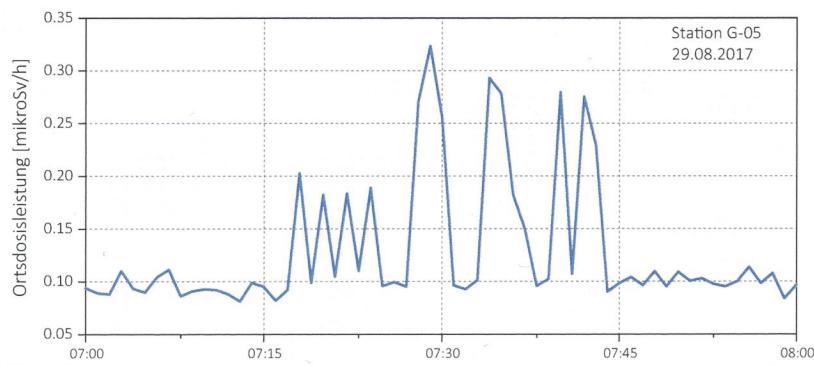
Messergebnisse

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

Am 7. April wurde im Rahmen der Funktionsprüfung an der Station L-09 mit einem Prüfstrahler die Station nicht rechtzeitig in den Testmodus geschaltet. Dadurch gelang um 11:30 Uhr ein durch den Prüfstrahler verursachter Messwert (Ortsdosisisleistung: 1'392 nSv/h; Nettodosisisleistung: 1'282 nSv/h) in die zentrale Verarbeitung und wurde auf dem Internet publiziert. Schliesslich wurde der Status des Messwertes in der Zentrale manuell als Testwert gekennzeichnet. Der Messwert auf dem Internet wurde belassen.

Bei der Feldeichung wurde aufgrund einer Verwechslung die falsche Messstation in den Testmodus gesetzt. Dadurch gelangte am 25. August um 09:10 für die Messstation B-12 ein erhöhter Messwert von 1'382 nSv/h ohne Teststatus in die zentrale Verarbeitung und löste einen Alarm aus. Zudem wurde der Wert ebenfalls auf dem Internet publiziert. Schliesslich wurde der Status des Messwertes in der Zentrale manuell als Testwert gekennzeichnet. Der Messwert auf dem Internet wurde belassen.

Am 29. August wurde an der Station G-05 von 07:30 bis 07:50 Uhr der Nettodosisisleistungsschwellwert von 50 nSv/h überschritten. Die maximale Nettodosisisleistung betrug 68 nSv/h, die maximale Ortsdosisisleistung 165 nSv/h. In der betreffenden Zeit wurde kein Niederschlag in der Region registriert. Die Analyse der 1-Minuten-Messwerte im entsprechenden Zeitraum zeigte kurzzeitige Ortsdosisisleistungsspitzen bis über 300 nSv/h (Figur 2). Die Regelmässigkeit der Spitzen lässt auf ein Testmuster schliessen. Abklärungen bei der SUVA betreffs Durchstrahlungsprüfungen im entsprechenden Zeitraum und im entsprechenden Gebiet blieben ohne Ergebnis.



Figur 2:
Verlauf der 1-Minuten-Messwerte an der Station G-05

Die jährliche Überprüfungskampagne der NADAM Sonden der NAZ an den Standorten, an denen auch eine MADUK-Station in Betrieb ist, führte 2017 bei keiner MADUK-Sonde zu wesentlichen Erhöhungen der Messwerte.

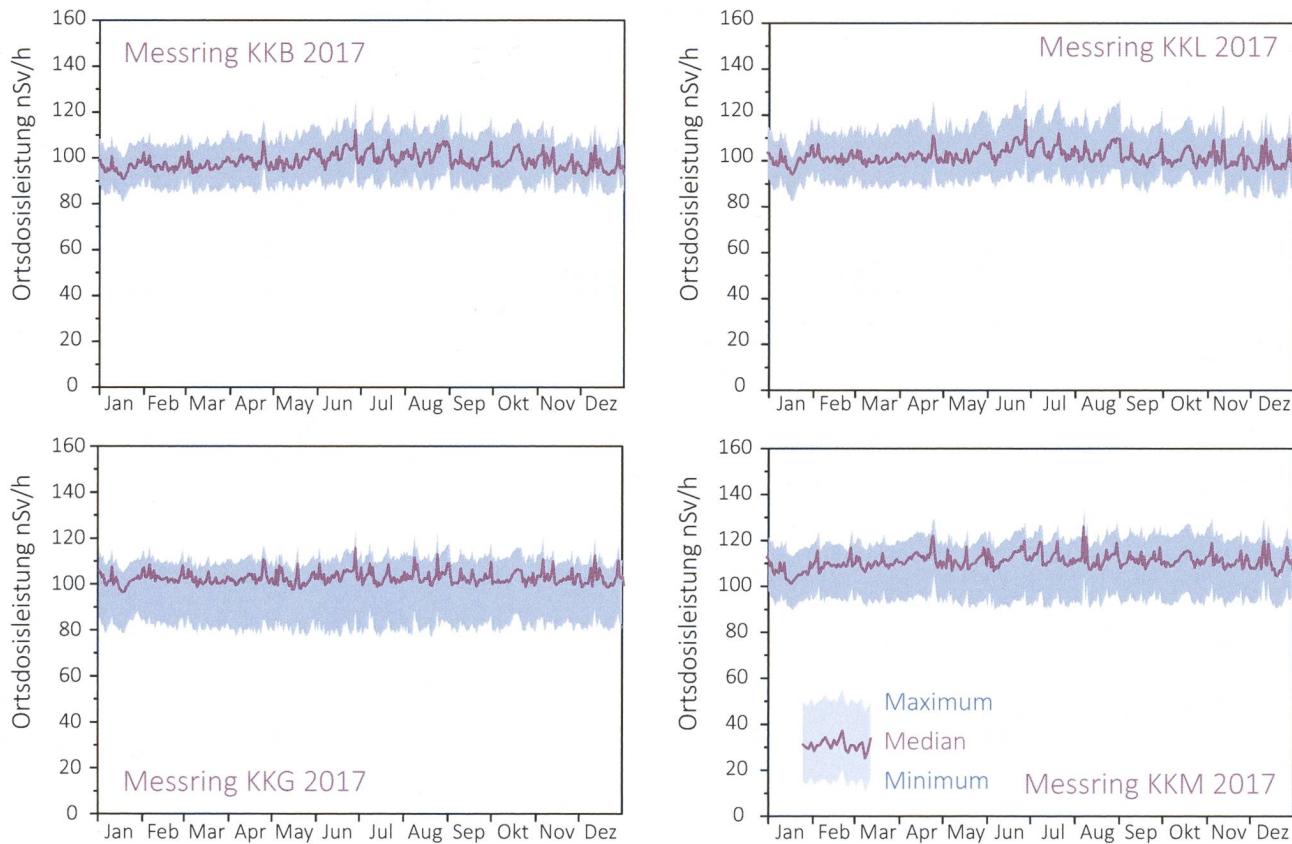
In der Tabelle 2 sind mit Ausnahme des oben erwähnten Ereignisses bei der Sonde G-05 alle Ereignisse aufgelistet, bei denen der Nettodosisleistungsschwellwert von 50 nSv/h überschritten wurde. Die registrierten Erhöhungen waren auf lokal begrenzte Starkreagen und deren Washout-Effekte zurückzuführen. Ein Zusammenhang mit dem Betriebsverhalten der Kernanlagen konnte nicht hergestellt werden.

Tabelle 2:

Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2017.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
03.04.2017 17:30	G-06	1.0	70	189
03.04.2017 17:40	G-08	0.7	50	165
01.06.2017 21:40	L-10	0.7	63	181
02.08.2017 02:20	B-01	0.3	54	163
02.08.2017 02:20	B-02	0.2	53	153
02.08.2017 02:20	B-04	0.2	61	161

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



Figur 3:

Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2017.

8.4

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

M. Jäggi, P. Kramer, I. Zumsteg, H. Hauswirth, M. Rüthi, J. Eikenberg, M. Heule

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. Die Staubfangplatten sind mit Vaseline beschichtet und werden γ -spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie ^{241}Am und ^{137}Cs sowie natürliche Radionuklide wie ^7Be , ^{210}Pb gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der γ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung von α - und β -Strahlern (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm und ^{131}I). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 10 - 40 Bq/kg (2016 - 2017). Diese Abnahmen sind mit dem radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von ^{137}Cs beträgt 30.17 Jahre) und mit einer begrenzten Aufenthaltszeit in der oberen Bodenschicht zu erklären. Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope ^{90}Sr und $^{239+240}\text{Pu}$ sind ähnlich signifikant, zumal diese Radionuklide schon sehr viel früher (Beginn der 60iger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts) als Fallout der A-Bombentest in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf 1 - 2 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.2 - 0.8 Bq/kg im Jahr 2017. 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 Aktinide den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 20 - 30 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 250 und 350 Bq/kg gemessen.

Einleitung

Das Zwischenlager (ZWILAG AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut 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 und ^{131}I) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von oberirdi-

schen Kernwaffentests der 60er Jahre und der Chernobyl-Reaktorkatastrophe im Jahr 1986. Seit der Durchführung dieser Studie zur Beweissicherung werden im Routinebetrieb einmal jährlich an 4 Erhebungsorten Waldbodenproben aus der oberen Schicht (0 - 5 cm) erhoben und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades wurden zusätzlich 4 Staubfangplatten an der Umzäunung des ZWILAG angebracht. Diese Platten werden monatlich ausgewechselt und mit der Methode der hochauflösenden Gamma-Spektrometrie auf Photonemittierende Radioisotope wie ^{241}Am , ^{137}Cs und ^{131}I gemessen.

Radiochemische Trennmethoden (Boden)

Nach der Probenerhebung werden die Bodenproben zunächst getrocknet, gesiebt und in Aliquote von je ca. 30 g aufgeteilt. Vor der Analyse werden ^{243}Am - und ^{242}Pu -Tracer hinzugegeben. Nach der Nass- und Trockenveraschung wird die Probe in 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 (Oxidationsmittel) beim Auslaugen, liegt das Plutonium vorwiegend als Pu^{4+} vor. Die Lösung, welche die Fraktionen von Pu, Am und Cm, aber auch U und Th enthält, wird sodann von der festen Phase über Filtration getrennt.

Diese Leach-Lösung wird 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/TEVA™-Kolonne zur Retention von U und Th und einer DGA™-Kolonne, die Am und Cm absorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach-salzauren NaNO_2 Lösung. Da Am in sehr geringer Konzentration vorliegt, ist ein weiterer Purifikationsschritt, die Trennung von den Lanthanoiden, mit einer TEVA-Säule notwendig. Die Fraktionen von Pu bzw. Am+Cm werden anschliessend eingedampft, 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 Oxalatfällung auf einer Sr-Resin-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 Flüssigszintillations-Spektrometer gemessen.

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 .



Figur 1:
Staubfangplatte am Lorbeerbusch

Niederschlag

In einem 14-tägigen Turnus wird das in diesem Zeitraum anfallende Niederschlagswasser aus dem Niederschlagssammler beim ZWILAG-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10 ml dieser Wasserproben werden für die Tritium-Messung verwendet und grossvolumige Monatsmischproben (ideal 6 Liter) werden für die Langzeit Gamma-Spektrometrie genommen. Gemessen werden anthropogene Radionuklide, wie ^{137}Cs für welches bei den Langzeitmessungen über 2 Tage Nachweigrenzen 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 ^{131}I) und natürlichen terrestrischen Isotope aus den U- und Th-Zerfallsreihen (^{226}Ra , ^{228}Ra) zusammengefasst.

Dargestellt ist der Streubereich der Probenmessungen aus den 4 Bodenentnahmestellen um das ZWILAG-Areal. Die Aktivitäten sind über die Zeit äusserst stabil und liegen auf sehr tiefem Niveau. Die Aktivitäten gewisser Nuklide liegen tiefer als die Nachweisgrenze des verwendeten Messverfahrens. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ liegen derzeit zwischen 0.2 und 0.8 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.1 und 0.3 Bq/kg. In Spuren ist noch ^{238}Pu nachweisbar (0.01 - 0.03 Bq/kg), während die Werte für das Spaltprodukt ^{90}Sr etwas höher sind (<1 - 2 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für ^{137}Cs (10 - 50 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der Beitrag von Fallout-Caesium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall. Über die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (im Mittel 0.4) und $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (0.03 ± 0.01) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen 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, primoriales ^{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 und im säkularen Gleichgewicht mit ihren langlebigen Mutternukliden stehen. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für ^{238}U 2 - 3 ppm und für ^{232}Th 5 - 9 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

Weniger aufwändig ist die Auswertung der Staubfangplatten. Mit der monatlichen Kontrolle ist praktisch eine kontinuierliche Überwachung möglich. Seit Beginn der Probennahme lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unter den Nachweissgrenzen von 0.2 bzw. 0.3 Bq/m². Die tiefe Nachweissgrenze für ^{241}Am von 0.4 Bq/m² ergibt sich aufgrund der Verwendung eines hochauflösenden Gamma-Spektrometers mit Be-Eintrittsfenster.

Bei den Regenwasserproben werden typischerweise ^3H -Aktivitäts-Konzentrationen von 1 - 12 Bq/Liter nachgewiesen, mit der Gammaspektrometrie konnten seit 1997 noch nie anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs oder ^{131}I nachgewiesen werden. Die Nachweissgrenze dieser Radionuklide liegt jeweils bei 0.03 Bq/Liter.

Tabelle 1:

Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten Jahre (2013- 2017) in Bodenproben Umgebung ZWILAG. Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2013	2014	2015	2016	2017
^{90}Sr	1 - 3	1 - 3	1 - 3	<1 - 2	<1 - 2
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs ⁽¹⁾	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	20 - 60	20 - 60	10 - 60	10 - 50	10 - 50
^{238}Pu	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.2 - 0.7	0.1 - 0.7	0.1 - 0.7	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
^{226}Ra	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30
^{228}Ra	20 - 40	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 2013-2017 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 nicht mehr nachgewiesen werden.

Literaturliste

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

8.5

Les installations nucléaires et l'environnement

S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller, P. Steinmann
Section radioactivité dans l'environnement, URA / OFSP, 3003 Berne

Résumé

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

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

Introduction

Dans le but de préserver la santé de l'homme et l'environnement au voisinage des centrales nucléaires, l'OFSP poursuit depuis de longues années un programme spécifique de prélèvements d'échantillons et de mesures de la radioactivité. Celui-ci commence au terme source, par des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, l'IFSN et l'OFSP sur divers échantillons en phase de rejet (filtres à aérosols, à 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 et ^{85}Kr) et du LUBW (Baden-Württemberg), conformément au programme germano-suisse autour de la centrale nucléaire de Leibstadt. L'IFSN met également à disposition de l'OFSP un accès direct à son réseau MADUK, mesurant en continu le débit de dose ambiante au voisinage des centrales nucléaires. L'OFSP se doit ensuite de procéder à l'examen critique de l'ensemble de ces données pour évaluer de manière pertinente l'influence des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce programme de surveillance des immissions au voisinage des installations nucléaires. Le tableau 1 indique les chapitres à consulter pour accéder aux résultats plus détaillés relatifs à un compartiment de l'environnement particulier ou un radionucléide spécifique.

Les immissions des centrales nucléaires étant parfois difficilement mesurables dans l'environnement, l'estimation de la dose au public repose avant tout sur les calculs effectués à partir des émissions des installations (voir chapitre 8.1). En effet, les niveaux de radioactivité à la source permettent une détection plus aisée et plus exhaustive des radionucléides rejetés. Leur impact sur l'environnement et l'homme est ensuite déterminé sur la base de modèles de transfert, basés sur des hypothèses conservatrices. En complément, les mesures dans l'environnement servent à vérifier ces modèles et à établir un bilan local réaliste de la radioactivité naturelle et artificielle.

Méthodologie

Dans le cas d'un suivi de l'environnement, deux aspects peuvent être pris en compte : l'un radioécologique qui consiste à rechercher les meilleurs indicateurs de la contamination du milieu et l'autre dosimétrique, qui met l'accent sur ce qui peut contribuer aux doses de la population. La surveillance des installations nucléaires s'oriente sur ces deux aspects. Les méthodes de prélèvement et de traitement sont prescrites de manière à assurer une reproductibilité et à viser à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à très bas niveaux.

Résultats

Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que les 4 centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (KKB 1 et 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2017 (voir Chap. 8.1).

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population avoisinante en termes de doses. La centrale nucléaire de Mühleberg avait rejeté des poussières radioactives dans l'atmosphère de manière incontrôlée en septembre 1986. A partir des mesures de terre et d'herbe effectuées par la suite par la commission fédérale de surveillance de la radioactivité de

Tableau 1

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

Milieu/Isotope	Chapitre
Exposition ambiante	8.2 - 8.3
Air/Aérosols (émetteurs γ)	4.1
Précipitations (γ , ^{3}H)	4.1
Milieu aquatique	4.5
Mesures in situ	3.1
Sol et herbe (γ , ^{90}Sr)	4.9
Sol (Pu, ^{241}Am)	7.2
^{14}C dans les feuillages	7.1
Denrées alimentaires	5

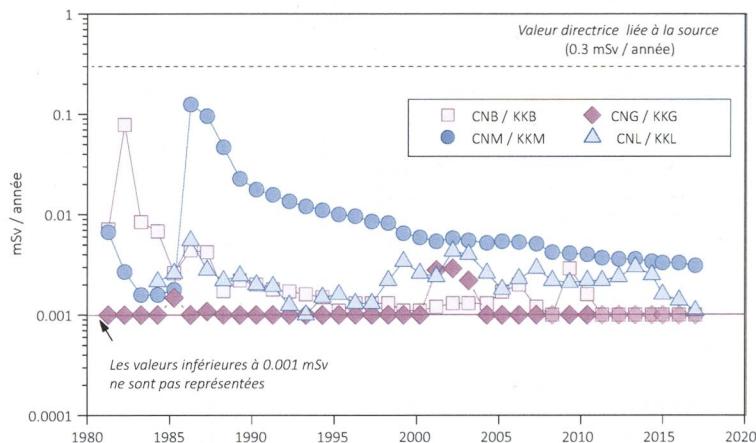


Figure 1:

Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2017 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

l'époque, l'activité rejetée avait pu être estimée à 11 GBq (50% de ^{134}Cs , 40% de ^{137}Cs , 7% de ^{60}Co et quelques 3% de ^{65}Zn) et donc inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. En tenant compte des rejets des années précédentes, les doses dues aux émissions se sont échelonnées en 2017 entre <0.001 mSv pour KKB et KKG, env. 0.002 mSv pour KKL et env. 0.004 pour KKM. Pour ces dernières, la contribution majeure provient des rejets atmosphériques: essentiellement du ^{14}C pour Leibstadt, avec à Mühleberg une contribution rémanente des résines rejetées en 1986. Comme le montre la figure 1, l'impact de ce rejet très localisé a constamment diminué depuis. Notons que les résultats des 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).

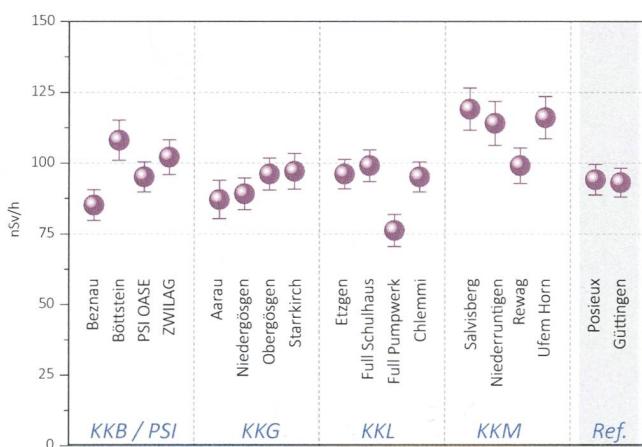


Figure 2:

Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2017 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Göttingen 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 réacteurs à eaux bouillantes, à savoir, Leibstadt et Mühleberg, ainsi que, dans une moindre mesure, au PSI (voir Chapitre 8.2). A Mühleberg, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation de la dose ambiante annuelle de 0.8 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel qui s'élève à 0.7 mSv/an). La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint 0.7 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 respectée par toutes les installations en 2017. 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) de 1994 (encore en vigueur en 2017), 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, puisque le temps de séjour n'est pas considéré. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside pour de longue période en ces endroits.

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) de 1994 (encore en vigueur en 2017), 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, puisque le temps de séjour n'est pas considéré. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside 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 Göttingen, situées hors de leur influence. Il est intéressant de remarquer que les valeurs de débit de dose légèrement plus élevées mesurées aux environs de la centrale de Mühleberg sont dues à une concentration généralement plus élevée en ^{40}K (naturel) dans les sols de cette région (cf. Figure 3).

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 l'analyse des dépôts sur plaques de vaseline par l'exploitant.

Les résultats 2017 des mesures mensuelles des filtres aérosols des environs des centrales nucléaires suisses ainsi que du PSI ont montré la prédominance des radionucléides naturels ^{7}Be et ^{210}Pb , avec des valeurs comprises respectivement entre 1.5 et 5.6 et entre 0.2 et 2.7 mBq/m³ (mesures OFSP et PSI). Le seul radionucléide d'origine artificielle régulièrement détectés dans l'ensemble des stations est le

^{137}Cs (valeur maximale de $1.2 \pm 0.4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$), 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.

Aucun autre radionucléide d'origine artificielle n'a été décelé dans les filtres aérosols du voisinage des centrales nucléaires suisses en 2017. Toutefois des traces de ^{24}Na , radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15h) produit par exemple dans les accélérateurs de particules, ont sporadiquement été mesurées sur les filtres à grand débit de la station de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer. La concentration maximale mesurée s'élève à $101 \pm 37 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immissions dans l'air fixée dans l'ORAP à $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Les activités des émetteurs gamma d'origine artificielle dans les échantillons de pluie collectés aux environs des centrales nucléaires de Mühlberg, Leibstadt, Gösgen et Beznau ainsi que ceux du voisinage du PSI et du ZWILAG sont toutes restées inférieures aux limites de détection, qui se situe aux environs de 0.4 à 1 mBq/l par exemple pour le ^{137}Cs .

Les résultats des mesures du tritium (^3H) dans les échantillons mensuels de précipitations des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. Les concentrations de tritium mesurées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires, du PSI ainsi que du ZWILAG sont généralement restées proches des seuils de détection de 1 à 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs légèrement plus élevées, notamment au voisinage de KKB. La concentration maximale de ^3H enregistrée en 2017 dans les précipitations de cette station (27 Bq/l) n'a toutefois représenté que 0.2% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ORAP à 12'000 Bq/l pour le ^3H dans les eaux accessibles au public.

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C . Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2017 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse (voir chapitre 7.1), de 145 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. A noter que le prélèvement a été réalisé le 26.09.2017, soit environ une semaine après l'arrêt pour révision de la centrale, arrêt qui s'est finalement prolongé jusqu'à début 2018. Il est donc représentatif de la première partie de l'année, alors que la centrale de Leibstadt était en service. 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 déterminé par des mesures dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats enregistrés en 2017 pour les échantillons de sol et de plantes prélevés au voisinage des installations nucléaires montrent à nouveau que la radioactivité

Tableau 2:

Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2017.

Lieu	Valeur min/max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruttingen * (environs KKM)	< 2- 8.0	2.3
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2.0	< 2.0
Full (environs KKL) *	< 2- 2.1	< 2.0
Beznau (environs KKB) **	2.3 - 27	12.4
PSI **	1.7- 11.1	6.6
ZWILAG **	3.4 - 17.0	6.6

* mesures OFSP / ** mesures PSI

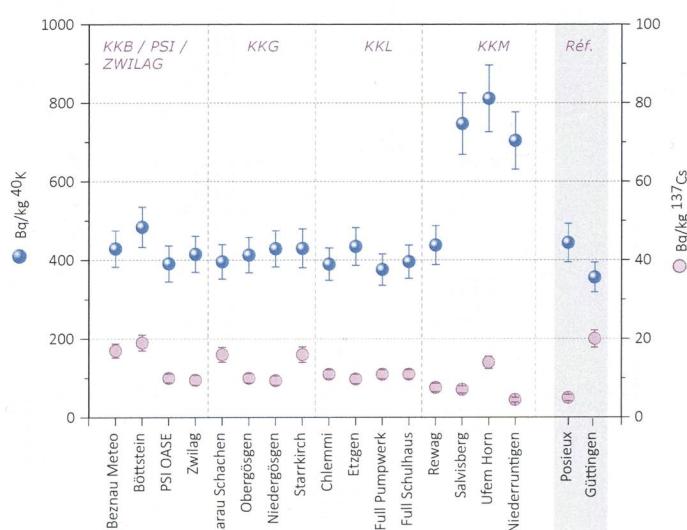


Figure 3:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2017 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

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 2017. Afin de caractériser les sites du point de vue des contributions individuelles à l'exposition externe du public, l'OFSP procède depuis les années 80 à des mesures par spectrométrie gamma in situ. Les résultats correspondants confirment les résultats précédents et montrent que les valeurs enregistrées au voisinage des installations nucléaires ne se distinguent pas de celles mesurées sur les sites de référence.

Afin de pouvoir évaluer l'impact radiologique éventuel des travaux de désaffectation de la centrale nucléaire de Mühleberg qui débuteront début 2020, un programme de mesures complémentaires a été initié en 2017 par l'IFSN et l'OFSP pour une durée de 3 ans. La situation radiologique au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est généralement bien connue étant donné que le site fait l'objet d'une surveillance régulière depuis le début de la période d'exploitation de la centrale. Toutefois, des radionucléides spéciaux, qui n'ont jamais ou sporadiquement été analysés dans les échantillons environnementaux en régime d'exploitation sont susceptibles d'être émis ou de devenir prépondérants au cours des travaux de désaffectation. Ce programme comprend donc l'analyse de radionucléides spéciaux (^{63}Ni , émetteurs alpha, ^3H) dans le milieu terrestre (sol, denrées alimentaires) et aquatique (sédiments), mais également des mesures in situ supplémentaires, sur des sites situés à proximité immédiate de la centrale. En effet, contrairement à un rejet éventuel par voie atmosphérique tel qu'il pourrait se produire en période d'exploitation, l'éventuel impact des travaux de désaffectation devrait être plus localisé dans un périmètre restreint. Les résultats de l'ensemble de ce programme de mesures « Point zéro Désaffectation » fera l'objet d'un rapport détaillé qui sera publié à l'issue des 3 ans de surveillance renforcée. Toutefois, les résultats des mesures in situ supplémentaires réalisées en 2017 sont déjà disponibles dans le présent rapport (voir chapitre 3.1).

Les denrées alimentaires constituent le prochain maillon susceptible de transférer les radionucléides jusqu'à l'homme. Les résultats des mesures de la radioactivité dans les aliments, coordonnées par l'OFSP en étroite collaboration avec les laboratoires cantonaux, n'ont pas révélé de marquage attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires. Les mesures additionnelles de l'OFSP, en particulier celles du programme germano-suisse au voisinage de Leibstadt dans les produits agricoles et les poissons ont confirmé ce constat, puisqu'aucun émetteur gamma d'origine artificielle, hormis des traces de ^{137}Cs attribuable à d'anciennes contaminations (valeurs voisines des limites de détection), n'a été décelé dans ces échantillons. Les résultats des mesures de ^{90}Sr effectuées par l'Institut de Radiophysique dans des échantillons de lait et de céréales prélevés au voisinage des centrales nucléaires ainsi que de fruits et légumes prélevés au voisinage de Leibstadt ne diffèrent pas de ceux enregistrés ailleurs sur le plateau suisse.

Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1 il y a une dizaine d'année, la majeure partie des produits d'activation tels que le ^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co était rejetée dans les eaux fluviales par la centrale de Mühleberg. Toutefois en 2016 et surtout en 2017, les activités rejetées (hors tritium) par la centrale nucléaire de Mühleberg ont été significativement plus faibles que par le passé, à tel point qu'elles ont été, en 2017, inférieures à celles rejetées par les centrales de Beznau et de Leibstadt. Ainsi, tout comme en 2016 et contrairement aux années précédentes, aucune trace de ^{54}Mn ou des isotopes du cobalt n'a pu être mise en évidence dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln. Il faut cependant préciser que les débits de l'Aar et du Rhin aux stations de surveillance ont été encore plus faibles en 2017 qu'en 2016. On notera finalement qu'en raison d'adaptations techniques de la station de surveillance (BAFU/METAS) de Hagneck, il n'a pas été possible de collecter des échantillons d'eaux de l'Aar dans cette station aux mois d'avril, septembre et octobre 2017. Par conséquent, les mesures des radionucléides pour les mêmes périodes sont manquantes.

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

Les concentrations mensuelles en ^{3}H enregistrées en 2017 dans les eaux de l'Aar à Brugg/AG ainsi que celles du Rhin prélevées près de Weil/D, en aval de Bâle, sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l à l'exception de la période avril-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen.

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

Les traces des rejets liquides, et en particulier de ^{54}Mn et de ^{60}Co ont pu être sporadiquement mises en évidence dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar à Hagneck ainsi qu'à Klingnau. Seul le ^{54}Mn est parfois mesurable dans les échantillons de sédiments prélevés à Pratteln. Contrairement aux années précédentes, aucune trace de ^{58}Co n'a été mise en évidence dans les échantillons de sédiments prélevés dans l'Aar et le Rhin en 2017. Les résultats obtenus dans le cadre de la surveillance des émetteurs gamma dans les sédiments reflètent la diminution significative des rejets dans le milieu aquatique par les centrales nucléaires, et en particulier par Mühleberg, en 2017.

Si le ^{137}Cs est également présent dans pratiquement tous les échantillons de sédiment de l'Aar (Hagneck et Klingnau) et du Rhin (Pratteln), il n'existe pas, pour les raisons citées plus haut, de corrélation générale avec les rejets des centrales nucléaires.

Comme chaque année, un échantillon de plantes aquatiques a été prélevé dans chacune des stations de surveillance en 2017: les échantillons prélevés en octobre à Hagneck et Klingnau ont présenté un faible marquage en ^{60}Co (1.6 Bq/kg et 4.1 Bq/kg resp.) ainsi qu'en ^{137}Cs (1.8 Bq/kg, resp. 3.5 Bq/kg) alors que seul du ^{137}Cs (6.3 Bq/kg) a pu être mesuré dans l'échantillon de plantes aquatiques prélevés à Pratteln.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval de KKM, KKB et KKL en 2017 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma 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)

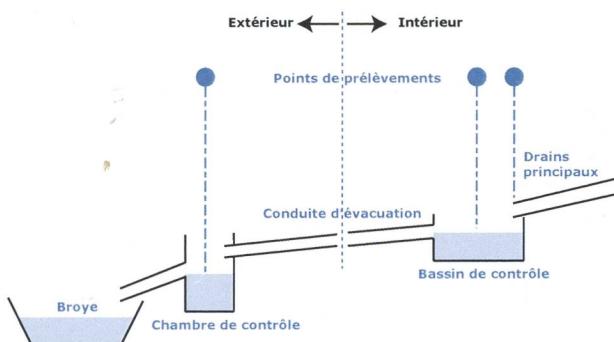


Figure 5:
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

par un membre du personnel du dépôt de conservation des objets culturels du Canton de Vaud, qui occupe maintenant l'ancienne caverne des machines.

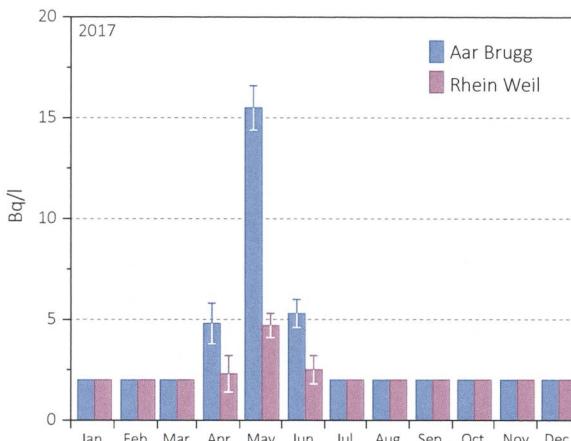


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2017.

La surveillance du site de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens effectuée par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP comprend la mesure de la radioactivité (émetteurs gamma, tritium (^{3}H) et ^{90}Sr) dans les eaux provenant du bassin de contrôle (BdC) et de la chambre de contrôle (CdC). Le bassin de contrôle est un bassin de collecte dans lequel sont réunies les eaux de drainage provenant des 9 drains principaux du système de drainage; la chambre de contrôle est située juste avant le rejet dans la Broye (voir Figure 5).

Les prélèvements sont effectués à l'aide de collecteurs automatiques et envoyés à l'IRA

En 2017, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4 h aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyé à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2017. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.2 à 0.4 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^3H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2017 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 8.3 ± 0.9 Bq/l et 7.8 ± 0.9 Bq/l respectivement. Ces valeurs sont en constantes diminutions depuis le début de la surveillance en 2001 (excepté les valeurs ponctuellement plus élevées enregistrées fin 2011 et début 2012 et qui avaient nécessité la mise en place d'un programme spécifique), ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive (demi-vie du tritium = 12.32 ans).

Pour la mesure du ^{90}Sr , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Aucune activité supérieure à la limite de détection de 8 mBq/l n'a été mise en évidence en 2017.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2017.

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

CERN - Rejets et environnement (Mesures CERN)

F. Malacrida et P. Vojtyla

CERN - Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE), 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, pour 2017, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose effective délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.014 mSv, soit 5% de la limite. Les concentrations de radionucléides sont restées inférieures à 3% de la limite d'exemption [2] dans tous les échantillons environnementaux. De fait, le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN demeure très faible.

Le CERN

Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Le CERN a son siège à Genève et ses installations sont situées d'un côté et de l'autre de la frontière franco-suisse.

Il a pour mission la recherche fondamentale en physique des particules afin de découvrir les constituants et lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière: les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la nature. Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent les résultats de ces collisions.

La Figure 1 présente le complexe des accélérateurs du CERN de manière schématique. Pour un complément d'information, se référer au site web du CERN www.cern.ch.

CERN's Accelerator Complex

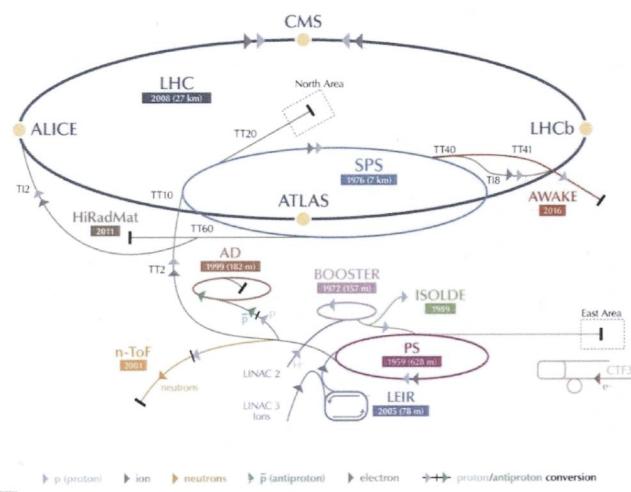


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire en fin de chapitre).

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 de faibles quantités de substances radioactives. Conséquemment, le rayonnement diffusé, la radioactivité dans les rejets gazeux et dans 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 radionucléides produits sont principalement des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités. Pour plus d'information, se référer au site : voisins.web.cern.ch/fr/radiation.

Lorsque les accélérateurs sont arrêtés, l'émission atmosphérique de gaz de demi-vies courtes et le rayonnement diffusé cessent. Néanmoins, les composantes des tunnels, des machines, des cibles et des détecteurs restent sensiblement marquées par leur exposition au faisceau; ceux-ci contiennent des radionucléides produits par activation. L'eau d'infiltration des tunnels peut donc toujours potentiellement se charger en radionucléides lors de sa percolation, avant d'être évacuée vers les eaux de surface. De la même manière, des traces de radionucléides peuvent être mesurées dans l'air, lorsque par exemple le tritium dégaze des composantes précitées. L'installation ISOLDE peut par ailleurs continuer d'émettre des petites quantités d'iode ou de gaz radioactifs. Ces derniers sont provisoirement stockés dans des cuves en vue de leur décroissance avant rejet et seule une fraction des quantités initialement récoltées sont émises.

Programme de surveillance

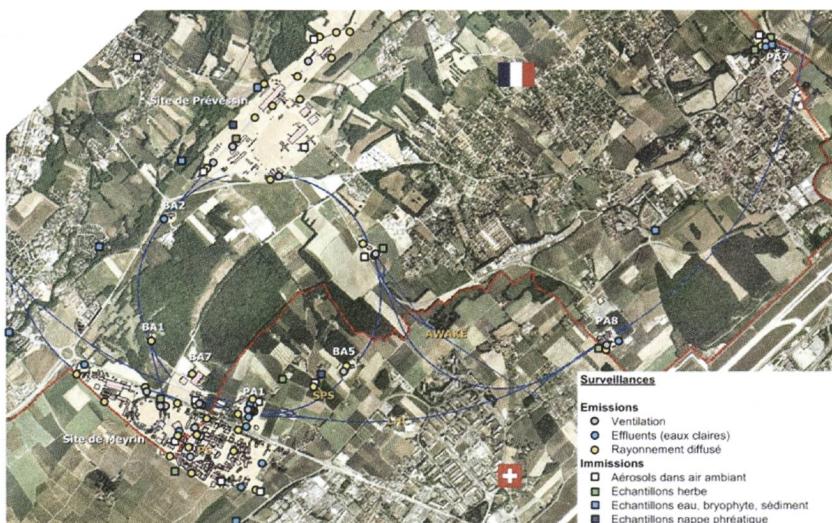


Figure 2:
Région frontalière franco-suisse : sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS) et du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonage du CERN ; ceux qui concernent le territoire suisse y sont tous représentés, excepté le point de collecte des échantillons dans la rivière l'Allondon qui est hors carte.

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnemental, qui est élaboré en tenant compte des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance du rayonnement diffusé se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou 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 2017, 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 2017, 40 stations étaient en opération. De manière similaire, les points de rejet des eaux claires qui sont déversées dans les eaux de surfaces (rivière) sont équipés de stations de surveillance de la radioactivité de l'eau (13 stations en 2017); les eaux claires incluent les eaux de refroidissement des circuits secondaires, les eaux d'infiltration des tunnels et les eaux météoriques. Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vies courtes et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire. Deux stations contrôlent indépendamment les eaux de refroidissement et d'infiltration du SPS et du LHC.

Les niveaux de rayonnement diffusé mesurés ainsi que le bilan des rejets vers l'atmosphère et les cours d'eau sont utilisés pour quantifier l'impact dosimétrique, par le biais de modèles environnementaux et radiologiques reconnus [3, 4]. La surveillance des émissions est complétée par la surveillance des immissions, qui est un processus impliquant la collecte d'échantillons environnementaux et leur analyse en laboratoire. Les résultats doivent corrélérer avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont adéquats. Cette surveillance implique également un échantillonnage en continu des aérosols 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 p. ex. blé, graines de tournesol, asperges et vin.

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

Résultats 2017

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2017

L'opération des machines a redémarré à partir de début avril et a duré jusqu'à mi-décembre. Toutes les installations étaient en fonctionnement.

Rayonnement diffusé

La principale source de rayonnement diffusé sur le site de Meyrin est le complexe du PS. Une petite fraction des neutrons produits dans les accélérateurs peut diffuser à travers le blindage, gagner en hauteur, puis, en interagissant avec les composants de l'air, être redirigés vers le sol. C'est le phénomène dit du skyshine et le public résidant de manière permanente aux abords des barrières du site peut être exposé à ce rayonnement. La figure 3 présente les doses équivalentes ambiantes telles que mesurées par les moniteurs de rayonnement diffusé localisés aux abords des sites situés en Suisse.

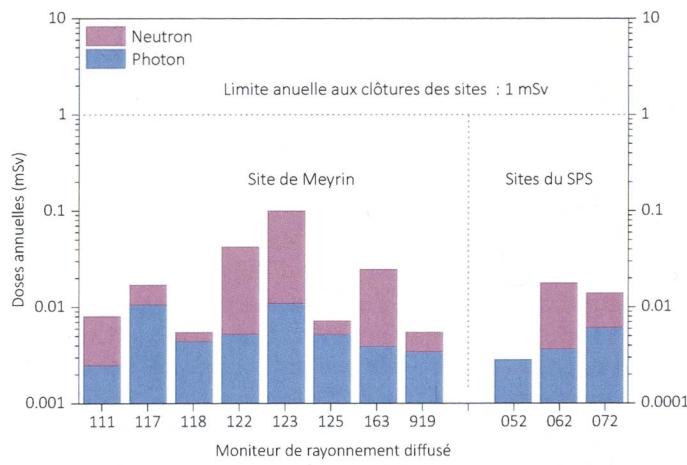


Figure 3:
Equivalent de dose ambiant annuel net enregistré par les moniteurs de rayonnement diffusé (CERN, 2017).

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère qui concernent le territoire suisse sont résumés au Tableau 1. Dû à la faible hauteur des cheminées ainsi qu'aux courtes demi-vies des radionucléides émis, l'impact reste local et est minime. Les radionucléides se répartissent en quatre catégories: les gaz radioactifs de demi-vie courtes (^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O et ^{41}Ar ; le ^{7}Be ; l'activité bêta total (majoritairement ^{32}P et ^{33}P) et le tritium (^{3}H).

Tableau 1:
Rejets radioactifs dans l'air (CERN, 2017).

Origine du rejet	Station(s)	Air rejeté	^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , ^{41}Ar	^{7}Be aérosol	Bêta aérosol	Tritium
		10^6 m^3	TBq	MBq	MBq	GBq
LINAC 4	VMS180	29	< 0.001	< LD	< LD	< LD
PS BOOSTER	VMS175	152	0.4	20	0.5	1.7
ISOLDE via MEDICIS*	VMS169	70	< 0.001	0.009	<0.001	0.1
ISOLDE	VMS170	34	6.2	21	0.3	15
Anneau principal PS	VMS176 VMS177 VMS178 VMS179	530	1.8	<LD	< LD	6.1
TT70 transfert PS-SPS	VMS173	69	0.2	0.004	< LD	3.5
n-TOF	VMS171	0.5	7.1	1.5	<0.001	57
East Area	VMS181	11	2.0	27	0.8	0.3
Evaporation tritium	NA**	3	<LD	<LD	< LD	9.4
TT10 injection PS-SPS	VMS011	275	2.1	39	1.4	9.2
SPS BA5	VMS051	396	0.5	<LD	< LD	2.0
HIRADMAT	VMS070	22	0.007	<LD	< LD	3.9
LHC Machine Secteurs 2->1, 8->1	VMS901	429	2.4	<LD	0.007	<LD
LHC Experiment ATLAS	VMS911 VMS912 VMS913 VMS914	157	0.009	<LD	<LD	<LD

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

** L'eau est analysée en laboratoire avant son évaporation.

Outre ces radionucléides, les expériences ISOLDE et n-TOF produisent également des petites quantités d'iode radioactif ($^{120}, 121, 123, 124, 125, 126, 131, 133\text{I}$), résultat de l'irradiation par des protons de cibles lourdes. Les quantités rejetées en 2017 sont de respectivement 362 et 107 MBq, (ne figurent pas en Tableau 1), induisant une dose au groupe de référence (personnes les plus exposées au voisinage de l'installation) de 0.0002 et 0.000003 mSv. ISOLDE a rejeté de très faibles quantités de gaz (Xe, Kr), d'iode et de tritium sous forme gazeuse via la cheminée de l'installation MEDICIS. Ces rejets sont induits par la vidange des réservoirs de stockage du gaz provenant des systèmes du vide.

Une fraction de l'eau d'infiltration des tunnels est collectée dans des cuves et est ensuite évaporée depuis le site de Meyrin (référencé sous «évaporation tritium» en Tableau 1).

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 quatre catégories :

- le tritium sous forme aqueuse (HTO),
- l'activité bêta totale imputable en grande majorité au ^{22}Na ,
- les rejets d'émetteurs de positrons de demi-vie courte (^{11}C , ^{13}N , $^{14,15}\text{O}$) et
- le ^{24}Na avec une demi-vie de 15 heures.

Le Tableau 2 présente les rejets de 2017, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés. L'indice bêta global résiduel, c'est-à-dire corrigé pour la présence de ^{40}K naturel dans l'eau, est attribué au ^{22}Na exclusivement. Par conséquent, les rejets déclarés en bêta/gamma (^{22}Na) sont surestimés car une fraction ou la totalité de l'indice bêta global résiduel est en réalité induit par des radionucléides d'origines naturelles (p. ex. descendants de l'uranium).

Tableau 2:

Rejets radioactifs dans les cours d'eau (CERN, 2017).

Origine du rejet	Station	Quantité d'eau	Tritium	Bêta/gamma (^{22}Na)	$^{11}\text{C}, ^{13}\text{N}, ^{14,15}\text{O}$	^{24}Na	Rejeté dans:
		10^6 m^3	GBq	MBq	GBq	GBq	
Site de Prévessin, SPS	WMS021	0.22	39	49	1.9	0.31	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	WMS101	1.1	1.4	13	<LD	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	WMS103	0.13	0.6	2.6	<LD	<LD	Le Lion (F)
AD infiltration	WS104	0.03	0.01	1.3	<LD	<LD	STEP*
Site SPS BA6 + site LHC PA1	WMS910	0.7	0.4	15	3.5	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	WMS970	0.005	0.03	0.04	n.m.**	n.m.**	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS**, rejet par le site du LHC PA8	WMS980	0.09	0.6	1.1	<LD	<LD	Le Nant (F)

* Station d'épuration d'eau Bois-de-Bay à Satigny/GE

** n.m. : dû à un problème technique relatif à l'échantillonnage en continu, les données ne sont pas disponibles pour 2017. Noter qu'aucun radionucléide de demi-vie courte n'avait été identifié par le passé

Surveillance des immissions

Le Béryllium-7 (^7Be) 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 4 montre la concentration de ^7Be dans l'air ambiant collecté dans deux types de stations :

- des stations situées autour du CERN pouvant capter des rejets d'accélérateurs et
- deux stations de référence éloignées des accélérateurs (EAS951 et HVS Posieux/FR).

Les valeurs mesurées proches et loin des sites du CERN ont toutes corrélées, prouvant ainsi que la majeure partie de l'activité en ^7Be mesurée est d'origine naturelle. La mesure de l'échantilleur 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 mBq/m³, 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.

Concernant l'environnement aquatique, des faibles concentrations en ^{54}Mn ont été mesurées dans des échantillons de bryophytes (mousses) et de sédiments prélevés dans la rivière le Lion (F). Les radionucléides proviennent de la Zone Nord du site de Prévessin (F) et les activités spécifiques sont au maximum équivalentes à 3 % de la limite d'exemption [2]. Les bryophytes sont d'excellents bioaccumulateurs de pollution. Alors que la mesure de l'eau de rivière est une valeur instantanée, ces végétaux, qui peuvent être assimilés à des collecteurs, permettent d'identifier des radionucléides ayant été présents dans l'eau. Aucun autre radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les autres échantillons d'eau, de bryophytes et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collectés en septembre. Bien que les radionucléides aient été mesurés dans des échantillons provenant du territoire français, ils sont mentionnés dans ce présent rapport car la rivière le Lion rejoint l'Allondon, qui termine son cours dans le Rhône. Le Nant d'Avril, dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches, fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève, mandaté par l'Office Fédéral de la Santé Publique (se référer au chapitre 8.7).

En dehors des sédiments et bryophytes susmentionnés, aucun radionucléide produit au CERN n'a pu être mis en évidence dans les autres échantillons environnementaux; le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN peut donc être considéré comme très faible.

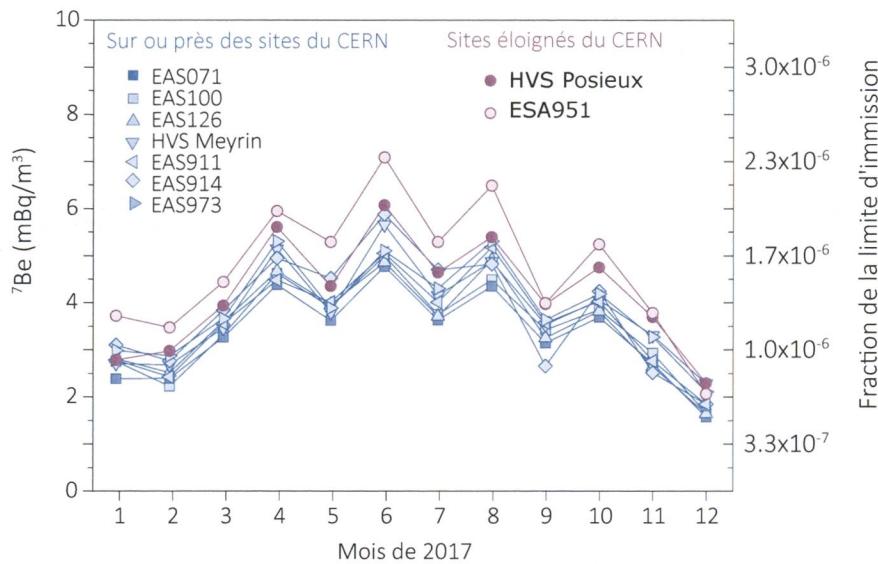


Figure 4:

Activités du ^{7}Be mesurées par le biais de 9 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: Station de référence localisée à Cessy (F). 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].

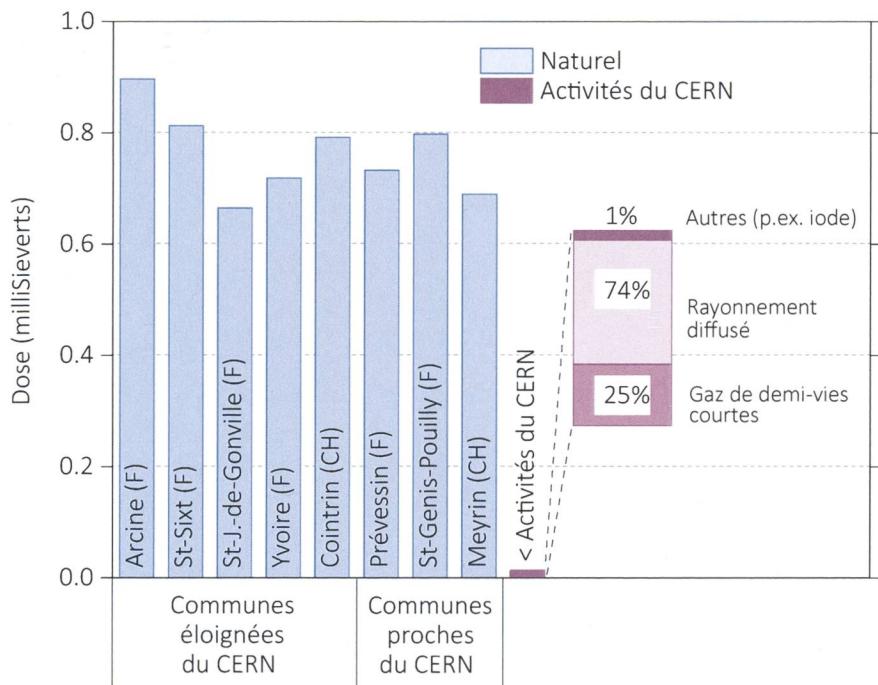


Figure 5:

Contribution à la dose annuelle des activités du CERN sur le site CERN de Meyrin, comparée aux variations des doses externes naturelles dans des communes françaises et suisses situées à proximité. La contribution du CERN de 0.014 mSv doit être comparée à la valeur limite de dose fixée dans la réglementation du CERN à 0.3 mSv [1].

Impact radiologique

La dose effective reçue par le groupe de référence pour le site de Meyrin du CERN en 2017 a été calculée à partir des équivalents de dose ambiante mesurés aux barrières du site et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion amélioré basé sur les directives nationales et internationales [3, 4]. La dose effective totale de 0.014 mSv est induite pour deux tiers par le rayonnement diffusé et pour un tiers par les rejets de gaz de demi-vies courtes. A noter qu'il n'a pas été possible de tenir compte de l'éloignement du groupe de référence par rapport au site de Meyrin dans le calcul de la dose efficace

induite par le rayonnement diffusé. Conséquemment, la dose efficace est très probablement surestimée. Le groupe de référence exposé aux rejets d'effluents liquides dans le Nant d'Avril a reçu une dose inférieure à 0.0004 mSv.

Le rayonnement diffusé et les rejets en gaz de demi-vies courtes contribuent à 99% à la dose susmentionnée de 0.014 mSv. Ceux-ci sont surveillés en continu, garantissant ainsi un temps de réaction optimal en cas de dégradation de fonctionnement des installations.

Conclusions

- Les résultats du programme de surveillance effectué par le CERN, combinés aux calculs de dose pour les groupes de référence ont démontré, pour l'année 2017 et à l'instar des années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1];
- Des techniques de mesure sensibles ont permis de détecter des radionucléides en faibles concentrations dans un seul échantillon environnemental. Les valeurs de concentration sont néanmoins restées inférieures à 3% des limites d'exemption [2]. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN demeure très faible.
- De manière à confronter l'impact dosimétrique des activités du CERN aux valeurs typiques d'expositions naturelles, la figure 5 compare la dose susmentionnée de 0.014 mSv avec la dose équivalente annuelle mesurée en plusieurs localités proches et éloignées des sites du CERN.

Références

- [1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2014), Annexe 3.
- [3] Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), Calcul de l'exposition aux radiations ionisantes dans l'environnement due à l'émission de substances radioactives par les installations nucléaires, IFSN-G14/f rév.1 (2009).
- [4] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
- [5] S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement : Résultats des mesures 2017 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2018)

Glossaire

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

8.7

Environnement du CERN (mesures OFSP)

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

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

J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus

Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau,
Université de Genève, Bd Carl-Vogt 66, 1211 Genève 4

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE) du CERN, l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnements au voisinage du centre de recherche. L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2017 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Même si des traces de radioisotopes, produits dans les installations du centre de recherche, ont pu être détectées, les activités maximales enregistrées sont restées nettement inférieures aux limites suisses et leur impact radiologique peut être considéré comme minime.

Programme de surveillance de l'OFSP

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

- Dosimétrie d'ambiance du rayonnement gamma ainsi que des neutrons sur une base trimestrielle (13 dosimètres à thermoluminescence-TLD- évalués par l'IRA) et mesures instantanées de l'équivalent de dose ambiant effectuées par l'OFSP sur 9 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants.
- Aérosols: mesure continue par spectrométrie gamma des aérosols déposés sur un filtre déroulant par le moniteur URAnet et spectrométrie gamma hebdomadaire des filtres d'un collecteur à haut débit.
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel, mesure du tritium par l'OFSP).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) et végétaux ainsi que certains produits locaux (comme le ${}^3\text{H}$ dans le vin).

A noter qu'après l'arrêt hivernal pour maintenance, les installations du CERN ont toutes été en fonction dès début avril et jusqu'à la mi-décembre 2017.

Mesures de l'exposition ambiante

Treize sites ont été surveillés en 2017, 5 d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français) et 7 sur le parcours du LHC. En plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée.

Les résultats de ces mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP, ont montré que les doses des photons enregistrées au cours de l'année 2017 correspondent partout à l'irradiation naturelle (environ 0.2 mSv par trimestre), sauf en un point situé sur le site de Prévessin, où des valeurs 2 à 3 fois plus élevées ont été observées au 2^{ème} et au 3^{ème} trimestre 2017. Des valeurs similaires ont toutefois déjà été relevées par le passé, par exemple au 3^{ème} et 4^{ème} trimestre 2016 ainsi qu'au 4^{ème} trimestre 2012 et sont dues au fonctionnement de l'installation COMPASS.

Les doses des neutrons sont restées faibles ou inférieures à la limite de détection de 0.02 mSv sauf en deux points, situés à l'intérieur de l'enceinte du site de Meyrin, à proximité du synchrotron à protons (PS) et du booster du PS (PSB). Les doses observées restent cependant peu élevées (maximum de 0.24 mSv par trimestre) par rapport aux valeurs atteintes par le passé (jusqu'à environ 1 mSv). Notons que les doses des neutrons enregistrées en ces points au premier trimestre 2017 sont quant à elles restées proches de l'irradiation naturelle, puisque les installations étaient à l'arrêt pour maintenance au cours de l'hiver.

Au 3^{ème} trimestre 2017, la dose des neutrons enregistrées près du Hadron stopper sur le site de Prévessin étaient également supérieure à l'irradiation naturelle, avec une valeur voisine de 0.15 mSv par trimestre.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2017 sur 9 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants n'ont par ailleurs montré aucune influence du centre de recherche sur l'exposition ambiante due au rayonnement gamma. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$) pour les gammas se sont échelonnées entre 88 et 109 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes : 96 ± 5 nSv/h; moyenne des sites distants 99 ± 7 nSv/h).

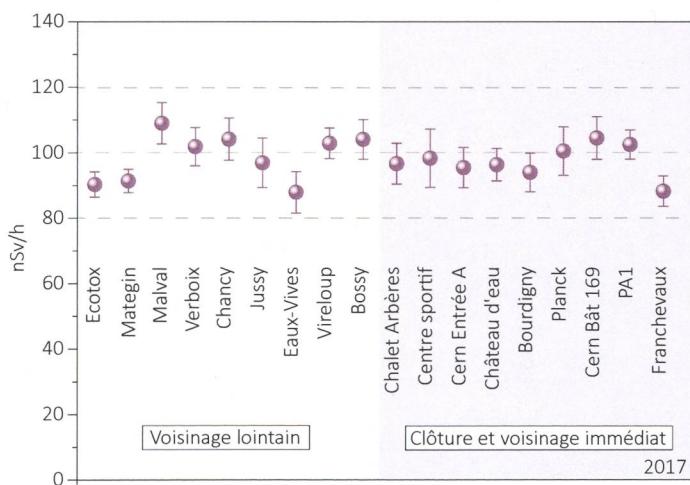


Figure 1:
Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2017 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1m au-dessus du sol.

Mesures dans le milieu atmosphérique

Même si le nouveau réseau de surveillance de la radioactivité dans l'air, URAnet, ne sera officiellement opérationnel qu'en 2018, la station de mesure située au CERN a déjà fonctionné pendant toute l'année 2017. Le moniteur spectrométrique mesurant en continu les émetteurs gamma dans les aérosols déposés sur un filtre déroulant, n'a mis en évidence aucun radionucléides d'origine artificielle avec une concentration supérieure à la limite de détection (1.1 mBq/m^3 pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h). Le moniteur d'iode gazeux également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l' ^{131}I gazeux n'a révélé aucune valeur supérieure à la limite de détection de $50 - 60 \text{ mBq/m}^3$.

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

Tableau 1 :

Concentrations du ${}^7\text{Be}$ mesurées en 2017 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

Station de collection à haut débit	Valeur min/max (mBq/m ³)	Moyenne (mBq/m ³)
CERN (Meyrin/GE)	1.1 - 6.7	3.8 ± 1.4
Posieux/FR	1.1 - 7.0	4.2 ± 1.5
Klingnau/AG*	1.3 - 6.3	3.1 ± 1.4
Göttingen/TG	1.4 - 7.3	3.9 ± 1.4
Cadenazzo/TI	1.7 - 8.4	4.7 ± 1.5

*Le débitmètre de la station de Klingnau était en panne de la mi-mai à la mi-août 2017, période où les concentrations en ${}^7\text{Be}$ sont généralement les plus élevées; les résultats pour cette période n'ont pas été considéré (débit estimé sur la base des valeurs usuelles).

entre 0.4 ± 0.2 et $4.0 \pm 0.8 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Ces radionucléides, d'une demi-vie de 15 h pour le ${}^{24}\text{Na}$ et de 8 jours pour le ${}^{131}\text{I}$, sont produits dans les accélérateurs de particules du centre de recherche (${}^{131}\text{I}$ est produit par l'installation ISOLDE et nTOF, voir chap. 8.6).

Notons encore que l'impact radiologique de ces traces de ${}^{24}\text{Na}$ et de ${}^{131}\text{I}$ est tout à fait négligeable, puisque les concentrations les plus élevées enregistrées en 2017 pour ces radionucléides ne représentent qu'environ 0.00003% (pour le ${}^{24}\text{Na}$) et 0.00015% (pour le ${}^{131}\text{I}$) des limites d'immissions dans l'air selon l'Ordonnance sur la radioprotection. L'identification d'un aussi faible niveau de radioactivité nécessite des méthodes extrêmement sensibles, comme celles mises en œuvre par l'OFSP.

concentrations de ${}^7\text{Be}$ mesurées en 2017 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Des traces de ${}^{22}\text{Na}$, également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre 0.1 et $0.8 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ${}^{137}\text{Cs}$ provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont, comme partout en Suisse, été détectées à plusieurs reprises, mais les activités sont restées très faibles (valeur maximale de $1.2 \pm 0.2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

Les seuls radio-isotopes attribuables aux activités du CERN sporadiquement mis en évidence dans les filtres aérosols en 2017 sont le ${}^{24}\text{Na}$ (valeur maximale de $30 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) et le ${}^{131}\text{I}$ (valeurs comprises

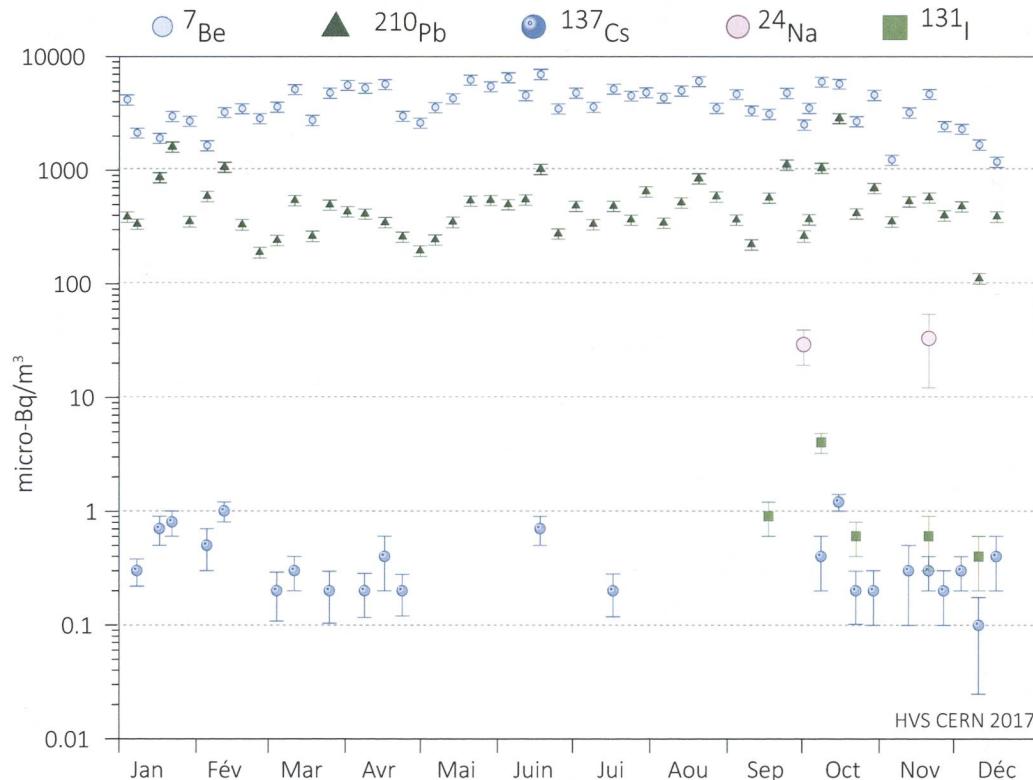


Figure 2 :

Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2017.

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma in situ permettent de distinguer les contributions d'origine naturelle et artificielle à l'exposition externe du public. La figure 3 montre que les valeurs mesurées au voisinage du centre de recherche sont tout à fait comparables à celles relevées dans des sites hors de son influence, tel que Posieux/FR (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au chapitre 3.1). Seuls les résultats enregistrés au point de mesure situé à l'intérieur de la clôture du centre de recherche (BAT 588) s'en distinguent légèrement. En effet, d'infimes traces d'⁴¹Ar, un gaz rare de demi-vie inférieure à 2 heures produit dans les accélérateurs du centre de recherche, ont pu être enregistrées dans l'air sur ce site. La présence de ²²Na était également clairement visible sur le spectre in situ enregistré sur ce même site. Comme le ⁷Be, le ²²Na est produit dans la stratosphère par rayonnement cosmique, mais peut également être produit par les installations du CERN. Il n'est pas possible de déterminer avec certitude la part attribuable aux activités du CERN, mais ce radionucléide n'a pas été mis en évidence aux points de mesure situés à l'extérieur de la clôture du centre de recherche.

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux prélevés au voisinage proche du centre de recherche ont confirmé ce constat. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioéléments d'origine naturelle, dont les concentrations prédominent, on y détecte encore les traces des injections artificielles des essais nucléaires des années 50 et 60 et dans une moindre mesure de l'accident de Tchernobyl.

Mesures dans le milieu aquatique

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle mesurable en 2017. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

Dans les échantillons mensuels d'eaux du Nant d'Avril, les concentrations de tritium sont également généralement restées inférieures à la limite de détection. Une concentration de tritium faible mais mesurable (2.3 ± 0.6 Bq/l) a toutefois pu être mise en évidence dans l'échantillon d'eau du Nant d'Avril en novembre. Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit le département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme a fait l'objet d'un rapport spécifique¹.

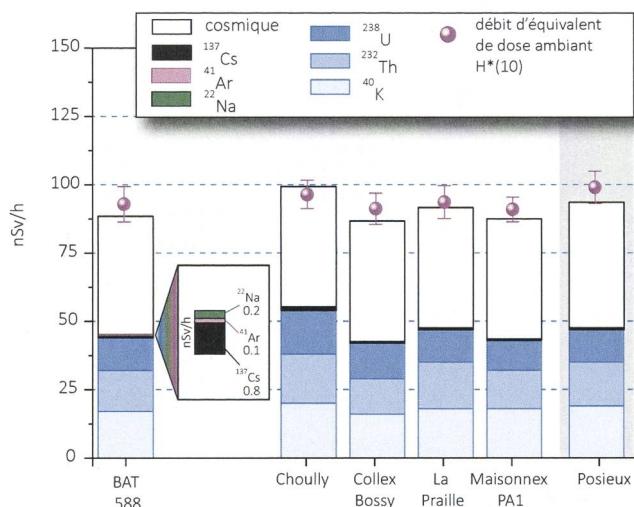


Figure 3 : Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2017. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée. ²²Na et ⁴¹Ar sont présents dans l'air contrairement aux autres radionucléides présents dans le sol

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux prélevés au voisinage proche du centre de recherche ont confirmé ce constat. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioéléments d'origine naturelle, dont les concentrations prédominent, on y détecte encore les traces des injections artificielles des essais nucléaires des années 50 et 60 et dans une moindre mesure de l'accident de Tchernobyl.

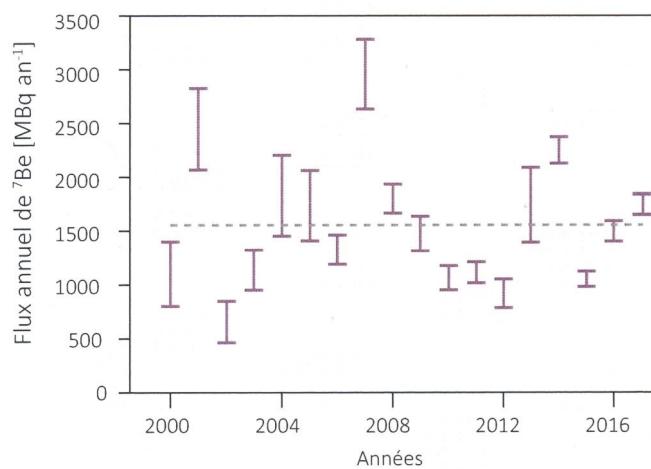


Figure 4 : Estimation des flux annuels minimum et maximum de ⁷Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel).

¹ J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°18 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2016 – Novembre 2017 ; Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Décembre 2017)

Entre le 29 octobre 2016 et le 04 décembre 2017, 24 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) avec une intégration des prélèvements de 4 à 21 jours. Suite à une panne de l'échantillonneur, la période du 10 juillet au 09 août 2017 est manquante.

En dehors du ^{40}K et des isotopes des séries primordiales (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th), seuls 3 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 $0.85 \pm 0.04 \text{ Bq/l}$ enregistré en septembre), avec une moyenne de 0.35 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 2016 - 2017 (calculé sur une année, du 29 octobre 2016 au 5 novembre 2017), est ainsi de $1'660 \text{ MBq/an}$ au minimum et de $1'850 \text{ MBq/an}$ au maximum. Ces valeurs se situent dans les valeurs moyennes des périodes de mesure précédentes (voir figure 4).

Le deuxième radionucléide mis en évidence dans les eaux du Nant d'Avril est le ^{137}Cs (maximum de 13 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.

Finalement, des traces de ^{22}Na (max de 2.5 mBq/l), proche de la limite de détection, ont été mise en évidence à 2 reprises dans les échantillons d'eau. 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 . Ce radionucléide n'avait pu être détecté en 2013, alors que les installations étaient complètement à l'arrêt, alors qu'il avait régulièrement été mis en évidence au cours des années antérieures. Ces résultats tendent 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.

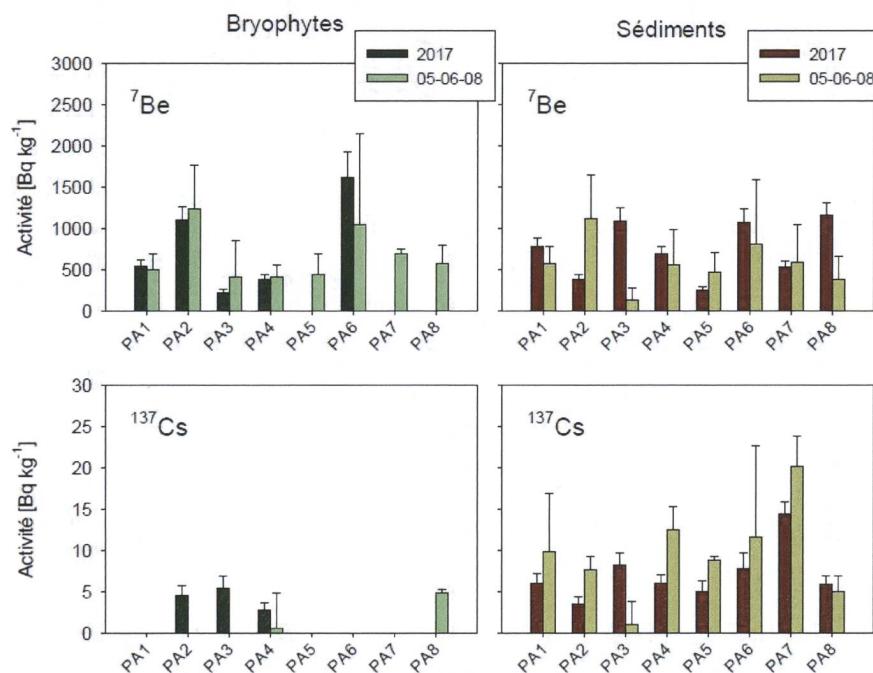


Figure 5 :

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

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^{7}Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons. Les activités mesurées pour ces deux isotopes sont résumées dans le tableau 2. Aucun autre émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être décelé dans les échantillons de sédiments au cours de la période sous revue.

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 le département F.-A. Forel. Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments se sont échelonnées, en 2017 (période d'échantillonage du 22.09 au 20.10.2017), entre 251 et 1'162 Bq/kg pour le ^{7}Be et entre 3.6 et 14.5 Bq/kg pour le ^{137}Cs . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^{7}Be variant entre 228 et 1'618 Bq/kg et entre < 2.6 et 5.5 Bq/kg pour le ^{137}Cs . La figure 5 permet de comparer ces résultats avec ceux obtenus en 2005, 2006 et 2008 alors que le LHC n'était pas encore en fonction (programme point zéro LHC) et montre pas d'augmentation significative des radionucléides présents; aucun autre émetteur gamma marqueur du CERN n'a par ailleurs été détecté dans les sédiments ou les bryophytes aux points de rejet du LHC.

En résumé, si l'on exclut le ^{7}Be , puisque les résultats des mesures effectuées ne peuvent mettre en évidence une origine anthropique, le seul radionucléide potentiellement attribuable aux activités du centre de recherche décelé dans le milieu aquatique en 2017 est le ^{22}Na . D'autres radioéléments produits par les installations du CERN tels que ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , mis en évidence par le passé dans le Nant d'Avril, n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes durant l'année sous revue.

Conclusions

Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec le département F.-A. Forel, a montré que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement et la population avoisinante a été très faible en 2017.

L'ensemble des résultats ont montré la prédominance des radioéléments d'origine naturelle. La détection de traces de radionucléides attribuables aux activités du CERN, comme le ^{24}Na , l' ^{41}Ar et le ^{131}I dans l'air et le ^{22}Na dans l'eau n'a été possible que grâce à la mise en œuvre de techniques de prélèvement et de mesure d'une très grande sensibilité, dépassant le cadre des contrôles réglementaires. Les activités maximales des radioisotopes artificiels provenant des activités du CERN mesurées dans l'environnement ne représentent en effet que d'infimes fractions des valeurs limites fixées par la législation suisse en radioprotection.

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 2016 à octobre 2017 (14 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max	Moyenne	Médiane
	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
^{7}Be	363 - 1'748	877	859
^{137}Cs	5.9 - 11.3	7.8	7.1

