

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:	- (2021)
Rubrik:	Surveillances des installations nucléaires : émissions et immissions = Überwachung der Kernanlagen : Emissionen und Immissionen

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>

Chapitre / Kapitel 8

Surveillances des
installations nucléaires :
Emissions et Immissions

Überwachung der
Kernanlagen :
Emissionen und Immissionen

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

Emissionen und Immissionen
Ortsdosis und Ortsdosisleistung
MADUK
ZWILAG
Nukleare Anlagen und Umwelt
CERN-Emissionen und Umwelt
CERN- BAG-Messungen

2021

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 2021 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr

Emissionen aus den Kernanlagen: Ergebnisse 2021

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 Jahresabgabelimiten 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 2021. 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 25 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 179 Proben eigene gammaskopmetrische Messungen durchgeführt. 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 tritium-

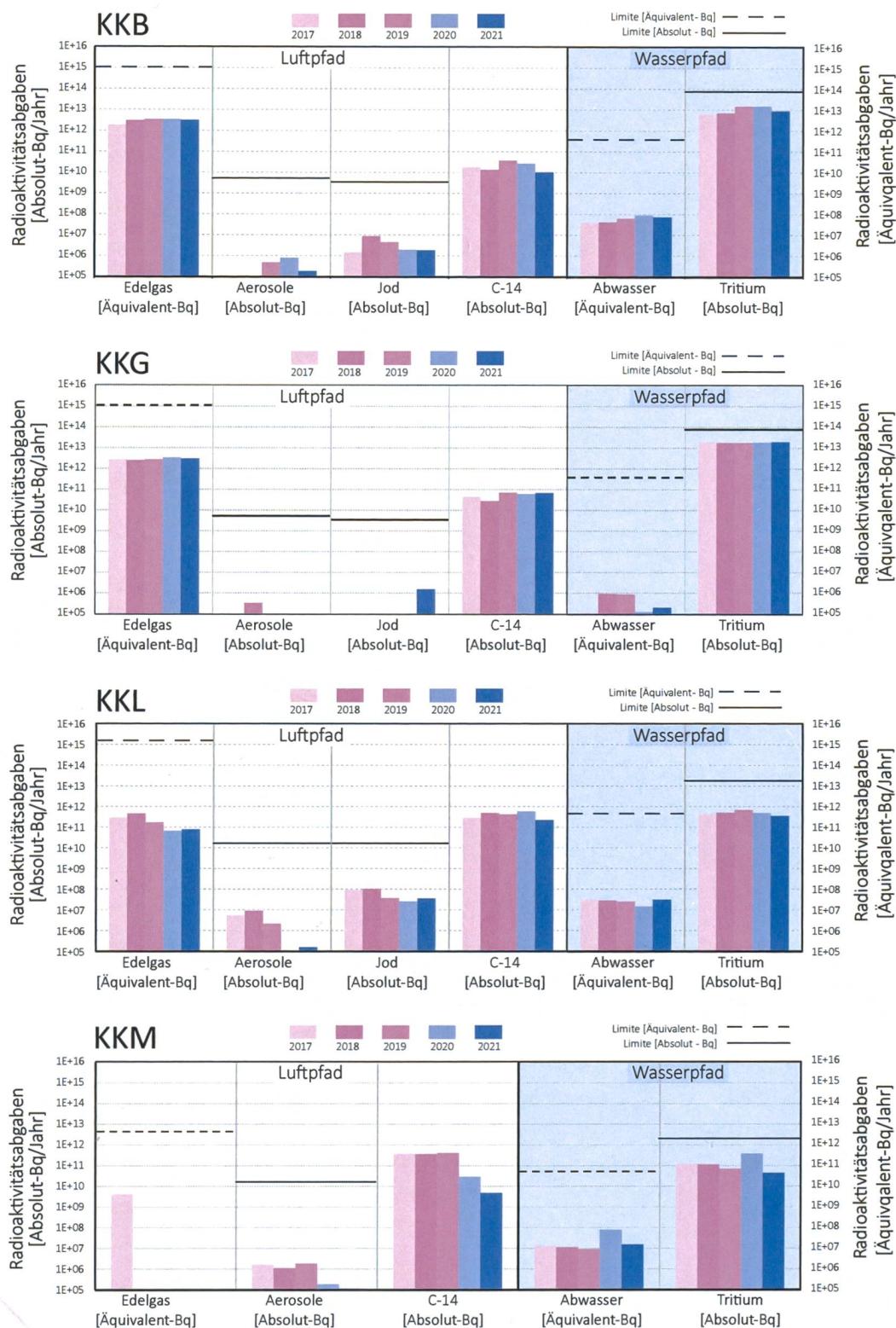


Fig 1.a:

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2017 bis 2021) 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-Abgabe-äquivalente wurde in diesen Fällen ein konservatives Nuklidgemisch angesetzt. Das KKL und das KKM bilanzieren die Edelgase dagegen nuklidspezifisch mittels Gamma-Spektrometriemessungen. Die nuklidspezifischen Messungen liegen häufig unterhalb der Nachweisgrenze.



Fig 1.b (Teil 1):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2021 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.

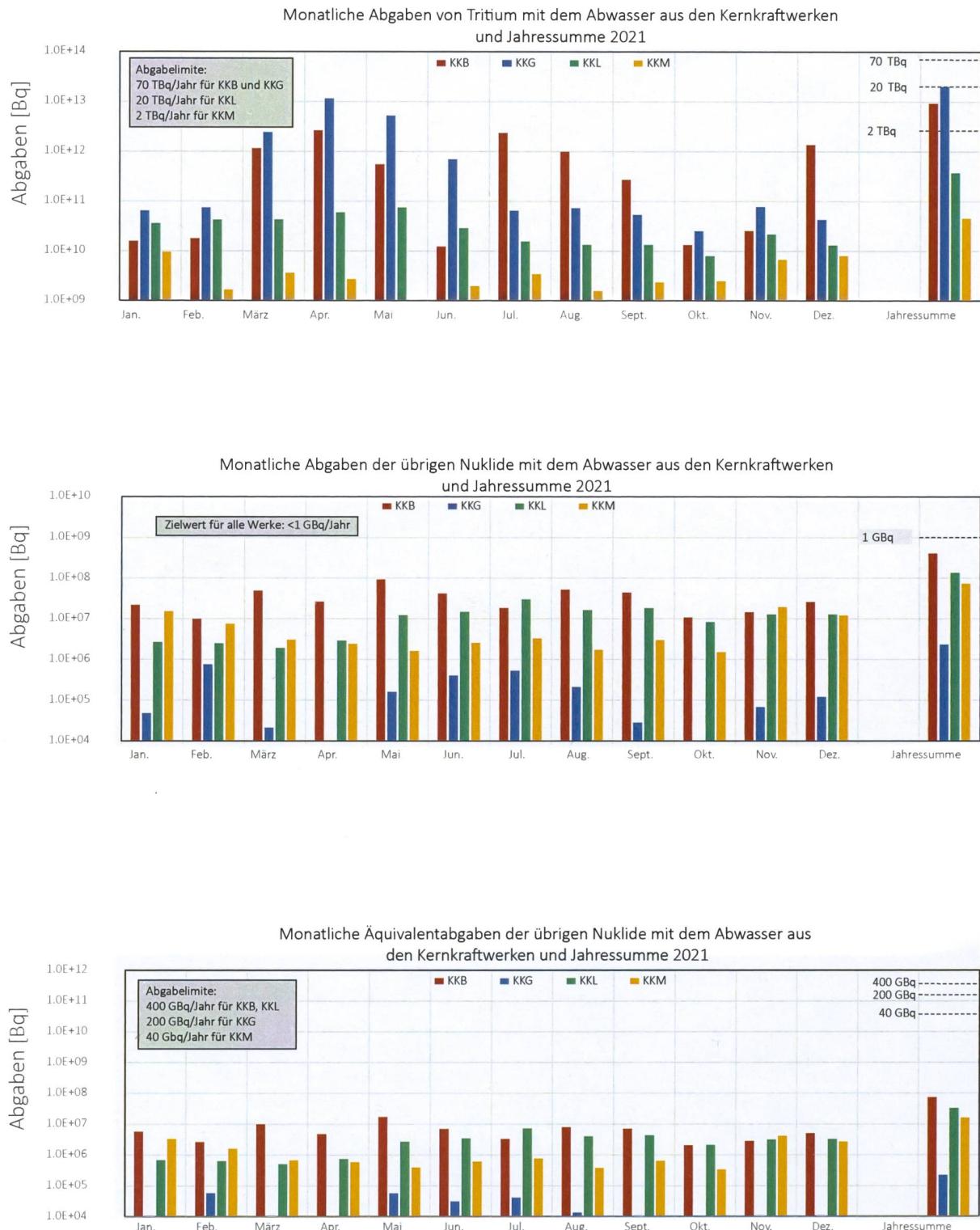
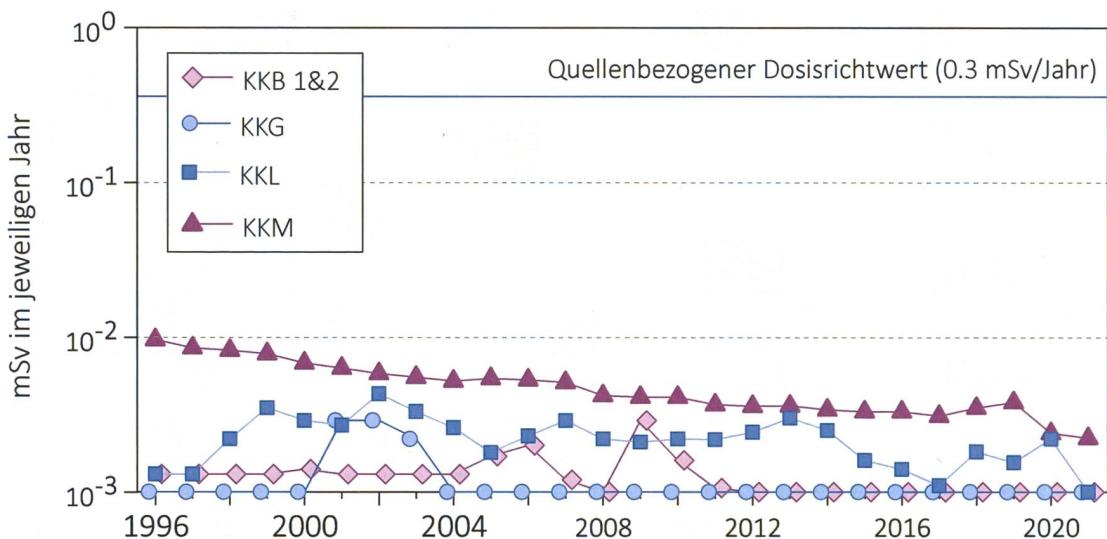


Fig 1.b (Teil 2):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2021 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.



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 2021	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01-11.05; 24.05-31.12 Revisionsstillstand: 12.05-23.05	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01-06.08; 11.09-31.12 Revisionsstillstand: 07.08-10.09	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01-21.05; 25.06-31.12 Revisionsstillstand: 22.05-24.06	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 1.1-23.05; 01.12-31.12 Revisionsstillstand: 24.05-30.11	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019	Siedewasserreaktor	373 MW

Figur 3:

Betrieb der Kernanlagen 2021.

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

Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKB und KKG weniger als 0.001 mSv, bei KKM und KKL etwa 0.002 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betrugen somit im Jahr 2021 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts.

Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der

Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von weniger als 0.011 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Gasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeführten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Die für das Jahr 2021 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2021 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung. (Fussnoten siehe Text)

Ort	Medium	Art der Abgaben ¹	Bilanzierte Abgaben ²				Berechnete Jahresdosis ³		
			Messung	Äquivalent-abgaben ^{1,2}	Limiten ⁴	Prozent der Limite	mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr		Erw.	10j Kind	1j Kind
KKB1 + KKB2	Abwasser 3'600 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.0·10 ⁸	7.2·10 ⁷	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	8.9·10 ¹²	-	7·10 ¹³	13 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	3.2·10 ¹²	3.2·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.3 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.8·10 ⁵	-	6·10 ⁹	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	1.8·10 ⁶	1.8·10 ⁶	4·10 ⁹	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.0·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total							<0.001	<0.001	<0.001
KKG	Abwasser 7'799 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.3·10 ⁶	2.0·10 ⁵	2·10 ¹¹	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.9·10 ¹³	-	7·10 ¹³	27 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<2.9·10 ¹²	<3.0·10 ¹²	1·10 ¹⁵	<0.3 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	5.9·10 ³	-	1·10 ¹⁰	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	1.5·10 ⁶	1.5·10 ⁶	7·10 ⁹	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	6.6·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total							<0.001	<0.001	<0.001
KKL	Abwasser 15'937 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.3·10 ⁸	3.0·10 ⁷	4·10 ¹¹	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	3.5·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	1.8 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	3.4·10 ¹⁰	7.6·10 ¹⁰	2·10 ¹⁵	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.5·10 ⁵	-	2·10 ¹⁰	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	3.5·10 ⁷	3.5·10 ⁷	2·10 ¹⁰	0.2 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	2.2·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	0.0011	0.0018
Dosis total							<0.001	0.0011	0.0019
KKM	Abwasser 2'657 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.5·10 ⁷	1.5·10 ⁷	4·10 ¹⁰	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.3·10 ¹⁰	4.3·10 ¹⁰	2·10 ¹²	2.2 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	-	-	4·10 ¹²	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.1·10 ⁵	-	2·10 ¹⁰	<0.1 %	0.0022	0.0022	0.0021
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.6·10 ⁹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Dosis total					0.0022	0.0022	0.0021
ZZL	Abwasser 419 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	7.2·10 ⁷	2.0·10 ⁷	2·10 ¹¹	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.3·10 ⁹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-γ-Aerosole	3.0·10 ⁵	-	1·10 ⁹	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.1·10 ⁴	-	3·10 ⁷	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.6·10 ⁷	-	1·10 ¹²	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	2.1·10 ⁹	-	1·10 ¹⁴	<0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total							<0.001	<0.001	<0.001

Tabelle 2:

Zusammenstellung der Abgaben des Paul Scherrer Instituts im Jahr 2021 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	$2.3 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-
β/γ -Aerosole, ohne Iod	-	-	-	-	$1.4 \cdot 10^4$
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	-	-	-	-	-
Tritium als HTO	$3.5 \cdot 10^9$	-	-	$3.6 \cdot 10^9$	$4.8 \cdot 10^9$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	$1.7 \cdot 10^7$
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 1'096 m ³	Abluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$3.7 \cdot 10^7$	-	$2.9 \cdot 10^6$
Tritium	-	-	-	$5.8 \cdot 10^9$	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	$2.8 \cdot 10^{14}$	$1.8 \cdot 10^{10}$	-	-	$2.8 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{15}$
β/γ -Aerosole, ohne Iod	$7.8 \cdot 10^9$	$1.0 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^4$	-	$7.8 \cdot 10^9$	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	$1.1 \cdot 10^8$	-	-	-	$1.1 \cdot 10^8$	$6.6 \cdot 10^7$
Tritium als HTO	$2.3 \cdot 10^{12}$	-	-	-	$2.3 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	$1.7 \cdot 10^7$	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.0106	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.011	
Kind 10j	0.0106	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.011	
Kleinkinder	0.0106	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.011	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	7.1 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 8.0%	

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2021:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]						
	β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
³ H		8.9·10 ¹²	1.9·10 ¹³	3.5·10 ¹¹	4.3·10 ¹⁰	5.8·10 ⁹	4.3·10 ⁹
⁷ Be						3.9·10 ⁴	
²² Na						1.2·10 ⁵	8.6·10 ⁵
²⁴ Na		6.1·10 ⁶					
⁴⁴ Sc						1.2·10 ⁴	
⁴⁴ Ti						1.2·10 ⁴	
⁵¹ Cr		1.5·10 ⁶					
⁵⁴ Mn		6.6·10 ⁶		6.9·10 ⁶	1.2·10 ⁷	6.6·10 ⁴	1.9·10 ⁵
⁵⁷ Co						3.7·10 ³	
⁵⁸ Co		1.6·10 ⁷		1.1·10 ⁶			
⁵⁹ Fe		8.2·10 ⁴					
⁶⁰ Co		8.5·10 ⁷		1.3·10 ⁸	5.7·10 ⁷	4.2·10 ⁵	4.4·10 ⁶
⁶⁵ Zn		4.3·10 ⁴					
⁶⁷ Ga						2.1·10 ⁵	
⁸⁹ Sr		5.1·10 ⁵			1.5·10 ⁵		
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y		6.2·10 ⁵			4.6·10 ⁴	2.4·10 ⁵	1.5·10 ⁵
⁹⁵ Zr		1.9·10 ⁵					
⁹⁵ Nb		3.8·10 ⁵					
^{99m} Tc		2.1·10 ⁵	3.8·10 ⁴				
¹⁰³ Ru		2.2·10 ⁵					
¹⁰⁶ Ru						4.1·10 ⁴	
^{108m} Ag						5.7·10 ³	
^{110m} Ag		9.4·10 ⁶					
¹¹¹ In						5.3·10 ⁵	
¹²² Sb		3.2·10 ⁶					
¹²⁴ Sb		1.4·10 ⁸					
¹²⁵ Sb		4.1·10 ⁷					3.0·10 ⁵
^{123m} Te		1.3·10 ⁷	2.1·10 ⁶				
¹³² Te		2.0·10 ⁶					
¹³¹ I		3.7·10 ⁶					
¹³³ I		2.6·10 ⁵					
¹³⁴ Cs		1.2·10 ⁶				1.1·10 ⁵	1.2·10 ⁵
¹³⁷ Cs		7.2·10 ⁷		3.7·10 ⁶	4.7·10 ⁶	6.6·10 ⁷	
¹⁴⁰ La		3.0·10 ⁴					
¹⁴⁴ Ce			1.6·10 ⁵				
¹⁵⁵ Tb						2.1·10 ⁵	
¹⁵⁶ Tb						1.2·10 ⁴	
¹⁶¹ Tb						6.2·10 ⁶	
¹⁷² Lu						1.1·10 ⁴	
¹⁷⁷ Lu						2.4·10 ⁷	
¹⁹⁴ Hg/ ¹⁹⁴ Au						5.1·10 ³	
α-Strahler	*)	1.0·10⁵	1.7·10⁵	2.6·10⁴		*)	
^{234/238} U							
^{239/240} Pu		6.6·10 ³					
²³⁸ Pu/ ²⁴¹ Am		3.4·10 ⁴					
²³⁹ Np							
²⁴² Cm		1.1·10 ⁴					
^{243/244} Cm		3.7·10 ⁴					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2020 bis und mit dem 3. Quartal 2021

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2021:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid β/γ- Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase. Edelgase						
Tritium	$5.6 \cdot 10^{11}$	$6.0 \cdot 10^{11}$	$3.2 \cdot 10^{11}$	$1.6 \cdot 10^{10}$	$2.3 \cdot 10^{12}$	$2.1 \cdot 10^9$
$^{14}\text{C} (\text{CO}_2)$	$1.0 \cdot 10^{10}$	$6.6 \cdot 10^{10}$	$2.2 \cdot 10^{11}$	$4.6 \cdot 10^9$	$1.7 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^7$
^{11}C						$4.3 \cdot 10^{13}$
^{13}N						$4.5 \cdot 10^{13}$
^{15}O						$1.8 \cdot 10^{14}$
^{18}F						$1.4 \cdot 10^{12}$
^{24}Ne						
^{41}Ar				$1.2 \cdot 10^{10}$		$6.0 \cdot 10^{12}$
^{85}Kr						
$^{85\text{m}}\text{Kr}$		$1.1 \cdot 10^{11}$				
^{88}Kr		$1.9 \cdot 10^{11}$				
^{133}Xe		$1.5 \cdot 10^{12}$		$9.0 \cdot 10^9$		
^{135}Xe		$1.4 \cdot 10^{12}$		$1.3 \cdot 10^{10}$		
$^{135\text{m}}\text{Xe}$				$7.2 \cdot 10^8$		
EG-Aequiv.						
EG: β-total			$<2.9 \cdot 10^{12}$			
Andere						
Iod						
^{123}I						$1.8 \cdot 10^7$
^{124}I						$3.1 \cdot 10^5$
^{125}I						$9.6 \cdot 10^7$
^{126}I						$1.3 \cdot 10^5$
^{131}I		$1.8 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^7$		
^{133}I		$1.1 \cdot 10^7$				

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2021:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben
(Fussnoten siehe Text).

Nuklid β/γ-Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
⁷ Be					$1.9 \cdot 10^6$	
²⁴ Na					$2.0 \cdot 10^8$	
⁵⁷ Co		$1.6 \cdot 10^3$				
⁶⁰ Co			$8.6 \cdot 10^4$	$2.8 \cdot 10^4$	$3.3 \cdot 10^5$	
⁷⁷ Br					$7.1 \cdot 10^6$	
^{80m} Br					$2.3 \cdot 10^7$	
⁸² Br					$9.3 \cdot 10^8$	
⁸⁹ Sr			$7.4 \cdot 10^4$			
⁹⁰ Sr						
¹⁰³ Ru	$3.2 \cdot 10^3$					
^{123m} Te		$4.3 \cdot 10^3$				
¹²¹ Te					$5.4 \cdot 10^5$	
¹³⁷ Cs			$6.6 \cdot 10^4$	$8.4 \cdot 10^4$		
¹⁷³ Lu					$5.9 \cdot 10^4$	
^{177m} Lu					$7.0 \cdot 10^4$	
¹⁸¹ Re					$8.8 \cdot 10^7$	
¹⁸² Re					$8.5 \cdot 10^8$	
^{182m} Re					$1.7 \cdot 10^6$	
¹⁸³ Re					$1.2 \cdot 10^7$	
¹⁸² Os					$3.3 \cdot 10^8$	
¹⁸³ Os					$4.0 \cdot 10^8$	
^{183m} Os					$8.7 \cdot 10^7$	
¹⁸⁵ Os					$2.9 \cdot 10^7$	
¹⁸⁵ W					$1.1 \cdot 10^8$	
¹⁹¹ Os	$1.8 \cdot 10^5$					
¹⁹¹ Pt					$1.3 \cdot 10^7$	
¹⁹² Au					$1.2 \cdot 10^9$	
¹⁹³ Au					$3.2 \cdot 10^8$	
¹⁹⁴ Au					$1.4 \cdot 10^6$	
¹⁹² Hg					$1.2 \cdot 10^9$	
^{193m} Hg					$2.7 \cdot 10^8$	
¹⁹⁴ Hg					$1.4 \cdot 10^6$	
¹⁹⁵ Hg					$5.6 \cdot 10^8$	
^{195m} Hg					$1.7 \cdot 10^8$	
¹⁹⁷ Hg					$6.7 \cdot 10^8$	
^{197m} Hg					$2.1 \cdot 10^8$	
²⁰³ Hg					$1.5 \cdot 10^7$	
Nicht spezifizierte					$3.0 \cdot 10^5$	
α-Aerosole		$4.3 \cdot 10^4$	$8.4 \cdot 10^3$	$5.1 \cdot 10^3$		$1.1 \cdot 10^4$

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

Abwasser: Die Summe der Abwasserabgaben ist in der Spalte «Abgaben» angegeben. Für den Vergleich mit den Abgabelimiten werden die Werte mit einem Referenz-Immissionsgrenzwert für Gewässer ($IG_{Gw,ref}$ -Wert) von 10 Bq/l umgerechnet und als sogenannte Äquivalentabgaben angegeben:

$$Q_{Aeq} = \sum_i Q_i \frac{IG_{Gw,ref}}{IG_{Gw,i}}$$

Edelgase und Gase: Die Summe der Edelgas- bzw. Gasabgaben ist in der Spalte «Abgaben» angegeben. Für den Vergleich mit den Abgabelimiten werden die Werte mit einem Referenz-Immissionsgrenzwert für Luft ($IG_{Lf,ref}$ -Wert) von 2'000 Bq/m³ umgerechnet und als sogenannte Äquivalentabgaben angegeben:

$$Q_{Aeq} = \sum_i Q_i \frac{IG_{Lf,ref}}{IG_{Lf,i}}$$

Iod: Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von ¹³¹I limitiert; somit ist bei den bilanzierten Abgaben nur dieses Iod-Isotop angegeben. Beim PSI ist die Abgabe für die einzelnen Abgabestellen und die Gesamtanlage als Summe der Aktivität der gemessenen Iod-Nuklide angegeben. Für die Gesamtabgabe des PSI wird zudem auch ein ¹³¹Iod-Äquivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben.

Für die Berechnung der Jahresdosis werden sowohl für die KKW wie für das PSI immer sämtliche verfügbaren Iod-Messungen verwendet.

[2] Abgaben kleiner als 1'000 Bq werden in den Tabellen 3a-c nicht aufgeführt.

[3] Die **Jahresdosis** wird für fiktive Personen konservativ abgeschätzt, indem angenommen wird, dass sie sich dauernd am kritischen Ort aufhalten, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort beziehen und ihren gesamten Trinkwasserbedarf aus dem Fluss unterhalb der Anlage decken. Die Dosis wird mit den in der Richtlinie ENSI G14 angegebenen Modellen und Parametern ermittelt. Dosiswerte kleiner als 0.001 mSv werden nicht angegeben.

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

8.2

Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhe

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 wurden.

Ergebnisse 2021

Die Ortsdosisleistung $H^*(10)$ ist im Nahbereich (beispielsweise am Arealzaun) des Siedewasserreaktors in Leibstadt durch Direkt- und Streustrahlung aus dem Maschinenhaus erhöht. Diese Strahlung resultiert aus dem radioaktiven Zerfall des kurzlebigen Stickstoffnuklids ^{16}N , welches im Reaktor produziert und bei Siedewasserreaktoren mit dem Dampf in die Turbine im Maschinenhaus getragen wird. Weiter können Abfalllager zu einer erhöhten Ortsdosis am Zaun beitragen. Rückbauarbeiten, wie sie im KKM stattfinden, können zu temporären Erhöhungen der Ortsdosis am Zaun führen.

Beim KKB und KKG wurde am Zaun weder mittels TLD resp. EDIS noch bei den vierteljährlichen Messungen des ENSI eine signifikante Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt. Am Zaun des KKL wurden bei den vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.19 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von etwa 0.02 mSv pro Woche. Die von KKL quartalsweise ausgewerteten EDIS am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.03 mSv . Am Zaun des KKM wurden bei den vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen $0.08 \mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.32 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Auf eine Woche hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am

meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von etwa 0.04 mSv resultieren. Im Falle des KKM wird bei einer solchen Hochrechnung die Ortsdosis stark überschätzt, da die maximalen Ortdosisleistungen am Zaun in der Regel aufgrund der Rückbauarbeiten zeitlich begrenzt sind. In diesem Falle wurde der hohe Wert während Arbeiten im Aktivlager gemessen. Die vom KKM quartalsweise ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.016 mSv . Am Zaun des PSI wurden bei vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen Ortsdosisleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.09 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.005 mSv pro Woche. Die vom PSI quartalsweise ausgewerteten TLD am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.005 mSv . Beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) konnte weder aus den stichprobenweise durchgeführten Dosisleistungsmessungen noch aufgrund der am Zaun positionierten TLD und Neutronendosimeter eine signifikante Erhöhung der Ortsdosisleistung festgestellt werden.

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

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungs-überwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

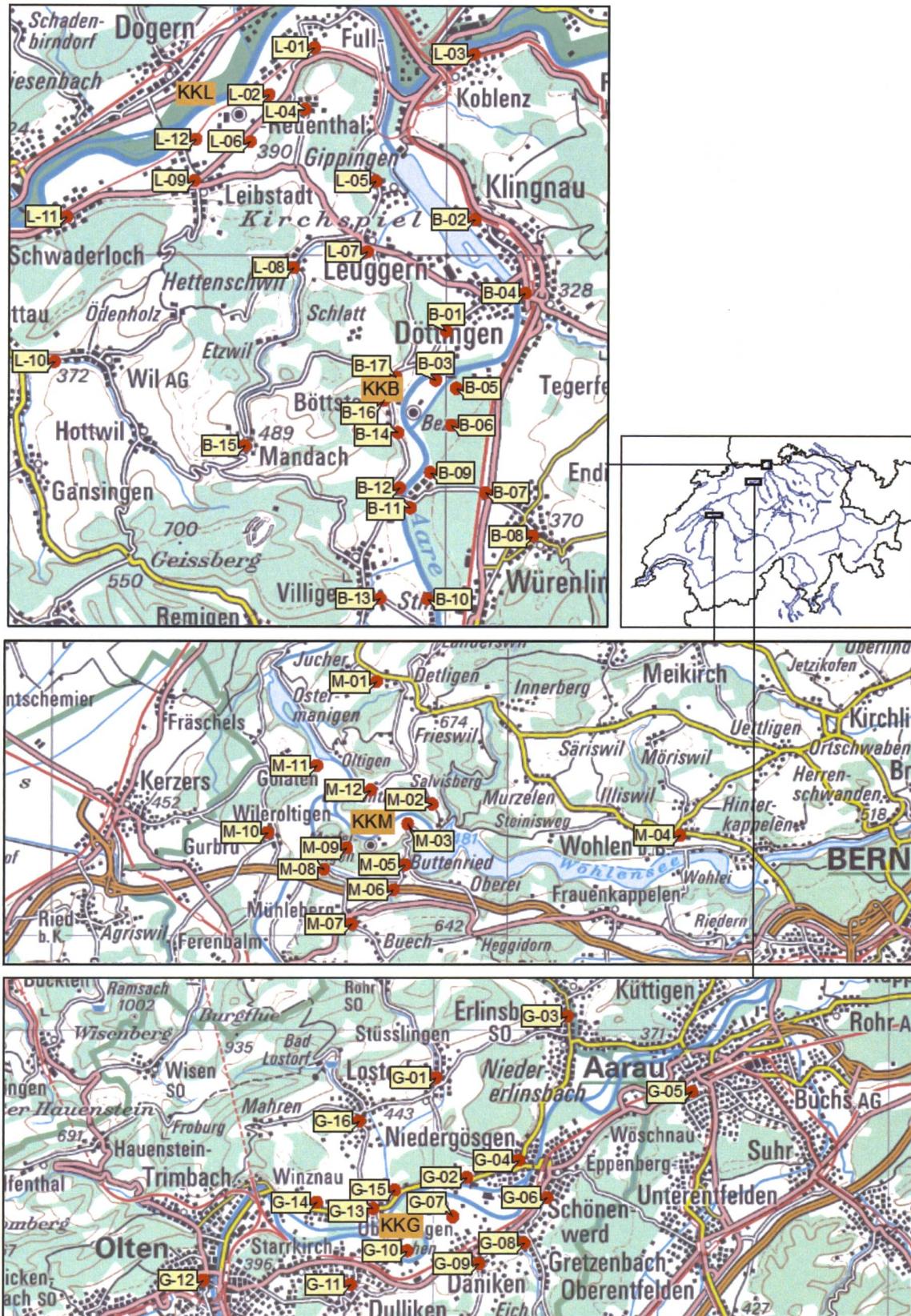
Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung $H^*(10)$ in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und zur Schaffung von Transparenz gegenüber 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 2021 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

Übersicht

Das **MADUK**-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von **Anlageparametern (ANPA)** und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 in den operationellen Betrieb überführt. Da das System die Dosisleistung $H^*(10)$ in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr misst und überwacht, dient es der Beweissicherung für die Behörden und gegenüber der Öffentlichkeit. Ebenso ermöglicht es das Erkennen von Betriebsstörungen und Unfällen, da Erhöhungen gegenüber den natürlichen Dosiswerten ab einem vordefinierten Schwellenwert im ENSI automatisch gemeldet werden. Bei einem Störfall unterstützt MADUK die Notfallorganisation bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 76 Messstationen zählen kann. Die Messsonden beider Messnetze ermitteln die Gamma-Dosisleistung im Messbereich von 10 nSv/h (Niederdosiszählrohr) bis 10 Sv/h (Hochdosiszählrohr). Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten des MADUK-Netzes, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Zudem erfolgt ein permanenter Datenaustausch mit externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ), Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM und JRODOS/LASAT im ENSI. Die Figur 1 zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.



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

Die Daten von MADUK können mittels einer speziellen Software auf bestimmten Windows-Arbeitsplatzrechnern im ENSI und in den Kernkraftwerken visualisiert werden. Auf der [Internetseite](http://www.ensi.ch/de/messwerte-radioaktivitaet/) sind alle seit 1994 archivierten Tages-, Stunden- und Zehnminutenmittelwerte der MADUK Stationen abrufbar. (<https://www.ensi.ch/de/messwerte-radioaktivitaet/>).

Systeminstandhaltung und -ergänzung



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

Im Jahr 2020 wurde mit dem Umbau der Stationen auf den neuen Sondentyp (Figur 2) begonnen und bereits 40 Stationen umgerüstet. Bereits in den ersten Monaten mussten rund 20 Sonden mit defektem Hochdosiszählrohr ausgetauscht und zur Reparatur an den Lieferanten returniert werden. Deshalb konnten nur weitere 8 Stationen im Jahr 2021 auf den neuen Sondentyp umgerüstet werden, da bis Ende Jahr nur 10 reparierte Sonden wieder verfügbar, geeicht und als Reservematerial für weitere Ausfälle zur Verfügung standen. Die restlichen Sonden werden voraussichtlich im Februar 2022 wieder verfügbar sein und im März geeicht, so dass der Umbau im Frühjahr 2022 abgeschlossen werden kann.

Die MADUK-Zentrale wurde auf neue Systeme mit aktuellen Betriebs- und Datenbanksystemen migriert. Die Migration konnte ohne nennenswerte Unterbrüche für den Betrieb durchgeführt werden.

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

Tabelle 1:

Auflistung der Störungen bei den MADUK-Messstationen mit permanentem Datenverlust.

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
G-06	23.0	23.0	Ausfall Kommunikation
M-10	24.5	24.5	Ausfall Kommunikation
G-09	19.4	19.4	Defekt Stationelektronik
G-05	21.8	21.8	Wasserschaden Stationsstandort
L-12	17.2	17.2	Defekte Messsonde
M-08	1.7	1.7	Technisches Problem bei Neukonfiguration
G-07	19.7	19.7	Blockierter Datenlogger
B-17	2.0	2.0	Blockierter Datenlogger
G-05	91.3	91.3	Defekte Batterie

Die Messstationen liefen auch im Jahr 2021 grösstenteils zuverlässig. Die Anzahl Kommunikationsunterbrüche gingen im Vergleich zu den Vorjahren deutlich zurück. Dies war hauptsächlich auf den Einsatz des neuen Sondentyps mit redundanten Datenübertragung zurückzuführen. Bei zwei Kommunikationsausfällen wurde jeweils gleich die Messstation auf den neuen Sondentyp umgebaut (G-06, M-10). Bei der Station G-05 führte ein Wasserschaden am Standort zu einem langen Stromausfall. Deshalb wurde diese Station ebenfalls auf den neuen Sondentyp umgerüstet. Die ersten Betriebserfahrungen mit dem neuen Sondentyp sind gut. Die Autarkie durch die eingebauten Solarpanels ist grösstenteils ausreichend. Bei Messstationen mit starker Beschattung durch Gebäude und/oder Bäume wurden in den bestehenden Messkästen Schaltuhren montiert, um zyklisch die Batterien der Sonden über das Stromnetz zu laden. Damit kann auch bei langerem Stromausfall von mehr als 30 Tagen der Betrieb der Sonden an allen Standorten gewährleistet werden.

Aufgrund von Bauarbeiten am Standort musste die Messsonde der Station G-11 für den Zeitraum vom 29. März 2021 11:50 Uhr bis 23. Juni 2021 14:20 Uhr demontiert werden. Für diesen Zeitraum liegen keine Messdaten für diese Station vor.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99,9% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMU-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.54% (Ausfall der Station G-11 mit 0.4% eingerechnet).

Qualitätssicherung

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

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV), welche sich derzeit in Revision befindet, werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Aufgrund der Umrüstung der Messstationen auf einen neuen Sondentyp, der Ressourcensituation und der aktuellen Überarbeitung der StMmV wurde auch im 2021 auf die Durchführung der Funktionsprüfung vor Ort verzichtet. Durch die permanente Messung und die laufende automatische Prüfung der Messdaten kann trotzdem eine sehr hohe Datenqualität sichergestellt werden.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden üblicherweise Messungen mittels In-Situ-Gammapektrometrie bei den Messstationen durchgeführt. Im Jahre 2021 erfolgten die Messungen an den MADUK-Standorten der Messringe KKB und KKM. Bei allen Messungen wurden die Untersuchungsschwellen nicht erreicht. Es konnten keine Immissionen der Kernanlagen nachgewiesen werden.

Messergebnisse

Im Jahr 2021 wurden insgesamt drei Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellwertes von 50 nSv/h (Tabelle 2) festgestellt. Alle waren aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen.

Tabelle 2:

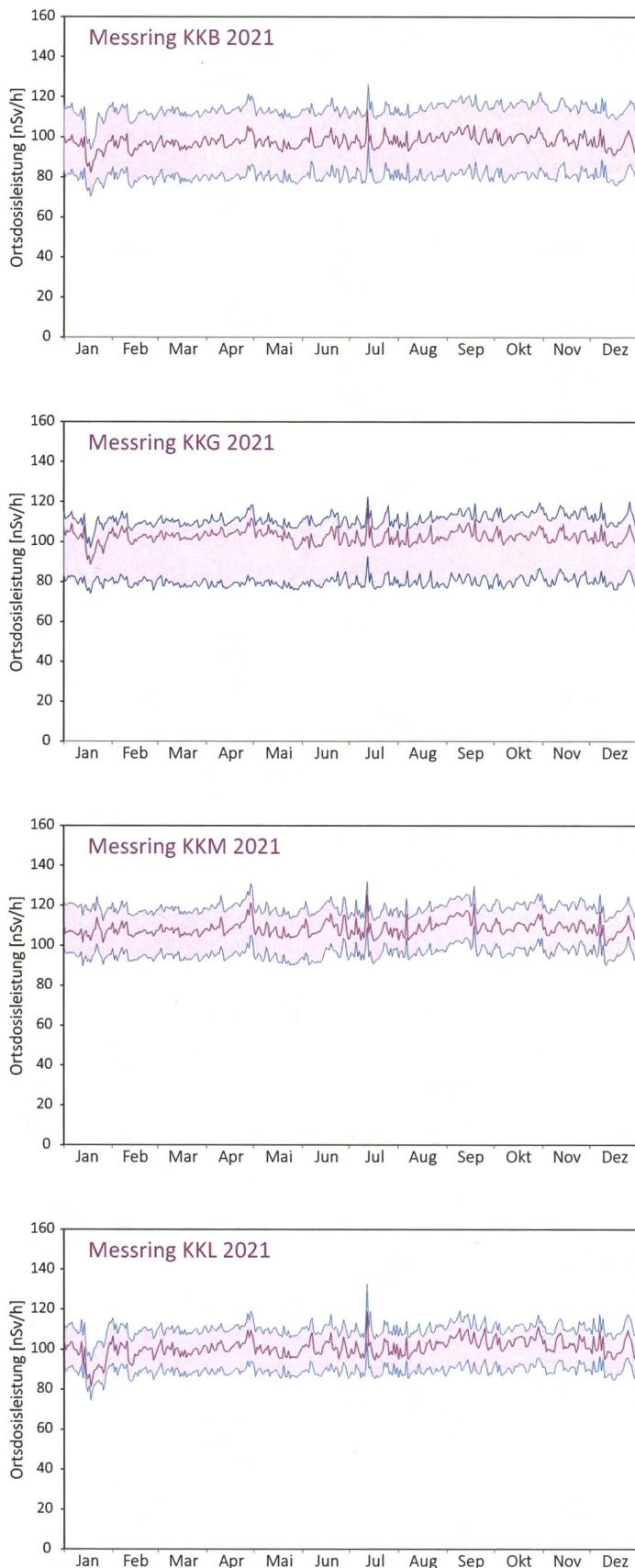
Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2021.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
06.01.2021 07:00	L-12	1.3	108	210
08.06.2021 16:50	M-04	0.2	52	140
30.08.2021 16:00	L-03	0.3	61	167

Bei der Station L-12 wurde am 6. Januar zwischen 07:00 Uhr und 08:40 Uhr eine Verletzung des Nettodosisleistungsschwellwertes von 50 nSv/h registriert. Die maximale Ortsdosleistung betrug 210 nSv/h und die maximale Nettodosisleistung 108 nSv/h. Aufgrund des Verlaufs der Erhöhung mit dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten konnte die Erhöhung auf Washout natürlicher Radionuklide (Radonfolgeprodukte) durch Niederschlag zurückgeführt werden. Ein Augenschein vor Ort zeigte Schnee bei der Station, obwohl in der Region ansonsten kein Schnee lag. Der künstliche Schneefall (Industrieschnee) konnte sich durch die Temperaturen um den Gefrierpunkt aus dem Dampf des Kühlturmes des Kernkraftwerkes Leibstadt bilden. Da es wegen dieser Erhöhung zu einer Öffentlichkeitsanfrage kam, wurde auf der Webseite des ENSI ein Artikel zu diesem Thema aufgeschaltet: <https://www.ensi.ch/de/2021/01/20/schneefall-kann-zu-erhoeten-messwerten-fuehren/>.

Erhöhte Ortsdosleistungswerte, 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:

Maxima, Minima und Medianwerte der Tagesmittelwerte der Sonden der Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2021.

8.4

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

M. Jäggi, P. Kramer, H. Hauswirth, M. Heule

Paul Scherrer Institut, Villigen

Zusammenfassung

Seit 1997 führt das PSI im Rahmen der Immissionsüberwachung Radionuklidmessungen an Waldbodenproben und Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (Zwilag Würenlingen) durch. Die Staubfangplatten sind mit Vaseline beschichtet und werden γ -spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie ^{241}Am und ^{137}Cs sowie natürliche Radionuklide wie ^7Be , ^{210}Pb gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der γ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung von α - und β -Strahlern (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm und ^{131}I). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 15 - 40 Bq/kg für das Jahr 2021. Diese Abnahmen sind mit dem radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von ^{137}Cs beträgt 30.17 Jahre) und mit einer begrenzten Aufenthaltszeit in der oberen Bodenschicht zu erklären. Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope ^{90}Sr und $^{239+240}\text{Pu}$ sind ähnlich signifikant, zumal diese Radionuklide schon sehr viel früher (Beginn der 1960er Jahre) als Fallout der A-Bombentest in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf 1.4 - 3.5 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) schwanken im Spurenbereich von 0.2 - 1.0 Bq/kg im Jahr 2021. Die konstanten Isotopenverhältnisse von $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.03) und $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.35) zeigen, dass die gemessenen Werte für die Actinoide den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 20 - 40 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 180 und 460 Bq/kg gemessen.

Einleitung

Das Zwischenlager (Zwilag AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erbaut und anschliessend in Betrieb genommen. Um potentielle, geringfügige Radionuklid-Emissionen in der Umgebung des Areals aus Abgaben aus der Anlage feststellen zu können, wurden vor der Inbetriebnahme im Rahmen des Projektes Beweissicherung umfangreiche Radionuklid-Messungen an Bodenproben in der unmittelbaren Umgebung des Areals durchgeführt [1]. Diese Analysen dienten der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B. ^7Be),

terrestrischer (^{40}K sowie Radionuklide aus den U- und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm und ^{131}I) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von oberirdischen Kernwaffentests der 60iger Jahre und der Chernobyl-Reaktorkatastrophe im Jahr 1986. Seit der Durchführung dieser Studie zur Beweissicherung werden im Routinebetrieb einmal jährlich an 4 Erhebungsorten Waldbodenproben aus der oberen Schicht (0 - 5 cm) erhoben und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades wurden zusätzlich 4 Staubfangplatten entlang der Umzäunung des Zwilag angebracht.

Radiochemische Trennmethoden (Boden)

Nach der Probenerhebung werden die Bodenproben zunächst getrocknet, gesiebt und in Aliquote von je ca. 30 g aufgeteilt. Vor der Analyse werden ^{243}Am - und ^{242}Pu -Tracer hinzugegeben. Nach der Nass- und Trockenveraschung wird die Probe in 6 M HCl unter Kochen während 1 Stunde ausgelaugt, so dass die oberflächlich adsorbierten Fallout-Produkte in Lösung gehen. Durch die Zugabe von H_2O_2 (Oxidationsmittel) beim Auslaugen, liegt das Plutonium vorwiegend als Pu^{4+} vor. Die Lösung, welche die Fraktionen von Pu, Am und Cm, aber auch U und Th enthält, wird sodann von der festen Phase über Filtration getrennt.

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, welche ebenso das Am und Cm enthält, wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer UTEVA-Kolonne zur Retention von U und Th und einer DGA-Kolonne, die Am und Cm adsorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach-salzsauren NaNO_2 -Lösung. Da Am in sehr geringer Konzentration vorliegt, ist ein weiterer Purifikationsschritt, die Trennung von den Lanthanoiden mit einer TEVA-Säule notwendig. Die Fraktionen von Pu bzw. Am und Cm werden anschliessend eingedampft, kalziniert und in einer Na_2SO_4 - NaHSO_4 -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Actinoiden verwendet wird. Nach der Elektrodeposition werden die verschiedenen Messpräparate über 3 Tage mit hochauflösender α -Spektrometrie gemessen (alle Details in [1]).

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

Staubfangplatten

Die 4 Staubfangplatten, eine pro Himmelsrichtung, befinden sich entlang der Umzäunung des Zwilag-Areals. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden jeweils ausgewechselt. Im Labor wird die

Vaselineschicht von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen eingeschmolzen. Mittels hochauflösender Gamma-Spektrometrie werden photonenemittierende Radioisotope wie ^7Be , ^{241}Am , ^{137}Cs und ^{131}I gemessen. Die γ -Messung dauert 15 Stunden.

Niederschlag

In einem monatlichen Turnus wird das in diesem Zeitraum anfallende Niederschlagswasser aus dem Niederschlags-sammler beim Zwilag-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10ml 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 von 48 Stunden Dauer Nachweisgrenzen von 0.04 Bq/Liter erreicht werden.



Figur 1:
Installierte Staubfangplatte an der Seitenwand der ZWILAG auf ca. 2m Höhe über Boden. Sämtlicher Staub und Partikel, die durch Wind und Witterung auf der Fettschicht kleben bleiben, werden alle 2 Wochen auf ihren Radionuklidgehalt analysiert. Foto: Patricia Kramer (04-2022).

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 (als ^{226}Ra und ^{228}Ra ausgewiesen) 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 lagen in verschiedenen Jahren teilweise tiefer als die

Tabelle 1:

Anthropogene Fallout-Isotope in Bodenproben aus der Umgebung der Zwilag (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten fünf Jahre (2017-2021). Wertebereiche der Analysenresultate in Bq/kg Trockengewicht. Die Messunsicherheit einer einzelnen Analyse betrug zwischen 10% - 40%.

Isotop	2017	2018	2019	2020	2021
^{90}Sr	< 1 - 2	<1 - 2.5	<1 - 3	<1 - 2	1.3 - 3.5
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs ⁽¹⁾	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	10 - 50	10 - 50	5 - 40	10 - 40	7 - 60
^{238}Pu ⁽²⁾	0.01- 0.03	0.01- 0.03	< 0.005- 0.03	< 0.005- 0.03	0.02 - 0.06
$^{239+240}\text{Pu}$	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8	0.1- 0.8	0.05 - 0.5	0.2 - 1.0
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.05 - 0.3	0.02 - 0.3	0.02 - 0.4
^{226}Ra	20 - 30	10 - 24	15 - 30	20 - 30	19 - 30
^{228}Ra	20 - 40	13 - 25	17 - 30	20 - 40	15 - 40

⁽¹⁾ Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte seit 2015 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 nicht mehr nachgewiesen werden, da bereits über 30 Jahre (mehr als 10 Halbwertzeiten) vergangen sind.

⁽²⁾ Einzelne ^{238}Pu -Resultate lagen unter der Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg.

Nachweisgrenze des verwendeten Messverfahrens. Für 2021 konnten praktisch alle Nuklide über der Nachweisgrenze gemessen werden. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ liegen derzeit zwischen 0.2 und 1.0 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.02 und 0.4 Bq/kg. In Spuren ist noch ^{238}Pu nachweisbar (0.02- 0.06 Bq/kg). Es wurde dieses Jahr festgestellt, dass ^{238}Pu in sämtlichen Bodenproben nach wie vor nachgewiesen werden konnte. Der Wertebereich für das Spaltprodukt ^{90}Sr lag 2021 geringfügig höher als im Vorjahr (1.3 - 3.5 Bq/kg), scheint jedoch immer noch in derselben Grössenordnung einem langsamen Abbau- und Zerfallstrend zu folgen. Die Resultate für ^{137}Cs (10 - 60 Bq/kg, im Mittel 35 Bq/kg) liegen zuverlässig im langjährigen Mittel. Der Grund für die grundsätzlich höheren Aktivitätskonzentrationen ist der Beitrag von Fallout-Cäsium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall von 1986. Über die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (im Mittel 0.37 in 2021 bei einem erwarteten Wert von 0.35) und $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (0.03 ± 0.01) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Actinoide ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren stammt [1,2]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten fünf 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. es handelt sich um typische Werte für Böden und

Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

Weniger aufwändig ist die Auswertung der Staubfangplatten. Mit der monatlichen Sammlung der auf dem Fett anhaftenden Partikel ist praktisch eine kontinuierliche Überwachung möglich. Seit Beginn der Probennahmen lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unterhalb der 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. Anhand des in der oberen Atmosphäre durch Sonnenpartikel produzierten ^7Be lassen sich die mittleren Jahreszeitverläufe abbilden. Auch die Flächenaktivitäten auf den Staubfangplatten von ^7Be schwankten zwischen ca. 5 - 20 Bq/m² im Winter und maximal 105 Bq/m² im Sommerhalbjahr 2021.

Bei den Regenwasserproben wurden ^3H -Aktivitätskonzentrationen von 2 - 6 Bq/Liter nachgewiesen. Mit der Gammaspektrometrie konnten seit 1997 noch nie anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs oder ^{131}I nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze dieser Radionuklide liegt jeweils bei 0.04 Bq/Liter.

Literaturliste

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

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 (^{3}H dans l'eau ou ^{54}Mn et ^{60}Co dans les sédiments) de ces installations. La contribution du rayonnement direct a également été détectée en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühleberg. Les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont toutefois restées nettement inférieures aux limites réglementaires et donc, sans danger pour la santé.

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

Introduction

Dans le but de préserver la santé de l'homme et l'environnement au voisinage des centrales nucléaires, l'OFSP poursuit depuis de longues années un programme spécifique de prélèvements d'échantillons et de mesures de la radioactivité. Celui-ci commence au terme source, par des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, l'IFSN et l'OFSP sur divers échantillons en phase de rejet (filtres à aérosols, à iodé, 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'OFSP se doit ensuite de procéder à l'examen de l'ensemble de ces données pour évaluer de manière pertinente l'impact des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obte-

nus dans le cadre de ce programme de surveillance des immissions au voisinage des installations nucléaires. Le tableau 1 indique les chapitres à consulter pour accéder aux résultats plus détaillés relatifs à un compartiment de l'environnement particulier ou un radionucléide spécifique.

Tableau 1

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

Milieu/Isotope	Chapitre
Exposition ambiante	8.2 - 8.3
Air/Aérosols (émetteurs γ)	4.1 - 4.2
Précipitations (γ , ^3H)	4.1
Milieu aquatique	4.4
Mesures in situ	3.1
Sol et herbe (γ , ^{90}Sr)	4.7
Actinides Pu, ^{241}Am	7.2
^{14}C dans les feuillages	7.1
Denrées alimentaires	5

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

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

Méthodologie

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

Résultats 2021

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 2021 (voir Chap. 8.1). Comme attendu, les rejets de substances radioactives dans l'air par la centrale nucléaire de Mühleberg ont encore diminué en 2021 avec la disparition complète des émissions d'iode. Par contre, les rejets de substances radioactives dans les cours d'eau sont toujours comparables à ceux déclarés au cours des dernières années d'exploitation. On notera que toutes les centrales ont respecté la valeur cible de 1 GBq pour les rejets liquides en 2021.

La figure 1 présente les doses calculées pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires suisses entre 1981 et 2021. Ces doses sont calculées sur la base des rejets effectifs, en appliquant des modèles de dispersion ainsi que sur la base de scénarios conservateurs en termes de temps de séjour en plein air et d'habitudes alimentaires des personnes les plus exposées selon la directive G14 de l'IFSN (voir directive pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

L'augmentation significative de 1986 au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est due à un rejet non contrôlé de poussières radioactives dans

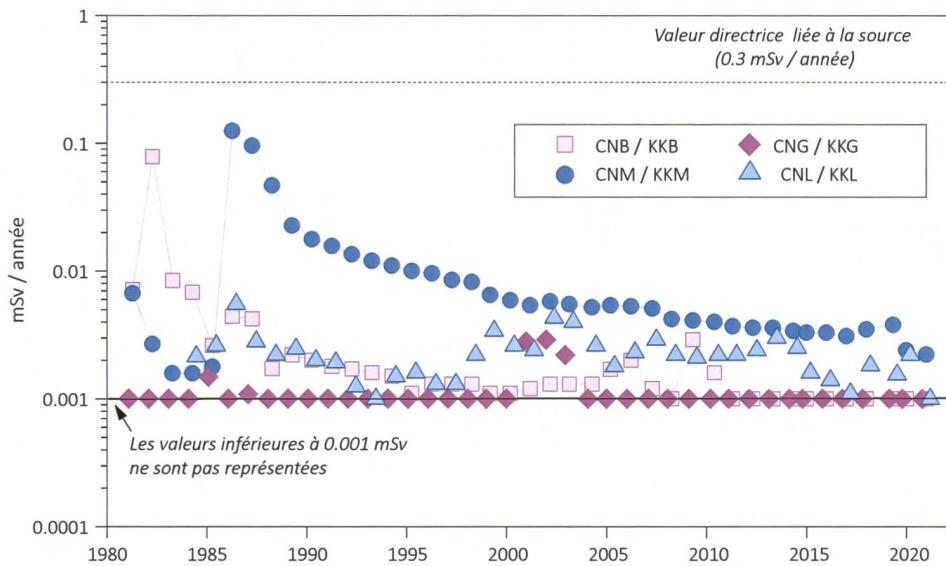


Figure 1:

Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2021 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

l'atmosphère. A partir des mesures de terre et d'herbe effectuées par la suite par la commission fédérale de surveillance de la radioactivité de l'époque, l'activité rejetée en septembre 1986 avait pu être estimée à 11 GBq (50 % de ^{134}Cs , 40 % de ^{137}Cs , 7 % de ^{60}Co et quelques 3 % de ^{65}Zn) et donc inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. Comme le montre la figure 1, l'impact radiologique de ce rejet très localisé a constamment diminué depuis. La dose calculée pour les personnes adultes les plus exposées vivant au voisinage de KKM sur la base des émissions effectives, en tenant compte des rejets des années précédentes, s'est élevée en 2021 à env. 0.002 mSv. Pour toutes les autres centrales (KKB, KKG, KKL), les doses pour les personnes adultes les plus exposées ont été évaluées à < 0.001 mSv. Dans le cas de la centrale nucléaire de Leibstadt, les émissions de ^{14}C conduisent à une dose d'env. 0.002 mSv pour les très petits enfants (1 an).

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres thermoluminescents (TLD) et par des mesures périodiques effectuées par l'IFSN à la clôture des installations.

Comme par le passé, les résultats de cette surveillance ont mis en évidence des valeurs plus élevées en certains points de la clôture du réacteur à eau bouillante de Leibstadt en raison du rayonnement direct et diffusé en provenance de la salle des machines. La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint 0.02 mSv par semaine en moyenne, après soustraction du bruit de fond naturel. Ce

rayonnement résulte de la désintégration radioactive du ^{16}N , à courte demi-vie, qui est produit dans le réacteur et, dans le cas des réacteurs à eau bouillante, est transporté avec la vapeur dans la turbine du bâtiment des machines. Avec l'arrêt de l'exploitation à Mühleberg, la contribution de l' ^{16}N a disparu, toutefois, les travaux de démantèlement peuvent entraîner des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture. Ainsi des valeurs instantanées de débit de dose comprises entre 0.08 (correspondant au fond naturel) et 0.32 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ont été mesurées lors des contrôles périodiques sur site effectués par l'IFSN en 2021. En extrapolant cette valeur instantanée maximale sur une semaine, on obtiendrait une dose supplémentaire d'environ 0.04 mSv. Toutefois, cette valeur est très certainement surestimée car les augmentations de débit de dose à la clôture dus aux travaux de démantèlement sont généralement temporaires. L'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale de Mühleberg montre en effet une élévation moyenne (calculée sur la base de la valeur trimestrielle mesurée) de la dose ambiante de 0.016 mSv par semaine, après soustraction du bruit de fond naturel.

Aucune valeur plus élevée n'a en revanche pu être mesurée à la clôture des centrales nucléaires de Beznau et Gösgen.

Toutes ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés. En effet, cet article stipule que la dose ambiante ne doit pas dépasser 0.02 mSv par semaine aux endroits situés à l'extérieur de ces secteurs où peuvent séjournier 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 du

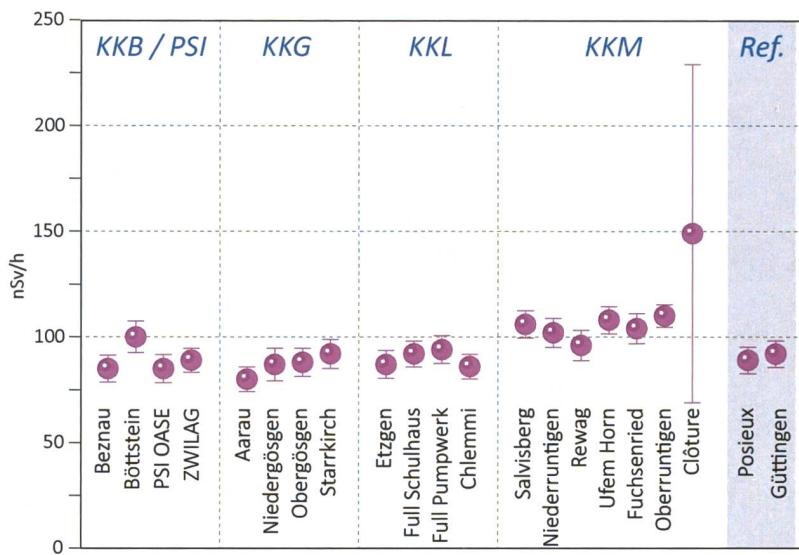


Figure 2:

Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2021 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). La valeur instantanée plus élevée mesurée à la clôture de la centrale de Mühleberg est due à des travaux de démantèlement.

rablement, 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.

L'OFSP effectue également des mesures de débit d'équivalent de dose ambiante $H^*(10)$ à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1 m au-dessus du sol dans un voisinage plus étendu. Lors de ces mesures, une valeur de débit de dose plus élevée (0.149 $\mu\text{Sv}/\text{h}$) a également été mesurée à la clôture de la centrale nucléaire de Mühleberg. Cette valeur se situe dans la gamme de celles mesurées par l'IFSN lors de ces contrôles périodiques. La figure 2, illustrant les résultats de ces mesures, montre qu' hormis ce cas particulier, l'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires ne se distingue pas de manière significative de celle enregistrée à Posieux ou Güttingen, situées hors de leur influence. Il est intéressant de remarquer que les valeurs de débit de dose légèrement plus élevées mesurées aux autres points du voisinage de la centrale de Mühleberg (en particulier Ufem Horn, Oberruntigen, Niederruntigen et Salvisberg) sont dues à une concentration généralement plus élevée en ^{40}K (naturel) dans les sols de cette région (cf. figure 3).

Une dosimétrie d'ambiance du rayonnement des neutrons et des gammas est en outre réalisée par l'IRA sur mandat de l'OFSP depuis 2004 autour du

PSI-West (11 dosimètres à thermoluminescence-TLD) sur une base trimestrielle. Trois points de mesures supplémentaires sont par ailleurs situés autour de SwissFEL au PSI. Il s'agit de contrôler des endroits accessibles au public sur le toit du bâtiment, au-dessus des beam dumps de l'injecteur, d'Athos et d'Aramis.

Les doses de neutrons relevées autour du PSI-West au cours du 1er trimestre 2021 étaient partout inférieures à la limite de détection. Il en va de même aux trois points situés autour de SwissFEL. Ceci était attendu puisque les installations étaient à l'arrêt. Le reste de l'année, les doses des neutrons étaient faibles ou inférieures à la limite de détection dans la majorité des points autour du PSI West, avec quelques valeurs plus élevées (valeur maximale de 0.134 mSv/trimestre au 4ème trimestre) comparables à celles enregistrées au cours des années précédentes. Notons que les équivalents de dose ambients attendus dans l'environnement, dus à l'irradiation naturelle, sont de l'ordre de 0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons.

Les doses des photons sont restées partout au niveau de l'irradiation naturelle d'environ 0.2 mSv par trimestre.

Mesures dans le milieu atmosphérique

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

Depuis 2019, la surveillance de la radioactivité dans l'air dans le rayon d'influence des centrales nucléaires est assurée uniquement par les 9 stations du réseau URAAnet aero. Le collecteur à moyen débit du PSI dédié à la propre surveillance de ses immissions est par contre toujours en fonction.

Aucun émetteur gamma d'origine artificielle résultant de l'exploitation des centrales nucléaires n'a pu être mis en évidence par le réseau URAAnet aero en 2021 (voir aussi chapitre 4.2). Les activités du ^{137}Cs enregistrées par URAAnet en 2021, sont également restées inférieures à la limite de détection d'env. 3-7 mBq/m³ (pour une mesure de 12h).

Le ^{137}Cs provenant de la remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que l'accident de Tchernobyl) a par contre été régulièrement décelé dans les filtres aérosols des collecteurs à grand débit (HVS). La limite de détection pour le ^{137}Cs de ce dispositif très sensible dédié à la mesure de traces, est de l'ordre de 0.2-0.3 µBq/m³ pour un temps de collecte de 7 jours et une mesure en laboratoire de 48h. A la station HVS de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer, les concentrations de ^{137}Cs ne se sont pas distinguées de celles enregistrées à la station de référence de Güttingen. Ainsi en 2021, les concentrations maximales de ^{137}Cs dans ces 2 stations ont été enregistrées en février et ont atteint respectivement 0.9 µBq/m³ à Klingnau et 1.1 µBq/m³ à Güttingen.

Des traces de ^{24}Na , un radionucléide de courte demi-vie pouvant être produit dans les accélérateurs de particules du PSI, ont également été sporadiquement mesurées dans les filtres HVS de la station de Klingnau entre juillet et décembre. La concentration maximale mesurée s'élève à 159 ± 31 µBq/m³ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immission dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/m³.

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2021.

Lieu	Valeur min/max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruttingen * (environ KKM)	< 2.0 - 2.7	-
Niedergösgen * (environ KKG)	< 2.0 - 3.1	-
Full (environ KKL) *	< 2.0	-
Beznau (environ KKB) **	< 1.8 - 23.0	4.2
PSI **	< 1.8 - 28.2	3.7
ZWILAG **	< 1.8 - 6.8	-

* mesures OFSP / ** mesures PSI

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 globalement entre 0.2 et 2.0 mBq/l par exemple pour le ^{137}Cs . La limite de détection dépend en particulier de la quantité de précipitations.

Les résultats des mesures du tritium (^3H) dans les échantillons mensuels de précipitations des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. Les concentrations de tritium mesurées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires, du PSI et du ZWILAG sont généralement restées proches de la limite de détection de l'ordre de 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs légèrement plus élevées au voisinage du PSI et de Beznau (jusqu'à 25 Bq/l).

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C . Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2021 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 61 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Cette valeur est plus faible que les années précédentes, en raison de la longue période d'arrêt de la centrale pour révision (révision KKL du 24.5 au 30.11.2021). Les doses supplémentaires qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales sont ainsi très faibles (inférieures à 1 µSv par an).

Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout déterminé par des mesures dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats enregistrés en 2021 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 2021. 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 (voir chapitre 3.1) confirment les résultats précédents, à savoir qu' hormis à proximité immédiate (clôture) de ces installations (en particulier à Mühleberg), les valeurs enregistrées aux environs des installations nucléaires ne se distinguent pas de celles mesurées sur les sites de référence.

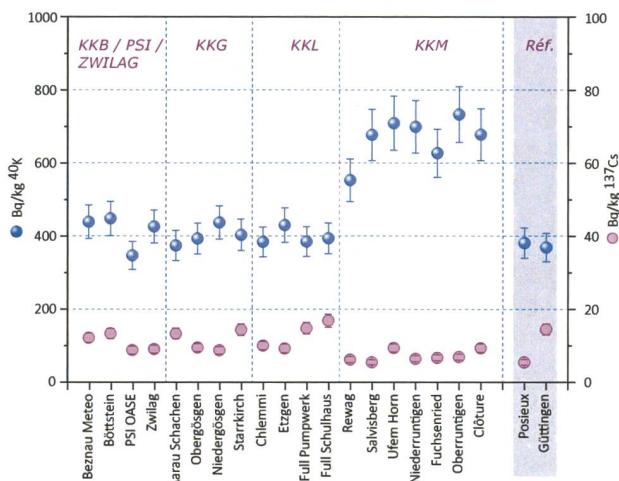


Figure 3:
 ^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2021 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

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

Mesures dans le milieu aquatique

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

qu'en 2021, les rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de Mühleberg, en démantèlement, ont été comparables à ceux des années 2017-2019, alors que la centrale était encore en exploitation. Elles sont restées inférieures à la valeur cible de 1 GBq/an.

Le ^{137}Cs , lui reste sporadiquement présent dans les échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin. Il est essentiellement dû à la remobilisation des dépôts de Tchernobyl et des essais d'armes nucléaires 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.

La figure 4 montre que de manière générale, les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2021 dans les eaux de l'Aar et du Rhin sont restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l, à l'exception de la période avril-mai. Comme chaque

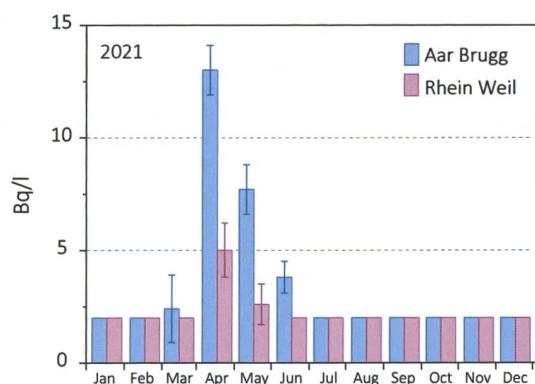


Figure 4:
 Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2021.

année à cette période, on constate en effet une légère augmentation des concentrations de tritium dans l'Aar à Brugg (jusqu'à 13 Bq/l) et à Klingnau (jusqu'à 11 Bq/l), ainsi que, dans une moindre mesure, dans le Rhin (jusqu'à 5 Bq/l à Weil am Rhein) en raison de rejets plus importants de tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant sa révision.

Les traces des rejets liquides sont essentiellement mesurables dans les sédiments. En effet, les produits d'activation, comme le ⁵⁴Mn et le ⁶⁰Co, ne sont pas (ou peu) dissous dans l'eau, mais sont présents sous forme particulière (corrosion) dans les effluents liquides. Des traces de ⁶⁰Co ont été mesurées à une seule reprise dans les sédiments prélevés à Hagneck en 2021; de faibles activités de ⁵⁴Mn ont également été sporadiquement décelées dans les sédiments prélevés à Hagneck, ainsi qu'à Klingnau et Pratteln en 2021.

Le ¹³⁷Cs est quant à lui présent dans pratiquement tous les échantillons de sédiment de l'Aar et du Rhin et provient essentiellement de l'érosion des sols contaminés à la suite de l'accident de Tchernobyl ou des essais nucléaires en atmosphère.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar à Aarberg, Schönenwerd et Döttingen, ainsi que dans le Rhin, près de Augst, en 2021 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle.

Comme chaque année, des échantillons de plantes aquatiques ont également été prélevés en 2021 dans l'Aar (Hagneck, lac du barrage de Klingnau ainsi qu'à Erlinsbach) et le Rhin (Möhlin). Les activités de tous les radionucléides gamma d'origine artificielle sont restées inférieures aux limites de détection. De même, l'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Schönenwerd, Böttstein et Muttenz n'a mis en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle.

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

La surveillance du site de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens effectuée par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP comprend la mesure de la radioactivité (émetteurs gamma, tritium (³H) et ⁹⁰Sr) 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.

En 2021, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4 h aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyé à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2021. Les résultats montrent en effet que les activités du ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 0.5 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ³H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2021 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 5.3 ± 0.7 Bq/l et 4.9 ± 0.9 Bq/l respectivement. Mis à part le phénomène de résurgence locale décelé fin 2011 et début 2012, où des valeurs atteignant 230 Bq/l avaient été mesurées

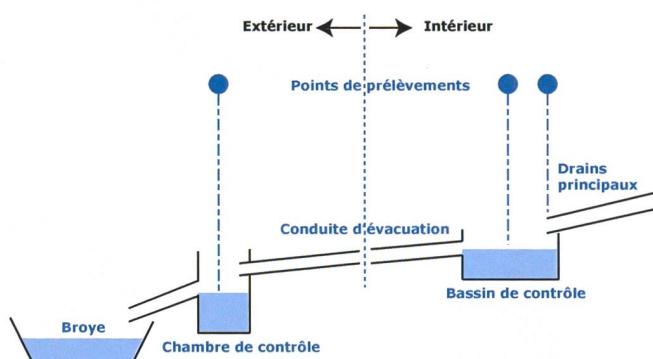


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

et qui avaient nécessité la mise en place d'un programme spécifique, les valeurs enregistrées sont en constante diminution depuis le début de la surveillance en 2001, ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive du tritium (demi-vie du tritium = 12.32 ans).

Pour la mesure du ^{90}Sr , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Aucune activité supérieure à la limite de détection de 7 mBq/l n'a été mise en évidence en 2021.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2021.

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 est resté très inférieur à la valeur directrice de dose 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 de dose liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour l'ensemble du site PSI/ ZWILAG (dont 0.05 mSv/an pour le ZWILAG).

Les mesures effectuées dans tous les compartiments environnementaux ont mis en évidence un faible marquage du milieu: la détection du rayonnement direct, ou du ^{14}C , issu des rejets atmosphériques, dans les feuillages ou encore du ^{3}H et des produits d'activation (^{60}Co , ^{54}Mn), issus des effluents liquides, dans les eaux, resp. les sédiments, de l'Aar et du Rhin témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations pendant l'année sous revue.

Même si des rejets des installations nucléaires conduisent à des doses très faibles par rapport à celles d'origine naturelle ou médicale, le principe de précaution implique de poursuivre les contrôles et les études avec le plus de précision possible pour répondre aux différents objectifs à la fois d'ordre scientifique, réglementaire et d'information du public.

8.6

CERN - Rejets et environnement (Mesures CERN)

F. Malacrida

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 2021, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose efficace maximale délivrée aux membres du public Suisse est demeurée inférieure à 0.002 mSv. Le contrôle des immissions n'a révélé que de faibles traces de radioéléments dans des échantillons prélevés dans les cours d'eau et dans l'air du site CERN de Meyrin. Le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN demeure donc très faible.

Le glossaire relatif aux installations du CERN peut être trouvé en Figure 1.

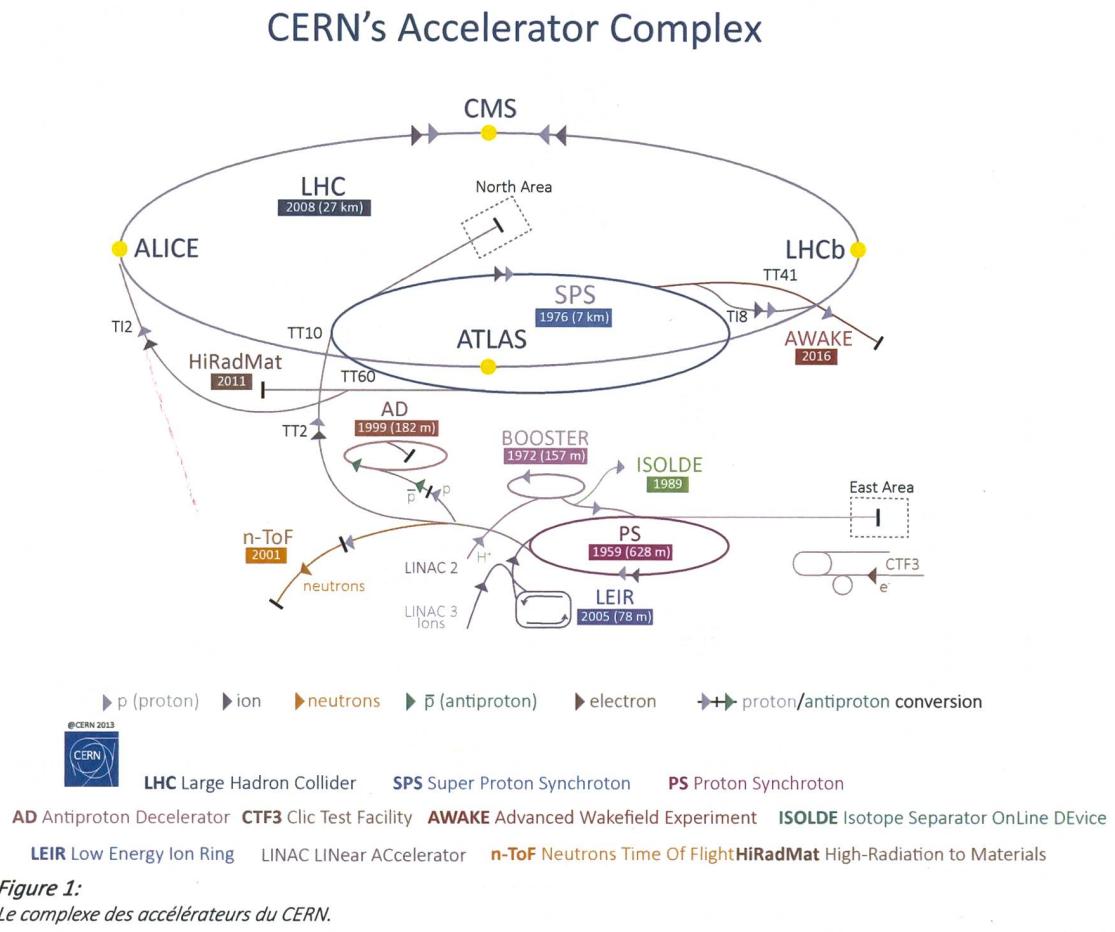
Le CERN

Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Le CERN a son siège à Genève et ses installations sont situées d'un côté et de l'autre de la frontière franco-suisse. Il a pour mission la recherche fondamentale en physique des particules afin de découvrir les constituants et lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière: les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la nature. Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent les résultats de ces collisions.

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

Aspects environnementaux

L'interaction de particules de hautes énergies avec la matière génère des radiations ionisantes et produit des nucléides instables, c'est-à-dire radioactifs. Ces interactions se produisent entre autres lorsque les particules se percutent entre-elles ou percutent des cibles fixes, ainsi que lors de l'extraction et de la collimation des faisceaux. Les accélérateurs sont blindés et les plus puissants d'entre eux sont situés profondément sous terre, de telle manière à ce que seule une fraction infime des rayonnements traverse ces protections; ce type de rayonnement est nommé rayonnement diffusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Conséquemment, le rayonnement diffusé, les effluents gazeux et liquides sont surveillés en continu.



En termes d'impact environnemental, le risque radiologique induit par des installations mettant en jeu des accélérateurs est très faible. Maintenir un faisceau de particules en orbite requiert une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radionucléides produits sont principalement des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités. Pour plus d'information, se référer au site: <https://voisins.cern/fr/radiation>.

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

cléides peuvent être mesurées dans l'air, lorsque par exemple le tritium 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 pompés des circuits sous vide puis provisoirement stockés dans des cuves en vue de leur décroissance avant rejet et seule une fraction des quantités initialement récoltées sont émises.

Programme de surveillance

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnemental, qui est élaboré en tenant compte des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance du rayonnement diffusé se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou prédis 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 2021, 40 stations de ce type étaient en opération.

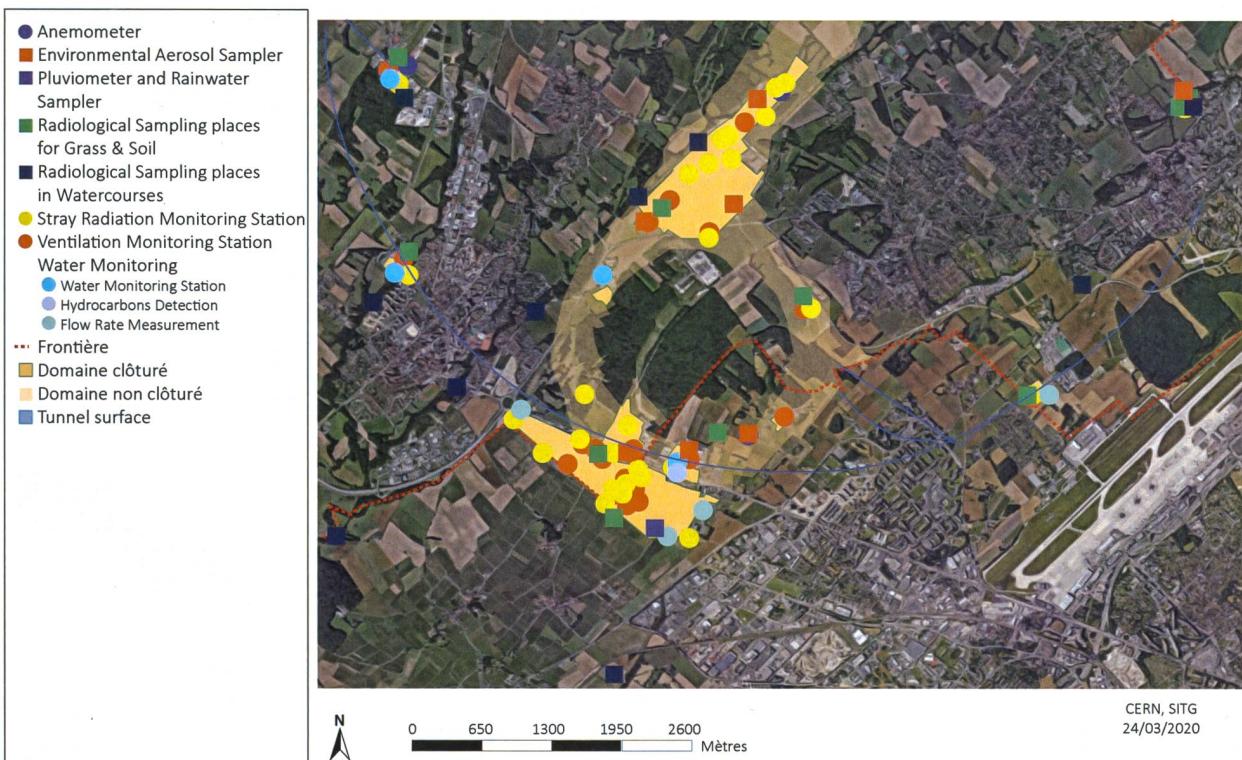


Figure 2:

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

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 2021, 42 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 (14 stations en 2021); les eaux claires incluent les eaux de refroidissement des circuits secondaires, les eaux d'infiltration des tunnels et les eaux de pluie. Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vies courtes et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire. Deux stations contrôlent indépendamment les eaux de refroidissement et d'infiltration du SPS et du LHC.

Les niveaux de rayonnement diffusé mesurés ainsi que le bilan des rejets vers l'atmosphère et les cours d'eau sont utilisés pour quantifier l'impact dosimétrique, par le biais de modèles environnementaux et radiologiques reconnus [3, 4]. La surveillance des émissions est complétée par la surveillance des immissions, qui est un processus

impliquant la collecte d'échantillons environnementaux et leur analyse en laboratoire. Les résultats doivent corréler avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont adéquats. Cette surveillance implique également un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (13 stations, dont deux collectent aussi les éléments volatils comme l'iode gazeux sur charbons actifs ainsi que l'humidité pour la mesure du tritium dans l'air), des échantillons d'herbes (12 points d'échantillonnage), d'eau, de bryophytes (mousses) et de sédiments dans les cours d'eau (14 points), de l'eau des nappes phréatiques et de consommation (23 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 2021

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2021

Après 2 ans d'arrêt dédiés à l'amélioration des installations, la majorité des installations du CERN ont progressivement été remises en service. Le LHC n'a fait l'objet que d'une brève période de tests à très faibles intensités, en vue de son redémarrage en 2022.

Sur le site de Meyrin, la zone cible du décélérateur d'antiprotons et la zone est primaire ayant fait l'objet de renouvellements importants, de nouvelles stations de surveillance des rejets atmosphériques y ont été déployées.

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 en clôture des sites. Les doses gamma sont quant à elles induites par le rayonnement diffusé (muons) et les photons émis par les gaz de demi-vies courtes rejetés par les installations (voir ci-dessous).

Tableau 1: Rejets radioactifs dans l'air en 2021.

Origine du rejet	$^{11}\text{C}, ^{13}\text{N}, ^{14,15}\text{O}, ^{41}\text{Ar}$		Bêta aérosols	Tritium	^{131}I
	TBq	MBq			
LINAC 4	0.03	< LD	< LD	< LD	< LD
PS BOOSTER	1.0	160	2.0	2.9	< LD
MEDICIS *	0.007	< LD	< LD	0.04	0.1
ISOLDE	5.9	< LD	0.6	3.3	169
Anneau principal PS	1.1	< LD	< LD	5.3	< LD
TT70 transfert PS-SPS	4.0	< LD	< LD	< LD	< LD
n-TOF	1.3	0.2	0.001	0.9	0.02
Zone est primaire	0.08	< LD	< LD	0.005	< LD
Zone est, IRRAD/CHARM	0.5	4.1	0.1	0.02	< LD
TT10 injection PS-SPS	0.6	2.5	0.05	1.7	< LD
Evaporation tritium	< LD	< LD	< LD	33	< LD
SPS BA5	3.6	0.03	0.002	1.4	< LD
HIRADMAT	0.02	< LD	< LD	2.9	< LD
LHC Machine Secteurs 2->1, 8->1	< LD	< LD	< LD	0.06	< LD

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

Tableau 2: Rejets dans les cours d'eau en 2021.

Origine du rejet	Tritium	^{22}Na	$^{11}\text{C}, ^{13}\text{N}, ^{14,15}\text{O}, ^{41}\text{Ar}$		Rejeté dans :
			GBq	MBq	
Site de Prévessin, SPS	15	< LD	< LD	< LD	Le Lion (F)
Site de Meyrin, Sud-est	0.003	< LD	< LD	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin, Sud-ouest	2.1	< LD	< LD	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin, Ouest	0.08	< LD	< LD	< LD	Le Lion (F)
Site SPS BA6 + site LHC PA1	0.2	< LD	< LD	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	0.02	< LD	< LD	< LD	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS, rejet par le site du LHC PA8	2.7	< LD	< LD	< LD	Le Nant (F)

La Figure 3 présente les doses mesurées par les moniteurs de rayonnement diffusé.

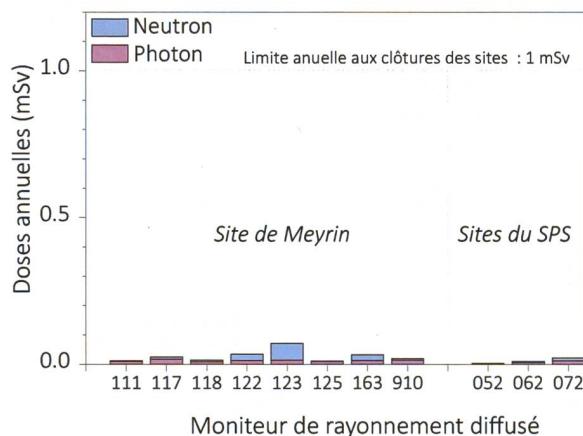


Figure 3:
Doses annuelles nettes enregistrées par les moniteurs de rayonnement diffusé situés en clôtures (CERN, 2021).

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 ^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O et ^{41}Ar ; le ^{7}Be ; l'activité bêta total (majoritairement ^{32}P et ^{33}P), le tritium (^{3}H) ainsi que les isotopes de l'iode, représentés par ^{131}I . Cette dernière catégorie est principalement émise par l'installation ISOLDE.

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. Les radionucléides rejetés se répartissent en quatre catégories: (a) le tritium sous forme aqueuse (HTO), (b) le ^{22}Na , (c) les rejets d'émetteurs de positrons de demi-vie courte (^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O) et (d) le ^{24}Na d'une demi-vie de 15 heures. Le Tableau 2 présente les rejets de 2021, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés.

Contrairement aux années d'exploitations précédentes, aucun radioélément de demi-vie courte n'a été détecté.

Surveillance des immissions

Les rejets atmosphériques des installations du site de Meyrin ont dérivé en des concentrations locales maximales de $0.09 \pm 0.02 \text{ Bq/m}^3$ en ^{3}H , de $0.09 \pm 0.05 \text{ mBq/m}^3$ en ^{125}I , $0.14 \pm 0.07 \text{ mBq/m}^3$ en ^{131}I ainsi que $0.6 \pm 0.2 \text{ mBq/m}^3$ en ^{194}Hg , provenant majoritairement de l'installation ISOLDE.

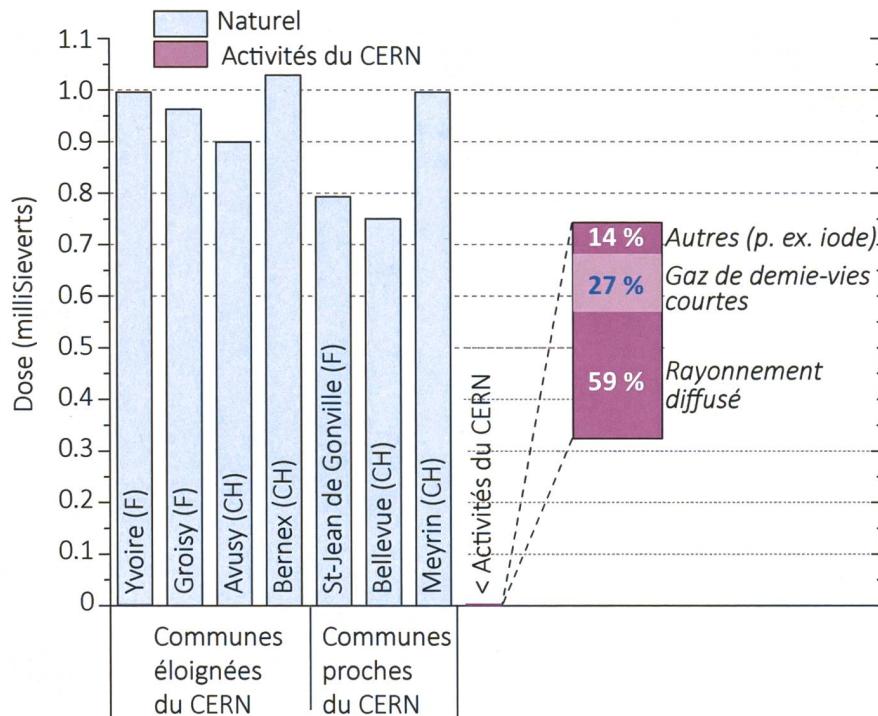


Figure 4:
Contribution à la dose annuelle des activités du CERN sur le site CERN de Meyrin, comparée aux variations des doses externes naturelles dans des communes françaises et suisses.

Concernant l'environnement aquatique et comme pour les années précédentes, du ^{54}Mn ($3 \pm 1 \text{ Bq/kg}$ masse sèche) a été mesuré dans l'échantillon de bryophytes prélevées dans le Lion (F), tandis que l'échantillon ponctuel d'eau du Nant (F) contenait $6 \pm 1 \text{ Bq/l}$ de tritium.

Les valeurs susmentionnées étaient bien inférieures aux limites applicables [2]. Le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN peut donc être considéré comme négligeable.

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du groupe de référence a été calculée à partir des équivalents de dose ambients mesurés aux barrières du site [3] et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion basé sur les directives [4, 5]. Les membres du public Suisse ont reçu une dose efficace de maximum 0.002 mSv. Il convient de mentionner que les échanges menés avec les autorités des pays des états hôtes dans le cadre des accords tripartites conduit le CERN à faire évoluer ses méthodes d'évaluation de l'impact. Il n'est cependant pas attendu que l'exercice amènera à des valeurs de doses efficaces significativement différentes dans le futur.

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 2021 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 l'air du site de Meyrin et certains cours d'eau récepteurs. Les valeurs de concentration sont restées bien inférieures aux limites d'immission applicables [2]. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN demeure faible.
- De manière à confronter l'impact dosimétrique des activités du CERN aux valeurs typiques d'expositions naturelles, la Figure 4 compare la dose susmentionnée de 0.002 mSv avec la dose 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 (2021), Annexe 3.
- [3] Evaluation of doses from stray radiation in the environment of CERN (2021) EDMS# 2386315
- [4] 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).
- [5] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).

8.7

Environnement du CERN

(mesures OFSP)

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

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

J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus

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

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE) du CERN, l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnements au voisinage du centre de recherche. L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2021 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 8 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants.
- Aérosols: mesure continue par spectrométrie gamma des aérosols déposés sur un filtre déroulant par le moniteur URAnet et spectrométrie gamma hebdomadaire des filtres d'un collecteur à haut débit.
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel, mesure du tritium par l'OFSP).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) et végétaux ainsi que certains produits locaux (comme le ^{3}H dans le vin).

A noter qu'après 2 ans d'arrêt pour maintenance, la majorité des installations du CERN ont progressivement été remises en service en 2021. Le LHC quant à lui n'a fonctionné que pour une brève période de tests à très faibles intensités, en vue de son redémarrage en 2022.

Mesures de l'exposition ambiante

Douze sites ont été surveillés en 2021 par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP. Cinq d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français) et 6 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 équivalents de dose ambients des neutrons et des photons relevés dans les emplacements autour du CERN sont généralement restées faibles en 2021, de l'ordre de l'irradiation naturelle (0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons et environ 0.2 mSv par trimestre pour

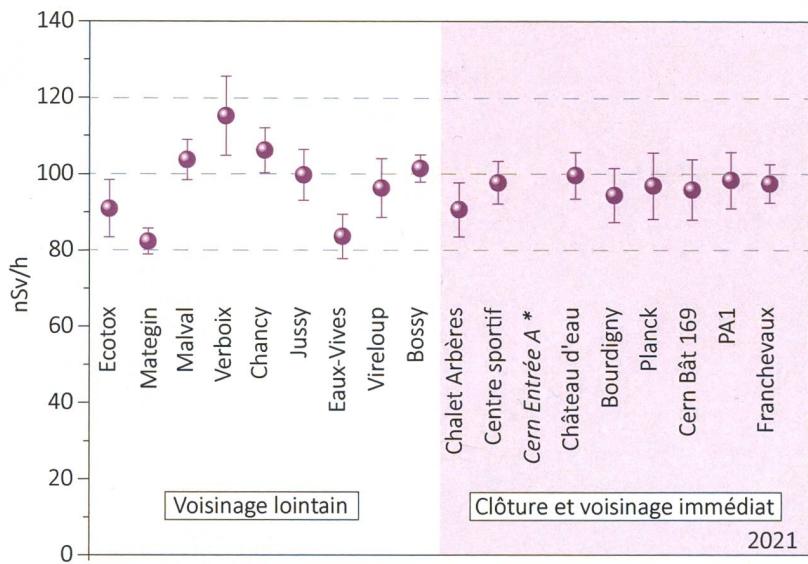


Figure 1:

Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2021 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1m au-dessus du sol (* pas de mesure en 2021).

les gammas). Ainsi, les doses des neutrons étaient faibles ou inférieures à la limite de détection en presque tous les points, sauf aux points situés près du synchrotron à protons à Meyrin, où des doses clairement mesurables (0.047 à 0.178 mSv par trimestre) ont été observées après le redémarrage de l'installation en mars et jusqu'à la fin de l'année. On observe également des doses neutrons en un point (proche de NA62) à Prévessin, mais uniquement au 4^{ème} trimestre. C'est une situation qui correspond à celle observée en 2018 et auparavant, avec les installations en exploitation.

La dose des photons correspond partout à l'irradiation naturelle sauf en un point situé à Prévessin où une valeur 2 fois plus élevée a été mesurée au 3^{ème} trimestre, ce qui s'est déjà produit en 2016 et 2017 (et auparavant en 2006, 2007, 2010 et 2012).

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2021 sur 8 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants n'ont par ailleurs montré aucune influence du centre de recherche sur l'exposition ambiante due au rayonnement gamma. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$) pour les gammas se sont échelonnées entre 82 et 115 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 96 ± 3 nSv/h; moyenne des sites distants 98 ± 11 nSv/h).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air, URAnet, située au CERN a fonctionné sans interruption en 2021. 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 3 à 7 mBq/m³ pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2021. 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 (fig. 2). Le cas du ^7Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production/émissions par les installations du CERN, en particulier le PS Booster, voir Chap. 8.6).

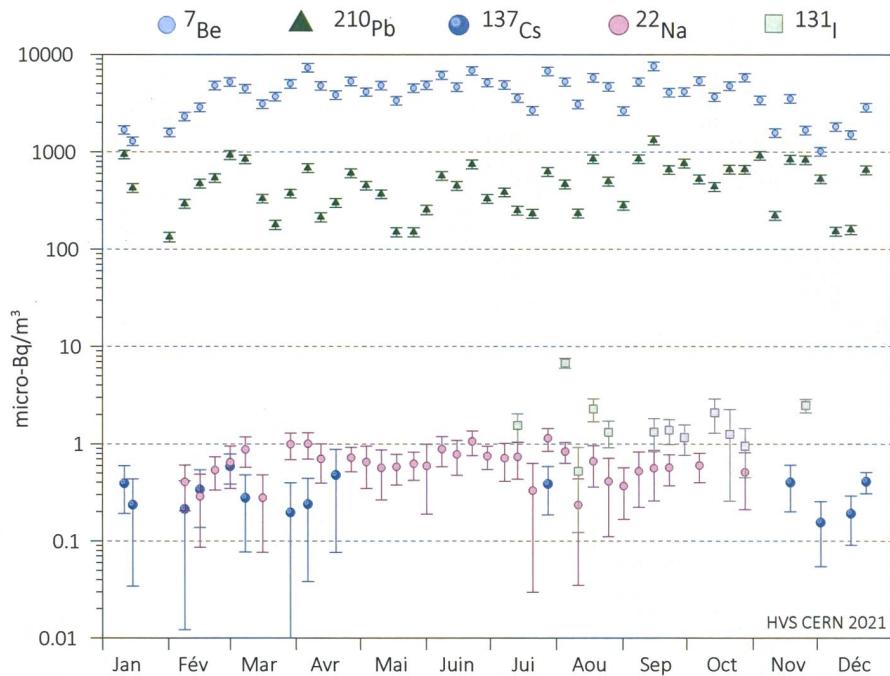


Figure 2 :

Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2021.

Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ^{7}Be mesurées en 2021 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Tableau 1 :

Concentrations du ^{7}Be mesurées en 2021 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 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	Moyenne ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
CERN (Meyrin/GE)*	1.0 - 7.6	4.1 ± 1.6
Posieux/FR	1.2 - 7.3	4.4 ± 1.7
Klingnau/AG	1.0 - 6.8	3.7 ± 1.5
Göttingen/TG	1.2 - 7.8	4.2 ± 1.7
Cadenazzo/TI	1.4 - 8.2	4.8 ± 1.5

Des traces de ^{22}Na , également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre 0.2 et 1.1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

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

Avec la remise en exploitation des installations, des traces de ^{24}Na (46 à 78 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) et de ^{131}I (0.5 à 7 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) ont à nouveau été décelées dans les filtres aérosols en 2021, contrairement aux années 2019 - 2020. Ces radioisotopes de courte demi-vie (15 h pour le ^{24}Na et 8 jours pour le ^{131}I) sont produits dans les installations du CERN et sont sporadiquement mesurables dans l'environnement quand celles-ci sont en fonction. Même si la concentration d' ^{131}I mesurée dans les filtres aérosols ne représente qu'une fraction de la concentration totale d' ^{131}I présent dans l'air (N.B la partie gazeuse n'est pas mesurée sur les filtres aérosols, mais seulement par le moniteur d'iode du réseau URANet), l'impact radiologique de ces radionucléides est resté négligeable. Les concentrations maximales sont en effet restées nettement inférieures à 0.1% des limites d'immissions définies pour ces radionucléides dans l'air selon l'Ordonnance sur la radioprotection.

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

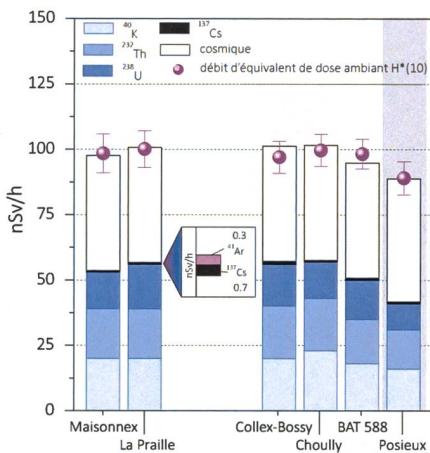


Figure 3 :

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 2021. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

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 contribution supplémentaire à l'exposition ambiante due à ce radionucléide est minime (de l'ordre de 0.3 nSv/h).

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 2021. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par le département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme ont

fait l'objet d'un rapport spécifique¹.

25 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) dans le Nant d'Avril entre le 2 novembre 2020 et le 12 novembre 2021, avec un temps d'intégration de 13 ± 4 jours par échantillon. A noter que certaines périodes (3.-27.11.20, 12-22.01.21, 3-16.05.21 et 20-24.06.21) ne sont pas couvertes à la suite de pannes de l'échantillonneur.

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.

Dans les échantillons d'eau brute, outre les radioisotopes géogènes, le ^7Be est le principal radioisotope détecté (figure 4). Son activité moyenne (lorsque l'isotope est présent) pour la période couverte par le rapport s'est élevée à 0.37 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ^7Be (1.17 ± 0.04 Bq/l) a été mesurée au mois de septembre 2021.

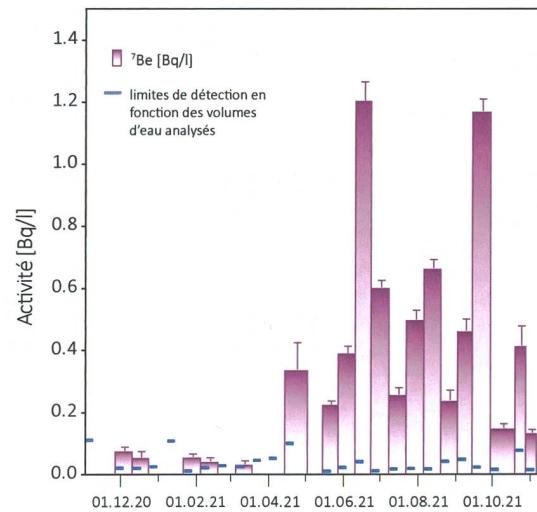


Figure 4 :

Activités du ^7Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'Avril entre novembre 2020 et novembre 2021

Le ^{137}Cs , issu des tests nucléaires dans l'atmosphère et de l'accident de la centrale de Tchernobyl, n'a été mesuré sur les particules qu'à quatre reprises,

¹ J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°22 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2020 – Novembre 2021; Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Janvier 2022)

avec une valeur maximale de 0.011 ± 0.001 Bq/l. Le ^{22}Na a été détecté dans quatre échantillons également (0.003 à 0.007 Bq/L), avec des valeurs très proches de la limite de détection.

L'échantillonnage des eaux ayant été réalisé en fonction du débit, il est possible d'estimer le flux d'un isotope en multipliant les débits (exprimés en $\text{m}^3/\text{période}$) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de ^7Be pour la période 2020 - 2021 est ainsi de 1'641 MBq par an au minimum et de 2'001 MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent au niveau des années précédentes, qui montraient une moyenne de 1'640 MBq/an (figure 5).

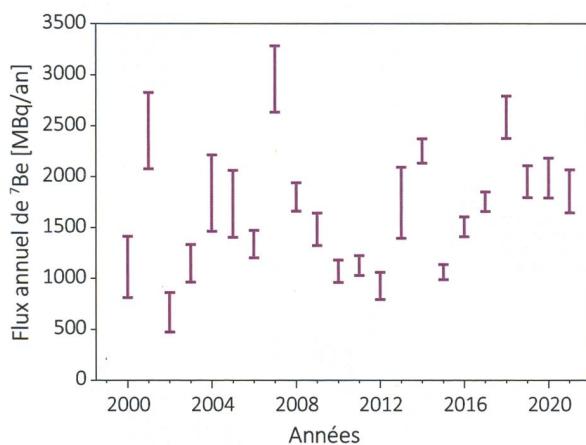


Figure 5 :
Estimation des flux annuels minimums et maximums de ^7Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^7Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons avec des activités spécifiques variant respectivement entre 502 et 1'574 Bq/kg, et entre 3.6 et 10.7 Bq/kg. Ces résultats se situent dans la moyenne des valeurs mesurées les années précédentes.

Afin de mettre en évidence d'éventuelles augmentations des immissions radioactives dans le milieu aquatique dues au fonctionnement du LHC, des sédiments et des bryophytes sont par ailleurs prélevés une fois par an aux 8 principaux points de rejet des eaux du LHC et analysés par le département F.-A. Forel. Les pièges à sédiments ont été exposés du 30 septembre au 29 octobre 2021. Sur chaque site, des bryophytes ont été prélevées le 30 septembre 2021. En raison de l'absence de bryophytes sur les points PA7 et PA8, aucune mesure pour ce type d'échantillon n'a pu être effectuée pour ces sites. A noter que le LHC, à l'arrêt depuis 2019, n'a été redémarré qu'à la fin octobre 2021 pour des tests à faible intensité de faisceau; il n'était donc pas en fonction pendant la période couverte par le rapport du département F.-A. Forel.

Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux points de rejet du LHC se sont échelonnées entre 43 et 1'128 Bq/kg pour le ^7Be et entre 3.9 et 15.7 Bq/kg pour le ^{137}Cs . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^7Be variant entre 124 et 3'928 Bq/kg et de 3.9 Bq/kg pour le ^{137}Cs , certains sites présentant des valeurs inférieures à la limite de détection. L'activité très élevée en ^7Be ($3'928 \pm 264$ Bq/kg) du point P6 (proche du Bois sous Villars Dame) est la valeur la plus élevée mesurée depuis le début de la surveillance.

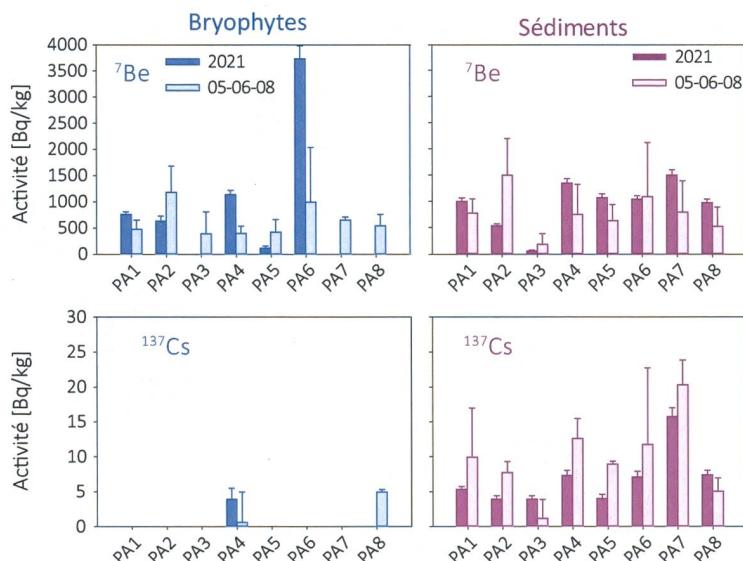


Figure 6 :
Activités du ^7Be et du ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8) en 2021 comparées aux valeurs moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008 (valeurs 05-06-08), avant la mise en service du LHC. Il n'y a pas d'échantillon de bryophytes aux points PA7 et PA8 en 2021.

Une origine naturelle est plausible, car l'activité en ^{210}Pb , également d'origine essentiellement atmosphérique, est nettement plus élevée dans cet échantillon (448 Bq/kg) que sur les autres sites (~ 150 Bq/kg).

La comparaison (figure 6) de ces résultats avec ceux des années de référence (2005, 2006 et 2008), alors que le LHC n'était pas encore en activité, ne montre pas de nouveaux radioisotopes.

En résumé, les résultats du programme de surveillance mené par le département F.-A. Forel ont montré, comme lors des années précédentes, qu' hormis les radioisotopes d'origine géogène, les radioisotopes présentant les plus fortes activités sont le ^7Be et le ^{137}Cs . Le ^7Be est d'origine naturelle et les mesures effectuées ne peuvent pas mettre en évidence une origine anthropique. Le ^{137}Cs résulte de l'érosion des sols contaminés par les essais nucléaires dans l'atmosphère et par l'accident de Tchernobyl.

Des traces de ^{22}Na pouvant provenir du CERN ont été détectées en 2021 dans les eaux du Nant d'Avril, avec toutefois des valeurs très proches des limites de détection. Les autres radioéléments parfois détectés dans le Nant d'Avril au cours des périodes de

surveillance précédente, comme le ^{57}Co , le ^{58}Co , le ^{60}Co ou le ^{54}Mn , n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes mesurées pour contrôler les immissions du LHC (à l'arrêt pendant la période de surveillance mise en œuvre par le département F.-A. Forel).

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 faible en 2021.

Si des traces des radionucléides de courte demi-vie produits par les installations du CERN, comme le ^{24}Na , l' ^{41}Ar ou l' ^{131}I , ont sporadiquement pu être détectées dans l'air au voisinage du CERN en 2021, leur impact radiologique est resté négligeable. Les autres résultats des mesures dans l'air, le milieu terrestre ou encore les eaux et sédiments du Nant d'Avril ne se sont que peu distingués de ceux enregistrés dans les stations de mesures de référence, situées hors influence du centre de recherche.

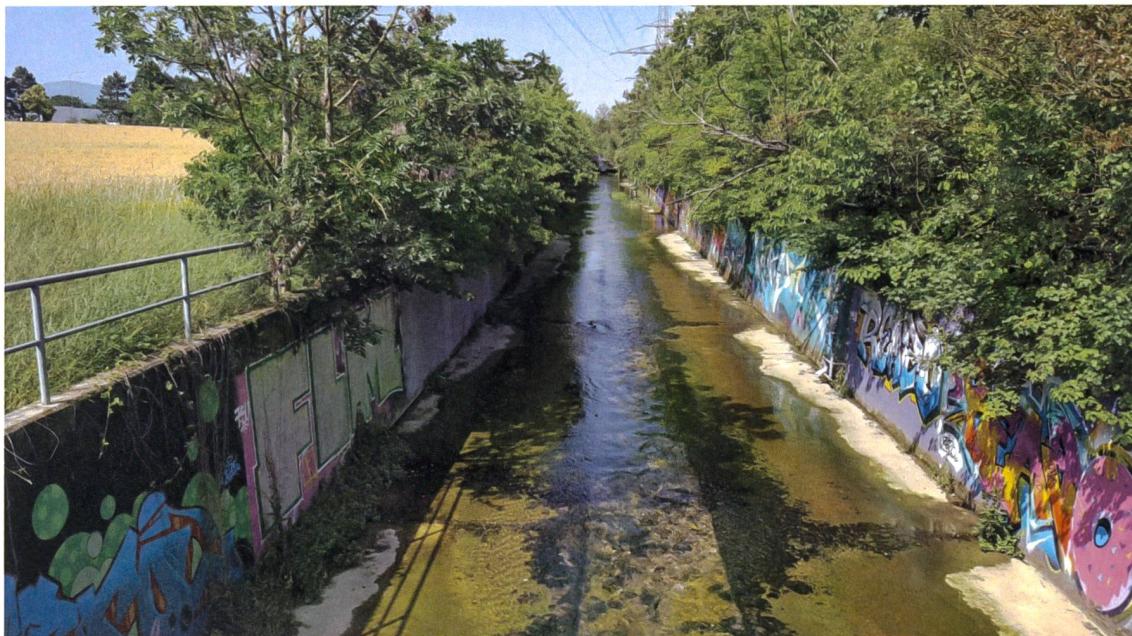


Figure 7:
Nant d'Avril

