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: - (2020)

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

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 01.10.2025

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

2020

Chapitre
Kapitel
8

Surveillance des installations nucléaires : Emissions et Immissions

Überwachung der Kernanlagen : Emissionen und Immissionen

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

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

8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

R. Habegger, A. Leupin, J. Löhle
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2020 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM, endgültige Einstellung des Leistungsbetriebs Ende Dezember 2019) 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 für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Emissionen aus den Kernanlagen: Ergebnisse 2020

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1a für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Figur 1b enthält eine Aufschlüsselung der Abgaben der Kernkraftwerke nach Monat für die limitierten radioaktiven Abgaben. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen gemäss Richtlinie ENSI G14 errechneten Personendosen für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2020. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c gegeben. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für die meistbetroffenen Personen (nur Erwachsene) über die letzten 24 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 196 Proben eigene gammaspektrometrische Messungen durchgeführt (inkl. Teilnahme an Ringvergleichen zur Sicherstellung der eigenen Messqualität). Dabei wurden Aerosol- und Iodfilter sowie Abwasserproben aus den Anlagen stichprobenweise analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

Bei der monatlichen Aufschlüsselung der radioaktiven Abgaben aus den Werken (vgl. Figur 1b) ist bei den flüssigen Abgaben beim KKG die jährlich jeweils vor dem Revisionsstillstand durchgeführte Verwerfungsaktion für

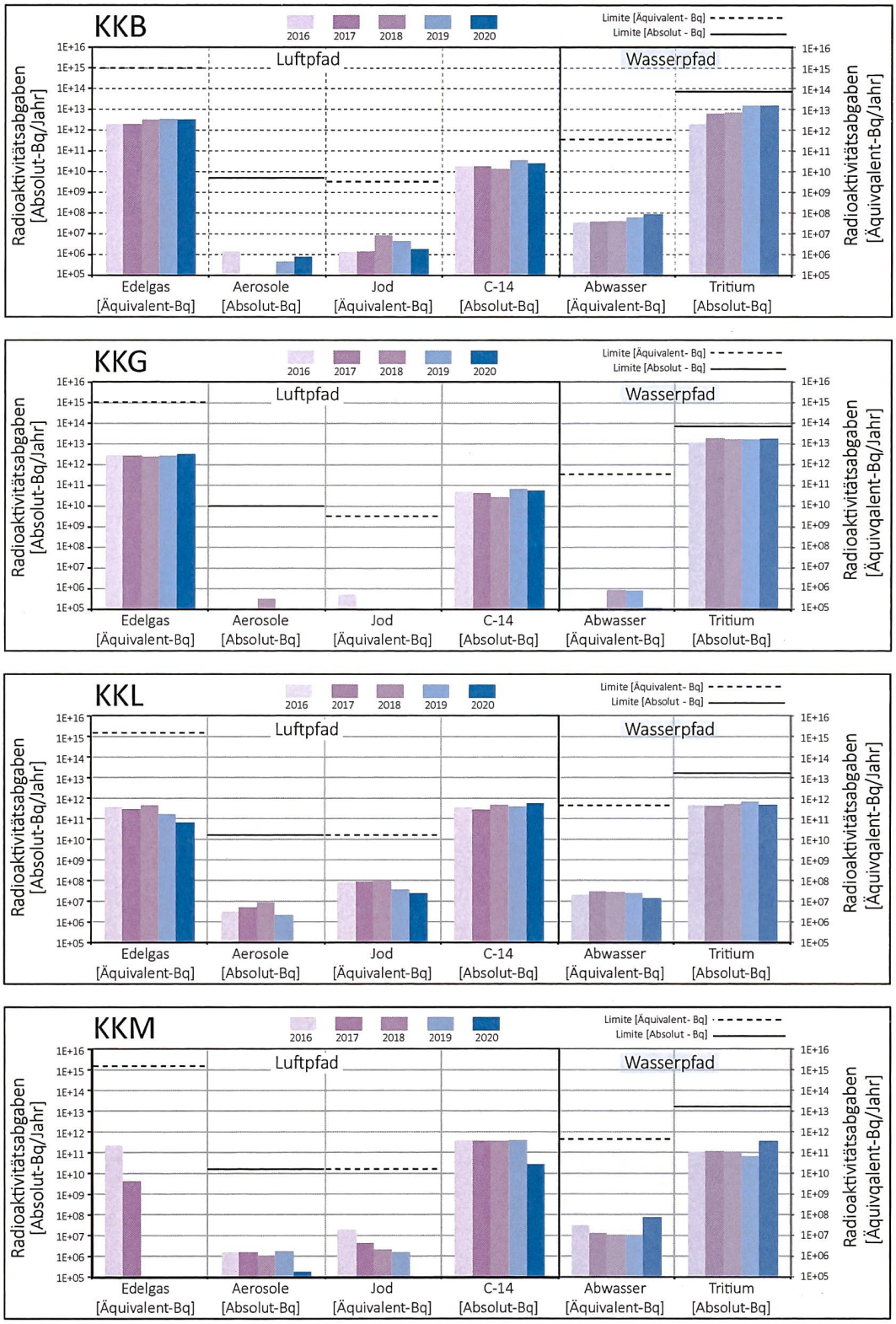
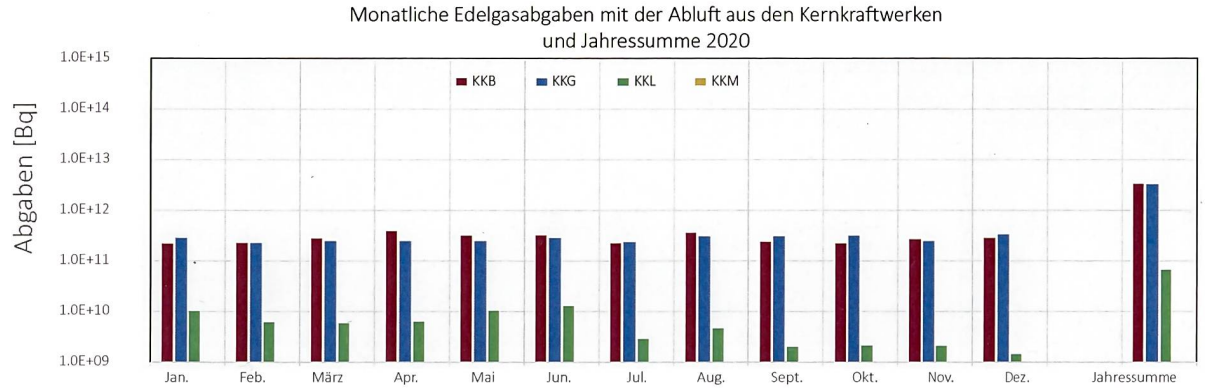
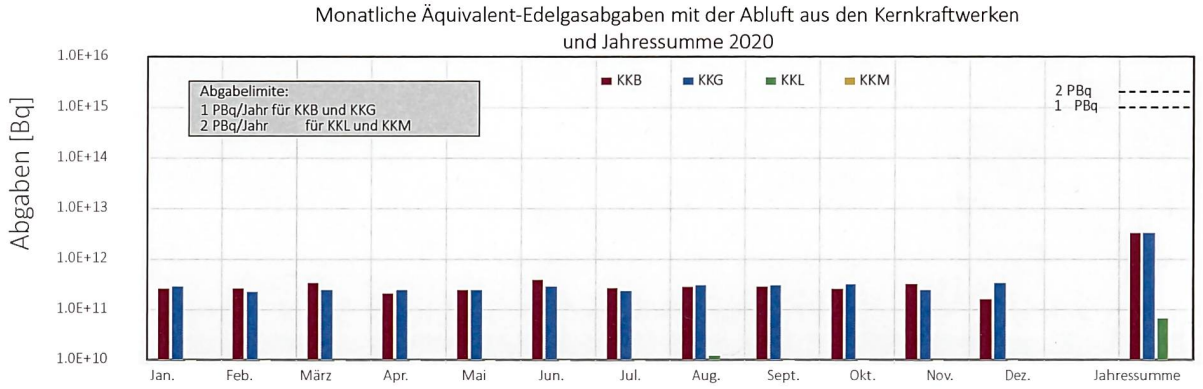
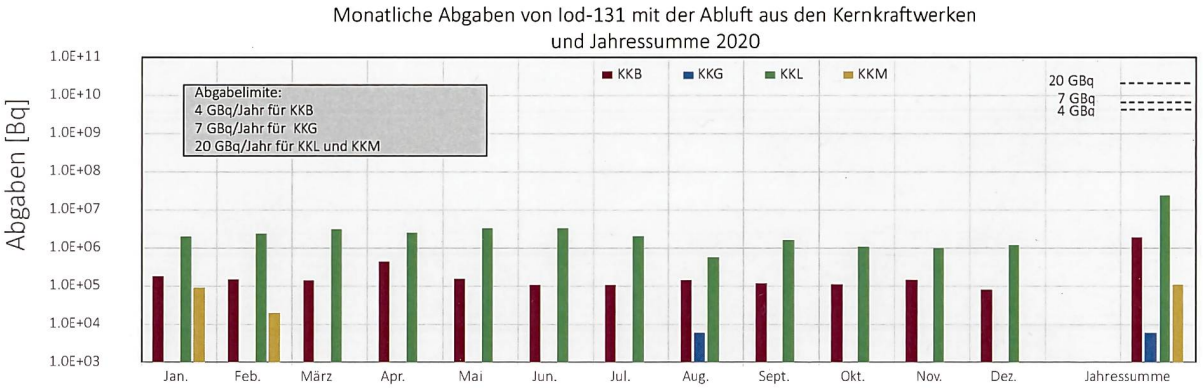


Fig 1.a:
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser ins Flusswasser in den letzten fünf Jahren (2016 bis 2020) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Angegeben ist für die jeweilige Nuklidgruppe und den Abgabepfad die Jahressumme der bei den einzelnen bilanzierenden 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







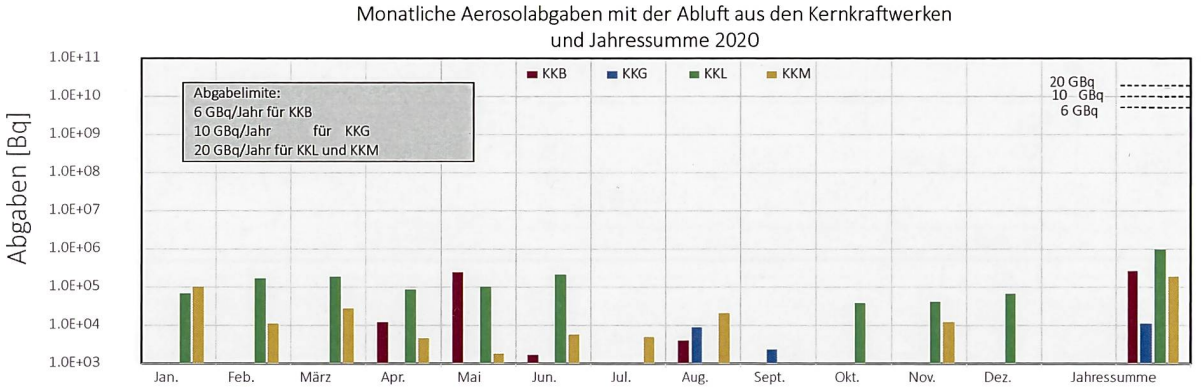
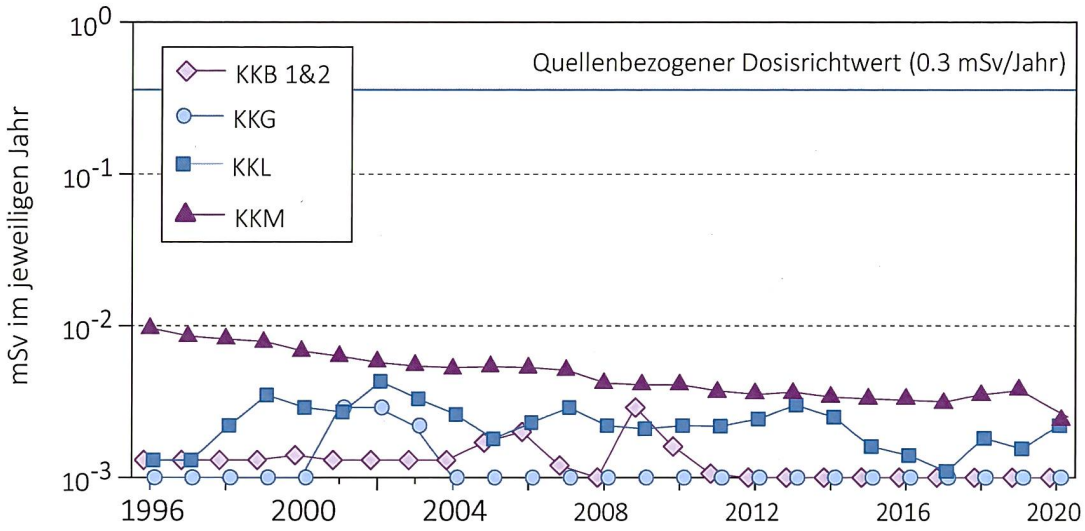


Fig 1.b (Teil 1):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2020 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.

Fig 1.b (Teil 2):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2020 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.



Figur 2:
Berechnete Dosen für die meistbetroffenen Personen (Erwachsene) in der Umgebung der schweizerischen KKW, d.h. eine erwachsene Person, die sich dauernd am kritischen Ort aufhält, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort bezieht und nur Trinkwasser aus dem Fluss unterhalb des jeweiligen Kernkraftwerks konsumiert. An diesem Ort ist der Dosisbeitrag durch die Direktstrahlung aus den Kernkraftwerken vernachlässigbar. Werte kleiner als 0.001 mSv werden in der Figur als 0.001 mSv dargestellt.

Anlage/Block	Betrieb 2020	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01-16.04; 22.05-31.12 Revisionsstillstand: 17.04-21.05	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01-04.08; 17.08-31.12 Revisionsstillstand: 05.08-16.08	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01-05.06; 24.06-31.12 Revisionsstillstand: 06.06-23.06	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 1.1-29.06; 12.08-31.12 Revisionsstillstand: 30.06-11.08	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019	Siedewasserreaktor	373 MW

Figur 3:
Betrieb der Kernanlagen 2020.

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

Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKG weniger als 0.001 mSv, beim KKB weniger als 0.002 mSv, beim KKM weniger als 0.003 mSv und KKL weniger als 0.005 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betrugen somit im Jahr 2020 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts.

Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von weniger als 0.007 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Gasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeführten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Die für das Jahr 2020 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

Tabelle 1:
Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2020 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]		
			Messsung	Äquivalent-abgaben [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 4'020 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$4.7 \cdot 10^{8}$	$8.7 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$1.5 \cdot 10^{13}$	-	$7 \cdot 10^{13}$	21 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	$3.3 \cdot 10^{12}$	$3.3 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$7.8 \cdot 10^{5}$	-	$6 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ^{131}I	$1.9 \cdot 10^{6}$	$1.9 \cdot 10^{6}$	$4 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$2.6 \cdot 10^{10}$	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0012
	Dosis total						<0.001	<0.001	0.0014
KKG	Abwasser 6'834 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$1.2 \cdot 10^{6}$	$1.1 \cdot 10^{5}$	$2 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$1.8 \cdot 10^{13}$	-	$7 \cdot 10^{13}$	26 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	$<3.2 \cdot 10^{12}$	$<3.3 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	<0.4%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$1.1 \cdot 10^{4}$	-	$1 \cdot 10^{10}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ^{131}I	$6.0 \cdot 10^{3}$	$6.0 \cdot 10^{3}$	$7 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$5.8 \cdot 10^{11}$	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKL	Abwasser 12'308 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$6.3 \cdot 10^{7}$	$1.4 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$4.8 \cdot 10^{11}$	-	$2 \cdot 10^{13}$	2.4 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	$6.7 \cdot 10^{10}$	$6.6 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{15}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$1.7 \cdot 10^{4}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ^{131}I	$2.4 \cdot 10^{7}$	$2.4 \cdot 10^{7}$	$2 \cdot 10^{10}$	0.1 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$5.8 \cdot 10^{11}$	-	-	-	0.0022	0.0029	0.0049
	Dosis total						0.0022	0.0029	0.0049
KKM[5]	Abwasser 4'990 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$4.7 \cdot 10^{8}$	$7.3 \cdot 10^{7}$ $3.1 \cdot 10^{6}$	$2.8 \cdot 10^{11}$ $1.2 \cdot 10^{10}$	<0.1% <0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$4.0 \cdot 10^{11}$	$3.6 \cdot 10^{11}$ $4.1 \cdot 10^{10}$	$1.4 \cdot 10^{13}$ $5.9 \cdot 10^{11}$	2.6% 7.0%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	-	-	$1.4 \cdot 10^{15}$ $1.2 \cdot 10^{12}$	<0.1% <0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$1.5 \cdot 10^{5}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	<0.1%	0.0023	0.0023	0.0022
		Iod: ^{131}I	$1.1 \cdot 10^{5}$	$1.1 \cdot 10^{5}$	$2 \cdot 10^{10}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$2.8 \cdot 10^{10}$	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						0.0024	0.0024	0.0024
ZZL	Abwasser 340 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$2.4 \cdot 10^{8}$	$6.7 \cdot 10^{7}$	$2 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$9.2 \cdot 10^{9}$	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β–/γ-Aerosole	$3.2 \cdot 10^{5}$	-	$1 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	$1.1 \cdot 10^{4}$	-	$3 \cdot 10^{7}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$7.3 \cdot 10^{8}$	-	$1 \cdot 10^{12}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$6.2 \cdot 10^{9}$	-	$1 \cdot 10^{14}$	<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 2020 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungslabor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszwischenlager
Abgaben im Abwasser[1,2] [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft[1,2] [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	-	-	-	-	-
β/γ-Aerosole, ohne Iod	-	-	-	-	$1.9 \cdot 10^4$
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	$1.3 \cdot 10^6$	-	-	-	-
Tritium als HTO	$2.9 \cdot 10^9$	-	-	$8.2 \cdot 10^9$	$5.6 \cdot 10^9$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	$8.8 \cdot 10^7$	$6.7 \cdot 10^6$
Jahresdosis[3] [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Kind 10j	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Kleinkinder	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.0015	< 0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert[4]	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI[1,2]		
	Zentrale Fortluftanlagen	Injektor II	C-Labor	Abwasser 949 m³	Abluft	Aequivalentabgaben
Abgaben im Abwasser[1,2] [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$6.0 \cdot 10^7$	-	$6.3 \cdot 10^6$
Tritium	-	-	-	$1.2 \cdot 10^{10}$	-	-
Abgaben über die Abluft[2,4] [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	$1.7 \cdot 10^{14}$	$2.2 \cdot 10^{10}$	-	-	$1.7 \cdot 10^{14}$	$7.0 \cdot 10^{14}$
β/γ-Aerosole, ohne Iod	$1.9 \cdot 10^{10}$	$5.6 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^4$	-	$1.9 \cdot 10^{10}$	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod: Summe aller Isotope	$7.2 \cdot 10^7$	-	-	-	$7.3 \cdot 10^7$	$4.4 \cdot 10^7$
Tritium als HTO	$1.8 \cdot 10^{12}$	-	-	-	$1.8 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	$9.5 \cdot 10^7$	-
Jahresdosis[3] [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.0064	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kind 10j	0.0064	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kleinkinder	0.0064	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert[4]	4.3 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 5.0%	

Tabelle 3a:
Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2020:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{3}H	$1.5\cdot10^{13}$	$1.8\cdot10^{13}$	$4.8\cdot10^{11}$	$4.0\cdot10^{11}$	$1.2\cdot10^{10}$	$9.2\cdot10^{9}$
^{22}Na					$1.3\cdot10^{5}$	$2.6\cdot10^{6}$
^{24}Na	$3.3\cdot10^{6}$					
^{35}S					$2.3\cdot10^{7}$	
^{51}Cr	$3.2\cdot10^{5}$					
^{54}Mn	$1.3\cdot10^{7}$		$3.0\cdot10^{6}$	$1.4\cdot10^{8}$	$5.7\cdot10^{4}$	$6.2\cdot10^{5}$
^{57}Co					$5.4\cdot10^{3}$	
^{58}Co	$1.7\cdot10^{7}$		$9.5\cdot10^{5}$	$1.4\cdot10^{7}$		$1.4\cdot10^{4}$
^{60}Co	$9.9\cdot10^{7}$		$5.9\cdot10^{7}$	$2.7\cdot10^{8}$	$4.9\cdot10^{5}$	$1.6\cdot10^{7}$
^{65}Zn	$8.6\cdot10^{4}$			$4.0\cdot10^{7}$		
^{67}Ga					$8.7\cdot10^{4}$	
^{89}Sr	$7.0\cdot10^{5}$			$7.4\cdot10^{6}$		
$^{90}Sr/^{90}Y$	$1.0\cdot10^{6}$			$3.6\cdot10^{5}$	$1.9\cdot10^{6}$	$5.1\cdot10^{5}$
^{95}Nb	$5.1\cdot10^{4}$					
^{99m}Tc	$5.9\cdot10^{6}$	$2.6\cdot10^{5}$				
^{103}Ru	$4.7\cdot10^{5}$					
^{110m}Ag	$8.0\cdot10^{6}$					
^{111}In					$4.7\cdot10^{4}$	
^{122}Sb	$1.4\cdot10^{7}$					
^{124}Sb	$1.2\cdot10^{8}$			$1.4\cdot10^{5}$		$1.6\cdot10^{5}$
^{125}Sb	$3.4\cdot10^{7}$			$6.1\cdot10^{5}$		$2.4\cdot10^{6}$
^{123m}Te	$2.2\cdot10^{7}$	$5.9\cdot10^{5}$				
^{129m}Te	$1.8\cdot10^{7}$					
^{132}Te	$2.7\cdot10^{7}$					
^{131}I	$5.0\cdot10^{6}$					
^{133}I	$1.8\cdot10^{5}$					
^{134}Cs	$1.6\cdot10^{6}$				$1.2\cdot10^{4}$	$1.4\cdot10^{6}$
^{137}Cs	$7.2\cdot10^{7}$			$1.3\cdot10^{6}$	$9.7\cdot10^{6}$	$2.2\cdot10^{8}$
^{140}Ba	$4.4\cdot10^{5}$					
^{140}La	$4.6\cdot10^{5}$					
^{141}Ce	$5.7\cdot10^{4}$					
^{144}Ce	$1.7\cdot10^{5}$	$2.5\cdot10^{5}$				
^{155}Tb					$4.7\cdot10^{4}$	
^{156}Tb					$4.0\cdot10^{3}$	
^{161}Tb					$2.3\cdot10^{6}$	
^{169}Yb					$6.6\cdot10^{3}$	
^{172}Lu					$4.2\cdot10^{4}$	
^{173}Lu					$5.4\cdot10^{4}$	
^{177}Lu					$2.2\cdot10^{7}$	
^{207}Bi					$1.7\cdot10^{4}$	
^{239}Np	$2.0\cdot10^{6}$					
α-Strahler	*)	$5.5\cdot10^{4}$	$2.6\cdot10^{5}$	$2.8\cdot10^{4}$		*)
$^{234/238}U$					$1.4\cdot10^{4}$	
$^{239/240}Pu$	$1.8\cdot10^{4}$					
$^{238}Pu/^{241}Am$	$8.8\cdot10^{4}$					$2.7\cdot10^{3}$
^{239}Np						
^{242}Cm	$1.1\cdot10^{4}$					
$^{243/244}Cm$	$1.2\cdot10^{5}$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2019 bis und mit dem 3. Quartal 2020

Tabelle 3b:
Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2020:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase. Edelgase						
Tritium	$7.4 \cdot 10^{11}$	$6.0 \cdot 10^{11}$	$4.9 \cdot 10^{11}$	$2.4 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^{12}$	$6.2 \cdot 10^{9}$
^{14}C (CO_2)	$2.6 \cdot 10^{10}$	$5.8 \cdot 10^{10}$	$5.8 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^{10}$	$9.5 \cdot 10^{7}$	$7.3 \cdot 10^{8}$
^{11}C					$2.5 \cdot 10^{13}$	
^{13}N					$2.6 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$1.1 \cdot 10^{14}$	
^{18}F					$7.9 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne						
^{41}Ar			$2.0 \cdot 10^{9}$		$3.7 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr						
^{85m}Kr	$1.2 \cdot 10^{11}$					
^{88}Kr	$2.0 \cdot 10^{11}$					
^{133}Xe	$1.6 \cdot 10^{12}$		$1.7 \cdot 10^{10}$			
^{135}Xe	$1.4 \cdot 10^{12}$		$3.4 \cdot 10^{10}$			
^{135m}Xe			$1.4 \cdot 10^{10}$			
EG-Aequiv.						
EG: β-total		$<3.2 \cdot 10^{12}$				
Andere						
Iod						
^{123}I					$8.2 \cdot 10^{6}$	
^{124}I					$6.0 \cdot 10^{5}$	
^{125}I					$6.3 \cdot 10^{7}$	
^{126}I					$6.0 \cdot 10^{5}$	
^{131}I	$1.9 \cdot 10^{6}$	$6.0 \cdot 10^{3}$	$2.5 \cdot 10^{7}$	$1.1 \cdot 10^{5}$		
^{133}I	$9.5 \cdot 10^{6}$					

Tabelle 3c:
Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2020:
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
^{7}Be					$6.1 \cdot 10^{5}$	
^{24}Na					$3.4 \cdot 10^{8}$	
^{39}Cl					$1.4 \cdot 10^{6}$	
^{54}Mn				$3.3 \cdot 10^{4}$		
^{57}Co		$2.3 \cdot 10^{3}$				
^{60}Co	$4.0 \cdot 10^{3}$	$8.8 \cdot 10^{3}$		$1.3 \cdot 10^{5}$	$1.1 \cdot 10^{5}$	$9.5 \cdot 10^{3}$
^{75}Se					$4.0 \cdot 10^{4}$	
^{77}Br					$5.7 \cdot 10^{6}$	
^{80m}Br					$3.8 \cdot 10^{6}$	
^{82}Br					$4.8 \cdot 10^{8}$	
^{89}Sr			$1.4 \cdot 10^{5}$			
^{90}Sr						
^{103}Ru	$2.0 \cdot 10^{5}$					
^{106}Ru	$5.8 \cdot 10^{4}$					
^{121}Te					$1.6 \cdot 10^{5}$	
^{137}Cs				$1.7 \cdot 10^{4}$		$1.4 \cdot 10^{4}$
^{140}La			$1.7 \cdot 10^{4}$			
^{141}Ce						
^{144}Ce						
^{173}Lu					$1.3 \cdot 10^{5}$	
^{181}Re					$4.6 \cdot 10^{7}$	
^{182}Re					$6.2 \cdot 10^{8}$	
^{182m}Re					$9.9 \cdot 10^{6}$	
^{183}Re					$7.3 \cdot 10^{6}$	
^{182}OS					$1.8 \cdot 10^{8}$	
^{183}Os					$1.9 \cdot 10^{8}$	
^{183m}Os					$5.6 \cdot 10^{7}$	
^{185}Os					$1.3 \cdot 10^{7}$	
^{185}W					$1.3 \cdot 10^{8}$	
^{191}Os	$5.2 \cdot 10^{5}$					
^{191}Pt					$9.1 \cdot 10^{6}$	
^{192}Au					$2.1 \cdot 10^{8}$	
^{193}Au					$1.5 \cdot 10^{8}$	
^{194}Au					$4.3 \cdot 10^{6}$	
^{192}Hg					$2.9 \cdot 10^{9}$	
^{193m}Hg					$1.2 \cdot 10^{8}$	
^{194}Hg					$4.3 \cdot 10^{6}$	
^{195}Hg					$1.3 \cdot 10^{10}$	
^{195m}Hg					$1.0 \cdot 10^{8}$	
^{197m}Hg					$1.1 \cdot 10^{8}$	
^{203}Hg					$6.8 \cdot 10^{6}$	
Nicht spezifizierte						$2.9 \cdot 10^{5}$
α-Aerosole		$4.4 \cdot 10^{4}$	$4.1 \cdot 10^{3}$	$1.0 \cdot 10^{4}$		$1.1 \cdot 10^{4}$

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[4] Abgabelimiten gemäss Bewilligung der jeweiligen Kernanlage. Die Abgabelimiten wurden so festgelegt, dass die Jahresdosis für Personen in der Umgebung (vgl. Fussnote 3) für die Kernkraftwerke unter 0.3 mSv / Jahr respektive das Zentrale Zwischenlager in Würenlingen (ZZL) unter 0.05 mSv pro Jahr bleibt. Für das Paul Scherrer Institut (PSI) sind die Abgaben gemäss der Bewilligung Abgabe radioaktiver Stoffe 6/2018 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv pro Jahr limitiert.

[5] KKM : Bis zum 14. September 2020 war im KKM das Abgabereglement ENSI 11/2288 Rev.1 gültig. Ab dem 15. September 2020 ist das Abgabereglement ENSI 11/2288 Rev.2 gültig. Für die Abgabelimiten gilt die pro rata temporis-Regel, d.h. die Abgabelimiten werden mit dem zeitlichen Anteil der Gültigkeit der Abgabereglemente verrechnet.

8.2
Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

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

Ergebnisse 2020

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

Beim KKB und KKG wurde am Zaun weder mittels TLD resp. EDIS noch bei den vierteljährlichen Messungen des ENSI eine signifikante Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt. Am Zaun des KKL wurden bei den vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.16 µSv/h ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von etwa 0.02 mSv pro Woche. Die von KKL quartalsweise ausgewerteten EDIS am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.02 mSv. Am Zaun des KKM wurden bei den vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen 0.08 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.32 µSv/h ermittelt. Auf eine Woche hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von etwa 0.04 mSv resultieren. Im Falle des KKM wird bei einer solchen Hochrechnung die Ortsdosis stark überschätzt, da die maximalen Ortdosisleistungen am Zaun in der Regel

aufgrund der Rückbauarbeiten zeitlich begrenzt sind. In diesem Falle wurde der hohe Wert während einer Transportbereitstellung von radioaktiven Abfällen gemessen. Die vom KKM quartalsweise ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.007 mSv. Am Zaun des PSI wurden bei vierteljährlichen vom ENSI durchgeführten Messungen Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.11 µSv/h ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.008 mSv pro Woche. Die vom PSI quartalsweise ausgewerteten TLD am Zaun ergeben nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes eine maximale, auf eine Woche gemittelte Dosiserhöhung von etwa 0.004 mSv. Beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) konnte weder aus den stichprobenweise durchgeführten Dosisleistungsmessungen noch aufgrund der am Zaun positionierten TLD und Neutronendosimeter eine signifikante Erhöhung der Ortsdosisleistung festgestellt werden.

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

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

B. Bucher, R. Habegger, J. Löhle
Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, Brugg

Zusammenfassung

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

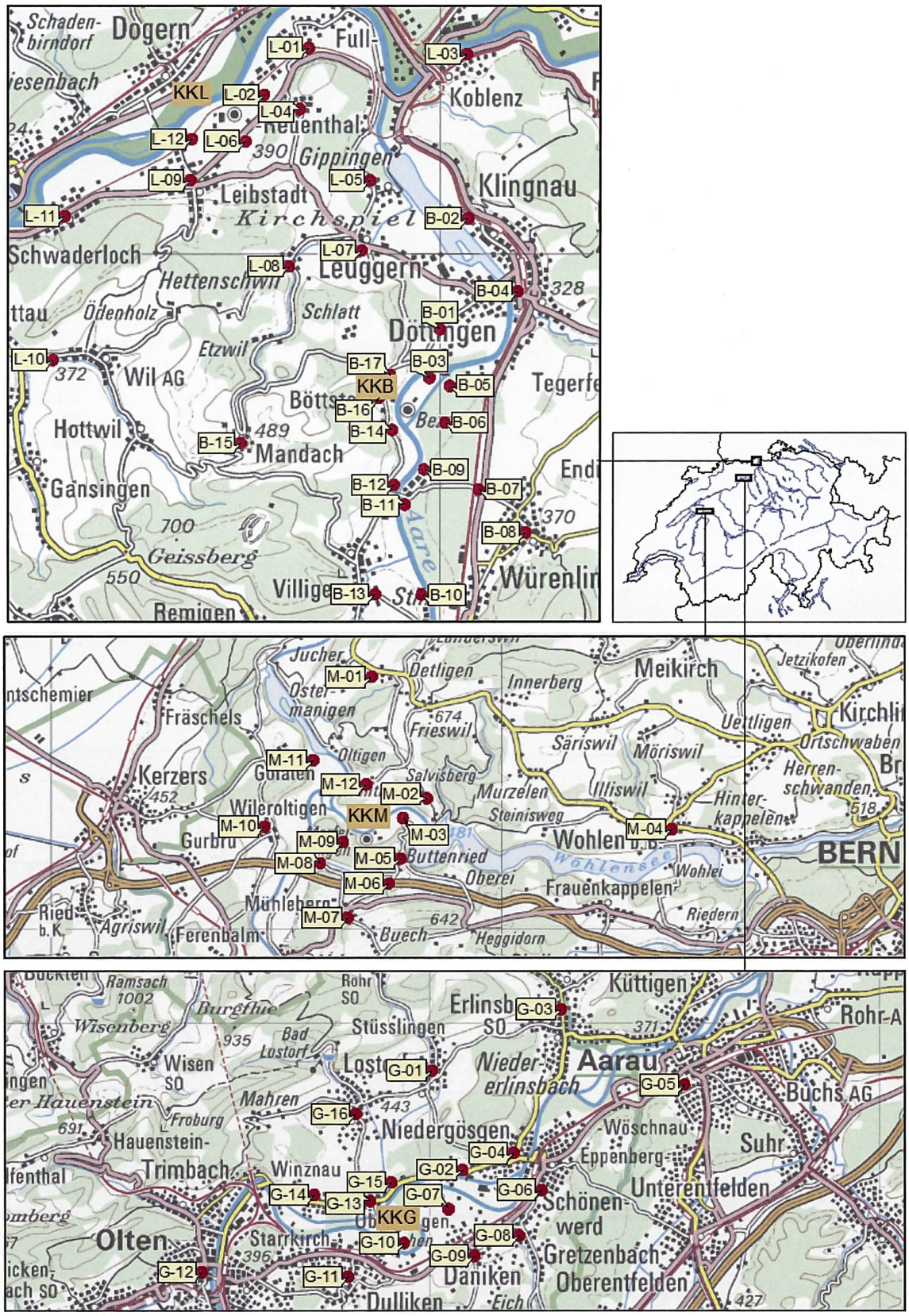
Die Messwerte im Jahr 2020 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren bis auf drei Ausnahmen auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Die erhöhte Ortsdosisleistung von 161 nSv/h vom 28. September 2020 um 08:00 Uhr bei der Station B-11 wurde durch eine erhöhte Edelgasabgabe aus der Anlage SINQ des Paul Scherrer Instituts über die zentrale Fortluftanlage verursacht. An derselben Station verursachte ein defektes Hochdosiszählrohr am 10. Oktober um 22:40 Uhr und am 14. Oktober um 03:10 Uhr erhöhte Ortsdosisleistungswerte. Der erhöhte Wert am 14. Oktober führte zu einer automatischen Alarmierung der Notfallorganisation des ENSI. Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuführen waren, wurden keine festgestellt.

Übersicht

Das **MADUK**-System (**M**essnetz zur **a**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von **An**lage**pa**rametern (**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 ab einem vordefinierten Schwellenwert im ENSI automatisch gemeldet werden. Bei einem Störfall unterstützt MADUK die Notfallorganisation bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 76 Messstationen zählen kann. Die 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. Zudem erfolgt ein permanenter 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 https://www.ensi.ch/de/messwerte-radioaktivitat/ 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

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

Im Jahr 2020 wurden rund 40 Messstationen auf den neuen Sondentyp (Figur 2) umgerüstet. Dieser ist mit Solarpanels und zusätzlichen Akkus ausgerüstet und damit unabhängig von einer externen Stromversorgung. An Standorten mit starker Beschattung stösst die Autarkie in den Wintermonaten mit viel Nebel oder Bewölkung an seine Grenzen. An diesen Standorten konnte die bisher genutzte, noch vorhandene Infrastruktur (Kabel, Spannungskonverter) für den Betrieb mit externer Stromversorgung genutzt werden.

Die Messdaten werden primär über das Mobilfunknetz an die Zentrale gesendet. Scheitert die Übertragung via Mobilfunk mehrfach, werden die Daten über das Iridium-Satellitensystem an die Zentrale übermittelt. Diese Funktionalität kann auch gesteuert von der Zentrale getestet werden. Die bisherigen Tests verliefen erfolgreich.

Der Umbau erfolgte mit sehr kurzen Betriebsunterbrüchen von meistens deutlich weniger als einer halben Stunde. Da die neue Messsonde auf denselben Sondenfuss montiert werden kann, musste nur die Sonde getauscht und der neue Datenpfad für diese Messstation in der Zentrale aktiviert werden. Die Aktivierung des neuen Datenpfads konnte grösstenteils automatisiert werden.

Der Umbau der restlichen Stationen auf den neuen Sondentyp ist für 2021 vorgesehen. Das entsprechende Material wurde vollständig Ende 2020 geliefert.

Systemverfügbarkeit und Störungen

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

Die permanente Übertragung der Anlageparameter erreichte insgesamt wiederum eine sehr hohe Verfügbarkeit. Konfigurationsänderungen im Zusammenhang mit dem Übergang in die Stilllegungsphase 1 bei KKM führten zu einem Unterbruch von 2.0 Stunden. Bei KKG wurden zwei Unterbrüche länger als eine Stunde registriert mit einer Gesamtdauer von 2.3 Stunden.

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

Die einzelnen Messstationen arbeiteten auch im Jahr 2020 grösstenteils zuverlässig. Bei der Station M-08 führte eine defekte Messsonde über den Jahreswechsel 2019/2020 zu einem Ausfall der Messungen während 203.5 Stunden. Der Ersatz der Sonde erfolgte erst am 9. Januar, da sich die Kontaktaufnahme mit dem Standortbesitzer schwierig gestaltete.

2020 waren wiederum diverse Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen zu verzeichnen. Die meisten Unterbrüche waren von kurzer Dauer (<4 Stunden). Deren Ursachen konnten nicht immer festgestellt werden. Ein grösserer Unterbruch betraf im Januar gleichzeitig 12 Messstationen aus verschiedenen Messringen während rund 30 Stunden. Ursache war der Ausfall eines Gateways und dessen Redundanz beim Kommunikationsprovider. Bis auf wenige in der Tabelle 1 aufgeführte Ausnahmen konnten die Messdaten nach Ausfall der Kommunikation nachträglich archiviert werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.9 % (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.91 %.

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

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
M-08	203.5	203.5	Defekte Messsonde
G-07	3.2	3.2	Blockierter Datenlogger
G-16	31.2	7.8	Ausfall Kommunikation
L-02	31.2	4.7	Ausfall Kommunikation
L-04	14.4	14.4	Blockierter Datenlogger
G-05	5.3	5.3	Blockierter Datenlogger
G-12	88.8	88.8	Defekte Messsonde
L-01	7.2	7.2	Blockierter Datenlogger
G-10	28.8	28.8	Blockierter Datenlogger
M-08	2.0	2.0	Blockierter Datenlogger
G-11	35.0	35.0	Defekte Messsonde
B-12	3.4	3.4	Ausfall 4G-Modem in Messsonde
L-04	1.0	1.0	Defekte Messsonde
G-12	22.7	22.7	Blockierter Prozess in Messsonde

Qualitätssicherung

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

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV), welche sich derzeit in Revision befindet, werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Aufgrund der Umrüstung der Messstationen auf einen neuen Sondentyp, der Ressourcensituation und der aktuellen Überarbeitung der StMmV wurde im 2020 auf die Durchführung der Funktionsprüfung vor Ort verzichtet. Durch die permanente Messung und die laufende automatische Prüfung der Messdaten kann trotzdem eine sehr hohe Datenqualität sichergestellt werden.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden üblicherweise Messungen mittels In-Situ-Gammaspektrometrie bei den Messstationen durchgeführt. Diese Messungen konnten 2020 wegen eines Defekts des Messgeräts sowie der damit verbundenen lang dauernden Reparatur nicht durchgeführt werden.

Messergebnisse

Im Jahr 2020 wurden insgesamt 13 Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h und eine Überschreitung des Ortsdosisleistungsschwellenwertes von 1'000 nSv/h registriert (Tabelle 2). Davon waren 10 aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen.

Die erhöhte Ortsdosisleistung vom 28. September 2020 um 08:00 Uhr bei der Station B-11 wurde durch eine erhöhte Edelgasabgabe aus der Anlage SINQ über die zentrale Fortluftanlage verursacht, welche das Paul Scherrer Institut für diesen Zeitpunkt meldete.

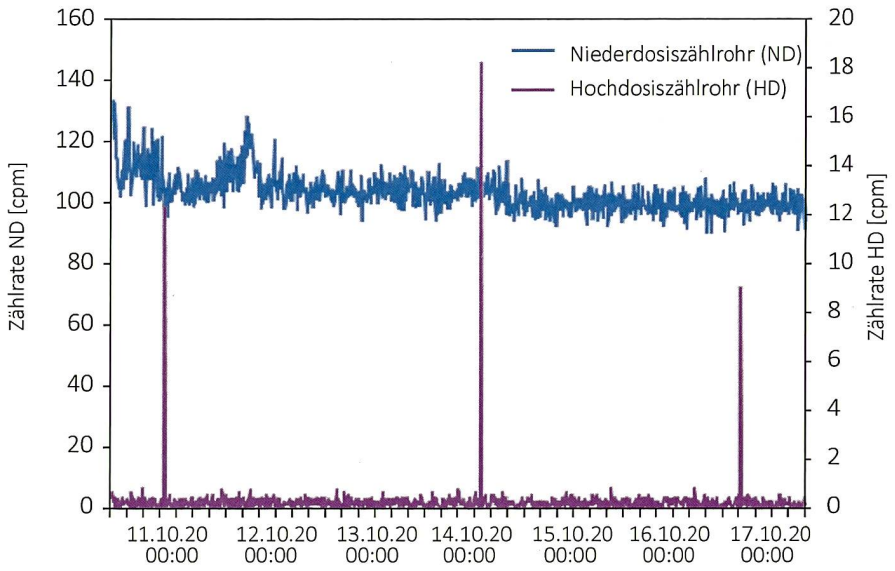
An derselben Station wurden am 10. Oktober um 22:40 Uhr und am 14. Oktober um 03:10 Uhr erneut Überschreitungen des Nettodosisleistungsschwellwerten von 50 nSv/h und am 14. Oktober um 03:10 Uhr auch eine Überschreitung des Ortsdosisleistungsschwellwertes von 1'000 nSv/h festgestellt. Die Überschreitung des Ortdosisleistungsschwellwertes führte auch zu einer unmittelbaren automatischen Alarmierung der Notfallorganisation des ENSI: Die detaillierten Abklärungen zeigten einen Defekt des Hochdosiszählrohres der Messsonde. Das Hochdosiszählrohr wies kurzzeitig eine erhöhte Zählrate auf, während das empfindlichere Niederdosiszählrohr über denselben Zeitraum praktisch konstante Werte lieferte (Figur 3). Die Messsonde an der Messstation B-11 wurde am 14. Oktober um 10:00 Uhr ersetzt. Die Messsonde zeigte auch später (z.B. am 16. Oktober 2020, siehe Figur 3) im Gebäude des ENSI dasselbe Muster in den Zählraten.

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

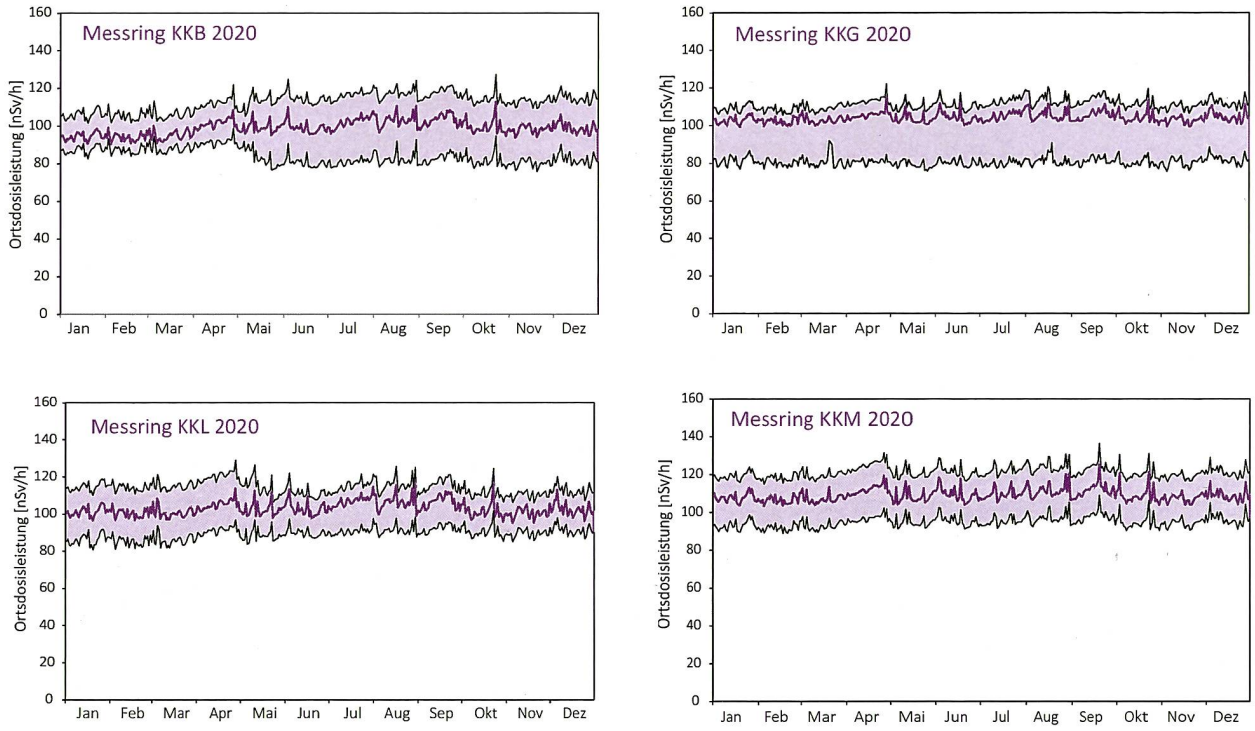
Die Figuren 4 und 5 zeigen die Maxima, die Minima und die Medianwerte der Tagesmittelwerte der jeweiligen Messringe im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke. Bei den Messringen KKB und KKL ist der Einfluss der Umrüstung auf den neuen Sondentyp ersichtlich. Die Unterschiede in der Bandbreite der Messwerte lässt sich durch die etwas unterschiedliche Charakteristik der neuen Messsonden erklären.

Tabelle 2:
Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2020.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
22.07.2020 20:10	M-04	0.5	61	193
02.08.2020 14:50	M-01	0.2	55	182
02.08.2020 14:50	M-04	0.5	56	174
03.08.2020 16:00	G-05	0.2	52	161
14.08.2020 13:40	G-10	0.2	60	189
16.08.2020 17:40	G-05	0.2	52	151
16.08.2020 18:30	G-06	0.2	57	212
20.09.2020 22:00	M-12	0.2	62	300
20.09.2020 22:20	M-08	0.5	63	315
28.09.2020 08:00	B-11	0.2	59	161
10.10.2020 22:40	B-11	0.2	159	251
14.10.2020 03:10	B-11	0.2	1'311	1'408
06.12.2020 13:20	L-02	0.2	50	151



Figur 3:
Verlauf der Zählraten des Niederdosiszählrohrs (ND) und des Hochdosiszählrohrs (HD) der Messsonde SN2218, welche bis zum 14.10.2020 um 10:00 Uhr bei der Station B-11 im Einsatz war und sich anschliessend im Gebäude des ENSI befand.



Figur 4:
Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2020.

8.4 Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

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

Zusammenfassung

Seit 1997 führt das PSI im Rahmen der Immissionsüberwachung Radionuklidmessungen an Waldbodenproben und Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (Zwilag Würenlingen) durch. Die Staubfangplatten sind mit Vaseline beschichtet und werden γ-spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie ^{241}Am und ^{137}Cs sowie natürliche Radionuklide wie ^{7}Be, ^{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, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am, ^{244}Cm und ^{131}I). Die Ergebnisse der γ-Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 10 - 40 Bq/kg für das Jahr 2020. 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 $^{239+240}$Pu sind ähnlich signifikant, zumal diese Radionuklide schon sehr viel früher (Beginn der 1960er Jahre) als Fallout der A-Bombentest in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf 1 - 2 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}$Pu von 0.4- 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.05 - 0.5 Bq/kg im Jahr 2020. Die konstanten Isotopenverhältnisse von ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu (ca. 0.03) und ^{241}Am/$^{239+240}$Pu (ca. 0.4) zeigen, dass die gemessenen Werte für die Actionide den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 20 - 40 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 300 und 440 Bq/kg gemessen.

Einleitung

Das Zwischenlager (Zwilag AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erbaut und anschliessend in Betrieb genommen. Um potentielle, geringfügige Radionuklid-Emissionen in der Umgebung des Areals aus Abgaben aus der Anlage feststellen zu können, wurden vor der Inbetriebnahme im Rahmen des Projektes Beweissicherung umfangreiche Radionuklid-Messungen an Bodenproben in der unmittelbaren Umgebung des Areals durchgeführt. (Details in [1]). Diese Analysen dienten der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B. ^{7}Be), terrestrischer (^{40}K sowie Radionuklide aus den U– und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am, ^{244}Cm und ^{131}I) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von oberirdischen Kernwaffentests der 60iger Jahre und der Chernobyl-Reaktorkatastrophe im Jahr 1986. Seit der Durchführung dieser Studie zur Beweissicherung werden im

Routinebetrieb einmal jährlich an 4 Erhebungsorten Waldbodenproben aus der oberen Schicht (0 - 5 cm) erhoben und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades wurden zusätzlich 4 Staubfangplatten entlang der Umzäunung des Zwilag angebracht.

Radiochemische Trennmethoden (Boden)

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

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

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

Staubfangplatten

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

Niederschlag

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

Figur 1 :
Niederschlagssammler in der Nähe der Zwilag (Bild: P. Kramer)

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, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am und ^{131}I) und natürlichen terrestrischen Isotope aus den U– und Th–Zerfallsreihen (^{226}Ra, ^{228}Ra) zusammengefasst. Dargestellt ist der Streubereich der Probenmessungen aus den

4 Bodenentnahmestellen um das Zwilag-Areal. Die Aktivitäten sind über die Zeit äusserst stabil und liegen auf sehr tiefem Niveau. Die Aktivitäten gewisser Nuklide liegen tiefer als die Nachweisgrenze des verwendeten Messverfahrens. Die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}$Pu liegen derzeit zwischen 0.05 und 0.5 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). Bei einzelnen Messungen lagen die Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu unter der Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg. Die Nachweisgrenzen für das Spaltprodukt ^{90}Sr sind etwas höher (< 1 - 3 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für ^{137}Cs (10 - 50 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der Beitrag von Fallout-Cäsium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall. Über die Isotopenverhältnisse von ^{241}Am/$^{239+240}$Pu (im Mittel 0.4) und ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu (0.03 ± 0.01) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Actinoide ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren stammt [1,2]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten Jahre. Ebenfalls eingetragen sind die Werte für ^{226}Ra (als Mass für natürlich vorkommendes, primordiales ^{238}U) und ^{228}Ra (als Mass für ^{232}Th). Diese Werte liegen konstant zwischen 10 - 30 Bq/kg und zeigen keinen Trend mit der Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingebaut sind und im säkularen Gleichgewicht mit ihren langlebigen Mutternukliden stehen. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für ^{238}U 2 - 3 ppm und für ^{232}Th 5 - 9 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

Weniger aufwändig ist die Auswertung der Staubfangplatten. Mit der monatlichen Kontrolle ist praktisch eine kontinuierliche Überwachung möglich. Seit Beginn der Probennahme lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unter den Nachweisgrenzen von 0.3 bzw. 0.4 Bq/m^2. Die tiefe Nachweisgrenze für ^{241}Am von 0.4 Bq/m^2 ergibt sich aufgrund der Verwendung eines hochauflösenden Gamma-Spektrometers mit Be-Eintrittsfenster.

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

Literaturliste

[1] Eikenberg, J., Bajo, S., Hitz, J., Beer, H., Gann, C., Wyer, L und Ziegler, J. (2002) Spezialnuklid-Analysen für die Beweissicherung ZWILAG AG 1997-2001: Abschlussbericht der Immissionsmessungen. PSI-Bericht Nr. 02-15.

[2] UNSCAER (2000), Sources and effects of ionising radiation. Report to the General Assembly, Volume 1, Annex C, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

Tabelle 1:
Anthropogene Fallout-Isotope in Bodenproben aus der Umgebung der Zwilag (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am, ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra, ^{228}Ra) im Verlauf der letzten fünf Jahre (2016-2020) . Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2016	2017	2018	2019	2020
^{90}Sr	< 1 - 2	< 1 - 2	<1 - 2.5	<1 - 3	<1 - 2
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs (1)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	10 - 50	10 - 50	10 - 50	5 - 40	10 - 40
^{238}Pu (2)	0.01- 0.03	0.01- 0.03	0.01- 0.03	< 0.005- 0.03	< 0.005- 0.03
$^{239+240}$Pu	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8	0.1- 0.8	0.05 - 0.5
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.05 - 0.3	0.02 - 0.3
^{226}Ra	20 - 30	20 - 30	10 - 24	15 - 30	20 - 30
^{228}Ra	20 - 30	20 - 40	13 - 25	17 - 30	20 - 40

(1) Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte seit 2015 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 nicht mehr nachgewiesen werden, da bereits über 30 Jahre (mehr als 10 Halbwertzeiten) vergangen sind.
(2) Einzelne ^{238}Pu-Resultate lagen unter der Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg.

8.5
Les installations nucléaires et l'environnement

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

Résumé

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

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

Introduction

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

La surveillance se poursuit par la mesure des immissions des centrales nucléaires (concentrations radioactives effectivement mesurées dans l'environnement). Tous les compartiments environnementaux sont examinés, de l'air jusqu'aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma in situ) complètent ces analyses en permettant d'évaluer directement la radioactivité déposée au sol. Ce programme de surveillance, coordonné par l'OFSP, englobe non seulement les propres mesures de l'Office mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut de radiophysique (mesures alpha et bêta), du laboratoire de Spiez (^{90}Sr dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aéroradiométrie etc.), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université de Berne (^{14}C et ^{85}Kr) et du LUBW (Baden-Württemberg), conformément au programme germano-suisse autour de la centrale nucléaire de Leibstadt. L'IFSN met également à disposition de l'OFSP un accès direct à son réseau MADUK, mesurant en continu le débit de dose ambiante au voisinage des centrales nucléaires. L'OFSP se doit ensuite de procéder à l'examen critique de l'ensemble de ces données pour

évaluer de manière pertinente l'impact des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce programme de surveillance des immissions au voisinage des installations nucléaires. Le tableau 1 indique les chapitres à consulter pour accéder aux résultats plus détaillés relatifs à un compartiment de l'environnement particulier ou un radionucléide spécifique.

Tableau 1
Tableau récapitulatif indiquant les chapitres du présent rapport à consulter pour accéder aux résultats détaillés de la surveillance du voisinage des installations nucléaires en fonction du compartiment environnemental (milieu) ou du radionucléide d'intérêt.

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

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

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

Méthodologie

Dans le 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 reçues par la population. La surveillance des installations nucléaires s'oriente sur ces deux aspects. Les méthodes de prélèvement et de traitement sont prescrites de manière à assurer une reproductibilité et à viser à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à très bas niveaux.

Résultats

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 2020 (voir Chap. 8.1). Comme attendu, les rejets de substances radioactives dans l'air par la centrale nucléaire de Mühleberg ont diminué de façon très importante en 2020, et sont presque nulles pour l'iode par exemple. Par contre, les rejets de substances radioactives dans les cours d'eau ont été supérieurs à ceux déclarés aux cours des années précédentes et ont égalés ceux déclarés par KKB par exemple ; les deux centrales ayant toutefois respectées la valeur cible de 1 GBq pour les rejets liquides.

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population (adulte) avoisinante en termes de doses entre 1981 et 2020. L'augmentation significative de 1986 au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est due à un rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère. A partir des mesures de terre et d'herbe effectuées par la suite par la commission fédérale de surveillance de la radioactivité de l'époque, l'activité rejetée en septembre 1986 avait pu être estimée à 11 GBq (50% de ^{134}Cs, 40% de ^{137}Cs, 7% de ^{60}Co et quelques 3% de ^{65}Zn) et donc inférieure à la limite annuelle de 19 GBq. Comme le montre la figure 1, l'impact de ce rejet très localisé a constamment diminué depuis. En tenant compte des rejets des années précédentes,

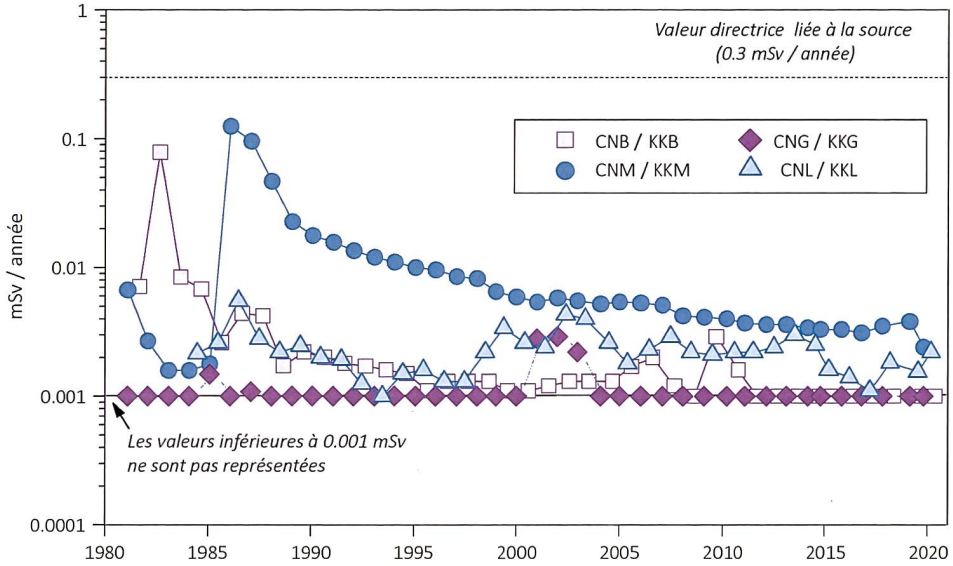


Figure 1:
Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2020 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnemment direct compris) est représentée à titre de comparaison.

les doses dues aux émissions des centrales nucléaires reçues par les personnes adultes les plus exposées se sont échelonnées en 2020 entre <0.001 mSv pour KKB et KKG, et env. 0.002 mSv pour KKM et KKL. Pour cette dernière, ces doses atteignent 0.005 mSv par an pour les petits enfants. Pour ces installations, la contribution majeure provient des rejets atmosphériques: essentiellement du ^{14}C pour Leibstadt avec, en plus, à Mühleberg la contribution rémanente des résines rejetées en 1986. Notons que les doses reçues par les personnes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires citées plus haut ont été calculées sur la base des rejets effectifs, en appliquant des modèles de dispersion et en tenant compte des temps de séjour, des habitudes alimentaires et de nombreux paramètres biologiques, physiologiques et environnementaux (voir directive G14 de l'IFSN pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

Mesures de l'exposition ambiante

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

Comme par le passé, les résultats de cette surveillance ont mis en évidence des valeurs plus élevées en certains points de la clôture du réacteur à eau bouillante de Leibstadt en raison du rayonnement direct et diffusé en provenance de la salle des machines. La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint 0.02 mSv par semaine en moyenne, après soustraction du bruit de fond naturel. Ce rayonnement résulte de la désintégration radioactive du ^{16}N, à courte demi-vie, qui est produit dans le réacteur et, dans le cas des réacteurs à eau bouillante, est transporté avec la vapeur dans la turbine du bâtiment des machines. En outre, les installations de stockage des déchets peuvent contribuer à une augmentation de la dose locale à la clôture. Avec l'arrêt de la production à Mühleberg, la contribution de l'^{16}N disparait, toutefois, les travaux de démantèlement, tels que ceux qui ont lieu à KKM, peuvent entrainer des augmentations temporaires de la dose locale à la clôture. Ceci a été constaté lors d'un contrôle périodique sur site effectué par l'IFSN en 2020 où une valeur instantanée de débit de dose de 0.32 µSv/h a été mesurée (voir chapitre 8.3). Toutefois, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale de Mühleberg

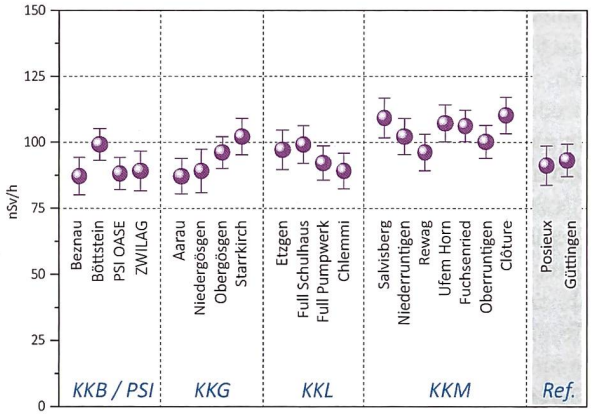


Figure 2:
Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectués en 2020 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).*

a montré une élévation moyenne (calculée sur la base de la valeur trimestrielle mesurée) de la dose ambiante de 0.007 mSv par semaine, après soustraction du bruit de fond naturel.

Toutes ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés. En effet, cet article stipule que la dose ambiante ne doit pas dépasser 0.02 mSv par semaine aux endroits situés à l'extérieur de ces secteurs où peuvent séjourner durablement des membres du public. Cette valeur peut être dépassée jusqu'à 5 fois (0.1 mSv/semaine) dans les endroits où personne ne séjourne durablement, comme c'est le cas à la clôture des centrales nucléaires. Il convient de relever qu'il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne, puisque le temps de séjour n'est pas considéré. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside durant de longues périodes en ces endroits.

Une dosimétrie d'ambiance du rayonnement des neutrons et des gammas est en outre réalisée par l'IRA sur mandat de l'OFSP depuis 2004 autour du PSI-West (11 dosimètres à thermoluminescence-TLD) sur une base trimestrielle. Trois points de mesures supplémentaires ont été installés en 2019 autour de SwissFEL au PSI. Il s'agit de contrôler des endroits accessibles au public sur le toit du bâtiment, au-dessus des beam dumps de l'injecteur, d'Athos et d'Aramis. A noter que les équivalents de dose ambiants attendus dans l'environnement, dus à l'irradiation naturelle, sont de l'ordre de 0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons et d'environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas.

Les doses des neutrons relevées au cours des 2 premiers trimestres 2020 autour du PSI-West étaient presque partout inférieures à la limite de détection ou très faibles. Ceci était attendu puisque les installations étaient à l'arrêt, au moins sur une grande partie de la période. En seconde partie d'année, les doses des neutrons sont parfois plus élevées (valeur maximale de 0.138 mSv/trimestre au 4ème trimestre), mais similaires à celles enregistrées au cours des mêmes périodes des années précédentes. Pour les 3 points autour de SwissFEL, les doses des neutrons sont restées inférieures à la limite de détection ou très faibles pendant toute l'année. Les doses des photons sont restées au niveau de la radiation naturelle dans tous les emplacements du PSI-West en 2020. Autour de SwissFEL, les valeurs sont parfois jusqu'à 1.5 fois plus élevées qu'au PSI West mais restent au niveau de l'irradiation naturelle.

Mesures dans le milieu atmosphérique

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

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

Notons que l'OFSP a décidé de déménager la station URAnet aero de Fribourg vers la localité de Ufem Horn, située au voisinage immédiat de la centrale nucléaire de Mühleberg après sa mise à l'arrêt fin 2019. En effet, les rejets de radioactivité dans l'air qui pourraient éventuellement survenir durant les futurs travaux de démantèlement seraient nettement plus faibles et localisés qu'en phase d'exploitation. Ce changement dans la nature du risque a donc motivé le déménagement de la station, qui a eu lieu en février 2020, soit quelques mois avant le début des travaux effectifs de démantèlement.

Aucun radionucléide d'origine artificielle résultant de l'exploitation des centrales nucléaires n'a pu être mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2020 (voir aussi chapitre 4.2). Par contre, la station de mesure URAnet aero du PSI a mesuré des traces de ^{24}Na dans les aérosls de l'air le 28.09.2020. Ce radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15 h) est produit par exemple dans les accélérateurs des centres de recherche. L'évaluation du spectre a montré un signal faible mais significatif provenant de ce radionucléide (voir fig. 1 a,b,c - chap. 4.2) avec une concentration d'activité d'env. 1 mBq/m^3 moyennée sur toute la période de collecte, à savoir 12 h. Bien qu'inhabituelles, les activités rejetées sont restées nettement inférieures aux limites de rejet autorisées, aussi bien annuelle qu'à court terme. Cette légère augmentation de la radioactivité dans l'air, de courte durée (env. 10 minutes) et localement limitée, n'a pas eu de conséquences pour la santé. La détection d'une si faible concentration de radioactivité dans l'air par la sonde URAnet montre toutefois l'efficacité du système et son bon état de fonctionnement. Pour plus de détails, le lecteur pourra également consulter le site https://www.radenviro.ch/fr/detection-de-traces-de-sodium-24-dans-lair-par-un-detecteur-uranet-aero/.

Les activités du ^{137}Cs enregistrées par URAnet en 2020, sont quant à elles restées inférieures à la limite de détection d'env. 4-6 mBq/m³ (pour une mesure de 12h). Le ^{137}Cs provenant de la remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que l'accident de Tchernobyl) a par contre été régulièrement décelé dans les filtres aérosols des collecteurs à grand débit (HVS), puisque la limite de détection de ce dispositif très sensible dédié à la mesure de traces, est de l'ordre de 0.2 µBq/m³ pour ce radionucléide pour un temps de collecte de 7 jours et une mesure en laboratoire de 48h. Dans les filtres HVS de la station de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer, les concentrations de ^{137}Cs ne sont pas distinguées de celles enregistrées sur le site de référence de Güttingen. La valeur maximale de 1 µBq/m³ a été enregistrée en avril 2020, tout comme à Güttingen, et pourrait contenir une contribution due au ^{137}Cs émis par les incendies de forêts qui ont fait rage en Ukraine pendant plusieurs jours à cette période (voir chapitre 4.1).

Des traces de ^{24}Na ont également été sporadiquement mesurées dans les filtres HVS de la station de Klingnau. La concentration maximale mesurée s'élève à 111 ± 43 µBq/m³ et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immission dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/m³.

Les activités des émetteurs gamma d'origine artificielle dans les échantillons de pluie collectés aux environs des centrales nucléaires de Mühleberg, Leibstadt, Gösgen et Beznau ainsi que ceux du voisinage du PSI et du ZWILAG sont toutes restées inférieures aux limites de détection, qui se situent généralement entre 0.2 et 1.0 mBq/l par exemple pour le ^{137}Cs.

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

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2020.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)
Niederruntingen * (environs KKM)	< 2.0 - 2.3	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 .0	-
Full (environs KKL) *	< 2.0 - 2.3	-
Beznau (environs KKB) **	< 1.7 - 25.4	9.7
PSI **	< 1.7 - 24.8	-
ZWILAG **	< 1.7 - 5.8	2.8

* mesures OFSP / ** mesures PSI

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C. Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2020 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 99 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Les doses supplémentaires qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales sont ainsi très faibles, de l'ordre de 1 micro-Sv par an.

Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout déterminé par des mesures dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats enregistrés en 2020 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 2020. 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 diffèrent pas de ceux enregistrés ailleurs sur le plateau suisse.

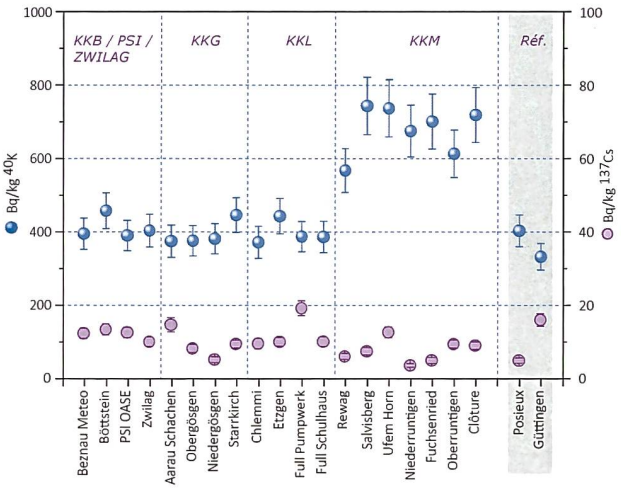


Figure 3:
^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2020 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

Avant l'arrêt définitif de l'exploitation de la centrale nucléaire de Mühleberg le 20 décembre 2019, l'IFSN, en concertation avec l'OFSP, a renforcé le programme existant de surveillance de la radioactivité dans l'environnement à proximité de KKM pour la période 2017-2019, en particulier dans le milieu terrestre; ce programme complémentaire avait pour objectif de permettre l'évaluation de l'impact radiologique éventuel des travaux de désaffectation de la centrale nucléaire de Mühleberg sur l'environnement et la population avoisinante.

Une description détaillée du programme complémentaire, y compris une évaluation des résultats de mesure, se trouve dans le rapport intitulé «Programme complémentaire: «Point zéro démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM) 2017-2019», publié en avril 2021.

En résumé, les résultats des mesures n'ont mis en évidence aucune indication d'immissions récentes d'actinides ou de produits de fission pouvant être attribuées au fonctionnement de la centrale nucléaire de Mühleberg. En effet, les évaluations des rapports isotopiques et la comparaison avec les valeurs de référence usuellement enregistrées sur le plateau suisse permettent de conclure que les radionucléides détectés dans l'environnement proviennent (hormis le tritium) d'anciennes contaminations. Ainsi les actinides et le ^{90}Sr peuvent être attribués aux retombées des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère du milieu du siècle dernier, tandis que les petites quantités de ^{137}Cs encore présentes proviennent également des retombées de l'accident de Tchernobyl en 1986 ainsi que du rejet non contrôlé de poussières radioactives dans l'atmosphère par la CNM qui a également eu lieu en 1986. Les concentrations des radionucléides spéciaux tels que le ^{55}Fe et le ^{63}Ni dans les sols et les sédiments sont restées inférieures aux limites de détection. L'origine des traces de ^{3}H mesurées sporadiquement dans les échantillons de lait n'a pu être déterminée de manière certaine, mais les résultats de mesure montrent qu'il provient très probablement d'autres sources que du fonctionnement de la CNM.

En plus du programme de surveillance de l'environnement de routine de l'OFSP, les résultats du programme complémentaire de surveillance de l'environnement donnent un très bon aperçu de l'état radiologique de l'environnement au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg avant le début des travaux de démantèlement. Ils peuvent ainsi être utilisés comme valeurs de référence en cas de suspicion de rejets de substances radioactives dans l'environnement, pendant les travaux, pour évaluer si ces rejets sont conformes aux limites réglementaires.

Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1 il y a une dizaine d'années, la majeure partie des produits d'activation tels que le ^{54}Mn, le ^{58}Co et le ^{60}Co était rejetée dans les eaux fluviales par la centrale de Mühleberg. Mais depuis 2016 les activités rejetées (hors tritium) par cette dernière ont à leur tour significativement baissé à tel point qu'elles étaient depuis 2018 inférieures à celles rejetées par les centrales de Beznau et de Leibstadt. Comme corolaire à cette diminution des rejets, aucune trace de ^{54}Mn ou des isotopes du cobalt n'ont plus été

mesurées dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln depuis 2016. En 2020, les rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de Mühleberg ont été supérieurs à ceux des années précédentes (avec le ^{60}Co et le ^{54}Mn comme isotopes dominants), mais les activités sont restées inférieures à la valeur cible de 1 GBq/an et n'ont pas conduit à une augmentation mesurable des concentrations de ^{54}Mn ou de ^{60}Co dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar.

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.

En revanche, l'augmentation de la concentration journalière de ^{3}H dans l'eau de l'Aar en aval de la centrale de Mühleberg mesurée par l'Université de Berne en juin 2020 (jusqu'à 5 Bq/l) est directement lié à un rejet autorisé de tritium par la centrale (voir chapitre 4.6). L'université de Berne avait initié un programme de mesure du tritium d'une très grande sensibilité en amont et en aval de la centrale nucléaire de Mühleberg en 2017, pour une durée initiale de 3 ans, qui a été prolongée de 3 années supplémentaires. A noter qu'un tel rejet n'a pas entrainé d'augmentation de la concentration mensuelle moyenne du tritium de l'eau de l'Aar, qui est restée inférieure à 2 Bq/l pendant cette période. Les mesures de surveillance usuelles ne peuvent donc pas mettre en évidence des variations de courte durée d'une si faible ampleur.

De manière générale, les concentrations mensuelles en ^{3}H enregistrées en 2020 dans les eaux de l'Aar et du Rhin sont restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l à l'exception de la période avril-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation des concentrations de tritium dans l'Aar à Brugg et à Klingnau, ainsi que, dans une moindre mesure, dans le Rhin (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants de tritium par la centrale nucléaire de Gösgen avant la révision (voir chapitre 8.1).

Une légère augmentation des concentrations de ^{3}H semble également avoir été mesurée en janvier dans l'Aar à Klingnau et dans le Rhin à Pratteln, toutefois la méthode de mesure mise en œuvre pour l'analyse du tritium dans ces deux stations est moins sensible (limite de détection de 5 Bq/l) et les valeurs enregistrées étaient légèrement supérieures (6 à 8 Bq/l) à cette limite de détection, avec une grande incertitude. Les valeurs mesurées dans le Rhin à Weil am Rhein sont restées voisines des 2 Bq/l. Les émissions de tritium dans l'Aar par le PSI et la centrale nucléaire de Beznau ont par ailleurs été conformes à la normale pendant cette période (voir chapitre 8.1).

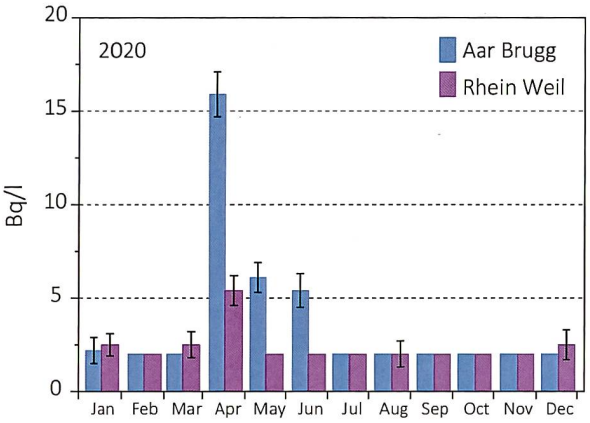


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2020.

Contrairement à ce qui a été constaté dans les échantillons d'eau, l'augmentation des activités rejetées dans le milieu aquatique par la centrale nucléaire de Mühleberg en 2020 s'est traduit immédiatement par l'apparition de traces sporadiques de ^{54}Mn et de ^{60}Co dans les échantillons de sédiments prélevés à Hagneck, mais également à Klingnau et Pratteln en ce qui concerne le ^{54}Mn. Les activités de ^{54}Mn rejetées dans l'Aar en 2020 proviennent à près de 90% de KKM. Le ^{60}Co, systématiquement décelé par le passé dans les échantillons de sédiments, n'avait pas pu être mesuré en 2019 en raison de la diminution des rejets par KKM.

Le ^{54}Mn et le ^{60}Co sont des produits d'activation qui ne sont pas (ou peu) dissous dans l'eau, mais présents sous forme particulaire (corrosion) dans les effluents liquides. C'est la raison pour laquelle, les traces des rejets liquides sont essentiellement mesurables dans les sédiments. Les activités mesurées sont par ailleurs très faibles et ne présentent pas de risque pour la santé; elles témoignent de l'efficacité des programmes de surveillance mis en œuvre.

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

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar à Aarberg et près de Wöschnau, dans le lac du barrage de Klingnau ainsi que dans le Rhin, près de Augst, en 2020 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle.

Comme chaque année, un échantillon de plantes aquatiques a été prélevé en 2020 dans chacune des stations de surveillance. Le ^{137}Cs était mesurable dans deux échantillons (Wöschnau: 1.8 Bq/kg, Muttenz: 4.2 Bq/kg). L'échantillon prélevé dans le lac du barrage de Klingnau contenait du ^{131}I (18.3 Bq/kg) très probablement utilisé en médecine (l'^{131}I produit dans les centrales nucléaires

est accompagnés d'autres radionucléides, tels que le ^{134}Cs et le ^{137}Cs). L'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Döttingen et Pratteln n'a mis en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle.

Situation radiologique du site démantelé de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens

(site soustrait à la législation sur les installations nucléaires)

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

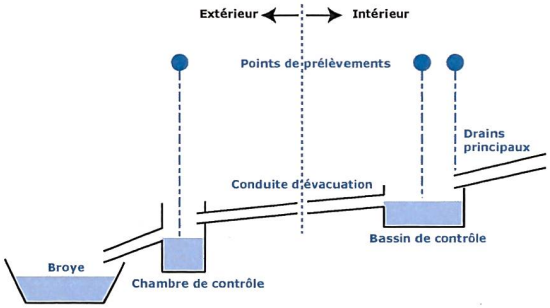


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

En 2020, 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 4h aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyé à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2020. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co, ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 0.5 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^{3}H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2020 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 5.3 ± 0.7 Bq/l et 4.9 ± 0.9 Bq/l respectivement. Mis à part le phénomène de résurgence locale décelé fin 2011 et début 2012, où des valeurs atteignant 230 Bq/l avaient été mesurées et qui avaient nécessité la mise en place d'un programme spécifique, les valeurs enregistrées sont en constante diminution depuis le début de la surveillance en 2001, ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive du tritium (demi-vie du tritium = 12.32 ans).

Pour la mesure du ^{90}Sr, deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Aucune activité supérieure à la limite de détection de 7 mBq/l n'a été mise en évidence en 2020.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2020.

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, ou du ^{14}C, issu des rejets atmosphériques, dans les feuillages ou encore du ^{3}H et des produits d'activation (^{60}Co, ^{54}Mn) issus des effluents liquides dans l'eau de l'Aar et du Rhin ou dans les sédiments témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations pendant l'année sous revue.

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

8.6
CERN - Rejets et environnement
(Mesures CERN)

F. Malacrida et P. Vojtyla
CERN - Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE), Genève

Résumé

Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que, pour 2020, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose effective maximale délivrée aux membres du public Suisse est demeurée inférieure à 0.00002 mSv. Le contrôle des immissions n'a révélé que de faibles traces de radioéléments dans des échantillons prélevés dans les cours d'eau. Aussi, suite au déploiement d'une méthode très sensible de surveillance des immissions du tritium dans l'air du site de Meyrin, des concentrations négligeables de ce radioélément ont été mesurées dans le courant de l'année. Le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN demeure donc très faible.

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

Le CERN

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

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

Aspects environnementaux

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

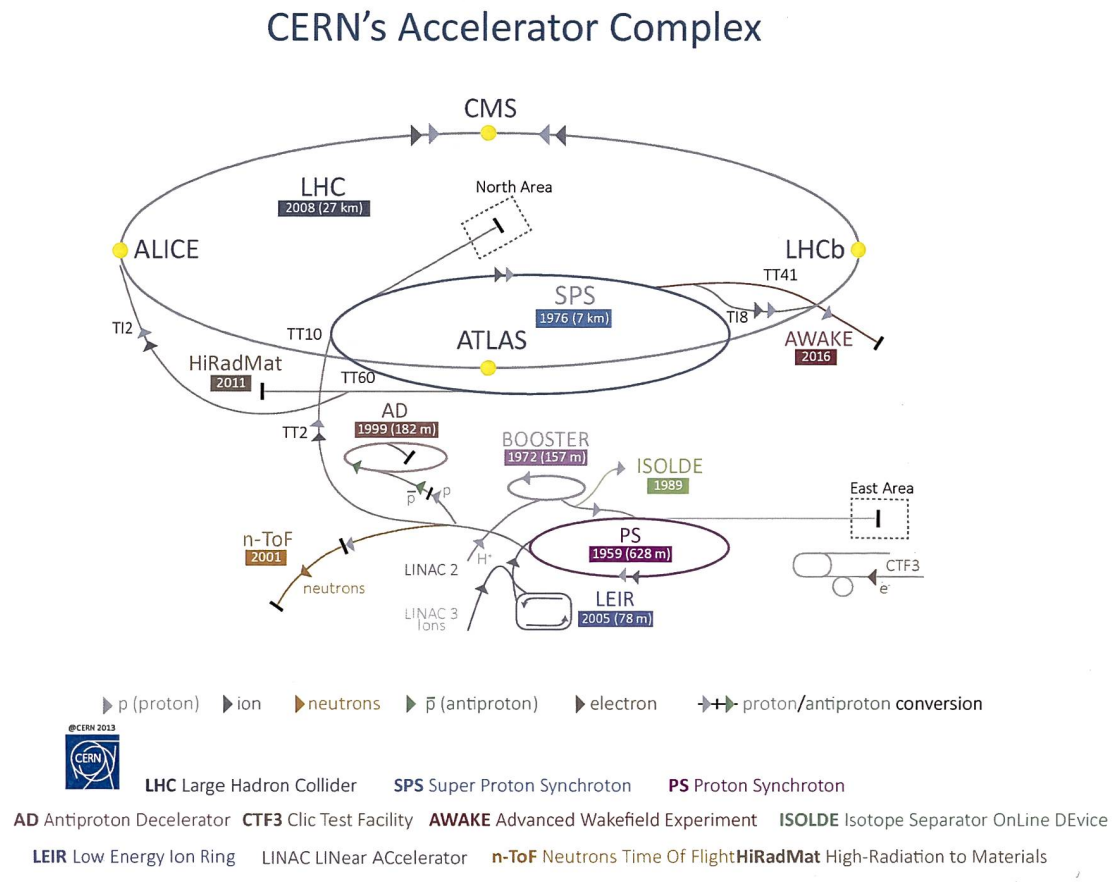


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN.

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

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

Programme de surveillance

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnemental, qui est élaboré en tenant compte des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance du rayonnement diffusé se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou prédits par des calculs. Chaque station est équipée d'une chambre d'ionisation argon dédiée à la mesure en continu des photons et des particules chargées et pénétrantes, comme les muons, ainsi que d'un moniteur de neutrons. En 2020, 40 stations de ce type étaient en opération. Les points d'extraction d'air, d'où des

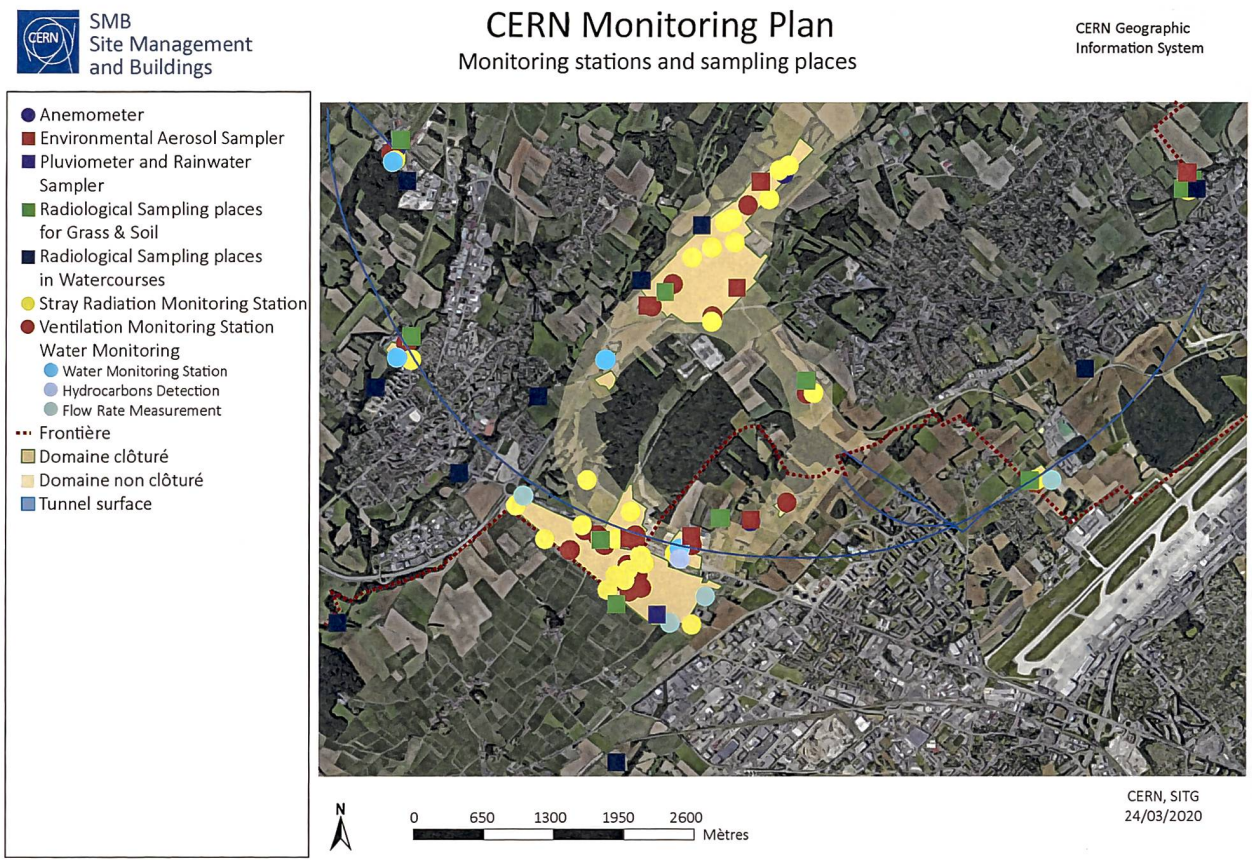


Figure 2:
Région frontalière franco-suisse: sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS) et d'une partie du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonnage du CERN qui concernent le territoire Suisse et en partie le territoire Français.

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 2020, 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 2020); les eaux claires incluent les eaux de refroidissement des circuits secondaires, les eaux d'infiltration des tunnels et les eaux de pluie. Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vies courtes et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire. Deux stations contrôlent indépendamment les eaux de refroidissement et d'infiltration du SPS et du LHC.

Les niveaux de rayonnement diffusé mesurés ainsi que le bilan des rejets vers l'atmosphère et les cours d'eau sont utilisés pour quantifier l'impact dosimétrique, par le biais de modèles environnementaux et radiologiques reconnus [3,4]. La surveillance des émissions est complétée par la surveillance des immissions, qui est un processus impliquant la collecte d'échantillons environnementaux et leur analyse en laboratoire. Les résultats doivent corréler avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont adéquats. Cette surveillance implique également un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (13 stations, dont deux collectent aussi l'humidité pour la mesure du tritium dans l'air), des échantillons d'herbe (12 points d'échantillonnage), d'eau, de bryophytes (mousses) et de sédiments dans les cours d'eau (14 points), de l'eau des nappes phréatiques et de consommation (18 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 2020

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2020

Le deuxième long arrêt du CERN, le Long Shutdown 2 ou simplement LS2, a débuté en décembre 2018 et la remise en service du complexe des accélérateurs s'effectuera progressivement en 2021. Seul le LINAC 4 a fait l'objet d'essais tandis que le groupe de radioprotection a recommencé l'évaporation d'eau tritiée (site de Meyrin).

Comme pour le précédent long arrêt LS1 de 2013–2014, l'impact des activités du CERN durant le LS2 demeure négligeable.

Rayonnement diffusé

Des activités de vérifications radiographiques de soudures ont été détectées à la barrière du site de Meyrin, aux abords d'une zone de passage de véhicules et de piétons côté France, pour un total intégré à l'année inférieur à 1 µSv en termes d'équivalent de dose ambiant.

Tableau 1:
Rejets radioactifs dans l'air en 2020. Le site de Meyrin est attenant à certains sites du SPS et du LHC et ceux-ci sont donc groupés. Les sites combinés sont identifiés par un symbole «&».

Site ou groupe de sites proches (Pays)	Tritium GBq
Sites de Meyrin, SPS 6 & LHC 1, SPS 7 & LHC SM18	31.0
SPS BA5	1.4

Tableau 2:
Rejets dans les cours d'eau en 2020.

Origine principale du rejet, Cours d'eau récepteur	Tritium GBq
Site de Meyrin, Nant d'Avril (CH)	0.5
Site de Prévessin, Lion (F)	5.5
LHC PA7, Affluent du Marquet (F)	0.02
LHC PA8, Nant (F)	1.5

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère et dans les cours d'eau

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère et dans les cours d'eau, qui concernent le territoire Suisse, sont résumés au Tableau 1 et 2 respectivement. Les rejets dans certains cours d'eaux localisés sur le territoire français sont mentionnés dans ce présent rapport car ils terminent leurs cours dans le lac Léman (Marquet, Nant) ou rejoignent le Rhône (Lion).

Surveillance des immissions

En 2020, le CERN s'est doté de systèmes de prélèvement passifs de l'humidité de l'air, déployés sur le site de Meyrin, en vue de contrôler les immissions de tritium. Les rejets atmosphériques des installations locales ont dérivé en des concentrations mensuelles moyennes de 0.04 Bq/m³, à comparer avec la limite d'immission dans l'air suisse de 2'200 Bq/m³ [2].

Concernant l'environnement aquatique, des traces de radionucléides ont été mesurées dans certains échantillons des cours d'eau récepteurs (Tableau 3). La détection de très faibles traces de tritium dans le Nant de Rebatière (F, mentionné car affluent de la Versoix, CH), juste supérieures aux fluctuations naturelles, peut apparaitre comme en contradiction avec le fait qu'aucun rejet de tritium dans ce cours d'eau n'est déclaré dans le Tableau 2. Ceci ne constitue pas une anomalie car le prélèvement effectué dans la rivière est ponctuel tandis que les rejets sont évalués sur la base d'un prélèvement continu, analysé mensuellement.

Comme pour les années précédentes, des traces de ^{54}Mn ont été mesurées dans des échantillons de bryophytes et de sédiments prélevés dans le Lion (F). 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 radioélément d'origine artificielle n'a été détecté dans aucun autre échantillon

Tableau 3 :
Concentrations dans les échantillons prélevés dans les cours d'eau en 2020.

Cours d'eau (Date d'échantilonnage)		^{3}H Bq/l		^{54}Mn Bq/kg		^{54}Mn Bq/kg
Lion (09.09.2020)	Eau	< LD	Bryophites	6.5 ± 4.5	Sédiments	0.2 ± 0.1
Nant (04.09.2020)		7.2 ± 1.1		< LD		< LD
Nant de Rebatière (04.09.2020)		2.1 ± 1.0		< LD		< LD
Nant d'Avril (04.09.2020)		3.2 ± 2.0		< LD		< LD

collecté dans le cadre de la surveillance des immissions. 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 a été calculée à partir des équivalents de dose ambiants mesurés aux barrières du site et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion basé sur les directives [3, 4]. Les membres du public Suisse ont reçu une dose efficace de maximum 0.00002 mSv. Cette dose est estimée sur la base d'un scenario très conservateur d'exposition aux rejets dans le Nant (F), qui rejoint le territoire Suisse.

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 2020 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] ;
- Les installations du CERN étaient en période de long arrêt ; la dose efficace reçue par les membres du public Suisse est restée négligeable (0.00002 mSv).
- Des radionucléides ont été détectés dans des échantillons prélevés dans certains cours d'eau récepteurs. Les valeurs de concentration sont restées bien inférieures aux limites d'immission applicables [2]. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN demeure faible.

Références

[1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).

[2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2017), Annexe 3.

[3] Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), *Calcul de l'exposition aux radiations ionisantes dans l'environnement due à l'émission de substances radioactives par les installations nucléaires*, IFSN-G14/f rév.1 (2009).

[4] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).

Glossaire

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

8.7 Environnement du CERN *(mesures OFSP)*

S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, D. Lienhard, M. Müller, P. Steinmann
Section Radioactivité de l'environnement, URA / OFSP, Berne
J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus
Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau,
Université de Genève, Genève

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE) du CERN, l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnements au voisinage du centre de recherche. L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2020 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Le LHC, mais aussi la majorité des grandes installations du CERN étant à l'arrêt en 2020, aucune trace de radionucléides habituellement produits dans les installations du centre de recherche, n'ont pu être détectées au cours de l'année sous revue, mis à part des traces de ^{22}Na.

Programme de surveillance de l'OFSP

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

- Dosimétrie d'ambiance du rayonnement gamma ainsi que des neutrons sur une base trimestrielle (13 dosimètres à thermoluminescence-TLD- évalués par l'IRA) et mesures instantanées de l'équivalent de dose ambiant effectuées par l'OFSP sur 8 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants.
- Aérosols: mesure continue par spectrométrie gamma des aérosols déposés sur un filtre déroulant par le moniteur URAnet et spectrométrie gamma hebdomadaire des filtres d'un collecteur à haut débit.
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel, mesure du tritium par l'OFSP).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) et végétaux ainsi que certains produits locaux (comme le ^{3}H dans le vin).

A noter que la quasi totalité des installations du CERN étaient à l'arrêt pendant l'année 2020; le deuxième long arrêt du CERN, le Long Shutdown 2 (LS2), qui a débuté en décembre 2018, c'est en effet poursuivi en 2020 et la remise en service du complexe des accélérateurs s'effectuera progressivement en 2021. Seul le LINAC 4 a été (partiellement) en service.

Mesures de l'exposition ambiante

Douze sites ont été surveillés en 2020 par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP. Cinq d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français) et 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. En raison de la pandémie de COVID, les TLD n'ont pas été changés à la fin du 1er trimestre 2020 et la première période de mesure couvre les mois de janvier à juin (inclus).

Les équivalents de dose ambiants des neutrons et des photons relevés dans les emplacements autour du CERN en 2020 étaient faibles, de l'ordre de l'irradiation naturelle (0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons et environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas). Les doses des neutrons étaient généralement inférieures à la limite de détection, avec quelques valeurs mesurables qui sont toutefois restées faibles.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2020 sur 8 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants n'ont par ailleurs montré aucune influence du centre de recherche sur l'exposition ambiante due au rayonnement gamma. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant (H*(10)) pour les gammas se sont échelonnées entre 88 et 120 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 106 ± 3 nSv/h; moyenne des sites distants 105 ± 10 nSv/h).

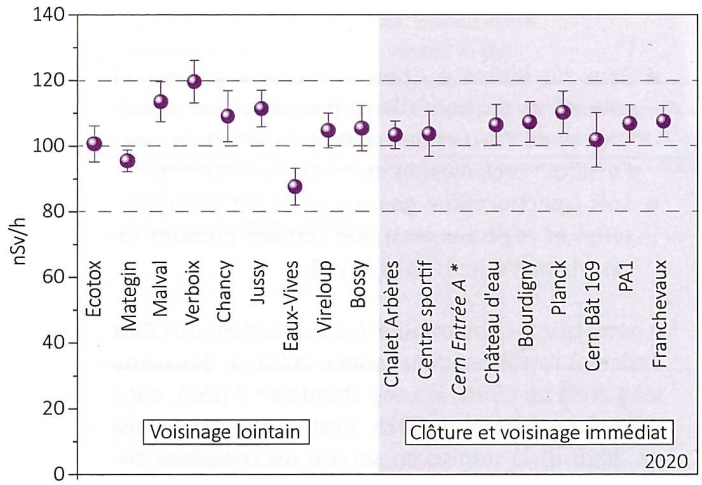


Figure 1:
Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectuées par l'OFSP en 2020 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1m au-dessus du sol (* pas de mesure en 2020)*

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau automatique de surveillance de la radioactivité dans l'air, URAnet, située au CERN a fonctionné sans interruption en 2020. Les nouveaux moniteurs spectrométriques permettent de mesurer en continu les concentrations individuelles des différents émetteurs gamma présents dans l'air (aérosols) (voir chapitre 4.2). Si les concentrations du ^{214}Pb et du ^{214}Bi, descendants du radon, sont clairement mesurables, les concentrations des émetteurs gamma d'origine artificielle sont toutes restées inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 4 à 6 mBq/m^3 pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2020. Le moniteur d'iode gazeux également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l'^{131}I gazeux n'a révélé aucune valeur supérieure à la limite de détection de 50 - 60 mBq/m^3.

Tableau 1 :
Concentrations du ^{7}Be mesurées en 2020 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.
**Entre la mi-mars et la fin juin, les filtres HVS de la station du CERN ont été changés toutes les deux semaines, le nombre total d'échantillons mesurés en 2020 est donc de 45, contre 50-53 aux autres stations.*

Station de collection à haut débit	Valeur min/max (mBq/m^3)	Moyenne (mBq/m^3)
CERN (Meyrin/GE)*	1.2 - 7.5	4.2 ± 1.5
Posieux/FR	2.0 - 8.0	4.7 ± 1.7
Klingnau/AG*	1.2 - 7.7	4.0 ± 1.7
Güttingen/TG	0.9 - 9.0	4.3 ± 1.7
Cadenazzo/TI	0.8 - 8.5	5.0 ± 1.8

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 ^{7}Be et ^{210}Pb (fig. 2). Le cas du ^{7}Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production dans les tunnels du CERN). Cependant, les installations du CERN étant (presque) toutes à l'arrêt, il n'y a pas eu de ^{7}Be émis par le CERN dans l'atmosphère en 2020. Le tableau 1 ne montre en effet pas de différence notable entre les concentrations de ^{7}Be mesurées en 2020 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 0.2 et 1.0 µBq/m^3).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs (valeur maximale de 0.6 ± 0.2 µBq/m^3) provenant de la remise en

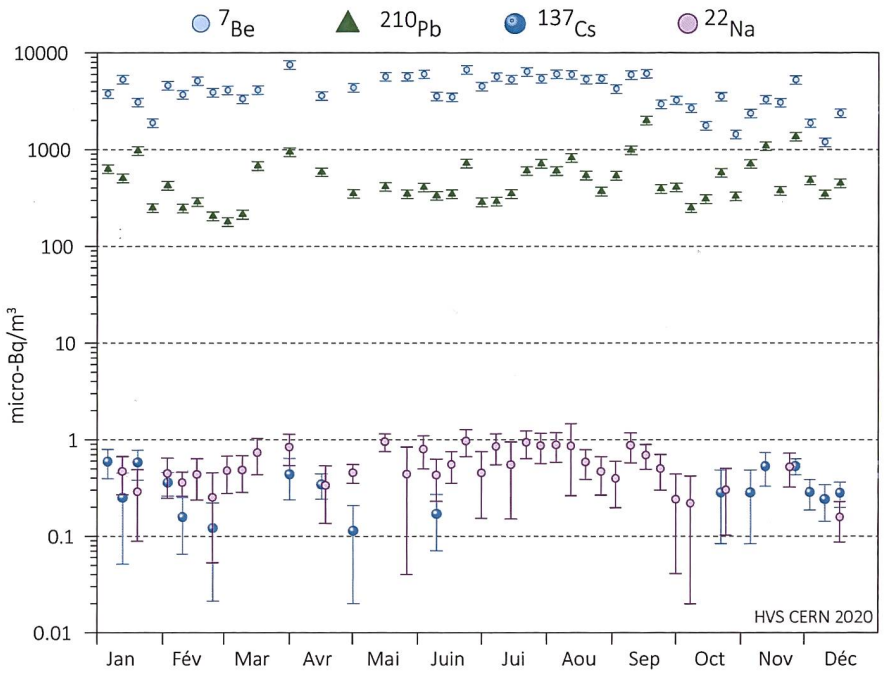


Figure 2 :
Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2020. En raison du semi-confinement, les filtres ont été changés toutes les 2 semaines, entre la mi-mars et la fin juin 2020.

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.

Tout comme en 2019, mais contrairement aux années précédentes, aucune trace de ^{131}I ou de ^{24}Na n'a été mise en évidence dans les filtres aérosols en 2020. Ces radio-isotopes de courte demi-vie sont produits dans les installations du CERN et sont sporadiquement mesurables dans l'environnement quand celles-ci sont en fonction.

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma in situ permettent de distinguer les contributions d'origine naturelle et artificielle à l'exposition externe du public. La figure 3 montre que les valeurs mesurées au voisinage du centre de recherche ne se distinguent pas de celles relevées dans des sites hors de son influence, tel que Posieux/FR. Par contre au point situé à l'intérieur de la clôture (BAT588) des traces de ^{22}Na ont été détectées (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.

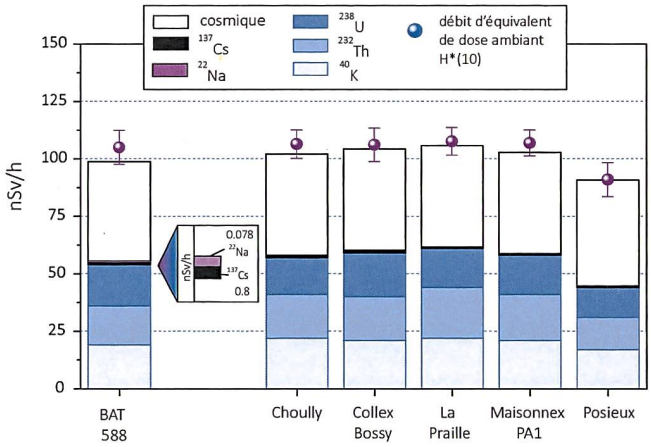


Figure 3 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2020. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre d'ionisation est également représentée.*

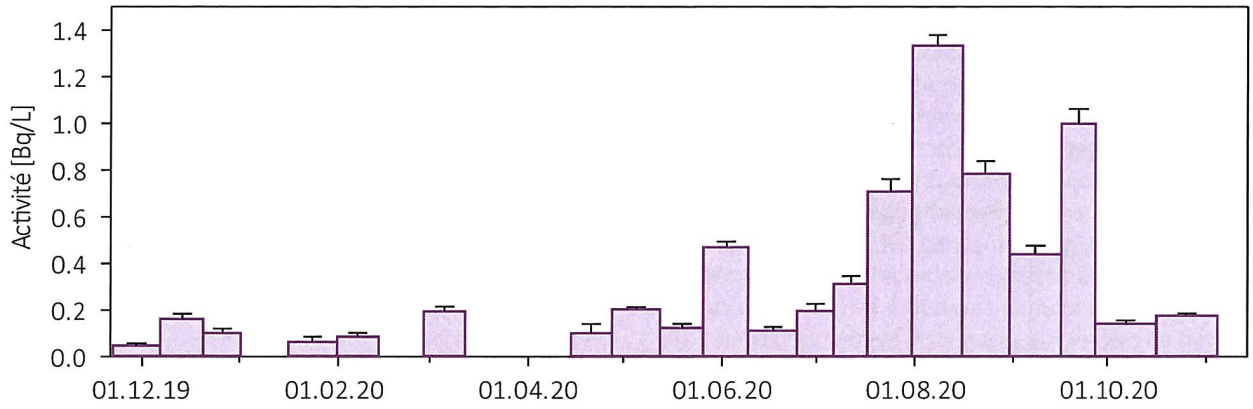


Figure 4 :
Activités du ^{7}Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'Avril entre novembre 2019 et novembre 2020

Mesures dans le milieu aquatique

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle mesurable en 2020. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par le département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme ont fait l'objet d'un rapport spécifique[1].

25 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) dans le Nant d'Avril entre le 22 novembre 2019 et le 13 novembre 2020, avec un temps d'intégration de 14 ± 2 jours par échantillon. A noter que les laboratoires de l'Université de Genève ayant été fermés entre le 16 mars et le 8 juin 2020 à cause de la pandémie, certaines analyses ont été reportées de plusieurs semaines, ce qui a pu entraîner la disparation de radioisotopes de courte période.

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

1 J.-L- Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°21 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2019 – Novembre 2020; Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Université de Genève (Janvier 2021)

Dans les échantillons d'eau brute, outre les radioisotopes géogènes, le ^{7}Be est le principal radioisotope détecté (figure 4). Son activité moyenne (lorsque l'isotope est présent) pour la période couverte par le rapport s'est élevée à 0.34 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ^{7}Be (1.33 ± 0.05 Bq/l) a été mesurée au mois de septembre 2020.

Le ^{137}Cs, issu des tests nucléaires dans l'atmosphère et de l'accident de la centrale de Tchernobyl, n'a été mesuré sur les particules qu'à trois reprises, avec une valeur maximale de 0.007 ± 0.001 Bq/l. Le ^{22}Na a été détecté dans trois échantillons (0.003 à 0.005 Bq/L), avec des valeurs très proches de la limite de détection.

L'échantillonnage des eaux ayant été réalisé en fonction du débit, il est possible d'estimer le flux d'un isotope en multipliant les débits (exprimés en m^{3}/période) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de ^{7}Be pour la période 2019-2020 est ainsi de 1'790 MBq/an au minimum et de 2'180 MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent dans la moyenne haute des périodes de mesure précédentes (fig. 5).

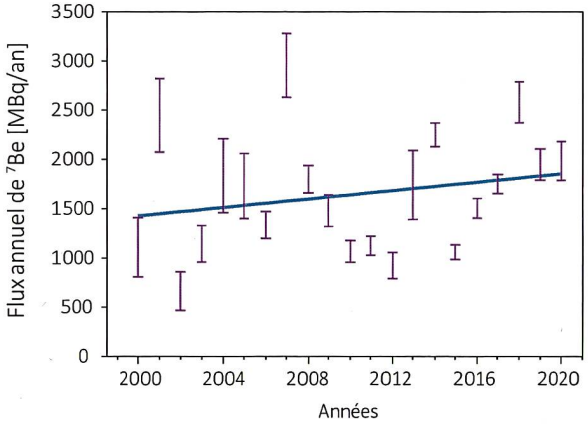


Figure 5 :
Estimation des flux annuels minimums et maximums de ^{7}Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

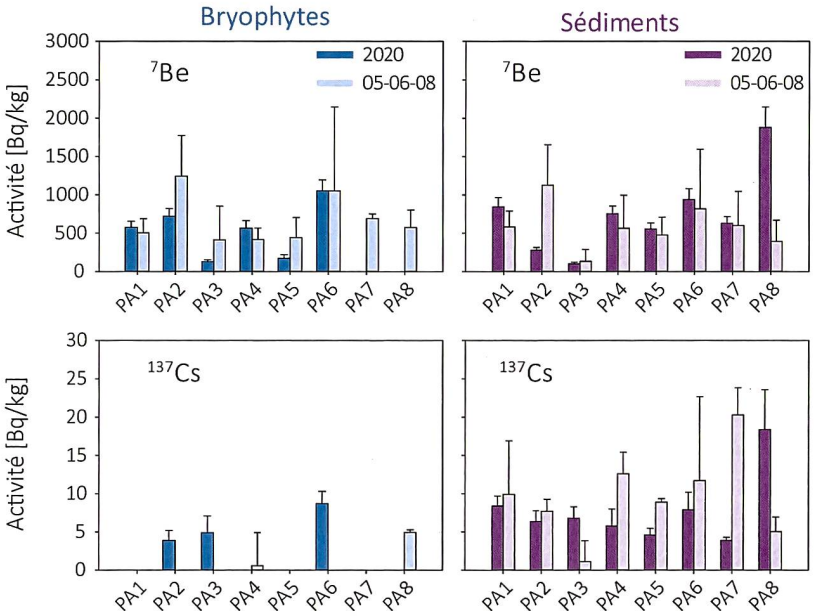


Figure 6 :
Activités du ^{7}Be et du ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8) en 2020 comparées aux valeurs moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008 (valeurs 05-06-08), avant la mise en service du LHC. Il n'y avait pas d'échantillon de bryophytes aux points 7 et 8 en 2020.

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ^{7}Be et de ^{137}Cs dans tous les échantillons avec des activités spécifiques variant respectivement entre 297 et 2'271 Bq/kg, et entre 2.7 et 10.6 Bq/kg.

Les hautes valeurs de ^{7}Be mesurées en juin (2'271 Bq/kg) et en août (2'132 Bq/kg) sont les 4è^{me} et 6è^{me} valeurs les plus élevées mesurées depuis 20 ans. Elles restent toutefois deux fois plus basses que le maximum mesuré (4'595 Bq/kg) en 2010.

Aucun radioisotope artificiel parfois observé (^{60}Co, ^{57}Co, ^{54}Mn) par le passé n'a été détecté dans les sédiments au cours de la période de mesure.

Afin de mettre en évidence d'éventuelles augmentations des immissions radioactives dans le milieu aquatique dues au fonctionnement du LHC, des sédiments et des bryophytes sont par ailleurs prélevés une fois par an aux 8 principaux points de rejet des eaux du LHC et analysés par le département F.-A. Forel. Malgré que le LHC ait été à l'arrêt depuis fin mars 2019 et pendant toute l'année 2020, la surveillance a été poursuivie.

Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments prélevés aux points de rejet du LHC (période d'échantillonnage du 24.09 au 16.10.2020), se sont échelonnées entre 102 et 1'880 Bq/kg pour le ^{7}Be et entre 3.9 et 18.4 Bq/kg pour le ^{137}Cs. Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^{7}Be variant entre 129 et 1'053 Bq/kg et entre 3,9 et 8.7 Bq/kg pour le ^{137}Cs, certains sites présentant des valeurs inférieures à la limite de détection. La figure 6 montrent que ces résultats sont comparables à ceux de 2005, 2006 et 2008 alors que le LHC n'était pas encore en fonction (programme point zéro LHC).

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

Des traces de ^{22}Na pouvant provenir du CERN ont été détectées cette année dans les eaux du Nant d'Avril, avec toutefois des valeurs très proches des limites de détection. Les autres radioéléments parfois détectés dans le Nant d'Avril au cours des périodes de surveillance précédente, comme le ^{57}Co, le ^{58}Co,

le ^{60}Co ou le ^{54}Mn, n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes mesurées pour contrôler les immissions du LHC.Ces résultats étaient attendus, étant donné que la quasi-totalité des installations du CERN étaient à l'arrêt.

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 particulièrement faible en 2020, étant donné que la majorité des installations étaient à l'arrêt.

Ainsi contrairement aux années précédentes, les radionucléides de courte demi-vie produits par les installations du CERN et habituellement mesurées dans le cadre du programme de surveillance de la radioactivité dans l'environnement au voisinage du CERN, comme par exemple le ^{24}Na ou le ^{131}I dans l'air, n'ont pu être décelées en 2020. Les résultats des mesures dans l'air, le milieu terrestre ou encore les eaux et sédiments du Nant d'Avril ne se sont que peu distingués de ceux enregistrés dans les stations de mesures de référence, situées hors influence du centre de recherche. En effet, le seul radionucléide supplémentaire détecté a été le ^{22}Na dans le sol (activation des blindages) lors d'une mesure in situ réalisée dans l'enceinte du centre de recherche.