

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: - (2018)

Rubrik: Überwachung der Kernanlagen : Emissionen und Immissionen = Surveillance des installations nucléaires : émissions et immissions

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.02.2026

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

The background of the entire page is a photograph of a nuclear power plant. In the foreground on the left, a person wearing a yellow hard hat and safety glasses is looking at a tablet. The power plant's complex structure, including tall chimneys and various pipes, is visible in the background under a bright sky.

2018



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, Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2018 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimite. 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 2018

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1a für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Figur 1b enthält eine Aufschlüsselung der Abgaben der Kernkraftwerke nach Monat für die limitierten radioaktiven Abgaben. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen gemäss Richtlinie ENSI G14 errechneten Personendosen für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2018. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c gegeben. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für die meistbetroffenen Personen (nur Erwachsene) über die letzten 20 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimite eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 179 Proben eigene gammaspektrometrische Messungen durchgeführt (inkl. Teilnahme an Ringvergleichen zur Sicherstellung der eigenen Messqualität). Dabei wurden Aerosol- und Iodfilter sowie Abwasserproben aus den Anlagen stichprobenweise analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

Bei der monatlichen Aufschlüsselung der radioaktiven Abgaben aus den Werken (vgl. Figur 1b) ist bei den flüssigen Abgaben beim KKG die jährlich jeweils vor dem Revisionsstillstand durchgeführte Verwerfungsaktion für tritiumhaltiges Wasser erkennbar. Solche Abgaben sind bei den Druckwasserreaktoren systembedingt erforderlich, um den operationellen Strahlenschutz während der Revision zu optimieren.

Im Gegensatz zum KKG erfolgen die Tritiumabgaben bei den Druckwasserreaktoren des KKB über das ganze Jahr verteilt.

Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKB und KKG weniger als 0.001 mSv, bei KKL und KKM etwa 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2018 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv/Jahr.

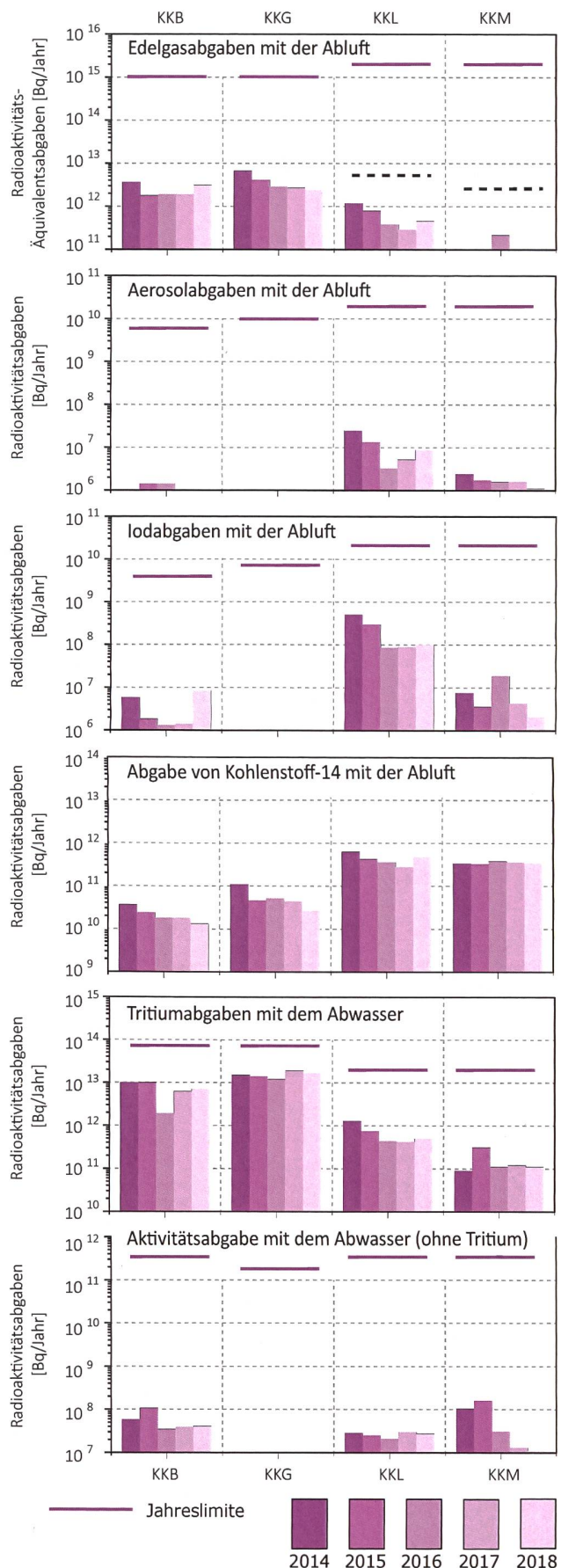
Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen 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 durchgeführten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der bewilligte Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Die für das Jahr 2018 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

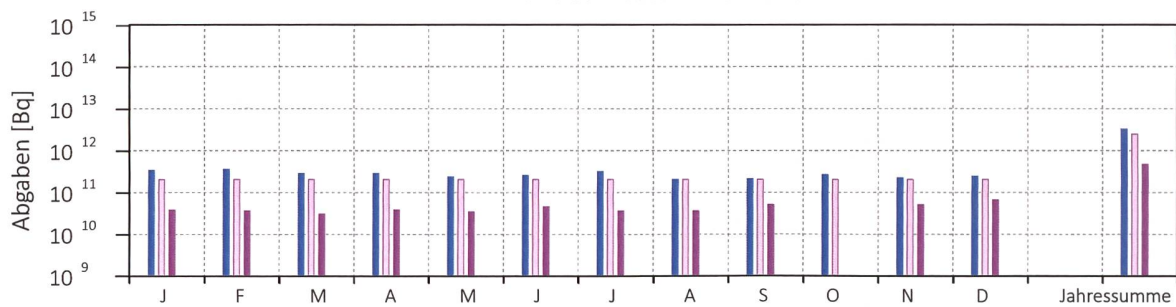
Fig 1.a:

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser ins Flusswasser in den letzten fünf Jahren (2014 bis 2018) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten.

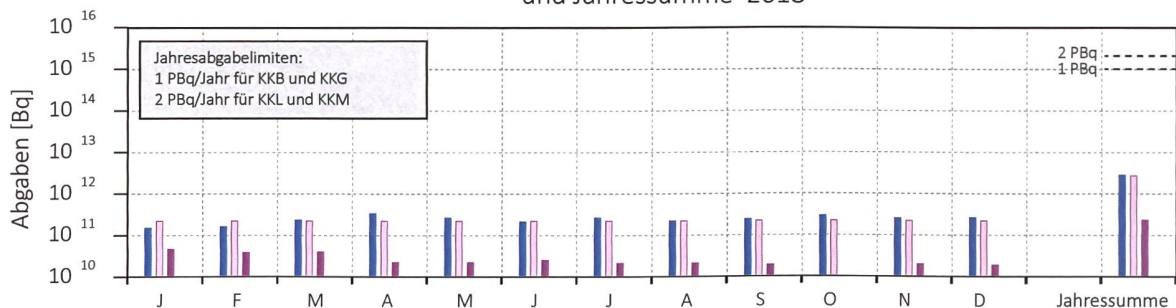
Angegeben ist für die jeweilige Nuklidgruppe und den Abgabepfad die Jahressumme der bei den einzelnen bilanzierenden Messungen durch die Kernkraftwerke ausgewiesenen Aktivitätsabgaben. Die Edelgasbilanzierung im KKB und im KKG basiert auf Beta-Totalmessungen. Für die Umrechnung in die für den Vergleich mit den Abgabelimiten notwendigen Edelgas-Abgabeäquivalente wurde in diesen Fällen ein konservatives Nuklidgemisch angesetzt. Das KKL und das KKM bilanzieren die Edelgase dagegen nuklidspezifisch mittels Gamma-Spektrometriemessungen. Die nuklidspezifischen Messungen liegen häufig unterhalb der Nachweisgrenze. Die gestrichelten Linien bei KKL und KKM stellen eine abgeschätzte obere Grenze der tatsächlichen Abgaben dar, falls die Edelgasaktivitäten jeweils knapp unterhalb der Nachweisgrenze liegen würden. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.



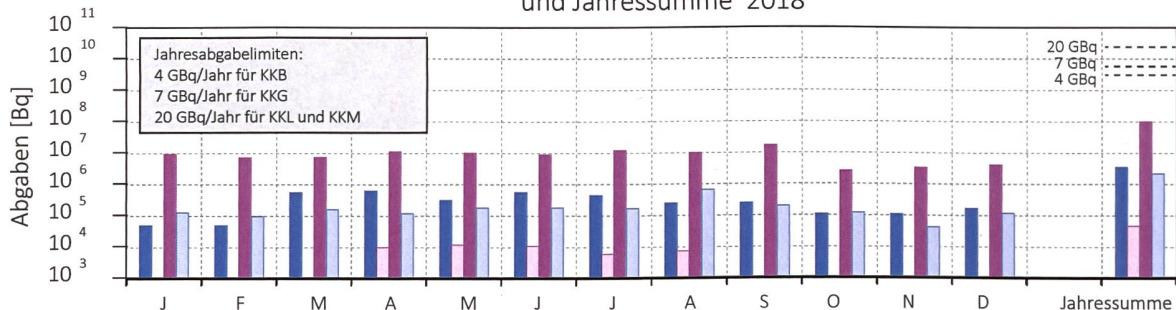
Monatliche **Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2018



Monatliche **Äquivalent-Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2018



Monatliche **Abgaben von Iod-131** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2018



Monatliche **Aerosolabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2018

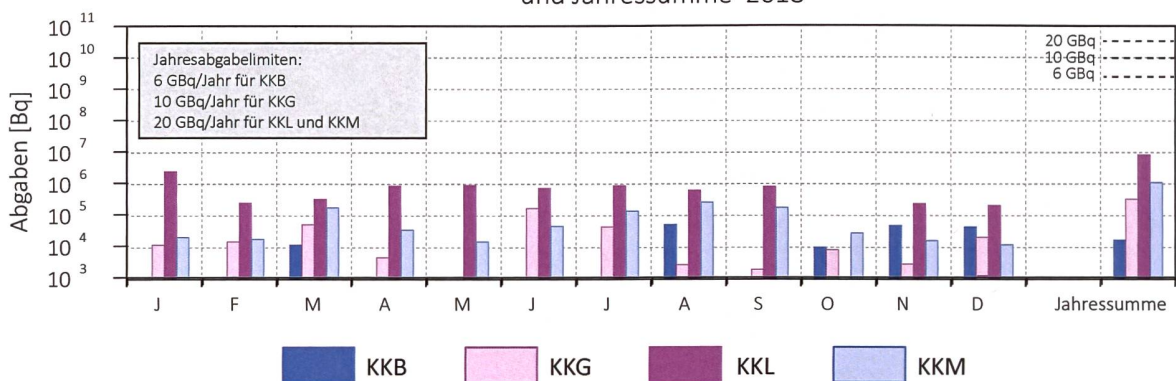


Fig 1.b (Teil 1):

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

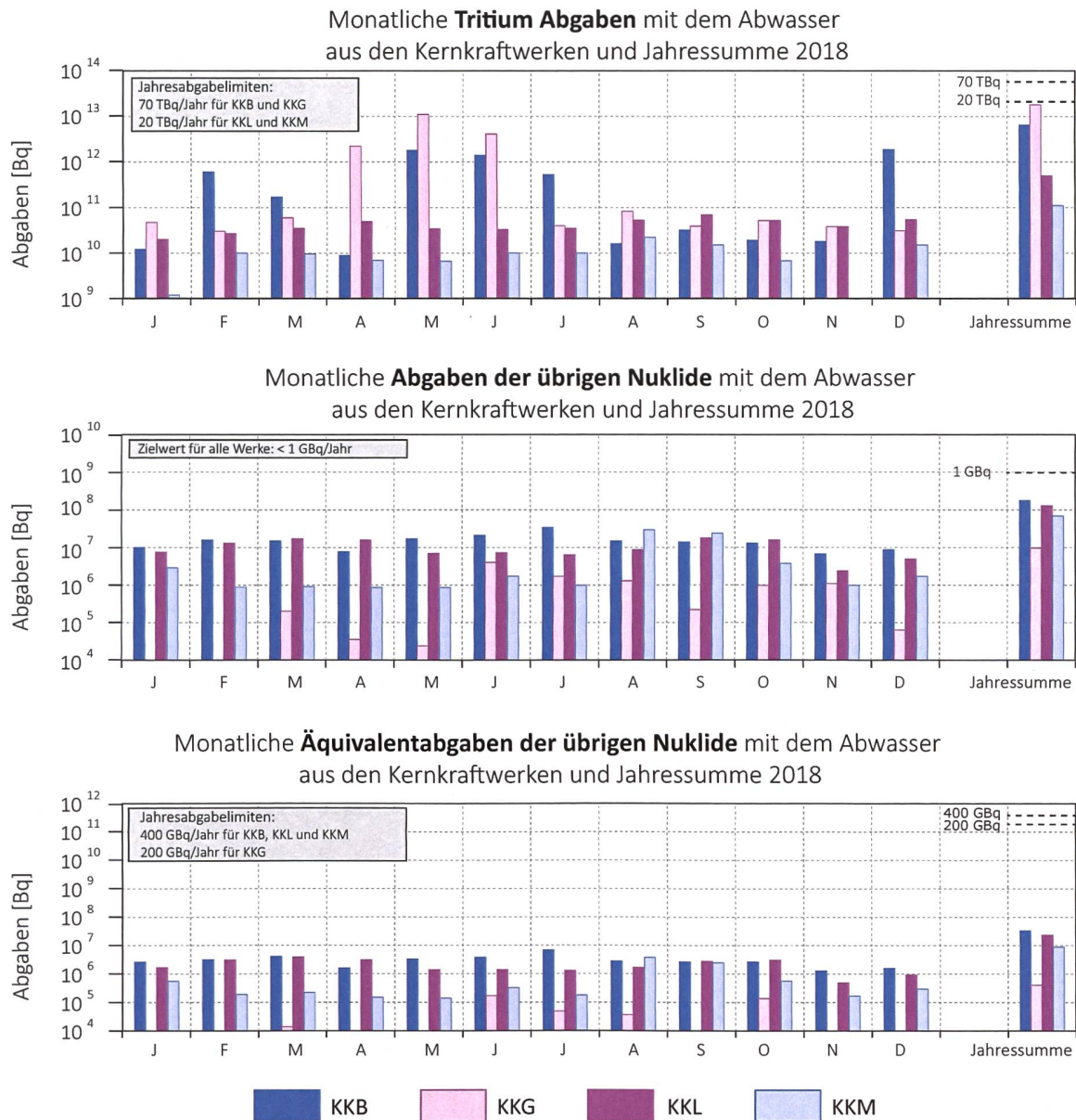
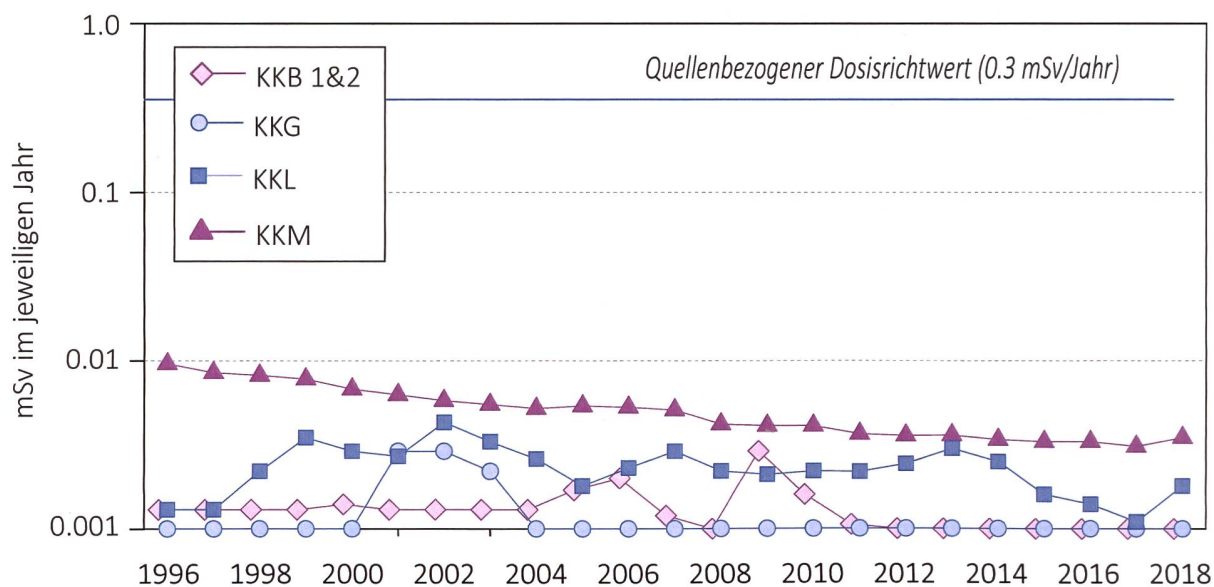


Fig 1.b (Teil 2):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2018 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.



Figur 2:

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

Anlage/Block	Betrieb 2018	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 18.3-31.12. Stillstand: 1.1-18.3.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 1.1-26.6; 9.7-31.12. Revisionsstillstand: 26.6-9.7.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 1.1-2.6.; 23.6-31.12. Revisionsstillstand: 2.6.-23.6.	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 1.1-15.9.; 03.11.-31.12. Revisionsstillstand: 16.9.-2.11.	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Leistungsbetrieb: 1.1-18.8.; 14.9.-31.12. Revisionsstillstand: 19.8.-13.9.	Siedewasserreaktor	373 MW

Figur 3:

Betrieb der Kernanlagen 2018.

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2018 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 3'200 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.8·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	7.1·10 ¹²	-	7·10 ¹³	10 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	3.2·10 ¹²	3.1·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.3 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.6·10 ⁴	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	3.5·10 ⁶	-	4·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.3·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKG	Abwasser 7'509 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.2·10 ⁷	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.7·10 ¹³	-	7·10 ¹³	25 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<2.4·10 ¹²	<2.5·10 ¹²	1·10 ¹⁵	<0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	3.3·10 ⁵	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	4.7·10 ⁴	-	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.7·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKL	Abwasser 13'549 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.2·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	5.0·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	3 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	4.6·10 ¹¹	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	8.8·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	1.0·10 ⁸	1.1·10 ⁸	2·10 ¹⁰	0.6 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.8·10 ¹¹	-	-	-	0.0018	0.0024	0.0040
	Dosis total						0.0018	0.0024	0.0041
KKM	Abwasser 2'347 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	6.9·10 ⁷	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.1·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	0.6%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	-	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.1·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0025	0.0024	0.0024
		Iod: ¹³¹ I	2.1·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.5·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	0.0011	0.0019
	Dosis total						0.0034	0.0036	0.0043
ZZL	Abwasser 340 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.3·10 ⁸	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	2.6·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-/γ-Aerosole	2.7·10 ⁵	-	1·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.0·10 ⁴	-	3·10 ⁷	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.2·10 ⁸	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.3·10 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 2018 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungslabor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszwischenlager
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft^{1,2} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$2.0 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$2.3 \cdot 10^7$	-	-	-	$5.8 \cdot 10^4$
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$1.5 \cdot 10^6$	-	-	-	-
Tritium als HTO	$3.2 \cdot 10^{10}$	-	-	$3.0 \cdot 10^{10}$	$8.7 \cdot 10^9$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$3.3 \cdot 10^6$	-	-	$4.7 \cdot 10^7$	$7.1 \cdot 10^6$
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Kind 10j	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Kleinkinder	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI ^{1,2}		
	Zentrale Fortluftanlagen	Injektor II	C-Labor	Abwasser 949 m ³	Abluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$3.2 \cdot 10^8$	-	$8.4 \cdot 10^7$
Tritium	-	-	-	$8.4 \cdot 10^{10}$	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	$1.8 \cdot 10^{14}$	$2.8 \cdot 10^{10}$	-	-	$1.8 \cdot 10^{14}$	$7.7 \cdot 10^{14}$
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$1.1 \cdot 10^{10}$	$5.1 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^4$	-	$1.1 \cdot 10^{10}$	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$2.3 \cdot 10^7$	-	-	-	$8.5 \cdot 10^6$	$8.3 \cdot 10^6$
Tritium als HTO	$7.4 \cdot 10^{11}$	-	-	-	$8.2 \cdot 10^{11}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	$5.7 \cdot 10^7$	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.007	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kind 10j	0.007	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kleinkinder	0.007	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	4.7 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 5.0%	

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2018:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid β/γ-Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
³ H	7.1·10 ¹²	1.7·10 ¹³	5.0·10 ¹¹	1.1·10 ¹¹	8.4·10 ¹⁰	2.6·10 ¹⁰
⁷ Be					2.8·10 ⁷	
²² Na					2.0·10 ⁶	5.7·10 ⁶
²⁴ Na	4.8·10 ⁵					
⁴⁴ Ti					1.8·10 ⁴	
⁴⁶ Sc					1.0·10 ⁵	
⁵¹ Cr	3.1·10 ⁵			6.3·10 ⁶	3.3·10 ⁵	2.0·10 ⁵
⁵⁴ Mn	1.1·10 ⁶		8.4·10 ⁶	1.4·10 ⁷	2.6·10 ⁶	1.0·10 ⁶
⁵⁶ Co					8.6·10 ⁴	
⁵⁷ Co					7.3·10 ⁵	
⁵⁸ Co	3.0·10 ⁶	9.3·10 ⁴		4.7·10 ⁶	3.9·10 ⁵	2.1·10 ⁴
⁶⁰ Co	5.4·10 ⁷	8.3·10 ⁵	1.1·10 ⁸	4.1·10 ⁷	1.1·10 ⁶	1.7·10 ⁷
⁶⁵ Zn	2.3·10 ⁵			1.8·10 ⁶	4.9·10 ⁶	
⁶⁷ Ga					6.9·10 ⁴	
^{69m} Zn		4.0·10 ⁴				
⁷⁵ Se					8.1·10 ⁴	
⁸³ Rb					1.2·10 ⁴	
⁸⁵ Sr					1.2·10 ⁴	
⁸⁸ Y					4.6·10 ⁴	
⁸⁹ Sr	1.6·10 ⁵			4.5·10 ³		
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1.3·10 ⁶			2.5·10 ⁴	1.2·10 ⁷	1.2·10 ⁵
⁹⁵ Nb		9.1·10 ⁴				
^{99m} Tc	2.2·10 ⁴	1.1·10 ⁶				
^{110m} Ag	2.7·10 ⁶				2.4·10 ⁴	
¹¹¹ In					8.3·10 ⁴	
¹²² Sb	1.2·10 ⁵					
¹²⁴ Sb	1.1·10 ⁷	2.4·10 ⁵		1.5·10 ⁵	3.1·10 ⁵	8.4·10 ⁵
¹²⁵ Sb	1.8·10 ⁷					2.8·10 ⁷
^{123m} Te	1.0·10 ⁶	6.8·10 ⁶				
¹³² Te	1.6·10 ⁴	5.3·10 ⁵				
¹³¹ I	2.0·10 ⁶					
¹³² I		2.3·10 ⁶				
¹³³ I	2.4·10 ⁵					
¹³³ Ba					1.9·10 ⁴	
¹³⁴ Cs	1.2·10 ⁶				3.3·10 ⁶	5.1·10 ⁶
¹³⁷ Cs	8.1·10 ⁷		2.4·10 ⁶	1.1·10 ⁶	2.3·10 ⁸	2.8·10 ⁸
¹⁶⁰ Tb					3.3·10 ⁴	
¹⁶¹ Tb					3.6·10 ⁶	
¹⁶⁹ Yb					6.6·10 ⁴	
¹⁷² Lu					3.8·10 ⁵	
¹⁷³ Lu					1.8·10 ⁵	
¹⁷⁷ Lu					3.2·10 ⁷	
¹⁸⁵ Os					8.9·10 ⁴	
¹⁹⁵ Au					7.0·10 ⁵	
²⁰⁷ Bi					5.6·10 ⁴	
α-Strahler	*)	< 7.0·10 ⁴	2.0·10 ⁵	2.1·10 ⁴		*)
^{234/238} U					3.6·10 ⁴	
^{239/240} Pu	4.6·10 ³				2.2·10 ⁴	
²³⁸ Pu/ ²⁴¹ Am	2.8·10 ⁴				2.2·10 ⁴	
²³⁹ Np						
²⁴² Cm	5.7·10 ³					
^{243/244} Cm	6.3·10 ⁴					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2017 bis und mit dem 3. Quartal 2018

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2018:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase, Edelgase						
Tritium	5.7·10 ¹¹	5.7·10 ¹¹	4.2·10 ¹¹	2.7·10 ¹⁰	8.2·10 ¹¹	1.3·10 ¹⁰
¹⁴ C (CO ₂)	1.3·10 ¹⁰	2.7·10 ¹⁰	4.8·10 ¹¹	3.5·10 ¹¹	5.7·10 ⁷	1.2·10 ⁸
¹¹ C					2.8·10 ¹³	
¹³ N					2.9·10 ¹³	
¹⁵ O					1.2·10 ¹⁴	
¹⁸ F					9.2·10 ¹¹	
²⁴ Ne					1.6·10 ¹²	
⁴¹ Ar					4.1·10 ¹²	
⁸⁵ Kr			5.6·10 ¹⁰		2.0·10 ¹¹	
^{85m} Kr	1.1·10 ¹¹					
⁸⁸ Kr	1.9·10 ¹¹					
¹³³ Xe	1.6·10 ¹²		6.2·10 ¹⁰			
¹³⁵ Xe	1.3·10 ¹²		1.3·10 ¹¹			
^{135m} Xe			2.1·10 ¹¹			
EG-Aequiv.						
EG: β-total		< 2.4·10 ¹²				
Andere						
Iod						
¹²³ I					1.6·10 ⁷	
¹²⁵ I					8.4·10 ⁶	
¹³¹ I	3.5·10 ⁶	4.7·10 ⁴	1.1·10 ⁸	2.1·10 ⁶		
¹³³ I	2.4·10 ⁷					

von 2·10³ Bq/m³ normierte Abgabe aufgeführt.

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

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

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

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

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

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

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

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

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

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

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

[3] Die Jahresdosis ist für Personen berechnet, die sich dauernd am kritischen Ort aufhalten, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort beziehen und ihren gesamten Trinkwasserbedarf aus dem Fluss unterhalb der Anlage decken. Die Dosis wird mit den in der Richtlinie ENSI-G14 angegebenen Modellen und Parametern ermittelt. Dosiswerte kleiner als 0.001 mSv- entsprechend einer Dosis, die durch natürliche externe Strahlung in ca. zehn Stunden akkumuliert wird- werden in der Regel nicht angegeben. Beim PSI wird die Jahresdosis der Gesamtanlage als Summe über die Abgabestellen gebildet.

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

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2018:

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
^{38}S					$4.3 \cdot 10^8$	
^{39}Cl					$9.7 \cdot 10^9$	
^{51}Cr						
^{54}Mn		$5.8 \cdot 10^3$		$1.6 \cdot 10^5$		
^{57}Co		$3.6 \cdot 10^3$				
^{58}Co				$1.3 \cdot 10^5$		
^{60}Co	$1.2 \cdot 10^3$		$2.2 \cdot 10^5$	$7.2 \cdot 10^5$	$6.8 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^3$
^{65}Zn				$2.2 \cdot 10^4$		
^{77}Br					$2.1 \cdot 10^5$	
$^{80\text{m}}\text{Br}$					$1.8 \cdot 10^9$	
^{82}Br					$3.5 \cdot 10^8$	
^{89}Sr			$3.9 \cdot 10^5$			
^{90}Sr						
^{95}Nb				$3.9 \cdot 10^3$		
$^{99\text{m}}\text{Tc}$					$2.3 \cdot 10^7$	
^{103}Ru		$8.6 \cdot 10^3$				
$^{110\text{m}}\text{Ag}$		$1.3 \cdot 10^5$				
$^{123\text{m}}\text{Te}$		$9.1 \cdot 10^4$				
^{125}Sb						
^{131}I (Aerosol)		$4.3 \cdot 10^3$	$7.0 \cdot 10^6$			
^{134}Cs						
^{136}Cs						
^{137}Cs	$1.5 \cdot 10^4$			$3.1 \cdot 10^4$		$3.2 \cdot 10^3$
^{140}Ba			$5.5 \cdot 10^5$			
^{140}La			$6.4 \cdot 10^5$			
^{141}Ce		$1.4 \cdot 10^4$				
^{144}Ce		$7.7 \cdot 10^4$				
^{181}Re					$3.9 \cdot 10^7$	
^{182}Re					$1.1 \cdot 10^8$	
$^{182\text{m}}\text{Re}$					$2.5 \cdot 10^6$	
^{183}Re					$5.6 \cdot 10^6$	
^{182}Os					$1.3 \cdot 10^8$	
^{183}Os					$1.3 \cdot 10^8$	
$^{183\text{m}}\text{Os}$					$2.1 \cdot 10^8$	
^{185}Os					$1.0 \cdot 10^7$	
^{185}W					$2.9 \cdot 10^8$	
^{192}Au					$7.5 \cdot 10^8$	
^{193}Au					$6.5 \cdot 10^7$	
^{194}Au					$2.2 \cdot 10^5$	
^{192}Hg					$4.3 \cdot 10^8$	
$^{193\text{m}}\text{Hg}$					$1.4 \cdot 10^8$	
^{194}Hg					$2.2 \cdot 10^5$	
^{195}Hg					$5.1 \cdot 10^8$	
$^{195\text{m}}\text{Hg}$					$5.5 \cdot 10^7$	
$^{197\text{m}}\text{Hg}$					$6.9 \cdot 10^7$	
^{203}Hg					$4.5 \cdot 10^6$	
Nicht spezifizerte						$7.4 \cdot 10^4$
α -Aerosole	$4.6 \cdot 10^3$	$4.6 \cdot 10^4$		$2.2 \cdot 10^4$		$3.3 \cdot 10^3$

8.2

Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

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

Ergebnisse 2018

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

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen etwa $0.08 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 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 1.1 mSv .

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.16 \mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.9 mSv pro Jahr. Die höchste, mit den TLD am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) beträgt 1.1 mSv .

Auf Grund der stichprobenweise vom ENSI gemessenen Ortsdosisleistung am Zaun des Paul Scherrer Instituts, Areal Ost ergibt sich hochgerechnet auf ein Jahr eine Ortsdosis von 0.3 mSv ohne natürlichen Untergrund. Im Jahr 2018 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert ca. 0.23 mSv (nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes 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 durchgeführten Dosisleistungsmessungen noch aufgrund der am Zaun positionierten TLD und Neutronendosimeter eine signifikante Erhöhung der Ortsdosisleistung festgestellt werden.

Die Messungen aller Betreiber und des ENSI gaben keinen Hinweis auf eine Verletzung der nach Art. 79 Absatz 2 der Strahlenschutzverordnung anzuwendenden Immissionsgrenzwerte für die Direktstrahlung ausserhalb des Kraftwerksareals von 0.02 mSv pro Woche für Wohn- und Aufenthaltsräume und von 0.1 mSv pro Woche für andere Bereiche.

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

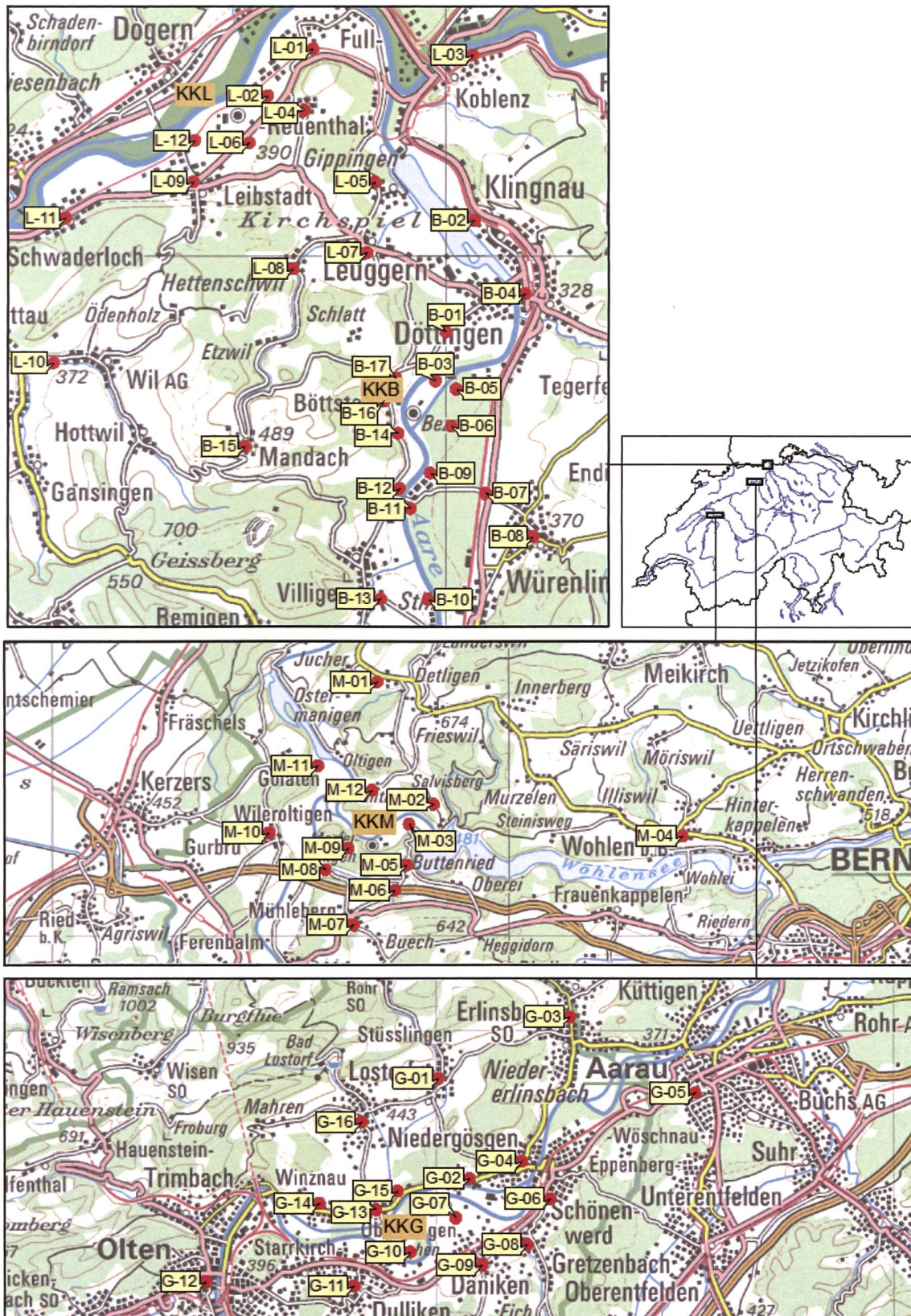
Das MADUK-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und zur Schaffung von Transparenz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

Die Messwerte im Jahr 2018 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren bis auf eine Ausnahme auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Bei der Station M-06 in Mühleberg wurde am 15. Juni um 09:50 Uhr ein einzelner erhöhter Ortsdosisleistungsmesswert von 296 nSv/h registriert. Ein Zusammenhang mit dem Betriebsverhalten von KKM konnte aufgrund der Emissionsdaten und der Routineausbreitungsrechnungen ausgeschlossen werden.

Übersicht

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. 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 externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM und JRODOS/LASAT im ENSI. Die Darstellung B.1 zeigt die Standorte der der MADUK-Messsonden, welche das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung komplettieren.

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 zur Schaffung von Transparenz 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 Beurteilung möglicher Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.



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

Die Daten von MADUK können mit entsprechender Software 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 2018 wurde die Hardware der ANPA-/EMI-Erfassungsrechner in den vier Kernkraftwerksstandorten ersetzt und das Betriebssystem auf den aktuellen Stand gebracht. Für die Erneuerung der MADUK-Stationen erfolgte die WTO-Ausschreibung, welche Ende Jahr mit der Vertragsunterzeichnung erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Die Umsetzung erfolgt in den Jahren 2019 und 2020.

Systemverfügbarkeit und Störungen

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

Die permanente Übertragung der Anlageparameter erreichte insgesamt wiederum eine hohe Verfügbarkeit. Im Berichtsjahr führten geplante Unterhaltsarbeiten seitens der Werke zu Unterbrüchen von 1.5 Stunden bei KKG und 2.8 Stunden bei KKM. Der Ersatz der ENSI-Erfassungsrechner in den Werken konnte bei KKG und KKM ohne Unterbrüche durchgeführt werden, bei KKB1, KKB2 und KKL waren die Unterbrüche kürzer als eine Stunde. Ein defektes Kabel des Kommunikationsproviders verursachte für KKB1 und KKB2 einen Ausfall der Datenübertragung der ANPA- und EMI-Daten in die MADUK-Zentrale über 68 Stunden. Aufgrund der Datenhaltung vor Ort konnten die Daten nachträglich vollständig übernommen werden. Aufgrund eines Fehlers im Erfassungstreiber der MADUK-Zentrale für KKL wurden während 28.6 Stunden nur Nullwerte archiviert. Die korrekten Daten konnten nachträglich archiviert werden. Ein ähnlicher Fehler führte bei KKG zu einem Ausfall der Datenübernahme von einer Stunde. Bei KKM wurde zudem ein Unterbruch in der Datenübernahme von 1.7 Stunden registriert.

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

Tabelle 1:

Auflistung der Störungen bei den MADUK-Messstationen.

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
L-06	6.7	-	Stromunterbruch
B-14	9.5	9.5	Blockierter Datenlogger
L-05	2.0	2.0	Defekte Messsonde
M-08	67.3	67.3	Defekte Messsonde
M-01	2.6	2.6	Defekte Messsonde
B-01	20.5	20.5	Defekte Messsonde
M-02	7.3	7.3	Blockierter Datenlogger
M-10	10.0	10.0	Blockierter Datenlogger
G-03	251.8	251.8	Defektes Netzteil

Die Stationselektronik lief auch im 2018 grösstenteils zuverlässig. Es wurden im Vergleich zum Vorjahr deutlich weniger blockierte Datenlogger registriert. Die Station G-03 fiel aufgrund eines defekten Netzteils über die Weihnachtstage und Neujahr aus. Die Reparatur konnte erst anfangs Januar 2019 ausgeführt werden. Es verbleibt eine Datenlücke von 251.8 Stunden.

2018 waren wiederum diverse Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen von insgesamt 491.5 Stunden zu verzeichnen, deren Ursachen nicht immer ermittelt werden konnten. Insgesamt 408 Stunden bzw. je 68 Stunden pro Station entfallen auf den gleichzeitigen Kommunikationsunterbruch zu den Messstationen B-03, B-05, B-06, B-09, B-11 und B-12 aufgrund einer defekten Kommunikationsleitung, die auch für den oben erwähnten Unterbruch der ANPA- und EMI-Daten von KKB verantwortlich war. Bei der Station G-09 wurde bei Sanierungsarbeiten am Gebäude mit einer Kernbohrung die Kommunikationsleitung durchtrennt. Dies führte zu einem Kommunikationsunterbruch von 50.3 Stunden. Bei der Station B-16 war nach Wartungsarbeiten des Kommunikationsproviders während 22.8 Stunden keine Datenübertragung zwischen Station und Zentrale möglich. Bei allen Kommunikationsstörungen konnten die Daten nachträglich lückenlos archiviert werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.9% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.93%.

Qualitätssicherung

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

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) wird jede MADUK-Sonde vor ihrem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Ansprechvermögen der Sonden wird zwischen den Eichungen mit halbjährlichen Funktionstests geprüft. Bei den Funktionstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer ^{137}Cs -Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten produziert und mit Sollwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunktionskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellenwerten benutzt. Im Jahr 2018 wurden zwei Funktionsprüfungen durchgeführt. Bei beiden Funktionsprüfungen erfüllten alle Sonden inklusive die Reserve-sonden die Prüfkriterien.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme wurden auch im Jahr 2018 Messungen mittels In-Situ-Gammaspektrometrie bei den Sonden der Messringe Beznau und Mühleberg durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre. Ausser ^{137}Cs vom Fallout aufgrund der bisherigen Atombombentests und des Tschernobyl-Unfalls konnten keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen werden.

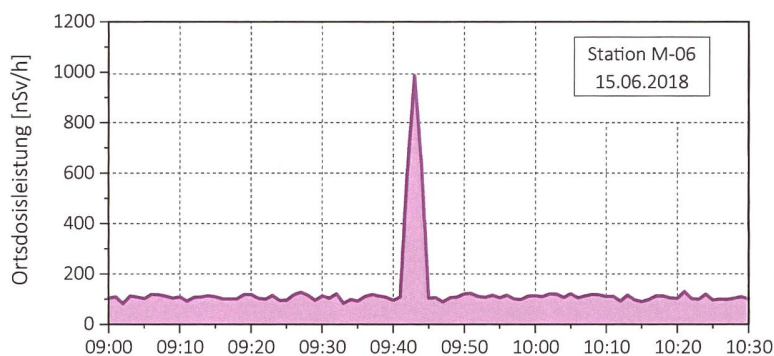
Messergebnisse

Im Jahr 2018 wurden insgesamt 26 Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h registriert (Tabelle 2). Davon waren 25 aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen. Die Schwellenwertverletzung vom 15. Juni bei der Station M-06 entsprach nicht diesem typischen Muster. Um 09:50 Uhr lag der 10-Minuten-Mittelwert der Ortsdosisleistung bei 298 nSv/h, derjenige der Nettodosisleistung bei 184 nSv/h. Die 1-Minutenwerte zeigten einen Maximalwert von 985 nSv/h (Figur 2) und weisen insgesamt nur drei erhöhte Messwerte auf. Die Ergebnisse der routinemässig durchgeführten Ausbreitungsrechnungen für KKM zeigten zum entsprechenden Zeitpunkt eine Ausbreitung in Richtung Südwest.

Tabelle 2:

Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2018.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
21.05.2018 19:40	B-04	0.2	52	156
21.05.2018 19:40	L-03	0.7	73	170
22.05.2018 20:30	L-09	0.5	57	169
22.05.2018 20:40	L-10	0.3	64	179
22.05.2018 20:20	L-11	1.0	76	191
22.05.2018 20:20	L-12	0.7	68	169
04.06.2018 19:40	G-14	0.5	62	192
04.06.2018 19:40	G-15	0.3	52	173
04.06.2018 19:40	G-16	0.2	68	182
08.06.2018 20:10	M-04	0.3	54	149
09.06.2018 19:30	L-08	0.2	51	185
15.06.2018 09:50	M-06	0.2	184	296
03.07.2018 07:30	M-04	0.3	53	186
03.07.2018 10:20	B-10	0.3	56	199
17.07.2018 13:40	B-02	0.5	57	151
17.07.2018 13:50	B-01	0.2	54	159
17.07.2018 20:30	M-04	0.5	57	157
20.07.2018 15:20	G-12	0.3	51	155
17.08.2018 16:40	G-12	0.7	66	167
17.08.2018 16:30	L-12	0.3	55	255
17.08.2018 16:30	L-06	0.3	64	231
17.08.2018 16:30	L-10	0.3	114	306
17.08.2018 16:30	B-15	0.3	76	202
13.09.2018 17:00	G-12	0.5	61	157
18.09.2018 21:00	L-10	1.2	100	260
27.10.2018 20:40	M-01	0.3	52	185

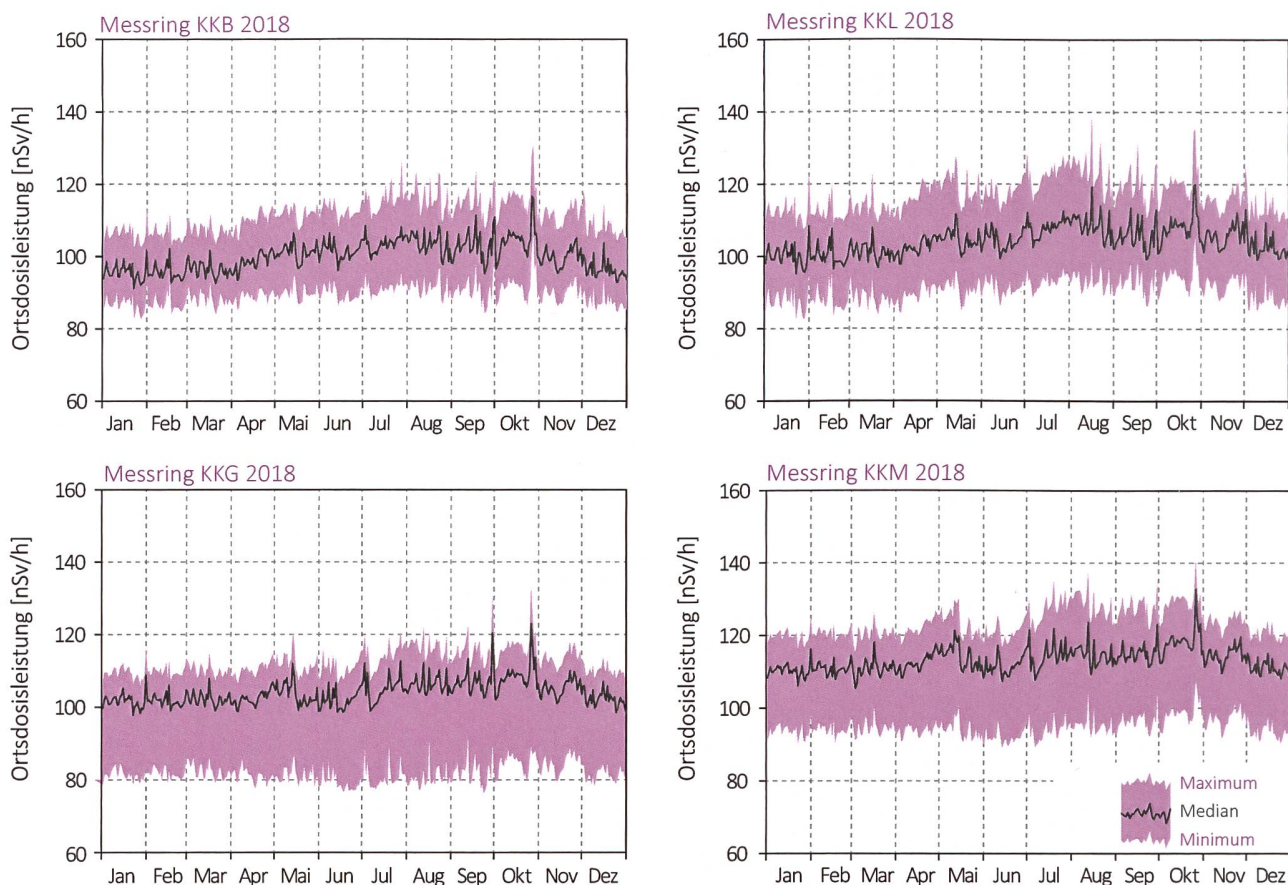


Figur 2:
Verlauf der gemessenen 1-Minuten-Messwerte an der Station M-06.

Die Station M-06 liegt in Richtung Südost von KKM. Ein Zusammenhang mit dem Betriebsverhalten von KKM, auch aufgrund der Emissionsdaten, konnte nicht hergestellt werden. Zum Zeitpunkt der Erhöhung befanden sich in unmittelbarer Nähe zur Messsonde ein Baustelleninstallationsplatz sowie eine Baustelle mit Rotlichtanlage auf der angrenzenden Strasse. Die Ursache für die Erhöhung konnte nicht abschliessend bestimmt werden, am wahrscheinlichsten ist eine Person, die sich zuvor einer Strahlentherapie oder PET-Untersuchung unterziehen musste.

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

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



Figur 3:
Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2018.

8.4

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

M. Jäggi, P. Kramer, H. Hauswirth, M. Heule
Paul Scherrer Institut, Villigen

Zusammenfassung

Seit 1997 führt das PSI im Rahmen der Immissionsüberwachung Radionuklidmessungen an Waldbodenproben und Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (ZWILAG Würenlingen) durch. Die Staubfangplatten sind mit Vaseline beschichtet und werden γ -spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie ^{241}Am und ^{137}Cs sowie natürliche Radionuklide wie ^7Be , ^{210}Pb gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der γ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung von α - und β -Strahlern (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , und ^{244}Cm). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 10 - 50 Bq/kg (2017-2018). 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 60er 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 - 3 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 2018. Die konstanten Isotopenverhältnisse von $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.03) und $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.4) zeigen deutlich, dass die gemessenen Werte für die Aktiniden den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 10 - 25 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 210 und 290 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

oberirdischen 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 Erhebungs-orten 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.

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 Trocken- veraschung wird die Probe in 6 M HCl unter Kochen während 1 Stunde ausgelaugt, so dass die oberflächlich adsorbierten Fallout-Produkte in Lösung gehen. Durch die Zugabe von H_2O_2 (Oxidationsmittel) beim Auslaugen, liegt das Plutonium vorwiegend als Pu^{4+} vor. Die Lösung, welche die Fraktionen von Pu, Am und Cm, aber auch U und Th enthält, wird sodann von der festen Phase über Filtration getrennt.

Diese Leach-Lösung wird auf eine DGATM- und eine Anionenaustauscher-Kolonne (Bio-Rad AG 1-X2, 100-200 mesh) gegeben und durch Zugabe von HNO_3 und HCl-Waschlösungen werden potentiell bei der α -Spektrometrie interferierende, natürliche Radionuklide abgetrennt (z.B. α -Emission des natürlichen Radionuklids ^{228}Th interferiert mit dem künstlichen Radionuklid ^{238}Pu bei 5.4 MeV). Im folgenden Schritt wird die Pu-Fraktion durch Reduktion von Pu^{4+} zu Pu^{3+} mit einer HI/HCl-Lösung eluiert. Die durch die Bio-Rad-Kolonne gelaufene Fraktion mit Am und Cm wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer U/TEVATM-Kolonne zur Retention von U und Th und einer DGATM-Kolonne, die Am und Cm adsorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach-salzsäuren NaNO_2 Lösung. Da Am in sehr geringer Konzentration vorliegt, ist ein weiterer Purifikationsschritt, die Trennung von den Lanthanoiden mit einer TEVA-Säule notwendig. Die Fraktionen von Pu bzw. Am+Cm werden anschliessend eingedampft, kalziniert und in einer Na_2SO_4 - NaHSO_4 -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Actinoiden verwendet wird. Nach der Elektrodeposition werden die Messpräparate über 3 Tage mit hochauflösender α -Spektrometrie gemessen (alle Details in [1]).

Das Radionuklid ^{90}Sr (reiner β -Strahler) wird nach dem Leaching und einer Vorkonzentration via Oxalat-Fällung auf einer Sr-Resin-Kolonne in 8 M HNO_3 -Medium fixiert und mit verdünnter Salpetersäure eluiert, eingedampft und in 2 ml Toluolsulfonsäure gelöst. Die Lösung wird mit der Szintillationsflüssigkeit Ultima GoldTM LLT vermischt und anschliessend im Flüssigszintillations-Spektrometer gemessen.

Staubfangplatten

Die 4 Staubfangplatten, eine pro Himmelsrichtung, befinden sich entlang der Umzäunung des ZWILAG-Areals. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden jeweils ausgewechselt. Im Labor wird die Vaseline von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen eingeschmolzen. Mittels hochauflösender Gamma-Spektrometrie werden Photonen-emittierende Radioisotope wie ^7Be , ^{241}Am , ^{137}Cs und ^{131}I gemessen. Die γ -Messung dauert 15 Stunden.



Figur 1 :
Staubfangplatte am Klingnauer
Stausee (Bild: P. Kramer)

Niederschlag

In einem 14-tägigen Turnus wird das in diesem Zeitraum anfallende Niederschlagswasser aus dem Niederschlagssammler beim ZWILAG-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10 ml dieser Wasserproben werden für die Tritium-Messung verwendet und grossvolumige Monatsmischproben (ideal 6 Liter) werden für die Langzeit Gamma-Spektrometrie genommen. Gemessen werden anthropogene Radionuklide, wie ^{137}Cs für welches bei den Langzeitmessungen über 2 Tage Nachweisgrenzen von 0.04 Bq/Liter erreicht werden.

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 - 3 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für ^{137}Cs (10-50 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der Beitrag von Fallout-Caesium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall. Über die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (im Mittel 0.4) und $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (0.03 ± 0.01) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Actinoiden ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren stammt [1,2]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten Jahre. Ebenfalls eingetragen sind die Werte für ^{226}Ra (als Mass für natürlich vorkommendes, primordiales ^{238}U) und ^{228}Ra (als Mass für ^{232}Th). Diese Werte liegen konstant zwischen 10 - 30 Bq/kg und zeigen keinen Trend mit der Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingebaut sind und im säkularen Gleichgewicht mit ihren langlebigen Mutternukliden stehen. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für ^{238}U 2-3 ppm und für ^{232}Th 5-9 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

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

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

Tabelle 1:

Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten Jahre (2014 - 2018) in Bodenproben Umgebung ZWILAG. Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2014	2015	2016	2017	2018
^{90}Sr	1 - 3	1 - 3	<1 - 2	<1 - 2	<1 - 2.5
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs (1)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	20 - 60	10 - 60	10 - 50	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
$^{239+240}\text{Pu}$	0.1 - 0.7	0.1 - 0.7	0.2 - 0.8	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	10 - 24
^{228}Ra	20 - 40	20 - 40	20 - 40	20 - 40	13 - 25

(1) Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2014-2018 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, 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 iode, gaz, eaux de rejet). Les exploitants sont par ailleurs tenus de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois aux autorités.

La surveillance se poursuit par la mesure des immissions des centrales nucléaires (concentrations radioactives effectivement mesurées dans l'environnement). Tous les compartiments environnementaux sont examinés, de l'air jusqu'aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma in situ) complètent ces analyses en permettant d'évaluer directement la radioactivité déposée au sol. Ce programme de surveillance, coordonné par l'OFSP, englobe non seulement les propres mesures de l'Office mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut de radiophysique (mesures alpha et bêta), du laboratoire de Spiez (^{90}Sr dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aéroradiométrie etc.), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université

de Berne (^{14}C et ^{85}Kr) et du LUBW (Baden-Württemberg), conformément au programme germano-suisse autour de la centrale nucléaire de Leibstadt. L'IFSN met également à disposition de l'OFSP un accès direct à son réseau MADUK, mesurant en continu le débit de dose ambiante au voisinage des centrales nucléaires. L'OFSP se doit ensuite de procéder à l'examen critique de l'ensemble de ces données pour évaluer de manière pertinente l'influence des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce programme de surveillance des immissions au voisinage des installations nucléaires. Le tableau 1 indique les chapitres à consulter pour accéder aux résultats plus détaillés relatifs à un compartiment de l'environnement particulier ou un radionucléide spécifique.

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

Méthodologie

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

Résultats

Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que les 4 centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (KKB 1 et 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2018 (voir Chap. 8.1).

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population (adulte) avoisinante en termes de doses entre 1981 et 2018. L'augmentation significative de 1986 au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est due à un rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère. À partir des mesures de terre et d'herbe effectuées par la suite par la commission fédérale de surveillance 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 - 4.2
Précipitations (γ , ^3H)	4.1
Milieu aquatique	4.4
Mesures in situ	3.1
Sol et herbe (γ , ^{90}Sr)	4.7
Sol (Pu, ^{241}Am)	7.2
^{14}C dans les feuillages	7.1
Denrées alimentaires	5

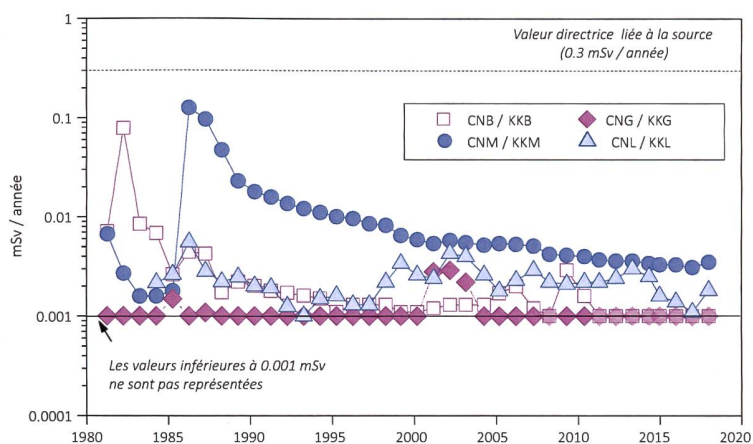


Figure 1:

Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulées par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2018 (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.

la radioactivité de l'époque, l'activité rejetée en septembre 1986 avait pu être estimée à 11 GBq (50% de ^{134}Cs , 40% de ^{137}Cs , 7% de ^{60}Co et quelques 3% de ^{65}Zn) et donc inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. Comme le montre la figure 1, l'impact de ce rejet très localisé a constamment diminué depuis. En tenant compte des rejets des années précédentes, les doses dues aux émissions des centrales nucléaires reçues par les personnes adultes les plus exposées se sont échelonnées en 2018 entre < 0.001 mSv pour KKB et KKG, env. 0.002 mSv pour KKL et env. 0.003 pour KKM. Dans le cas des petits enfants (< 1 an), ces doses atteignent env. 0.004 mSv par an au voisinage de KKL et KKM. Pour ces installations, la contribution majeure provient des rejets atmosphériques : essentiellement du ^{14}C pour Leibstadt avec, en plus, à Mühleberg la contribution rémanente des résines rejetées en 1986. Notons que les doses reçues par les personnes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires citées plus haut ont été calculées sur la base des rejets effectifs, en appliquant des modèles de dispersion et en tenant compte des temps de séjour, des habitudes alimentaires et de nombreux paramètres biologiques, physiologiques et environnementaux (voir directive G14 de l'IFSN pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

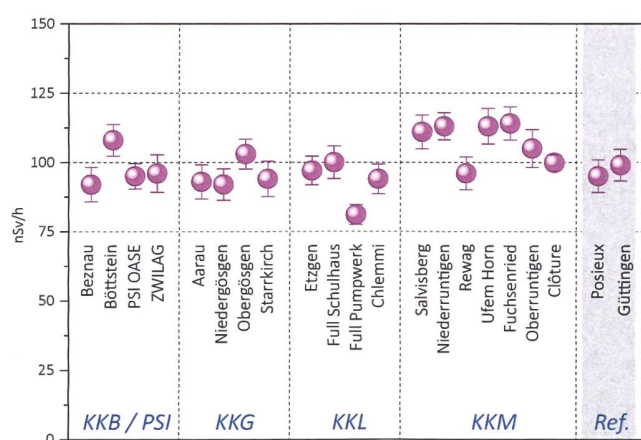


Figure 2: Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2018 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres thermoluminescents (TLD) et par des mesures périodiques effectuées par l'IFSN à la clôture des installations. Les résultats de cette surveillance ont mis en évidence une contribution clairement mesurable du rayonnement direct en certains points de la clôture des réacteurs à eaux bouillantes, à savoir, Leibstadt et Mühleberg, ainsi que, dans une moindre mesure, au PSI (voir Chapitre 8.2). A Mühleberg, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation de la dose ambiante annuelle de 1.1 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 également 1.1 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel de 0.6 mSv/an). Ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés. En effet, cet article stipule que la

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

Mesures dans le milieu atmosphérique

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

L'année 2018 a été une année de transition pour la surveillance de l'air (aérosols) au voisinage des centrales nucléaires. La plupart des stations du nouveau réseau automatique de mesure de la radioactivité dans l'air, URAnet aero (voir chapitre 4.2), dédiées à la surveillance de ces installations étaient déjà en fonction, mais le réseau n'a été officiellement mis en service qu'en automne 2018. Les anciens collecteurs à moyen débit (FWP) situés à proximité des centrales nucléaires ont donc été maintenus jusqu'en décembre 2018. Ces anciens collecteurs ont été démontés début 2019 et ne sont aujourd'hui plus en fonction. Si les limites de détection atteintes avec le réseau automatique de mesure URAnet aero sont environ 1'000 fois supérieures à celles atteintes après la mesure des filtres aérosols à moyens débit en laboratoire, il faut rappeler que le premier réseau fournit un résultat toutes les 12h, alors que les aérosols étaient collectés sur les filtres pendant

1 mois, puis mesurés pendant 1 à 2 jours en laboratoire, pour atteindre les performances mentionnées. Ce dispositif n'était pas assez réactif pour la surveillance de l'air au voisinage des centrales nucléaires. Par ailleurs, les limites de détection atteintes avec les sondes de mesure du réseau URAnet aero après 12 h (p.ex 1 mBq/m³ pour le ¹³⁷Cs) sont très largement inférieures aux valeurs limite d'immissions selon l'ORaP (p.ex. 8.5 Bq/m³ pour le ¹³⁷Cs) et sont donc parfaitement compatibles avec les objectifs de surveillance fixés. Le rôle du réseau n'est en effet pas de mesurer les traces de radioactivité présentes dans l'environnement, rôle assuré par les stations du réseau HVS (High Volume Sampler), mais de mesurer en permanence les immissions dans l'air et permettre une évaluation réaliste des doses reçues par la population dans un délai compatible avec la survenue d'un incident.

Aucun radionucléide d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2018. Les activités du ¹³⁷Cs sont en effet restées inférieures à la limite de détection d'env. 1 mBq/m³ (pour une mesure de 12h). Les résultats 2018 des mesures mensuelles des filtres aérosols des collecteurs à moyen débit des environs des centrales nucléaires ainsi que du PSI ont confirmé la prédominance des radionucléides naturels ⁷Be et ²¹⁰Pb, avec des valeurs comprises respectivement entre 0.4 et 6.1 et entre 0.1 et 2.4 mBq/m³ (mesures OFSP et PSI). Le seul radionucléide d'origine artificielle détectés sur les filtres aérosols à moyen débit est le ¹³⁷Cs (valeur maximale de $1.4 \pm 0.5 \mu\text{Bq/m}^3$) et provient 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 2018. Toutefois des traces de ²⁴Na, 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 (HVS) de la station de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer. La concentration maximale mesurée s'élève à $71 \pm 37 \mu\text{Bq/m}^3$ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immissions dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/m³.

Les activités des émetteurs gamma d'origine artificielle dans les échantillons de pluie collectés aux environs des centrales nucléaires de Mühleberg, Leibstadt, Gösgen et Beznau ainsi que ceux du voisinage du PSI et du ZWILAG sont toutes restées inférieures aux limites de détection, qui se situent entre de 0.4 à 3.0 mBq/l par exemple pour le ¹³⁷Cs.

Les résultats des mesures du tritium (³H) dans les échantillons mensuels de précipitations des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. Les concentrations de tritium mesurées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires et du ZWILAG sont généralement restées proches des seuils de détection de 1 à 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs légèrement plus élevées, notamment au voisinage de KKB. Une concentration mensuelle de tritium 84 Bq/l a été mesurée au voisinage du PSI en mars 2018. Si cette valeur est significativement plus élevée que celles habituellement mesurées dans les stations de référence, elle n'a que peu d'impact radiolo-

Tableau 2:

Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2018.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)
Niederruntingen * (environs KKM)	< 2 - 3.1	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 - 2.6	-
Full (environs KKL) *	< 2 - 5.3	-
Beznau (environs KKB) **	< 1.7 - 19.2	5.6
PSI **	2.3 - 84	8.8
ZWILAG **	< 1.7 - 7.9	3.4

* mesures OFSP / ** mesures PSI

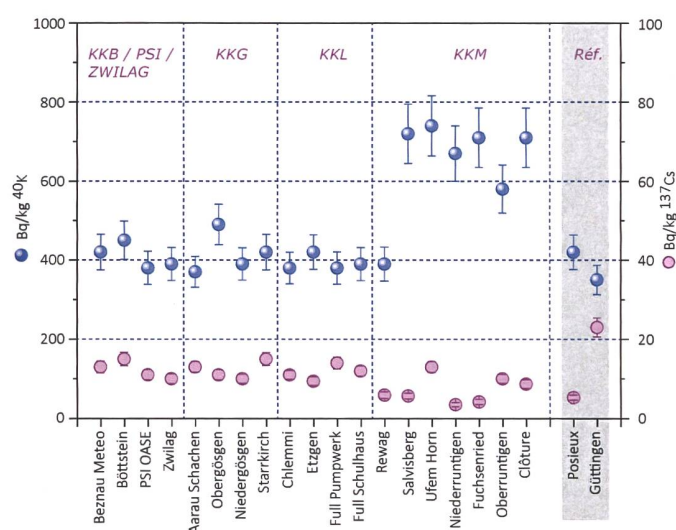


Figure 3:

¹³⁷Cs et ⁴⁰K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2018 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

gique puisque qu'une telle concentration ne représente que 0.4% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ORaP à 20'000 Bq/l pour le ^3H dans les eaux accessibles au public.

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C . Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2018 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 94 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt et de 91 pour mille aux environs de la centrale de Mühleberg. Ces valeurs, en particulier pour Leibstadt, sont bien inférieures à celles enregistrées au cours des années précédentes. Les doses supplémentaires qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales sont ainsi très faibles, de l'ordre de 1 micro-Sv par an. 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 2018 pour les échantillons de sol et de plantes prélevés au voisinage des installations nucléaires montrent à nouveau que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que la radioactivité d'origine artificielle (^{137}Cs , ^{90}Sr , Pu et Am) provient principalement des essais nucléaires des années 60 et de l'accident de Tchernobyl. La figure 3 présente à titre d'exemple la contamination rémanente en ^{137}Cs dans les sols prélevés par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires en 2018. 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.

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

Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1 il y a une

dizaine d'années, la majeure partie des produits d'activation tels que le ^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co était rejetée dans les eaux fluviales par la centrale de Mühleberg. Mais depuis 2016 les activités rejetées (hors tritium) par la centrale nucléaire de Mühleberg ont à leur tour significativement baissé à tel point qu'elles sont depuis 2017 inférieures à celles rejetées par les centrales de Beznau et de Leibstadt. A noter que depuis 2016 toutes les centrales nucléaires suisses respectent la valeur cible de rejet de 1GBq/an pour les rejets de substances radioactives (hors tritium) dans les cours d'eau. Comme corolaire à cette diminution des rejets, aucune trace de ^{54}Mn ou des isotopes du cobalt n'a plus été mise en évidence dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln depuis 2016.

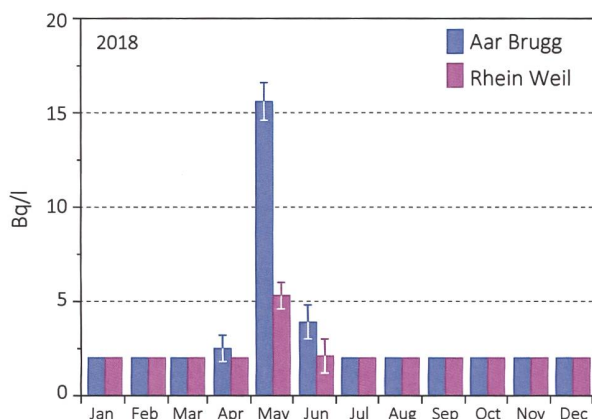


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2018.

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.

On notera 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 de mars, avril et août 2018. Par conséquent, les mesures des radionucléides pour les mêmes périodes sont manquantes.

Les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2018 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 mai-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen, avant la révision.

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

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. Dans les sédiments prélevés dans le Rhin à Pratteln, seul le ^{60}Co a sporadiquement pu être détecté. Comme en 2017 et 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 2018. Les résultats obtenus dans le cadre de la surveillance des émetteurs gamma dans les sédiments reflètent donc également la diminution significative des rejets dans le milieu aquatique par les centrales nucléaires.

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 2018: en plus des traces habituelles de ^{137}Cs provenant de la remobilisation d'anciens dépôts, les échantillons prélevés en octobre à Hagneck et Klingnau ont présenté un faible marquage en ^{60}Co (1.2 Bq/kg et 3.5 Bq/kg resp.) et pour l'échantillon de Hagneck en ^{54}Mn (0.8 Bq/kg). De faibles traces de ^{131}I ont par ailleurs pu être mises en évidence dans les sédiments prélevés à Klingnau, mais dans ce cas une origine médicale est probable. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle autre que le ^{137}Cs n'a par contre été mesuré dans l'échantillon de plantes aquatiques prélevé à Pratteln.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval de KKM, KKB et KKL en 2018 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, à l'exception de traces non quantifiables de ^{137}Cs dans l'échantillon prélevé à Döttingen.

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

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

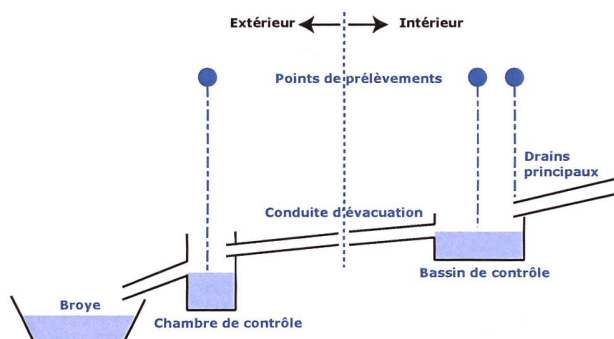


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

En 2018, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4 h aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyée à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2018. 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 0.5 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^3H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2018 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 6.8 ± 0.6 Bq/l et 6.5 ± 0.7 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 2018.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2018.

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), Genève

Résumé

Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que, pour 2018, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose efficace délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.014 mSv, soit 5% de la limite. Cette dose a été principalement induite par le rayonnement diffusé et les émissions atmosphériques de radioéléments de courtes demi-vies. A l'exception de quelques échantillons prélevés dans deux cours d'eau, aucun radioélément n'a été détecté dans le cadre du programme de surveillance des immissions. Le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN demeure 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.

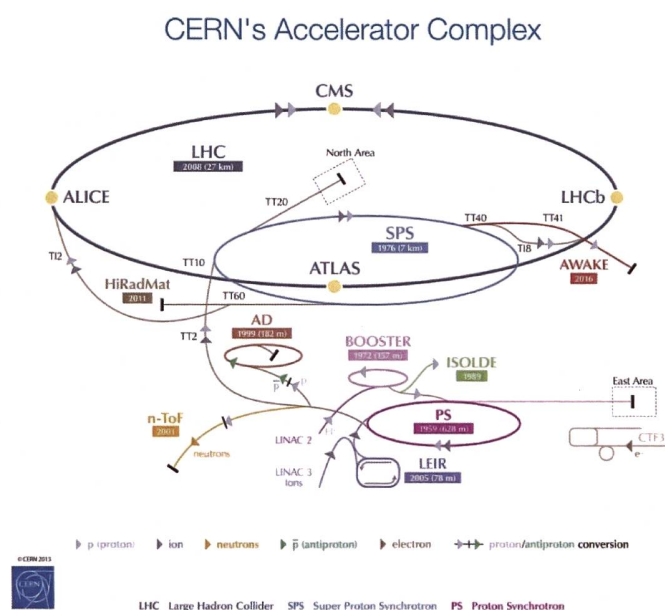


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire en fin de chapitre).

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 entre autres lorsque les particules se percutent entre-elles ou percutent des cibles fixes, ainsi que lors de l'extraction et de la collimation des faisceaux. Les accélérateurs sont blindés et les plus puissants d'entre eux sont situés profondément sous terre, de telle manière à ce que seule une fraction infime des rayonnements traverse ces protections; ce type de rayonnement est nommé rayonnement diffusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Conséquemment, le rayonnement diffusé, les effluents gazeux et liquides sont surveillés en continu (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 requière une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radionucléides produits sont principalement des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités. Pour plus d'information, se référer au site : voisins.web.cern.ch/fr/radiation.

Lorsque les accélérateurs sont arrêtés, l'émission atmosphérique de gaz de demi-vies courtes et le rayonnement diffusé cessent. Néanmoins, les composantes des tunnels, des machines, des cibles et des détecteurs sont sensiblement marquées par leur exposition au faisceau; celles-ci contiennent donc des radionucléides produits par activation. L'eau d'infiltration des tunnels peut donc toujours potentiellement se charger en radionucléides lors de sa percolation, avant d'être évacuée vers les eaux de surface. De la même manière, des traces de 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

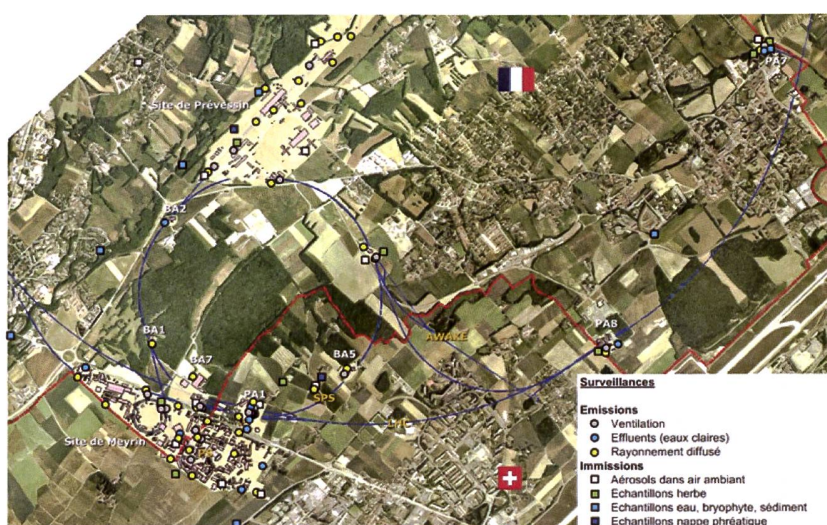


Figure 2:
Région frontalière franco-suisse : sites de Meyrin et de Préessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS) et du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonnage du CERN; ceux qui concernent le territoire suisse y sont tous représentés, excepté le point de collecte des échantillons 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 prédits par des calculs. Chaque station est équipée d'une chambre d'ionisation argon dédiée à la mesure en continu des photons et des particules chargées et pénétrantes, comme les muons, ainsi que d'un moniteur de neutrons. En 2018, 40 stations de ce type étaient en opération. Les points d'extraction d'air, d'où des substances radioactives peuvent être émises, sont équipés de stations de surveillance qui mesurent en continu les radionucléides gazeux à demi-vie courte et échantillonnent les aérosols sur des filtres périodiquement analysés en laboratoire. En 2018, 40 stations étaient en

opération. De manière similaire, les points de rejet des eaux claires qui sont déversées dans les eaux de surfaces (rivières) sont équipés de stations de surveillance de l'eau (13 stations en 2018); 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 contenus dans l'air ambiant (11 stations), des échantillons d'herbe (12 points d'échantillonnage), d'eau, de bryophytes (mousses) et de sédiments dans les cours d'eau (14 points), de l'eau des nappes phréatiques (14 points), ainsi que des échantillons de produits d'agriculture locaux, tels que p. ex. blé, graines de tournesol, asperges et vin.

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

Résultats 2018

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2018

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

Rayonnement diffusé

La principale source de rayonnement diffusé du site de Meyrin est le complexe du PS. Une petite fraction des neutrons produits dans les accélérateurs peut diffuser à travers le blindage, gagner en hauteur et interagir avec les composants de l'air. Une partie d'entre eux vont être redirigés vers le sol. Ce phénomène dit du *skyshine* contribue à une faible hausse de l'équivalent de dose ambiant. Quant aux doses photons nettes enregistrées en barrière des sites, ces dernières sont à la fois d'origines anthropique (activités du CERN) et naturelle. La fraction d'origine anthropique est induite d'une part par le rayonnement diffusé (p. ex. muons) et d'autre part par les photons émis par les gaz de demi-vies courtes rejetés par les installations (voir ci-dessous). La fraction d'origine naturelle provient majoritairement de précipitations qui impliquent un lessivage (*washout*) des radioéléments naturels présents dans l'air, tels que les filles du radon. Lorsque ces radioéléments sont ramenés au sol, l'équivalent de dose ambiant y est sensiblement plus élevé.

La Figure 3 présente les doses équivalentes ambiantes nettes, telles que mesurées par les moniteurs de rayonnement diffusé localisés aux abords des sites situés en Suisse.

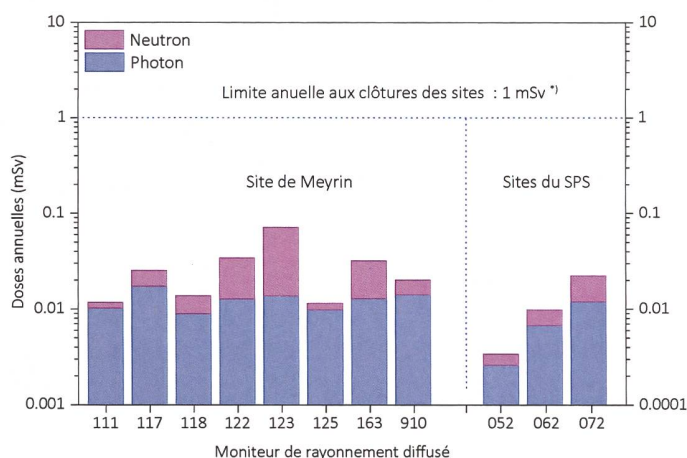


Figure 3: *Equivalent de dose ambiant annuel net enregistré par les moniteurs de rayonnement diffusé (CERN, 2018). * Limite définie dans la réglementation du CERN.*

Tableau 1:
Rejets radioactifs dans l'air en 2018.

Origine du rejet	¹¹ C, ¹³ N, ^{14,15} O, ⁴¹ Ar	⁷ Be aérosol	Bêta aérosol	Tritium	¹³¹ I
	TBq	MBq	MBq	GBq	MBq
LINAC 4	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
PS BOOSTER	0.50	48	1.0	1.9	< LD
ISOLDE via MEDICIS*	0.006	0.004	< LD	0.004	0.043
ISOLDE	8.6	2.1	0.7	5.7	250
Anneau principal PS	0.84	< LD	< LD	5.3	< LD
TT70 transfert PS-SPS	0.16	< LD	< LD	3.3	< LD
n-TOF	4.4	0.54	0.001	55	18
East Area	1.1	12	0.53	0.11	< LD
TT10 injection PS-SPS	3.6	33	1.5	8.9	< LD
SPS BA5	0.039	< LD	< LD	2.1	< LD
HIRADMAT	0.007	0.001	< LD	4.3	< LD
LHC Machine Secteurs 2->1, 8->1	3.3	< LD	0.002	< LD	< LD
LHC Expiriment ATLAS	0.006	< LD	0.002	< 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.

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère qui concernent le territoire suisse sont résumés au Tableau 1. Dû à la faible hauteur des cheminées ainsi qu'aux courtes demi-vies des radionucléides émis, l'impact reste local et est minime. Les radionucléides se répartissent en cinq catégories: les gaz radioactifs de demi-vie courtes ¹¹C, ¹³N, ¹⁴O, ¹⁵O et ⁴¹Ar; le ⁷Be; l'activité bêta total (majoritairement ³²P et ³³P), le tritium (³H) ainsi que les isotopes de l'iode, représentés par l'¹³¹I. Cette dernière catégorie est produite par irradiation de cibles composées d'éléments lourds, telles qu'exploitées par les expériences ISOLDE et n-TOF.

Rejets de substances radioactives dans les cours d'eau

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

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

Le Tableau 2 présente les rejets de 2018, 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 ⁴⁰K naturel dans l'eau, est attribué au ²²Na exclusivement. Par conséquent, les rejets déclarés en bêta/gamma (²²Na) 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).

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

Tableau 2 :

Rejets radioactifs dans les cours d'eau en 2018.

Origine du rejet	Tritium	Bêta/ gamma (²² Na)	¹¹ C, ¹³ N, ^{14,15} O	²⁴ Na	Rejeté dans:
	GBq	MBq	GBq	GBq	
Site de Prévessin, SPS	110	87	2.8	0.56	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	1.1	16	<LD	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Sud-Ouest	0.067	1.2	<LD	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	0.54	0.59	<LD	<LD	Le Lion (F)
Site SPS BA6 + site LHC PA1	< LD	68	17	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	0.15	3.0	n.m.*	n.m.*	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS, rejet par le site du LHC PA8	2.2	3.2	<LD	<LD	Le Nant (F)

** n.m. : dû à un problème technique relatif à l'échantillonnage en continu, les données ne sont pas disponibles pour 2018. Noter qu'aucun radionucléide de demi-vie courte n'avait été identifié par le passé.

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 au CERN pouvant capter des rejets d'accélérateurs et
- une station de référence très éloignée des accélérateurs (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'échantillonneur d'aérosols à haut volume situé au LHC-PA7 a été suffisamment sensible pour détecter le ²²Na naturel, aussi produit par rayonnement cosmique. 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 surveillance des émissions du LHC PA7 n'ont pas mis de ²²Na en évidence.

Concernant l'environnement aquatique, des radionucléides ont été mesurés dans les échantillons ponctuels prélevés dans les rivières le Lion (F) et dans le ruisseau du Nant à Ferney-Voltaire (F) (voir Tableau 3). Les échantillons consistaient en de l'eau, des bryophytes et des sédiments. Les bryophytes sont d'excellents bioaccumulateurs de pollution. Alors que la mesure de l'eau de rivière est une valeur instantanée, ces végétaux, qui peuvent être assimilés à des collecteurs, permettent d'identifier des radionucléides ayant été présents dans l'eau.

Aucun autre radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les autres échantillons d'eau, de bryophytes et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collectés en septembre. Bien que les radionucléides aient été mesurés dans des échantillons provenant du territoire français, ils sont mentionnés dans ce présent rapport car le Lion (F) rejoint l'Allondon (F/CH), qui termine son cours dans le Rhône

Tableau 3 :

Concentrations en radioéléments mesurés dans les échantillons ponctuellement prélevés dans les cours d'eau récepteurs des effluents du CERN en 2018. Les valeurs des concentrations mesurées dans les solides sont exprimées en (Bq/kg) masses sèches.

Origine de l'eau	Cours d'eau	Municipalité	³ H	⁵⁴ Mn	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn
			Bq/l		Bq/kg	Bq/kg
Site de Prévessin	Le Lion	Bugnon (F)	740 ± 40	210 ± 25	3 ± 2	0.2 ± 0.1
Zone Nord via	Le Lion	St-Genis (F)	3 ± 2	11 ± 3	< 0.3	< 0.2
SPS BA2 (F)	L'allondon	Moulin Fabry (F)	7 ± 2	3 ± 2	< 0.3	< 0.2
Ancienne expérience						
CNGS (zone AWAKE) via LHC PA8 (F)	Le Nant	Ferney-Voltaire (F)	3 ± 2	< 0.2	< 0.3	< 0.2

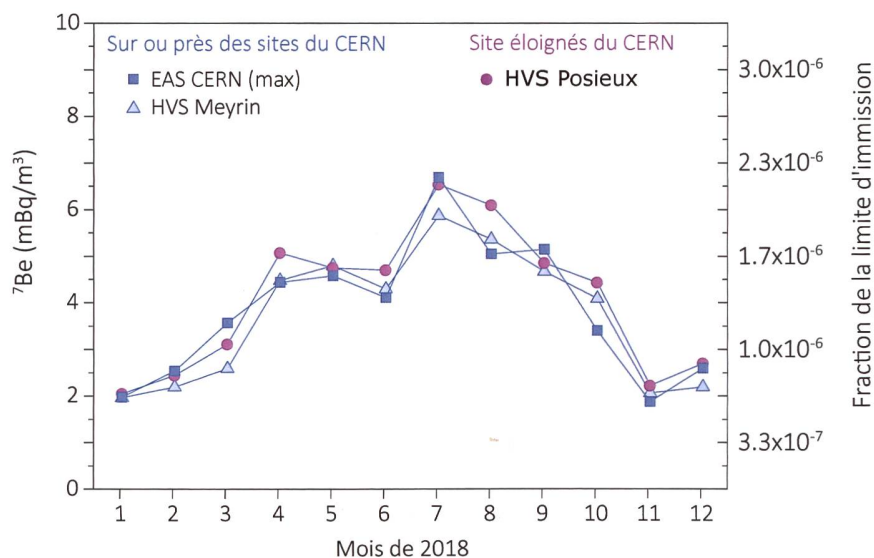


Figure 4:

Concentrations mensuelles moyennes mesurées en ^7Be mesurées par le biais des stations d'échantillonnage des aérosols des sites du CERN. Pour les stations EAS CERN, seule la valeur maximale est représentée. Ces valeurs corréleront avec celles mesurées par le biais de deux échantillonneurs OFSP à haut débit, soit les HVS Meyrin et HVS Posieux, le premier se situant sur le site CERN de Meyrin et le second à Posieux/Fribourg [5].

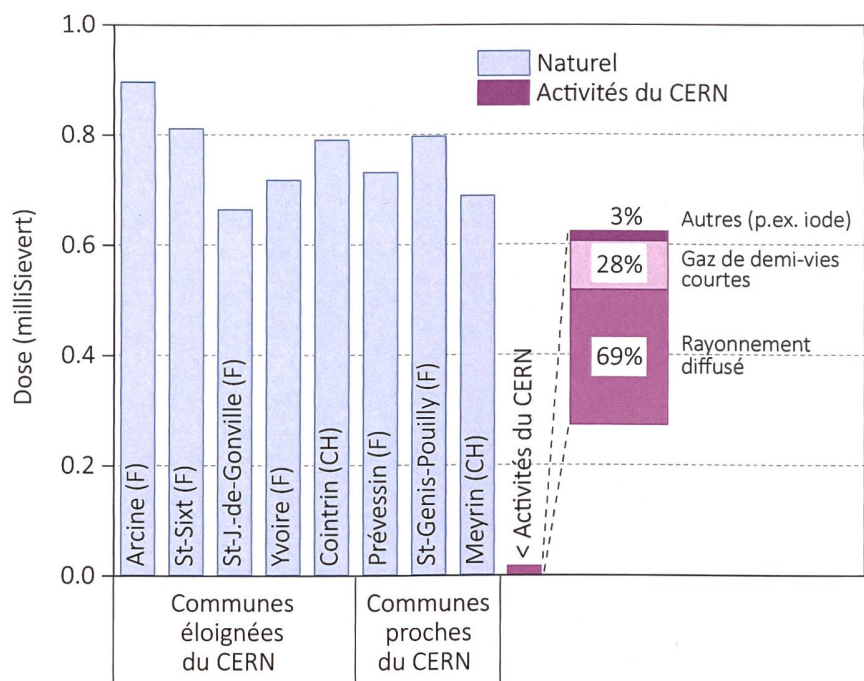


Figure 5:

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 de 0.3 mSv définie dans la réglementation du CERN [1].

(CH/F), tandis que le Nant (F) est un affluent du Gobé-Vengeron (F/CH) qui se déverse dans le lac Léman (CH). Le Nant d'Avril (CH), dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches, fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève, mandaté par l'Office Fédéral de la Santé Publique (se référer au chapitre 8.7).

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 faible.

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du groupe de référence pour le site de Meyrin du CERN en 2018 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 dispersion amélioré basé sur les directives [3, 4]. La dose efficace totale de 0.014 mSv est principalement induite par le rayonnement diffusé et par les rejets en gaz de demi-vies courtes. Ces paramètres contribuent à hauteur de 97% à la dose et sont surveillés en continu, garantissant ainsi un temps de réaction optimal en cas de dégradation de fonctionnement des installations. Noter qu'il n'a pas été possible de tenir compte de l'éloignement du groupe de population 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 population de référence exposé aux rejets d'effluents liquides dans le Nant d'Avril a reçu une dose inférieure à 0.0005 mSv.

Conclusions

- Les résultats du programme de surveillance effectué par le CERN, combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, pour l'année 2018 et à l'instar des années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1];
- Des radionucléides ont été détectés dans des échantillons prélevés dans deux rivières. Les valeurs de concentration sont restées inférieures aux limites d'immission applicables [2]. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN demeure 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 CERN.

Références

- [1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2017), Annexe 3.
- [3] Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), Calcul de l'exposition aux radiations ionisantes dans l'environnement due à l'émission de substances radioactives par les installations nucléaires, IFSN-G14/f rév.1 (2009).
- [4] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
- [5] S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement : Résultats des mesures 2018 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2019)

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
MEDICIS	Medical Isotopes Collected from ISOLDE – Isotopes médicaux collectés d'ISOLDE
n-TOF	neutron Time-Of-Flight, expérience impliquant une source de neutrons de spallation
PSB	Proton Synchrotron Booster- accélérateur injecteur pour le PS et pour l'ISOLDE
PS	Synchrotron à protons
SPS	Super synchrotron à protons

8.7

Environnement du CERN

(mesures OFSP)

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

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

J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus

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

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE) du CERN, l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnements au voisinage du centre de recherche. L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2018 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Même si des traces de radionucléides, produits dans les installations du centre de recherche, ont pu être détectées, les activités maximales enregistrées sont restées nettement inférieures aux limites suisses et leur impact radiologique peut être considéré comme minime.

Programme de surveillance de l'OFSP

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

- Dosimétrie d'ambiance du rayonnement gamma ainsi que des neutrons sur une base trimestrielle (13 dosimètres à thermoluminescence-TLD- évalués par l'IRA) et mesures instantanées de l'équivalent de dose ambiant effectuées par l'OFSP sur 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 ^3H dans le vin).

A noter qu'après l'arrêt hivernal pour maintenance, les installations du CERN ont redémarré fin mars et ont fonctionné jusqu'à mi-décembre 2018.

Mesures de l'exposition ambiante

Treize sites ont été surveillés en 2018, 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 2018 sont restées partout proche de l'irradiation naturelle (environ 0.2 mSv par trimestre).

Les doses des neutrons sont généralement restées faibles ou inférieures à la limite de détection de 0.02 mSv par trimestre sauf en trois points. Ainsi, sur le site de Préveessin, en particulier à proximité du Hadron stopper, une valeur de 0.8 mSv a été enregistrée aussi bien au 2^{ème} qu'au 3^{ème} trimestre 2018. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles enregistrées habituellement en ce point. Au 4^{ème} trimestre, la dose des neutrons a baissé, mais avec 0.25 mSv est restée supérieure à l'irradiation naturelle. Par ailleurs, les doses de neutrons enregistrées 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) étaient également supérieures à l'irradiation naturelle au 2^{ème} ainsi qu'au 3^{ème} trimestre. Les doses observées sont cependant restées peu élevées (maximum de 0.157 mSv par trimestre) par rapport aux valeurs atteintes par le passé (jusqu'à environ 1 mSv).

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2018 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'équi valent de dose ambiant ($H^*(10)$) pour les gammas se sont échelonnées entre 86 et 116 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 100 ± 4 nSv/h; moyenne des sites distants 102 ± 11 nSv/h).

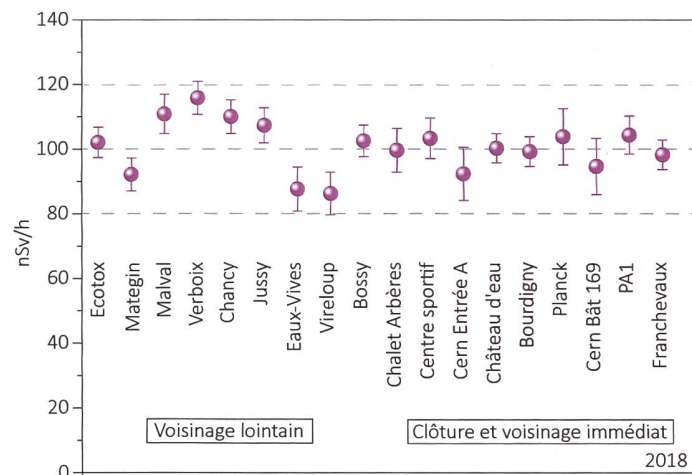


Figure 1: Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2018 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.

Mesures dans le milieu atmosphérique

Même si le nouveau réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air, URAnet, n'a été officiellement mis en service qu'en septembre 2018, la station de mesure située au CERN est déjà opérationnelle depuis début 2017. Les nouveaux moniteurs spectrométriques permettent de mesurer en continu les concentrations individuelles des différents émetteurs gamma présents dans l'air (aérosols) (voir chapitre 4.2). Si les concentrations du ^{214}Pb et du ^{214}Bi , descendants du radon, sont clairement mesurables, les concentrations des émetteurs gamma d'origine artificielle sont toutes restées inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 1 à 3 mBq/m³ pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2018. Le moniteur d'iode gazeux également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l' ^{131}I gazeux n'a révélé aucune valeur supérieure à la limite de détection de 50-60 mBq/m³.

Les résultats des mesures hebdomadaires des filtres aérosols à haut débit (HVS) du CERN ont confirmé, comme les années précédentes, la prédominance des radioéléments d'origine naturelle, tels que ^7Be et ^{210}Pb (cf figure 2). Le cas du ^7Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production dans les tunnels du CERN). Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ^7Be mesurées en 2018 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Tableau 1 :

Concentrations du ^7Be mesurées en 2018 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)	1.4 - 6.8	3.8 ± 1.7
Posieux/FR	1.2 - 8.0	4.1 ± 1.9
Klingnau/AG*	1.0 - 7.4	3.8 ± 1.6
Göttingen/TG	1.3 - 7.3	4.0 ± 1.6
Cadenazzo/IT	0.8 - 8.4	4.6 ± 1.8

Des traces de ^{22}Na , également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre 0.1 et 0.7 $\mu\text{Bq/m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont, comme partout en Suisse, été détectées à plusieurs reprises, mais les activités sont restées très faibles (valeur maximale de $0.7 \pm 0.2 \mu\text{Bq/m}^3$).

Les seuls radio-isotopes attribuables aux activités du CERN sporadiquement mis en évidence dans les filtres aérosols en 2018 sont le ^{24}Na (valeur maximale de $110 \pm 45 \mu\text{Bq/m}^3$) et le ^{131}I (valeurs comprises entre 0.3 ± 0.2 et $2.0 \pm 0.5 \mu\text{Bq/m}^3$). Ces radionucléides, d'une

demi-vie de 15 h pour le ^{24}Na et de 8 jours pour le ^{131}I , sont produits dans les accélérateurs de particules du centre de recherche (^{131}I est produit par les installations ISOLDE et nTOF, voir chap. 8.6).

Notons encore que l'impact radiologique de ces traces de ^{24}Na et de ^{131}I est tout à fait négligeable, puisque les concentrations les plus élevées enregistrées en 2018 pour ces radionucléides ne représentent qu'environ 0.0002% des limites d'immissions définies pour chacun de ces radionucléides 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.

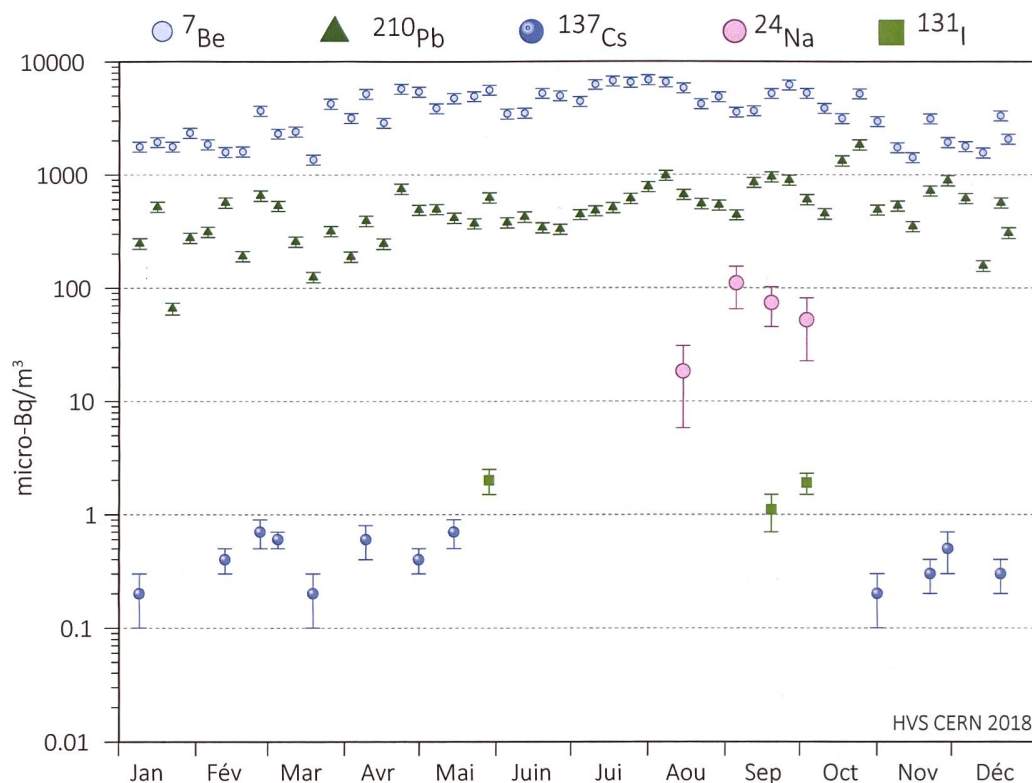


Figure 2 :

Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2018.

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' ^{41}Ar , un gaz rare de demi-vie inférieure à 2 heures produit dans les accélérateurs du centre de recherche, ont pu être enregistrées dans l'air sur ce site. La présence de ^{22}Na était également clairement visible sur le spectre in situ enregistré sur ce même site. Comme le ^7Be , le ^{22}Na 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.

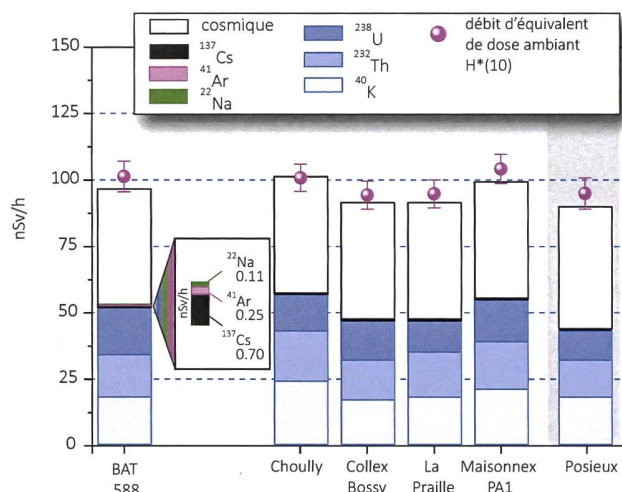


Figure 3 :

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 2018. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

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 2018. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit 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.

24 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) dans le Nant d'Avril entre le 4 décembre 2017 et le 30 novembre 2018, avec une intégration des prélèvements de 2.4 à 20.4 jours. Suite à une panne de l'échantillonneur, la période du 18 au 28 août 2018 est manquante.

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

1 J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°19 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Décembre 2017 – Novembre 2018; Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Janvier 2019)

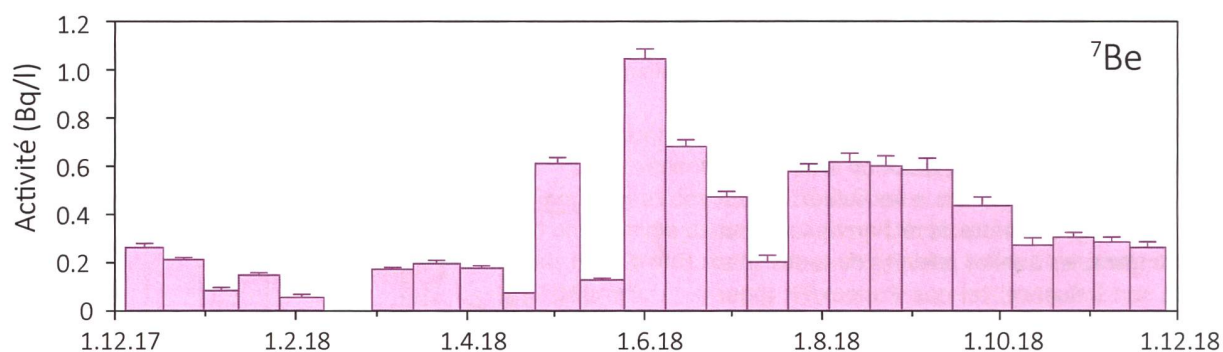


Figure 4 :
Activités du ^7Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'Avril entre décembre 2017 et novembre 2018.

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. Les activités maximales sont celles du ^7Be , avec une moyenne de 0.35 Bq/l lorsque l'isotope est présent. La plus forte activité spécifique de ^7Be (1.04 ± 0.04 Bq/L) a été mesurée entre le 25 mai et le 08 juin 2018 (voir figure 4).

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 2017-2018 est ainsi de 2'370 MBq/an au minimum et de 2'790 MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent dans les valeurs hautes des périodes de mesure précédentes (fig. 5).

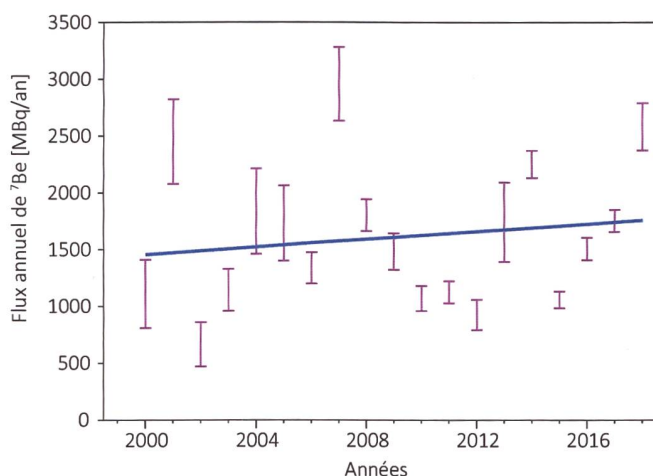


Figure 5 :
Estimation des flux annuels minimum et maximum de ^7Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

Le deuxième radionucléide mis en évidence dans les eaux du Nant d'Avril est le ^{137}Cs (maximum de 15 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 ont été mesurées dans les 2 échantillons d'eaux du Nant d'Avril prélevés en mars 2018, avec des activités (valeur maximale de 5 mBq/l) très proches de la limite de détection.

A noter que la mesure du tritium par l'OFSP dans les échantillons mensuels d'eaux du Nant d'Avril n'a pas mis en évidence de concentrations supérieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

Tableau 2 :
Résumé des résultats des mesures effectuées par l'Institut F.-A. Forel dans les sédiments du Nant d'Avril durant la période décembre 2017 à novembre 2018 (13 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max [Bq/kg]	Moyenne [Bq/kg]	Médiane [Bq/kg]
^7Be	725 - 1'715	1'154	1'218
^{137}Cs	5.6 - 9.6	7.4	7.5

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^7Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons. 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. En 2018, le LHC a fonctionné régulièrement depuis la mi-mars jusqu'à la fin novembre. Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux 8 points

de rejet (période d'échantillonnage du 21.09 au 19.10.2018), se sont échelonnées, en 2018, entre 184 et 1'822 Bq/kg pour le ^7Be et entre 4.0 et 9.5 Bq/kg pour le ^{137}Cs . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^7Be variant entre 63 et 3'553 Bq/kg et entre 3.7 et 4.1 Bq/kg pour le ^{137}Cs . La figure 6 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). Si aucun nouveau radionucléide n'a été décelé par rapport aux mesures effectuées dans le cadre du programme point zéro LHC, la concentration de ^7Be enregistrée au point de rejet PA6 en 2018 est relativement élevée (3'553 Bq/kg) dans les bryophytes, ainsi que dans les sédiments (1'882 Bq/kg); toutefois, en ce qui concerne les sédiments, de telles valeurs pour le ^7Be ont déjà été mesurées à plusieurs reprises par le passé au point PA1 qui correspond au site de surveillance du Nant d'avril (tableau 2), suivi depuis près de 20 ans. La valeur de 3'553 Bq/kg dans les bryophytes en revanche est la plus élevée mesurée jusqu'à présent, dépassant les maximums variant entre 2'200 et 2'700 Bq/kg enregistrés ces dernières années. Cette valeur élevée de ^7Be dans les bryophytes, prélevés le 21.09.2018, est probablement à mettre en relation avec les valeurs assez élevées de ^7Be mesurées dans le Nant d'Avril entre fin juillet et mi-septembre 2018 (figure 4), soit juste avant le prélèvement. On remarque également que cette année compte parmi celles dont le flux de ^7Be dans le Nant est le plus élevé (figure 5).

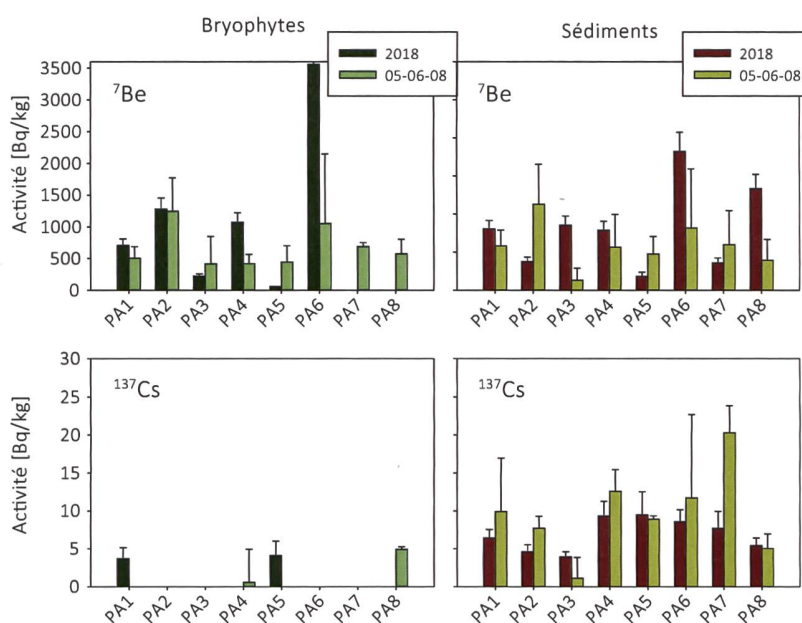


Figure 6 : Activités du ^7Be et du ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8) en 2018 comparées aux valeurs moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008 (valeurs 05-06-08), avant la mise en service du LHC. Il n'y a pas d'échantillon de bryophytes aux points 7 et 8.

En résumé, si l'on exclut le ^7Be , 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 en traces dans le milieu aquatique en 2018 est le ^{22}Na dans les eaux. 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 mesurés pour contrôler les immissions du LHC.

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 2018.

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, 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.

