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: - (2019)

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

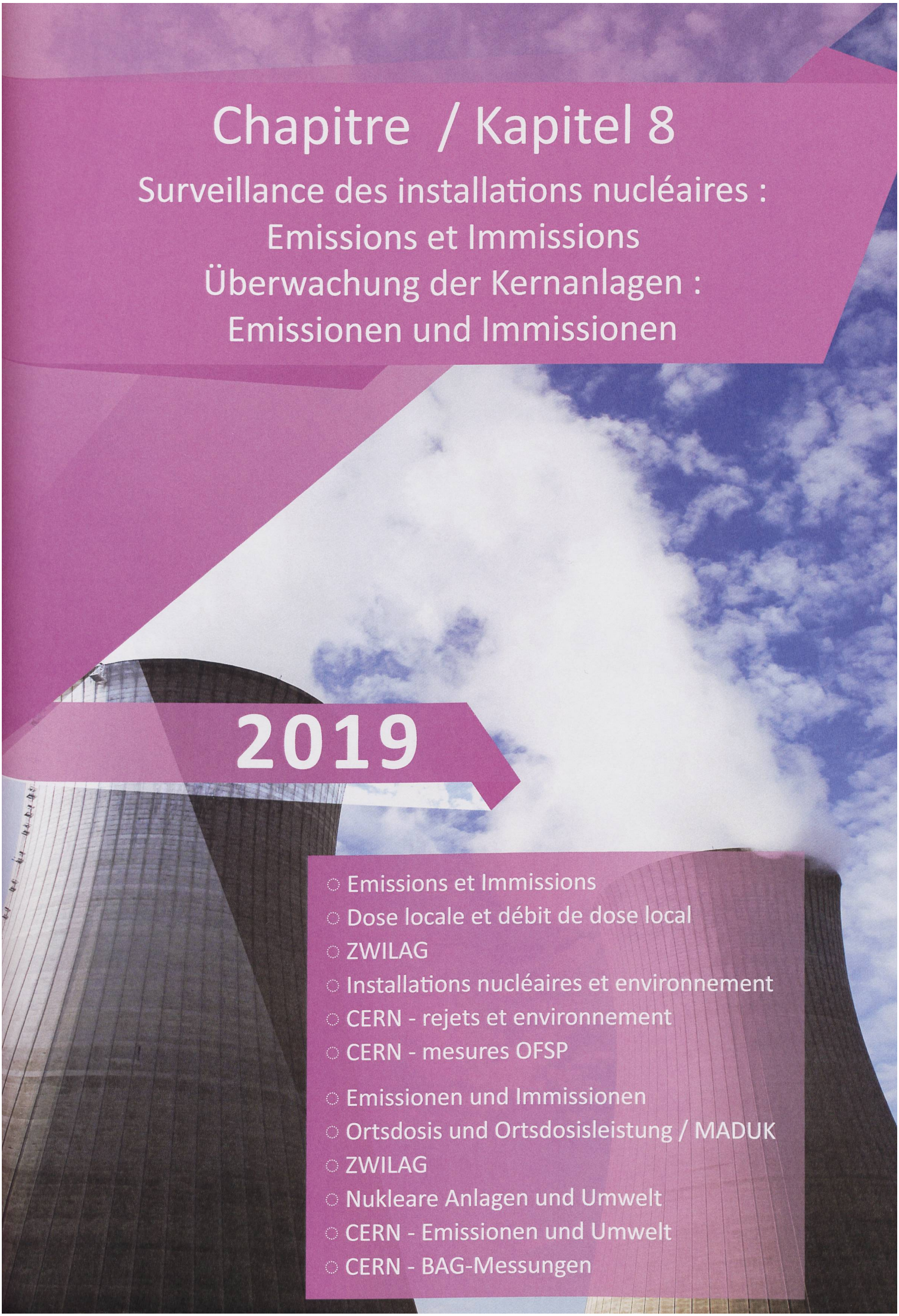
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media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

Chapitre / Kapitel 8

Surveillance des installations nucléaires : Emissions et Immissions
Überwachung der Kernanlagen : Emissionen und Immissionen



2019

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

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

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 2019 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr. Zusätzlich zum permanenten Probenahme- und Messprogramm wurde durch das PSI in den Jahren 2017 bis 2019 speziell für das KKM vor dessen Ausserbetriebnahme ein Spezialmessprogramm für Spezialnuklide wie ^{55}Fe, ^{63}Ni und Aktinide durchgeführt. Die Untersuchung zeigt, die radiologisch sehr geringe Belastung der Böden um das Kernkraftwerk Mühleberg.

Emissionen aus den Kernanlagen: Ergebnisse 2019

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 2019. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c gegeben. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für die meistbetroffenen Personen (nur Erwachsene) über die letzten 20 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimiten eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an 194 Proben eigene gammaspektrometrische Messungen durchgeführt (inkl. 10 Proben von Ringvergleichen zur Sicherstellung der eigenen Messqualität). Dabei wurden Aerosol- und Iodfilter sowie Abwasserproben aus den Anlagen stichprobenweise analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

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

systembedingt erforderlich, um den operationellen Strahlenschutz während der Revision zu optimieren. Im Gegensatz zum KKG erfolgen die Tritiumabgaben im KKB über das ganze Jahr verteilt.

Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKB und KKG weniger als 0.001 mSv, bei KKL und KKM etwa 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betrugen somit im Jahr 2019 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 0.010 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeführten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Die für das Jahr 2019 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

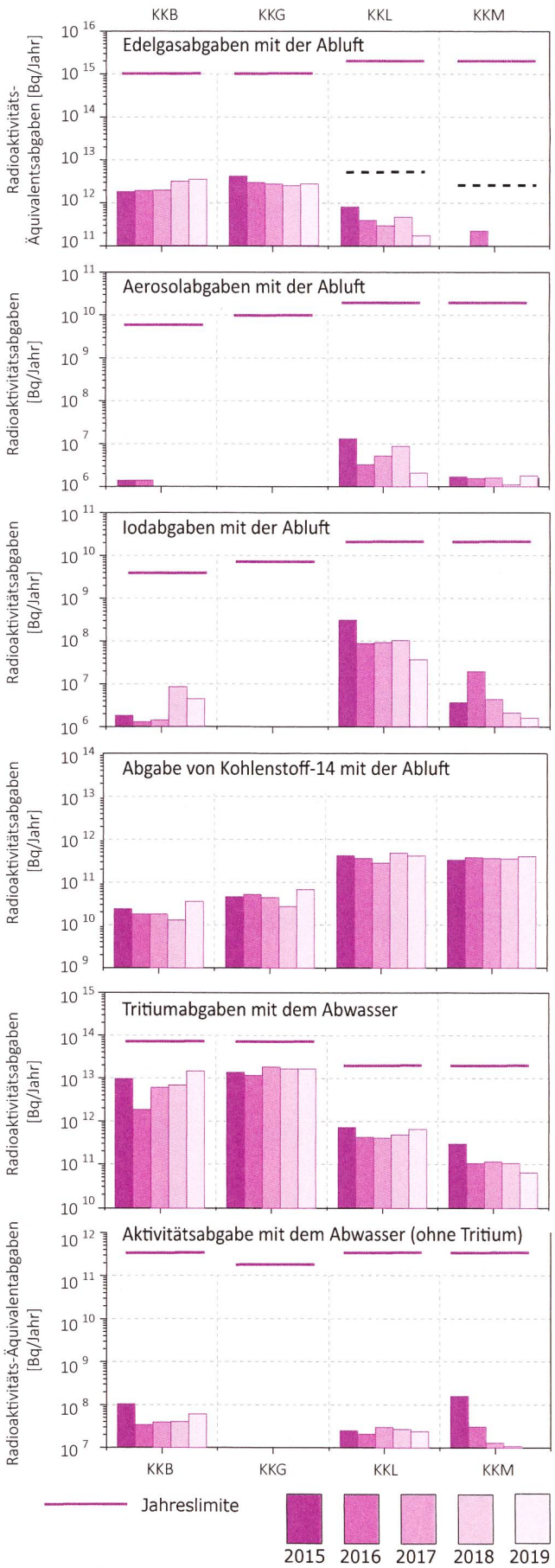


Fig 1.a:
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser ins Flusswasser in den letzten fünf Jahren (2015 bis 2019) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten.

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

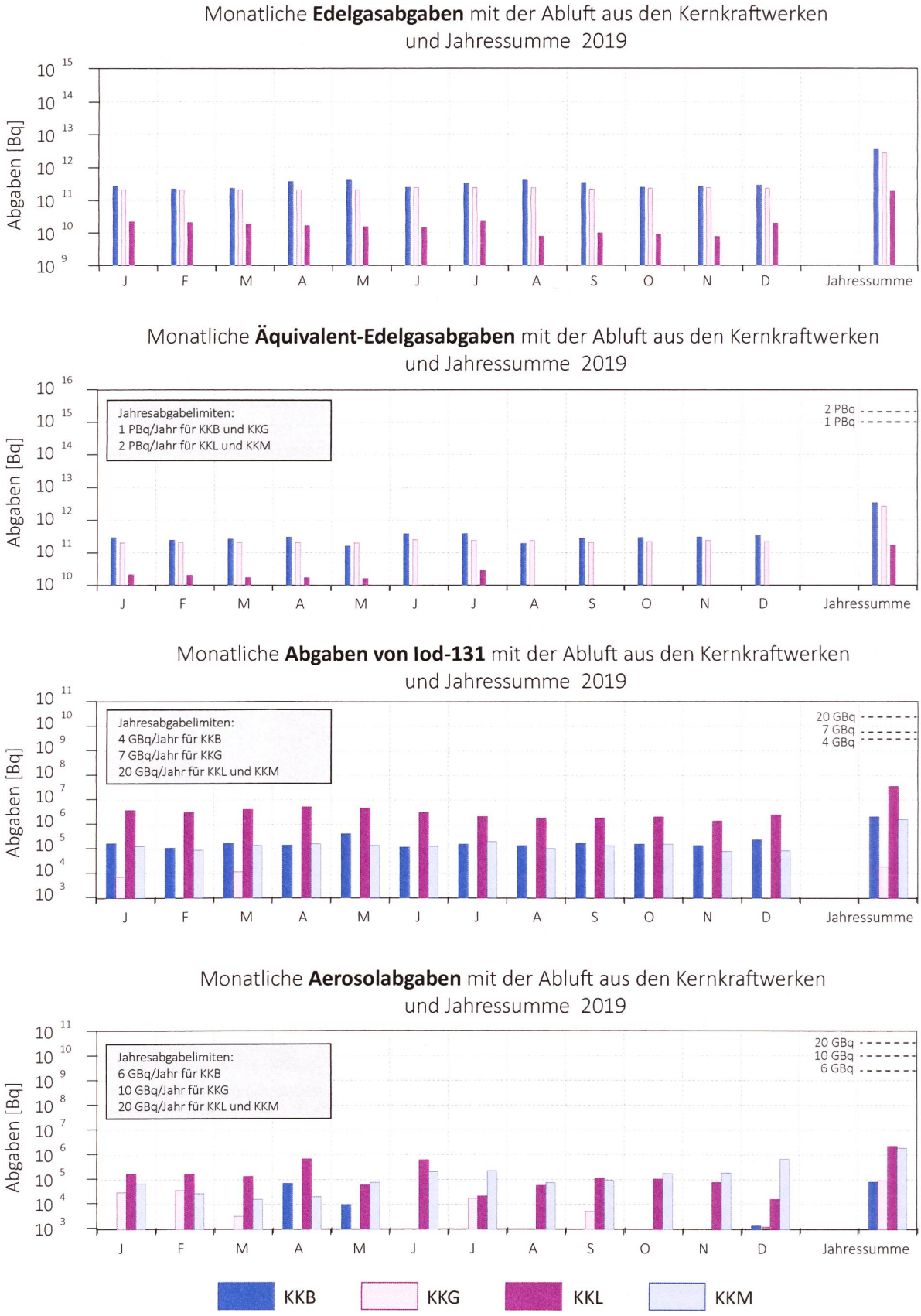
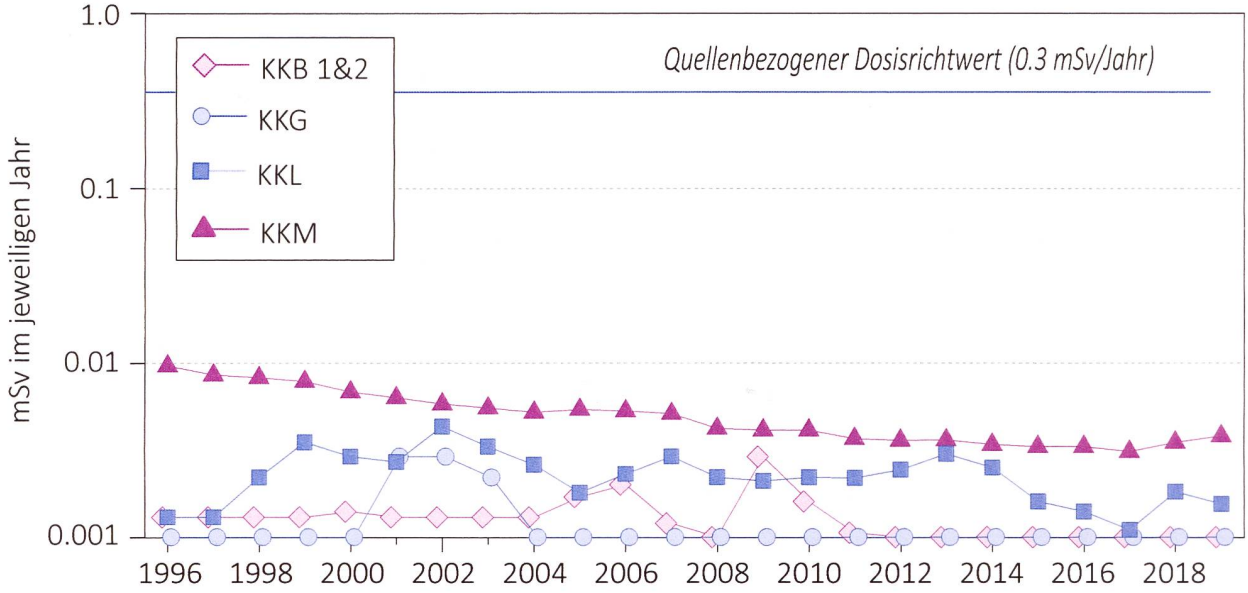


Fig 1.b (Teil 1):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2018 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten. Bei fehlenden Balken in den Figuren liegen die bilanzierten Werte unterhalb des dargestellten Wertebereichs.

Fig 1.b (Teil 2):
Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2018 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.



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

Anlage/Block	Betrieb 2019	Typ	Leistung
KKB/Block 1	Leistungsbetrieb: 01.01-03.05; 09.06-31.12. Revisionstillstand: 03.05-09.06.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKB/Block 2	Leistungsbetrieb: 01.01-10.08; 20.09-31.12. Revisionsstillstand: 10.08-20.09.	Druckwasserreaktor	365 MW
KKG	Leistungsbetrieb: 01.01-02.06; 23.06-31.12. Revisionsstillstand: 02.06-23.06.	Druckwasserreaktor	985 MW
KKL	Leistungsbetrieb: 01.01-03.06; 03.07-31.12. Revisionsstillstand: 03.06-03.07.	Siedewasserreaktor	1'275 MW
KKM	Leistungsbetrieb: 01.01-20.12. Endgültige Einstellung Leistungsbetrieb: ab 20.12.2019	Siedewasserreaktor	373 MW

Figur 3:
Betrieb der Kernanlagen 2019.

Tabelle 1:
Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2019 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	Normiert [1,2]	Limiten [4]		mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Prozent der Limite	Erw.	10j Kind	1j Kind
KKB1 + KKB2	Abwasser 4'200 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$3.1 \cdot 10^{8}$	-	$4 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$1.5 \cdot 10^{13}$	$1.5 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{13}$	21%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	$3.4 \cdot 10^{12}$	$3.4 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$4.7 \cdot 10^{5}$	-	$6 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ^{131}I	$2.1 \cdot 10^{6}$	-	$4 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$3.6 \cdot 10^{10}$		-	-	<0.001	<0.001	0.0018
	Dosis total						<0.001	<0.001	0.0018
KKG	Abwasser 7'362 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$2.1 \cdot 10^{6}$	-	$2 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$1.7 \cdot 10^{13}$	$1.7 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{13}$	25 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	$<2.6 \cdot 10^{12}$	$<2.7 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	<0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$9.1 \cdot 10^{4}$	-	$1 \cdot 10^{10}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ^{131}I	$1.9 \cdot 10^{4}$	-	$7 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$6.8 \cdot 10^{10}$		-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001
KKL	Abwasser 13'746 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$1.0 \cdot 10^{8}$	-	$4 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$6.8 \cdot 10^{11}$	$6.8 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{13}$	4 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	$1.8 \cdot 10^{11}$	-	$2 \cdot 10^{15}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$4.9 \cdot 10^{5}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ^{131}I	$3.6 \cdot 10^{7}$	$3.6 \cdot 10^{7}$	$2 \cdot 10^{10}$	0.2 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$4.1 \cdot 10^{11}$		-	-	0.0016	0.0021	0.0035
	Dosis total						0.0016	0.0021	0.0035
KKM	Abwasser 1'483 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$4.5 \cdot 10^{7}$	-	$4 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$6.7 \cdot 10^{10}$	$6.7 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{13}$	0.4%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	-	-	$2 \cdot 10^{15}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	$1.8 \cdot 10^{6}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	<0.1%	0.0024	0.0024	0.0023
		Iod: ^{131}I	$1.6 \cdot 10^{6}$	-	$2 \cdot 10^{10}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$4.0 \cdot 10^{11}$		-	-	<0.001	0.0013	0.0022
	Dosis total						0.0034	0.0037	0.0045
ZZL	Abwasser 307 m³	Nuklidgemisch ohne Tritium	$3.1 \cdot 10^{8}$	-	$2 \cdot 10^{11}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$4.9 \cdot 19^{0}$	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β–/γ-Aerosole	$2.5 \cdot 10^{5}$	-	$1 \cdot 10^{9}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	$9.9 \cdot 10^{3}$	-	$3 \cdot 10^{7}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	$4.8 \cdot 10^{8}$	-	$1 \cdot 10^{12}$	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	$1.9 \cdot 10^{9}$	-	$1 \cdot 10^{14}$	<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 2019 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungs-labor	Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundes-zwischen-lager
Abgaben im Abwasser[1,2] [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft[1,2] [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$4.1 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-
β/γ-Aerosole, ohne Iod	$7.4 \cdot 10^{5}$	-	-	-	$2.2 \cdot 10^{4}$
α-Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$4.7 \cdot 10^{4}$	-	-	-	-
Tritium als HTO	$2.3 \cdot 10^{10}$	-	-	$1.3 \cdot 10^{10}$	$6.6 \cdot 10^{9}$
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	$1.8 \cdot 10^{8}$	$9.7 \cdot 10^{6}$
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 Fortluftan-lagen	Injektor II	C-Labor	Abwasser 1075 m³	Abluft	Aequivalent-abgaben
Abgaben im Abwasser[1,2] [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$6.5 \cdot 10^{7}$	-	$1.8 \cdot 10^{7}$
Tritium	-	-	-	$3.6 \cdot 10^{10}$	-	-
Abgaben über die Abluft[2,4] [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	$2.4 \cdot 10^{14}$	$4.1 \cdot 10^{10}$	-	-	$2.4 \cdot 10^{14}$	$1.0 \cdot 10^{15}$
β/γ-Aerosole, ohne Iod	$1.2 \cdot 10^{10}$	$1.0 \cdot 10^{7}$	$7.6 \cdot 10^{3}$	-	$1.1 \cdot 10^{10}$	-
α-Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$1.4 \cdot 10^{8}$	-	-	-	$1.4 \cdot 10^{8}$	$8.2 \cdot 10^{7}$
Tritium als HTO	$3.1 \cdot 10^{12}$	-	-	-	$3.1 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ^{14}C in CO_2	-	-	-	-	$1.9 \cdot 10^{8}$	-
Jahresdosis[3] [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.010	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.010	
Kind 10j	0.010	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.010	
Kleinkinder	0.010	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	0.010	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert[4]	6.7 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 7.0%	

Tabelle 3a:
Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2019:
Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben.

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{3}H	$1.5\cdot10^{13}$	$1.7\cdot10^{13}$	$6.8\cdot10^{11}$	$6.7\cdot10^{10}$	$2.6\cdot10^{10}$	$4.9\cdot10^{9}$
^{22}Na					$1.5\cdot10^{5}$	$3.4\cdot10^{5}$
^{24}Na	$4.1\cdot10^{6}$					$4.9\cdot10^{4}$
^{54}Mn	$3.0\cdot10^{6}$		$4.0\cdot10^{6}$	$6.3\cdot10^{6}$	$1.6\cdot10^{5}$	$4.1\cdot10^{5}$
^{57}Co		$2.5\cdot10^{4}$			$3.2\cdot10^{4}$	
^{58}Co	$1.5\cdot10^{7}$		$1.8\cdot10^{6}$	$2.5\cdot10^{6}$		$2.1\cdot10^{4}$
^{60}Co	$7.4\cdot10^{7}$		$9.8\cdot10^{7}$	$3.3\cdot10^{7}$	$3.3\cdot10^{5}$	$9.4\cdot10^{6}$
^{65}Zn	$4.1\cdot10^{4}$			$2.1\cdot10^{6}$	$3.2\cdot10^{4}$	
^{69m}Zn		$3.8\cdot10^{4}$				
^{89}Sr	$5.5\cdot10^{5}$		$1.0\cdot10^{6}$	$1.2\cdot10^{5}$		
$^{90}Sr/^{90}Y$	$1.0\cdot10^{6}$	$5.7\cdot10^{5}$		$1.9\cdot10^{5}$	$7.0\cdot10^{6}$	$7.8\cdot10^{4}$
^{99}Mo	$2.8\cdot10^{4}$					
^{99m}Tc	$3.0\cdot10^{4}$				$1.6\cdot10^{3}$	
^{103}Ru	$7.3\cdot10^{4}$					
^{110m}Ag	$4.9\cdot10^{6}$					
^{111}In					$1.5\cdot10^{4}$	
^{122}Sb	$2.5\cdot10^{6}$					
^{124}Sb	$8.7\cdot10^{7}$					$3.1\cdot10^{6}$
^{125}Sb	$2.4\cdot10^{7}$					$3.2\cdot10^{7}$
^{123m}Te	$1.5\cdot10^{7}$	$1.5\cdot10^{6}$				
^{132}Te	$1.2\cdot10^{6}$					
^{125}I					$6.5\cdot10^{3}$	
^{131}I	$3.4\cdot10^{6}$					
^{133}I	$4.5\cdot10^{5}$					
^{133}Ba					$3.4\cdot10^{3}$	
^{134}Cs	$7.8\cdot10^{5}$				$1.1\cdot10^{5}$	$3.5\cdot10^{6}$
^{137}Cs	$7.7\cdot10^{7}$	$3.2\cdot10^{4}$		$6.8\cdot10^{5}$	$2.0\cdot10^{7}$	$2.6\cdot10^{8}$
^{141}Ce	$2.2\cdot10^{4}$					
^{161}Tb					$9.5\cdot10^{6}$	
^{172}Lu					$2.0\cdot10^{4}$	
^{173}Lu					$8.3\cdot10^{3}$	
^{177}Lu					$2.3\cdot10^{7}$	
^{207}Bi					$4.0\cdot10^{3}$	
α-Strahler	*)	$< 8.7\cdot10^{4}$	$9.5\cdot10^{4}$	$6.3\cdot10^{3}$		*)
$^{234/238}U$					$3.7\cdot10^{4}$	
$^{239/240}Pu$	$5.5\cdot10^{4}$				$1.8\cdot10^{4}$	
$^{238}Pu/^{241}Am$	$1.9\cdot10^{5}$				$1.8\cdot10^{4}$	
^{239}Np						
^{242}Cm	$1.1\cdot10^{4}$					
$^{243/244}Cm$	$4.2\cdot10^{5}$					

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2018 bis und mit dem 3. Quartal 2019

Tabelle 3b:
Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft (Gase, Edelgase und Iod) 2019:
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	$6.0 \cdot 10^{11}$	$6.1 \cdot 10^{11}$	$5.3 \cdot 10^{11}$	$4.3 \cdot 10^{10}$	$3.1 \cdot 10^{12}$	$1.9 \cdot 10^{9}$
^{14}C (CO_2)	$3.6 \cdot 10^{10}$	$6.8 \cdot 10^{10}$	$4.1 \cdot 10^{11}$	$4.0 \cdot 10^{11}$	$1.9 \cdot 10^{8}$	$4.8 \cdot 10^{8}$
^{11}C					$3.8 \cdot 10^{13}$	
^{13}N					$3.9 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$1.6 \cdot 10^{14}$	
^{18}F					$1.2 \cdot 10^{12}$	
^{24}Ne					$9.0 \cdot 10^{9}$	
^{41}Ar					$5.7 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr					$4.1 \cdot 10^{11}$	
^{85m}Kr	$1.2 \cdot 10^{11}$					
^{88}Kr	$2.2 \cdot 10^{11}$					
^{133}Xe	$1.7 \cdot 10^{12}$		$4.1 \cdot 10^{10}$			
^{135}Xe	$1.4 \cdot 10^{12}$		$8.1 \cdot 10^{10}$			
^{135m}Xe			$5.6 \cdot 10^{10}$			
EG-Aequiv.						
EG: β-total		$< 2.6 \cdot 10^{12}$				
Andere						
Iod						
^{123}I					$2.4 \cdot 10^{7}$	
^{125}I					$1.2 \cdot 10^{8}$	
^{131}I	$2.1 \cdot 10^{6}$	$1.9 \cdot 10^{4}$	$3.8 \cdot 10^{7}$	$1.6 \cdot 10^{6}$		
^{133}I	$1.2 \cdot 10^{7}$					

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

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

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

Gase : Beim PSI handelt es sich dabei vorwiegend um die Nuklide ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O und ^{41}Ar. Deren Halbwertszeiten sind kleiner als zwei Stunden. Hier ist für die einzelnen Abgabestellen und das gesamte PSI die Summe der Radioaktivität dieser Gase und Edelgase ohne Normierung auf einen Referenzwert angegeben. Für die Gesamtanlage wird zusätzlich auch die auf den Referenz- $IG_{Lf,ref}$-Wert von $2 \cdot 10^3$ Bq/m³ normierte Abgabe aufgeführt.

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

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

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

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

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

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

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

Tabelle 3c:
Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2019:
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					$3.6\cdot10^{5}$	
^{24}Na					$1.9\cdot10^{8}$	
^{38}S					$1.7\cdot10^{8}$	
^{39}Cl					$4.4\cdot10^{9}$	
^{51}Cr		$4.6\cdot10^{4}$		$2.5\cdot10^{5}$		
^{54}Mn				$1.9\cdot10^{5}$		
^{57}Co		$4.6\cdot10^{3}$				
^{58}Co			$3.7\cdot10^{4}$	$1.3\cdot10^{5}$		
^{59}Fe				$6.5\cdot10^{3}$		
^{60}Co	$6.8\cdot10^{4}$		$4.6\cdot10^{5}$	$5.8\cdot10^{5}$	$8.9\cdot10^{5}$	$1.3\cdot10^{3}$
^{65}Zn				$1.1\cdot10^{5}$		
^{77}Br					$3.3\cdot10^{6}$	
^{80m}Br					$1.8\cdot10^{8}$	
^{82}Br					$7.8\cdot10^{8}$	
^{89}Sr			$1.4\cdot10^{5}$			
^{90}Sr						
^{99m}Tc					$7.4\cdot10^{5}$	
^{103}Ru	$4.0\cdot10^{3}$	$2.5\cdot10^{3}$				
^{121}Te					$4.7\cdot10^{4}$	
^{123m}Te		$3.0\cdot10^{3}$				
^{125}Sb				$5.0\cdot10^{5}$		
^{131}I (Aerosol)			$1.6\cdot10^{6}$			
^{134}Cs						
^{137}Cs	$6.9\cdot10^{3}$			$3.8\cdot10^{3}$		$2.3\cdot10^{3}$
^{141}Ce		$3.3\cdot10^{3}$				
^{144}Ce		$3.2\cdot10^{4}$				
^{181}Re					$6.8\cdot10^{7}$	
^{182}Re					$4.0\cdot10^{8}$	
^{182m}Re					$5.1\cdot10^{5}$	
^{183}Re					$9.4\cdot10^{6}$	
^{182}Os					$2.2\cdot10^{8}$	
^{183}Os					$2.5\cdot10^{8}$	
^{183m}Os					$1.8\cdot10^{8}$	
^{185}Os					$1.6\cdot10^{7}$	
^{191}Os	$3.9\cdot10^{5}$					
^{191}Pt					$1.5\cdot10^{7}$	
^{192}Au					$2.4\cdot10^{9}$	
^{193}Au					$3.5\cdot10^{8}$	
^{194}Au					$4.3\cdot10^{4}$	
^{192}Hg					$2.0\cdot10^{9}$	
^{193m}Hg					$3.2\cdot10^{8}$	
^{194}Hg					$4.3\cdot10^{4}$	
^{195}Hg					$2.1\cdot10^{9}$	
^{195m}Hg					$1.4\cdot10^{8}$	
^{197m}Hg					$1.6\cdot10^{8}$	
^{203}Hg					$8.5\cdot10^{6}$	
Nicht spezifizierte						$2.5\cdot10^{5}$
α-Aerosole	$3.9\cdot10^{3}$	$2.5\cdot10^{4}$	$3.8\cdot10^{3}$	$1.9\cdot10^{4}$		$9.9\cdot10^{3}$

8.2
Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

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

Zusammenfassung

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

Ergebnisse 2019

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

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen etwa 0.08 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.22 µSv/h ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 1.2 mSv resultieren. Die vom KKM ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben für das Berichtsjahr nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von ca. 0.7 mSv eine Dosiserhöhung von etwa 1.3 mSv.

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 µSv/h (natürlicher Untergrund) und 0.19 µSv/h ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 1.1 mSv pro Jahr. Die höchste, mit den EDIS (Environmental Direct Ion Storage-Dosimeter) am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) beträgt 1.2 mSv.

Auf Grund der stichprobenweise vom ENSI gemessenen Ortsdosisleistung am Zaun des Paul Scherrer Instituts, Areal Ost ergibt sich hochgerechnet auf ein Jahr eine Ortsdosis (nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) von 0.3 mSv. Im Jahr 2019 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes ca. 0.2 mSv.

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

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

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

Spezialnuklide in Böden in der Umgebung des KKM

In seinem Gutachten zum Stilllegungsprojekt des KKM sah das ENSI in Absprache mit dem BAG für den Zeitraum von drei Jahren vor Beginn der Stilllegungsarbeiten eine Erweiterung des existierenden Messprogramms in der Umgebung des KKM für Spezialnuklide wie ^{55}Fe, ^{63}Ni, ^{90}Sr und Aktiniden (Umgebungsüberwachungsprogramm plus) zur Ermittlung des Zustandes vor Aufnahme der Stilllegungsarbeiten vor. Dieses erweiterte Messprogramm wurde in den Jahren 2017 bis 2019 im Auftrag des ENSI durch die Radioanalytik des Paul Scherrer Instituts (PSI) durchgeführt. Dabei wurden sechs Standorte in der Umgebung des Kernkraftwerks Müleberg sowohl gammaspektrometrisch wie hinsichtlich der genannten Spezialnuklide (^{55}Fe, ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{238}Pu, ^{239}Pu und ^{241}Am) halbjährlich beprobt und untersucht. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und der Messresultate kommt das PSI zu folgenden Schlussfolgerungen:

«Es zeigte sich, dass die Böden rund um das Kernkraftwerk Mühleberg radiologisch sehr sauber sind. Kurzlebigere Nuklide wie das ^{134}Cs (Anm.: aus dem Chernobyl-Reaktorunfall) sind praktisch komplett abgeklungen, das Niveau der Aktinide wie Pu-Isotope ist allgemein tief und die ^{90}Sr Messwerte nähern sich ebenfalls den Nachweisgrenzen. Sogar ^{137}Cs ist im Mittel nur noch mit 6 Bq/kg präsent.

Aus den Auswertungen der Isotopenverhältnisse wird plausibel, dass die gefundenen Aktinide auf die atmosphärischen Kernwaffentests zurückzuführen sind und die geringen Mengen an ^{137}Cs und das teilweise gefundene ^{90}Sr sehr wahrscheinlich noch aus dem Chernobyl-Reaktorunfall stammen. Derart tiefe Spuren von künstlichen Nukliden bilden ein sehr tiefes Hintergrundniveau, vor dem bereits geringfügige zusätzliche radiologische Immissionen (Anm. während des Rückbaus des KKM) zu messen sein würden.

Es konnten bei den untersuchten Nukliden keine Hinweise auf jüngere Immissionen von Aktiniden oder Spaltprodukten gefunden werden und auch keine Hinweise auf einen lokalen Einfluss durch den Betrieb des Kernkraftwerks Mühleberg. Dies stimmt mit der laufenden Überwachung anderer Kernkraftwerke in der Schweiz überein. Während die Kraftwerke im Rahmen ihrer Eigen- und Fremdüberwachung ihre Emissionen fortlaufend messen und auch publizieren, sind auf der Immissionsseite in den Böden keine messbaren Einflüsse im Vergleich zu Standorten fernab der Kernkraftwerke festzustellen.»

Die vom PSI zusammengestellten Resultate geben zusätzlich zum routinemässigen Umgebungsüberwachungsprogram des BAG einen sehr guten Überblick über den radiologischen Zustand der Umgebung des KKM vor der Aufnahme der Stilllegungsarbeiten und können bei Verdacht auf allfällige Abgaben während der Arbeiten als Referenz herangezogen werden. Die detaillierten Resultate des PSI werden zusammen mit weiteren Resultaten der anderen Stellen, die am Messprogramm ebenfalls beteiligt waren, in einem separaten Bericht bis Ende 2020 veröffentlicht.

8.3 MADUK

Messnetz zur automatischen Dosisleistungs-überwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke

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

Zusammenfassung

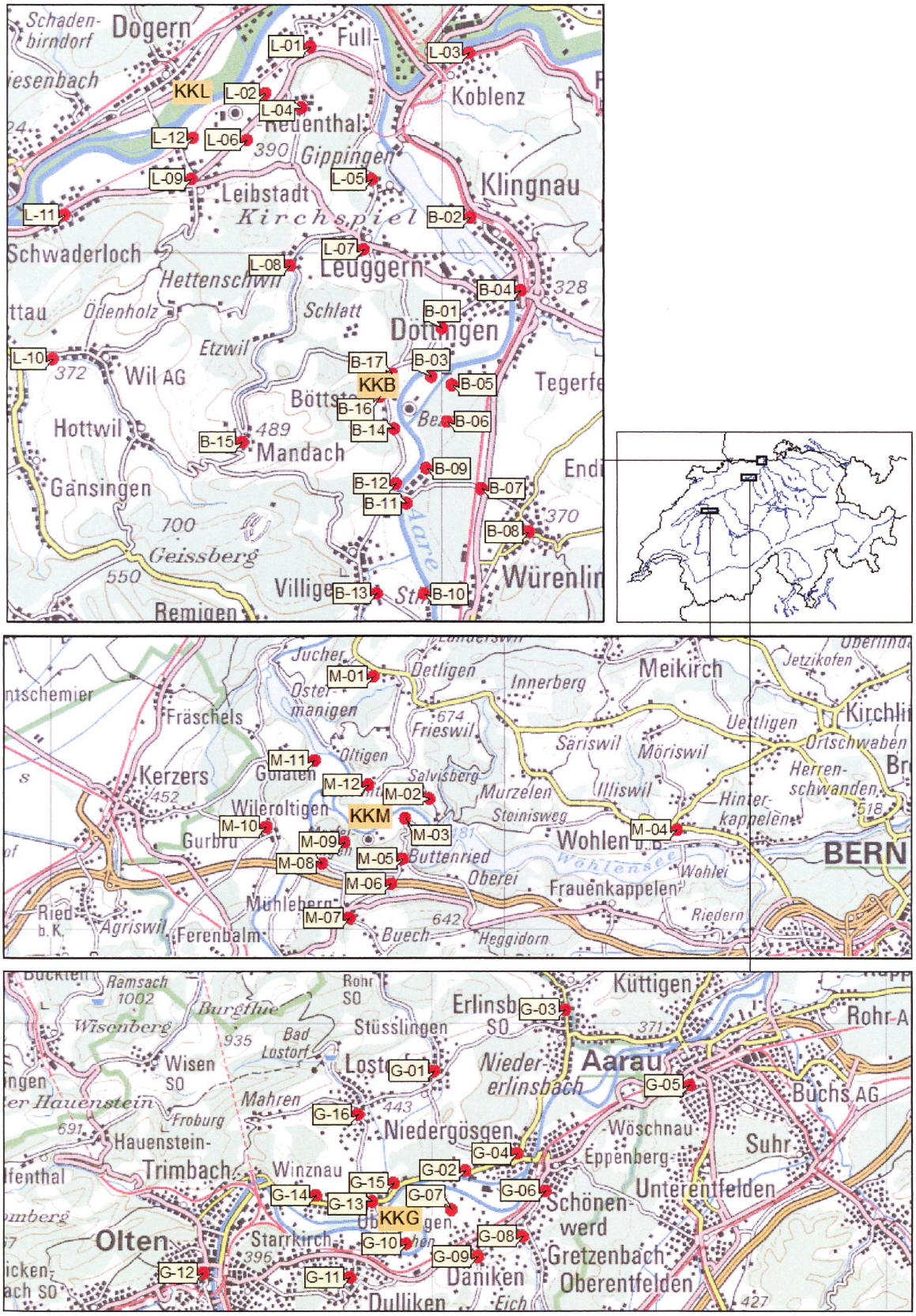
Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) misst und überwacht die Dosisleistung in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr. Es dient der Beweissicherung für die Behörden und zur Schaffung von Transparenz gegenüber der 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 2019 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren bis auf eine Ausnahme (Station B-12) auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Bei der Station B-12, die sich beim Paul Scherrer Institut befindet, wurde am 30. Juli um 07:40 Uhr eine einzelne Schwellwertverletzung registriert. An der Meteostation am PSI wurde zu diesem Zeitpunkt kein Niederschlag registriert. Der erhöhte Messwert ist sehr wahrscheinlich auf Emissionen aus der Fortluftanlage des PSI West zurückzuführen, die bei bestimmten Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung an den Stationen B-11 und B-12 gemessen werden können.

Übersicht

Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von Anlageparametern (ANPA) und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 in den operationellen Betrieb überführt. Da das System die Dosisleistung 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 dem 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 (Figur 1). 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).



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

Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Des Weiteren sorgen verschiedene Subsysteme für den Datenaustausch mit externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM (Notfallwerkzeug zur Analyse der Anlageparameter) und JRODOS/LASAT (Notfallwerkzeug zur Dosisprognose in der Umgebung) im ENSI.

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

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahr 2019 wurden Erweiterungen beim Treiber für die Übernahme der Ausbreitungsrechnungen von JRODOS vorgenommen, um den Notfallschutzpartnern zusätzliche Informationen zur Verfügung stellen zu können. Bei den ANPA-/EMI-Daten wurden die übertragenen Parameter um Temperatur und Füllstand der Brennelementelagerbecken erweitert.

Im zweiten Quartal wurden die Prüfmuster der neuen Messsonden geliefert. Diese wurden auf die Einhaltung der Spezifikationen getestet. Gleichzeitig wurden die Messwertzentralen für die neuen Messsonden eingerichtet und im Zusammenspiel mit den Prüfmustern erfolgreich in Betrieb genommen. Ende November konnte die Freigabe für die Serienproduktion der Messsonden erfolgen. Die Prüfmuster wurden durch das METAS erfolgreich geeicht. Die erste Teillieferung der Messsonden ist für das erste Quartal 2020 vorgesehen. Ende 2019 ging auch noch der Treiber für die Übernahme der Messdaten in das bestehende MADUK-System in den Probebetrieb.

Systemverfügbarkeit und Störungen

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

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

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
G-03	154.3	154.3	Defektes Netzteil
L-11	101.5	25.0	Defektes Netzkabel aufgrund Umbauarbeiten
B-01	93.0	14.5	Defektes Netzteil
G-09	128.7	55.5	Umbau am Standort
G-05	13.5	13.5	Defekte Messsonde
L-04	90.0	90.0	Defekte Messsonde
B-06	15.0	15.0	Blockierter Datenlogger
L-06	11.0	11.0	Arbeiten am Stromnetz
M-08	130.3	130.3	Defekte Messsonde

Die permanente Übertragung der Anlageparameter erreichte insgesamt wiederum eine hohe Verfügbarkeit. Im Berichtsjahr führten geplante Unterhaltsarbeiten seitens der Werke zu einem Unterbruch von 34.8 Stunden bei KKL. Ein Konfigurationsfehler bei der Integration neuer Datenpunkte für KKM führte auf Seiten des ENSI zu einem Unterbruch von 1.6 Stunden. Bei KKG wurden sieben Unterbrüche länger als eine Stunde registriert mit einer Gesamtdauer von 11.2 Stunden. Keiner der Unterbrüche dauerte länger als drei Stunden.

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

Die Stationselektronik lief auch im 2019 grösstenteils zuverlässig. Die Station G-03 fiel aufgrund eines defekten Netzteils über die Weihnachtstage und Neujahr 2018/2019 aus. Die Reparatur konnte erst anfangs Januar 2019 ausgeführt werden. Es verbleibt eine Datenlücke von 154.3 Stunden im Jahr 2019.

2019 waren wiederum diverse Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen von insgesamt 1'486.8 Stunden zu verzeichnen, deren Ursachen nicht immer festgestellt werden konnten. Davon entfielen 1'407.7 Stunden auf die Station L-11. Dort wurde im Zuge der Abschaltung des analogen Telefonnetzes auf einen Router via Mobilfunknetz migriert. Wie sich im Betrieb zeigte, war das Mobilfunksignal aber häufig für einen stabilen Betrieb zu schwach. Deshalb wurde anfangs Dezember die Station wieder auf einen Festnetzanschluss migriert. Eine Störung beim Provider führte bei den Stationen L-06 und L-12 zu einem Kommunikationsunterbruch von 1.5 Stunden. Bei den Stationen B-14, B-16, B-17, L-10 und M-10 waren Unterbrüche unbekannter Ursache von insgesamt 13.1 Stunden zu verzeichnen. Ein umgestürzter Baum beschädigte die Kommunikationsleitung der Station B-14. Die Reparatur konnte nach 41.5 Stunden abgeschlossen werden. Eine Störung in der Infrastruktur des Providers führte zu Kommunikationsunterbrüchen bei B-07 von 3.7 Stunden, bei B-17 von 3.3 Stunden und bei L-11 von 3.2 Stunden. Ein Stromausfall in Böttstein verursachte Unterbrüche zu den Stationen B-14, B-16 und B-17 während 2 Stunden. Bei allen Kommunikationsstörungen konnten die Daten nachträglich lückenlos archiviert werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.6% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.98%.

Qualitätssicherung

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

Gemäss Art. 2 der Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Ansprechvermögen der Sonden wird zwischen den Eichungen mit halbjährlichen Funktionstests geprüft. Bei den Funktionstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer ^{137}Cs-Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten produziert und mit Sollwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunktionskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellenwerten benutzt. Im Jahr 2019 wurden an jeder Sonde zwei Funktionsprüfungen durchgeführt. Bei den Funktionsprüfungen erfüllten alle Sonden, inklusive die Reservesonden, die Prüfkriterien.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme wurden auch im Jahr 2019 Messungen mittels In-Situ-Gammaspektrometrie bei den Sonden der Messringe Gösgen und Leibstadt durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre. Ausser ^{137}Cs vom Fallout der Atombombentests und des Tchernobyl-Unfalls konnten keine künstlichen Radionuklide nachgewiesen werden.

Messergebnisse

Im Jahr 2019 wurden insgesamt 13 Verletzungen des Nettodosisleistungsschwellenwertes von 50 nSv/h registriert (Tabelle 2). Davon waren 12 aufgrund von gleichzeitig registriertem Niederschlag und/oder dem für Radonfolgeprodukte typischen

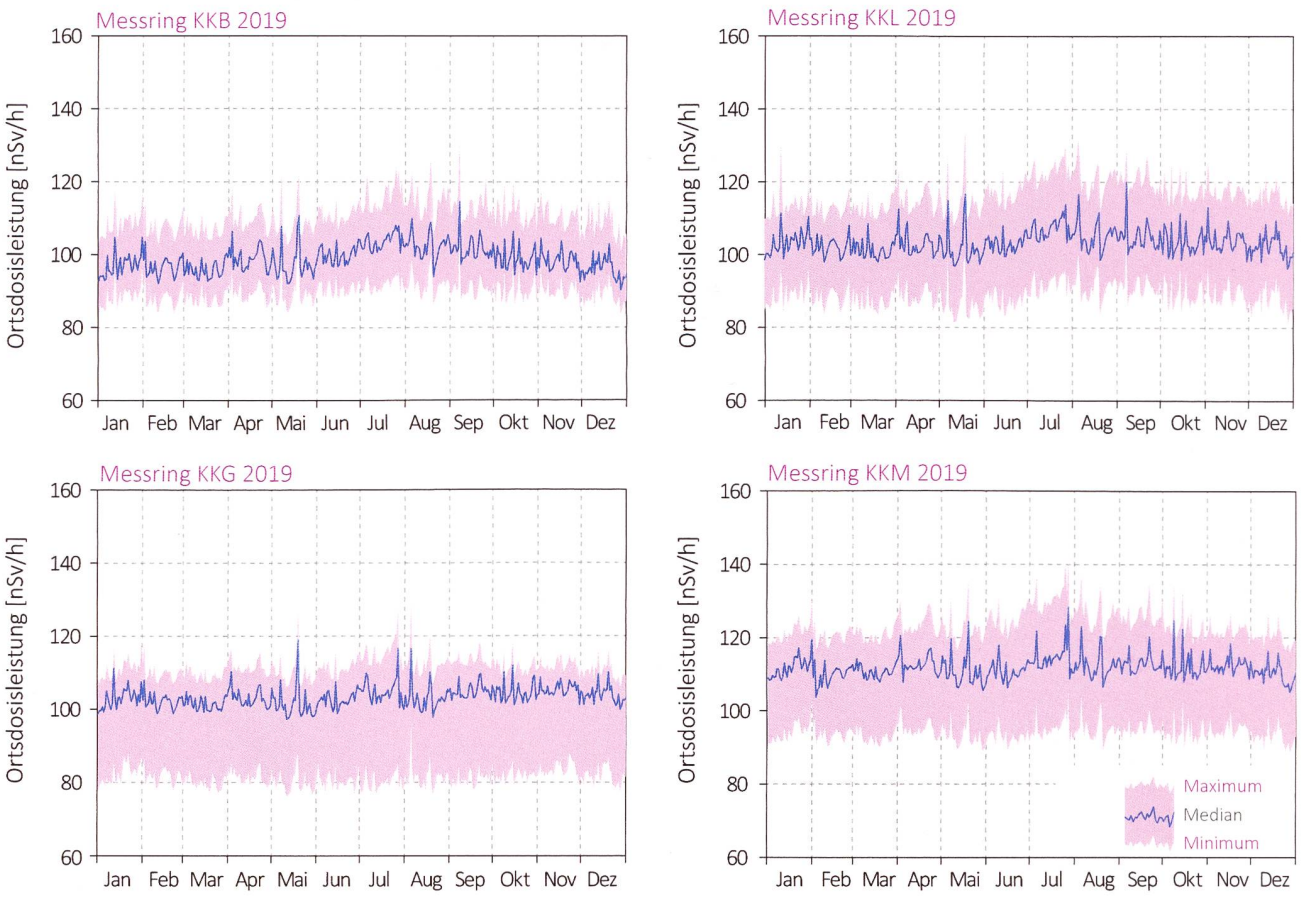
Tabelle 2:
Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2019.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
07.01.2019 07:50	L-02	1.2	61	158
10.05.2019 21:30	B-02	0.2	51	152
28.07.2019 03:20	M-01	0.2	51	180
28.07.2019 05:10	L-06	0.5	54	161
28.07.2019 05:20	G-10	0.2	52	160
28.07.2019 05:50	L-12	0.2	52	164
28.07.2019 06:50	G-15	0.5	68	161
28.07.2019 07:10	G-07	0.2	51	193
30.07.2019 07:40	B-12	0.2	53	159
30.07.2019 20:40	M-01	0.2	53	167
10.08.2019 05:30	G-08	0.2	50	169
20.08.2019 18:20	L-06	0.7	64	195
20.08.2019 18:30	L-02	0.2	61	183

Abklingverhalten auf Washout von natürlichen Radionukliden zurückzuführen. Zum Zeitpunkt der Erhöhung bei der Station B-12 am 30. Juli um 07:40 Uhr zeichnete die Niederschlagsmessung am Standort PSI keinen Niederschlag auf. Die Station B-11, welche sich ebenfalls auf dem PSI-Areal befindet, zeigte zum Zeitpunkt der Schwellenwertverletzung keine Erhöhung der Messwerte. Der erhöhte Messwert ist sehr wahrscheinlich auf Emissionen aus der Fortluftanlage des PSI West zurückzuführen, die bei bestimmten Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung an den Stationen B-11 und B-12 gemessen werden können. Auf Grund fehlender Messwerte für die Windsituation am Standort PSI (nur Prognosedaten vorhanden) ist eine abschliessende Aussage über die Ursache der Erhöhung nicht möglich.

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

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



Figur 2:
Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM im Jahr 2019.

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. 5 -40 Bq/kg für das Jahr 2019. 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-Bombentests in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg (1997) auf 1 - 3 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}$Pu von 0.4 - 0.9 Bq/kg (1997) auf 0.1 - 0.8 Bq/kg im Jahr 2019. Die konstanten Isotopenverhältnisse von ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu (ca. 0.03) und ^{241}Am/$^{239+240}$Pu (ca. 0.4) zeigen deutlich, dass die gemessenen Werte für die Aktiniden den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 10 - 30 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von ^{226}Ra und ^{228}Ra nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop ^{40}K wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 250 und 350 Bq/kg gemessen.

Einleitung

Das Zwischenlager (ZWILAG AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut 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 bis Anfang der 1960er 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.

Figur 1 :
Staubfangplatten, welche im Labor mit frischer Vaseline-Beschichtung vorbereitet sind, bereit zur Montage an den Sammelstationen (Bild: P. Kramer).

Diese Leach-Lösung wird auf eine DGA™- und eine Anionenaustauscher-Kolonne (Bio-Rad AG 1-X2, 100-200 mesh) gegeben und durch Zugabe von HNO_3 und HCl-Waschlösungen werden potentiell bei der α-Spektrometrie interferierende, natürliche Radionuklide abgetrennt (z.B. α-Emission des natürlichen Radionuklids ^{228}Th interferiert mit dem künstlichen Radionuklid ^{238}Pu bei 5.4 MeV). Im folgenden Schritt wird die Pu-Fraktion durch Reduktion von Pu^{4+} zu Pu^{3+} mit einer HI/HCl-Lösung eluiert. Die durch die Bio-Rad-Kolonne gelaufene Fraktion mit Am und Cm wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer U/TEVA™-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+Cm werden anschliessend eingedampft, kalziniert und in einer Na_2SO_4-$NaHSO_4$-Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Actinoiden verwendet wird. Nach der Elektrodeposition werden die Messpräparate über 3 Tage mit hochauflösender α-Spektrometrie gemessen (alle Details in [1]).

Das Radionuklid ^{90}Sr (reiner β-Strahler) wird nach dem Leaching und einer Vorkonzentration via Oxalat-Fällung auf einer Sr-Resin-Kolonne in 8 M HNO_3-Medium fixiert und mit verdünnter Salpetersäure eluiert, eindedampft 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 Vaseline von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen eingeschmolzen. Mittels hochauflösender Gamma-Spektrometrie werden Photonen-emittierende Radioisotope wie ^{7}Be, ^{241}Am, ^{137}Cs und ^{131}I gemessen. Die γ-Messung dauert 15 Stunden.

Niederschlag

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

Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$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 0.1 und 0.8 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.1 und 0.3 Bq/kg. In Spuren ist noch ^{238}Pu nachweisbar (0.01 - 0.03 Bq/kg). Es wurde bei einer einzelnen Messung festgestellt, dass ^{238}Pu unter die Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg gefallen war. 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-Caesium 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 Actinoiden ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren stammt [1,2]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten Jahre. Ebenfalls eingetragen sind die Werte für ^{226}Ra (als Mass für natürlich vorkommendes, primordiales ^{238}U) und ^{228}Ra (als Mass für ^{232}Th). Diese Werte liegen konstant zwischen 10-30 Bq/kg und zeigen keinen Trend mit der Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingebaut sind und im säkularen Gleichgewicht mit ihren langlebigen Mutternukliden stehen. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für ^{238}U 2-3 ppm und für ^{232}Th 5-9 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

Weniger aufwändig ist die Auswertung der Staubfangplatten. Mit der monatlichen Kontrolle ist praktisch eine kontinuierliche Überwachung möglich. Seit Beginn der Probennahme lagen die Werte für ^{137}Cs und ^{241}Am immer unter den Nachweisgrenzen von 0.3 bzw. 0.4 Bq/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 werden typischerweise ^{3}H-Aktivitäts-Konzentrationen von 5-15 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 0.03 Bq/Liter.

Tabelle 1:
Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am und ^{131}I) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra, ^{228}Ra) im Verlauf der letzen Jahre (2015-2019) in Bodenproben Umgebung ZWILAG. Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2015	2016	2017	2018	2019
^{90}Sr	1 - 3	1 - 2	< 1 - 2	< 1 - 2.5	< 1 - 3
^{131}I	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{134}Cs (1)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	10 - 60	10- 50	10- 50	10- 50	5 - 40
^{238}Pu (2)	0.01 -0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.005- 0.03
$^{239+240}$Pu	0.1- 0.7	0.2- 0.8	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8	0.1 - 0.8
^{241}Am	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.05 - 0.3
^{226}Ra	20 - 30	20 - 30	20 - 30	10 - 24	15 - 30
^{228}Ra	20 - 40	20 - 30	20 - 40	13 - 25	17 - 30

(1) Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2015-2019 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 nicht mehr nachgewiesen werden.

(2) Einzelne ^{238}Pu-Resultate beginnen die Nachweisgrenze von 0.005 Bq/kg zu erreichen.

Literaturliste

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

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

8.5
Les installations nucléaires et l'environnement

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

Résumé

Les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, mises en œuvre dans le cadre de la surveillance de la radioactivité au voisinage des centrales nucléaires ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques (^{14}C dans les feuillages) et des rejets liquides (^{54}Mn dans les sédiments) de ces installations. A noter qu'avec la diminution des activités rejetées dans l'Aar par la centrale de Mühleberg, les isotopes du cobalt ou le ^{54}Mn ne sont plus mesurables dans les eaux de l'Aar et du Rhin. 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, de l'ordre de quelques micro-Sv au maximum, 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'influence des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement. Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce programme de surveillance des immissions au voisinage des installations nucléaires. Le tableau 1 indique les chapitres à consulter pour accéder aux résultats plus détaillés relatifs à un compartiment de l'environnement particulier ou un radionucléide spécifique.

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.

Méthodologie

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

Résultats

Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que les 4 centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (KKB 1 et 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2019 (voir Chap. 8.1).

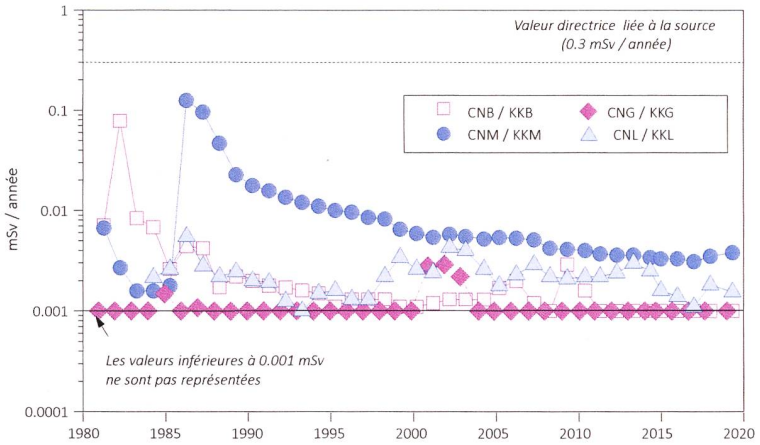


Figure 1:
Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2019 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population (adulte) avoisinante en termes de doses entre 1981 et 2019. 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, les doses dues aux émissions des centrales nucléaires reçues par les personnes adultes les plus exposées se sont échelonnées en 2019 entre < 0.001 mSv pour KKB et KKG, env. 0.002 mSv pour KKL et env. 0.003 pour KKM. Dans le cas des petits enfants (< 1 an), ces doses atteignent env. 0.0035 mSv par an au voisinage de KKL et 0.0045 mSv par an pour KKM. Pour ces installations, la contribution majeure provient des rejets atmosphériques: essentiellement du ^{14}C pour Leibstadt avec, en plus, à Mühleberg la contribution rémanente des résines rejetées en 1986. Notons que les doses reçues par les personnes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires citées plus haut ont été calculées sur la base des rejets effectifs, en appliquant des modèles de dispersion et en tenant compte des temps de séjour, des habitudes alimentaires et de nombreux paramètres biologiques, physiologiques et environnementaux (voir directive G14 de l'IFSN pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

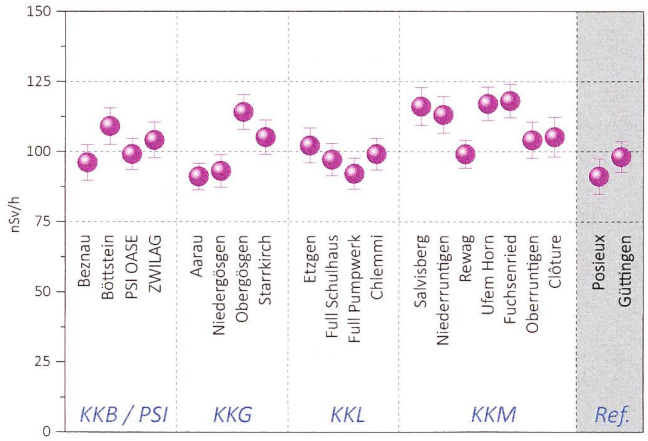


Figure 2:
Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectués en 2019 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).*

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres thermoluminescents (TLD) et par des mesures périodiques effectuées par l'IFSN à la clôture des installations. Les résultats de cette surveillance ont mis en évidence une contribution clairement mesurable du rayonnement direct en certains points de la clôture des réacteurs à eaux bouillantes, à savoir, Leibstadt et Mühleberg, ainsi que, dans une moindre mesure, au PSI (voir Chapitre 8.2). A Mühleberg, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation de la dose ambiante annuelle de 1.3 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel qui s'élève à 0.7 mSv/an). La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint 1.2 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel de 0.6 mSv/an). Ces valeurs respectent l'Art.79 de l'ORaP sur la limitation des doses ambiantes en dehors des secteurs contrôlés et surveillés. En effet, cet article stipule que la dose ambiante ne doit pas dépasser 0.02 mSv par semaine aux endroits situés à l'extérieur de ces secteurs où peuvent séjourner durablement des membres du public. Cette valeur peut être dépassée jusqu'à 5 fois (0.1 mSv/semaine) dans les endroits où personne ne séjourne durablement, comme c'est le cas à la clôture des centrales nucléaires. Il convient de relever qu'il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne, puisque le temps de séjour n'est pas considéré. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside durant de longues périodes en ces endroits.

Par ailleurs, une dosimétrie d'ambiance du rayonnement des neutrons et des gammas est 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. 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 2019 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. En seconde partie d'année des valeurs non nulles ont par contre été enregistrées, mais restant faibles (valeur maximale de 0.036 mSv/trimestre). 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 de PSI-West en 2019. Autour de SwissFEL, les valeurs sont environ 1.5 fois plus élevées qu'à PSI West mais restent au niveau de la radiation ambiante.

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.

Après une année de transition, où les nouvelles stations du réseau automatique de mesure de la radioactivité dans l'air URAnet aero et les anciens collecteurs d'air à moyen débit (FWP) situés à proximité des centrales nucléaires étaient simultanément en service, ces derniers ont été démontés début 2019. La surveillance de la radioactivité dans l'air dans le rayon d'influence des centrales nucléaires est donc, depuis 2019, 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.

Tableau 2:
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2019.

Lieu	Valeur min/max (Bq/l)	Médiane (Bq/l)
Niederruntingen * (environs KKM)	< 2 - 2.3	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 - 2.4	-
Full (environs KKL) *	< 2 - 5.7	-
Beznau (environs KKB) **	4.9 - 31.3	9.8
PSI **	< 1.7- 100	5.0
ZWILAG **	< 1.7- 21.0	5.8

* mesures OFSP / ** mesures PSI

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, qui a été mise en arrêt le 20 décembre 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 n'a pu être mis en évidence par le réseau URAnet aero en 2019 (voir aussi chapitre 4.1). Les activités du ^{137}Cs sont en effet restées inférieures à la limite de détection d'environ 1 mBq/m^3 (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/m^3 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. Par contre, comme les années précédentes, des traces de ^{24}Na, un radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15h) produit par exemple dans les accélérateurs de particules des centres de recherche, ont également été sporadiquement mesurées dans les filtres HVS de cette station. La concentration maximale mesurée s'élève à 340 ± 50 µBq/m^3 et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immissions dans l'air fixée dans l'ORaP à 48 Bq/m^3.

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

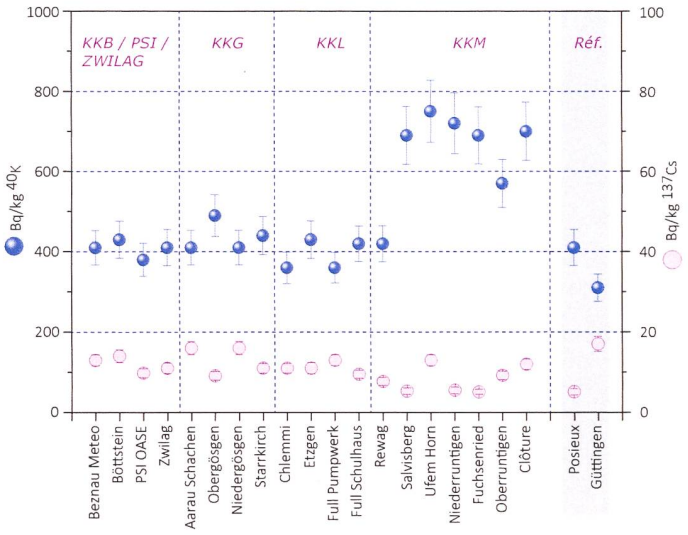


Figure 3:
^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2019 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisée).

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, notamment au voisinage du PSI. Des concentrations mensuelles de tritium voisines de 100 Bq/l ont ainsi été mesurées au voisinage du PSI en février et octobre 2019. Ces valeurs sont significativement plus élevées que celles habituellement mesurées dans les stations référence, mais n'ont que peu d'impact radiologique puisque qu'une telle concentration ne représente que 0.5% de la valeur limite d'immissions fixée dans l'ORaP à 20'000 Bq/l pour le ^{3}H dans les eaux accessibles au public.

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C. Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2019 une augmentation maximale, par rapport à la valeur de référence pour la Suisse, de 102 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt et de 91 pour mille aux environs de la centrale de Mühleberg. 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.

Un programme particulier de prélèvements et de mesures d'échantillons d'air a par ailleurs été conduit par l'Université de Berne au début de la révision de la centrale nucléaire de Gösgen, au moment du relâchement de la surpression de la cuve du réacteur. L'objectif de ces mesures étaient de fournir une estimation de l'émission maximale en $^{14}CO_2$, mais également en méthane radioactif, à savoir $^{14}CH_4$. Ainsi, pendant 8 heures, 18 échantillons d'air au total ont été prélevés en 5 endroits différents, au voisinage de la centrale. Les résultats montrent que les émissions de ^{14}C dans l'air sous forme de méthane sont bien supérieures à celles sous forme de dioxyde de carbone (73%, 27% resp). Cependant, les émissions de ^{14}C sous forme de méthane n'ont que peu de conséquences radiologiques, car le méthane - contrairement au dioxyde de carbone - n'est pas directement absorbé par les plantes via la photosynthèse et n'est donc pas absorbé dans la chaîne alimentaire. Les résultats détaillés de ce programme sont à consulter au chapitre 7.1

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 2019 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 2019. Afin de caractériser les sites du point de vue des contributions individuelles à l'exposition externe du public, l'OFSP procède depuis les années 80 à des mesures par spectrométrie gamma in situ. Les résultats correspondants confirment les résultats précédents et montrent que les valeurs enregistrées au voisinage des installations nucléaires ne se distinguent pas de celles mesurées sur les sites de référence.

Afin de pouvoir évaluer l'impact radiologique éventuel des travaux de désaffectation de la centrale nucléaire de Mühleberg qui débuteront en 2020, un programme de mesures complémentaires a été initié en 2017 par l'IFSN et l'OFSP pour une durée de 3 ans. La situation radiologique au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg est généralement bien connue étant donné que le site fait l'objet d'une surveillance régulière depuis le début de la période d'exploitation de la centrale. Toutefois, des radionucléides spéciaux, qui n'ont jamais ou sporadiquement été analysés dans les échantillons environnementaux en régime d'exploitation sont susceptibles d'être émis ou de devenir prépondérants au cours des travaux de désaffectation. Ce programme comprend donc l'analyse de radionucléides spéciaux (^{55}Fe, ^{63}Ni, émetteurs alpha, ^{3}H) dans le milieu terrestre (sol, denrées alimentaires) et aquatique (sédiments), mais également des mesures in situ supplémentaires, sur des sites situés à proximité immédiate de la centrale. En effet, contrairement à un rejet éventuel par voie atmosphérique tel qu'il pourrait se produire en période d'exploitation, l'éventuel impact des travaux de désaffectation devrait être plus localisé dans un périmètre restreint.

Les résultats des mesures réalisées entre 2017 et 2019 par le PSI sur mandat de l'IFSN ont fait l'objet d'un rapport qui a été transmis à l'IFSN début 2020. Les conclusions de ce rapport sont résumées au chapitre 8.2.

Les résultats complets des mesures «Point zéro Désaffectation» réalisées par le PSI, l'IRA, l'OFSP et le laboratoire cantonal de Berne feront l'objet d'un rapport séparé en 2020.

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

Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1 il y a une dizaine d'années, la majeure partie des produits d'activation tels que le ^{54}Mn, le ^{58}Co et le ^{60}Co était rejetée dans les eaux fluviales par la centrale de Mühleberg. Mais depuis 2016 les activités rejetées (hors tritium) par cette dernière ont à leur tour significativement baissé à tel point qu'elles sont depuis 2018 inférieures à celles rejetées par les centrales de Beznau et de Leibstadt. En 2019, les rejets d'effluents radioactifs liquides par la centrale nucléaire de KKM ont été encore plus faibles (avec le ^{60}Co et le ^{54}Mn comme isotopes dominants). Comme corolaire à cette diminution des rejets, et comme au cours des deux années précédentes, aucune trace de ^{54}Mn ou des isotopes du cobalt n'a pu être mise en évidence en 2019 dans les échantillons d'eau de l'Aar ou du Rhin, que ce soit à Hagneck, Klingnau ou Pratteln.

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

Les concentrations mensuelles en ^{3}H enregistrées en 2019 dans les eaux de l'Aar à Brugg/AG ainsi que celles du Rhin prélevées près de Weil/D, en aval de Bâle, sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l à l'exception de la période avril-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen, avant la révision.

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

Comme conséquence de la diminution importante des rejets d'effluents liquides, en particulier par la centrale de Mühleberg, aucune trace des isotopes du cobalt n'a été retrouvée dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar et le Rhin en 2019. Ces derniers étaient pourtant systématiquement mesurés dans ce type d'échantillon par le passé. Ainsi, hormis le ^{137}Cs, présent dans pratiquement tous les échantillons de sédiment de l'Aar et du Rhin et qui provient essentiellement de la remise en suspension d'anciennes contaminations, seules des traces sporadiques de ^{54}Mn ont pu être mises en évidence dans les sédiments prélevés à Hagneck ainsi qu'à Klingnau, en 2019.

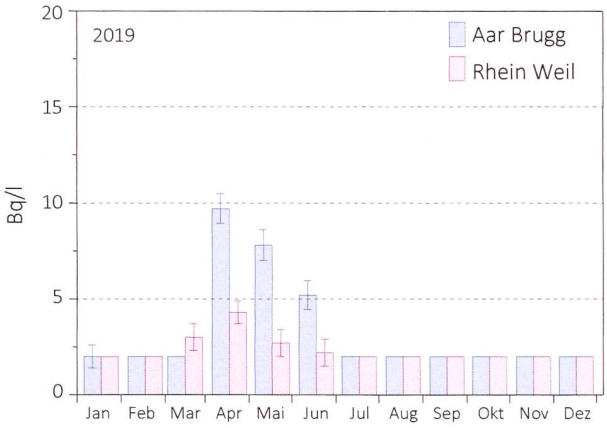


Figure 4:
Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2019.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval de KKM, KKB et KKL en 2019 n'ont révélé la présence d'aucun émetteur gamma d'origine artificielle, autre que le ^{137}Cs mesuré en très faible concentration (1 Bq/kg) dans le poisson pêché dans le Rhin, près de Augst.

Comme chaque année, un échantillon de plantes aquatiques a été prélevé en 2019 dans chacune des stations de surveillance. Contrairement aux années précédentes, aucun radionucléide d'origine artificielle n'a été décelé dans ces échantillons. Le constat est le même pour l'examen des échantillons des eaux des nappes phréatiques prélevées à Aarberg, Döttingen et Pratteln.

Notons finalement que les résultats des mesures de $^{239+240}Pu$ et de ^{241}Am effectuées par l'IRA sur différents échantillons de l'environnement aquatique (eaux de l'Aar et du Rhin, sédiments, poissons, plantes aquatiques) collectés en aval des centrales nucléaires ont montré que les rapports isotopiques $^{241}Am/^{239+240}Pu$ observés sont proches de 0.4, indiquant une contribution très majoritaire des retombées des essais nucléaires des années 60 (voir chapitre 7.2).

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.

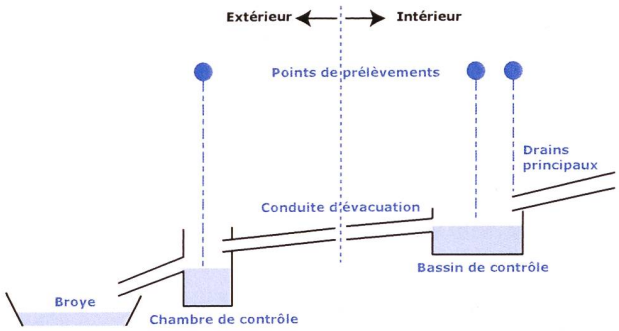


Figure 5 :
Représentation schématique du système de drainage de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens.

En 2019, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4 heures 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 2019. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co, ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.2 à 0.5 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^{3}H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2019 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à 7.0 ± 2.8 Bq/l et 6.3 ± 1.8 Bq/l respectivement. Une valeur légèrement plus élevée, atteignant 14.7 ± 0.7 Bq/l (soit le double de la valeur habituellement mesurée) a été enregistrée dans l'échantillon prélevé dans le BdC en octobre. Dans l'échantillon prélevé à la même période dans la CdC, l'activité spécifique du tritium était de 10.7 ± 0.5 Bq/l. Les valeurs enregistrées le mois suivant étaient à nouveau conformes à la normale. Cette très légère augmentation n'est toutefois pas comparable à celles enregistrées fin 2011 et début 2012 (jusqu'à 230 Bq/l), qui avaient nécessité la mise en place d'un programme spécifique. A cette exception près, les valeurs mesurées sont en constante diminution depuis le début de la surveillance en 2001, ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive (demi-vie du tritium = 12.32 ans).

Pour la mesure du ^{90}Sr, deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Aucune activité supérieure à la limite de détection de 8 mBq/l n'a été mise en évidence en 2019.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2019. Les doses résultant du fonctionnement des centrales nucléaires pour la population avoisinante sont restées nettement inférieures aux limites réglementaires. Les calculs effectués à partir des rejets effectifs et du rayonnement direct en se basant sur des modèles de transfert jusqu'à l'homme indiquent que l'impact dosimétrique des centrales nucléaires n'a pas dépassé la valeur directrice liée à la source de 0.3 mSv par an. Les calculs de dose effectués de manière indépendante par le PSI et les autorités de surveillance ont montré que les doses pour la population avoisinante générées par le centre de recherche sont également restées nettement inférieures à la valeur directrice liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour l'ensemble du site PSI/ ZWILAG.

Les mesures effectuées dans tous les compartiments environnementaux ont mis en évidence un faible marquage du milieu : la détection du rayonnement direct, du ^{14}C issu des rejets atmosphériques et des produits d'activation (^{54}Mn) présents dans les rejets liquides dans les sédiments témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations dans l'année sous revue.

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

8.6
CERN - Rejets et environnement
(Mesures CERN)

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

Résumé

Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que pour 2019, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose efficace délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.00006 mSv, soit 0.02 % de la limite ; il conviendra de noter que les installations du CERN étaient pratiquement toutes à l'arrêt durant l'année. Cette dose négligeable a été induite par les rejets de radioéléments dans les cours d'eau. A l'exception de quelques échantillons prélevés dans deux cours d'eau, aucun radioélément n'a été détecté dans le cadre du programme de surveillance des immissions. Le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN a donc été particulièrement faible.

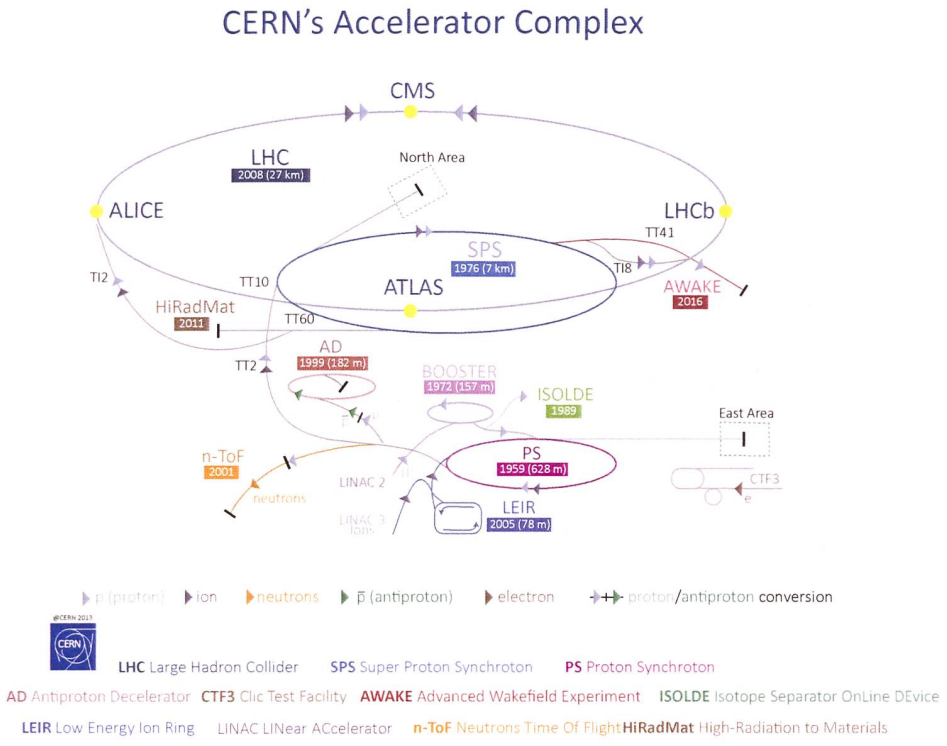


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire en fin de chapitre).

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 dif-

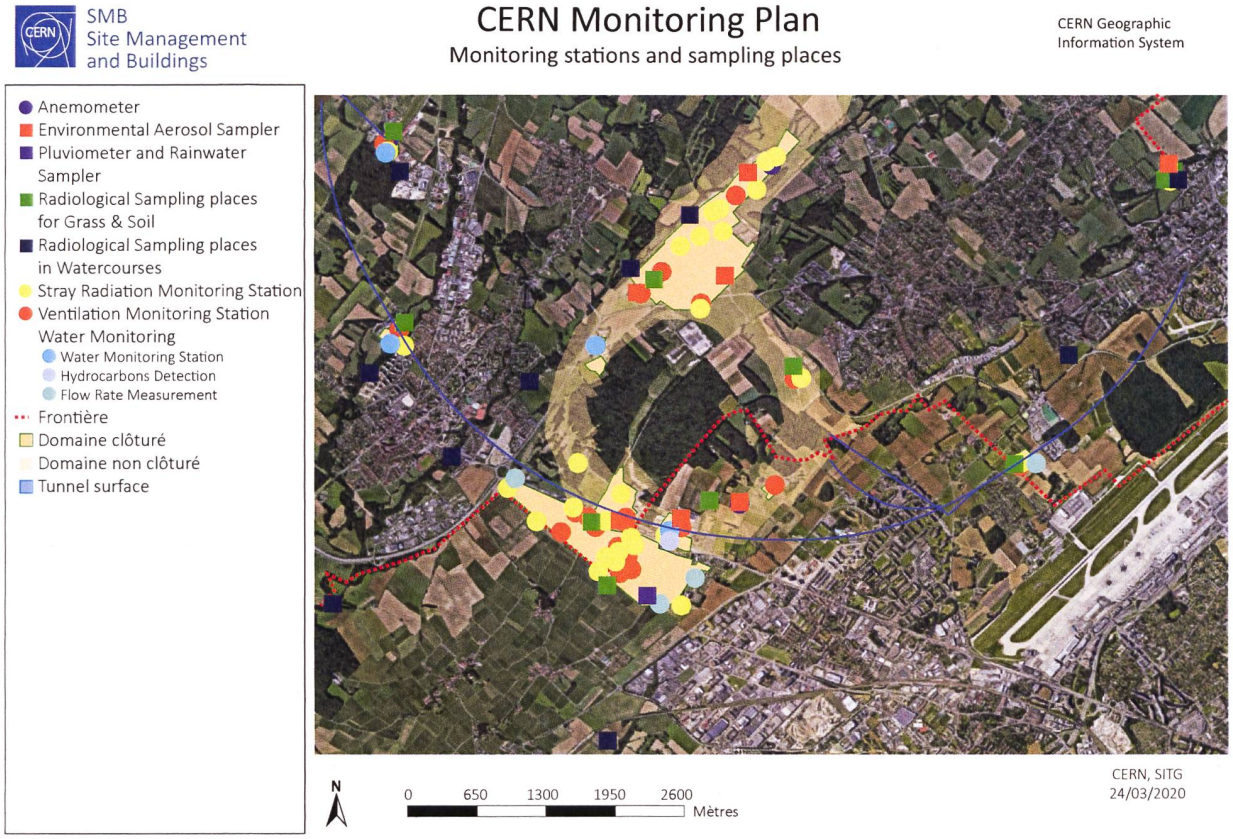


Figure 2:
Région frontalière franco-suisse: sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS) et d'une partie du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonnage du CERN qui concernent le territoire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

fusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Conséquemment, le rayonnement diffusé, les effluents gazeux et liquides sont surveillés en continu (voir Figure 2).

En termes d'impact environnemental, le risque radiologique induit par des installations mettant en jeu des accélérateurs est très faible. Maintenir un faisceau de particules en orbite requière une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et 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: voisins.web.cern.ch/fr/radiation.

Lorsque les accélérateurs sont arrêtés, l'émission atmosphérique de gaz de courtes demi-vies 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 ainsi 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 prédis par des calculs. Chaque station est équipée d'une chambre d'ionisation argon dédiée à la mesure en continu des photons et des particules chargées et pénétrantes, comme les muons, ainsi que d'un moniteur de neutrons. En 2019, 40 stations de ce type étaient en opération. Les points d'extraction d'air, d'où des substances radioactives peuvent être émises, sont équipés de stations de surveillance qui mesurent en continu les radionucléides gazeux à demi-vie courte et échantillonnent les aérosols sur des filtres périodiquement analysés en laboratoire. En 2019, 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 2019); 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), 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 (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 2019

Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2019

Le deuxième long arrêt du CERN, le Long Shutdown 2 ou simplement LS2, a débuté décembre 2018, tandis que la remise en service du complexe des accélérateurs s'effectuera progressivement fin 2020.

En 2019, les activités pouvant avoir un impact radiologique sur l'environnement étaient minimes. Le LINAC 4 a fait l'objet de tests avec de faibles intensités de faisceau. En parallèle, l'installation MEDICIS a effectué des séparations d'isotopes produits par d'autres organisations, tandis que certaines activités impliquant des tirs radiographiques sur sites ont été menées.

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

Tableau 1:
Rejets radioactifs dans l'air en 2019.

Origine du rejet	Bêta aérosol	Tritium	^{131}I
	MBq	GBq	MBq
PS BOOSTER	< LD	3.6	< LD
ISOLDE via MEDICIS*	< 0.01	4.0	< LD
ISOLDE	< 0.01	3.4	< 0.01
Anneau principal PS	< LD	4.1	< LD
n-TOF	< LD	0.1	< LD
East Area	< LD	< 0.01	< LD
TT10 injection PS-SPS	< LD	7.4	< LD
SPS BA5	< LD	2.0	< LD
HIRADMAT	< LD	3.9	< LD

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

Rayonnement direct

Les installations étant à l'arrêt et le LINAC 4 faisant l'objet de tests à faibles intensités, les niveaux de rayonnement diffusé sont restés nuls. Cependant, d'autres activités impliquant des tirs radiographiques effectués en dehors des heures ouvrées ont conduit à une petite augmentation du débit de dose gamma à la barrière du site de Meyrin, en zone de faible passage. L'équivalent de dose ambiant intégré à l'année est de 1 µSv, tandis que la dose efficace reçue par le public est négligeable.

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère qui concernent le territoire suisse sont résumés au Tableau 1. Peu après l'arrêt des accélérateurs, certaines installations continuent à rejeter de faibles quantités (a) d'émetteurs bêta, (b) de tritium sous forme vapeur (HTO) ainsi que (c) de certains éléments volatiles tels que les isotopes de l'iode, représentés par l'^{131}I. Cette dernière catégorie est produite par irradiation de cibles composées d'éléments lourds, telles qu'exploitées par les expériences ISOLDE et n-TOF. Noter qu'en règle générale, après un temps d'arrêt de quelques semaines, les installations ne rejettent plus que de faibles quantités de tritium sous forme vapeur qui diffuse des composantes.

Rejets de substances radioactives dans les cours d'eau

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

- le tritium sous forme aqueuse (HTO) (a)
- le ^{22}Na (b)

Le Tableau 2 présente les rejets de 2019, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés.

Tableau 2 :
Rejets radioactifs dans les cours d'eau en 2019.

Origine du rejet	Tritium	^{22}Na	Rejeté dans:
	GBq	MBq	
Site de Prévessin, SPS	14	3.4	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	0.08	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	0.04	< LD	Le Lion (F)
Site SPS BA6 + site LHC PA1	0.07	< LD	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	0.25	< LD	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS, rejet par le site du LHC PA8	4.1	< LD	Le Nant (F)

Surveillance des immissions

Le programme de surveillance des immissions induites par les rejets atmosphériques n'a mis aucun radioélément d'origine artificielle en évidence.

Concernant l'environnement aquatique et comme pour les années précédentes, des radionucléides ont été mesurés dans des échantillons ponctuels prélevés dans deux rivières. L'échantillon ponctuel d'eau de la rivière le Nant (F) contenait du tritium à hauteur de 2.2 ± 1.3 Bq/l, une valeur faible, mais sensiblement plus élevée que moyennes usuellement mesurées dans les rivières suisses. Les échantillons de bryophytes et de sédiments prélevés dans le Lion (F) contenaient du ^{54}Mn en concentrations respectives de 30 ± 4 Bq/kg et 0.5 ± 0.3 Bq/kg (masses sèches). Les bryophytes sont d'excellents bioaccumulateurs de pollution. Alors que la mesure de l'eau de rivière est une valeur instantanée, ces végétaux, qui peuvent être assimilés à des collecteurs, permettent d'identifier des radionucléides ayant été présents dans l'eau.

Aucun autre radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les autres échantillons d'eau, de bryophytes et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collectés en septembre. Bien que les radionucléides aient été mesurés dans des échantillons provenant du territoire français, ils sont mentionnés dans ce présent rapport car le Lion (F) rejoint l'Allondon (F/CH), qui termine son cours dans le Rhône (CH/F), tandis que le Nant (F) est un affluent du Gobé-Vengeron (F/CH) qui se déverse dans le lac Léman (CH). Le Nant d'Avril (CH), dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches, fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève, mandaté par l'Office Fédéral de la Santé Publique (se référer au chapitre 8.7).

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 ambiante mesurés aux barrières du site et des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion amélioré basé sur les directives [3, 4]. La dose efficace estimée de manière conservative à 0.00006 mSv est induite par des rejets tritium dans Le Nant (F).

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 2019 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 négligeable de 0.00006 mSv reçue par les membres du public a été induite par des rejets de tritium dans les cours d'eau.
- Des radionucléides ont été détectés dans des échantillons prélevés dans deux rivières. Les valeurs de concentration sont restées inférieures aux limites d'immission applicables [2]. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN est très faible.

Références
[1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
[2] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (état au 01.02.2019), 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, Bd Carl-Vogt 66, Genève

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE) du CERN, l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnements au voisinage du centre de recherche. L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2019 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 2019, 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.

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 (12 dosimètres à thermoluminescence-TLD- évalués par l'IRA) et mesures instantanées de l'équivalent de dose ambiant effectuées par l'OFSP sur 9 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants.
- Air: 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; mesure en continu de l'iode-131 gazeux.
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel, mesure du tritium par l'OFSP).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) et végétaux ainsi que certains produits locaux (comme le ^{3}H dans le vin).

A noter qu'une grande partie des installations du CERN étaient à l'arrêt pendant l'année 2019 (2ème long arrêt technique du Grand collisionneur de hadrons - LHC). Seuls le LINAC 4 et l'installation MEDICIS ont été (partiellement) en service.

Mesures de l'exposition ambiante

Treize sites ont été surveillés en 2019, 5 d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français) et 7 sur le parcours du LHC. En plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée.

Les mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP, ont montré que les doses des photons enregistrées au cours de l'année 2019 correspondaient partout à l'irradiation naturelle (environ 0.2 mSv par trimestre), résultat attendu en cette période de long arrêt technique des installations. Les doses des neutrons, sont quant à elles, généralement restées inférieures à la limite de détection ou étaient faibles avec de grandes incertitudes.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2019 sur 9 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants n'ont par ailleurs montré aucune influence du centre de recherche sur l'exposition ambiante due au rayonnement gamma. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant (H*(10)) pour les gammas se sont échelonnées entre 83.5 et 108 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 98 ± 6 nSv/h; moyenne des sites distants 98 ± 7 nSv/h).

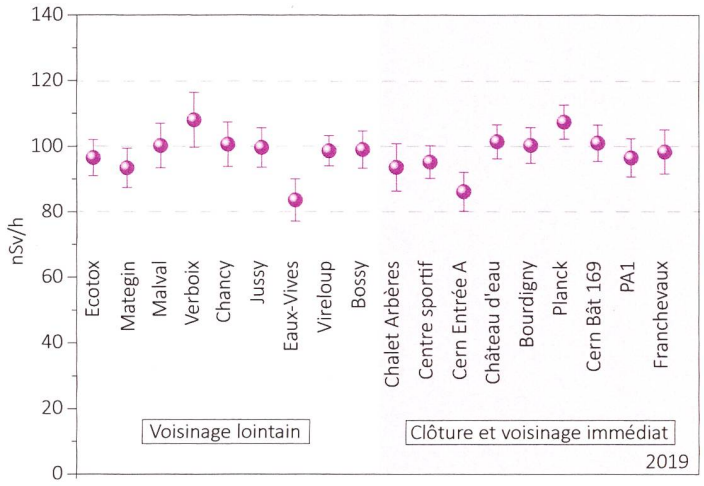


Figure 1:
Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant H(10) effectuées par l'OFSP en 2019 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.*

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 2019. 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 2 à 5 mBq/m^3 pour le ^{137}Cs pour un temps de mesure de 12h) en 2019. Le moniteur dédié à la surveillance de l'^{131}I sous forme gazeuse n'a révélé aucune valeur supérieure à la limite de détection de 50 - 60 mBq/m^3.

Les résultats des mesures hebdomadaires des filtres aérosols à haut débit (HVS) du CERN ont confirmé, comme les années précédentes, la prédominance des radioéléments d'origine naturelle, tels que ^{7}Be et ^{210}Pb (cf figure 2). Le cas du ^{7}Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production dans les tunnels du CERN). Le tableau 1 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de ^{7}Be mesurées en 2019 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 entre 0.1 et 0.9 µBq/m^3).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que

Tableau 1 :
Concentrations du ^{7}Be mesurées en 2019 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

Station de collection à haut débit	Valeur min/max (mBq/m³)	Moyenne (mBq/m³)
CERN (Meyrin/GE)	1.1 - 7.3	4.1 ± 1.5
Posieux/FR	0.8 - 7.6	4.4 ± 1.7
Klingnau/AG*	0.8 - 7.2	3.7 ± 1.5
Güttingen/TG	1.0 - 7.6	3.9 ± 1.5
Cadenazzo/TI	0.8 - 8.6	4.8 ± 2.0

de l'accident de Tchernobyl ont, comme partout en Suisse, été détectées à plusieurs reprises, mais les activités sont restées très faibles (valeur maximale de 0.9 ± 0.4 µBq/m³).

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

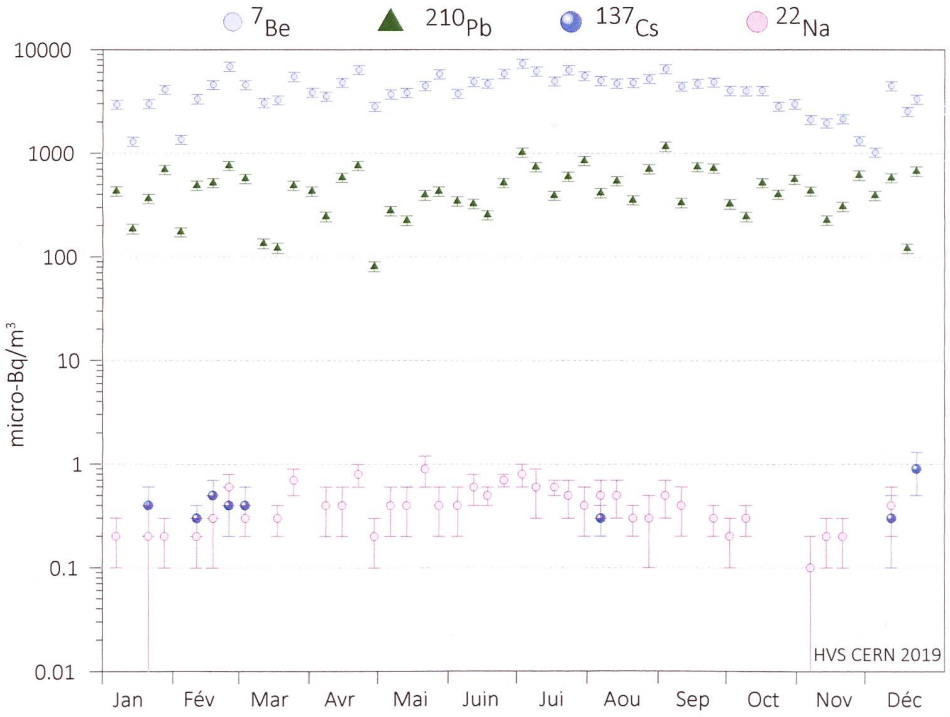


Figure 2 :
Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2019.

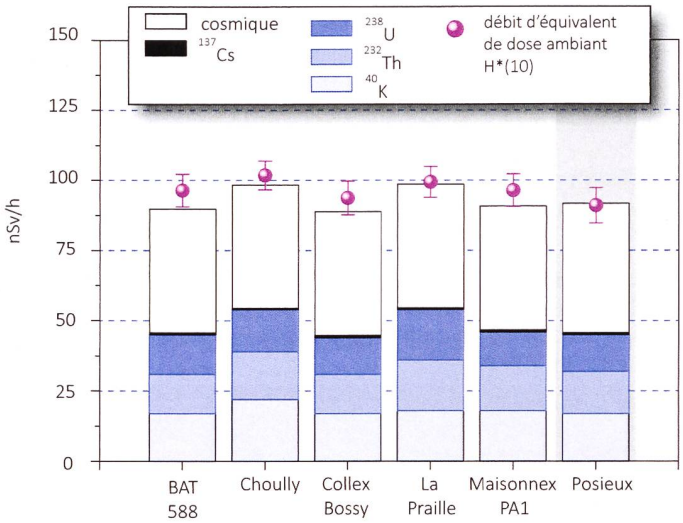


Figure 3 :
Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H(10) calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage du CERN en 2019. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) avec chambre d'ionisation est également représentée.*

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma in situ permettent de distinguer les contributions d'origines 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 (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au chapitre 3.1).

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

Mesures dans le milieu aquatique

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle mesurable en 2019, en dehors de traces sporadiques de ^{137}Cs (maximum de 1 ± 0.5 mBq/l). 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 mené 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].

Vingt-six échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collec- teur automatique) dans le Nant d'Avril entre le 30 novembre 2018 et le 21 novembre 2019, avec un temps d'intégration de 11 à 16 jours par échantillon.

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

Dans les échantillons d'eau brute, outre les radioisotopes géogènes, le ^{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 0.24 Bq/l. La plus forte activité spécifique de ^{7}Be (0.64 ± 0.02 Bq/l) a été mesurée au mois de juin 2019.

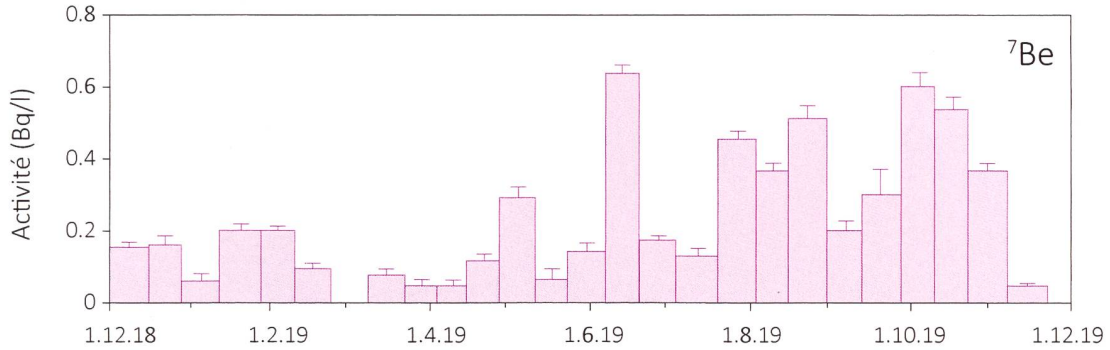


Figure 4 :
Activités du ^{7}Be mesurées dans les eaux brutes du Nant d'Avril entre décembre 2018 et novembre 2019.

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 deux reprises (0,002 ± 0,001 Bq/l) avec des activités très proches des limites de détection. Le ^{22}Na parfois mesuré dans les eaux du Nant d'Avril, n'a pas été détecté au cours de l'année sous revue. Par ailleurs, les mesures du tritium effectuées par l'OFSP dans les échantillons mensuels du Nant d'Avril n'ont pas mis en évidence de concentrations supérieures à la limite de détection de 2 Bq/l.

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 2018-2019 est ainsi de 1'791 MBq/an au minimum et de 2'016 MBq/an au maximum. Ces valeurs se situent dans la moyenne haute des périodes de mesure précédentes (fig. 5).

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 382 et 1'319 Bq/kg, et entre 5.0 et 9.3 Bq/kg. Aucun radioisotope 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.

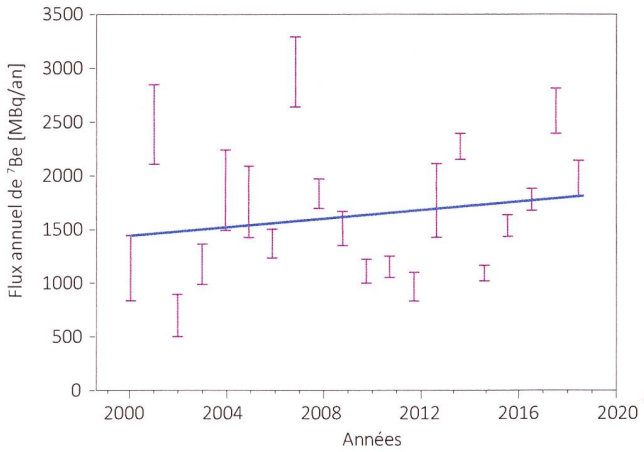


Figure 5 :
Estimation des flux annuels minimum et maximum de ^{7}Be dans le Nant d'Avril (données Département F.-A. Forel)

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 début 2019, 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 23.09.2019 au 25.10.2019), se sont échelonnées entre 121 et 1'150 Bq/kg pour le ^{7}Be et entre 4.5 et 15.8 Bq/kg pour le ^{137}Cs.

Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^{7}Be variant entre 224 et 1'332 Bq/kg. Le point PA6, qui montrait en 2018 une forte activité (3'353 Bq/kg), est cette année dans les valeurs mesurées les années précédentes (519 Bq/kg). L'activité spécifique du ^{137}Cs était quant à elle presque toujours inférieure à la limite de détection, à l'exception d'un seul site, où une valeur de 6.7 Bq/kg a été mesurée.

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

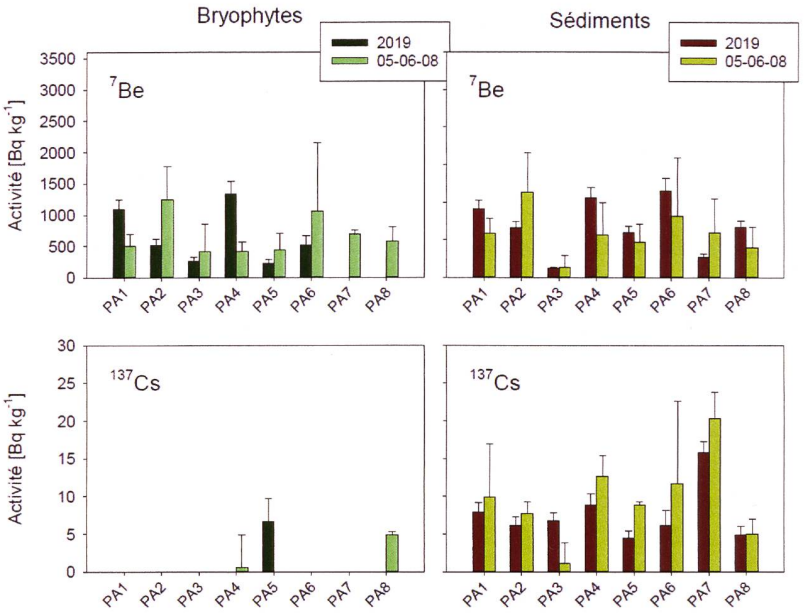


Figure 6 :
Activités du ^{7}Be et du ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8) en 2019 comparées aux valeurs moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées en 2005, 2006 et 2008 (valeurs 05-06-08), avant la mise en service du LHC. Il n'y a pas d'échantillon de bryophytes aux points 7 et 8.

contaminés par les essais nucléaires dans l'atmosphère et par l'accident de Tchernobyl. Aucun radioélément provenant du CERN n'a été détecté cette année. Les radioéléments parfois détectés dans le Nant d'Avril au cours des périodes de surveillance précédentes, comme le ^{22}Na ou certains isotopes du cobalt (^{57}Co, ^{58}Co, ^{60}Co) n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes mesurés pour contrôler les immissions dues au 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 2019, étant donné que la majorité des installations étaient à l'arrêt.

Ainsi contrairement aux années précédentes, aucune trace de certains radionucléides 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 2019. Les résultats des mesures dans l'air, le milieu terrestre ou encore les eaux et sédiments du Nant d'Avril ne se sont ainsi aucunement distingués de ceux enregistrés dans les stations de mesures de référence, situées hors influence du centre de recherche.