

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: - (2016)

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

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 10.01.2026

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

Chapitre / Kapitel 8

Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Surveillance des installations nucléaires: Emissions et Immissions

8.1

Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

F. Cartier, R. Habegger, A. Leupin

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2016 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr

Emissionen aus den Kernanlagen Ergebnisse 2016

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1a für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Figur 1b enthält eine Aufschlüsselung der Abgaben der Kernkraftwerke nach Monat für die limitierten radioaktiven Abgaben. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen gemäss ENSI-Richtlinie G14 errechneten Personendosen für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2016. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c aufgelistet. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für die meistbetroffenen Personen (nur Erwachsene) über die letzten 20 Jahre.

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

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Ergebnisse zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

Bei der monatlichen Aufschlüsselung der radioaktiven Abgaben aus den Werken (vgl. Figur 1b) ist bei den flüssigen Abgaben beim KKG die jährlich jeweils vor dem Revisionsstillstand durchgeführte Verwerfungsaktion für tritiumhaltiges Wasser bei den Abgaben erkennbar. Solche Abgaben sind in den Druckwasserreaktoren systembedingt erforderlich, um den operationellen Strahlenschutz während der Revision zu optimieren. Im Gegensatz zum KKG erfolgen die Tritiumabgaben im KKB über das ganze Jahr verteilt.

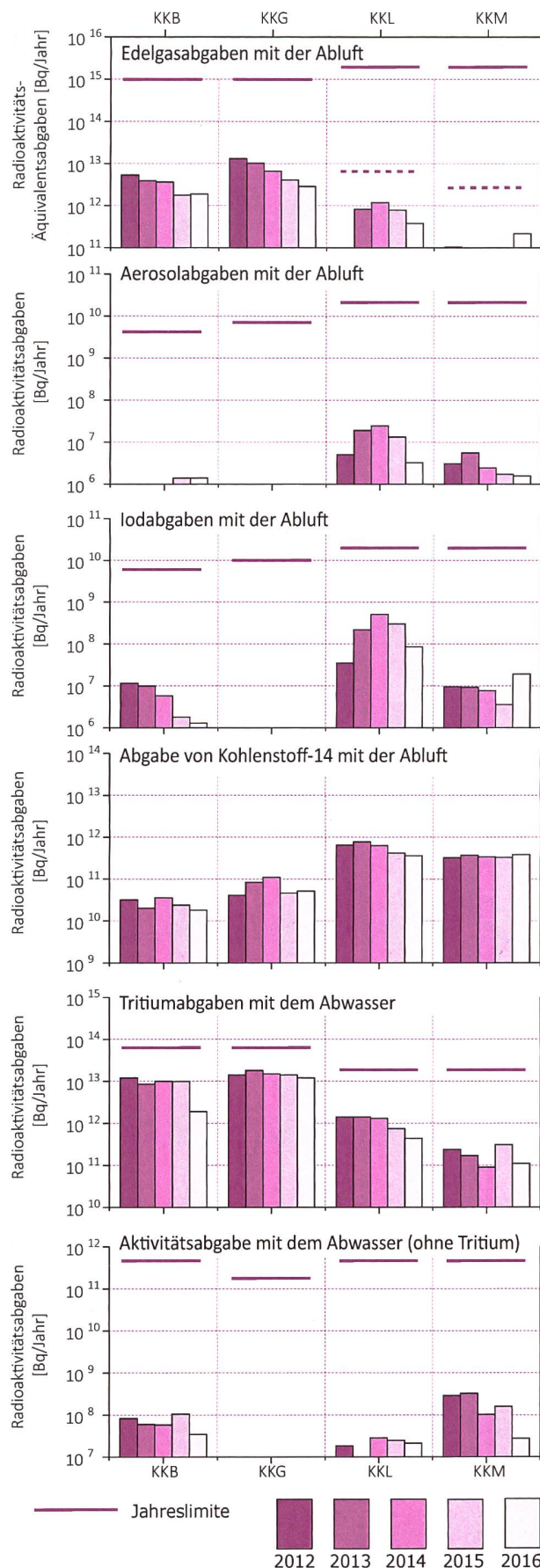
Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKG und KKB weniger als 0.001 mSv und beim KKM und KKL etwa 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betrugen somit im Jahr 2016 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von weniger als 0.007 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeführten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen

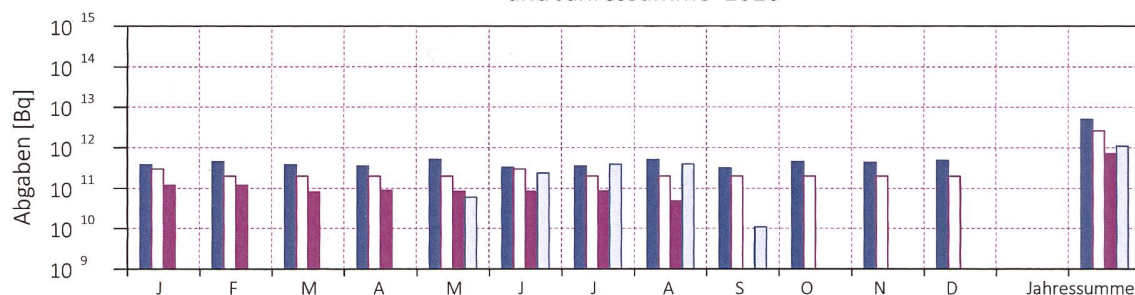
Fig 1.a:

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2012 bis 2016) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten.

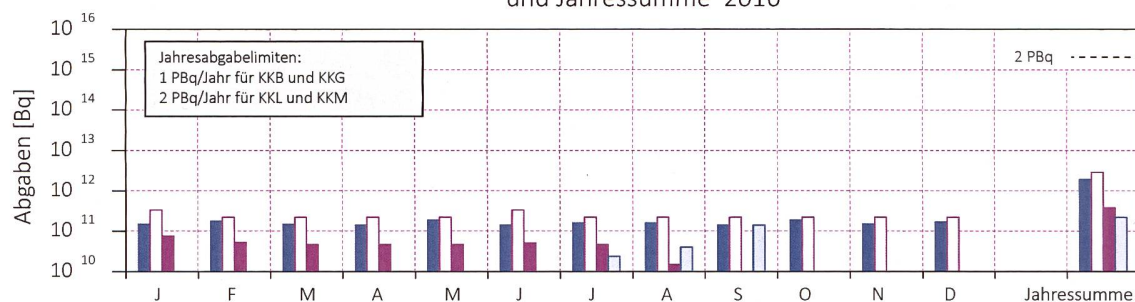
Angegeben ist für die jeweilige Nuklidgruppe und den Abgabepfad die Jahressumme der bei den einzelnen bilanzierenden Messungen durch die Kernkraftwerke ausgewiesenen Aktivitätsabgaben. Die Edelgasbilanzierung im KKB und im KKG basiert auf Beta-Totalmessungen. Für die Umrechnung in die für den Vergleich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



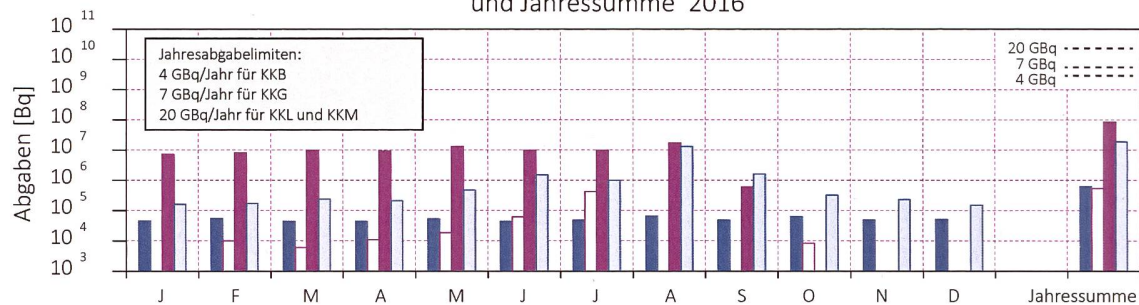
Monatliche **Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2016



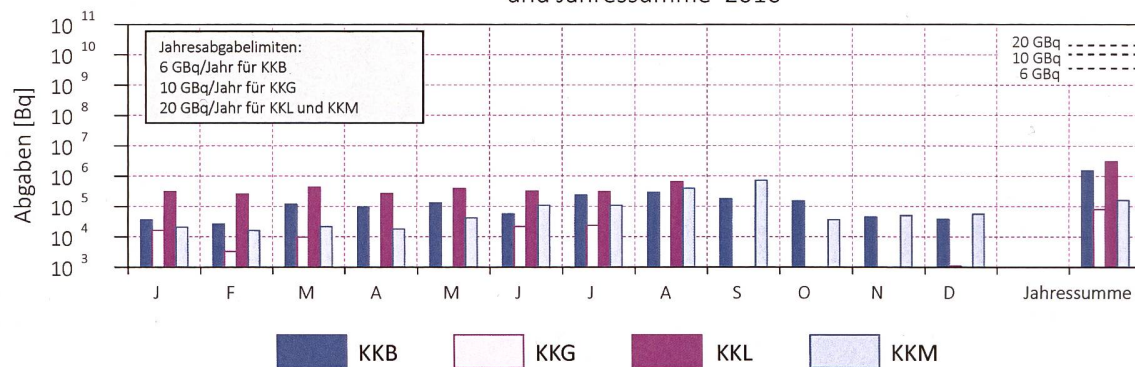
Monatliche **Äquivalent-Edelgasabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2016



Monatliche **Abgaben Iod-131** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2016



Monatliche **Aerosolabgaben** mit der Abluft aus den Kernkraftwerken
und Jahressumme 2016



■ KKB ■ KKG ■ KKL ■ KKM

Fig 1.b (Teil 1):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2016 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

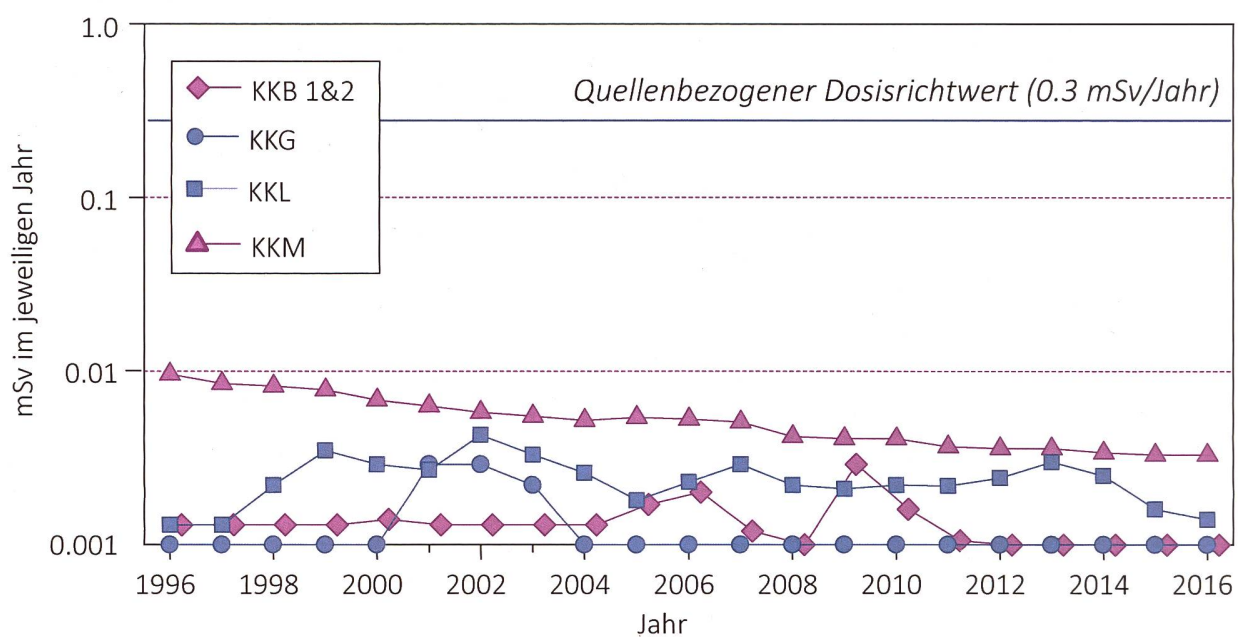
die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) erfolgten im Berichtsjahr Einlagerungen von 9 Transport- und Lagerbehältern mit hochaktivem Abfall aus Sellafield, von Glaskokillen mit mittelaktivem Abfall aus La Hague sowie von Brennelementen aus dem KKL. In der Konditionieranlage wurden grosse Mengen verschiedensten Materials angeliefert und konditioniert. Bei der Plasmaanlage fand 2016 eine Verbrennungskampagne im Herbst statt. Die für das Jahr 2016 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.



Fig 1.b (Teil 2):

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2016 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.



Figur 2:

Berechnete Dosen für eine «meistbetroffene Person» (Erwachsene) in der Umgebung der schweizerischen KKW.

Unter «meistbetroffene Person» versteht man eine fiktive erwachsene Person, die sich dauernd am kritischen Ort aufhält, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort bezieht und nur Trinkwasser aus dem Fluss unterhalb des jeweiligen Kernkraftwerks konsumiert. An diesem Ort ist der Dosisbeitrag durch die Direktstrahlung aus den Kernkraftwerken vernachlässigbar. Werte kleiner als 0.001 mSv werden in der Figur nicht dargestellt.

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2016 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung. (Fussnoten siehe Text)

Ort	Medium	Art der Abgaben ¹	Bilanzierte Abgaben ²				Berechnete Jahresdosis ³		
			Messung	Normiert ^{1,2}	Limiten ⁴		mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Prozent der Limite	Erw.	10j Kind	1j Kind
KKB1 + KKB2	Abwasser 2'800 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.0·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.9·10 ¹²	-	7·10 ¹³	3 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	5.0·10 ¹²	1.9·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.2%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.4·10 ⁶	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	6.2·10 ⁵	-	4·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.8·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKG	Abwasser 7'575 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.5·10 ⁶	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.2·10 ¹³	-	7·10 ¹³	17 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<2.6·10 ¹²	<2.9·10 ¹²	1·10 ¹⁵	<0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	8.0·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	5.4·10 ⁵	-	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	5.2·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKL	Abwasser 11'720 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.2·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	4.4·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	2 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	7.1·10 ¹¹	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	3.0·10 ⁶	8.6·10 ⁷	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	8.6·10 ⁷	-	2·10 ¹⁰	0.4 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.6·10 ¹¹	-	-	-	0.0014	0.0018	0.003
	Dosis total						0.0014	0.0018	0.0031
KKM	Abwasser 2'583 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.6·10 ⁹	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.1·10 ¹¹	-	2·10 ¹³	0.6%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	1.1·10 ¹²	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.5·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0024	0.0022	0.0022
		Iod: ¹³¹ I	1.9·10 ⁷	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.8·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	0.0012	0.0021
	Dosis total						0.0033	0.0035	0.0043
ZZL	Abwasser 481 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.9·10 ⁸	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	3.2·10 ⁹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-γ-Aerosole	1.1·10 ⁵	-	1·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.1·10 ⁴	-	3·10 ⁷	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.7·10 ⁷	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.8·10 ¹⁰	-	1·10 ¹⁴	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001

Tabelle 2:

Zusammenstellung der Abgaben des Paul Scherrer Instituts im Jahr 2016 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungslabor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszweischlager
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft^{1,2} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	-	-	-	-	-
β/γ-Aerosole, ohne Iod	2.6·10 ⁷	-	-	-	4.6·10 ⁴
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	4.3·10 ⁶	-	-	-	-
Tritium als HTO	1.2·10 ¹⁰	-	-	5.1·10 ¹⁰	6.8·10 ⁹
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.2·10 ⁷	-	-	1.9·10 ⁸	1.4·10 ⁷
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015
Kind 10j	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015
Kleinkinder	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI ^{1,2}		
	Zentrale Fortluftanlagen	Injektor II	C-Labor	Abwasser 1'142 m ³	Abluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser^{1,2} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	6.1·10 ⁷	-	4.4·10 ⁶
Tritium	-	-	-	1.9·10 ¹¹	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	1.7·10 ¹⁴	-	-	-	1.7·10 ¹⁴	3.8·10 ¹⁴
β/γ-Aerosole, ohne Iod	1.4·10 ¹⁰	1.2·10 ⁶	1.6·10 ⁵	-	1.4·10 ¹⁰	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	6.0·10 ⁷	-	2.1·10 ³	-	6.0·10 ⁷	1.7·10 ⁷
Tritium als HTO	1.4·10 ¹²	-	-	-	1.4·10 ¹²	-
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kind 10j	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kleinkinder	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert⁴	4.0 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 5.0%	

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2016:

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
^3H	$1.9 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{13}$	$4.4 \cdot 10^{11}$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$1.9 \cdot 10^{11}$	$3.2 \cdot 10^9$
^7Be					$1.1 \cdot 10^7$	
^{22}Na					$8.1 \cdot 10^4$	$6.9 \cdot 10^4$
^{24}Na	$2.3 \cdot 10^6$					
^{46}Sc					$7.0 \cdot 10^3$	
^{47}Sc					$7.1 \cdot 10^5$	
^{48}Sc					$6.3 \cdot 10^3$	
^{48}V					$1.0 \cdot 10^4$	
^{51}Cr	$5.7 \cdot 10^5$			$2.0 \cdot 10^7$		
^{54}Mn	$7.7 \cdot 10^5$		$9.9 \cdot 10^5$	$5.4 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^5$	$4.7 \cdot 10^5$
^{56}Co					$1.4 \cdot 10^4$	
^{57}Co		$3.5 \cdot 10^4$			$3.1 \cdot 10^4$	
^{58}Co	$9.5 \cdot 10^6$		$1.5 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^4$	
^{60}Co	$5.8 \cdot 10^7$	$7.8 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^8$	$1.0 \cdot 10^8$	$3.5 \cdot 10^4$	$7.6 \cdot 10^6$
^{65}Zn			$6.5 \cdot 10^6$	$6.5 \cdot 10^6$		
^{83}Rb					$9.8 \cdot 10^3$	
^{85}Sr					$3.9 \cdot 10^3$	
^{88}Y					$7.2 \cdot 10^3$	
^{89}Sr	$3.1 \cdot 10^5$			$4.1 \cdot 10^5$	$7.2 \cdot 10^3$	
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$8.6 \cdot 10^5$			$5.0 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^6$	
^{95}Nb	$6.7 \cdot 10^4$					
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$1.6 \cdot 10^5$	$5.2 \cdot 10^4$				
^{103}Ru	$5.0 \cdot 10^4$					
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$2.1 \cdot 10^5$			$9.4 \cdot 10^5$		
^{111}In					$1.2 \cdot 10^5$	
^{122}Sb	$7.1 \cdot 10^5$					
^{124}Sb	$1.6 \cdot 10^7$			$1.5 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$	
^{125}Sb	$2.3 \cdot 10^7$					$8.3 \cdot 10^6$
$^{123\text{m}}\text{Te}$	$4.8 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^6$				
^{132}Te		$6.1 \cdot 10^5$				
^{131}I			$4.8 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^6$		
^{132}I		$5.7 \cdot 10^5$				
^{134}Cs	$6.0 \cdot 10^6$			$9.6 \cdot 10^4$	$5.0 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^6$
^{137}Cs	$7.3 \cdot 10^7$		$5.0 \cdot 10^5$	$3.9 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	$3.7 \cdot 10^8$
^{141}Ce			$7.0 \cdot 10^5$		$7.9 \cdot 10^3$	
^{144}Ce	$2.3 \cdot 10^5$					
^{149}Gd					$7.1 \cdot 10^4$	
^{160}Tb					$1.8 \cdot 10^4$	
^{161}Tb					$2.8 \cdot 10^4$	
^{172}Lu					$2.1 \cdot 10^4$	
^{177}Lu					$3.5 \cdot 10^7$	
^{207}Bi					$5.6 \cdot 10^3$	
α -Strahler	*)	$2.1 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^4$		*)
$^{234}/^{238}\text{U}$					$1.3 \cdot 10^4$	
$^{239}/^{240}\text{Pu}$	$5.0 \cdot 10^4$					
$^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$	$2.4 \cdot 10^4$					
^{242}Cm	$3.7 \cdot 10^4$					
$^{243}/^{244}\text{Cm}$	$7.3 \cdot 10^5$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2015 bis und mit dem 3. Quartal 2016

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2016:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Text).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ -Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase, Edelgase						
Tritium	$3.1 \cdot 10^{11}$	$4.4 \cdot 10^{11}$	$4.4 \cdot 10^{11}$	$2.3 \cdot 10^{10}$	$1.5 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^{10}$
^{11}C					$2.6 \cdot 10^{13}$	
^{14}C (CO_2)	$1.8 \cdot 10^{10}$	$5.2 \cdot 10^{10}$	$3.6 \cdot 10^{11}$	$3.8 \cdot 10^{11}$	$2.2 \cdot 10^8$	$4.7 \cdot 10^7$
^{13}N					$2.7 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$1.1 \cdot 10^{14}$	
^{18}F					$8.6 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne					$1.3 \cdot 10^{12}$	
^{41}Ar					$6.8 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr			$2.4 \cdot 10^{10}$			
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$6.1 \cdot 10^{10}$			$9.7 \cdot 10^8$		
^{88}Kr	$1.0 \cdot 10^{11}$					
^{127}Xe					$5.1 \cdot 10^8$	
^{133}Xe	$4.1 \cdot 10^{12}$		$1.2 \cdot 10^{11}$	$9.8 \cdot 10^{11}$		
^{135}Xe	$7.5 \cdot 10^{11}$		$2.3 \cdot 10^{11}$	$1.4 \cdot 10^{10}$		
$^{135\text{m}}\text{Xe}$			$3.3 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{10}$		
^{138}Xe			$3.3 \cdot 10^9$			
EG-Aequiv.				$1.0 \cdot 10^{11}$		
EG: β -total		$< 2.6 \cdot 10^{12}$				
Andere						
Iod						
^{123}I					$3.8 \cdot 10^7$	
^{124}I					$6.3 \cdot 10^5$	
^{125}I					$2.5 \cdot 10^7$	
^{126}I					$1.7 \cdot 10^5$	
^{131}I	$6.2 \cdot 10^5$	$5.4 \cdot 10^5$	$8.6 \cdot 10^7$	$1.9 \cdot 10^7$		
^{133}I	$3.5 \cdot 10^5$					

wert angegeben. Der Dosisbeitrag von Aerosolen mit Halbwertszeiten kleiner 8 Tagen ist bei den Kernkraftwerken vernachlässigbar. Beim KKM ergibt sich der Hauptbeitrag zur Dosis durch die Strahlung der abgelagerten Aerosole, die im Jahre 1986 durch eine unkontrollierte Abgabe in die Umgebung gelangten. Die Abnahme des dadurch verursachten Dosisbeitrags über die Jahre ist in der Figur 2 deutlich erkennbar. Der Dosisbeitrag der Aerosole, welche im Berichtsjahr abgegeben wurden, ist demgegenüber vernachlässigbar und liegt in der Größenordnung der anderen schweizerischen Kernkraftwerke.

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

Beim PSI, bei dem andere Iod-Isotope nachgewiesen werden, ist die Abgabe für die einzelnen Abgabestellen und die Gesamtanlage als Summe der Aktivität der gemessenen Iod-Nuklide angegeben. Für die Gesamtabgabe wird zudem auch ein ^{131}I -Äquivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben, wobei sich der Gewichtungsfaktor aus dem Verhältnis des Ingestionsdosisfaktors des jeweiligen Nuklides zum Ingestionsdosisfaktor von ^{131}I ergibt. Die Ingestionsdosisfaktoren sind der StSV entnommen.

Für die Berechnung der Jahresdosis werden sowohl für die KKW wie für das PSI immer sämtliche verfügbaren Iod-Messungen verwendet, d.h. es ist beispielsweise für KKB auch der Beitrag von ^{133}I berücksichtigt.

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

Abwasser: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-LE-Wert von 200 Bq/kg angegeben. Die LE-Werte für die einzelnen Nuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein LE-Wert von 200 Bq/kg entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Ingestions-Dosisfaktor von $5 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq. Die unnormierte Summe der Abwasserabgaben ist in der Spalte «Messung» angegeben.

Edelgase: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ angegeben. Die CA-Werte für die Edelgasnuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Immersions-Dosisfaktor von $4.4 \cdot 10^{-7}$ (Sv/Jahr)/(Bq/m³). Die unnormierte Summe der Edelgasabgaben ist in der Spalte «Messung» angegeben. Beim KKG wird für die Bilanzierung der Edelgase eine β -total-Messung durchgeführt; für die Äquivalent-Umrechnung wurde in diesem Fall ein Gemisch von 80% ^{133}Xe , 10% ^{135}Xe und 10% ^{88}Kr angenommen.

Gase: Beim PSI handelt es sich dabei vorwiegend um die Nuklide ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O und ^{41}Ar . Deren Halbwertszeiten sind kleiner als zwei Stunden. Hier ist für die einzelnen Abgabestellen und das gesamte PSI die Summe der Radioaktivität dieser Gase und Edelgase ohne Normierung auf einen Referenzwert angegeben. Für die Gesamtanlage wird zusätzlich auch die auf den Referenz-CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ normierte Abgabe aufgeführt.

Aerosole: Hier ist in jedem Fall die Summe der Radioaktivität ohne Normierung auf einen Referenz-

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

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

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

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

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

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2016:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Text).

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{38}S					$1.9 \cdot 10^9$	
^{39}Cl					$1.1 \cdot 10^{10}$	
^{54}Mn			$1.3 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^5$		
^{57}Co		$3.3 \cdot 10^3$				
^{58}Co				$3.3 \cdot 10^5$		
^{60}Co			$9.0 \cdot 10^4$	$9.0 \cdot 10^5$	$6.5 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^3$
^{75}Se					$1.5 \cdot 10^5$	
^{77}Br					$7.0 \cdot 10^6$	
$^{80\text{m}}\text{Br}$					$3.4 \cdot 10^9$	
^{82}Br					$7.1 \cdot 10^8$	
^{89}Sr			$2.6 \cdot 10^5$			
^{90}Sr		$2.1 \cdot 10^3$				
$^{99\text{m}}\text{Tc}$					$2.6 \cdot 10^7$	
$^{110\text{m}}\text{Ag}$		$1.9 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^4$			
$^{123\text{m}}\text{Te}$		$3.5 \cdot 10^3$				
^{125}Sb						
^{131}I (Aerosol)		$3.3 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 10^6$	$3.6 \cdot 10^4$		
^{136}Cs		$3.3 \cdot 10^3$				
^{137}Cs				$3.5 \cdot 10^4$		$7.2 \cdot 10^5$
^{140}Ba		$2.4 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^5$			
^{140}La			$3.5 \cdot 10^5$			
^{141}Ce		$5.3 \cdot 10^3$	$6.6 \cdot 10^4$			
^{144}Ce		$1.6 \cdot 10^4$				
^{181}Re					$7.7 \cdot 10^7$	
^{182}Re					$2.2 \cdot 10^8$	
^{183}Re					$9.6 \cdot 10^6$	
^{182}Os					$3.0 \cdot 10^8$	
^{183}Os					$2.5 \cdot 10^8$	
$^{183\text{m}}\text{Os}$					$4.8 \cdot 10^8$	
^{185}Os					$2.2 \cdot 10^7$	
^{185}W					$1.3 \cdot 10^9$	
^{191}Pt					$3.5 \cdot 10^6$	
^{192}Au					$1.1 \cdot 10^9$	
^{193}Au					$1.5 \cdot 10^8$	
^{194}Au					$1.1 \cdot 10^6$	
^{192}Hg					$7.0 \cdot 10^8$	
$^{193\text{m}}\text{Hg}$					$2.5 \cdot 10^8$	
^{194}Hg					$1.1 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^2$
^{195}Hg					$4.5 \cdot 10^5$	
$^{195\text{m}}\text{Hg}$					$9.2 \cdot 10^7$	
$^{197\text{m}}\text{Hg}$					$1.2 \cdot 10^8$	
^{203}Hg					$1.3 \cdot 10^7$	
Nicht spezifizerte	$1.4 \cdot 10^6$					
α -Aerosole	$1.8 \cdot 10^3$	$5.2 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^4$		$1.1 \cdot 10^4$

8.2

Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

F. Cartier, R. Habegger, A. Leupin

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

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

Ergebnisse 2016

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

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen etwa $0.08 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.22 \mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 1.2 mSv (ohne natürlichen Untergrund) resultieren. Die vom KKM ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben für das Berichtsjahr nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von ca. 0.7 mSv eine Dosiserhöhung von etwa 0.8 mSv .

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen $0.06 \mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und $0.16 \mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.9 mSv pro Jahr. Die höchste, mit den TLD am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Abzug des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) beträgt 0.8 mSv .

8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

Auf Grund der stichprobenweise vom ENSI gemessenen Ortsdosisleistung am Zaun des Paul Scherrer Instituts, Areal Ost ergibt sich hochgerechnet auf ein Jahr eine Ortsdosis von 0.3 mSv ohne natürlichen Untergrund. Im Jahr 2016 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert ca. 0.22 mSv (ohne natürlichen Untergrund von ca. 0.6 mSv).

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

Beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) konnte weder aus den stichprobenweise durchgeführten Dosisleistungsmessungen noch aufgrund der am Zaun positionierten TLD eine signifikante Erhöhung der Ortsdosisleistung festgestellt werden. Mit einem Neutronendosimeter wurde 2016 am Zaun bei der Hochaktivlagerhalle eine geringe Erhöhung der Neutronendosis von 0.065 mSv über dem natürlichen Untergrund festgestellt.

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

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

F. Cartier, B. Bucher, R. Habegger

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

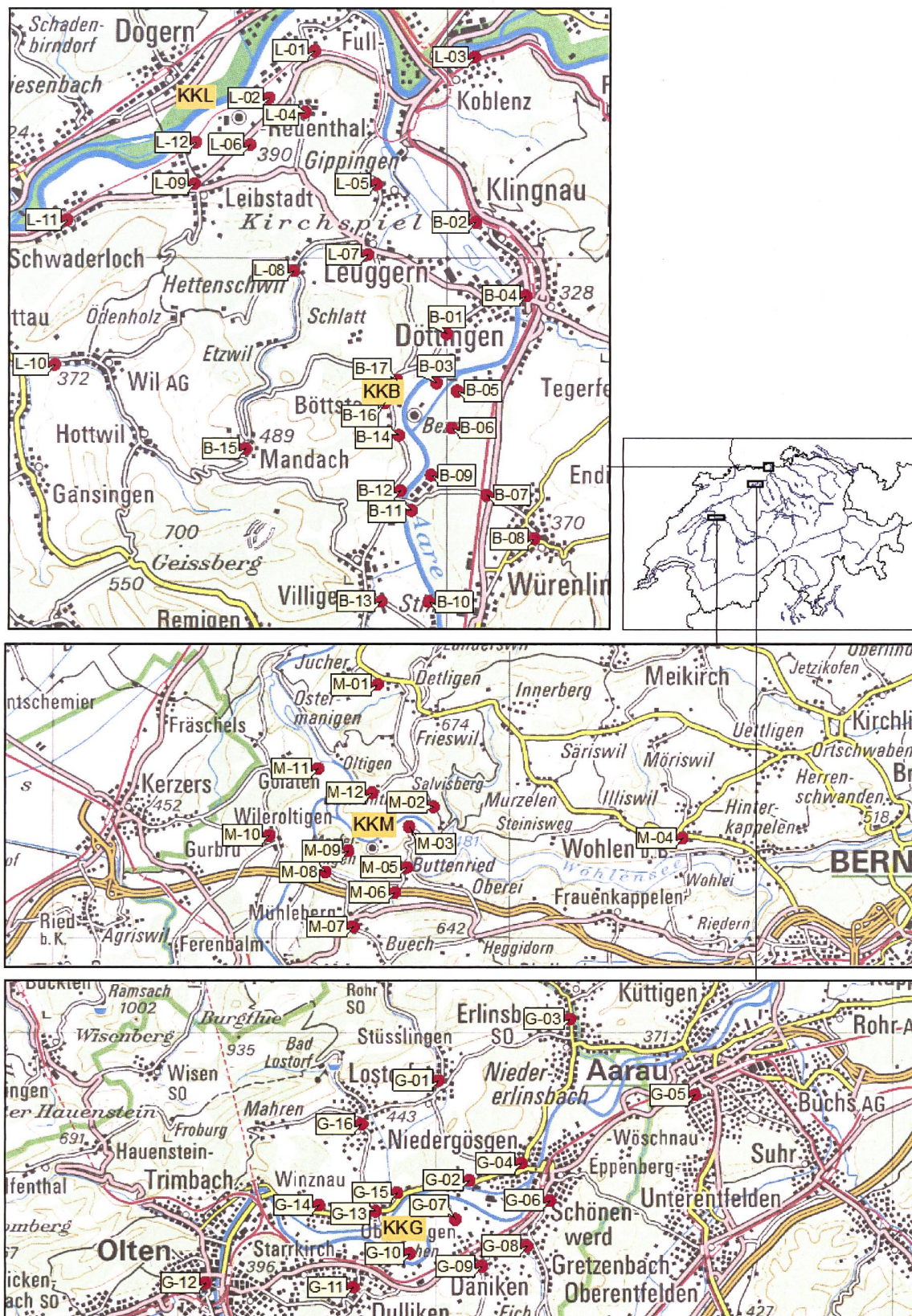
Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von Anlageparametern (ANPA) und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 in den operationellen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

Die Messwerte im Jahr 2016 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Es wurden keine Dosisleistungserhöhungen festgestellt, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückgeführt werden konnten.

Übersicht

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische NADAM-Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung (siehe Kapitel 3.2). Die Geiger-Müller-Zählrohre in den Sonden ermitteln die Gamma-Dosisleistung im Messbereich von 10 nSv/h (Niederdosiszählrohre) bis 10 Sv/h (Hochdosiszählrohr). Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Des Weiteren sorgen verschiedene Subsysteme für den Datenaustausch mit externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM und JRODOS/LASAT im ENSI. Die Figur 1 zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.

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



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

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahr 2016 wurde die Hardware der zentralen Server ersetzt und Betriebs- sowie Datenbanksystem auf den aktuellen Stand gebracht. Ein Teil der Zentrale wurde im Ausweichstandort bei der Nationalen Alarmzentrale installiert. Damit kann das MADUK-System auch von diesem Ausweichstandort aus betrieben werden.

Die Treiber wurden so ergänzt, dass mit denselben Treibern parallel zum operativen System ein Simulationssystem für Übungen betrieben werden kann. Die Bedienoberfläche wurde dahingehend ergänzt, dass bei Übungen mit simulierten Daten die Darstellungen und Ausgaben entsprechend gekennzeichnet werden können.

Systemverfügbarkeit und Störungen

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

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Störungen an den MADUK-Messstationen mit Störungsdauer, permanentem Datenverlust und Ursache der Störung. Reine Kommunikationsstörungen, die zu keinem permanenten Datenverlust führten, sind in der Tabelle 1 nicht aufgeführt.

Die Stationselektronik lief auch im 2016 grösstenteils zuverlässig. Es wurden jedoch vermehrt blockierte Datenlogger nach kurzen Unterbrüchen in der Kommunikation bzw. durch fehlende Einträge in der lokalen Datenbank des Datenloggers festgestellt.

2016 waren wiederum diverse Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen zu verzeichnen, deren Ursachen nicht immer festgestellt werden konnten. Insgesamt hat sich die Situation nach 2015 wieder verbessert. Eine Unzulänglichkeit beim Serviceprovider verursachte den grössten Ausfall von insgesamt 279.3 Stunden verteilt auf 11 Stationen. Ohne Rücksprache wurden die Leitungen zu diesen Stationen ab-

Tabelle 1:

Auflistung der Störungen bei den MADUK-Messstationen.

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
B-15	6.3	6.3	Blockierter Datenlogger
G-07	153.3	153.3	Korrupte lokale Datenbank des Datenloggers
G-07	4.7	4.7	Blockierter Datenlogger
G-12	11.0	11.0	Blockierter Datenlogger
L-09	14.7	14.7	Defekte Messsonde
B-01	1.0	1.0	Blockierter Datenlogger
L-09	49.0	49.0	Keine Kommunikation Datenlogger zu Sonde
B-05	1.5	1.5	Blockierter Datenlogger
M-04	23.2	23.2	Blockierter Datenlogger
B-13	22.3	22.3	Defekte Messsonde
B-14	3.0	3.0	Wechsel Stationskasten
L-06	39.7	39.7	Umbau am Standort. unterbrochene Stromversorg.
B-17	25.7	25.7	Blockierter Datenlogger
B-15	92.5	92.5	Defekter Akku
M-01	75.8	75.8	Blockierter Datenlogger

gehängt. Eine unangekündigte Migration des Anschlusses der Station L-08 führte zu einem Kommunikationsunterbruch von 49.5 Stunden. Bei der Station M-10 verursachte ein defektes Netzteil einen Kommunikationsunterbruch von 87.2 Stunden. Ein Befall des Stationskastens mit Ameisen führte bei der Station B-14 zu einem Kommunikationsunterbruch von 50.3 Stunden. Sporadische Kommunikationsunterbrüche von insgesamt 55.2 Stunden mit unbekannter Ursache waren bei der Station B-01 zu verzeichnen. Bei allen Kommunikationsstörungen konnten die Daten nachträglich lückenlos archiviert werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit

bei 99.0% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.90%.

Qualitätssicherung

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

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Messverhalten der Sonden wird zwischen den Eichungen mit halbjährlichen Funktionstests geprüft. Bei den Funktionstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer ^{137}Cs -Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten produziert und mit Sollwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunktionskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellwerten benutzt. Im Jahr 2016 wurden zwei Funktionsprüfungen durchgeführt. Dabei erfüllten alle Sonden die Prüfkriterien.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme wurden im Jahr 2016 Messungen mittels in-situ-Gamma-spektrometrie bei den Sonden der Messringe Beznau und Mühleberg durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre. Ausser ^{137}Cs vom Fallout der Atombombentests und des Tschernobyl-Unfalls konnten keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen werden.

Messergebnisse

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

Am 10. März wurde im Rahmen der Funktionsprüfung an der Station M-12 mit einem Prüfstrahler die Station nicht rechtzeitig in den Testmodus geschaltet. Dadurch gelang ein durch den Prüfstrahler verursachter Messwert (Ortsdosisleistung: 285 nSv/h; Nettodosisleistung: 176 nSv/h) in die zentrale Verarbeitung und wurde auf dem Internet publiziert. Schliesslich wurde der Status des Messwertes in der Zentrale manuell als Testwert gekennzeichnet. Der Messwert auf dem Internet wurde belassen.

Die jährliche Überprüfungskampagne der NADAM Sonden an den Standorten, an denen auch eine MADUK-Station in Betrieb ist, führte 2016 bei keiner MADUK-Sonde zu wesentlichen Erhöhungen der Messwerte.

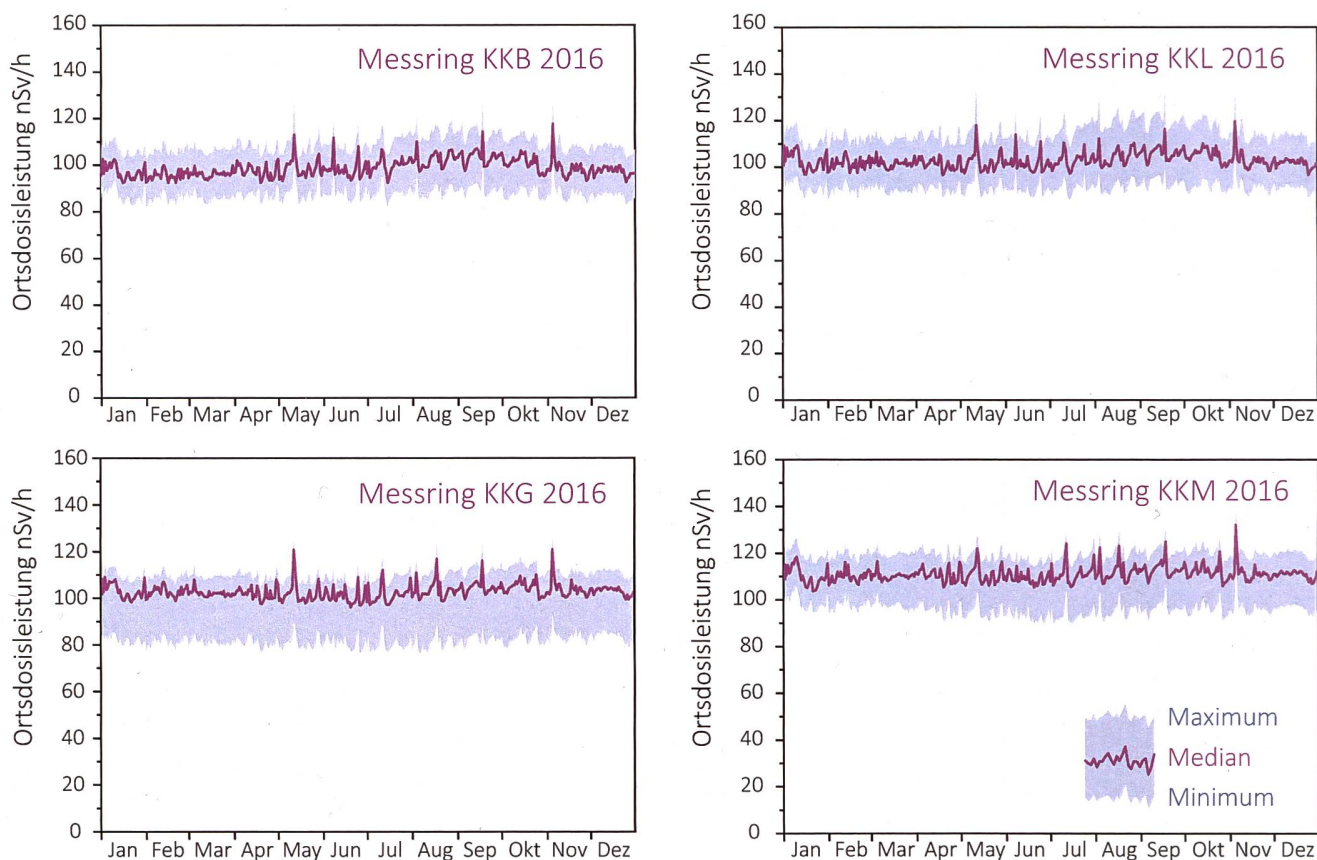
Tabelle 2:

Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2016.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
10.3.2016 09:30	M-12	0.2	176	285
28.5.2016 03:10	L-03	0.2	50	183
8.6.2016 11:50	B-02	1.0	59	165
8.6.2016 11:50	B-04	1.2	71	183
24.7.2016 18:00	L-03	1.2	89	188
25.7.2016 21:30	B-02	0.8	53	153
25.7.2016 21:30	B-04	0.8	66	172
16.8.2016 15:20	L-03	0.2	53	157
18.8.2016 14:10	G-15	0.2	53	229
31.8.2015 18:40	M-11	0.3	54	172
31.8.2015 18:40	M-12	0.7	63	190
31.8.2015 19:00	M-01	0.5	58	178

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

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



Figur 2:

Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2016.

8.4

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

J. Eikenberg, M. Jäggi, M. Rüthi, I. Zumsteg
Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen

Zusammenfassung

Seit 1997 führt das PSI im Rahmen der Immissionsüberwachung Radionuklidmessungen an Waldbodenproben und Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (ZWILAG Würenlingen) durch. Das Vaseline auf den Staubfangplatten wird γ -spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie ^{241}Am und ^{137}Cs sowie natürliche Radionuklide wie ^7Be , ^{210}Pb gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der γ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung von α - und β -Strahlern (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 10 - 40 Bq/kg (2016). Diese Abnahmen sind mit dem radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von ^{137}Cs beträgt 30.17 Jahre) und mit einer begrenzten Aufenthaltszeit in der oberen Bodenschicht zu erklären. Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope ^{90}Sr und $^{239+240}\text{Pu}$ sind ähnlich signifikant, zumal diese Radionuklide schon sehr viel früher (Beginn der 60iger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts) als Fallout der A-Bombentest in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf <1 - 2 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.2 - 0.8 Bq/kg im Jahr 2016. Die konstanten Isotopenverhältnisse von $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.03) und $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.4) zeigen deutlich, dass die gemessenen Werte für die Aktiniden den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 20 - 30 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 250 und 350 Bq/kg gemessen.

Einleitung

Das Zwischenlager (ZWILAG AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erstellt und anschliessend in Betrieb genommen. Um potentielle, geringfügige Radionuklid-Emissionen in der Umgebung des Areals aus Abgaben aus der Anlage feststellen zu können, wurden vor der Inbetriebnahme im Rahmen des Projektes Beweissicherung umfangreiche Radionuklid-Messungen an Bodenproben in der unmittelbaren Umgebung des Areals durchgeführt. (Details in [1]). Diese Analysen dienten der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B. ^7Be), terrestrischer (^{40}K sowie Radionuklide aus den U- und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm , ^{131}I) resultierend aus Aerosol-Fallout

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

Radiochemische Trennmethoden (Boden)

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

Diese Leach-Lösung wird dann direkt auf eine Anionenaustauscher-Kolonnen (Bio-Rad AG 1-X2, 100-200 mesh) gegeben und durch Zugabe von HCl und HNO_3 -Waschlösungen werden potentiell bei der γ -Spektrometrie interferierende, natürliche Radionuklide abgetrennt (z.B. α -Emission von ^{228}Th und ^{238}Pu bei 5.4 MeV), bevor die Pu-Fraktion durch Reduktion von Pu^{4+} zu Pu^{3+} mit einer HI-Lösung eluiert wird. Die durch die Bio-Rad-Kolonnen gelaufene Fraktion mit Am und Cm wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer U/TEVATM-Kolonnen zur Retention von U und Th und einer DGATM-Kolonnen, die Am und Cm absorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach-salzsäuren NaNO_2 Lösung. Da Am in sehr geringer Konzentration vorliegt, ist ein weiterer Purifikationsschritt, die Trennung von den Lanthanoiden, mit einer TEVA-Säule notwendig. Die Fraktionen von Pu bzw. Am und Cm werden anschliessend eingedampft, kaliniert und in einer NaSO_4 - NaHSO_4 -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Aktiniden verwendet wird. Nach der Elektrodeposition werden die Messpräparate über 3 Tage mit hochauflösender α -Spektrometrie gemessen (alle Details in [1]).

Das Radionuklid ^{90}Sr (reiner β -Strahler) wird nach dem Leaching und einer Vorkonzentration via Oxalat-Fällung auf einer SrSpecTM-Kolonnen in 3 M HNO_3 -Medium fixiert und mit verdünnter Salpetersäure eluiert. Das Eluat wird mit der Szintillationsflüssigkeit Ultima GoldTM LLT vermischt und anschliessend im Flüssigszintillations-Spektrometer gemessen.

Staubfangplatten

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



Figur 1 :
Staubfangplatte am Lorbeerbusch

Niederschlag

In einem 14-tägigen Turnus wird das in diesem Zeitraum anfallende Niederschlagswasser aus dem Niederschlagssammler beim ZWILAG-Areal entnommen und ein neuer Probenbehälter platziert. 10 ml dieser Wasserproben werden für die Tritium-Messung verwendet und grossvolumige Monatsmischproben (ideal 6 Liter) werden für die Langzeit Gamma-Spektrometrie genommen. Gemessen werden anthropogene Radionuklide, wie ^{137}Cs für welches bei den Langzeitmessungen über 2 Tage Nachweisgrenzen von 0.03 Bq/Liter erreicht werden.

Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{131}I) und natürlichen terrestrischen Isotope aus den U- und Th-Zerfallsreihen (^{226}Ra , ^{228}Ra) zusammengefasst. Dargestellt ist der Streubereich der Probenmessungen aus den 4 Bodenentnahmestellen um das ZWILAG-Areal. Wie die Tabelle zeigt, liegen die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ derzeit zwischen 0.2 und 0.8 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.1 und 0.3 Bq/kg. In Spuren ist noch ^{238}Pu nachweisbar (0.01 - 0.03 Bq/kg), während die Werte für das Spaltprodukt ^{90}Sr etwas höher sind (< 1- 2 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für ^{137}Cs (10 - 50 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der Beitrag von Fallout-Caesium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall. Über die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (im Mittel 0.4) und $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (0.03 ± 0.01) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Aktiniden ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 50 Jahren stammt [1,2]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten Jahre. Ebenfalls eingetragen sind die Werte für ^{226}Ra (als Mass für natürlich vorkommendes, primordiales ^{238}U) und ^{228}Ra (als Mass für ^{232}Th). Diese Werte liegen konstant zwischen 20 - 40 Bq/kg und zeigen keinen Trend mit der Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingebaut sind und im säkularen Gleichgewicht mit ihren langlebigen Mutternukliden stehen. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für ^{238}U 2 - 3 ppm und für ^{232}Th 5 - 9 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

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

Bei den Regenwasserproben werden typischerweise ^3H -Aktivitäts-Konzentrationen von < 1- 10 Bq/Liter nachgewiesen, mit der Gammaskpektrometrie konnten seit 1997 noch nie anthropogene Radionuklide wie ^{137}Cs oder ^{131}I nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze dieser Radionuklide liegt jeweils bei 0.03 Bq/Liter.

Tabelle 1:

Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten Jahre (2013 - 2016) in Bodenproben Umgebung ZWILAG. Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2013	2014	2015	2016
^{90}Sr	1 - 3	1 - 3	1 - 3	< 1 - 2
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs ⁽¹⁾	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	20 - 60	20 - 60	10 - 60	10 - 50
^{238}Pu	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.2 - 0.7	0.1 - 0.7	0.1 - 0.7	0.2 - 0.8
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
^{226}Ra	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30
^{228}Ra	20 - 40	20 - 40	20 - 40	20 - 40

⁽¹⁾ Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2013 - 2016 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 nicht mehr nachgewiesen werden.

Literaturliste

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

8.5

Les installations nucléaires et l'environnement

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

Résumé

Les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, mises en œuvre dans le cadre de la surveillance de la radioactivité au voisinage des centrales nucléaires ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques (^{14}C dans les feuillages) et des rejets liquides (isotopes du cobalt et ^{54}Mn 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 ne se sont pas distingués de ceux relevés dans les endroits situés hors de l'influence des installations nucléaires. Ils montrent que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que les contaminations détectables proviennent principalement des essais nucléaires des années 60 (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ et ^{241}Am) ainsi que de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs).

Introduction

Dans le but de préserver la santé de l'homme et l'environnement au voisinage des centrales nucléaires, l'OFSP poursuit depuis de longues années un programme spécifique de prélèvements et de mesures. Celui-ci commence au terme source, par des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, l'IFSN et l'OFSP sur divers échantillons en phase de rejet (filtres à aérosols, à iode, gaz, eaux de rejet). Les exploitants sont par ailleurs tenus de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois aux autorités.

La surveillance se poursuit par la mesure des immissions des centrales nucléaires (concentrations radioactives effectivement mesurées dans l'environnement). Tous les compartiments environnementaux sont examinés, de l'air jusqu'aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma in situ) complètent ces analyses en permettant d'évaluer directement la radioactivité déposée au sol. Ce programme de surveillance, coordonné par l'OFSP, englobe non seulement les propres mesures de l'Office mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut de radiophysique (mesures alpha et bêta), du laboratoire de Spiez (^{90}Sr dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aéroradiométrie etc.), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université de Berne (^{14}C et ^{85}Kr) et du LUBW (Baden-Württemberg), conformément au programme germano-

8.5 Les installations nucléaires et l'environnement

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

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

Méthodologie

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

Résultats

Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que les 4 centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (KKB 1 et 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2016 (voir Chap. 8.1).

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population avoisinante en termes de doses. En tenant compte des rejets des années précédentes, ces dernières se sont échelonnées en 2016 entre <0.001 mSv pour KKB et KKG et env. 0.004 mSv pour KKL et KKM. Pour ces dernières, la contribution majeure provient des rejets atmosphériques : essentiellement du ^{14}C pour

Tableau 1

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

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

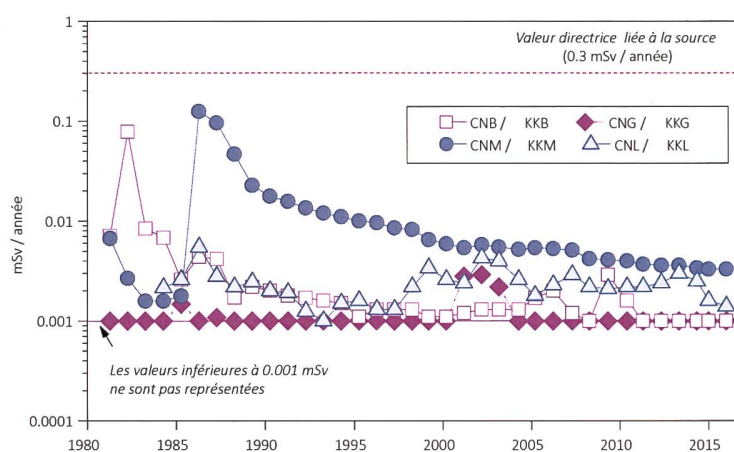


Figure 1:

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 2016 (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.

Leibstadt, avec à Mühleberg une contribution rémanente des résines rejetées en 1986. Pour rappel, la centrale nucléaire de Mühleberg avait rejeté des poussières radioactives dans l'atmosphère de manière incontrôlée en septembre 1986. A partir des mesures de terre et d'herbe effectuées par la suite par la commission fédérale de surveillance de la radioactivité de l'époque, l'activité rejetée avait pu être estimée à 11 GBq (50% de ^{134}Cs , 40% de ^{137}Cs , 7% de ^{60}Co et quelques 3% de ^{65}Zn) et donc inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. Comme le montre la figure 1, l'impact de ce rejet très localisé a constamment diminué depuis. Notons que les résultats des calculs des doses reçues par les personnes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires, qui sont représentées dans la figure 1, ont été effectués sur la base des rejets effectifs, en appliquant des modèles de dispersion et en tenant compte des temps de séjour, des habitudes alimentaires et de nombreux paramètres biologiques, physiologiques et environnementaux (voir directive G14 de l'IFSN pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

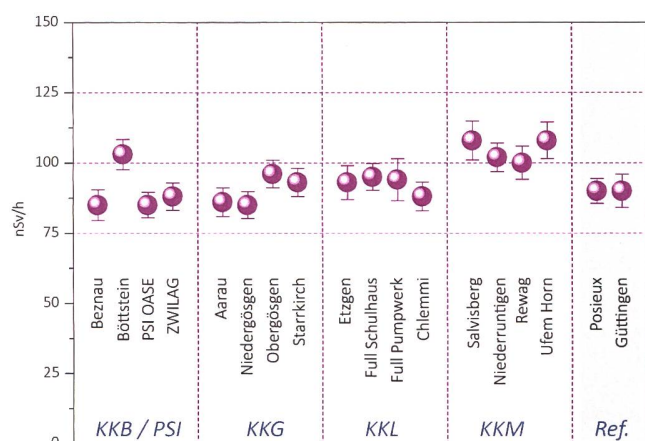


Figure 2: Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiante $H^*(10)$ effectués en 2016 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante à la clôture et au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres thermoluminescents (TLD) et par des mesures périodiques effectuées par l'IFSN à la clôture des installations. Les résultats de cette surveillance ont mis en évidence une contribution clairement mesurable du rayonnement direct en certains points de la clôture des réacteurs à eaux bouillantes, à savoir, Leibstadt et Mühleberg, ainsi que, dans une moindre mesure, au PSI (voir Chapitre 8.2). A Mühleberg, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation de la dose ambiante annuelle de 0.8 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel qui s'élève à 0.7 mSv/an). La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint 0.8 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel de 0.6 mSv/an). La valeur limite d'immissions pour le rayonnement direct a ainsi été respectée par toutes les installations en 2016. Rappelons que la valeur limite d'im-

missions pour le rayonnement direct, en dehors de l'enceinte des entreprises, est fixée à l'Art. 102, alinéa 3 de l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP), à 1 mSv par an dans les locaux d'habitation, de séjour et de travail et à 5 mSv par an dans tout autre endroit. Il convient de relever qu'il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne, puisque le temps de séjour n'est pas considéré. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside pour de longue période en ces endroits.

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

Mesures dans le milieu atmosphérique

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

Les résultats 2016 des mesures mensuelles des filtres aérosols des environs des centrales nucléaires suisses ainsi que du PSI ont montré la prédominance des radionucléides naturels ^7Be et ^{210}Pb , avec des valeurs comprises respectivement entre 1.6 et 5.4 et entre 0.2 et 2.4 mBq/m³ (mesures OFSP et PSI). Le seul radionucléide d'origine artificielle régulièrement détectés dans l'ensemble des stations est le ^{137}Cs (valeur maximale de $1.8 \pm 0.4 \mu\text{Bq/m}^3$), provenant de la remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des

8.5 Les installations nucléaires et l'environnement

années 50 et 60 ainsi que l'accident de Tchernobyl). Ces concentrations sont comparables à celles enregistrées sur les sites de référence.

Aucun autre radionucléide d'origine artificielle n'a été décelé dans les filtres aérosols du voisinage des centrales nucléaires suisses en 2016. Toutefois des traces de ^{24}Na , radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15h) produit par exemple dans les accélérateurs de particules, ont sporadiquement été mesurées sur les filtres à grand débit de la station de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer. La concentration maximale mesurée s'élève à $125 \pm 49 \mu\text{Bq/m}^3$ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immissions dans l'air fixée dans l'OrAP à 100 Bq/m^3 .

Les activités des émetteurs gamma d'origine artificielle dans les échantillons de pluie collectés aux environs des centrales nucléaires de Mühleberg, Leibstadt, Gösigen et Beznau ainsi que ceux du voisinage du PSI et du ZWILAG sont toutes restées inférieures aux limites de détection, qui se situe aux environs de 0.2 à 1 mBq/l par exemple pour le ^{137}Cs .

Les résultats des mesures du tritium (^3H) dans les échantillons mensuels de précipitations des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. A titre de comparaison, notons que les concentrations de tritium dans les précipitations de la station de référence de Posieux sont restées en 2016 inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l . Les concentrations de tritium enregistrées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires, du PSI ainsi que du ZWILAG sont généralement restées proches des seuils de détection de 1 à 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs plus élevées, notamment au voisinage de KKB et du PSI. Pour ces deux stations des valeurs de l'ordre de 70 Bq/l ont été enregistrées en décembre 2016. A noter que ce mois a été particulièrement sec et que la quantité d'échantillon récoltée était faible, au point qu'aucune mesure du tritium n'a pu être réalisée ce mois pour les centrales de KKM et KKG ni pour la station de référence. Les rejets en tritium dans l'atmosphère par le PSI étant nettement supérieurs à ceux de la centrale nucléaire de Beznau, on peut conclure que le centre de recherche est très certainement à l'origine de ces valeurs plus élevées. Par ailleurs même si ces dernières sont significativement supérieures aux valeurs usuellement enregistrées dans les stations situées hors influence des installations nucléaires, elles ne représentent que 0.6% de la valeur limite d'immissions pour le tritium fixée selon l'OrAP à $12'000 \text{ Bq/l}$ dans les eaux accessibles au public et le risque associé pour la santé du public peut donc être considéré comme négligeable.

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 2016 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse (voir chapitre 7.1), de 134 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. A noter que le prélèvement a été réalisé le 18.08.2016, soit environ deux semaines après l'arrêt pour révision de la centrale, arrêt qui s'est finalement prolongé jusqu'à début 2017. Il est donc représentatif de la première partie de l'année, alors que la centrale de Leibstadt était en service. Les doses qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales ne représentent cependant que quelques micro-Sv. L'intérêt des mesures de ^{14}C se situe aussi dans l'utilisation de ce traceur atmosphérique pour affiner la modélisation de la dispersion atmosphérique.

Tableau 2:

Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2016.

Lieu	Valeur min/max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruntingen * (environs KKM)	< 2- 2.6	< 2.0
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2- 2.6	< 2.0
Full (environs KKL) *	< 2- 2.3	< 2.0
Beznau (environs KKB) **	< 1.4- 75.6	3.8
PSI **	< 1.4- 69.3	3.2
ZWILAG **	< 1.4- 7.9	3.05

* mesures OFSP / ** mesures PSI

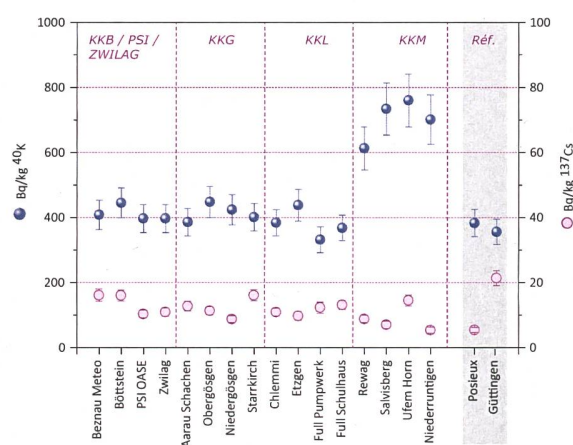


Figure 3:
 ^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2016 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisées).

Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout examiné dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats enregistrés en 2016 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 2016.

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

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

Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1, la majeure partie des produits d'activation tels que le ^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co rejetée dans les eaux fluviales proviennent de la centrale de Mühleberg. Les rejets les plus importants ont eu lieu aux mois d'août et septembre pendant la période de révision. Contrairement aux années précédentes, aucune trace de ces radionucléides n'a toutefois pu être mise en évidence dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln.

Il faut toutefois mentionner que le volume mensuel d'eau prélevé à Hagneck en août 2016 (65 l), période de l'année où les rejets sont les plus importants et où ils sont par conséquent usuellement détectés dans les échantillons d'eaux, fut environ 2 fois inférieur à la moyenne des quantités prélevées les années précédentes au cours de la même période (moyenne pour le mois d'août pour la période 2010-2015: 130 l). Ceci a pour corollaire une hausse des limites de détection qui pourrait expliquer l'absence de marquage mesuré.

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

Les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2016 dans les eaux de l'Aar à Brugg/AG ainsi que celles du Rhin prélevées près de Weil/D, en aval de Bâle, sont généralement restées inférieures à la

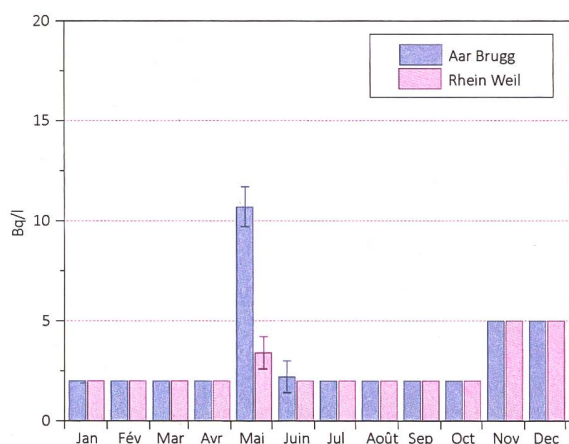


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2016.

limite de détection de 2 Bq/l à l'exception de la période mai-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen.

Contrairement aux échantillons d'eaux, les traces des rejets liquides de Mühleberg, et en particulier de ^{54}Mn , ^{58}Co et ^{60}Co ont pu être mises en évidence dans la majorité des échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar à Hagneck: si le ^{58}Co n'est décelé que pendant ou juste après la période de révision, le ^{54}Mn et le ^{60}Co se retrouvent dans tous les échantillons à l'exception de la période avril-juin. Dans les échantillons de sédiments prélevés à Klingnau et Pratteln, le ^{60}Co et le ^{54}Mn ne sont présents que de façon sporadique.

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

Un échantillon de plantes aquatiques a été prélevé dans chacune des stations de surveillance: l'échantillon prélevé à Hagneck (23.08.16) a présenté un marquage en ^{54}Mn (18 Bq/kg), en ^{60}Co (19 Bq/kg) ainsi qu'en ^{137}Cs (10 Bq/kg) alors que seul du ^{137}Cs (4 Bq/kg) a pu être mesuré dans celui de Klingnau (23.08.16). Aucune trace d'émetteur gamma d'origine artificielle n'a par ailleurs été décelée dans l'échantillon de Pratteln (23.08.16).

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval de KKM, KKB et KKL en 2016 n'ont pas révélé la présence de radionucléide d'origine artificielle. Le constat est le même pour l'examen des eaux des nappes phréatiques.

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

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

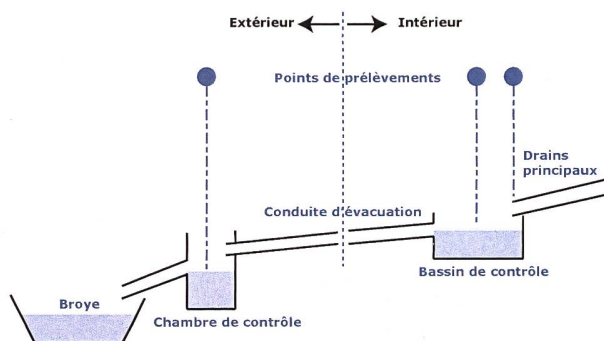


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

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 2016, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4 h aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyée à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2016. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co , ^{131}I , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 0.5 Bq/l (resp. 3 à 5 Bq/l pour le ^{131}I).

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 2016 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 8.0 ± 1.0 Bq/l et 7.2 ± 1.0 Bq/l respectivement. Ces valeurs sont en constantes diminutions depuis le début de la surveillance en 2001 (excepté les valeurs ponctuellement plus élevées enregistrées fin 2011 et début 2012 et qui avaient nécessité la mise en place d'un programme spécifique), ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive (demi-vie du tritium = 12.32 ans).

Pour la mesure du ^{90}Sr , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Aucune activité supérieure à la limite de détection de 7 mBq/l n'a été mise en évidence en 2016.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2016.

Les doses résultant du fonctionnement des centrales nucléaires pour la population avoisinante sont restées nettement inférieures aux limites réglementaires. Les calculs effectués à partir des rejets effectifs et du rayonnement direct en se basant sur des modèles de transfert jusqu'à l'homme indiquent que l'impact dosimétrique des centrales nucléaires n'a pas dépassé la valeur directrice liée à la source de 0.3 mSv par an. Les calculs de dose effectués de manière indépendante par le PSI et les autorités de surveillance ont montré que les doses pour la population avoisinante générées par le centre de recherche sont également restées nettement inférieures à la valeur directrice liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour l'ensemble du site PSI/ZWILAG.

Les mesures effectuées dans tous les compartiments environnementaux ont mis en évidence un faible marquage du milieu: la détection du rayonnement direct, du ^{14}C issu des rejets atmosphériques et des produits d'activation présents dans les rejets liquides témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations dans l'année sous revue.

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

8.6

Environnement du CERN (mesures OFSP)

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

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

J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus

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

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE) du CERN, l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnements au voisinage du centre de recherche. L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2016 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Même si des traces de radioisotopes, produits dans les installations du centre de recherche, ont pu être détectées, les activités maximales enregistrées sont restées nettement inférieures aux limites suisses et leur impact radiologique peut être considéré comme minime.

Programme de surveillance de l'OFSP

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

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

A noter qu'après l'arrêt hivernal usuel pour maintenance, les installations du CERN étaient toutes en fonction au cours de l'année sous revue (1er faisceau du LHC le 25.3.16).

Mesures de l'exposition ambiante

Les emplacements des TLD, destinés au contrôle de l'exposition ambiante au voisinage du CERN, ont été revus en 2006 déjà afin de pouvoir tenir compte de l'impact éventuel du LHC après sa mise en fonction. Treize sites ont été surveillés en 2016, 5 d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français) et 7 sur le parcours du LHC. En plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée.

Les résultats de ces mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP, ont montré que les doses des photons enregistrées au cours de l'année 2016 correspondent partout à l'irradiation naturelle (environ 0.2 mSv par trimestre), sauf en un point situé sur le site de Prévessin, où une valeur 2.5 fois plus élevée a été observée au 3^{ème} trimestre; au 4^{ème} trimestre, la valeur est 1.5 fois supérieure à l'irradiation naturelle. Des valeurs similaires à celles 3^{ème} trimestre 2016 ont déjà été relevées par le passé, par exemple au 4^{ème} trimestre 2012.

Les doses des neutrons sont restées faibles ou inférieures à la limite de détection de 0.02 mSv sauf en deux points, situés à l'intérieur de l'enceinte du site de Meyrin, à proximité du synchrotron à protons (PS) et du booster du PS (PSB). Les doses observées restent cependant peu élevées (maximum de 0.2 mSv par trimestre) par rapport aux valeurs atteintes par le passé (jusqu'à environ 1 mSv). Notons que les doses des neutrons enregistrées en ces points au premier trimestre 2016 sont quant à elles restées proches de l'irradiation naturelle, puisque les installations étaient à l'arrêt pour maintenance au cours de l'hiver et ont fonctionné uniquement au cours des 2 dernières semaines de la période de mesure. Au 3^{ème} trimestre 2016, la dose des neutrons enregistrées en un point du site de Prévessin était également supérieure à l'irradiation naturelle, avec une valeur voisine de 0.1 mSv par trimestre.

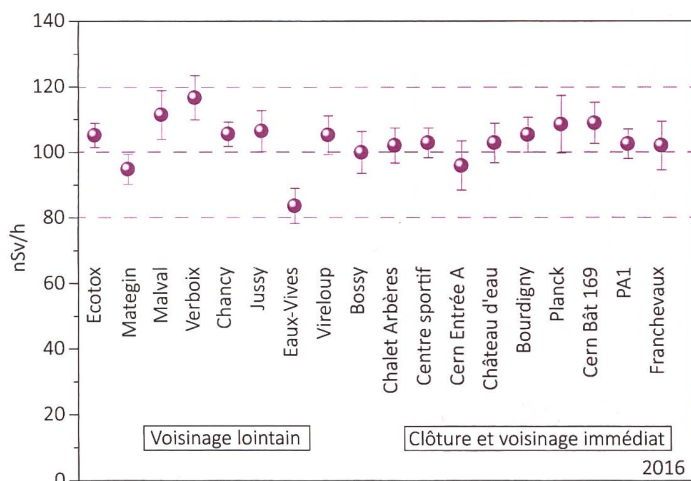


Figure 1:
Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2016 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.

variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 103 ± 4 nSv/h; moyenne des sites distants 103 ± 10 nSv/h).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau RADAIR située au CERN et mesurant en continu la radioactivité alpha et bêta des aérosols (voir Chap. 4.2) n'a pas signalé d'anomalie en 2016. Depuis 2007, un moniteur d'iode est également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l' ^{131}I gazeux. Aucune valeur supérieure à la limite de détection de 50- 60 mBq/m³ n'y a été enregistrée. A noter que dès 2017, et dans le cadre du remplacement du réseau RADAIR par le réseau URAnet aero, le moniteur alpha/bêta du CERN sera remplacé par un moniteur spectroscopique.

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

dans les tunnels du CERN). Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ^7Be mesurées en 2016 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

Des traces de ^{22}Na , également d'origine naturelle, sont régulièrement détectées (valeurs comprises entre 0.1 et 0.9 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont, comme partout en Suisse, été détectées à plusieurs reprises, mais les activités sont restées inférieures à 1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Les seuls radioisotopes attribuables aux activités du CERN sporadiquement mis en évidence dans les filtres aérosols en 2016 sont le ^{24}Na et le ^{131}I (valeurs comprises entre 28 ± 19 et 70 ± 26 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et entre 0.4 ± 0.2 et 2.0 ± 0.5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ respectivement). Ces radionucléides, d'une demi-vie de 15 h pour le ^{24}Na et de 8 jours pour le ^{131}I , sont produits dans les accélérateurs de particules du centre de recherche (l' ^{131}I est uniquement produit par l'installation ISOLDE).

Notons encore que l'impact radiologique de ces traces de ^{24}Na et de ^{131}I est tout à fait négligeable, puisque les concentrations les plus élevées enregistrées en 2016 pour ces radionucléides ne représentent qu'environ 0.00007% (pour le ^{24}Na) et 0.00008% (pour le ^{131}I) des limites d'immissions suisses. L'identification d'un aussi faible niveau de radioactivité nécessite des méthodes extrêmement sensibles, comme celles mises en œuvre par l'OFSP.

Tableau 1 :

Concentrations du ^7Be mesurées en 2016 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)	0.9 - 6.1	3.3
Posieux/FR	0.9 - 6.7	3.6
Klingnau/AG	1.3 - 7.3	3.7
Güttingen/TG	0.8 - 6.0	3.4
Cadenazzo/TI	1.2 - 6.7	4.0

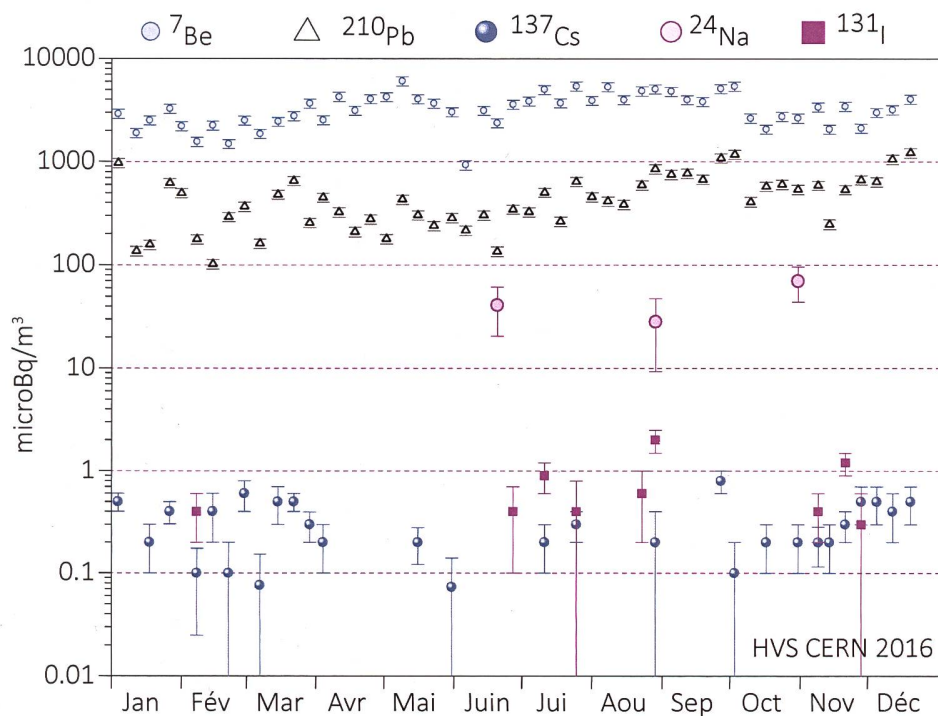


Figure 2 :

Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2016.

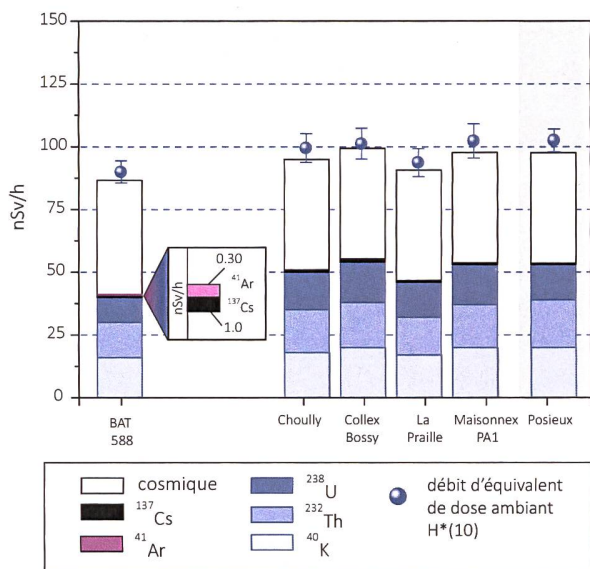


Figure 3 :
Contributions individuelles au débit d'exposition ambiante déterminées par spectrométrie gamma in situ pour les sites voisins du CERN examinés en 2016, et comparaison avec les résultats obtenus à Posieux/FR.

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. Les mesures 2016 n'ont pas indiqué d'apport artificiel attribuable aux activités du CERN, à l'exception de faibles traces d'⁴¹Ar dans l'air (un gaz rare de demi-vie inférieure à 2h produit dans les accélérateurs du centre de recherche) à l'intérieur de la clôture (voir BAT 588). La figure 3 montre en effet 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).

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

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par l'Institut F.-A. Forel, devenu le département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme a fait l'objet d'un rapport spécifique¹.

Entre le 11 novembre 2015 et le 29 octobre 2016, 23 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) avec une intégration des prélèvements de 5.4 à 22 jours. Suite à une panne de l'échantillonneur, la période du 7 au 20 juillet 2016 est manquante. En dehors du ⁴⁰K et des isotopes des séries primordiales (²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th), seuls 3 radioisotopes ont été détectés dans les échantillons d'eau brute (non filtrée) prélevés dans le Nant d'Avril. Les activités maximales sont celles du ⁷Be (maximum de 1.13 ± 0.14 Bq/l enregistré en septembre), avec une moyenne de 0.24 Bq/l lorsque l'isotope est présent.

L'échantillonnage des eaux ayant été réalisé en fonction du débit, il est possible d'estimer le flux d'un isotope en multipliant les débits (exprimés en m³/période) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de ⁷Be pour la période 2015- 2016 est ainsi de 1'410 MBq au minimum et de 1'610 MBq au maximum. Ces valeurs se situent dans les valeurs moyennes des périodes de mesure précédentes.

Le deuxième radionucléide mis en évidence dans les eaux du Nant d'Avril est le ¹³⁷Cs (maximum de 15

1 J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°17 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2015 - octobre 2016 ; Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Décembre 2016)

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

Des traces de ^{22}Na sont supposées dans les eaux du Nant d'Avril entre janvier et février 2016, mais à des activités trop proches de la limite de détection pour être quantifiées. Comme le ^7Be , le ^{22}Na est produit dans la stratosphère par rayonnement cosmique, mais peut également être produit par les installations du CERN. Très peu de données récentes sont disponibles sur les flux naturels de ^{22}Na . Ce radionucléide n'avait pas pu être détecté en 2013, lorsque les installations étaient complètement à l'arrêt, alors qu'il avait régulièrement été mis en évidence au cours des années antérieures. Ces résultats tendent à confirmer l'hypothèse faite les années précédentes, attribuant l'origine de ce radionucléide dans les échantillons d'eaux du Nant d'Avril aux activités du CERN.

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^7Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons. Les activités mesurées pour ces deux isotopes sont résumées dans le tableau 2. Contrairement à la période de surveillance précédente, un échantillon présente des traces de ^{54}Mn (0.8 ± 0.3 Bq/kg) en décembre 2015/janvier 2016.

Aucun autre émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être décelé dans les échantillons de sédiments au cours de la période sous revue.

Tableau 2 :

Résumé des résultats des mesures effectuées par l'Institut F.-A. Forel dans les sédiments du Nant d'Avril durant la période novembre 2015 à octobre 2016 (12 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max	Moyenne	Médiane
	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
^7Be	460 - 2'862	1'147	1'034
^{137}Cs	5.9 - 10.4	8.0	7.8

Afin de mettre en évidence d'éventuelles augmentations des immissions radioactives dans le milieu aquatique dues au fonctionnement du LHC, des sédiments et des bryophytes sont par ailleurs prélevés une fois par an aux 8 principaux points de rejets des eaux du LHC et analysés par le département F.-A. Forel. Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments se sont échelonnées, en 2016, entre 271 et 1'271 Bq/kg pour le ^7Be et entre 4.6 et 18.7 Bq/kg pour le ^{137}Cs . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^7Be variant entre 191 et 1'028 Bq/kg et entre <2.6 et 7.2 Bq/kg pour le ^{137}Cs . La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus en 2005, 2006 et 2008 alors que le LHC n'était pas encore en fonction (programme point zéro LHC) ne montre pas la présence de nouveaux radioisotopes ni d'augmentation significative des radionucléides présents.

En résumé, si l'on exclut le ^7Be , puisque les résultats des mesures effectuées ne peuvent mettre en évidence une origine anthropique, les seuls radionucléides attribuables aux activités du centre de recherche décelés dans le milieu aquatique en 2016 sont le ^{22}Na dans les eaux et le ^{54}Mn dans les sédiments. Pour ce premier toutefois, l'activité est trop proche des limites de détection pour être quantifiable. Pour le second l'activité mesurée dans les sédiments ne représente que 0.008% de la limite d'exemption selon l'ORAP. D'autres radioéléments produits par les installations du CERN tels que ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , mis en évidence par le passé dans le Nant d'Avril, n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes durant l'année sous revue.

Conclusions

Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec le département F.-A. Forel, a montré que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement et la population avoisinante a été très faible en 2016.

L'ensemble des résultats ont montré la prédominance des radioéléments d'origine naturelle. La détection de traces de radionucléides attribuables aux activités du CERN, comme le ^{24}Na , l' ^{41}Ar et le ^{131}I dans l'air et le ^{54}Mn dans l'eau n'a été possible que grâce à la mise en œuvre de techniques de prélèvement et de mesure d'une très grande sensibilité, dépassant le cadre des contrôles réglementaires. Les activités maximales des radioisotopes artificiels provenant des activités du CERN mesurées dans l'environnement ne représentent en effet que d'infimes fractions des valeurs limites fixées par la législation suisse en radioprotection.

8.6

CERN - Rejets et environnement (Mesures CERN)

F. Malacrida et P. Vojtyla

CERN - Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE), 1211 Genève 23

Résumé

Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que, pour 2016, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose efficace délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.012 mSv, soit 4% de la limite. Les concentrations de radionucléides sont restées inférieures à 6% de la limite d'exemption dans tous les échantillons environnementaux. De fait, le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN demeure très faible.

Le CERN

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

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

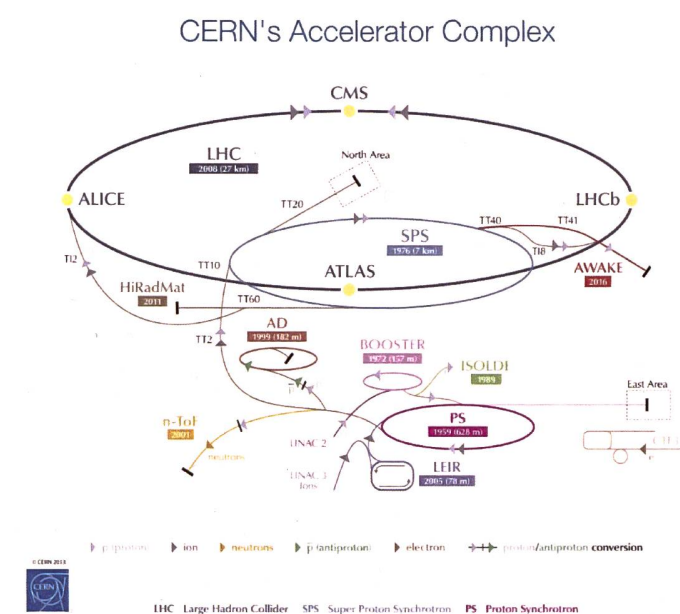


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire en fin de chapitre).

Aspects environnementaux

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

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

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

Programme de surveillance

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnemental, qui est élaboré en tenant compte des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance du rayonnement diffusé se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou prédis par des calculs. Chaque station est équipée d'une chambre d'ionisation dédiée à la mesure en continu des photons et des particules chargées et pénétrantes, comme les muons, ainsi que d'un moniteur de neutrons. En 2016, 41 stations de ce type étaient en opération. Les

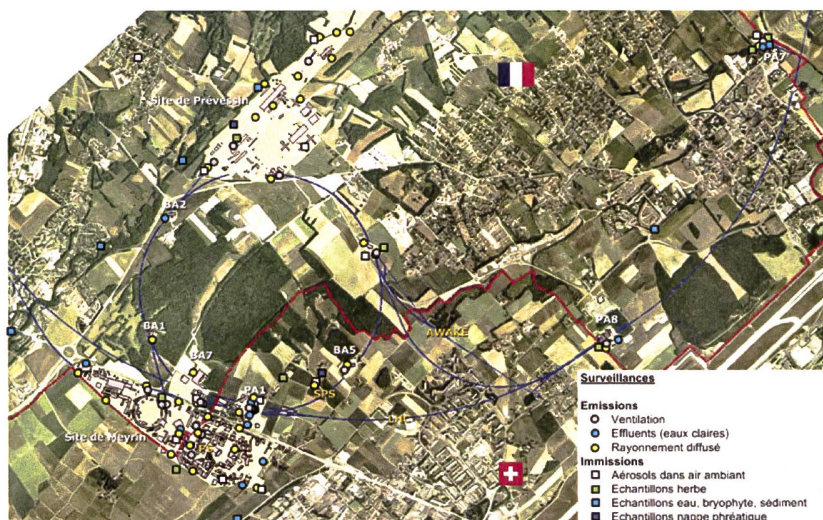


Figure 2:

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

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 2016, 40 stations étaient en opération. De manière similaire, les points de rejet des eaux claires qui sont déversées dans les eaux de surfaces (rivières) sont équipés de stations de surveillance de l'eau (13 stations en 2016); les eaux claires incluent les eaux de refroidissement des circuits secondaires, les eaux d'infiltration des tunnels et les eaux météoriques. Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vies courtes et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire. Deux stations contrôlent indépendamment les eaux de refroidissement et d'infiltration du SPS et du LHC.

Les niveaux de rayonnement diffusé mesurés ainsi que le bilan des rejets vers l'atmosphère et les cours d'eau sont utilisés pour quantifier l'impact dosimétrique, par le biais de modèles environnementaux et radiologiques reconnus [2, 3]. La surveillance des émissions est complétée par la surveillance des immissions, qui est un processus impliquant la collecte d'échantillons environnementaux et leur analyse en laboratoire. Les résultats doivent corrélérer avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont adéquats. Cette surveillance implique un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (11 stations), des échantillons d'herbe (12 points d'échantillonnage), d'eau, de bryophytes (mousses) et de sédiments dans les cours d'eau (13 points), de l'eau des nappes phréatiques (7 points), ainsi que des échantillons de produits d'agriculture locaux, tels que 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 2016

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2016

A l'exception de MEDICIS qui était en phase de mise-en-service, toutes les installations ont été en opération durant l'année 2016. La circulation des faisceaux de protons a redémarré à partir du mois de mars et les hautes intensités ont été mises en jeu d'avril à mi-novembre, suivies par une période s'étendant jusqu'à début décembre impliquant de plus faibles intensités avec des ions plomb. Noter qu'il est d'usage de privilégier des exploitations à plus faibles intensité vers la fin de l'année avant l'arrêt des machines, de telle manière à laisser décroître une partie de l'activité résiduelle induite par l'activation des composants des accélérateurs. Ceci permet de diminuer l'exposition des travailleurs intervenant dans les accélérateurs en début de périodes de maintenance.

En 2016, les intensités faisceaux circulant dans le SPS ont dû être sensiblement limitées à cause de problèmes techniques relatifs à un système d'arrêt faisceau. Aussi, pour le PS, l'exploitation de modes optimisés d'extraction des faisceaux permettent de réduire encore les pertes. Ces deux paramètres expliquent en partie pourquoi les rejets atmosphériques et le rayonnement diffusé étaient inférieurs à ceux de l'année précédente.

La nouvelle expérience AWAKE a démarrée dans le courant du second semestre. Situé sur territoire français, elle exploite le faisceau de protons délivré par le SPS. AWAKE permettra de valider le principe de l'accélération laser-plasma, dont l'intérêt est de générer des champs électriques très élevés. Ces champs permettront d'accélérer les particules sur des distances plus courtes que dans les accélérateurs conventionnels. La valeur ajoutée du développement de cette technologie serait de pouvoir réduire considérablement les tailles de certains accélérateurs dans un futur plus lointain.

Rayonnement diffusé

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

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 est minime et reste local. Les radionucléides se répartissent en quatre catégories: les gaz radioactifs de demi-vie courtes ^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O et ^{41}Ar ; le ^7Be ; l'activité bêta totale (majoritairement ^{32}P et ^{33}P) et le tritium (^3H).

L'expérience ISOLDE produit entre autres des petites quantités d'iode radioactif (^{121}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I , ^{126}I , ^{130}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I), résultat de l'irradiation par des protons de cibles lourdes. Les quantités rejetées en 2016 sont de 309 MBq (ne figurent pas en Tableau 1) induisant une dose au groupe de population de référence de 0.0002 mSv. ISOLDE a rejeté de très faibles quantités de gaz rares (Xe, Kr), d'iode et de tritium sous forme gazeuse via la cheminée de l'installation MEDICIS. Ces rejets sont induits par la vidange des réservoirs de stockage du gaz provenant des systèmes du vide.

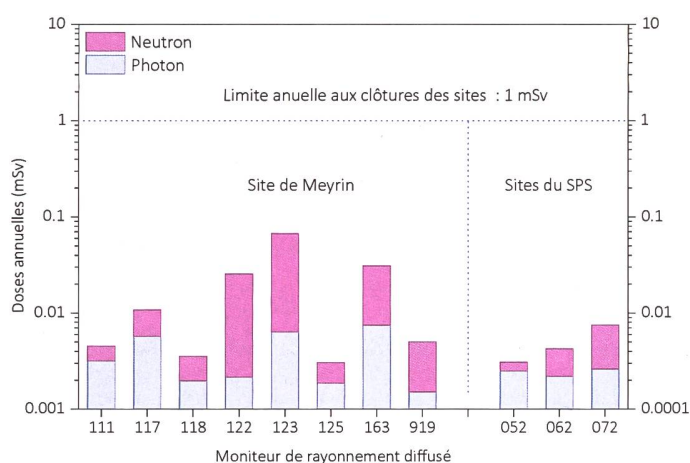


Figure 3:

Equivalent de dose ambiant annuel net enregistré par les moniteurs de rayonnement diffusé (CERN, 2016).

Tableau 1:

Rejets radioactifs dans l'air (CERN, 2016).

Origine du rejet	Station(s)	Air rejeté	^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , ^{41}Ar	^7Be aérosol	Bêta aérosol	Tritium
		10^6 m^3	TBq	MBq	MBq	GBq
LINAC 4	VMS180	9	<0.001	<LD	<LD	<LD
PS BOOSTER	VMS175	165	0.4	100	2.5	4.6
ISOLDE via MEDICIS*	VMS169	84	<LD	<LD	<LD	14
ISOLDE	VMS170	46	8.2	<LD	0.8	9.2
Anneau principal PS	VMS176	525	1.8	<LD	<LD	31
	VMS177					
	VMS178					
	VMS179					
TT70 transfert PS-SPS	VMS173	71	0.2	<LD	<LD	3.6
n-TOF	VMS171	8.4	10	0.4	0.05	50
East Area	VMS181	16	3.1	43	1.4	0.4
Evaporation tritium	NA**	3.0	<LD	<LD	<LD	4.4
TT10 injection PS-SPS	VMS011	278	1.8	22	0.8	18
SPS BA5	VMS051	42	0.08	<LD	<LD	14
HIRADMAT	VMS070	16	<0.001	<LD	<LD	2.5
LHC Experiment ATLAS	VMS911	16	<0.001	0.01	0.01	<LD
	VMS912					
	VMS913					
	VMS914					

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

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

Rejets de substances radioactives dans les cours d'eau

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

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

Le Tableau 2 présente les rejets de 2016, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés. L'indice bêta global résiduel, c'est-à-dire corrigé pour la présence de ^{40}K naturel dans l'eau, est attribué au ^{22}Na exclusivement. Par conséquent, les rejets déclarés en bêta/gamma (^{22}Na) sont surestimés car une fraction ou la totalité de l'indice bêta global résiduel est en réalité induit par des radionucléides d'origines naturelles (p. ex. descendants de l'uranium).

Surveillance des immissions

Le Béryllium-7 (^7Be) est un radioélément faiblement radiotoxique, produit dans l'air par les particules de haute énergie. Il possède une grande affinité aux aérosols, ce qui permet de l'utiliser comme marqueur de rejets dans l'atmosphère de particules radioactives en suspension dans l'air provenant des accélérateurs (voir Tableau 1). Cependant, ce radioélément est également produit naturellement par les rayonnements cosmiques en atmosphère. Aux latitudes moyennes, la concentration en ^7Be dans l'air varie au cours de l'année, avec des maximums en début d'été et en été, lorsque la tropopause, une couche se situant entre la troposphère et la stratosphère, se rompt. L'air provenant de la stratosphère, riche en radioéléments produits par rayonnements cosmiques, est alors injecté dans la troposphère. Les pluies influencent aussi la concentration naturelle en ^7Be , car elles précipitent les aérosols en suspension dans l'air. La Figure 4 montre la concentration de ^7Be dans l'air ambiant collecté dans deux types de stations :

- des stations situées autour du CERN pouvant capter des rejets d'accélérateurs et
- une station de référence très éloignée des accélérateurs (HVS Posieux/FR).

Les valeurs mesurées à proximité et loin des sites du CERN ont toutes corrélées, prouvant ainsi que la majeure partie de l'activité en ^7Be mesurée est d'origine naturelle. La mesure de l'échantillonneur d'aérosols à haut volume EAS973 situé au LHC-PA7 a été suffisamment sensible pour détecter le ^{22}Na naturel, aussi produit par rayonnements cosmiques. Les quantités mesurées, soit $< 0.001 \text{ mBq/m}^3$, correspondent à celles mesurées avant que le LHC ne soit en opération. Les mesures des filtres d'aérosols de la station de ventilation VMS907 du LHC PA7 n'ont pas mis de ^{22}Na en évidence.

Tableau 2 :

Rejets radioactifs dans les cours d'eau (CERN, 2016).

Origine du rejet	Station	Quantité d'eau	Tritium	Bêta/gamma (^{22}Na)	^{11}C , ^{13}N , $^{14,15}\text{O}$	^{24}Na	Rejeté dans:
		10^6 m^3	GBq	MBq	GBq	GBq	
Site de Prévessin, SPS	WMS021	0.39	28	58	2.1	0.23	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	WMS101	1.8	1.4	47	<LD	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	WMS103	0.34	0.2	4.6	<LD	<LD	Le Lion (F)
AD infiltration	WS104	0.03	0.03	1.7	<LD	<LD	STEP*
Site SPS BA6 + site LHC PA1	WMS910	0.7	0.4	15	3.5	<LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	WMS970	0.006	0.02	0.07	<LD	<LD	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS**, rejet par le site du LHC PA8	WMS980	0.01	0.4	1.8	<LD	<LD	Le Nant (F)

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

Concernant l'environnement aquatique, des faibles concentrations en ^{54}Mn ont été mesurées dans des échantillons de bryophytes (mousses) et de sédiments prélevés dans la rivière le Lion (F). Les radionucléides proviennent de la Zone Nord du site de Prévessin (F) et les activités spécifiques sont au maximum équivalentes à 6% de la limite d'exemption [5]. Les bryophytes sont d'excellents bioaccumulateurs de pollution. Alors que la mesure de l'eau de rivière est une valeur instantanée, ces végétaux, qui peuvent être assimilés à des collecteurs, permettent d'identifier des radionucléides ayant été présents dans l'eau. Aucun autre radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les autres échantillons d'eau,

de bryophytes et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collectés en septembre. Bien que les radionucléides aient été mesurés dans des échantillons provenant du territoire français, ils sont mentionnés dans ce présent rapport car la rivière le Lion rejoint l'Allondon, qui termine son cours dans le Rhône. Le Nant d'Avril, dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches, fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève, mandaté par l'Office Fédéral de la Santé Publique (se référer au chapitre 8.6).

En dehors d'un échantillon de bryophyte prélevé à proximité du point de rejet de l'eau de la Zone Nord du site de Prévessin (F) dans le Lion, aucun radionucléide produit au CERN n'a pu être mis en évidence; le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN peut donc être considéré comme très faible.

Impact radiologique

La dose efficace reçue par les membres du groupe de référence pour le site de Meyrin du CERN en 2016 a été calculée à partir des équivalents de dose ambiante mesurés aux barrières du site et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion amélioré, basé sur les directives [2,3]. La dose efficace totale de 0.012 mSv est induite pour environ deux tiers par le rayonnement diffusé et pour un tiers par les rejets de gaz de demi-vies courtes. Noter qu'il n'a pas été possible de tenir compte de l'éloignement du groupe de population de référence par rapport au site de Meyrin dans le calcul de la dose efficace induite par le rayonnement diffusé. Conséquemment, la dose efficace est très probablement surestimée.

Le groupe de population de référence exposé aux rejets d'effluents liquides dans le Nant d'Avril a reçu une dose inférieure à 0.0002 mSv.

Le rayonnement diffusé et les rejets en gaz de demi-vies courtes contribuent à 98% à la dose susmentionnée de 0.012 mSv. Ceux-ci sont surveillés en continu, garantissant ainsi un temps de réaction optimal en cas de dégradation du fonctionnement des installations.

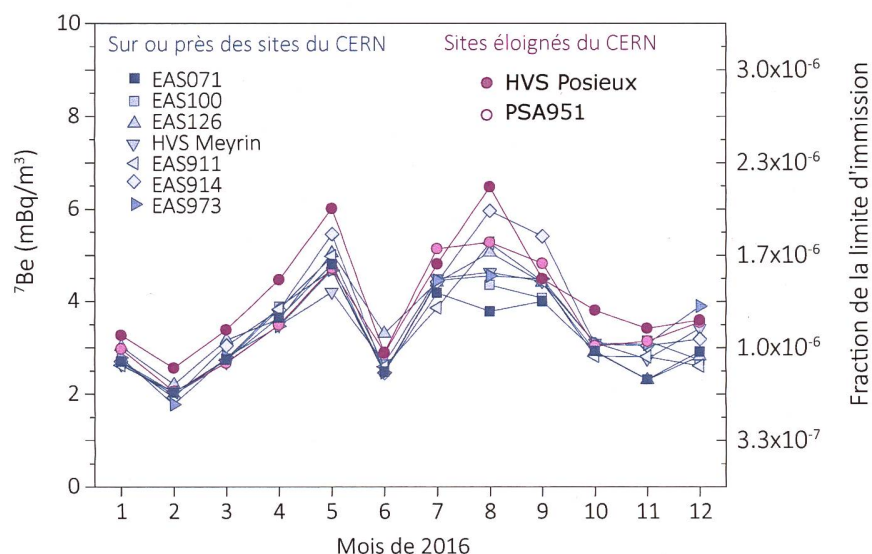


Figure 4:

Activités du ^{7}Be mesurées par le biais de 9 stations d'échantillonnage dont 7 sont situées sur ou proches des sites du CERN. EAS71: Site du SPS BA-7. EAS100 Site CERN de Meyrin. EAS126: Proche du PS. EAS914: Site du LHC PA1. EAS911: Proche d'une ferme de Meyrin. EAS973: Échantillonneur CERN à haut débit sur le site du LHC PA7 proche de Collex-Bossy/GE. HVS Meyrin, HVS Posieux: Échantillonneurs OFSP à haut débit, le premier se situant sur le site CERN de Meyrin et le second à Posieux/Fribourg [4].

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 2016 et à l'instar des années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1];
- Des techniques de mesure sensibles ont permis de détecter des radionucléides en faibles concentrations dans un seul échantillon environnemental. Les valeurs de concentration sont néanmoins restées inférieures à 6% des limites d'exemption. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN demeure très faible.
- De manière à confronter l'impact dosimétrique des activités du CERN aux valeurs typiques d'expositions naturelles, la Figure 5 compare la dose susmentionnée de 0.012 mSv avec la dose équivalente annuelle mesurée en plusieurs localités proches et éloignées des sites du CERN.

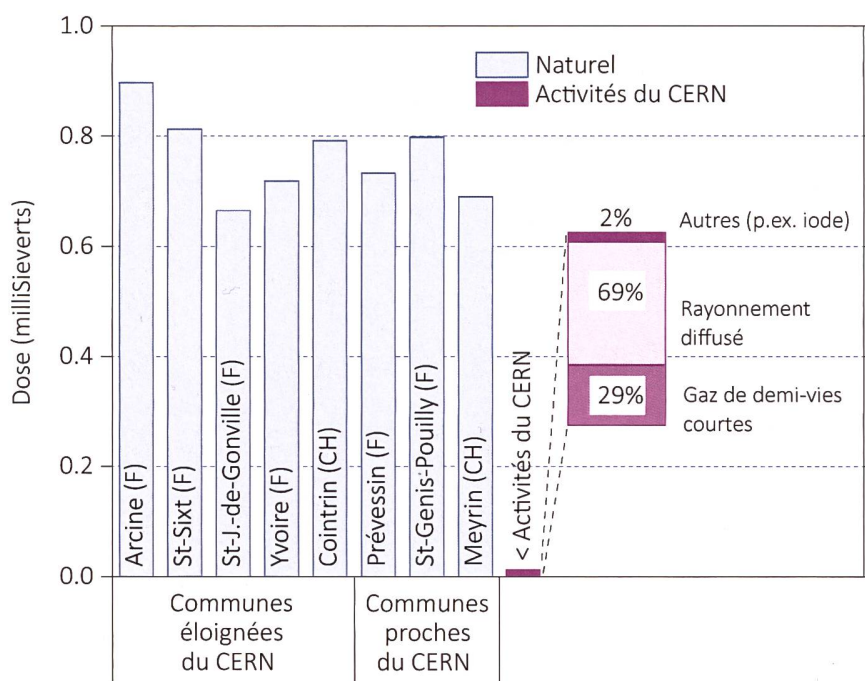


Figure 5:

Contribution des activités du CERN à la dose annuelle du groupe de référence du site de Meyrin, comparée aux variations des doses externes naturelles dans des communes françaises et suisses situées à proximité. La contribution du CERN de 0.012 mSv doit être comparée à la valeur limite de dose de 0.3 mSv définie dans la réglementation du CERN [1].

Références

- [1] Code F Rev., Radioprotection- Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [2] 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).
- [3] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
- [4] S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement: Résultats des mesures 2016 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2017).
- [5] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2014), Annexe 3.

Glossaire

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

