

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

Objektyp: **Group**

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**

Band (Jahr): - **(2011)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz

Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse

Ergebnisse 2011
Résultats 2011



8 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

8 Surveillance des installations nucléaires: Emissions et Immissions



Inhatverzeichnis / Sommaire

8.1 Emissionen aus den Kernanlagen	125
Zusammenfassung	125
8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen	134
Zusammenfassung	134
8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)	135
Zusammenfassung	135
Übersicht	135
Systeminstandhaltung und –ergänzung	137
Systemverfügbarkeit und Störungen	137
Qualitätssicherung	138
Messergebnisse	138
8.4 Ortsdosimetrie in der Umgebung der Kernanlagen	141
Einleitung	141
Auswertemethode	141
Ergebnisse	143
Fazit	146
8.5 Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)	147
Zusammenfassung	147
Einleitung	147
Radiochemische Trennmethode(n) (Boden)	148
Staubfangplatten	148
Resultate und Diskussion	148
8.6 Les installations nucléaires et l'environnement	150
Résumé	150
Introduction	150
Méthodologie	151
Résultats	152
Conclusions	155
8.7 Environnement du CERN (mesures OFSP)	156
Résumé	156
Programme de surveillance de l'OFSP	156
Mesures de l'exposition ambiante	157
Mesures dans le milieu atmosphérique	158
Mesures dans le milieu terrestre	158
Mesures dans le milieu aquatique	159
8.8 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)	161
Résumé	161
Le CERN	161
Aspects environnementaux	162
Programme de surveillance	163
Résultats 2011	163
Impact radiologique	166
Conclusions	167

8.1

Emissionen aus den Kernanlagen

F. Cartier, B. Bucher, A. Leupin

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2011 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimite. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1 für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen gemäss ENSI-Richtlinie G14 errechneten Personendosen für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2011. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c aufgelistet. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitlimiten eingehalten. Die Behörden haben die Messverfahren der Kernanlagen

mit über 170 Proben kontrolliert. Dabei wurden Aerosol- und Jodfilter sowie Abwasserproben stichprobenweise analysiert. Die Messwerte oberhalb einer definierten Untersuchungsschwelle stimmten im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit mit den Angaben der Betreiber überein. Die Untersuchungsschwelle ist für Wasser beispielsweise so festgelegt, dass Aktivitätskonzentrationen unterhalb dieser Schwelle gemäss Anhang 2 der Strahlenschutzverordnung als inaktiv gelten. Die Kontrollmessungen zeigten, dass die Abgabereglemente eingehalten wurden.

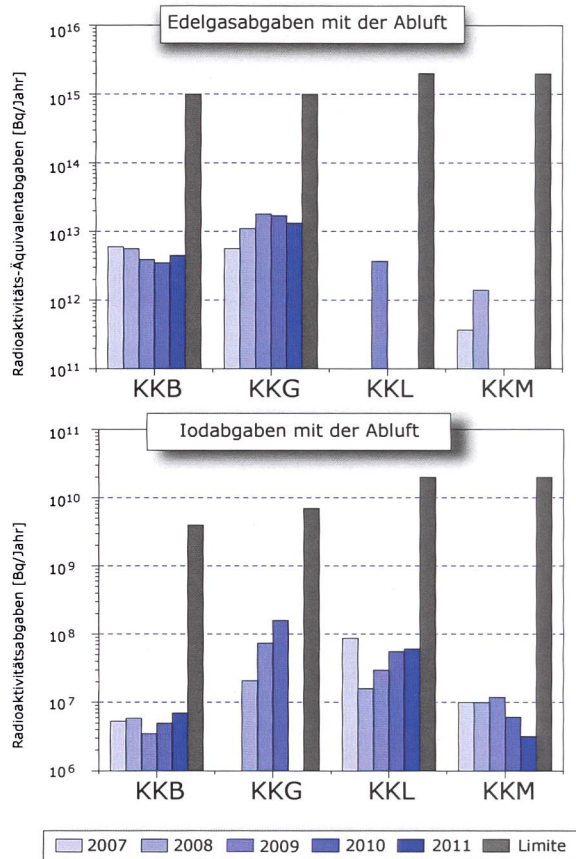
Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKG weniger als 0.001 mSv, beim KKB etwa 0.002 mSv, beim KKM etwa 0.004 mSv und beim KKL ungefähr 0.005 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2011 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts.

Das ENSI berücksichtigt bei den Dosisberechnungen auch die formell nicht limitierten ^{14}C -Abgaben, da diese seit einigen Jahren aufgrund der geringen übrigen Abgaben die Dosis dominieren. Das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C entsteht im Reaktor durch Kernreaktionen von Neutronen mit Stickstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff. Die ^{14}C -Abgaben der Kernkraftwerke sind systembedingt begrenzt, weil die Abgaberate primär von der Reaktorleistung abhängig ist. Die Kernkraftwerke haben in den letzten Jahren die ^{14}C -Abgaben gemessen und nachgewiesen, dass diese mit den Erfahrungswerten aus der Messkampagne vor etwa zwanzig Jahren und den in der einschlägigen Literatur angegebenen ^{14}C -Abgabewerten für ähnliche Anlagen korrespondieren. Das KKL führt seit längerer Zeit aus eigener Initiative ^{14}C -Messungen durch. Mitte 1998 wurde die

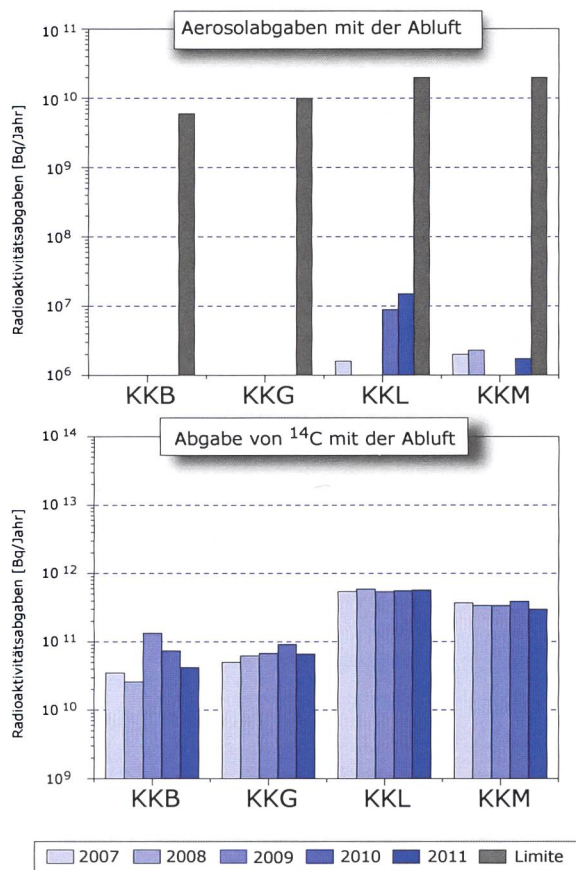
Apparatur des KKL zur Messung von ^{14}C aufgrund der Resultate einer internationalen Vergleichsmessung neu kalibriert, was dazu führte, dass die für Einzelpersonen der Bevölkerung errechnete Dosis seit 1998 etwas höher ist. Das KKG führt seit Ende 2001 Messungen der ^{14}C -Abgaben mit der Abluft durch. Die für Einzelpersonen der Bevölkerung errechnete Dosis der Jahre 2001 bis 2003 werden beim KKG im Nachhinein als um den Faktor 3 zu hoch eingeschätzt, dies aufgrund der Ergebnisse der neuen Kalibrierung der Messapparatur mit zwei diversitären Standards zu Beginn des Jahres 2004. Alle Schweizer Kernkraftwerke führten 2011 die ^{14}C - und die ^3H -Messungen auch nach Abschluss der geforderten einjährigen Messperiode auf freiwilliger Basis fort. Somit konnten auch 2011 zur Ermittlung des jeweiligen Dosisbeitrags von ^{14}C die gemessenen Werte herangezogen werden.

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 0.006 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.

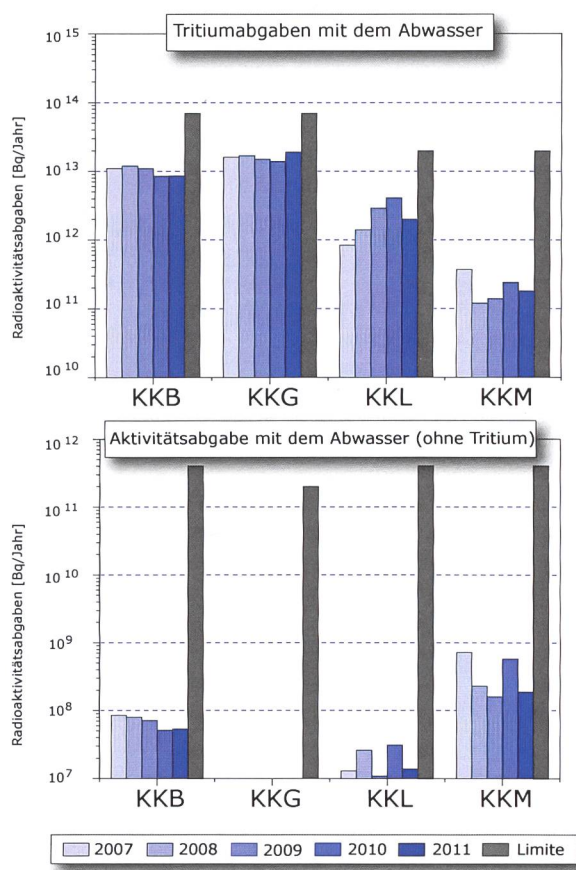
Im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) erfolgten im Berichtsjahr weitere Einlagerungen in die Lagergebäude für hoch- und mittelaktive Abfälle und im Hochregallager der Konditionieranlage. In der Plasma-Anlage fanden wiederum eine Frühjahres- und eine Herbstverbrennungskampagne statt. Die für das Jahr 2011 bilanzierten flüssigen und luftgetragenen Abgaben des ZZL stammen zum grössten Teil aus diesen Verbrennungskampagnen, bei den flüssigen Abgaben z.B. aus den Rauchgaswäschern. Sie 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.



Figur 1a: Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (2007 bis 2011) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Edelgasabgaben unterhalb von 10^{11} Bq und Abgaben von Jod unterhalb von 10^6 Bq werden im Diagramm nicht dargestellt.



Figur 1b: Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (2007 bis 2011) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Falls die Abgaben von Aerosolen unterhalb von 10⁶ Bq liegen, werden sie im Diagramm nicht dargestellt. Für ¹⁴C besteht keine Abgabelimite.



Figur 1c: Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an das Abwasser in den letzten fünf Jahren (2007 bis 2011) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Falls die Abgaben mit dem Abwasser unterhalb von 10⁷ Bq liegen, werden sie im Diagramm nicht dargestellt.

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2011 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung.
(Fussnoten siehe Ende Kap 8.1)

Ort	Medium	Art der Abgaben ¹	Bilanzierte Abgaben ²				Berechnete Jahresdosis ³		
			Messung	Normiert ^{1,2}		Limiten ⁴	mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Prozent der Limite	Erw.	10j Kind	1j Kind
KKB1 + KKB2	Abwasser 3'600 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.0·10 ⁸	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	8.6·10 ¹²	8.6·10 ¹²	7·10 ¹³	12 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	4.6·10 ¹²	4.5·10 ¹²	1·10 ¹⁵	0.5%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	2.0·10 ⁵	-	6·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	3.3·10 ⁶	-	4·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	4.2·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	0.0011	0.0019
Dosis total						0.001	0.0013	0.0021	
KKM	Abwasser 3'574 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.5·10 ⁹	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.8·10 ¹¹	1.8·10 ¹¹	2·10 ¹³	0.9%	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	8.2·10 ¹⁰	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.8·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	0.0028	0.0028	0.0027
		Iod: ¹³¹ I	3.2·10 ⁶	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	3.0·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0016
Dosis total						0.0037	0.0038	0.0043	
KKG	Abwasser 7'219 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.6·10 ⁶	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.9·10 ¹³	1.9·10 ¹³	7·10 ¹³	27 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	1.2·10 ¹³	<1.4·10 ¹³	1·10 ¹⁵	<1.4%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	3.0·10 ⁴	-	1·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	8.6·10 ⁵	-	7·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	6.6·10 ¹⁰	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001	
KKL	Abwasser 13'684 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	8.9·10 ⁷	-	4·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	2.0·10 ¹²	2.0·10 ¹²	2·10 ¹³	10 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	9.1·10 ¹⁰	-	2·10 ¹⁵	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.1·10 ⁷	-	2·10 ¹⁰	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: ¹³¹ I	6.1·10 ⁷	6.1·10 ⁷	2·10 ¹⁰	0.3%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	5.7·10 ¹¹	-	-	-	0.0021	0.0028	0.0048
Dosis total						0.0022	0.0029	0.0049	
ZZL	Abwasser 468 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2.8·10 ⁸	-	2·10 ¹¹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.1·10 ¹¹	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-γ-Aerosole	4.1·10 ⁵	-	1·10 ⁹	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.5·10 ⁴	-	3·10 ⁷	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1.5·10 ⁸	-	1·10 ¹²	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	5.8·10 ¹⁰	-	1·10 ¹⁴	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
Dosis total						<0.001	<0.001	<0.001	

8.1 Emissionen aus den Kernanlagen - @BAG 2012

Tabelle 2:

Zusammenstellung der Abgaben des Paul Scherrer Instituts im Jahr 2011 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung - (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

	PSI Ost				
	Hochka- min	Saphir, Proteus	Forschungs- labor	Betriebs- Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszwi- schenlager
Abgaben im Abwasser^{2,4} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$1.6 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-
β/γ -Aerosole ⁴ , ohne Iod	$2.2 \cdot 10^8$	-	$2.4 \cdot 10^4$	-	$2.0 \cdot 10^5$
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$5.1 \cdot 10^7$	$4.5 \cdot 10^3$	-	-	$5.9 \cdot 10^3$
Tritium als HTO	$4.5 \cdot 10^{10}$	$5.2 \cdot 10^5$	-	$8.3 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^{10}$
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Kind 10j	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Kleinkinder	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert¹	<0.1%	<0.1%	<0.1%	<0.1%	<0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI ^{2,4}		
	Zentrale Fortluft- anlagen	Injektor II	C-Labor	Abgaben Bq / Jahr		
				Abwasser 1'527 m ³	Abluft	Aequiva- lent-abga- ben
Abgaben im Abwasser^{2,4} [Bq/a]						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$3.8 \cdot 10^7$	-	$7.6 \cdot 10^6$
Tritium	-	-	-	$2.1 \cdot 10^{10}$	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]						
Edelgase und andere Gase	$1.7 \cdot 10^{14}$	$1.6 \cdot 10^{10}$	-	-	$1.7 \cdot 10^{14}$	$3.7 \cdot 10^{14}$
β/γ -Aerosole ⁴ , ohne Iod	$2.8 \cdot 10^{10}$	$3.0 \cdot 10^6$	$8.9 \cdot 10^3$	-	$2.8 \cdot 10^{10}$	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$6.5 \cdot 10^7$	-	$5.8 \cdot 10^3$	-	$6.5 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^7$
Tritium als HTO	$1.2 \cdot 10^{12}$	-	-	-	$1.2 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:						
Erwachsene	0.0056	<0.00015	<0.00015	<0.00015		<0.0060
Kind 10j	0.0057	<0.00015	<0.00015	<0.00015		<0.0060
Kleinkinder	0.0056	<0.00015	<0.00015	<0.00015		<0.0060
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert¹	3.7 %	<0.1%	<0.1%	<0.1%		<4.0%

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2011:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben² - (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq/Jahr]						
	β/γ -Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
³ H		8.6·10 ¹²	1.9·10 ¹³	2.0·10 ¹²	1.8·10 ¹¹	2.1·10 ¹⁰	1.1·10 ¹¹
⁷ Be						7.0·10 ⁶	
²² Na						1.6·10 ⁶	6.2·10 ⁷
²⁴ Na		5.7·10 ⁶					
⁴⁴ Sc						5.8·10 ³	
⁴⁴ Ti						4.5·10 ³	
⁵¹ Cr		7.0·10 ⁵			2.8·10 ⁷		
⁵⁴ Mn		2.4·10 ⁶		9.7·10 ⁶	3.5·10 ⁸	8.9·10 ⁵	1.6·10 ⁵
⁵⁷ Co		1.0·10 ⁴				1.2·10 ⁵	
⁵⁸ Co		5.0·10 ⁷		3.1·10 ⁶	1.8·10 ⁸	1.1·10 ⁴	
⁶⁰ Co		5.0·10 ⁷	4.4·10 ⁵	6.4·10 ⁷	8.6·10 ⁸	8.2·10 ⁵	6.7·10 ⁵
⁶⁵ Zn				1.2·10 ⁷	3.31·10 ⁷	1.2·10 ⁴	
⁸⁸ Zr						2.5·10 ⁵	
⁸⁸ Y						2.2·10 ⁵	
⁸⁹ Sr		2.6·10 ⁶			8.1·10 ⁵		
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y		5.7·10 ⁵			1.7·10 ⁶	1.4·10 ⁶	
⁹⁵ Nb		3.0·10 ⁵					
^{99m} Tc		3.4·10 ⁵	5.1·10 ⁴				
¹⁰³ Ru						6.6·10 ⁴	
^{110m} Ag		1.2·10 ⁶					
¹²² Sb		3.5·10 ⁶					
¹²⁴ Sb		6.4·10 ⁷			7.1·10 ⁶		5.4·10 ⁴
¹²⁵ Sb		4.9·10 ⁷			1.1·10 ⁷		3.6·10 ⁶
^{123m} Te		1.1·10 ⁷	7.9·10 ⁵				
¹³² Te		2.1·10 ⁵	3.5·10 ⁵				
¹²⁵ I						1.6·10 ⁷	
¹³¹ I		1.8·10 ⁷				9.9·10 ⁴	
¹³³ I		5.0·10 ⁶					
¹³⁴ Cs		7.0·10 ⁶				4.5·10 ⁵	4.7·10 ⁵
¹³⁷ Cs		1.3·10 ⁸			1.5·10 ⁷	6.4·10 ⁶	2.0·10 ⁸
¹⁷⁷ Lu						2.8·10 ⁶	
α -Strahler	*)	< 2.0·10 ⁵	3.3·10 ⁵	3.7·10 ⁵			*)
^{234/238} U						2.1·10 ⁵	
^{239/240} Pu		2.6·10 ³					1.6·10 ³
²³⁸ Pu/ ²⁴¹ Am		5.8·10 ³					1.2·10 ³
²⁴² Cm		2.9·10 ³					1.0·10 ²
^{243/244} Cm		2.8·10 ³					7.4·10 ²

*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2010 bis und mit dem 3. Quartal 2011

Tabelle 3b:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2011:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase, Edelgase						
Tritium	$4.2 \cdot 10^{11}$	$5.2 \cdot 10^{11}$	$1.6 \cdot 10^{12}$	$9.5 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^{12}$	$5.8 \cdot 10^{10}$
^{11}C					$2.6 \cdot 10^{13}$	
^{14}C (CO_2)	$4.2 \cdot 10^{10}$	$6.6 \cdot 10^{10}$	$5.7 \cdot 10^{11}$	$3.0 \cdot 10^{11}$		$1.5 \cdot 10^8$
^{13}N					$2.7 \cdot 10^{13}$	
^{15}O					$1.1 \cdot 10^{14}$	
^{18}F					$8.5 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne					$1.3 \cdot 10^{12}$	
^{41}Ar					$3.9 \cdot 10^{12}$	
^{85}Kr					$1.6 \cdot 10^{11}$	
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$1.7 \cdot 10^{11}$					
^{133}Xe	$2.1 \cdot 10^{12}$		$2.2 \cdot 10^{10}$			
^{135}Xe	$2.0 \cdot 10^{12}$		$5.3 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^9$		
$^{135\text{m}}\text{Xe}$			$1.5 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^9$		
EG-Aequiv. ⁴⁾				$7.8 \cdot 10^{10}$		
EG: β -total		$1.2 \cdot 10^{13}$				
Andere	$2.9 \cdot 10^{11}$					
Iod						
^{123}I					$4.3 \cdot 10^7$	
^{125}I					$7.1 \cdot 10^7$	
^{131}I	$3.3 \cdot 10^6$	$8.6 \cdot 10^5$	$6.1 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^6$	
^{133}I	$1.9 \cdot 10^7$					

Tabelle 3c:

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2011:

Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]						
	β/γ -Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
⁷ Be						1.4·10 ⁵	
²⁴ Na						6.2·10 ⁴	
³⁸ S						1.8·10 ⁹	
³⁹ Cl						4.1·10 ⁹	
⁵⁴ Mn				9.0·10 ⁵	2.0·10 ⁵		
⁵⁷ Co			1.8·10 ³				
⁵⁸ Co				7.7·10 ⁴	1.3·10 ⁵		
⁶⁰ Co			2.4·10 ⁴	2.6·10 ⁶	1.0·10 ⁶	1.8·10 ⁶	3.8·10 ³
⁶⁵ Zn				2.3·10 ⁶	6.3·10 ⁴		
⁷⁷ Br						2.7·10 ⁶	
^{80m} Br						3.3·10 ⁹	
⁸² Br						6.3·10 ⁸	
^{99m} Tc						2.2·10 ⁸	
^{123m} Te			3.0·10 ³				
¹³¹ I (Aerosol)				3.3·10 ⁶	9.8·10 ⁴		
¹³⁷ Cs					4.7·10 ⁴		4.9·10 ³
¹⁴⁰ Ba				7.9·10 ⁵	3.1·10 ⁵		
¹⁴⁰ La				5.3·10 ⁵			
¹⁸¹ Re						9.4·10 ⁷	
¹⁸² Re						2.7·10 ⁸	
^{182m} Re						1.9·10 ⁶	
¹⁸³ Re						1.9·10 ⁷	
¹⁸³ Os						3.2·10 ⁸	
^{183m} Os						8.2·10 ⁸	
¹⁸⁵ Os						2.9·10 ⁷	
¹⁹³ Os						6.6·10 ⁶	
¹⁸⁵ W						5.0·10 ⁹	
¹⁹² Au						1.6·10 ⁹	
¹⁹⁴ Au						1.9·10 ⁵	
¹⁹² Hg						7.9·10 ⁸	
^{193m} Hg						2.2·10 ⁸	
¹⁹⁴ Hg						1.9·10 ⁵	
¹⁹⁵ Hg						1.8·10 ¹⁰	
^{195m} Hg						8.5·10 ⁷	
^{197m} Hg						1.1·10 ⁸	
²⁰³ Hg						6.3·10 ⁶	
Nicht spezifizierte		2.0·10 ⁵					
α -Aerosole		1.2·10 ⁴	6.0·10 ⁴	1.6·10 ⁵	2.5·10 ⁵		1.5·10 ⁴

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

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

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

Edelgase: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ angegeben. Die CA-Werte für die Edelgasnuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Immersions-Dosisfaktor von $4.4 \cdot 10^{-7}$ (Sv/Jahr)/(Bq/m³). Die unnormierte Summe der Edelgasabgaben ist in der Spalte „Messung“ angegeben.

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

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

Aerosole: Hier ist in jedem Fall die Summe der Radioaktivität ohne Normierung auf einen 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. Der Dosisbeitrag der Aerosole, welche im Berichtsjahr abgegeben wurden, ist dem gegenüber vernachlässigbar und liegt in der Grössenordnung der anderen schweizerischen Kernkraftwerke.

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

Beim PSI, bei dem andere Iod-Isotope in signifikan-

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

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

Kohlenstoff ¹⁴C: In den Tabellen ist der als Kohlendioxid vorliegende Anteil des ¹⁴C, der für die Dosis relevant ist, angegeben. Die für ¹⁴C 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 (-).

[3] Die Jahresdosis ist für Personen berechnet, die sich dauernd am kritischen Ort aufhalten, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort beziehen und ihren gesamten Trinkwasserbedarf aus dem Fluss unterhalb der Anlage decken. Die Dosis wird mit den in der Richtlinie ENSI-G14 angegebenen Modellen und Parametern ermittelt.

Dosiswerte kleiner als 0.001 mSv - entsprechend einer Dosis, die durch natürliche externe Strahlung in ca. zehn Stunden akkumuliert wird - werden in der Regel nicht angegeben. Beim PSI wird die Jahresdosis der Gesamtanlage als Summe über die Abgabestellen gebildet.

[4] Abgabelimiten gemäss Bewilligung der jeweiligen Kernanlage. Die Abgabelimiten wurden so festgelegt, dass die Jahresdosis für Personen in der Umgebung (vgl. Fussnote 3) für die Kernkraftwerke unter 0.3 mSv/Jahr respektive das Zentrale Zwischenlager in Würenlingen (ZZL) unter 0.05 mSv/Jahr bleibt. Für das Paul Scherrer Institut (PSI) sind die Abgaben gemäss Bewilligung 6/2003 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv/Jahr limitiert.

8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

F. Cartier, B. Bucher, A. Leupin

Edg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

Die Ortsdosis, respektive die Ortsdosisleistung durch externe Strahlung werden in der Umgebung der Kernanlagen und des PSI mit dem MADUK-Messnetz (siehe Kapitel 8.3), und mit Thermolumineszenzdosimetern (TLD) in der Umgebung (siehe Kapitel 8.4) sowie am Arealzaun überwacht. Zusätzlich dazu führt das ENSI vierteljährlich stichprobenweise Dosisleistungsmessungen am Arealzaun sowie bei Bedarf spezielle Messkampagnen durch. Die gemessenen Maximalwerte lagen allesamt unter den Immissionsgrenzwerten für die Direktstrahlung ausserhalb des Betriebsareals von 1 mSv pro Jahr für Wohn-, Aufenthalts- und Arbeitsräume und von 5 mSv pro Jahr für andere Bereiche nach Art. 102 Absatz 3 der Strahlenschutzverordnung.

Die Ortsdosisleistung ist im Nahbereich 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. Desweiteren können Abfalllager zu einer erhöhten Ortsdosis am Zaun beitragen.

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen etwa 0.08 $\mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.29 $\mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf diesen Momentanwerten am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 1.8 mSv (ohne natürlichen Untergrund) resultieren. Die vom KKM ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben für das Berichtsjahr nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von ca. 0.7 mSv eine Dosiserhöhung von 0.7 mSv.

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.17 $\mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 0.9 mSv pro Jahr. Die höchste mit den TLD am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Abzug des natürlichen Untergrundes von 0.7 mSv) beträgt 0.6 mSv.

Auf Grund der stichprobenweise vom ENSI gemessenen Ortsdosisleistung am Zaun des Paul Scherrer Instituts, Areal Ost ergibt sich hochgerechnet auf ein Jahr eine Ortsdosis von 0,6 mSv ohne natürlichen Untergrund. Im Jahr 2011 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert beim Areal Ost ca. 0,2 mSv (ohne natürlichem Untergrund von ca. 0,6 mSv). Der zugehörige Messpunkt liegt beim Betriebsgebäude für Radioaktive Abfälle des PSI-Ost. Beim PSI-West wurde mittels TLD eine Dosisleistungserhöhung von höchstens 0.3 mSv am Zaun nachgewiesen.

Beim KKB, KKG und beim Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) 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.

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

8.3

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)

F. Cartier, B. Bucher, A. Leupin

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Zusammenfassung

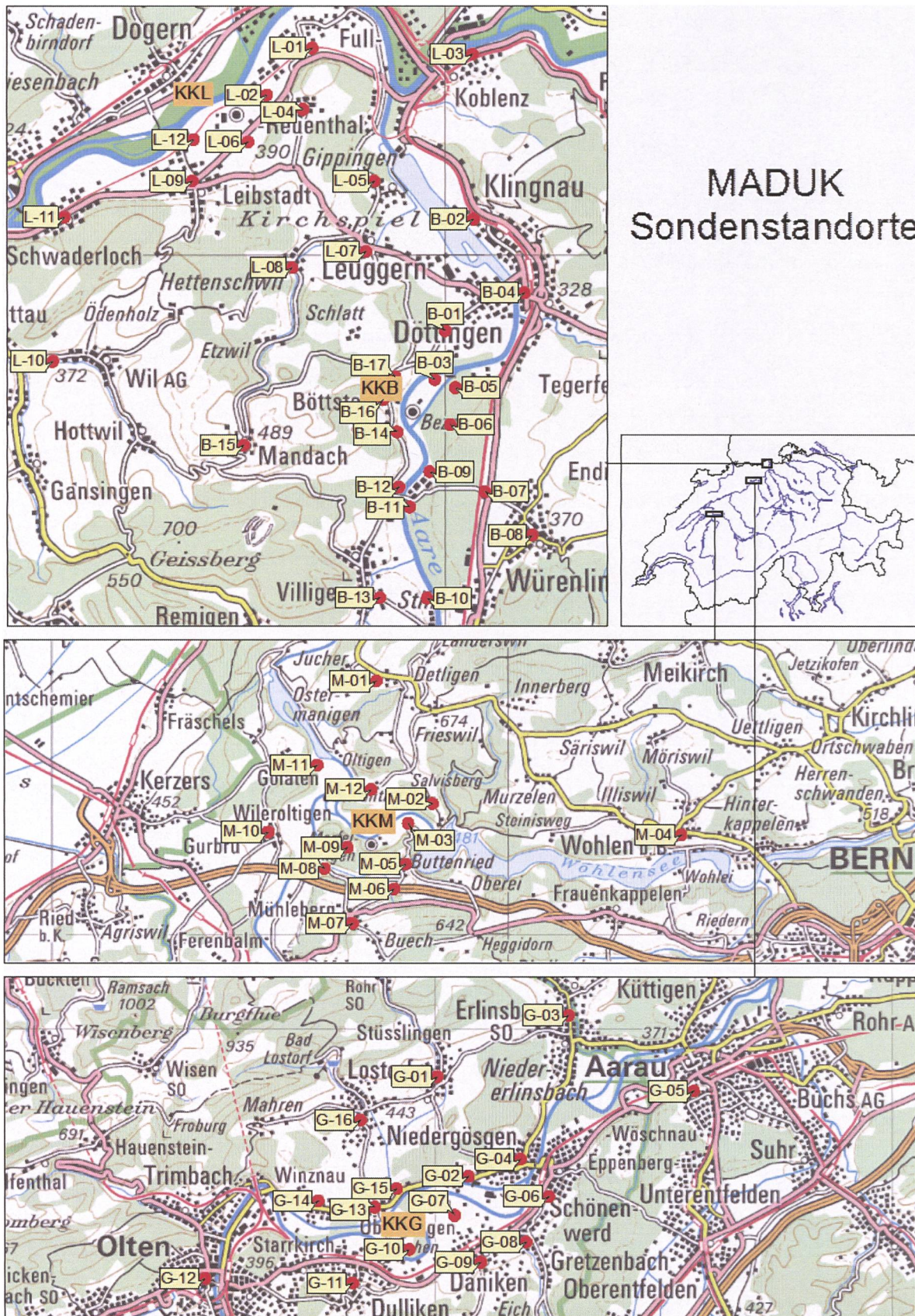
Das MADUK-System (**M**essnetz zur **A**utomatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von Anlageparametern (ANPA) und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling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

Die Messwerte im Jahr 2011 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Es wurden keine Dosisleistungserhöhungen festgestellt, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückgeführt werden konnten.

Übersicht

Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 64 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). Von den Kernkraftwerken werden Kaminemissionswerte und wichtige Anlagenparameter der Primär- und Sekundäranlage übernommen und in die MADUK-Zentrale geleitet. Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Des Weiteren sorgen verschiedene Subsysteme für den Datenaustausch mit externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM und ADPIC im ENSI. Die Figur 1 zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.

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



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

8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke - ©BAG 2012

Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahre 2011 wurde mit der Erneuerung der MADUK-Zentrale parallel zur bestehenden Infrastruktur begonnen. In einem ersten Schritt wurde die benötigte Hardware beschafft, die Datenbanksysteme aufgebaut und die ersten Erfassungstreiber migriert. Die Rechenwerte sowie die verdichteten Werte wie Stunden-, Tages- und Monatsmittelwerte werden vom operationellen System transferiert und in der neuen Datenstruktur abgelegt. Der Datenzugriff der Bedienoberfläche wurde so umgebaut, dass nun auch auf die neue Datenstruktur zugegriffen und die Daten angezeigt werden können.

Die Software auf dem Datenlogger der MADUK-Stationen wurde insofern ausgebaut, dass nun die Funktionsprüfung auch ohne Zugang zum Messkasten remote gestartet und gestoppt werden kann. Das Softwaretool für die Remotebedienung wurde intern erstellt und erfolgreich getestet.

Systemverfügbarkeit und Störungen

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

Die permanente Übertragung der Anlageparameter erreichte insgesamt eine sehr hohe Verfügbarkeit. Zum Jahresbeginn wurden die ANPA-Daten aufgrund eines Problems bei der Vorbelegung des Kurzzeitarchivs während 56.5 Stunden nicht im MADUK-System archiviert. Die Daten standen aber für das System ADAM zur Verfügung. Bei KKB fiel aufgrund eines defekten Routers die Datenübertragung während 26.3 Stunden aus. Zusätzlich fiel am Jahresende die Datenübertragung für KKB I für insgesamt 9 Stunden aus. Bei KKG wurde im ersten Quartal ein Unterbruch in der Datenlieferung

Tabelle 1:

Auflistung der Störungen bei den MADUK-Messstationen.

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
G-12	1.5	1.5	Versetzen des Stationskastens
M-12	21.5	-	Bei Bauarbeiten gekappte Telefonleitung
M-11	6.6	-	Korrodierte Grobsicherung führte zu Kommunikationsausfall
B-10	2.8	2.8	Problem Datenlogger
L-06	1.6	-	Kommunikationsausfall aufgrund von Wartungsarbeiten Swisscom
M-03	20.8	-	Kommunikationsausfall
L-03	0.7	0.7	Umbauarbeiten am Stationsstandort
G-02, G-04, G-06, G-08	5.2	-	Kommunikationsausfall
B-02, B-04 bis B-07, B-08, B-13, B-17, G-01 bis G-16, L-02, L-05, L-07, L-10, L-11, M-01 bis M-07, M-12	2.0	-	Ausfall eines Peer-Routers bei Swisscom führte zum Ausfall der Stationen, die über einen Office Access an die Zentrale angeschlossen sind.
M-12	1.5	1.5	Abschluss Umbauarbeiten
M-03	0.5	-	Angekündigte Kabelarbeiten an Telekommunikationskabel
B-07	18.5	18.5	Unterbruch Gebäudestromversorgung
B-14	30.8	-	Kommunikationsunterbrüche
G-02, G-04, G-06, G-08	2.3	-	Kommunikationsunterbruch
B-10	4.2	-	Angekündigte Kabelarbeiten an Telekommunikationskabel
B-14	6.8	-	Kommunikationsunterbruch
B-01	1.3	-	Kommunikationsunterbruch
B-03, B-05, B-06	26.3	-	Kommunikationsunterbruch aufgrund eines defekten Routers

von 3.8 Stunden registriert, im zweiten Quartal von 3.3 Stunden und im dritten Quartal von 1.2 Stunden. Bei KKL kam es während der Jahresrevision aufgrund von Unterhaltsarbeiten zu Unterbrüchen von insgesamt 31.8 Stunden. Bei KKM führte der Ausfall des Kommunikationsdienstes im zweiten Quartal zu Unterbrüchen von insgesamt 2.5 Stunden. Im vierten Quartal führten Tests für die Übertragung von Simulatordaten zu einem Ausfall von 2.6 Stunden.

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

Die nun dreijährige Stationselektronik lief auch im 2011 äusserst zuverlässig. Nur ein Datenlogger zeigte Probleme in der Kommunikation mit einer Sonde, welche zu einem Datenverlust von 2.8 Stunden bei der Station B-10 führten. An den Stationen L-12 (defektes Niederdosiszählrohr) und L-09 (defektes Hochdosiszählrohr) mussten die Sonden ausgetauscht werden.

Defekte Festplatten auf den zentralen Servern führten im April zu einem Ausfall der MADUK-Zentrale von insgesamt 5 Stunden. Eine weitere defekte Festplatte im November hatte keinen Einfluss auf den Betrieb der MADUK-Zentrale. Im Zusammenhang mit einer Störung in der Büroautomation war der MADUK-Webserver während insgesamt 20 Stunden nicht verfügbar.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 99.8% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.99%.

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 qualitäts-gestützt und nachvollziehbar bearbeitet werden. Die wesentlichen qualitätssichernden Massnahmen werden im Folgenden beschrieben.

In Anlehnung an die "Empfehlungen zur Sicherstellung der Messdatenqualität von Umgebungs-dosimetriesystemen" der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radio-

aktivität vom 24. November 2004 werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Messverhalten der Sonden wird zwischen den Eichungen mit halbjährlichen Genauigkeitstests geprüft. Bei den Genauigkeitstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer 460 kBq ¹³⁷Cs-Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten produziert und mit Sollwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunktionskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellwerten benutzt. Im Jahr 2011 wurden zwei Funktionskontrollen durchgeführt. Zwei Sonden mussten aufgrund von defekten Zählrohren zur Reparatur eingeschickt werden. Die übrigen Sonden sowie die Archivierung der Messwerte funktionierten einwandfrei. Bei der Alarmierung gab es bei der Funktionsprüfung im Frühjahr Probleme. So konnten teilweise die Pager-Meldungen nicht abgesetzt werden. Abklärungen zeigten, dass der Fehler bei der redundant ausgelegten Telefonanlage lag. Mitte Jahr konnte das Problem schliesslich behoben werden. Die Meldungen der Funktionsprüfungen im Herbst wurden dann korrekt abgesetzt.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden Messungen mittels in-situ-Gammaspektrometrie im Feld durchgeführt. Im Jahr 2011 wurden Messungen bei den Sonden der Messringe Gösigen und Leibstadt durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre.

Messergebnisse

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

Da im 2011 auch die NADAM-Station beim Personalrestaurant des PSI erneuert wurde, führte die jährliche Überprüfungskampagne der NADAM Sonden an den Standorten, an denen auch eine MADUK-Station in Betrieb ist, bei keiner MADUK-Sonde zu wesentlichen Erhöhungen der Messwerte.

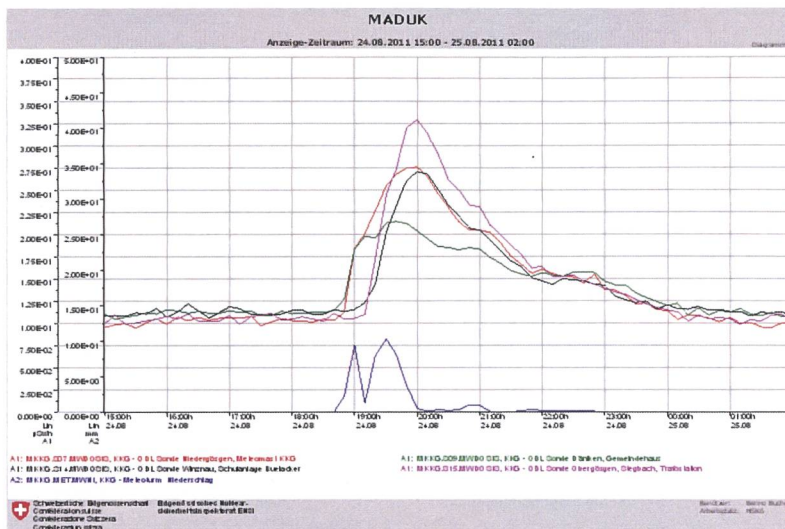
In der Tabelle 2 sind alle Ereignisse aufgelistet, bei denen der Nettodosisleistungsschwellwert von 50 nSv/h überschritten wurde. Alle registrierten Erhöhungen waren auf lokal begrenzte Starkregen und deren Washout-Effekte zurückzuführen. Ein Zusammenhang mit dem Betriebsverhalten der Kernanlagen konnte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

Am 24. August verursachte ein extremer Niederschlag von bis 10 mm pro 10 Minuten gleich bei vier Stationen eine Verletzung des Nettodosisleistungsschwellwertes von 50 nSv/h. Die maximal gemessene Dosisleistung betrug bei der Station G-15 329 nSv/h (Figuren 2 und 3).

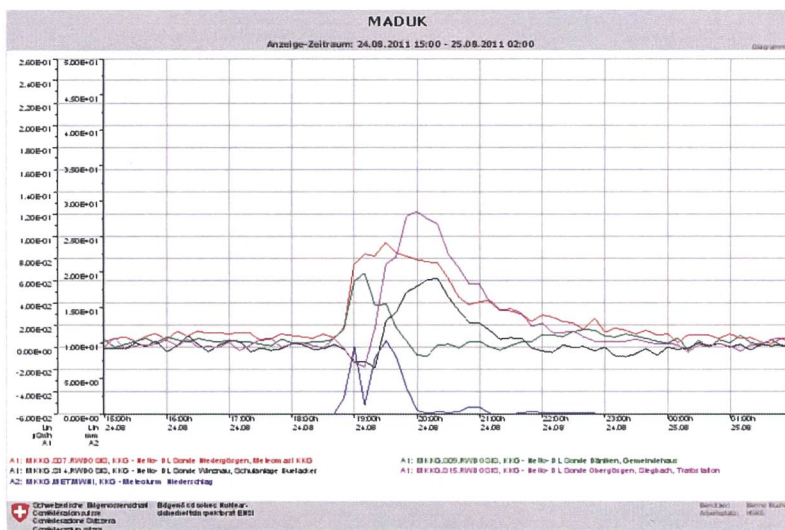
Die Figuren 4 und 5 zeigen die Maxima, die Minima und die Mediane der Tagesmittelwerte im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke. Die Werte liegen im normalen Schwankungsbereich der letzten 17 Jahre (Figuren 6 und 7).

Tabelle 2:
Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2011.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
01.01.11 22:20	L-12	0.3	58	161
20.05.11 20:50	G-15	0.3	56	183
14.06.11 16:30	G-01	0.2	52	182
28.07.11 13:20	L-01	0.7	70	179
24.08.11 19:00	G-07	1.7	94	275
24.08.11 19:00	G-09	0.3	67	214
24.08.11 20:00	G-14	0.5	62	270
24.08.11 19:30	G-15	1.7	122	329

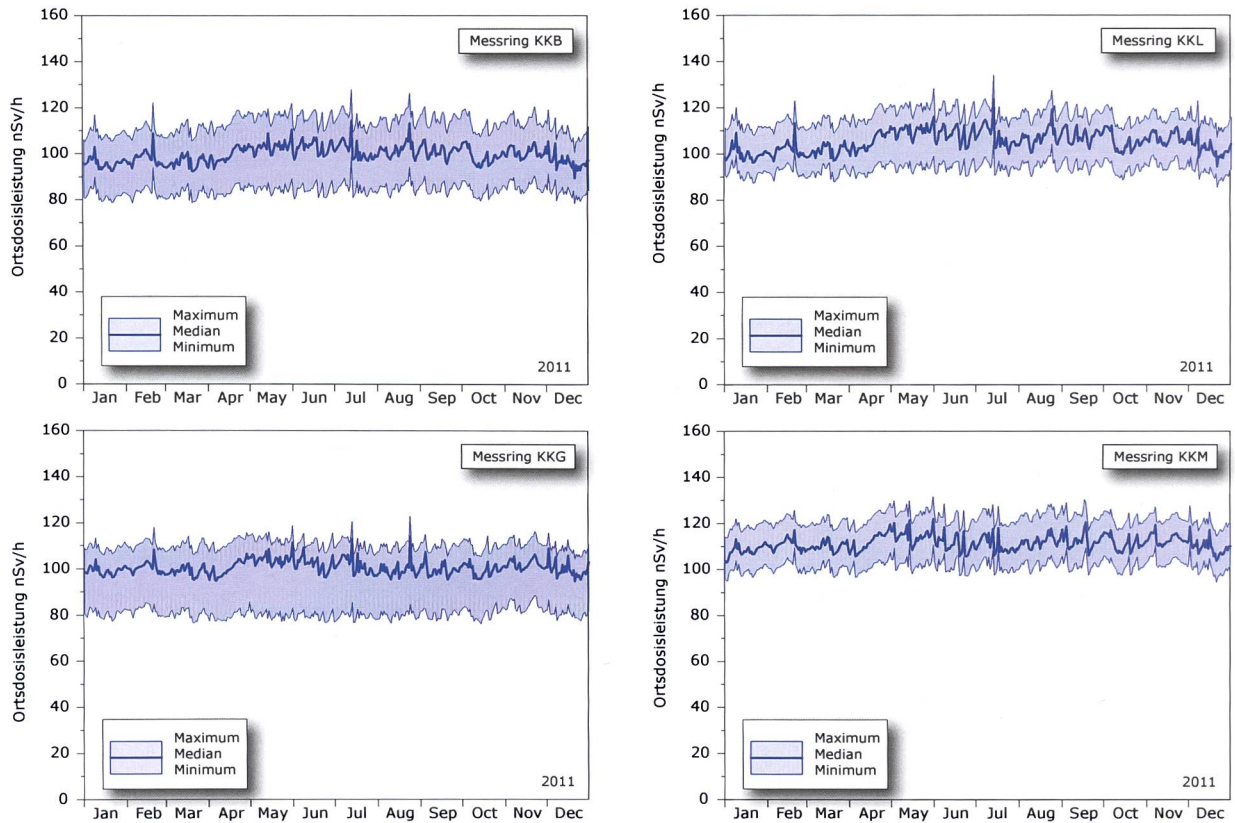


Figur 2:
Verlauf der gemessenen Ortsdosisleistungen an den Stationen G-07, G-09, G-14 und G-15 sowie des Niederschlags an der SwissMetNet-Station KKG.

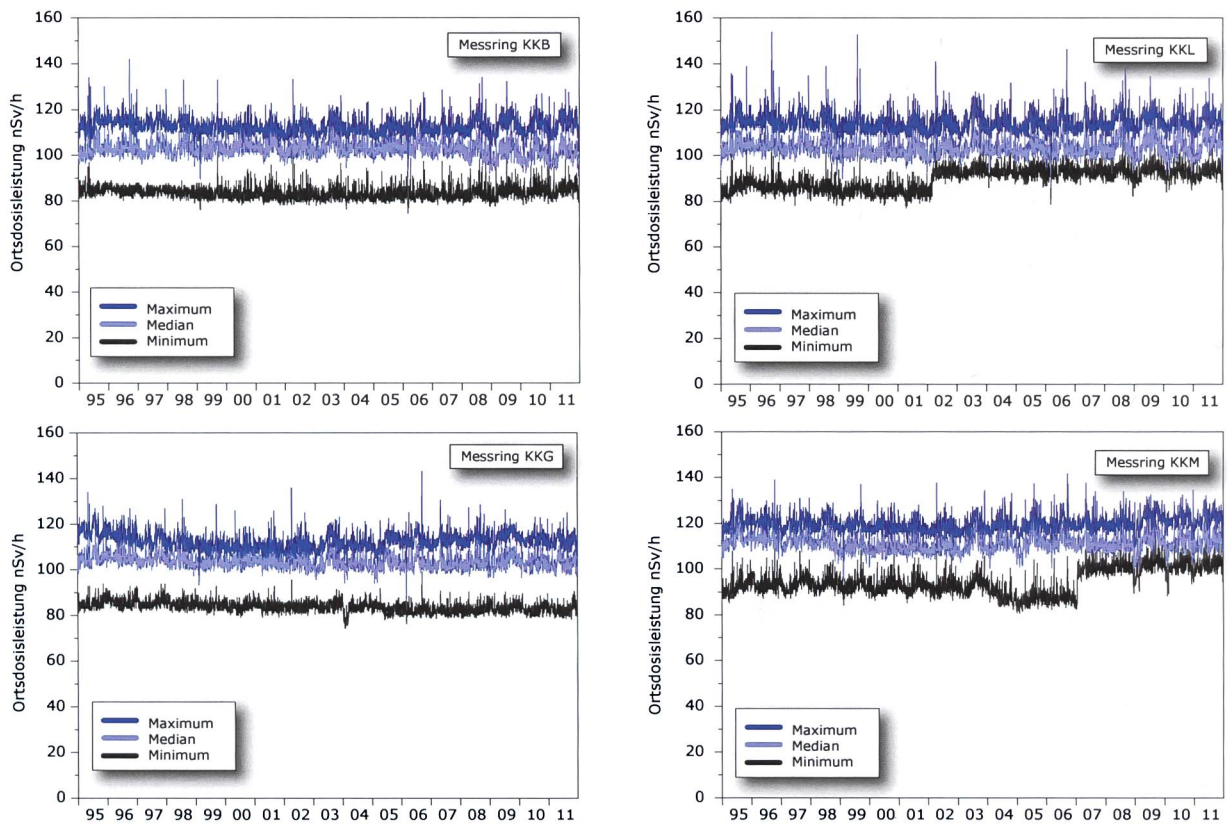


Figur 3:
Verlauf der bestimmten Nettodosisleistungen an den Stationen G-07, G-09, G-14 und G-15 sowie des Niederschlags an der SwissMetNet-Station KKG.

8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke - @BAG 2012



Figur 4 & 5: Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG, KKL und KKM.



Figur 6: Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB und KKG für die Jahre 1995 bis 2011.

Figur 7: Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKL und KKM für die Jahre 1995 bis 2011. Die Sprünge in den Minima-Werten sind darauf zurückzuführen, dass Sonden, die sich auf Dächern befanden, auf den Boden versetzt wurden (bei KKL bei der Station L-05, bei KKM bei der Station M-04).

8.4 Ortsdosimetrie in der Umgebung der Kernanlagen

F. Cartier, B. Bucher, A. Leupin

Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Industriestrasse 19, 5200 Brugg

Einleitung

Als Teil der Umgebungsüberwachung der schweizerischen Kernanlagen werden quartalsweise Messungen der Ortsdosis mit speziell für Umgebungsmessungen kalibrierten Dosimetern durchgeführt. Die in der Umgebung der Anlagen positionierten Dosimeter sind vor Witterungseinflüssen geschützt an Bäumen, Masten oder Gebäuden einige Meter über dem Boden so angebracht, dass sie ohne Hilfsmittel nicht erreichbar sind. In der Umgebung des Kernkraftwerks Gösgen befinden sich die Dosimeter an 24 Standorten, beim Kernkraftwerk Leibstadt an 21 und beim Kernkraftwerk Mühleberg an 17 Standorten. In der Umgebung des Kernkraftwerkes Beznau, des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen und des Paul Scherrer Instituts sind an 35 Orten Dosimeter positioniert. In der Figur 1 sind die Messpunkte kartographisch dargestellt.

Für die Messungen kommen verschiedene passive Umgebungsdosimeter zum Einsatz. Das PSI und das KKM setzen Thermolumineszenzdosimeter (TLD) auf Basis von Al_2O_3 ein. Das KKG verwendete bis Mitte 2009 TLD-200 ($\text{CaF}_2:\text{Dy}$), seither EDIS-Dosimeter (Environmental Direct Ion Storage). Das KKL verwendet seit Mitte 2004 den TL-Typ GR200 ($\text{LiF}:\text{Mg};\text{Cu};\text{P}$). Die Messungen werden pro Ort quartalsweise alternierend mit je zwei Dosimetern durchgeführt.

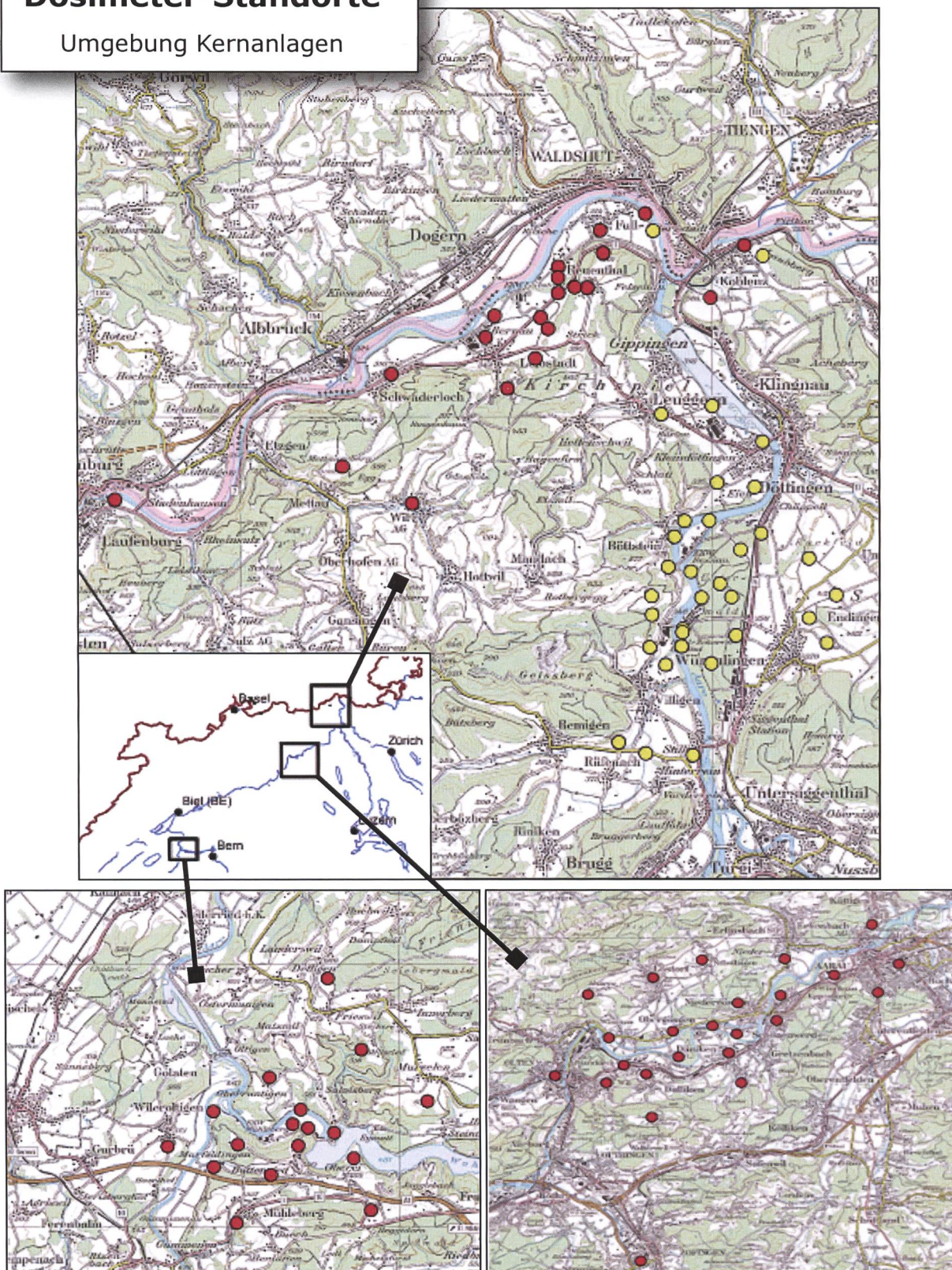
Das Auslegen, Einsammeln und Auswerten der Dosimeter wird durch die Betreiber durchgeführt. Die TLD resp. EDIS werden quartalsweise durch die anerkannten Personendosimetriestellen des PSI sowie der Kernkraftwerke Mühleberg, Leibstadt und Gösgen ausgewertet. Die Messwerte werden als Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ erhoben (vgl. Strahlenschutzverordnung Anhang 5) und ohne Abzug der natürlichen Untergrundstrahlung im Rahmen der periodischen Berichterstattung an das ENSI gemeldet. Dieses analysiert die Resultate und führt bei signifikanten Veränderungen vor Ort Messungen mit einem In-Situ-Gammaspektrometer und einer Hochdruckionisationskammer zur Dosisleistungsmessung durch.

Auswertemethode

Grundsätzlich erfolgt die Analyse der TLD-Daten nach der sogenannten Methode der ortsspezifischen Parameter (OSP), wie sie beispielsweise in der Loseblattsammlung FS-78-15-AKU Blatt 3.4.1 des Arbeitskreises Umweltüberwachung des deutschschweizerischen Fachverbandes für Strahlenschutz beschrieben wird. Um unterschiedliche Quartalslängen auszugleichen, werden die Messwerte auf eine Quartalslänge von 91 Tagen normiert. In der Regel wurden mit Hilfe von Beweissicherungsdaten aus der Zeit vor dem Betrieb der Kernanlage die für jeden Standort charakteristischen, ortsspezifischen Parameter (OSP) bestimmt, indem die zeitliche, insbesondere wetterbedingte Variation der Dosiswerte rechnerisch eliminiert wurden: Der ortsspezifische Parameter ergibt sich als über die Beweissicherungsperiode gemittelte Differenz zwischen den Messwerten eines Dosimeterstandortes und dem jeweiligen Quartalsmittelwert über alle Standorte in der Umgebung einer Kernanlage. Diese Differenzen entsprechen der örtlichen Variation der natürlichen Strahlung in der Umgebung einer Kernanlage. Bei der Auswertung von anfallenden Quartalsdaten wird nun die sogenannte Nettodosis berechnet, indem vom Messwert der aktuelle Quartalsmittelwert und der ortsspezifische Parameter subtrahiert werden. Die Nettodosis entspricht für einen Standort somit der Dosis, welche nicht a priori durch Einflüsse des Wetters und der ortsspezifischen natürlichen Strahlung erklärt werden können. Der Erwartungswert der Nettodosis liegt – innerhalb der Fehlergrenzen – bei null, solange keine neu vorhandenen Strahlenquellen einen zusätzlichen Dosisbeitrag liefern. Abweichungen vom Erwartungswert können sich aber auch dann ergeben, wenn sich auf Grund einer Verschiebung des Standortes resp. baulichen oder sonstigen Änderungen am Standort der ortsspezifische Parameter verändert. Im Weiteren kann auch die Kalibrierung der verwendeten Dosimeter zu einer Verschiebung des Nullpunktes führen, da die Kalibrierunsicherheit ca. $10 \mu\text{Sv}$ beträgt. Schliesslich kann der Wechsel des Dosimetertyps auf Grund unterschiedlicher Energieabhängigkeiten zu systematischen Änderungen führen. Deshalb wird der ortsspezifische Parameter für einen Standort bei

Dosimeter-Standorte

Umgebung Kernanlagen



Figur 1: Standorte der TLD in der Umgebung der Kernanlagen. Kartendaten PK100 und PK200 © (DV316.2) Swisstopo.

Bedarf aus den Messwerten mehrerer Quartale neu bestimmt, nachdem vor Ort mögliche Ursachen für die Verschiebung geklärt wurden und mittels in-Situ Gammaspektrometrie nachgewiesen wurde, dass die überwachte Kernanlage als Ursache für die Veränderung ausgeschlossen werden kann.

Die Erkennungsgrenze der Methode liegt für das Vertrauensintervall von 95% (k=2) bei allen Kernkraftwerkstandorten bei etwa 25 µSv pro Quartal oder etwa 10 – 15% des Bruttomesswertes. Liegen die für einzelne Punkte ermittelten Nettodosen oberhalb dieser Erkennungsgrenze, so werden weitere Abklärungen zu den Ursachen in die Wege geleitet.

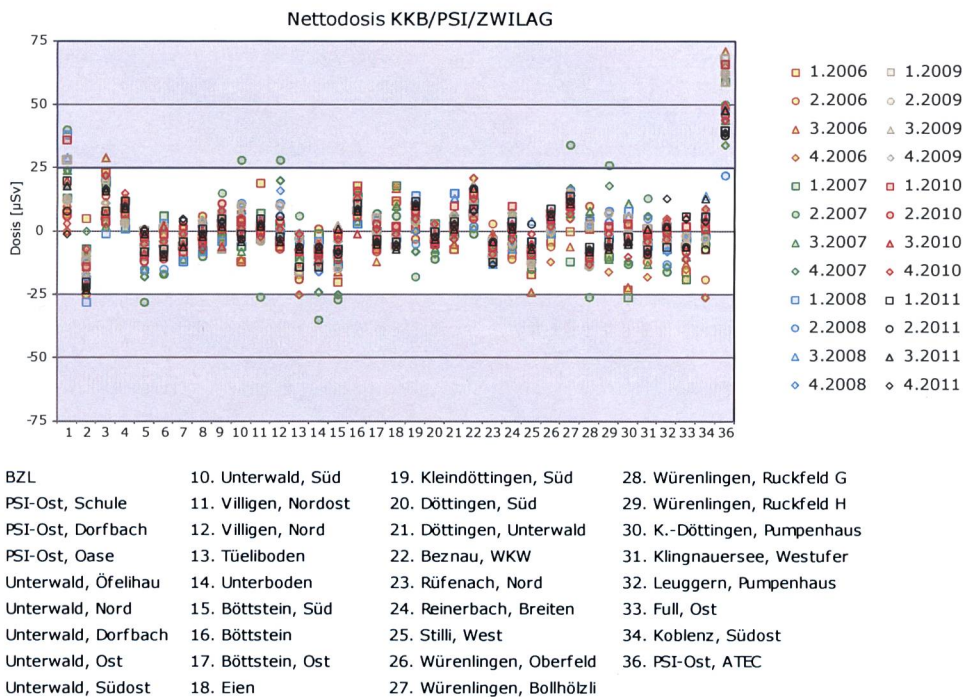
Ergebnisse

In den Figuren 2 – 5 sind die Nettodosen für die Umgebungen von KKB/PSI/ZWILAG, KKG, KKL und KKM für die letzten 6 Jahre graphisch dargestellt. In der Regel liegen die Nettodosen innerhalb einer durch die Mess- und Analyseverfahren bestimmten Streuung relativ nahe beieinander. Durch den erwähnten, alternierenden Einsatz zweier Dosimeter mit einer u.U. etwas unterschiedlichen Kalibrierung kann es zu einer geringfügigen Aufweitung der Streubreite, im Extremfall sogar zu einer Verteilung mit zwei unterscheidbaren Schwerpunkten an ein-

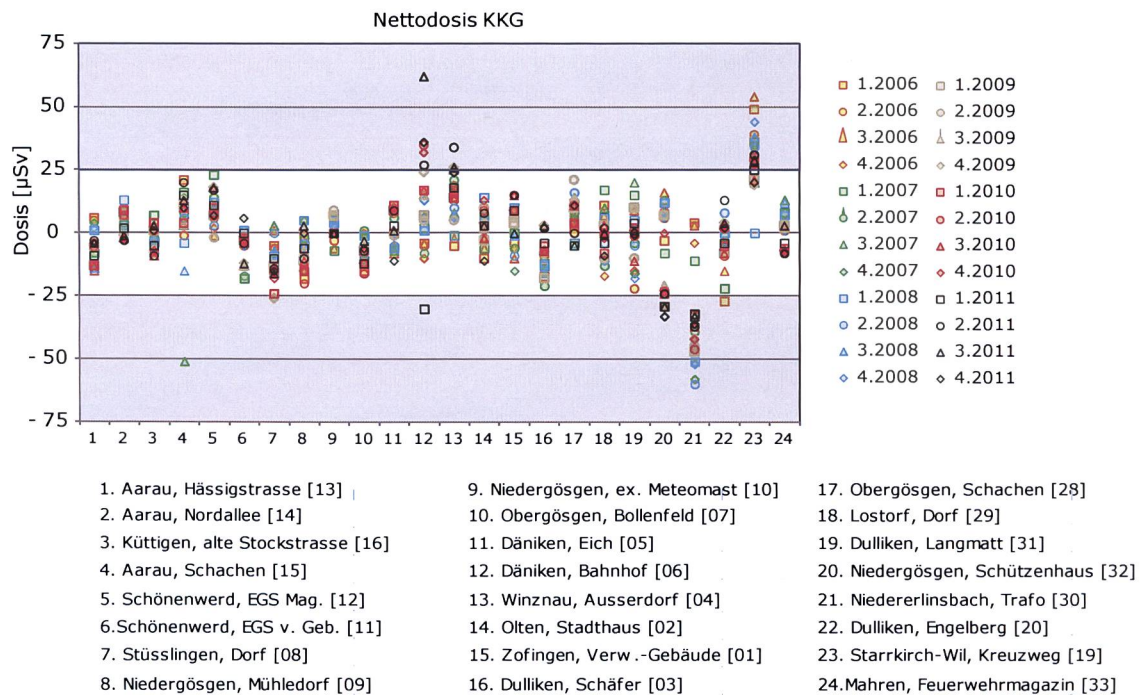
zelnen Messorten kommen. Die Streubreite liegt aber für alle Kraftwerks- und Dosimeterstandorte mit Ausnahme einzelner Ausreisser, welche im Folgenden diskutiert werden, deutlich unterhalb von ±25 µSv pro Quartal.

Im Überwachungsgebiet KKB/PSI/ZWILAG liegt der Schwerpunkt der Messungen in der Regel innerhalb des Nettodosisbandes von ± 25 µSv pro Quartal. In der Umgebung des PSI sind die Nettodosen am Zaun beim Bundeszwischenlagers und beim Abfalllabor Ost (ATEC) durch Direktstrahlung leicht erhöht. Umgerechnet auf ein Jahr ergibt sich beim ATEC eine Netto-Ortsdosis von maximal etwa 0.2 mSv. Diese beiden TLD liegen an einem nicht bewohnbaren und nur erschwert begehbaren Ort.

Im 2. Quartal 2007 lagen die Streuung bei den Nettodosen und auch der Dosismittelwert über alle Standorte höher als normal. Die damals mit dem PSI durchgeführten Untersuchungen und Abklärungen haben keinen Hinweis auf die mögliche Ursache gebracht, ein Fehler bei der Ermittlung der Bruttodosiswerte ist aber nicht auszuschliessen. Wie aus der Figur 2 zu erkennen ist, handelte es sich um eine einmalige Abweichung, die in den übrigen Quartalen nicht auftrat. Wenn man das Quartal 2/2007 von der Betrachtung ausschliesst, liegt die Streubreite der Nettodosis über die betrachtenden 6 Jahre für alle Standorte bei deutlich weniger als ± 25 µSv.



Figur 2: Darstellung der mittels TLD ermittelten, quartalsweisen Nettodosen für den Zeitraum 2006 – 2011 in der Umgebung KKB/PSI/ZWILAG.



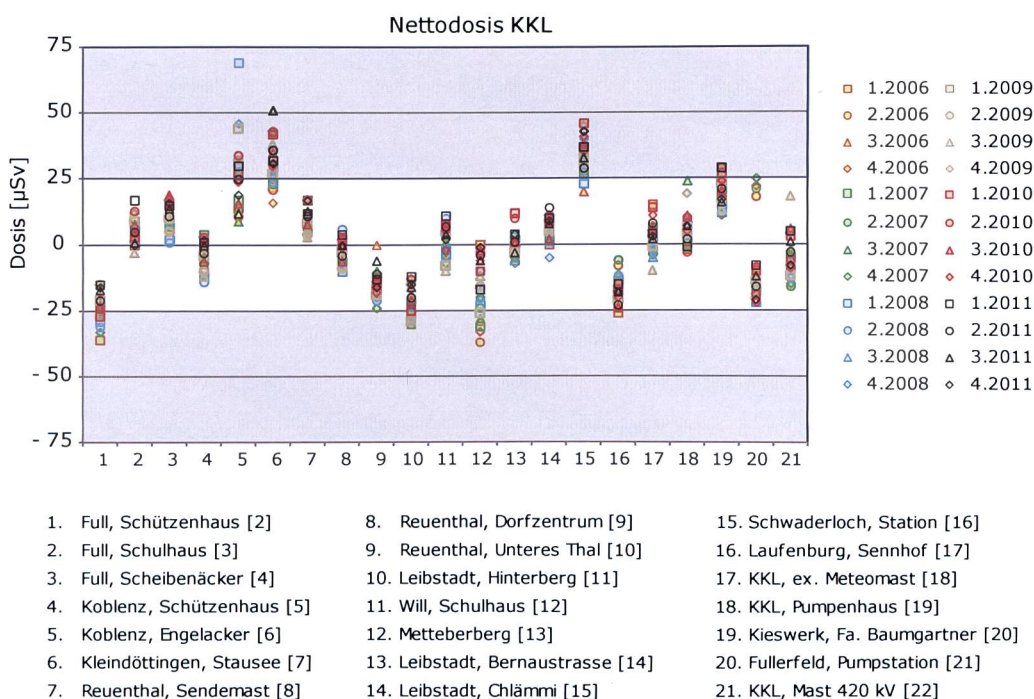
Figur 3: Darstellung der mittels TLD resp. EDIS ermittelten, quartalsweisen Nettodosen für den Zeitraum 2006 – 2011 in der Umgebung des KKG.

Beim KKG wurde ab Mitte 2009 die Umgebungs-dosimetrie von TLD auf EDIS umgestellt. Wie Figur 3 illustriert, ist die Streuung der Nettodosen an den 24 Messpunkten mit wenigen Ausnahmen deutlich kleiner als $\pm 25 \mu\text{Sv}$. Folgende Ausreisser waren aber zu verzeichnen:

- Im 3. Quartal 2007 und in geringerem Mass im 3. Quartal 2008 lag die Nettodosis am Messpunkt "Aarau Schachen" deutlich unterhalb des Schwerpunkts der Verteilung und des Erwartungswertes. Der tiefe Wert wurde in beiden Fällen mit demselben Dosimeter ermittelt. Da weder zuvor noch danach aussergewöhnliche Werte an diesem Messpunkt zu verzeichnen waren, konnte die Ursache nicht abschliessend geklärt werden.
- Am Messpunkt "Däniken Bahnhof" ist die Streubreite allgemein grösser als bei den anderen Messorten. Zusätzlich fallen ein Ausreisser der Nettodosis nach unten im Quartal 1/2011 und einer nach oben im Quartal 3/2011 auf, die beide mit dem gleichen EDIS-Dosimeter gemessen wurden. Das KKG versucht aktuell, die Ursachen für diese beiden Ausreisser im Berichtsjahr zu klären. Die allgemein grössere Streuung ist bedingt durch die Umstellung auf EDIS: ganz allgemein kann festgestellt werden, dass die mit EDIS an diesem Messpunkt ermittelten Nettodosen in der Regel etwas höher liegen als die, welche mit TLD ermittelt wurden. Das ENSI hat am

Messpunkt im Mai 2011 gammaspektrometrische Messungen durchgeführt und konnte dabei keine nuklidspezifischen Anomalien feststellen.

- Beim Messpunkt "Winznau Ausserdorf" trat im 2. Quartal 2011 ein Nettodosiswert knapp über der Untersuchungsschwelle von $+ 25 \mu\text{Sv}$ auf. Die Ursache ist auch hier in einer generellen leichten Verschiebung der Nettodosen seit Einführung der EDIS-Dosimeter zu suchen.
- Am Messpunkt "Niedergösgen Schützenhaus" werden seit Einführung der EDIS-Dosimeter eher tiefere Nettodosiswerte festgestellt. In-situ-gammaspektrometrische Untersuchungen im Mai des Berichtsjahres zeigten aber keine nuklidspezifischen Anomalien.
- Der Messpunkt "Niedererlinsbach Trafo" wurde im Jahr 2007 auf Grund der Erneuerung der Trafoanlage um etwa 150 m im Gelände verschoben. Auf Grund der topographischen Gegebenheiten am neuen Messort ist in der Folge die Nettodosisleistung deutlich gesunken. Gammaspektrometrische Untersuchungen zeigen keine nuklidspezifischen Anomalien, bestätigen aber den Einfluss der unterschiedlichen Topografie.
- Am Messpunkt "Starrkirch-Wil, Kreuzweg" liegen die Nettodosen über die letzten 6 Jahre konsistent über dem Erwartungswert. Gammaspektrometrisch wurde am Messort keine nuklidspezifische Anomalie festgestellt. Vor Ort liess sich aber feststellen, dass im Verlauf der Jahre verschie-



Figur 4: Darstellung der mittels TLD ermittelten, quartalsweisen Nettodosen für den Zeitraum 2006 – 2011 in der Umgebung des KKL.

dene bauliche Veränderungen stattgefunden haben, welche als Erklärung für den festgestellten Anstieg dienen können.

Beim KKL (Figur 4) liegen die Streubreiten der Nettodosen an den einzelnen Messorten in der Regel deutlich unter $\pm 25 \mu\text{Sv}$. Allerdings sind für mehrere Messpunkte deutliche Abweichungen des Verteilungsschwerpunkts der Nettodosis zum Erwartungswert festzustellen. Teils sind diese Abweichungen der Umstellung auf GR200-Dosimeter und der damit notwendigen Neukalibrierung der verwendeten Dosimeter zuzuordnen. Weitere Abweichungen bei den nachfolgend beschriebenen Messpunkten sind den Verhältnissen vor Ort zuzuschreiben:

- Der Schwerpunkt der Nettodosiswerte beim Messpunkt "Full Schützenhaus", die ansonsten eine geringe Streuung aufweisen, ist gegenüber dem Erwartungswert um etwa $25 \mu\text{Sv}$ nach unten verschoben. Eine im Mai 2011 durchgeführte gamma-spektrometrische Untersuchung am Messort zeigt keine nuklidspezifischen Anomalien auf.
- Am Messpunkt "Koblentz Engelacker" wurden insbesondere in den Quartalen Q1 2008, Q4 2008 und Q1 2009 Ausreisser der Nettodosis nach oben festgestellt. Die gamma-spektrometrische Untersuchung vom Ort ergab keine nuklidspezifische Anomalie. Der Messort an einer Trafostation liegt über einem asphaltierten Platz, der einem Gemüsehändler als Lager dient. Aufgrund dieser

sich ändernden Nutzung des Messortes hat das ENSI eine Versetzung des TLD veranlasst.

- Der Schwerpunkt der Nettodosenverteilung beim Messpunkt "Kleindöttigen Stausee" ist deutlich nach oben verschoben. Mit einem am gleichen Standort positionierten TLD der Umgebungsüberwachung KKB/PSI/ZWILAG wird die Dosisverschiebung über die Jahre allerdings nicht bestätigt. Die in-Situ-Gammaspektrometrie an diesem Standort zeigt zwar, dass bis zu $13 \mu\text{Sv}$ der gemessenen Quartalsdosis durch ^{137}Cs im Boden erklärt werden könnte, jedoch fällt der Zeitpunkt, seit dem die Erhöhung festgestellt werden kann, mit der Umstellung des KKL auf GR200 Dosimeter zusammen, sodass es insgesamt wahrscheinlicher ist, dass die Verschiebung auf die damit verbundene Neukalibrierung bzw. unterschiedliche Energieabhängigkeit der beiden TLD-Typen zurückzuführen ist.
- Beim Messpunkt "Schwaderloch Station" ist die seit 2001 festzustellende Verschiebung der mittleren Nettodosis nach oben vermutlich in baulichen Veränderungen begründet. Die Gamma-spektrometrie vor Ort zeigt keine Anomalien auf.
- Das Dosimeter beim "Kieswerk Baumgartner" ist unter einem Dach platziert und somit für die Ermittlung der Ortsdosis an diesem Ort nicht unbedingt repräsentativ. Hier ist die Versetzung des Dosimeters an einen besser geeigneten Ort zu veranlassen.

8.5

Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

J. Eikenberg, M. Jäggi, H. Beer, C. Parussudis, I. Zumsteg

Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen

Zusammenfassung

Im Rahmen der Immissionsüberwachung führt das PSI Radionuklidmessungen sowohl an Waldbodenproben als auch an Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (ZWILAG Würenlingen) durch. Das Vaseline auf den Staubfangplatten wird γ -spektrometrisch ausgewertet (auf anthropogene Radionuklide wie ^{241}Am , ^{137}Cs und auf natürliche Radionuklide wie ^7Be , ^{210}Pb). Bei den Bodenproben folgt nach der γ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung reiner α - und β -Strahler (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm). Die Ergebnisse der γ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid ^{137}Cs von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 20 - 70 Bq/kg (2011). Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope ^{90}Sr und $^{239+240}\text{Pu}$ sind ähnlich signifikant. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für ^{90}Sr von 6 - 10 Bq/kg auf 2 - 4 Bq/kg und diejenigen für $^{239+240}\text{Pu}$ von 0.4 - 0.9 (1997) auf 0.2 - 0.7 im Jahr 2011. Die konstanten Isotopenverhältnisse von $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.03) und $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (ca. 0.4) zeigen deutlich, dass die gemessenen Werte für die Aktiniden den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 50 Jahren zuzuschreiben sind.

Einleitung

Das Zwischenlager (ZWILAG AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erstellt und anschliessend in Betrieb genommen. Um potentielle, geringfügige Radionuklid-Emissionen in der Umgebung des Areals aus Abgaben aus der Anlage feststellen zu können, wurden vor der Inbetriebnahme im Rahmen des Projektes Beweissicherung umfangreiche Radionuklid-Messungen an Bodenproben in der unmittelbaren Umgebung des Areals durchgeführt. (Details in [1]). Diese Analysen dienten der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B. ^7Be), terrestrischer (^{40}K sowie Radionuklide aus den U- und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von Kernwaffentests und dem Chernobyl-Ereignis. Seit der Durchführung dieser Studie werden im Routinebetrieb einmal jährlich an 4 Beprobungs-Punkten Waldbodenproben aus der oberen Schicht (0 - 5 cm) erhoben und im Labor auf ihren Radionuklid-Gehalt untersucht. Für die kontinuierliche Überwachung des Luftpfades wurden 4 Staubfangplatten an der Umzäunung der ZWILAG angebracht. Diese Platten werden monatlich ausgewechselt und die Konzentrationen Photonen emittierender Radioisotope ^{241}Am , ^{137}Cs bestimmt.

Radiochemische Trennmethoden (Boden)

Der Boden wird zunächst getrocknet, gesiebt und in ca. 30 g schwere Aliquots gesplittet. Vor der Analyse werden ^{243}Am - und ^{242}Pu -Tracer hinzu gegeben. Nach der Trockenveraschung wird die Probe in 8 M HNO_3 unter Kochen während 1 Stunde ausgelaugt, so dass die oberflächlich adsorbierten Fallout-Produkte in die wässrige Phase transferiert werden. Die wässrige Lösung, welche die Fraktionen von Pu, Am und Cm enthält, wird sodann von der festen Phase über Filtration getrennt.

Die Leach-Lösung wird dann direkt auf eine Anionenaustauscher-Kolonnen (Bio-Rad 1-X2, 100-200 mesh) gegeben und durch Zugabe von HCl und HNO_3 -Waschlösungen werden potentiell bei der α -Spektrometrie interferierende, natürliche Radionuklide abgetrennt (z.B. α -Emission von ^{228}Th und ^{238}Pu bei 5.4 MeV), bevor die Pu-Fraktion durch Reduktion von Pu^{4+} zu Pu^{3+} mit einer HI-Lösung eluiert wird. Die durch die Bio-Rad-Kolonnen gelaufene Fraktion mit Am und Cm wird über 2 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer U/TEVATM-Kolonnen zur Retention von U und Th und einer DGATM-Kolonnen, die Am und Cm absorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer 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 und in einer NaSO_4 - NaHSO_4 -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Aktiniden verwendet wird [2]. Nach der Elektrodeposition werden die Messpräparate über 2 Tage mit hochauflösender α -Spektrometrie gemessen (alle Details in [1]).

Staubfangplatten

4 Staubfangplatten (siehe Figur 1), eine pro Himmelsrichtung, wurden an der Umzäunung der ZWILAG befestigt. Die Probenerhebung erfolgt monatlich, d.h. die Staubfangplatten werden jeweils ausgewechselt. Im Labor wird das Vaseline von der Kunststoffplatte abgezogen und in einem Metallschälchen eingeschmolzen. Die anschliessende γ -Messung dauert 15 Stunden. Bestimmt werden u.a. ^{137}Cs und ^{241}Am .

Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) und natürlichen terrestrischen Isotope aus den U- und Th-Zerfallsreihen (^{226}Ra , ^{228}Ra) zusammengefasst. Dargestellt ist der Streubereich der Probenmessungen aus den 4 Bodenentnahmestellen um das ZWILAG-Areal. Wie die Tabelle zeigt, liegen die typischen Aktivitätskonzentrationen von $^{239+240}\text{Pu}$ derzeit zwischen 0.2 und 0.7 Bq/kg, diejenigen von ^{241}Am zwischen 0.1 und 0.3 Bq/kg. In Spuren ist noch ^{238}Pu nachweisbar (0.01 - 0.03 Bq/kg), während die Werte für fisiogenes ^{90}Sr etwas höher sind (2 - 4 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für ^{137}Cs (30 - 70 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der zusätzliche Beitrag von Fallout-Caesium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall. Über die Isotopenverhältnisse von $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (im Mittel 0.4) und $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (0.03 ± 0.01) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Aktiniden ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca.



Figur 1:
Staubfangplatte (ZWILAG).

50 Jahren stammt [1,3]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten Jahre. Während für ^{137}Cs noch eine geringfügige Abnahme beobachtet werden kann, sind die Aktivitätskonzentration der anderen anthropogenen Radioisotope bereits so tief, dass aufgrund der mess-statistischen Schwankungen keine Trends mehr auszumachen sind. Ebenfalls eingetragen sind die Werte für ^{226}Ra (als Mass für natürlich vorkommendes, primordiales ^{238}U) und ^{228}Ra (als Mass für ^{232}Th). Diese Werte liegen konstant zwischen 20 - 40 Bq/kg und zeigen keinen Trend mit der Zeit, da diese Radionuklide fest in den Kristallgittern der Bodenminerale eingebaut sind. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für ^{238}U 2 - 3 ppm und für ^{232}Th 5 - 7 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste.

Tabelle 1:

Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope (^{226}Ra , ^{228}Ra) im Verlauf der letzten Jahre (2008-2011). Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2008	2009	2010	2011
^{90}Sr	2 - 5	2 - 4	2 - 5	2 - 4
^{134}Cs ⁽¹⁾	< 1	< 1	< 1	< 1
^{137}Cs	25 - 80	30 - 70	23 - 70	20 - 70
^{238}Pu	0.01 - 0.02	0.01 - 0.03	0.01 - 0.08	0.01 - 0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.2 - 0.5	0.2 - 0.8	0.25 - 0.8	0.2 - 0.7
^{241}Am	0.1 - 0.4	0.1 - 0.3	0.2 - 0.3	0.1 - 0.3
^{226}Ra	20 - 30	20 - 30	25 - 40	25 - 40
^{228}Ra	20 - 35	20 - 30	20 - 40	20 - 40

⁽¹⁾ Die Halbwertszeit von ^{134}Cs beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2008 - 2011 nicht mehr nachgewiesen werden.

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

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] Bajo, S. und Eikenberg, J. (1999) Electro-deposition of actinides for α -spectrometry, J. Radioanal. Nucl. Chem. 242, 745-751.
- [3] 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.

8.6 Les installations nucléaires et l'environnement

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

Section radioactivité dans l'environnement, URA / BAG, 3003 BERN

Résumé

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

Hormis ces quelques exemples, les résultats des mesures environnementales ne se sont pas distingués de ceux relevés dans les endroits situés hors de l'influence des installations nucléaires. Ils montrent que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que les contaminations détectables proviennent principalement des essais nucléaires des années 60 (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ et ^{241}Am) et de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs) ainsi que, pour la période allant de mars à mai 2011, de l'accident de Fukushima (^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs).

Introduction

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

La surveillance se poursuit par la mesure des immissions des centrales nucléaires (concentrations radioactives effectivement mesurées dans l'environnement). Tous les compartiments environnementaux sont examinés, de l'air jusqu'aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma in situ) complètent ces analyses en permettant d'évaluer directement la radioactivité déposée au sol. Ce programme de surveillance, coordonné par l'OFSP, englobe non seulement les propres mesures de l'Office mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut de radiophysique (mesures alpha et bêta), du laboratoire de Spiez (^{90}Sr dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aéroradiométrie etc.), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université de Berne (^{14}C , ^3H 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	Ch. 8.2 - 8.4
Air/Aérosols (émetteurs γ)	Ch. 4.2
Précipitations (γ , ^3H)	Ch. 4.2
Milieu aquatique	Ch. 4.4
Mesures in situ	Ch. 3.1
Sol et herbe (γ , ^{90}Sr)	Ch. 4.5
Sol (Pu, ^{241}Am)	Ch. 7.2
^{14}C dans les feuillages	Ch. 7.1
Denrées alimentaires	Ch. 5

L'impact des rejets des centrales nucléaires sur l'environnement étant parfois difficilement mesurable, l'estimation de la dose au public repose avant tout sur le calcul à partir des émissions des installations. En effet, les niveaux de radioactivité à la source permettent une détection aisée et plus exhaustive des radionucléides rejetés. Leur impact sur l'environnement et l'homme résulte ensuite de la modélisation de leur transfert, basée 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 radio-écologique 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.

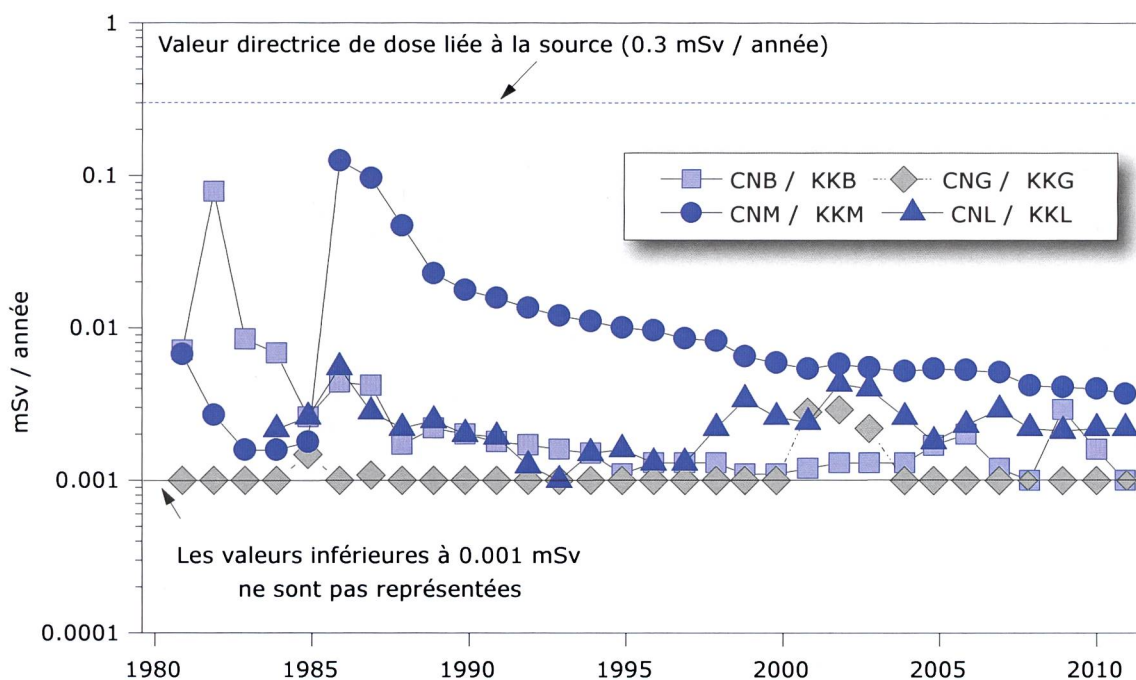


Figure 1:

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 2011 (Données IFSN) et comparaison avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an.

Résultats

Mesures à la source

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 2011 (voir aussi Chap. 8.1).

En synthèse, la figure 1 traduit ce constat du point de vue de l'impact des rejets sur la population avoisinante en termes de doses par rapport à la valeur directrice liée à la source, fixée à 0.3 mSv par an pour les centrales nucléaires (y compris rayonnement direct). Les calculs des doses reçues par les personnes les plus exposées vivant au voisinage des centrales nucléaires, qui sont représentées dans la figure 1, ont été effectués sur la base des rejets et des valeurs de rayonnements directs effectifs, en appliquant des modèles de dispersion et en tenant compte des temps de séjour, des habitudes alimentaires et de nombreux paramètres biologiques, physiologiques et environnementaux (voir directive G14 de l'IFSN pour plus de détails sur les modèles et paramètres utilisés).

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante à la clôture et au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide

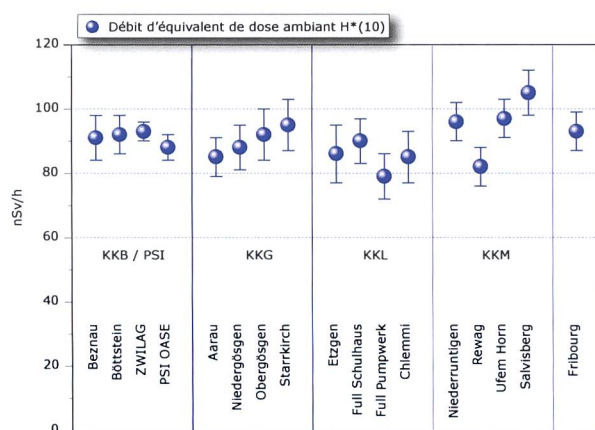


Figure 2: Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) effectués en 2011 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. La valeur mesurée à Fribourg est représentée à titre de comparaison.

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 centrales de Leibstadt et de Mühleberg ainsi qu'au PSI. A Mühleberg, par exemple, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation de la dose annuelle de 0.7 mSv par rapport au bruit de fond naturel qui s'élève également à 0.7 mSv par an. Cependant toutes les installations ont respecté les valeurs limites en 2011. Rappelons que la valeur limite d'immissions pour le rayonnement direct, en dehors de l'enceinte des entreprises, est fixée à l'Art. 102, alinéa 3 de l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP), à 1 mSv par an dans les locaux d'habitation, de séjour et de travail et à 5 mSv par an dans tout autre endroit.

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

Mesures dans le milieu atmosphérique

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

Les résultats des mesures 2011 des filtres aérosols des environs des centrales nucléaires suisses ainsi que du PSI ont montré la prédominance des radionucléides naturels ⁷Be et ²¹⁰Pb, avec des valeurs comprises respectivement entre 1.4 et 5.8 et entre 0.1 et 1.5 mBq/m³ (mesures OFSP et PSI). En dehors du ¹³¹I, du ¹³⁴Cs et du ¹³⁷Cs, dus à l'accident de Fukushima et détectés dans toute la Suisse entre fin mars et mi mai (voir Chapitre 4.1), ainsi que des traces de ¹³⁷Cs, attribuables à la remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl), aucun radionucléide d'origine artificielle, attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires, n'a pu être mis en évidence dans les filtres aérosols.

Le même constat s'applique aux émetteurs gamma mesurés 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.

Les résultats des mesures du tritium (^3H), radionucléide directeur dans les précipitations, dans les échantillons mensuels des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. Les concentrations mensuelles de ^3H enregistrées en 2011 dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires de Mühleberg, de Gösgen et de Leibstadt sont restées proches de celles enregistrées dans des stations de référence situées hors influence de ces installations. A proximité de Beznau, du PSI et du ZWILAG, les concentrations sont généralement restées proches du seuil de détection de 1 à 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs plus élevées. A noter que les maximas enregistrés dans les différentes stations ne présentent pas de corrélation, quand bien même celles-ci sont situées dans un rayon de quelques km seulement. Toutes ces valeurs sont par ailleurs nettement inférieures à la valeur limite d'immission fixée dans l'ordonnance sur la radioprotection pour les eaux accessibles au public (12'000 Bq/l pour le ^3H).

Tableau 2:

Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2011.

Lieu	Valeur min/ max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruntigen * (environs KKM)	< 2 - 2.9	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 - 2.4	-
Full (environs KKL) *	< 2 - 3.5	-
Beznau (environs KKB) **	2.9 - 19.8	6.40
PSI **	< 1.1 - 35.0	3.90
ZWILAG **	< 1.1 - 18.9	2.40

* mesures OFSP / ** mesures PSI

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C . Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Bern, ont ainsi mis en évidence en 2011 une augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 88 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Les doses qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales ne représentent cependant que quelques μSv .

L'intérêt des mesures de ^{14}C se situe aussi dans l'utilisation de ce traceur atmosphérique pour affiner la modélisation de la dispersion atmosphérique.

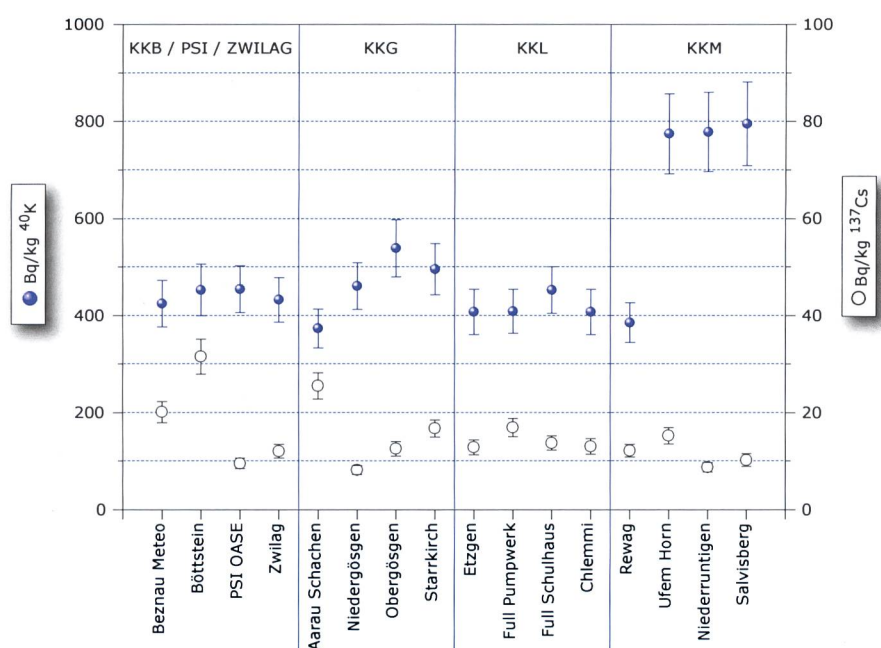


Figure 3:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2 mm) analysés par l'OFSP en 2011 (couche 0 - 5 cm).

Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout examiné dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats 2011 enregistrés 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 2011.

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 montrent que les valeurs dans le voisinage des installations nucléaires n'ont rien d'anormal par rapport aux autres sites. Notons ainsi qu'aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence en dehors du ^{137}Cs .

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

Mesures dans le milieu aquatique

Les analyses des échantillons mensuels des eaux de l'Aar et du Rhin, effectuées par l'EAWAG, ont permis de mettre en évidence les traces des rejets liquides des centrales nucléaires, principalement le ^{58}Co , le ^{60}Co ainsi que le ^{54}Mn provenant de Mühleberg. Les rejets les plus importants ont eu lieu aux mois d'août et septembre, pendant la période de révision. C'est aussi durant ces mois que les concentrations maximales ont été enregistrées dans les eaux de l'Aar, prélevées à Hagneck/BE en aval de KKM.

La réduction significative des rejets en ^{58}Co et ^{60}Co par la centrale de Beznau au cours des dernières années (l'activité en ^{58}Co , dont Beznau était la principale productrice, rejetée par l'ensemble des centrales nucléaires dans le milieu aquatique a chuté d'un facteur 100 entre 2001 et 2011) s'est traduite par une diminution significative des concentrations enregistrées dans les échantillons d'eaux. Ainsi, en 2011, les activités du ^{60}Co , ^{58}Co et du ^{54}Mn enregistrées dans les eaux de l'Aar, prélevées à Klingnau/AG (en aval de KKB), ainsi que dans celles du Rhin, prélevées à Pratteln/BL étaient toutes inférieures à la limite de détection.

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

Les concentrations mensuelles en ^3H enregistrées en 2011 dans les eaux de l'Aar à Brugg/AG ainsi que celles du Rhin prélevées près de Weil/D, en aval de Bâle, sont restées inférieures à 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.

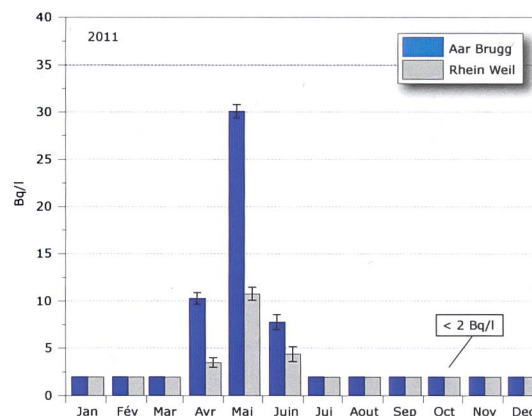


Figure 4: Suivi du tritium dans les échantillons mensuels d'eau de l'Aar à Brugg/AG et du Rhin prélevés à Weil/D en 2011.

Dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar à Hagneck, les radionucléides tels que le ^{54}Mn , le ^{58}Co et le ^{60}Co ainsi que le ^{137}Cs sont clairement mesurables. Du ^{65}Zn a également été décelé en août et septembre, durant la période de révision. Si le ^{137}Cs se retrouve également dans tous les échantillons de sédiment de l'Aar, prélevés à Klingnau, et du Rhin, prélevés à Pratteln, le

^{54}Mn et le ^{60}Co n'y sont présents que sous forme de traces sporadiques. Les activités du ^{58}Co et du ^{65}Zn sont par ailleurs toujours restées inférieures aux limites de détection dans ces échantillons.

Des traces de ^{60}Co , ^{54}Mn et de ^{137}Cs ont également été mises en évidence dans des échantillons de mousse prélevés fin juin dans l'Aar, en aval de Mühleberg. Dans les échantillons de mousses prélevées à Klingnau après la période de révision, seuls du ^{60}Co et du ^{137}Cs ont pu être décelés. Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar en aval de KKM, KKG et KKB en 2011 n'ont en revanche pas révélé la présence de radionucléide d'origine artificielle. Le constat est le même pour l'examen des eaux des nappes phréatiques.

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

Deux prélèvements d'eau sont effectués au début et à la fin de chaque mois dans le bassin de contrôle (intérieur de la centrale) et dans la chambre de contrôle (regard de conduite, à proximité de la Broye). Les échantillons sont ensuite envoyés tous les 2-3 mois à l'IRA qui a été mandaté par l'OFSP pour effectuer les mesures de la radioactivité. Les prélèvements de début et de fin de mois sont mélangés puis mesurés par spectrométrie γ . Aucun émetteur gamma artificiel n'a été détecté en 2011. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co , ^{131}I , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 1.5 Bq/l.

Les prélèvements mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^3H est mesuré par scintillation liquide. Si les teneurs en tritium dans la chambre de contrôle sont restées faibles dans tous les échantillons (valeur maximale de 11 Bq/l; valeur moyenne annuelle de 8 Bq/l), des valeurs plus élevées ont été enregistrées dans les échantillons du bassin de contrôle en février et mars puis à nouveau en octobre et novembre 2011 (valeur maximale de 100 Bq/l enregistrée en novembre; valeur moyenne annuelle de 32 Bq/l). Bien que la concentration maximale enregistrée soit plus de 100 fois inférieure à la valeur limite d'immission fixée dans l'ORaP à 12'000 Bq/l pour le tritium dans les eaux accessibles au public, un suivi plus rapproché sera mis en place dès 2012 afin de s'assurer que les concentrations en tritium n'augmentent pas davantage.

Pour la mesure du ^{90}Sr , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Les activités de tous les échantillons étaient inférieures à la limite de détection de 5-7 mBq/l.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement est resté faible en 2011. La détection du rayonnement direct, du ^{14}C issu des rejets atmosphériques et des produits d'activation présents dans les rejets liquides témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations au cours de l'année sous revue.

Les doses résultant du fonctionnement des centrales nucléaires pour la population avoisinante sont restées nettement inférieures aux limites réglementaires. Comme le montre le suivi de la figure 1, les calculs effectués à partir des rejets effectifs et des modèles de transfert jusqu'à l'homme des radionucléides rejetés confirment que l'impact dosimétrique des centrales nucléaires n'a pas dépassé la valeur directrice liée à la source de 0.3 mSv par an et s'est situé en 2011, en tenant compte des rejets des années précédentes, entre 0.001 et 0.005 mSv. La contribution majeure provient des rejets atmosphériques (essentiellement du ^{14}C), avec à Mühleberg une contribution rémanente des résines rejetées en 1986, dont l'impact très localisé a constamment diminué depuis.

Les calculs de dose effectués de manière indépendante par le PSI et les autorités ont montré que les doses pour la population avoisinante générées par le centre de recherche n'avaient pas dépassé 5% de la valeur directrice liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour l'ensemble du site PSI/ZWILAG. La contribution à la dose attribuable au ZWILAG s'est quant à elle élevée à 0.05 mSv pour l'année.

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.

8.7 Environnement du CERN (mesures OFSP)

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

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

J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus

Institut F.-A. Forel, Université de Genève, 10 route de Suisse, 1290 VERSOIX

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par l'Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement 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 2011 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Même si des traces de radioisotopes, produits dans les installations du centre de recherche, ont pu être détectées, les activités maximales enregistrées sont restées nettement inférieures aux limites suisses et leur impact radiologique peut être considéré comme très faible.

Programme de surveillance de l'OFSP

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

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

Programme spécifique «LHC»

Le grand collisionneur à hadrons (Large Hadron Collider- LHC) est en fonction depuis fin 2009 et les expériences de collision de faisceaux de protons au sein du LHC ont été poursuivies en 2011. Des mesures de surveillance complémentaires focalisées au voisinage des puits d'aération du LHC, ont donc été mises en œuvre par l'OFSP, côté suisse, afin d'évaluer l'impact éventuel du LHC sur l'environnement et la population avoisinante.

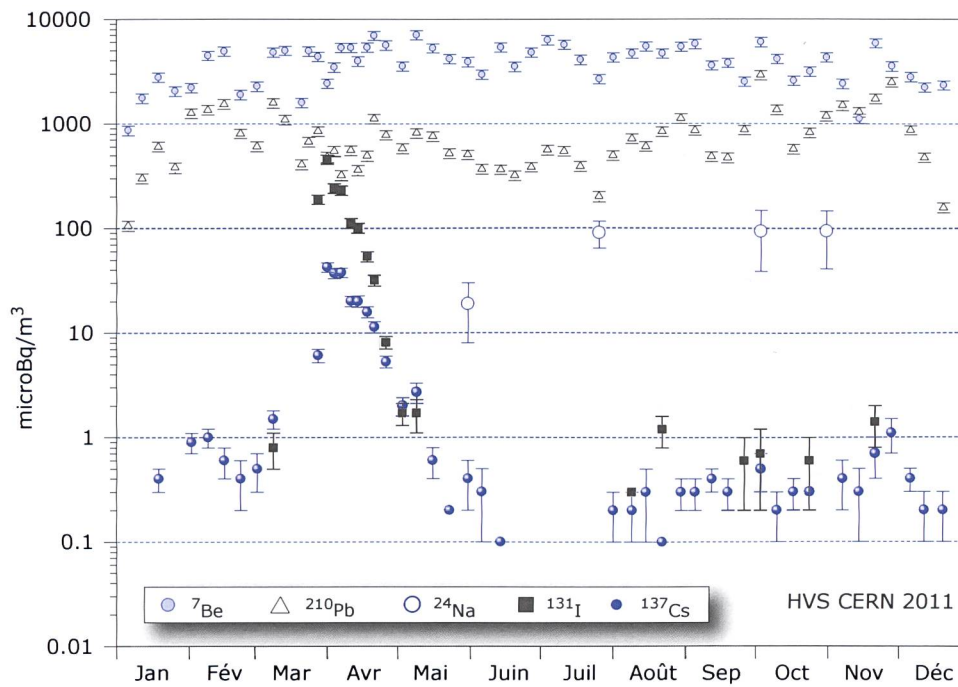


Figure 2: Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2011.

Mesures de l'exposition ambiante

Les emplacements des TLD, destinés au contrôle de l'exposition ambiante au voisinage du CERN, ont été revus en 2006 déjà afin de pouvoir tenir compte de l'impact éventuel du LHC après sa mise en fonction. Treize sites ont été surveillés en 2011, 5 d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français). Par ailleurs, en plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée.

Les résultats de ces mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP, n'ont pas signalé de valeur indicative d'un impact notable des installations du CERN pour les emplacements situés à l'extérieur de la clôture. En effet, pour les 8 sites concernés, les équivalents de dose ambiants correspondent à ceux de l'irradiation naturelle (0.01 à 0.02 mSv par trimestre pour les neutrons et environ 0.2 mSv par trimestre pour les gammas). En revanche, comme les années précédentes, des doses de neutrons plus élevées (jusqu'à 0.91 mSv par trimestre) ont parfois été enregistrées aux 2 emplacements proches du synchrotron à protons et de l'installation Isolde sur le site de Meyrin.

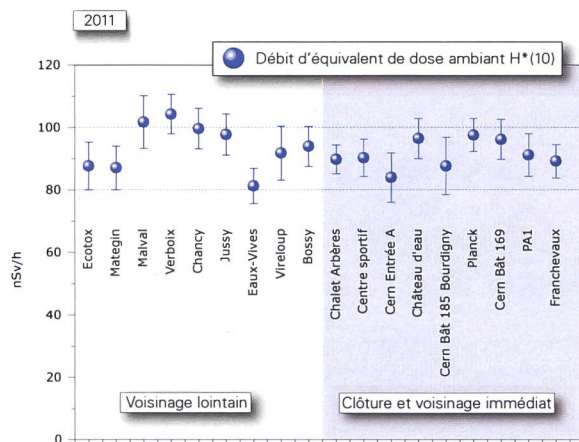


Figure 1: Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2011 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en automne 2011 sur 9 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants ont confirmé ce constat. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$) dû au rayonnement gamma se sont ainsi échelonnées entre 81 et 104 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes: 92 ± 5 nSv/h; moyenne des sites distants 94 ± 8 nSv/h).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau RADAIR située au CERN et mesurant en continu la radioactivité alpha et bêta des aérosols (voir Chap. 4.2) n'a pas signalé d'anomalie en 2011. Depuis 2007, un moniteur d'iode est également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l' ^{131}I gazeux. Aucune valeur supérieure à la limite de détection de 0.1 Bq/m^3 n'y a été enregistrée.

Les résultats des mesures hebdomadaires des filtres aérosols à haut débit (HVS) du CERN ont confirmé, comme les années précédentes, la prédominance des radioéléments d'origine naturelle, tels que ^7Be et ^{210}Pb (cf figure 2). Le cas du ^7Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production dans les tunnels du CERN). Le tableau 1 montre que les concentrations de ^7Be mesurées en 2011 dans les filtres aérosols de la station du CERN ne se sont toutefois pas notablement distinguées de celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence. Des traces de ^{22}Na , également d'origine naturelle, ont été détectées à plusieurs reprises (valeurs comprises entre 0.1 et $1 \mu\text{Bq/m}^3$).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, l'année 2011 fut particulière en raison de l'accident de Fukushima (voir Chapitre 4.1), dont les retombées radioactives (essentiellement du ^{131}I ainsi que du ^{134}Cs et du ^{137}Cs) ont pu être détectées dans l'air en Suisse dès la fin mars et jusqu'à fin mai environ. En dehors de cette période, des traces de ^{137}Cs provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont également été détectées à plusieurs reprises, mais les activités n'ont pas dépassé $1.5 \pm 0.3 \mu\text{Bq/m}^3$.

Les seuls radioisotopes attribuables aux activités du CERN sporadiquement mis en évidence dans les filtres aérosols sont le ^{24}Na et le ^{131}I (valeurs comprises entre 19 et $90 \mu\text{Bq/m}^3$ ¹ et entre 0.6 et $1.4 \mu\text{Bq/m}^3$ ² respectivement). Ces radionucléides, d'une demi-vie de 15 h pour le ^{24}Na et de 8 jours pour le ^{131}I , sont produits dans les accélérateurs de particules du centre de recherche (^{131}I est uniquement produit par l'installation ISOLDE).

1 Ces activités sont reportées à la date de référence correspondant au début de la période de collection; jusqu'en 2010, la date de référence correspondait à la date de fin de la période de collection, les activités pour les courtes périodes étaient sensiblement sous-estimées. A titre de comparaison, si l'on choisit la date de fin de collecte comme date de référence pour l'année 2011, les concentrations en ^{24}Na s'échelonnent alors entre 1 et $10 \mu\text{Bq/m}^3$.

2 Les concentrations mentionnées ici sont celles attribuables aux activités du CERN uniquement. La concentration maximale en ^{131}I enregistrée en 2011 dans les filtres aérosols du site de Meyrin à la suite de l'accident de Fukushima a atteint $456 \mu\text{Bq/m}^3$ entre le 28.03 et le 01.04.2011.

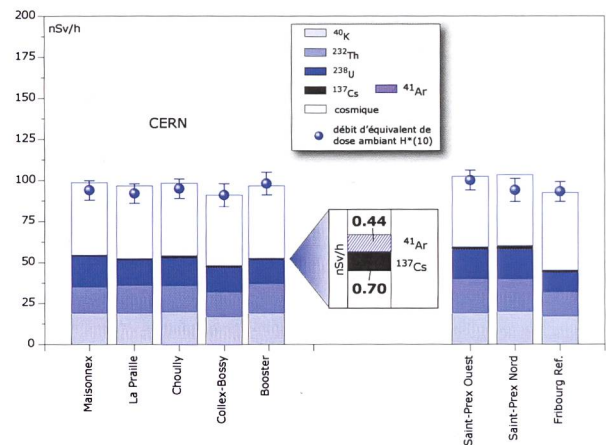


Figure 3:

Contributions individuelles au débit d'exposition ambiante déterminées par spectrométrie gamma in situ pour les sites voisins du CERN examinés en 2011, et comparaison avec les résultats obtenus à St-Prex/VD ainsi qu'à Fribourg.

Notons encore que l'impact radiologique de ces traces de ^{24}Na et de ^{131}I est tout à fait négligeable, puisque les concentrations les plus élevées enregistrées en 2011 pour ces radionucléides ne représentent qu'environ 0.00009% (pour le ^{24}Na) et 0.00005% (pour le ^{131}I) des limites d'immissions suisses. L'identification d'un aussi faible niveau de radioactivité nécessite des méthodes extrêmement sensibles, comme celles mises en œuvre par l'OFSP.

Tableau 1:

Concentrations du ^7Be mesurées en 2011 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	Moyenne
	($\mu\text{Bq/m}^3$)	($\mu\text{Bq/m}^3$)
CERN (Meyrin/GE)	1.1 – 7.1	4.0
Oberschrot/FR	1.6 – 8.2	4.0
Klingnau/AG	1.1 – 6.9	3.4
Güttingen/TG	1.0 – 7.2	4.0
Monte Ceneri/TI	1.8 – 8.2	4.5

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma in situ permettent de distinguer les contributions d'origine naturelle et artificielle à l'exposition externe du public. Les mesures 2011 n'ont pas indiqué d'apport artificiel attribuable aux activités du CERN en dehors de l'enceinte du centre de recherche: la figure 3 montre en effet que les valeurs mesurées au voisi-

nage du centre de recherche sont tout à fait comparables à celles relevées dans des sites hors de son influence, tels que St-Prex/VD ou Fribourg (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au Chap. 3.1). Les résultats de la mesure effectuée à Maisonnex, à proximité d'un point principal d'évacuation de l'air (PA1) du LHC, ne révèlent par ailleurs aucun impact notable du fonctionnement du collisionneur en termes d'exposition ambiante ou de production de radionucléides. Des traces d'⁴¹Ar ont en revanche pu être détectées sur le spectre in situ enregistré à la Rue Booster, située à l'intérieur de la clôture du site de Meyrin. La concentration de ce radioisotope de très courte période (1.8 h) dans l'air environnant a pu être évaluée à 1.3 Bq/m³, soit environ 0.8 % de la valeur limite d'immissions définie pour cet isotope dans l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP).

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux n'ont pas révélé d'impact notable des installations du CERN. 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. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l. La valeur maximale enregistrée pour le tritium dans les échantillons mensuels d'eau du Nant d'Avril s'est élevée à 3.4 ± 0.6 Bq/l.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par l'Institut F.-A. Forel à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme pour la période novembre 2010 à octobre 2011 a fait l'objet d'un rapport spécifique³.

En dehors du ⁴⁰K et des isotopes des séries primordiales (²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th), 3 radioisotopes ont été détectés dans les échantillons d'eau prélevés dans le Nant d'Avril.

Les activités maximales sont celles du ⁷Be (maximum de 0.86 ± 0.04 Bq/l), avec une moyenne de 0.21 Bq/l lorsque l'isotope est présent. L'échantillonnage des eaux ayant été réalisé en fonction du débit, il est possible d'estimer le flux d'un isotope en multipliant les débits (exprimés en m³/période) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de ⁷Be pour la période 2010 - 2011 est ainsi de 1'030 MBq au minimum et de 1'220 MBq au maximum et se situe en-dessous de la moyenne des périodes de mesure précédentes. Ces valeurs de flux pour la période 2010-2011 sont toutefois approximatives car les données concernant le débit du Nant d'Avril sont entachées d'une erreur, due à la présence d'un écoulement situé sous la dalle en béton qui recouvre le fond du lit de la rivière.

Le deuxième radionucléide mis en évidence dans les eaux du Nant d'Avril est le ¹³⁷Cs (maximum de 12 mBq/l). Ce radionucléide a été détecté exclusivement sur les particules (mesuré sur les filtres), ce qui montre qu'il est fortement associé à celles-ci, malgré une acidification de l'échantillon. Le ¹³⁷Cs provient de l'érosion des sols, qui entraîne des particules contaminées par les retombées des essais nucléaires dans l'atmosphère (maximum des retombées en 1963 - 1964) et la catastrophe de Tchernobyl (1986).

Le troisième radionucléide est le ²²Na, détecté dans 6 échantillons bimensuels, avec une valeur maximale de 15 mBq/l. Très peu de données récentes sont disponibles sur les flux naturels de ²²Na. Comme le ⁷Be, du ²²Na est produit dans la stratosphère par rayonnement cosmique. Tokuyama et al.⁴ mesurent au Japon un flux atmosphérique de ²²Na de 4 ordres de grandeur inférieurs à celui du ⁷Be, alors que les activités mesurées dans le Nant d'Avril ne sont inférieures que de 2 ordres de grandeur. Ce radionucléide provient donc très probablement des activités du CERN. L'activité maximale du ²²Na mesurée dans les eaux du Nant d'Avril en 2011 ne représente toutefois que 0.025 % de la limite d'immissions fixée par la législation suisse (ORaP) pour les eaux accessibles au public.

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ⁷Be et de ¹³⁷Cs dans tous les échantillons. Les activités mesurées pour ces deux isotopes sont résumées dans le tableau 2 et se situent dans la moyenne inférieure des périodes de mesure précédentes. Notons encore que depuis la période 2004 - 2005, aucune trace de ⁵⁴Mn, de ⁶⁵Zn ou des isotopes de cobalt (⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co) n'a plus été détectée dans les sédiments du Nant d'Avril.

³ J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus et K. Loizeau, Rapport N°12 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2010- Octobre 2011; Institut F.-A. Forel (Décembre 2011).

⁴ H. Tokuyama and S. Igarashi; Seasonal Variation in the Environmental Background Level of Cosmic-Ray-Produces ²²Na at Fukui City, Japan. J. Environ. Radioactivity 38:147-161 (1998).

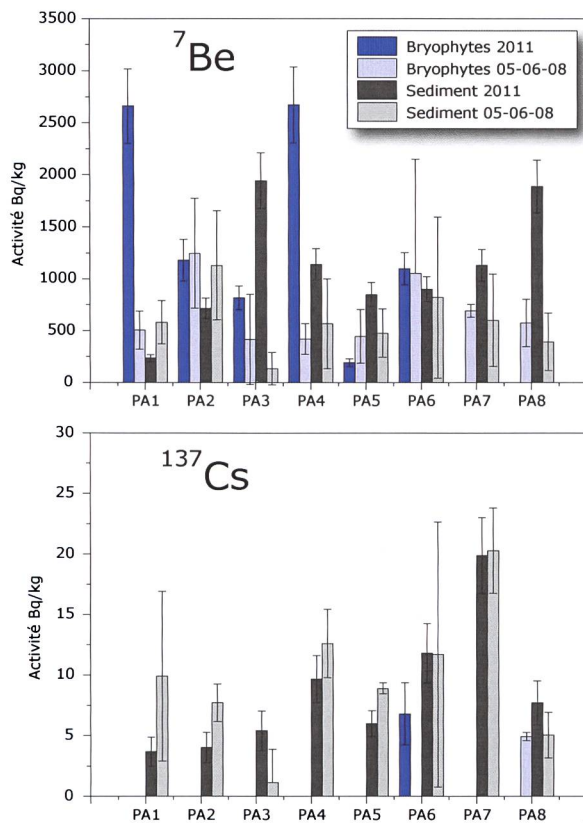


Figure 4: Activités du ^7Be et du ^{137}Cs dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC (PA1 à PA8). Les valeurs 05-06-08 correspondent aux moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées au cours des périodes témoins 2005-2006-2008.

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 ont par ailleurs été prélevés une fois au cours de l'année aux 8 principaux points de rejets des eaux du LHC et analysés par l'Institut Forel. Les activités mesurées dans les échantillons de sédiments se sont échelonnées entre 237 et 1'944 Bq/kg pour le ^7Be et entre 3.7 et 19.9 Bq/kg pour le ^{137}Cs . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en ^7Be variant entre 192 et 2'673 Bq/kg et entre < 2 et 6.8 Bq/kg pour le ^{137}Cs . La comparaison de ces résultats avec ceux des années précédentes, alors que le LHC n'était pas en fonction (programme point zéro LHC), n'a pas révélé la présence de nouveaux radioisotopes. La figure 4 montre que les activités spécifiques de ^7Be dans les bryophytes prélevés aux points de rejet PA1 et PA4 ainsi que celles des sédiments prélevés aux points PA3 et PA8 sont significativement plus élevées que celles enregistrées sur les mêmes sites lors des périodes témoins; elles restent toutefois dans des gammes de valeurs déjà observées dans le Nant d'Avril.

Tableau 2:

Résumé des résultats des mesures effectuées par l'Institut F.-A. Forel dans les sédiments du Nant d'Avril durant la période novembre 2010 à octobre 2011 (12 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max	Moyenne	Médiane
	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
^7Be	46 - 2'985	548	216
^{137}Cs	1.1 - 14.8	5.2	3.2

Conclusions

Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec l'institut F.-A. Forel, a confirmé que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement et la population avoisinante est resté très faible en 2011.

A l'image des examens in situ de la figure 3, l'ensemble des résultats ont montré la prédominance des radioéléments d'origine naturelle. La détection de traces de radionucléides attribuables aux activités du CERN (^{24}Na , ^{41}Ar , ^{131}I dans l'air ou ^{22}Na dans l'eau) n'a été possible que grâce à la mise en œuvre de techniques de prélèvement et de mesure d'une très grande sensibilité, dépassant le cadre des contrôles réglementaires. Les activités maximales des radioisotopes artificiels provenant des activités du CERN sont en effet nettement inférieures aux limites suisses légales.

8.8 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)

P. Vojtyla et F. Malacrida

CERN

Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE)

1211 Genève 23

Résumé

Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que l'Organisation a respecté la valeur directrice de 0.3 mSv/a pour l'année 2011. La dose effective délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.013 mSv, soit < 5% de la valeur directrice. Les valeurs de concentrations de radionucléides dans tous échantillons environnementaux sont restées inférieures à 0.3 % des limites applicables. De fait, l'impact écologique du CERN a été négligeable.

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. Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des 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.

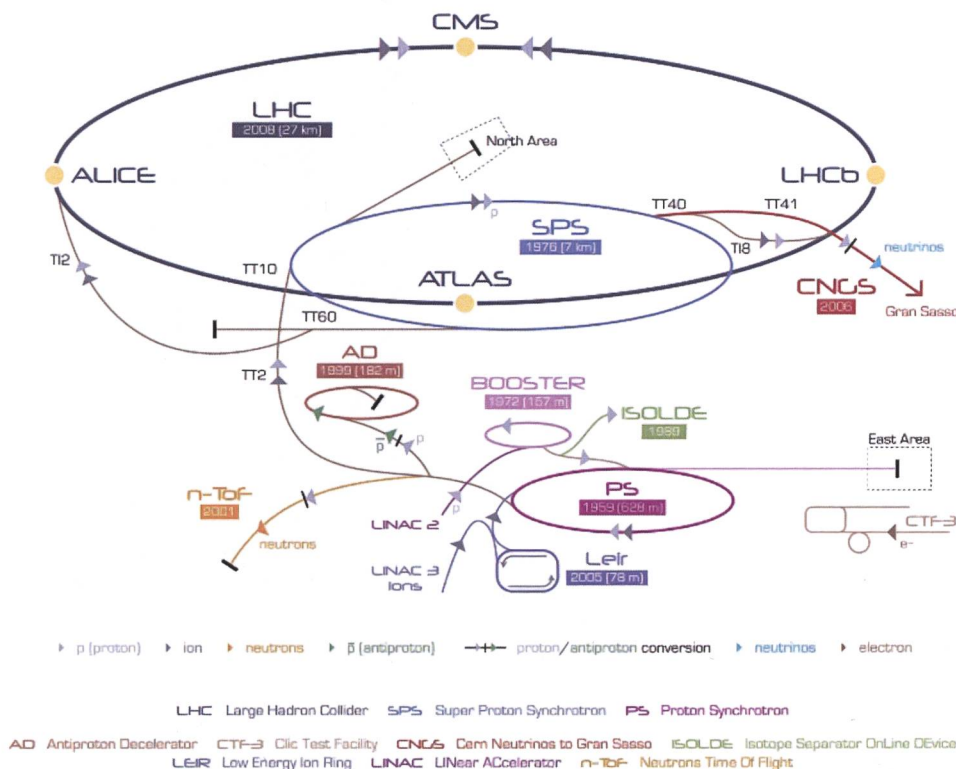


Figure 1:
Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire).

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 le résultat de ces collisions.

Plusieurs accélérateurs sont situés sur site CERN ainsi que sous terre le long de la frontière franco-suisse, au nord-ouest de Genève. Les particules y sont accélérées puis transférées, via des tunnels, à des accélérateurs de plus hautes énergies ou à des zones expérimentales. Ce qui suit présente les installations susceptibles de générer un impact radiologique sur l'environnement. Pour l'année 2011, la configuration était la suivante (voir Figure 1): le LINAC 2, situé en surface du site de Meyrin, prépare le faisceau pour le Proton Synchrotron Booster (PSB, surface, site de Meyrin), qui fournit l'expérience ISOLDE et le Proton Synchrotron (PS, surface, site de Meyrin). Le PS fournit du faisceau à trois zones expérimentales aussi situées sur le site de Meyrin, soit n-TOF, AD et East Hall. Il sert aussi d'injecteur au Super Proton Synchrotron (SPS), dont la majeure partie se situe en sous-sol côté France. Les protons accélérés par le SPS peuvent atteindre des énergies de 450 GeV et la majorité d'entre eux alimentent l'installation CNGS et les

zones expérimentales du site CERN de Prévessin (Zone Nord) en France. Une fraction de ces protons est injectée dans les deux anneaux de stockage au sens de rotation opposés du Large Hadron Collider (LHC). Les particules y atteignent une énergie de 3.5 TeV et circulent pendant plusieurs heures, durant lesquelles elles entrent en collision. Ces points de collision se situent aux milieux de quatre grands détecteurs : ATLAS, ALICE, CMS et LHC-b. Le LHC et ses détecteurs se situent profondément sous terre, majoritairement en France. 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 lorsque les particules en percutent d'autres ou percutent des cibles fixes, ainsi que lors d'accélération, d'extractions et de collimations des faisceaux. Les accélérateurs sont blindés et les plus puissants d'entre eux sont situés profondément sous terre, de telle manière à

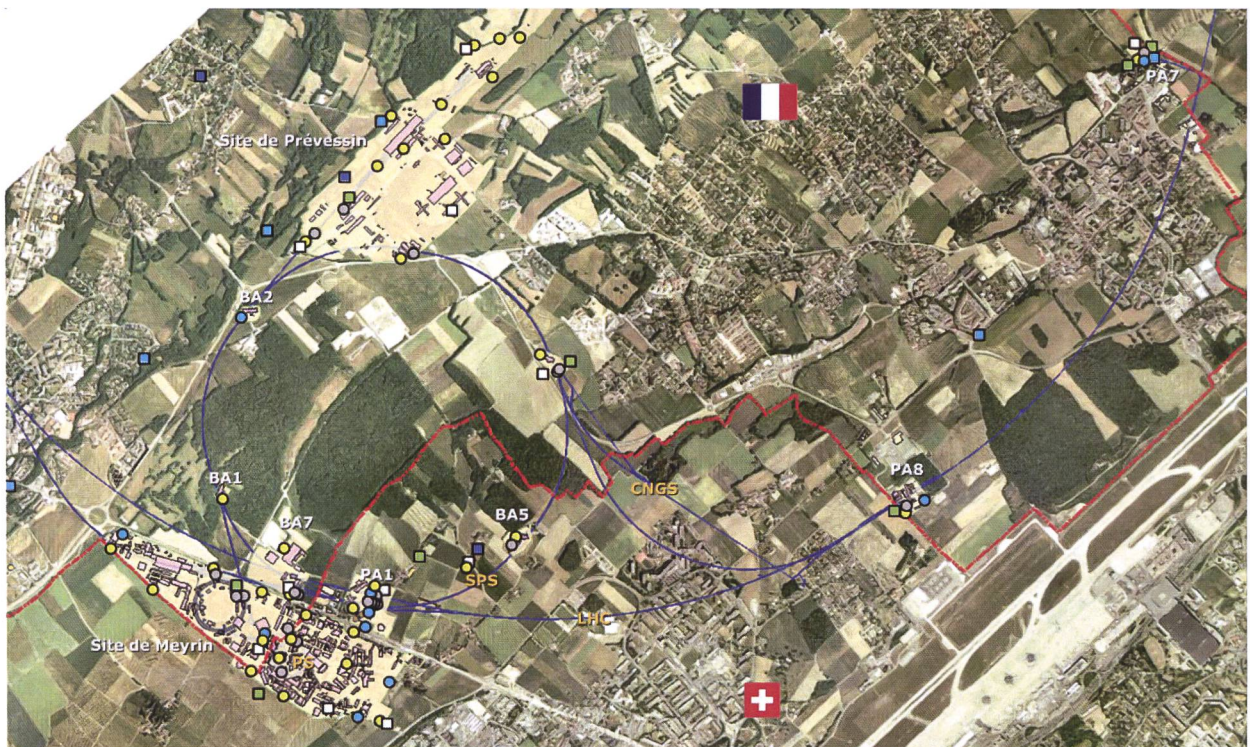


Figure 2: Région frontalière franco-suisse : sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS), de l'installation CERN Neutrinos to Gran Sasso (CNGS) et du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonnage qui concernent le territoire suisse. Certains points concerne le territoire français sont hors-carte, ainsi que les points de collecte des échantillons de l'Allondon et de l'eau de fontaine provenant des nappes phréatiques à Bourdigny.

ce que seule une fraction infime des rayonnements traverse ces protections; ce type de rayonnement est nommé rayonnement diffusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Les rayonnements diffusés, les rejets gazeux et les effluents sont surveillés en continu (voir ci-dessous).

En termes d'impact environnemental, le risque radiologique induit par des installations mettant en jeu des accélérateurs est très faible. Maintenir un faisceau de particules en orbite requiert une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radionucléides produits sont des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faible radiotoxicité. Une contamination à long terme de l'environnement est donc impossible. Pour plus d'information, se référer au site: <http://environmental-impact.web.cern.ch/environmental-impact/fr/Radiation/Radiation-fr.html>

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 fonction des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance des rayonnements diffusés se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou prédits. Chaque station est équipée d'une chambre d'ionisation dédiée à la mesure en continu des photons et des particules chargées et pénétrantes, comme les muons, ainsi que d'un moniteur à neutrons. En 2011, 41 stations de ce type étaient en opération. Les positions des stations des sites CERN sont identifiées en Figure 2 par des points jaunes. Les points d'extraction d'air pouvant émettre des substances radioactives 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 2011, 30 stations étaient en opération; les positions des stations sont identifiées en Figure 2

par des points gris. De manière similaire, les points de rejet d'eaux claires sont équipés de stations de surveillance de l'eau (15 stations en 2011). Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vie courte et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire (points bleus, Figure 2).

Les niveaux de rayonnements diffusés mesurés, 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 largement reconnus [1, 2]. Un mécanisme de contrôle supplémentaire consiste en la surveillance des immissions, 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 pu être effectué et que les modèles utilisés sont corrects. Cette surveillance implique un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (12 stations, carrés blancs en Figure 2), des échantillons d'herbe (12 points d'échantillonnage, carrés verts en Figure 2), d'eau, de bryophytes (mousses) et de sédiments dans les cours d'eau (13 points, carrés bleus en Figure 2), de l'eau des nappes phréatiques (7 points, carrés bleus foncés en Figure 2), ainsi que des échantillons de produits d'agriculture locaux, tels que blé, graines de tournesol, asperges et vin.

Résultats 2011

Opération des accélérateurs en 2011

En 2011, tous les accélérateurs du CERN ont été en opération de février à début décembre. Les faisceaux du LHC ont été exploités tout au long de l'année à la moitié de l'énergie nominale, soit 2 x 3.5 TeV, sauf aux mois de novembre et décembre qui ont été dédiés aux faisceaux de faibles intensités constitués de protons et d'ions plomb. Environ 50% de l'intensité nominale a été atteinte, ce qui constitue une progression notable par rapport à 2010. Seules quelques émissions de radionucléides gazeux de demi-vie courtes ont pu être mises en évidence aux sites LHC PA3 (Crozet, FR), PA5 (Cessy, FR) et PA7 (Collex-Bossy, CH, et Ferney-Voltaire, FR). Les quantités impliquées sont restées très largement inférieures aux limites légales. Ces rejets sont principalement attribuables à la collimation des faisceaux aux points 3 et 7 ainsi qu'aux arrêts des faisceaux au Point 6 (Versonnex, FR); l'air de cette zone est rejeté aux points 5 et 7. Aucun autre impact du LHC n'a été détecté. En comparaison avec le nombre nominal, seul un

dixième des protons a été arrêté sur les collimateurs (2.9×10^{16}). Le nombre de protons arrêtés par les blocs absorbeurs a été de 7×10^{16} en 482 extractions ; ce chiffre est à comparer avec le nombre nominal de 1.2×10^{17} protons en 233 extractions par an. Ces chiffres expliquent pourquoi l'impact du LHC est encore plus faible que prévu.

Rayonnement diffusé

La Figure 3 présente la dose ambiante équivalente mesurée par les moniteurs de rayonnements diffusés qui concernent le territoire suisse. Les stations PMS122 et PMS123 sont situées le long de vignes, à la barrière sud du site CERN de Meyrin. Cette zone est inhabitée. La quasi-totalité de la dose neutronique mesurée par ces stations est due aux rayonnements diffusés provenant de la section d'extraction du faisceau du PS où des interactions localisées de faisceau avec les éléments de l'accélérateur surviennent.

Cette section du PS se situe proche de ces stations. Aucune valeur mesurée autour du site de Meyrin n'a excédé 10 % de la limite de dose annuelle [3, 5]. La valeur de dose équivalente ambiante enregistrée par la station de surveillance PMS163 est utilisée pour la détermination de la dose effective aux membres du public du groupe de référence du site de Meyrin.

Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets par les cheminées de substances radioactives dans l'atmosphère concernant le territoire suisse sont résumés au Tableau 1. Dû à la faible hauteur des cheminées ainsi qu'aux courtes demi-vies des radionucléides émis, l'impact, qui est minime, reste local. La sommation des rejets est donc dénuée de sens, car à chaque point de rejet correspond un groupe de référence propre. Les radionucléides se répartissent en quatre catégories :

les gaz radioactifs de demi-vie courtes ^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , et ^{41}Ar ; le ^7Be ; l'activité beta total (majoritairement ^{32}P , ^{33}P) et le tritium (^3H). Les valeurs tritium sont surestimées car elles dérivent d'une méthode d'évaluation très conservative. L'impact radiologique du tritium est cependant négligeable (voir plus loin). Les valeurs d'émissions en iode (^{124}I , ^{126}I , et ^{131}I) ainsi qu'en émetteurs alpha de demi-vie courte (^{212}Pb) provenant de l'installation ISOLDE ne figurent pas dans le Tableau 1 : 2.0 MBq d'iode radioactif et 16 kBq de ^{212}Pb . Aucun émetteur alpha de demi-vie longue n'a été émis par l'installation.

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 de plusieurs cours d'eau à un moment donné. Les radionucléides rejetés se répartissent en deux catégories : (a) le tritium sous forme aqueuse (HTO) et (b) l'activité beta total imputable en grande majorité au ^{22}Na . Le Tableau 2 présente les rejets de 2011, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés. L'impact ne peut être dérivé de l'addition des rejets totaux dans les cours d'eau car, en règle générale, les différents groupes de population sont exposés de manières distinctes. La dose résultante est négligeable. En 2011, aucun membre du public n'a pu recevoir une dose supérieure à 0.00003 mSv par le biais des rejets de substances radioactives provenant des sites CERN dans les cours d'eau (<0.01% de la limite).

Surveillance des immissions

Comme pour les laboratoires suisses, les immissions provenant de l'accident de Fukushima ont pu être observées. Les activités spécifiques mesurées ont été cohérentes avec les valeurs mesurées dans le reste du pays. Le rôle du laboratoire environnemental du CERN étant de surveiller l'impact des installations de l'Organisation, les immissions imputables à cet accident ne sont pas reportées ici.

Le Béryllium-7 est un radioélément faiblement radiotoxique, produit dans l'air par les particules de hautes énergies. Il possède une grande affinité aux aérosols, ce qui permet de l'utiliser comme marqueur de rejets dans l'atmosphère de particules radioactives en suspension dans l'air provenant des accélérateurs (voir Tableau 1). Cependant, ce radioélément est également produit naturellement par les rayonnements cosmiques en atmosphère. Aux

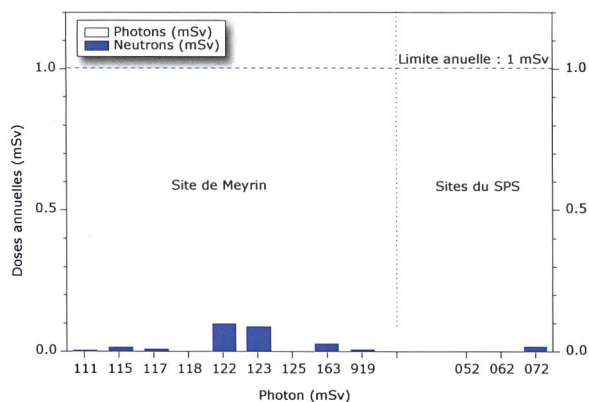


Figure 3: Doses ambiantes annuelles nettes enregistrées par les moniteurs de rayonnements diffusés (CERN, 2011).

Tableau 1:
Radioactivité du CERN rejetée dans l'air en 2011.

Origine du rejet	Station	Air rejeté	¹¹ C, ¹³ N, ¹⁴ O, ¹⁵ O, ⁴¹ Ar	⁷ Be aérosol	Bêta aérosol	Tritium
		10 ⁶ m ³	TBq	MBq	MBq	GBq
Anneau principal PS	PMV174	280	16.3	501	19	8.4
PS BOOSTER	PMV175	239	3.7	509	14	1.1
TT10 injection PS-SPS	PMV11	309	7.6	163	5.4	13.4
Ventilation SPS, BA5	PMV51	405	0.7	0.09	<0.001	5.9
HIRADMAT	PMV70	35	<0.001	< DL	< DL	< DL
ISOLDE	PMV170	94	9.4	7	0.4	6.9
n-TOF	PMV171	15	5.1	0.1	0.01	2.6
TT60 extr. SPS-Ouest1)	PMV172	80	< DL	< DL	< DL	< DL
TT70 transfert, PS-SPS	PMV173	69	0.4	< DL	< DL	48
TI2 transfert, SPS-LHC	PMV200	135	0.05	< DL	< DL	< DL
LHC PA1	PMV901	472	< DL	< DL	< DL	< DL
LHC PA1, ATLAS	PMV911-14	608	< DL	< DL	< DL	< DL
LHC PA8, LHC-b	PMV982	368	< DL	< DL	< DL	< DL
LHC PA7, collimateurs	PMV907	653	1.2	< DL	< DL	< DL

¹⁾ pas de faisceau dans le tunnel

Tableau 2:
Radioactivité du CERN rejetée dans l'eau en 2011.

Origine du rejet	Station	Quantité d'eau	Tritium	Bêta/gamma (²² Na)	Rejeté dans:
		10 ⁶ m ³	GBq	MBq	
Site de Prévessin, SPS	PMW21	0.20	9.7	28.2	Le Lion (F)
Refroidissement du SPS	PMW62	0.15	0.26	2.3	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Sud-est	PMW101	0.96	0.70	3.9	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Nord-est	PMW102	0.10	0.12	0.03	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	PMW103	0.49	0.47	25.3	Le Lion (F)
AD infiltration	PMW104	0.03	0.02	4.0	STEP ²⁾
Site SPS BA6 + site LHC PA1	PMW910	1.75	2.4	25.3	Nant d'Avril (CH)
CNGS, rejet par le site du LHC PA8	PMW980	0.002	0.34	0.09	Le Nant (F)

²⁾ Station d'épuration d'eau Bois-de-Bay à Satigny/GE.

latitudes moyennes, la concentration en ⁷Be dans l'air varie au cours de l'année, avec des maximums en début d'été et en été, lorsque la tropopause, une couche se situant entre la troposphère et la stratosphère, se rompt. L'air provenant de la stratosphère, riche en radioéléments produits par rayonnements cosmiques, est alors injecté dans la troposphère. Les pluies influencent aussi la concentration naturelle en ⁷Be, car elles précipitent les aérosols en suspension dans l'air. La Figure 4 montre la concentration de ⁷Be dans l'air ambiant collecté dans deux types de stations: (a) des stations situées autour du CERN pouvant capter des rejets d'accélérateurs et (b) des stations de référence éloignées (PSA951) voire très éloignées des accélérateurs (HVS Oberschrot/FR). Toutes les courbes suivent la même tendance, prouvant ainsi que la majeure partie de

l'activité en ⁷Be mesurée est d'origine naturelle. La possible contribution provenant des accélérateurs du CERN n'a en aucun cas excédé 0.9 mBq/m³, soit 0.0003% des limites d'immissions suisses [5]. La mesure de l'échantillonneur d'aérosols à haut volume PSA973 situé au LHC-PA7 a été suffisamment sensible pour détecter le ²²Na naturel, aussi produit par rayonnements cosmiques. Les quantités mesurées, soit <0.002 mBq/m³, correspondent à celles mesurées avant que le LHC ne soit en opération. Les mesures des filtres d'aérosols de la station de ventilation PMV907 n'ont pas mis de ²²Na en évidence.

Concernant l'environnement aquatique, seuls trois échantillons provenant de cours d'eau récepteurs des effluents du CERN ont présenté une concentration en tritium supérieure aux valeurs habituelles; deux échantillons d'eau proviennent de la rivière le Lion (FR), en aval du point de rejet PMW21 (comparer avec le Tableau 2), et un échantillon provient du ruisseau le Nant (FR). Dans le premier cas, les concentrations en tritium ont été respectivement de 3.1 ± 1.0 Bq/l et 3.5 ± 1.0 Bq/l, dans le second de 3.7 ± 1.0 Bq/l. Le tritium provient respectivement des zones expérimentales du site de Prévessin du CERN et de l'installation CNGS. La limite d'immission suisse pour le tritium dans l'eau est de 12'000 Bq/l [5]; la valeur la plus élevée ne représente donc que 0.03% de la limite [5]. Les bryophytes (mousses) sont d'excellent 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. Les mesures des bryophytes et de sédiments collectés dans le Lion ont permis de mettre en évidence des faibles traces de ^{54}Mn (demi-vie de 312 jours) dans les bryophytes et dans les sédiments en deux lieux d'échantillonnage. Les concentrations dans les bryophytes séchés ont été respectivement de 3.9 ± 3.3 Bq/kg et 21.9 ± 2.6 Bq/kg; les concentrations dans les sédiments séchés ont été respectivement de 0.2 ± 0.1 Bq/kg et 0.3 ± 0.1 Bq/kg. A ces mêmes points de collecte et en dehors du tritium, aucun autre radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les échantillons d'eau et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collec-

tés en octobre, pratiquement à la fin de la période d'exploitation des accélérateurs. Bien que les radionucléides aient été mesurés dans des échantillons provenant du territoire Français, ils sont mentionnés dans ce présent rapport car la rivière le Lion rejoint l'Allondon qui termine son cours dans le Rhône. Le Nant rejoint le Gobé qui se déverse dans le lac Léman. De fait, des traces de ^{54}Mn ont pu aussi être mises en évidence dans les bryophytes de l'Allondon, à concentrations de 0.6 ± 0.4 Bq/kg (échantillon séchés). La concentration maximale mesurée ne représente que 0.22% de la limite d'exemption suisses [5]. Aucun radionucléide provenant des effluents du CERN n'a pu être mesuré dans le Nant d'Avril, dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches. Cette rivière fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forrel de l'Université de Genève. En 2011, leurs méthodes de détection caractérisées par leur extrême sensibilité ont permis de révéler à six reprises du ^{22}Na dans l'eau de rivière, imputable au CERN. Les concentrations sont restées inférieures à 0.02 Bq/l [6], soit 0.03% de la limite d'immission [5].

Aucun radionucléide produit au CERN n'a pu être mis en évidence dans aucun des autres des échantillons environnementaux; l'impact écologique du CERN a été insignifiant.

Impact radiologique

La dose effective, reçue par les membres du groupe de référence pour le site de Meyrin du CERN en 2011, a été calculée à partir des valeurs enregistrées par le moniteur de rayonnements diffusés PMS163, situé à proximité du groupe de référence pour le site de Meyrin, ainsi que des activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion amélioré basé sur les directives [1,2]. La valeur de dose résultante est de 0.013 mSv, qui doit être comparée avec la valeur guide pour les membres du public de 0.3 mSv, comme définie en [3] (<4.3%). De fait, en 2011 et comme pour les années précédentes, le CERN a entièrement respecté les réglementations relatives à la radioprotection. La dose effective totale de 0.013 mSv a consisté pour 48.5% en rayonnements diffusés et pour 50.7% en rejets de radionucléides gazeux à demi-vie courte. Les autres radionucléides et voies d'exposition, incluant les rejets en eau (<0.00007 mSv), ont contribué d'à peine 0.8%. Les deux contributeurs majeurs sont surveillés en continu, garantissant ainsi un temps de réaction optimal en cas de dégradation de fonctionnement des installations.

8.8 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN) - @OFSP 2012

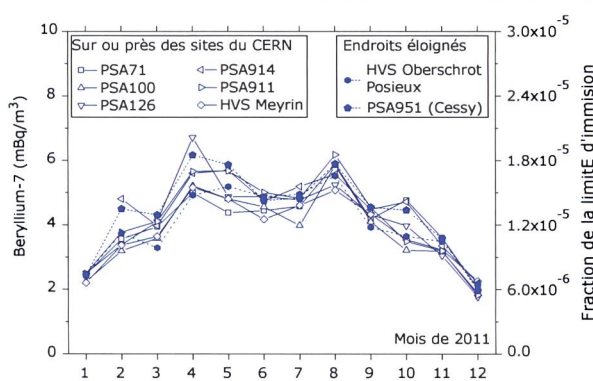


Figure 4: Activités en ^7Be mesurées par le biais de 9 stations d'échantillonnage dont 7 sont situées sur ou proches des sites du CERN. PSA71 : Site du SPS BA-7. PSA100 : Site CERN de Meyrin. PSA126 : Proche du PS. PSA914 : Site du LHC PA1. PSA911 : Proche d'une ferme de Meyrin. PSA973 : Échantillonneur CERN à haut débit sur le site du LHC PA7 proche de Collex-Bossy/GE. HVS Meyrin, HVS Oberschrot/Posieux : Échantillonneurs OFSP à haut débit, le premier se situant sur le site CERN de Meyrin et le second à Oberschrot (janvier-mai) puis relocalisé à Posieux (juin-décembre)/Fribourg [4]. PSA951 : Cessy, France.

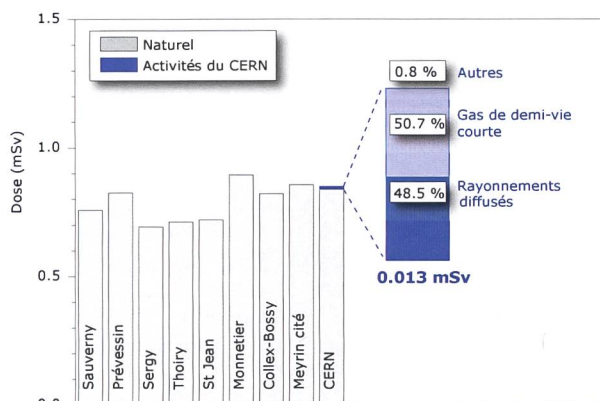


Figure 5: Contribution à la dose annuelle des activités du CERN sur le site CERN de Meyrin, comparée aux variations des doses externes naturelles dans des communes françaises et suisses situées à proximité. La contribution du CERN de 0.013 mSv doit être comparée à la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv [3].

Conclusions

1. Les résultats du programme de surveillance effectué par le CERN, combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur directrice de 0.3 mSv/a pour l'année 2011;
2. Des techniques de mesure sensibles ont permis de détecter des radionucléides en faibles concentrations dans certains échantillons environnementaux. Les valeurs de concentration sont néanmoins restées inférieures à 0.3% des limites applicables. De fait, l'impact écologique du CERN a été négligeable ;
3. En 2011, 99% de la dose effective aux membres du public des groupes de référence provenait d'aspects environnementaux qui sont surveillés en continu. De manière à confronter l'impact dosimétrique des activités du CERN aux valeurs typiques d'expositions naturelles, la Figure 5 compare la dose susmentionnée de 0.013 mSv avec la dose équivalente annuelle mesurée en plusieurs endroits éloignés des sites CERN.

Référence

- [1] Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, HSK-R-41/d (Juli 1997)..
- [2] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
- [3] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [4] S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement : Résultats des mesures 2011 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2011).
- [5] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2011), Annexe 3.
- [6] J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus et K. Loizeau, Rapport No 11 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2010 – Octobre 2011, Université de Genève, Genève (2011) p. 8.

Glossaire

AD	Décélérateur d'antiprotons
CLIC	Compact Linear Collider, projet impliquant un collisionneur linéaire
CNGS	CERN neutrinos to Gran Sasso, source de neutrinos pour les expériences souterraines situées au Gran Sasso (IT)
CTF3	CLIC Test Facility, installation de test pour le projet CLIC
HIRAD-MAT	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
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

