

**Zeitschrift:** Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz = Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse = Radioattività dell'ambiente e dosi d'irradiazione in Svizzera

**Herausgeber:** Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz

**Band:** - (2012)

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

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 15.02.2026

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

# Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz

## Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse

Ergebnisse 2012  
Résultats 2012



### 8 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

### 8 Surveillance des installations nucléaires: Emissions et Immissions

8 Überwachung der Kernanlagen - Surveillance des installations nucléaires - @BAG 2013





# Inhaltverzeichnis / Sommaire

<b>8.1 Emissionen aus den Kernanlagen</b>	<b>115</b>
Zusammenfassung	115
Ergebnisse 2012	115
<b>8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen</b>	<b>124</b>
Zusammenfassung	124
Ergebnisse 2012	124
<b>8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)</b>	<b>125</b>
Zusammenfassung	125
Übersicht	125
Systeminstandhaltung und -ergänzung	127
Systemverfügbarkeit und Störungen	127
Qualitätssicherung	128
Messergebnisse	129
<b>8.4 Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)</b>	<b>131</b>
Zusammenfassung	131
Einleitung	131
Radiochemische Trennmethode (Boden)	132
Staubfangplatten	132
Resultate und Diskussion	133
<b>8.5 Les installations nucléaires et l'environnement</b>	<b>134</b>
Résumé	134
Introduction	134
Méthodologie	135
Résultats	136
Conclusions	139
<b>8.6 La surveillance radiologique du site de l'ancienne centrale nucléaire de Lucens</b>	<b>140</b>
Résumé	140
Introduction	140
Programme de surveillance complémentaire mis en place en 2012	143
Résultats du programme de mesures complémentaires 2012	143
Conclusions	145
<b>8.7 Environnement du CERN (mesures OFSP)</b>	<b>146</b>
Résumé	146
Programme de surveillance de l'OFSP	146
Mesures de l'exposition ambiante	147
Mesures dans le milieu atmosphérique	148
Mesures dans le milieu terrestre	149
Mesures dans le milieu aquatique	149
<b>8.8 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)</b>	<b>151</b>
Résumé	151
Le CERN	151
Aspects environnementaux	152
Programme de surveillance	153
Résultats 2012	153

## 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 2012 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, 10-jährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

### Ergebnisse 2012

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 2012. 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 Ergebnisse stimmen überein und zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

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 betrugen somit im Jahr 2012 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts.

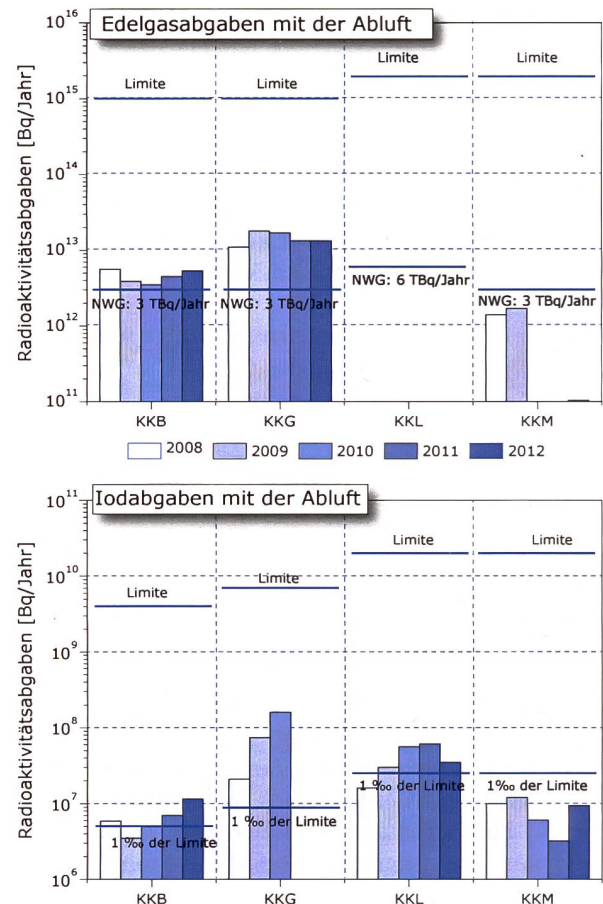
Das ENSI berücksichtigt bei den Dosisberechnungen auch die formell nicht limitierten  $^{14}\text{C}$ -Abgaben, da diese seit einigen Jahren aufgrund der geringen übrigen Abgaben die Dosis dominieren. Das radioaktive Kohlenstoffisotop  $^{14}\text{C}$  entsteht im Reaktor durch Kernreaktionen von Neutronen mit Stickstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff. Die  $^{14}\text{C}$ -Abgaben der Kernkraftwerke sind systembedingt begrenzt, weil



die Abgaberate primär von der Reaktorleistung abhängig ist. Die Kernkraftwerke haben in den letzten Jahren die  $^{14}\text{C}$ -Abgaben gemessen und nachgewiesen, dass diese mit den Erfahrungswerten aus der Messkampagne vor etwa zwanzig Jahren und den in der einschlägigen Literatur angegebenen  $^{14}\text{C}$ -Abgabewerten für ähnliche Anlagen korrespondieren. Das KKL führt seit längerer Zeit aus eigener Initiative  $^{14}\text{C}$ -Messungen durch. Mitte 1998 wurde die Apparatur des KKL zur Messung von  $^{14}\text{C}$  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  $^{14}\text{C}$ -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 2012 die  $^{14}\text{C}$ - und die  $^3\text{H}$ -Messungen auch nach Abschluss der geforderten einjährigen Messperiode auf freiwilliger Basis fort. Der Dosisbeitrag von  $^{14}\text{C}$  wurde aus den Messwerten ermittelt.

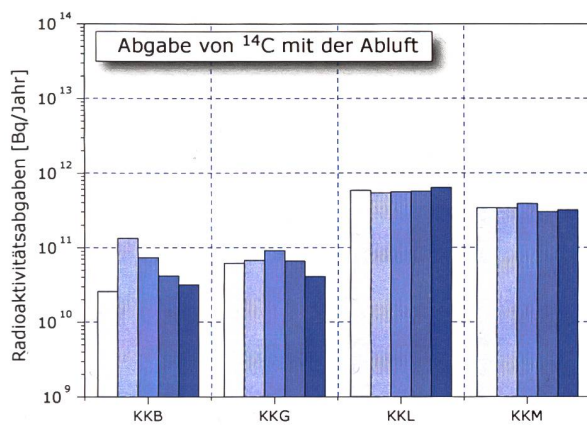
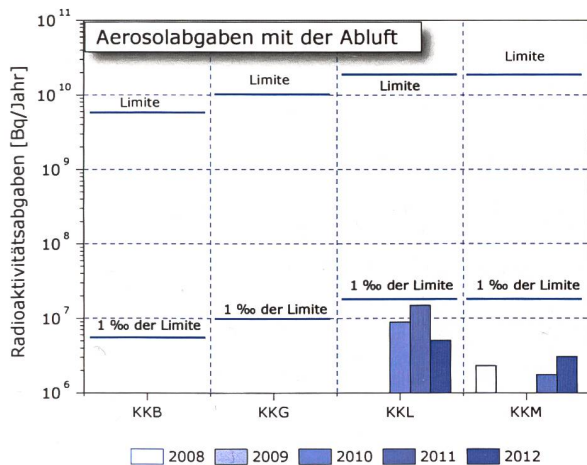
Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von weniger als 0.007 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeführten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen 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 2012 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengefasst. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.

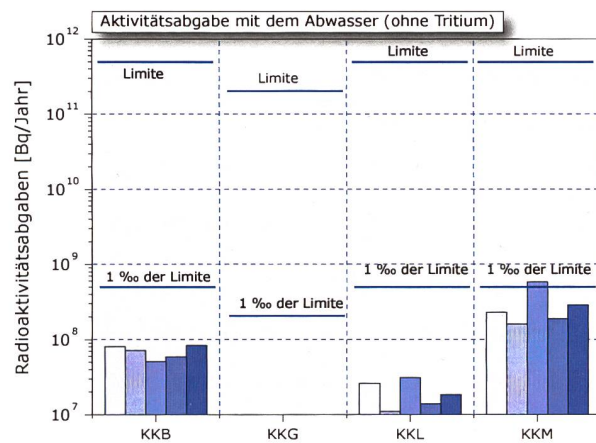
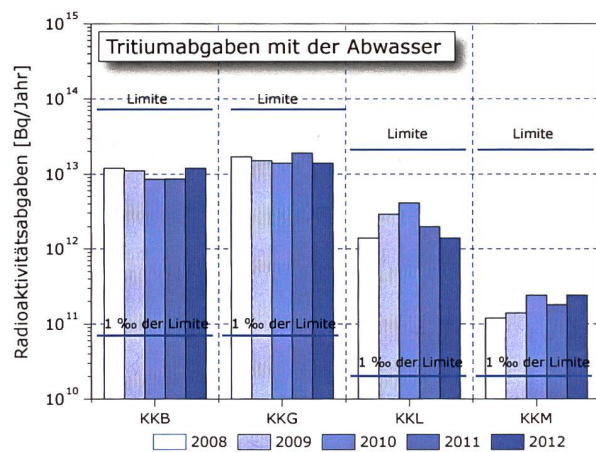


**Figur 1a:**

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (2008 bis 2012) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Edelgasabgaben unterhalb der eingezeichneten Jahres-Nachweisgrenzen (NWG) der bilanzierenden Messung resp. Iodabgaben unterhalb von 1 Promille der Jahresabgabelimite geben die Summe aller mittels Einzelmessungen nachgewiesenen Aktivitätsabgaben an. Die tatsächlich abgegebenen jährlichen Totalabgaben können in diesem Fall oberhalb der dargestellten Werte liegen, sind aber radiologisch gesehen nicht relevant. Die Edelgasbilanzierung im KKB und im KKG basieren auf Beta-Totalmessungen. Für die Umrechnung in die für den Vergleich mit den Abgabelimite notwendigen Edelgas-Abgabeäquivalente wurde in diesen Fällen ein konservatives Nuklidgemisch angesetzt. Das KKL und das KKM bilanzieren die Edelgase dagegen nuklid-spezifisch mittels Gamma-Spektrometriemessungen.


**Figur 1b:**

Abgaben der Schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (2008 bis 2012) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Aerosolabgaben unterhalb von 1 Promille der Jahres-Abgabelimiten geben die Summe aller mittels Einzelmessungen nachgewiesenen Aktivitätsabgaben an. Die tatsächlich abgegebenen jährlichen Aerosolabgaben können in diesem Fall oberhalb der dargestellten Werte liegen, sind aber radiologisch gesehen nicht relevant. Für <sup>14</sup>C besteht keine Abgabelimite.


**Figur 1c:**

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an das Abwasser in den letzten fünf Jahren (2008 bis 2012) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Abgabewerte unterhalb von 1 Promille der Jahres-Abgabelimiten geben die Summe aller mittels Einzelmessungen nachgewiesenen Aktivitätsabgaben an. Die tatsächlich abgegebenen jährlichen flüssigen Abgaben können in diesem Fall oberhalb der dargestellten Werte liegen, sind aber radiologisch gesehen nicht relevant.



**Tabelle 1:**

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2012 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 <sup>1</sup>	Bilanzierte Abgaben <sup>2</sup>				Berechnete Jahresdosis <sup>3</sup>		
			Messung	Normiert <sup>1,2</sup>	Limiten <sup>4</sup>		mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Prozent der Limite	Erw.	10j Kind	1j Kind
<b>KKB1 + KKB2</b>	Abwasser 4'400 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	4.3·10 <sup>8</sup>	-	4·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.2·10 <sup>13</sup>	1.2·10 <sup>13</sup>	7·10 <sup>13</sup>	17 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	6.2·10 <sup>12</sup>	5.3·10 <sup>12</sup>	1·10 <sup>15</sup>	0.5%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	3.9·10 <sup>5</sup>	-	6·10 <sup>9</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: <sup>131</sup> I	5.1·10 <sup>6</sup>	1.2·10 <sup>7</sup>	4·10 <sup>9</sup>	0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	3.2·10 <sup>10</sup>	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0015
	<b>Dosis total</b>						<b>&lt;0.001</b>	<b>0.001</b>	<b>0.0016</b>
<b>KKG</b>	Abwasser 7'272 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.1·10 <sup>7</sup>	-	2·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.4·10 <sup>13</sup>	1.4·10 <sup>13</sup>	7·10 <sup>13</sup>	20 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	<1.2·10 <sup>13</sup>	<1.4·10 <sup>13</sup>	1·10 <sup>15</sup>	<1.4%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	2.6·10 <sup>3</sup>	-	1·10 <sup>10</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: <sup>131</sup> I	7.9·10 <sup>5</sup>	-	7·10 <sup>9</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	4.1·10 <sup>10</sup>	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	<b>Dosis total</b>						<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
<b>KKL</b>	Abwasser 15'487 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.3·10 <sup>8</sup>	-	4·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	1.4·10 <sup>12</sup>	1.4·10 <sup>12</sup>	2·10 <sup>13</sup>	7 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	1.3·10 <sup>11</sup>	-	2·10 <sup>15</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	5.1·10 <sup>6</sup>	-	2·10 <sup>10</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: <sup>131</sup> I	3.5·10 <sup>7</sup>	3.5·10 <sup>7</sup>	2·10 <sup>10</sup>	0.2%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	6.4·10 <sup>11</sup>	-	-	-	0.0024	0.0032	0.0054
	<b>Dosis total</b>						<b>0.0024</b>	<b>0.0032</b>	<b>0.0054</b>
<b>KKM</b>	Abwasser 4'332 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	3.0·10 <sup>9</sup>	-	4·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	2.4·10 <sup>11</sup>	2.4·10 <sup>11</sup>	2·10 <sup>13</sup>	1.2 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	9.3·10 <sup>10</sup>	-	2·10 <sup>15</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	3.1·10 <sup>6</sup>	-	2·10 <sup>10</sup>	<0.1%	0.0028	0.0027	0.0026
		Iod: <sup>131</sup> I	9.4·10 <sup>6</sup>	-	2·10 <sup>10</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	3.2·10 <sup>11</sup>	-	-	-	<0.001	0.001	0.0017
	<b>Dosis total</b>						<b>0.0036</b>	<b>0.0037</b>	<b>0.0043</b>
<b>ZZL</b>	Abwasser 526 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.9·10 <sup>8</sup>	-	2·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	3.1·10 <sup>7</sup>	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-/γ-Aerosole	3.4·10 <sup>4</sup>	-	1·10 <sup>9</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.3·10 <sup>4</sup>	-	3·10 <sup>7</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	4.5·10 <sup>8</sup>	-	1·10 <sup>12</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	8.8·10 <sup>9</sup>	-	1·10 <sup>14</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
	<b>Dosis total</b>						<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>

**Tabelle 2:**

Zusammenstellung der Abgaben des Paul Scherrer Instituts im Jahr 2012 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
<b>Abgaben im Abwasser<sup>2,4</sup> [Bq/a]</b>					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
<b>Abgaben über die Abluft<sup>2,4</sup> [Bq/a]</b>					
Edelgase und andere Gase	$2.8 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-
$\beta/\gamma$ -Aerosole <sup>4</sup> , ohne Iod	$2.7 \cdot 10^8$	-	$2.0 \cdot 10^5$	-	$3.0 \cdot 10^5$
$\alpha$ -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$2.0 \cdot 10^8$	-	-	-	$5.9 \cdot 10^3$
Tritium als HTO	$1.2 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^6$	-	$6.1 \cdot 10^9$	$1.4 \cdot 10^{10}$
Kohlenstoff: $^{14}\text{C}$ in $\text{CO}_2$	-	-	-	-	-
<b>Jahresdosis<sup>3</sup> [mSv/Jahr] für:</b>					
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
<b>Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert<sup>1</sup></b>	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI <sup>2,4</sup>		
	Zentrale Fortluft-anlagen	Injektor II	C-Labor	Abwasser 1'583 m <sup>3</sup>	Abluft	Aequivalent-abgaben
<b>Abgaben im Abwasser<sup>2,4</sup> [Bq/a]</b>						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$3.1 \cdot 10^7$	-	$3.8 \cdot 10^6$
Tritium	-	-	-	$1.2 \cdot 10^{10}$	-	-
<b>Abgaben über die Abluft<sup>2,4</sup> [Bq/a]</b>						
Edelgase und andere Gase	$2.0 \cdot 10^{14}$	$7.5 \cdot 10^9$	-	-	$2.0 \cdot 10^{14}$	$4.3 \cdot 10^{14}$
$\beta/\gamma$ -Aerosole <sup>4</sup> , ohne Iod	$2.5 \cdot 10^{10}$	$3.5 \cdot 10^6$	-	-	$2.5 \cdot 10^{10}$	-
$\alpha$ -Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$5.5 \cdot 10^7$	-	-	-	$1.1 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^8$
Tritium als HTO	$1.1 \cdot 10^{12}$	-	-	-	$1.2 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: $^{14}\text{C}$ in $\text{CO}_2$	-	-	-	-	-	-
<b>Jahresdosis<sup>3</sup> [mSv/Jahr] für:</b>						
Erwachsene	0.0065	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kind 10j	0.0067	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
Kleinkinder	0.0066	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015	< 0.007	
<b>Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert<sup>1</sup></b>	4.4%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 5.0%	



**Tabelle 3a:**

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2012: Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben<sup>2</sup> - (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
$\beta/\gamma$ -Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
<sup>3</sup> H	$1.2 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^{12}$	$2.4 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{10}$	$3.1 \cdot 10^{10}$
<sup>7</sup> Be					$4.2 \cdot 10^6$	
<sup>22</sup> Na					$1.5 \cdot 10^5$	$6.4 \cdot 10^5$
<sup>24</sup> Na	$4.1 \cdot 10^6$					
<sup>44</sup> Sc					$1.7 \cdot 10^4$	
<sup>44</sup> Ti					$1.7 \cdot 10^4$	
<sup>51</sup> Cr			$7.3 \cdot 10^6$	$7.6 \cdot 10^8$		
<sup>54</sup> Mn	$2.3 \cdot 10^6$		$8.7 \cdot 10^6$	$5.1 \cdot 10^8$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^3$
<sup>57</sup> Co					$1.4 \cdot 10^4$	
<sup>58</sup> Co	$1.4 \cdot 10^7$		$2.7 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^8$		
<sup>59</sup> Fe				$1.7 \cdot 10^7$		
<sup>60</sup> Co	$3.4 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^6$	$8.2 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^9$	$5.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^6$
<sup>65</sup> Zn			$2.7 \cdot 10^7$	$5.7 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^4$	
<sup>67</sup> Ga					$2.8 \cdot 10^5$	
<sup>88</sup> Zr					$2.5 \cdot 10^5$	
<sup>88</sup> Y					$6.3 \cdot 10^4$	
<sup>89</sup> Sr	$1.7 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^6$		$9.1 \cdot 10^4$		
<sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y	$4.7 \cdot 10^5$			$6.1 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^5$	
<sup>95</sup> Nb	$2.0 \cdot 10^4$			$1.5 \cdot 10^6$		
<sup>97</sup> Zr	$3.1 \cdot 10^5$					
<sup>99</sup> Mo	$1.2 \cdot 10^5$					
<sup>99m</sup> Tc	$3.4 \cdot 10^5$	$7.9 \cdot 10^5$		$4.2 \cdot 10^5$		
<sup>106</sup> Ru						$6.8 \cdot 10^5$
<sup>110m</sup> Ag	$7.4 \cdot 10^6$			$4.5 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^4$	
<sup>111</sup> In					$2.6 \cdot 10^4$	
<sup>122</sup> Sb	$2.9 \cdot 10^6$					
<sup>124</sup> Sb	$4.5 \cdot 10^7$			$1.0 \cdot 10^7$		$1.1 \cdot 10^4$
<sup>125</sup> Sb	$1.7 \cdot 10^7$					$1.6 \cdot 10^5$
<sup>123m</sup> Te	$1.9 \cdot 10^7$	$9.8 \cdot 10^5$				
<sup>132</sup> Te	$2.6 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^6$				
<sup>125</sup> I					$3.3 \cdot 10^6$	
<sup>131</sup> I	$2.0 \cdot 10^7$				$5.9 \cdot 10^5$	
<sup>133</sup> I	$4.2 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^5$				
<sup>134</sup> Cs	$9.2 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^6$			$2.5 \cdot 10^5$	$5.1 \cdot 10^6$
<sup>137</sup> Cs	$2.4 \cdot 10^8$	$3.2 \cdot 10^6$		$1.1 \cdot 10^7$	$6.3 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^8$
<sup>140</sup> Ba		$1.0 \cdot 10^6$				
<sup>161</sup> Tb					$6.1 \cdot 10^5$	
<sup>172</sup> Lu					$1.8 \cdot 10^4$	
<sup>177</sup> Lu					$1.3 \cdot 10^7$	
<sup>185</sup> Os					$8.8 \cdot 10^3$	
<sup>195</sup> Au					$3.1 \cdot 10^5$	
<sup>207</sup> Pb					$6.4 \cdot 10^3$	
<sup>208</sup> Po					$1.3 \cdot 10^4$	
<sup>239</sup> Np	$9.5 \cdot 10^4$					
$\alpha$ -Strahler	*)	$< 1.3 \cdot 10^5$	$3.2 \cdot 10^5$	$5.3 \cdot 10^4$		*)
<sup>234/238</sup> U					$1.3 \cdot 10^5$	
<sup>239/240</sup> Pu	$2.6 \cdot 10^3$				$7.4 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^3$
<sup>238</sup> Pu/ <sup>241</sup> Am	$6.7 \cdot 10^4$				$4.8 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^3$
<sup>242</sup> Cm	$4.1 \cdot 10^3$					$4.7 \cdot 10^2$
<sup>243/244</sup> Cm	$9.1 \cdot 10^3$					$1.9 \cdot 10^2$

\*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2011 bis und mit dem 3. Quartal 2012

**Tabelle 3b:**

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2012: Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid $\beta/\gamma$ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
<b>Gase. Edelgase</b>						
Tritium	$4.3 \cdot 10^{11}$	$5.4 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^{12}$	$8.8 \cdot 10^9$
$^{11}\text{C}$					$3.1 \cdot 10^{13}$	
$^{14}\text{C}$ ( $\text{CO}_2$ )	$3.2 \cdot 10^{10}$	$4.1 \cdot 10^{10}$	$6.4 \cdot 10^{11}$	$3.2 \cdot 10^{11}$		$4.5 \cdot 10^8$
$^{13}\text{N}$					$3.2 \cdot 10^{13}$	
$^{15}\text{O}$					$1.3 \cdot 10^{14}$	
$^{18}\text{F}$					$1.0 \cdot 10^{12}$	
$^{24}\text{Ne}$					$1.7 \cdot 10^{12}$	
$^{41}\text{Ar}$				$4.3 \cdot 10^9$	$4.8 \cdot 10^{12}$	
$^{85}\text{Kr}$					$2.8 \cdot 10^{11}$	
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$2.0 \cdot 10^{11}$					
$^{87}\text{Kr}$			$6.4 \cdot 10^8$			
$^{88}\text{Kr}$	$3.5 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{12}$				
$^{133}\text{Xe}$	$3.2 \cdot 10^{12}$	$9.6 \cdot 10^{12}$	$1.1 \cdot 10^{11}$			
$^{135}\text{Xe}$	$2.4 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$2.3 \cdot 10^{10}$	$1.6 \cdot 10^9$		
$^{135\text{m}}\text{Xe}$						
EG-Aequiv. <sup>4)</sup>				$8.7 \cdot 10^{10}$		
EG: $\beta$ -total						
Andere						
<b>Iod</b>						
$^{123}\text{I}$					$3.7 \cdot 10^7$	
$^{125}\text{I}$					$2.2 \cdot 10^8$	
$^{131}\text{I}$	$5.1 \cdot 10^6$	$7.9 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^7$	$9.4 \cdot 10^6$	$4.7 \cdot 10^6$	
$^{133}\text{I}$	$3.3 \cdot 10^7$					



**Tabelle 3c:**

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2012: Summe der bei Einzelmessungen der Betreiber nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]					
$\beta/\gamma$ -Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
$^{24}\text{Na}$					$8.4 \cdot 10^5$	
$^{38}\text{S}$					$1.2 \cdot 10^9$	
$^{39}\text{Cl}$					$5.9 \cdot 10^9$	
$^{54}\text{Mn}$			$5.9 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^5$		
$^{58}\text{Co}$				$6.5 \cdot 10^5$		
$^{60}\text{Co}$			$2.3 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^3$
$^{65}\text{Zn}$			$3.7 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^5$		
$^{77}\text{Br}$					$3.4 \cdot 10^6$	
$^{80\text{m}}\text{Br}$					$2.9 \cdot 10^9$	
$^{82}\text{Br}$					$5.7 \cdot 10^8$	
$^{89}\text{Sr}$		$1.7 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^5$			
$^{99\text{m}}\text{Tc}$					$2.7 \cdot 10^8$	
$^{131}\text{I}$ (Aerosol)			$1.4 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^4$		
$^{137}\text{Cs}$				$5.2 \cdot 10^4$		$3.2 \cdot 10^4$
$^{140}\text{Ba}$			$2.3 \cdot 10^5$	$3.7 \cdot 10^5$		
$^{140}\text{La}$			$3.6 \cdot 10^4$			
$^{181}\text{Re}$					$7.6 \cdot 10^7$	
$^{182\text{m}}\text{Re}$					$2.2 \cdot 10^8$	
$^{183}\text{Re}$					$1.5 \cdot 10^7$	
$^{183}\text{Os}$					$2.5 \cdot 10^8$	
$^{183\text{m}}\text{Os}$					$6.5 \cdot 10^8$	
$^{185}\text{Os}$					$4.0 \cdot 10^7$	
$^{185}\text{W}$					$4.1 \cdot 10^9$	
$^{191}\text{Pt}$					$1.1 \cdot 10^6$	
$^{192}\text{Au}$					$1.2 \cdot 10^9$	
$^{193}\text{Au}$					$3.3 \cdot 10^6$	
$^{194}\text{Au}$					$1.6 \cdot 10^6$	
$^{192}\text{Hg}$					$7.1 \cdot 10^8$	
$^{193\text{m}}\text{Hg}$					$2.4 \cdot 10^8$	
$^{194}\text{Hg}$					$1.6 \cdot 10^6$	
$^{195}\text{Hg}$					$1.4 \cdot 10^{10}$	
$^{195\text{m}}\text{Hg}$					$1.0 \cdot 10^8$	
$^{197\text{m}}\text{Hg}$					$1.2 \cdot 10^8$	
$^{203}\text{Hg}$					$6.3 \cdot 10^6$	
Nicht spezifizierte	$3.9 \cdot 10^5$					
$\alpha$ -Aerosole	$4.8 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^3$	$9.9 \cdot 10^3$	$7.1 \cdot 10^4$		$1.3 \cdot 10^4$

**Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3**

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

**Abwasser:** Die 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/m<sup>3</sup> angegeben. Die CA-Werte für die Edelgasnuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein CA-Wert von  $2 \cdot 10^5$  Bq/m<sup>3</sup> entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Immersions-Dosisfaktor von  $4.4 \cdot 10^{-7}$  (Sv/Jahr)/(Bq/m<sup>3</sup>). Die unnormierte Summe der Edelgasabgaben ist in der Spalte „Messung“ angegeben.

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

**Gase:** Beim PSI handelt es sich dabei vorwiegend um die Nuklide <sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O und <sup>41</sup>Ar. Deren Halbwertszeiten sind kleiner als zwei Stunden. Hier ist für die einzelnen Abgabestellen und das gesamte PSI die Summe der Radioaktivität dieser Gase und Edelgase ohne Normierung auf einen Referenzwert angegeben. Für die Gesamtanlage wird zusätzlich auch die auf den Referenz-CA-Wert von  $2 \cdot 10^5$  Bq/m<sup>3</sup> 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 <sup>131</sup>I limitiert; somit ist bei den bilanzierten Abgaben nur dieses Iod-Isotop angegeben.

Beim PSI, bei dem andere Iod-Isotope nachgewiesen werden, ist die Abgabe für die einzelnen Abgabestellen und die Gesamtanlage als Summe der Aktivität der gemessenen Iod-Nuklide angegeben. Für die Gesamtabgabe wird zudem auch ein <sup>131</sup>Iod-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 <sup>131</sup>I ergibt. Die Ingestionsdosisfaktoren sind der StSV entnommen.

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

**Kohlenstoff <sup>14</sup>C:** In den Tabellen ist der als Kohlendioxid vorliegende Anteil des <sup>14</sup>C, der für die Dosis relevant ist, angegeben. Die für <sup>14</sup>C angegebenen Werte basieren bei allen Werken auf aktuellen Messungen.

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

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

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

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

Eidg. 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 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 tatsächlich durch eine Person am Arealzaun akkumulierte, jährliche Dosis aus externer Bestrahlung ergibt sich aus der mittleren Ortsdosisleistung am Arealzaun multipliziert mit der Aufenthaltszeit der Person. Eine Person, die sich während eines Jahres konstant am Arealzaun aufhalten würde, würde eine der Ortsdosis entsprechende Personendosis akkumulieren. Da sich eine Person aus der Umgebungsbevölkerung realistischerweise nur einige wenige Stunden direkt am Arealzaun aufhält, liegt die akkumulierte Personendosis um Faktor 100 bis 1'000 unterhalb der am gleichen Ort ermittelten Ortsdosis.

### Ergebnisse 2012

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  $^{16}\text{N}$ , 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 Messun-

gen Dosisleistungen zwischen etwa 0.07  $\mu\text{Sv/h}$  (natürlicher Untergrund) und 0.30  $\mu\text{Sv/h}$  ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf diesen Momentanwerten am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 2.0 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 0.9 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 0.6 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 0.7 mSv ohne natürlichen Untergrund. Im Jahr 2012 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 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

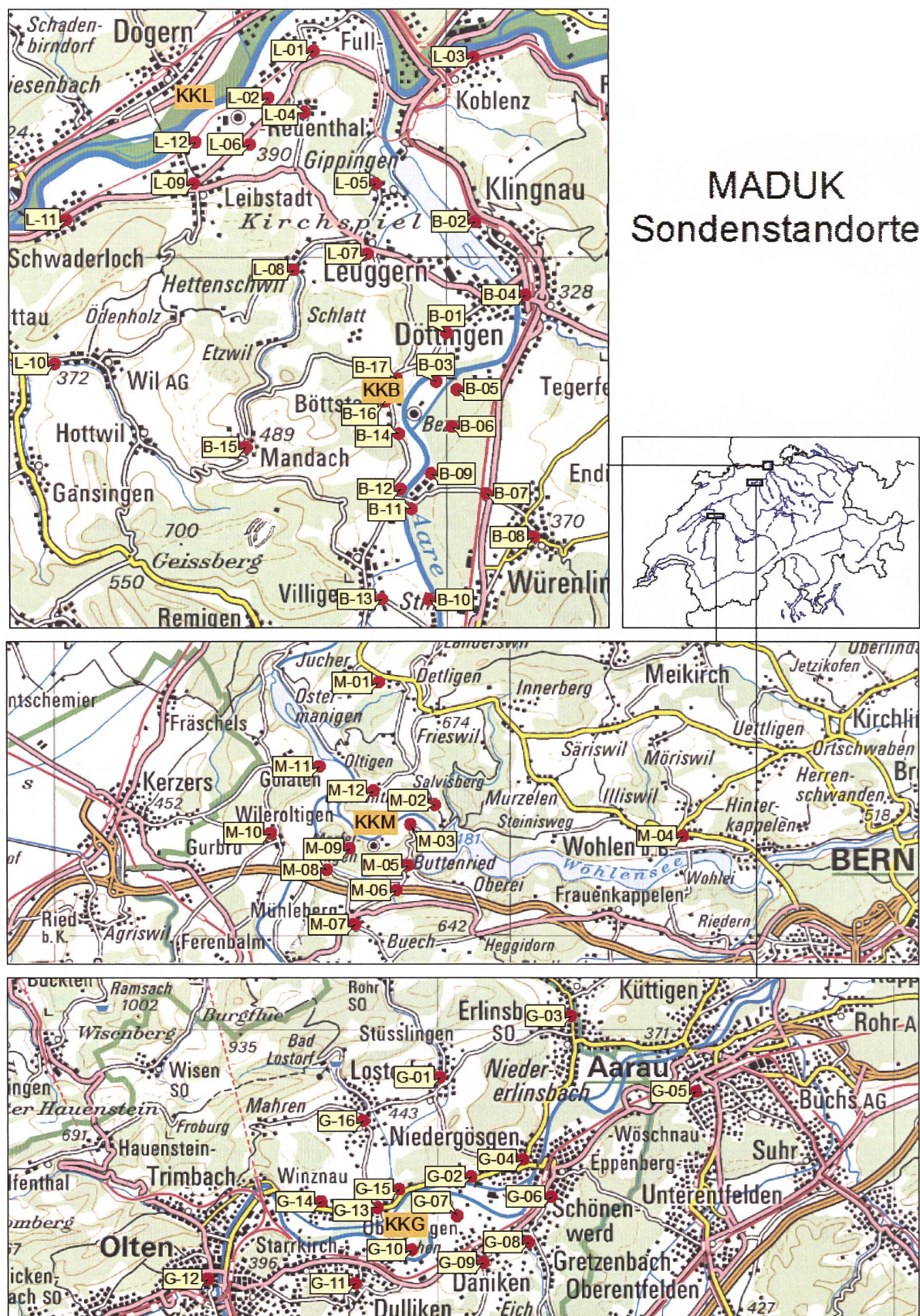
Das MADUK-System (**M**essnetz zur automatischen **D**osisleistungsüberwachung in der **U**mgebung der **K**ernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von Anlageparametern (ANPA) und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 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 und bei der Einschätzung der möglichen Massnahmen. Zudem trägt MADUK mit einem schnellen Datenaustausch zur erfolgreichen Zusammenarbeit mit den involvierten Behörden bei.

Die Messwerte im Jahr 2012 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 65 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 Darstellung auf der nächsten Seite zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.





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



## Systeminstandhaltung und -ergänzung

Im Jahre 2012 wurde die Erneuerung der MADUK-Zentrale weitergeführt. Bis Ende Jahr konnten sämtliche zentrale Softwaredienste implementiert und in den Testbetrieb überführt werden.

Die Software auf den Datenloggern der MADUK-Stationen wurde durch eine neue Version ersetzt, so 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. Die Funktionsprüfung im 2. Halbjahr konnte auf diese Weise weiter optimiert werden.

## Systemverfügbarkeit und Störungen

Die Systemverfügbarkeit ist bei MADUK von besonderer Bedeutung, da das System eine kontinuierliche Überwachung gewährleisten muss, die auch von der Öffentlichkeit wahrgenommen 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 wiederum eine sehr hohe Verfügbarkeit. Bei KKB, KKG und KKL fiel bei der Zeitumstellung von Sommer- auf Winterzeit die Datenübertragung während einer Stunde aus. Bei KKB fiel im zweiten Quartal aufgrund von Arbeiten während des Revisionsstillstands die Datenübertragung während 4.3 Stunden aus. Bei KKG kommt es im ersten Quartal aufgrund von geplanten Arbeiten

**Tabelle 1:**

Auflistung der Störungen bei den MADUK-Messstationen.

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
B-11	69.0	-	Bauarbeiten am Stationsstandort
G-06, L-05, M-05	1.0	-	Kommunikationsausfall
B-05, L-10	2.0	-	Kommunikationsausfall
M-07	4.0	-	Kommunikationsausfall
B-02, B-04, B-17, L-05, L-07	1.3	-	Kommunikationsausfall
L-01	4.2	-	Kommunikationsausfall
B-10	25.0	-	Routerausfall
B-08	6.2	6.2	Datenlogger blockiert
B-11	8.0	8.0	Datenlogger blockiert
M-01	29.0	-	Defekte Messsonde
G-02, G-05	3.0	-	Kommunikationsausfall
L-01	20.5	20.5	Defekte Messsonde
B-12	61.0	61.0	Defekte Messsonde
L-03	74.8	-	Routerausfall
G-10	8.2	-	Routerausfall
M-01	2.1	-	Ungültige Messwerte aufgrund Plausibilitätstests
L-12	12.3	12.3	Datenlogger blockiert
L-01	21.0	21.0	Defekte Messsonde
M-04	87.5	87.5	Kommunikationsausfall und Datenlogger blockiert
G-03	13.8	13.8	Stationskasten musste versetzt werden
L-03	28.5	-	Routerausfall
G-13, G-14	7.1	7.1	Blockierte Datenlogger nach Softwareupdate
L-06, L-12	24.0	-	Routerausfall
B-08	80.8	-	Defektes Hochdosiszählrohr
L-07	3.25	-	Routerausfall



an der Übertragungsleitung zu einem Unterbruch von 5 Stunden. Ein weiterer Unterbruch dauert 2.75 Stunden. Während des Revisionsstillstands kommt es zu einem Unterbruch der Datenübertragung von 15.8 Stunden. Bei KKM führten angekündigte Änderungsarbeiten bei der Stromversorgung der Erfassungsrechner im Werk zu einem kurzen Unterbruch von 0.25 Stunden.

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

Die Stationselektronik lief auch im 2012 grösstenteils zuverlässig. Mehrere Datenlogger zeigten Probleme bei der Aufzeichnung der Daten, welche jeweils zu einem permanenten Datenverlust führten. Bei zwei Stationen trat der Fehler beim Aufspielen eines Software-Updates auf. Bei der Station L-01 wurde innerhalb kurzer Zeit die Messsonde zwei Mal beim Rasenmähen beschädigt. Die defekten Messsonden wurden repariert und anschliessend einer Funktionsprüfung unterzogen.

Probleme beim zentralen Datenbanksystem führten sieben Mal zu einem Ausfall des Zentralsystems mit einer gesamten Ausfallzeit von 7 Stunden. Trotz intensiver Suche konnte die Ursache für die Probleme nicht gefunden werden.

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 99.95%.

## 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 qualitätsgestützt und nachvollziehbar bearbeitet werden. Die wesentlichen qualitätssichernden Massnahmen werden im Folgenden beschrieben.

In Anlehnung an die „Empfehlungen zur Sicherstellung der Messdatenqualität von Umgebungsdosimetriesystemen“ der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität vom 24. November 2004 werden die MADUK Sonden vor einem ersten Einsatz geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Messver-

halten 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 <sup>137</sup>Cs-Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten produziert und mit Sollwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunktionskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellwerten benutzt. Im Jahr 2012 wurde im ersten Halbjahr in Absprache mit der Eichstelle eine Eichung der Sonden im Feld durchgeführt. Es konnten alle Sonden erfolgreich geeicht werden. Im zweiten Halbjahr erfolgte eine Funktionsprüfung. Bei 6 Sonden bestand eines der beiden Niederdosiszählrohre die Funktionsprüfung nicht. Die übrigen Sonden funktionierten einwandfrei. Die Archivierung funktionierte ebenfalls einwandfrei.

Im Managementhandbuch ist für den Fall einer nicht bestandenen Funktionsprüfung eine Reparatur der Sonde beim Hersteller vorgesehen. Die Nachfrage beim Hersteller ergab, dass in diesem Fall beim Bestehen der Eichkriterien, ohne einen Eingriff an der Hardware, nur neue Referenzwerte angelegt werden. Bei einer genaueren Analyse der Daten aus den Funktionsprüfungen der letzten 3 Jahre zeigte sich ein allgemeiner Trend hin zu höheren Empfindlichkeiten bei den Niederdosiszählrohren. Sollte sich dieser Trend fortsetzen, sind die Häufungen nicht bestandener Funktionsprüfungen absehbar. Als Massnahme wird zusammen mit dem Hersteller abgeklärt, wie in Zukunft die Funktionsprüfung angewandt wird und was dieser allgemeine Trend für weitere Massnahmen nach sich zieht. Bis zum Entscheid über das weitere Vorgehen bleiben die 6 Sonden im Einsatz, da die Eichung erst ein halbes Jahr zurückliegt und die Eichkriterien auch aufgrund der Resultate der Funktionsprüfung immer noch eingehalten werden.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden Messungen mittels in-situ-Gammaskpektrometrie im Feld durchgeführt. 2012 wurden Messungen bei den Sonden der Messringe Beznau und Mühleberg durchgeführt. Die Messwerte lagen im Bereich der früheren Jahre. Bei der Station M-03 lagen die ODL-Ergebnisse der Reuter-Stokes-Ionisationskammer deutlich unterhalb der Ergebnisse der in-situ-Gammaskpektrometrie und der MADUK-Station. Bei den übrigen Stationen stimmten die Ergebnisse wie in den früheren Jahren gut überein. Die Ursache für die Abweichung konnte bisher nicht geklärt werden.



## Messergebnisse

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

Die jährliche Überprüfungskampagne der NADAM Sonden an den Standorten, an denen auch eine MADUK-Station in Betrieb ist, führte 2012 bei keiner MADUK-Sonde zu wesentlichen Erhöhungen der Messwerte.

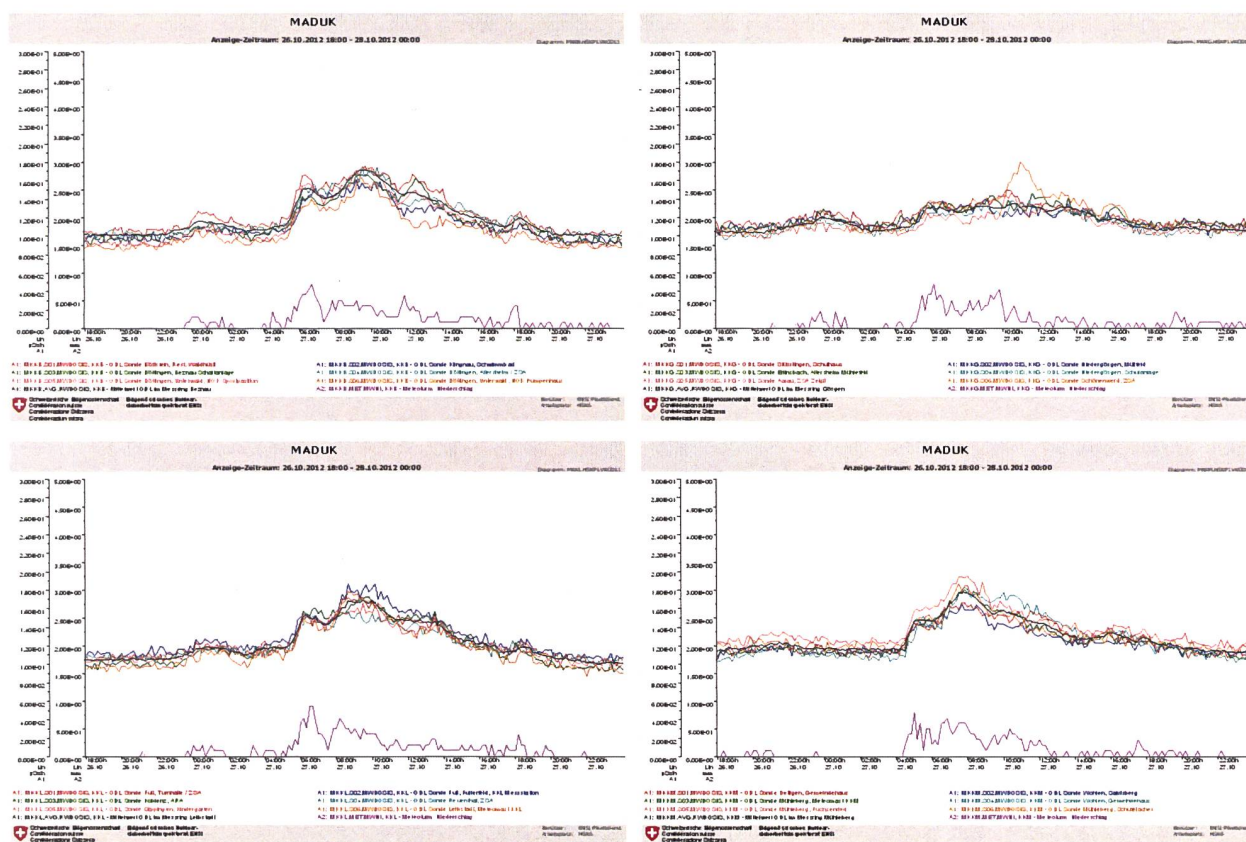
**Tabelle 2:**

Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2012.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
27. Jan. 14:00	L-02	1.8	75	197
30. Jan. 18:20	L-02	0.7	58	166
30. Jan. 23:10	L-12	0.8	61	164
06. Apr. 07:40	L-12	2.5	70	170
06. Apr. 10:10	L-12	1.5	102	206
03. Jul. 07:20	L-04	0.8	62	178
03. Jul. 11:40	L-04	1.7	108	216

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

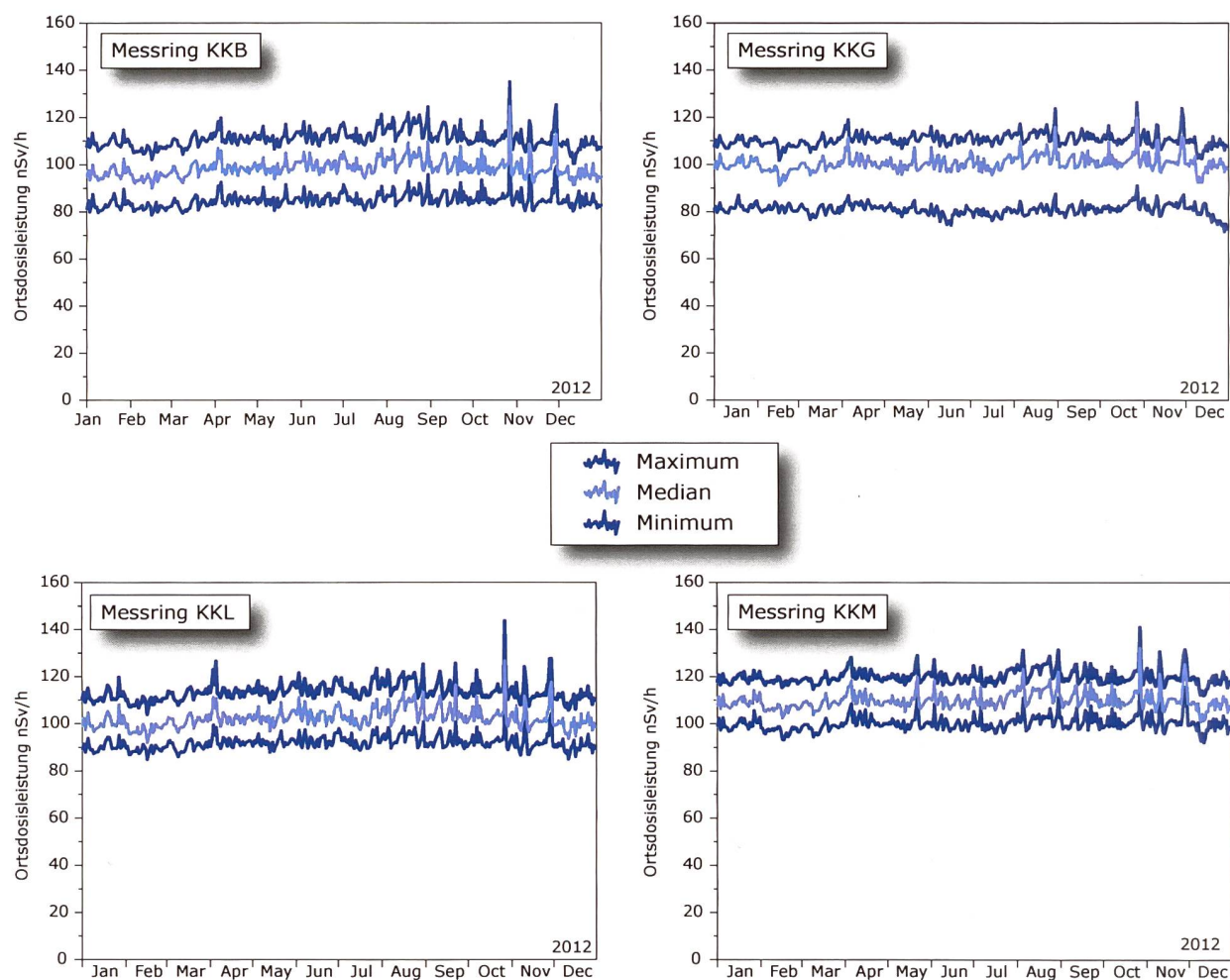
Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Maxima, die Minima und die Mediane der Tagesmittelwerte im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke. Am 27. Oktober sind in allen Messringen markante maximale Tagesmittelwerte zu erkennen. Betrachtet man die entsprechenden 10-Minutendaten für die verschiedenen Messringe, zeigt sich für die Stationen bei KKB, KKL und KKM ein fast identischer Verlauf (Abbildung 3). Bei den Stationen um KKG fielen die Messwerte weniger hoch aus. Der Beginn der Erhöhungen mit Einsetzen des Niederschlags und das für Radonfolgeprodukte typische Abklingverhalten deuten klar auf Washout natürlicher Radionuklide hin. Der maximale Niederschlag betrug 0.9 mm in 10 Minuten.



**Figur 3:**

Verlauf der 10-Minuten ODL-Daten für jeweils sechs MADUK-Stationen und den Niederschlag (Linie in Pink) der Messrinke Beznau (oben links), Gösgen (oben rechts), Leibstadt (unten links) und Mühleberg (unten rechts).





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

## 8.4

## Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

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

Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen

## Zusammenfassung

Seit 1997 führt das PSI im Rahmen der Immissionsüberwachung Radionuklidmessungen an Waldbodenproben und Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (ZWILAG Würenlingen) durch. Das Vaseline auf den Staubfangplatten wird  $\gamma$ -spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie  $^{241}\text{Am}$  und  $^{137}\text{Cs}$  sowie natürliche Radionuklide wie  $^7\text{Be}$  und  $^{210}\text{Pb}$  gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der  $\gamma$ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung reiner  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahler ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ). Die Ergebnisse der  $\gamma$ -Spektrometrie zeigen einen deutlich abnehmenden Trend für das anthropogene Radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  von ca. 100 - 150 Bq/kg (im Jahr 1997) auf ca. 10 - 80 Bq/kg (2012). Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{239+240}\text{Pu}$  sind ähnlich signifikant. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für  $^{90}\text{Sr}$  von 6 - 10 Bq/kg auf 2 - 4 Bq/kg und diejenigen für  $^{239+240}\text{Pu}$  von 0.4 - 0.9 (1997) auf 0.1 - 0.7 im Jahr 2012. 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. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 20 - 30 Bq/kg über die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte von  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{228}\text{Ra}$  nachgewiesen. Für das ebenfalls natürlich vorkommende Radioisotop  $^{40}\text{K}$  wurden Aktivitätskonzentrationen zwischen 250 und 400 Bq/kg gemessen.

## Einleitung

Das Zwischenlager (ZWILAG AG) für radioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken wurde im Jahr 1999 in unmittelbarer Nähe zum Paul Scherrer Institut erstellt und anschliessend in Betrieb genommen. Um potentielle, geringfügige Radionuklid-Emissionen in der Umgebung des Areals aus Abgaben 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<sup>1</sup>. Diese Analysen dienten der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B.  $^7\text{Be}$ ), terrestrischer ( $^{40}\text{K}$  sowie Radionuklide aus den U- und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ) 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  $^{241}\text{Am}$  und  $^{137}\text{Cs}$  bestimmt.

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: Abschluss-bericht der Immissionsmessungen. PSI-Bericht Nr. 02-15.



## Radiochemische Trennmethoden (Boden)

Nach der Probenerhebung werden die Bodenproben zunächst getrocknet, gesiebt und in ca. 30g schwere Aliquots gesplittet. Vor der Analyse werden  $^{243}\text{Am}$ - und  $^{242}\text{Pu}$ -Tracer hinzu gegeben. Nach der Trockenveraschung wird die Probe in 8 M  $\text{HNO}_3$  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.

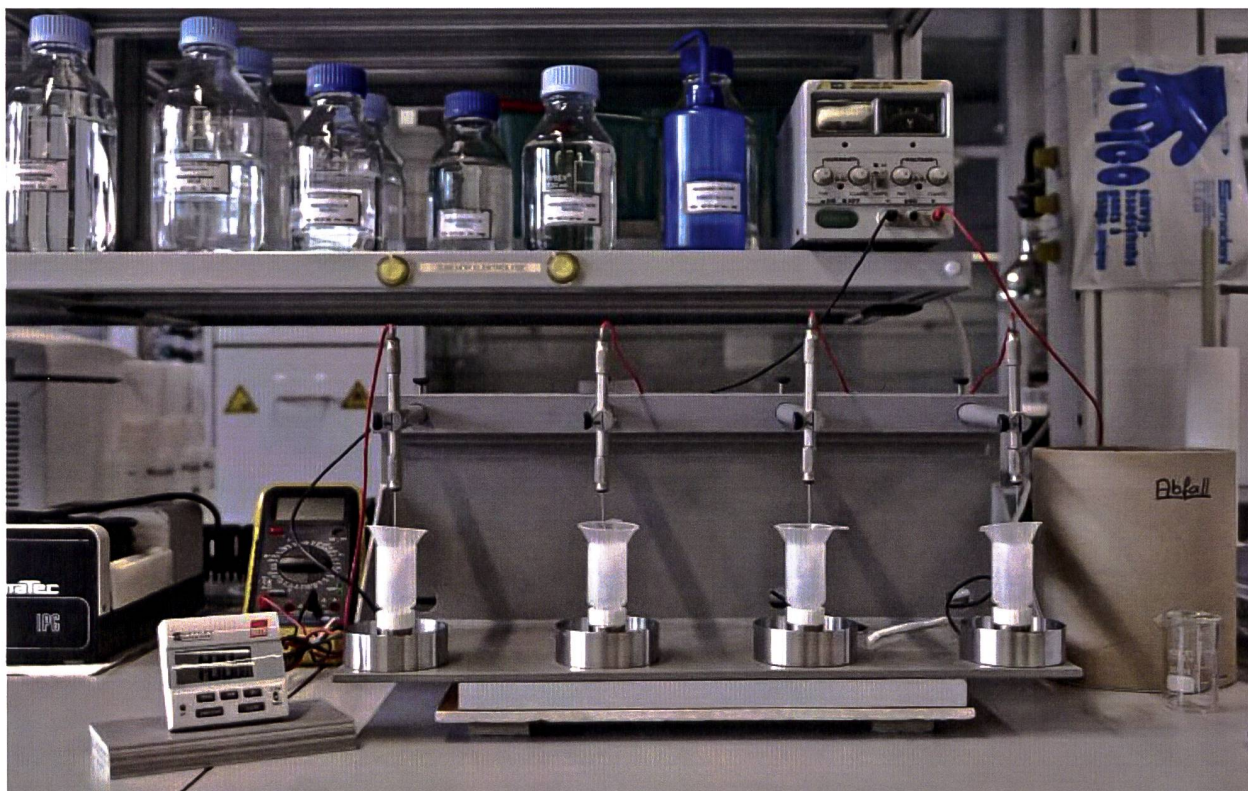
Die Leach-Lösung wird dann direkt auf eine Anionenaustauscher-Kolonnen (Bio-Rad 1-X2, 100-200 mesh) gegeben. Durch Zugabe von HCl und  $\text{HNO}_3$ -Waschlösungen werden potentiell bei der  $\alpha$ -Spektrometrie interferierende, natürliche Radionuklide abgetrennt (z.B.  $\alpha$ -Emission von  $^{228}\text{Th}$  und  $^{238}\text{Pu}$  bei 5.4 MeV), bevor die Pu-Fraktion durch Reduktion von  $\text{Pu}^{4+}$  zu  $\text{Pu}^{3+}$  mit einer HI-Lösung eluiert wird. Die durch die Bio-Rad-Kolonnen gelaufene Fraktion mit Am und Cm wird über 2 zusammenge- steckte 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  $\text{NaNO}_2$  Lösung. Da Am in sehr geringer Konzentration vorliegt, die

Trennung von den Lanthanoiden, mit einer TE-VA-Säule notwendig. Die Fraktionen von Pu bzw. Am+Cm werden anschliessend eingedampft und in einer  $\text{NaSO}_4$ - $\text{NaHSO}_4$ -Pufferlösung aufgenommen, die zur elektrolytischen Abscheidung von Aktiniden verwendet wird<sup>2</sup> (s. Figur 1). Nach der Elektrodeposition werden die Messpräparate über 2 Tage mit hochauflösender  $\alpha$ -Spektrometrie gemessen<sup>3</sup>.

## Staubfangplatten

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

- 2 Bajo, S. und Eikenberg, J. (1999) Electro-deposition of actinides for  $\alpha$ -spectrometry, J. Radioanal. Nucl. Chem. 242, 745-751.
- 3 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: Abschluss-bericht der Immissionsmessungen. PSI-Bericht Nr. 02-15.



**Figur 1:**  
Verwendete Elektrolyse-Apparatur am PSI.



## Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) und die natürlichen terrestrischen Isotope aus den U- und Th-Zerfallsreihen ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) 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 0.1 und 0.7 Bq/kg, diejenigen von  $^{241}\text{Am}$  zwischen 0.1 und 0.3 Bq/kg. In Spuren ist noch  $^{238}\text{Pu}$  nachweisbar (0.01 - 0.03 Bq/kg), während die Werte für fissiogenes  $^{90}\text{Sr}$  etwas höher sind (2 - 4 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für  $^{137}\text{Cs}$  (10 - 80 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  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  ( $0.03 \pm 0.01$ ) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Aktiniden ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 50 Jahren stammt<sup>4,5</sup>. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten Jahre. Ebenfalls eingetragen sind die Werte für  $^{226}\text{Ra}$  (als Mass für natürlich vorkommendes, primordiales  $^{238}\text{U}$ ) und  $^{228}\text{Ra}$  (als Mass für  $^{232}\text{Th}$ ). 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  $^{238}\text{U}$  2 - 3 ppm und für  $^{232}\text{Th}$  5 - 7 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste.

**Tabelle 1:**

Wertebereich für anthropogene Fallout-Isotope ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) im Verlauf der letzten Jahre (2009-2012). Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2009	2010	2011	2012
$^{90}\text{Sr}$	2 - 4	2 - 5	2 - 4	2 - 4
$^{134}\text{Cs}$ <sup>(1)</sup>	< 1	< 1	< 1	< 1
$^{137}\text{Cs}$	30 - 70	20 - 70	20 - 70	10 - 80
$^{238}\text{Pu}$	0.01 - 0.03	0.01-0.03	0.01-0.03	0.01-0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.2 - 0.8	0.3 - 0.8	0.2 - 0.7	0.1 - 0.7
$^{241}\text{Am}$	0.1 - 0.3	0.2 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
$^{226}\text{Ra}$	20 - 30	25 - 40	25 - 40	20 - 30
$^{228}\text{Ra}$	20 - 30	20 - 40	20 - 40	20 - 40

<sup>(1)</sup> Die Halbwertszeit von  $^{134}\text{Cs}$  beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2009 - 2012 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  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{241}\text{Am}$  immer unter den Nachweisgrenzen von 0.2 bzw. 0.3 Bq/m<sup>2</sup>. Die tiefe Nachweisgrenze für  $^{241}\text{Am}$  von 0.3 Bq/m<sup>2</sup> ergibt sich aufgrund der Verwendung eines hochauflösenden Gamma-Spektrometers mit Be-Eintrittsfenster.

<sup>4</sup> 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.

<sup>5</sup> UNSCAER (2000), Sources and effects of ionising radiation. Report to the General Assembly, Volume 1, Annex C, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

## 8.5

# Les installations nucléaires et l'environnement

**S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, 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 dans le cadre de la surveillance de la radioactivité au voisinage des centrales nucléaires ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques ( $^{14}\text{C}$  dans les feuillages) et des rejets liquides (en particulier isotopes du cobalt et  $^{54}\text{Mn}$  dans les eaux et les sédiments) de ces installations. La contribution du rayonnement direct a également été détectée en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühleberg. Les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont toutefois restées nettement inférieures aux limites réglementaires et donc, sans danger pour la santé.

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

### 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 d'effectuer 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 ( $^{90}\text{Sr}$  dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aéroradiométrie etc.), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université de Berne ( $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  et  $^{85}\text{Kr}$ ) 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**

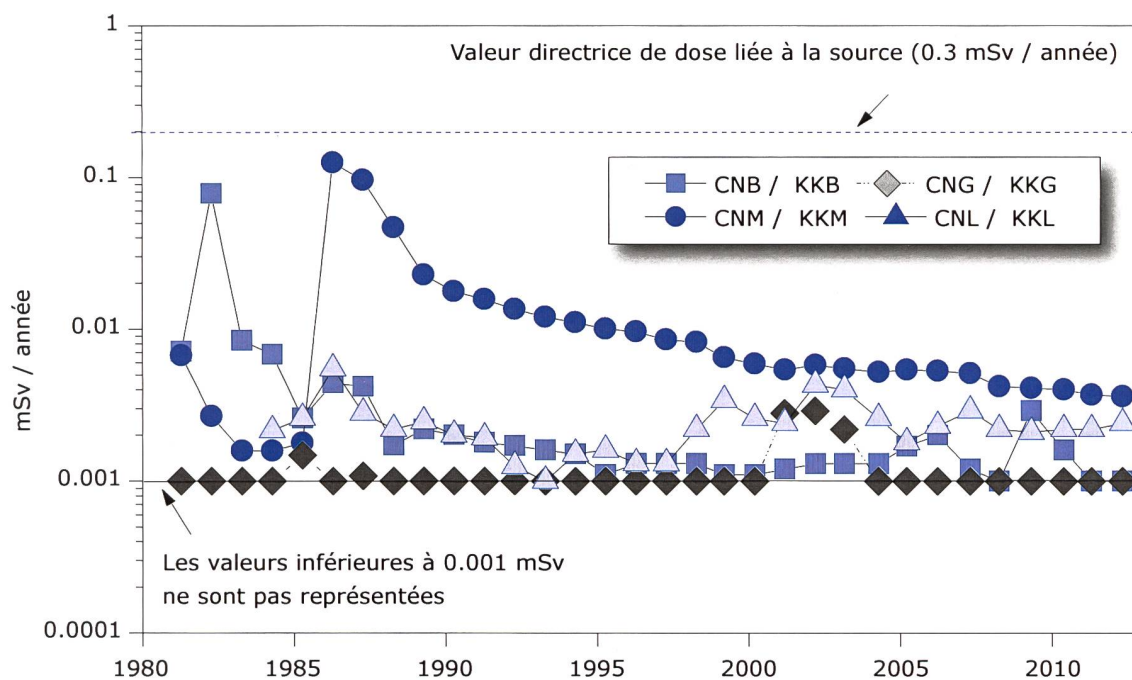
Tableau récapitulatif indiquant les chapitres du présent rapport à consulter pour accéder aux résultats détaillés de la surveillance du voisinage des installations nucléaires en fonction du compartiment environnemental (milieu) ou du radionucléide d'intérêt.

Milieu/Isotope	Chapitre
Exposition ambiante	Ch. 8.2 - 8.3
Air/Aérosols (émetteurs $\gamma$ )	Ch. 4.1
Précipitations ( $\gamma$ , $^3\text{H}$ )	Ch. 4.1
Milieu aquatique	Ch. 4.3
Mesures in situ	Ch. 3.1
Sol et herbe ( $\gamma$ , $^{90}\text{Sr}$ )	Ch. 4.4
Sol (Pu, $^{241}\text{Am}$ )	Ch. 7.2
$^{14}\text{C}$ dans les feuillages	Ch. 7.1
Denrées alimentaires	Ch. 5

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

## Méthodologie

Dans le cas d'un suivi de l'environnement, deux aspects peuvent être pris en compte: l'un 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:**

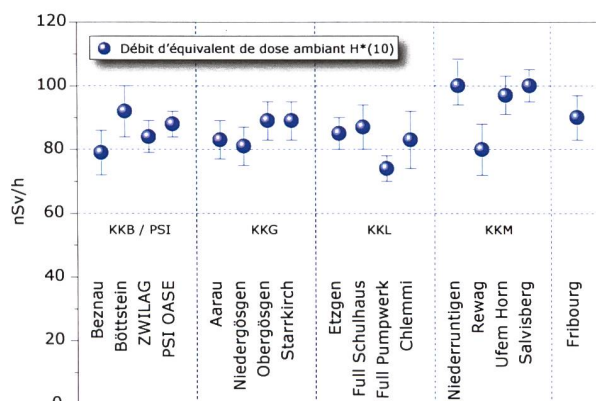
Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2012 (Données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

## 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 2012 (voir aussi Chap. 8.1).

La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population avoisinante en termes de doses. En tenant compte des rejets des années précédentes, ces dernières se sont échelonnées en 2012 entre 0.001 et 0.005 mSv. La contribution majeure provient des rejets atmosphériques (essentiellement du  $^{14}\text{C}$ ), avec à Mühleberg une contribution rémanente des résines rejetées en 1986, dont l'impact très localisé a constamment diminué depuis. 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 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). Trois catégories d'âge ont par ailleurs été considérées, l'adulte, l'enfant de 10 ans et le petit enfant. La dose représentée correspond à la dose reçue par la catégorie d'âge la plus péjorante.



**Figure 2:** Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiante  $H^*(10)$  effectués en 2012 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1 m du sol. La valeur mesurée à Fribourg est représentée à titre de comparaison.

### Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante à la clôture et au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres thermoluminescents (TLD) et par des mesures périodiques effectuées par l'IFSN à la clôture des installations. Les résultats de cette surveillance ont mis en évidence une contribution clairement mesurable du rayonnement direct en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühleberg ainsi qu'au PSI (voir Chapitre 8.2). A Mühleberg, par exemple, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation de la dose annuelle de 0.9 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel qui s'élève à 0.7 mSv/an). La valeur limite d'immission pour le rayonnement direct a toutefois été respectée par toutes les installations en 2012. 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. Il convient de relever qu'il s'agit ici de dose ambiante et non de dose à la personne. Ces valeurs ne sont donc pas à mettre en relation avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an puisqu'aucun membre du public ne réside pour de longue période en ces endroits.

L'OFSP effectue également des mesures de débit d'équivalent de dose ambiante  $H^*(10)$  à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1 m au-dessus du sol dans un voisinage plus étendu. La figure 2, illustrant les résultats de ces mesures, montre que l'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires ne se distingue pas de manière significative de celle enregistrée à 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  $^{40}\text{K}$  (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'OFSP et le PSI ainsi que des dépôts sur plaques de vaseline par l'exploitant.

Les résultats 2012 des mesures mensuelles des filtres aérosols des environs des centrales nucléaires suisses ainsi que du PSI ont montré la prédominance des radionucléides naturels  $^7\text{Be}$  et  $^{210}\text{Pb}$ , avec des valeurs comprises respectivement entre 1.1 et 5.5 et entre 0.1 et 1.4 mBq/m<sup>3</sup> (mesures OFSP et PSI). En dehors des traces de  $^{137}\text{Cs}$  (valeur maximale de  $1.7 \pm 0.5 \mu\text{Bq/m}^3$ ), attribuables à la



remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que l'accident de Tchernobyl), aucun radionucléide d'origine artificiel, n'a pu être mis en évidence sur 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 ( $^3\text{H}$ ) dans les échantillons mensuels de précipitations des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 2. A titre de comparaison, notons que les concentrations de tritium dans les précipitations de la station de référence de Posieux sont restées en 2012 inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l. Les valeurs enregistrées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires de Mühleberg, de Gösgen et de Leibstadt sont ainsi 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  $^3\text{H}$ ).

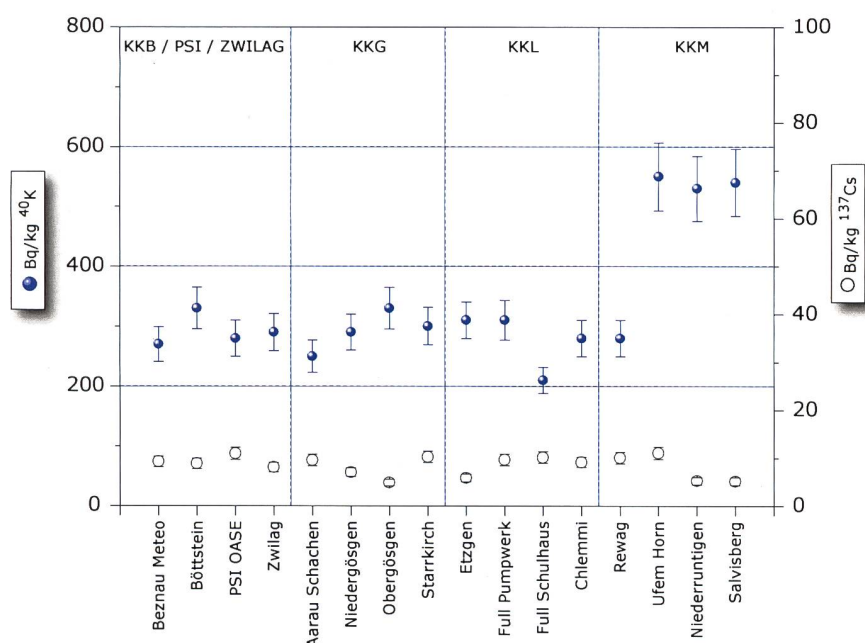
**Tableau 2:**

*Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2012.*

Lieu	Valeur min/ max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruntigen * (environs KKM)	< 2 - 2.8	-
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 - 2.3	-
Full (environs KKL) *	< 2 - 2.3	-
Beznau (environs KKB) **	3.0 - 24.8	6.7
PSI **	< 1.1 - 38.5	2.3
ZWILAG **	< 1.2 - 10.3	3.2

\* mesures OFSP / \*\* mesures PSI

Le  $^{14}\text{C}$  est le seul radionucléide émis dans l'atmosphère par les centrales nucléaires qui soit encore mesurable après dispersion dans l'environnement. Les échantillons de feuillage prélevés au voisinage de ces installations sont contrôlés par l'université de Berne depuis de nombreuses années. En 2012 les résultats ont mis en évidence une augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 104 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Les doses qui en résultent par ingestion



**Figure 3:**

$^{137}\text{Cs}$  et  $^{40}\text{K}$  (naturel) dans les sols secs et tamisés (2 mm) analysés par l'OFSP en 2012 (couche 0 - 5 cm).



de denrées alimentaires locales ne représentent cependant que quelques  $\mu\text{Sv}$ . L'intérêt des mesures de  $^{14}\text{C}$  se situe aussi dans l'utilisation de ce traceur atmosphérique pour affiner la modélisation de la dispersion atmosphérique.

### Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout examiné dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats enregistrés en 2012 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 ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , 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  $^{137}\text{Cs}$  dans les sols prélevés par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires en 2012.

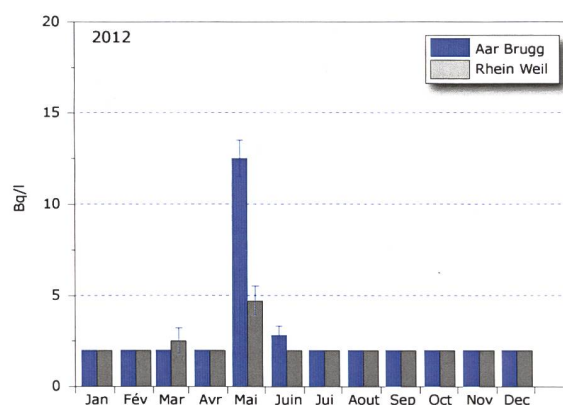
Afin de caractériser les sites du point de vue des contributions individuelles à l'exposition externe du public, l'OFSP procède depuis les années 80 à des mesures par spectrométrie gamma in situ. Les résultats correspondants montrent que les valeurs dans le voisinage des installations nucléaires n'ont rien d'anormal par rapport aux autres sites. Notons qu'aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence en dehors du  $^{137}\text{Cs}$ .

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  $^{90}\text{Sr}$  effectuées par l'Institut de Radiophysique dans des échantillons de lait et de céréales prélevés au voisinage des centrales nucléaires ainsi que de fruits et légumes prélevés au voisinage de Leibstadt ne se distinguent pas de ceux enregistrés ailleurs sur le plateau suisse. En 2010 et 2011 des activités de  $^{90}\text{Sr}$  légèrement plus élevées que la normale avait été enregistrées dans les échantillons de salade des environs de Leibstadt. Avec une valeur de 0.25 Bq par kg de poids frais, la valeur de  $^{90}\text{Sr}$  mesurée en 2012 dans cet échantillon était à nouveau conforme à la normale.

### 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  $^{58}\text{Co}$ , le  $^{60}\text{Co}$  ainsi que le  $^{54}\text{Mn}$  provenant à 90% de la centrale de Mühleberg. Les rejets les plus importants ont eu lieu aux mois d'août et septembre, pendant la période de révision. Si les activités mesurées pour ces radionucléides dans les échantillons d'eau de l'Aar, prélevés à Hagneck/BE en aval de KKM, reflètent bien les activités rejetées par la centrale pour les 9 premiers mois de l'année (à savoir jusqu'à septembre), on observe des différences notables en fin d'année. Les valeurs mesurées d'octobre à décembre surestiment en effet nettement les rejets effectifs. Cet écart est probablement dû aux travaux qui ont été réalisés dans le canal de Hagneck et qui ont eu pour conséquence une remise en suspension des sédiments qui s'y trouvaient.

La réduction significative des rejets en  $^{58}\text{Co}$  et  $^{60}\text{Co}$  par la centrale de Beznau au cours des dernières années (l'activité en  $^{58}\text{Co}$ , 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 2012, les activités du  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$  et du  $^{54}\text{Mn}$  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.



**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 2012.

Le  $^{137}\text{Cs}$ , 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  $^3\text{H}$  enregistrées en 2012 dans les eaux de l'Aar à Brugg/AG ainsi que celles du Rhin prélevées près de Weil/D, en aval de Bâle, sont généralement restées inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l à l'exception de la période mai-juin, où, comme chaque année, on constate une légère augmentation (voir Figure 4) en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen.

Dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar à Hagneck, les radionucléides tels que le  $^{54}\text{Mn}$ , le  $^{58}\text{Co}$  et le  $^{60}\text{Co}$  ainsi que le  $^{137}\text{Cs}$  sont clairement mesurables. Si le  $^{137}\text{Cs}$  se retrouve également dans tous les échantillons de sédiment de l'Aar, prélevés à Klingnau, et du Rhin, prélevés à Pratteln, le  $^{54}\text{Mn}$  et le  $^{60}\text{Co}$  n'y sont présents que sous forme de traces sporadiques. Les activités du  $^{58}\text{Co}$  sont quant à elles toujours restées inférieures aux limites de détection dans ces échantillons.

En raison de la détection répétée de  $^{131}\text{I}$  dans les échantillons de plantes aquatiques prélevées à Hagneck en 2011, l'EAWAG a procédé au prélèvement et à l'analyse mensuel d'échantillon de plantes aquatiques en provenance de cette station en 2012. Si les activités de  $^{131}\text{I}$  sont toujours restées inférieures à limite de détection, des valeurs inhabituellement élevées de  $^{54}\text{Mn}$  (250 Bq/kg m.s.), de  $^{58}\text{Co}$  (160 Bq/kg m.s.) et de  $^{60}\text{Co}$  (500 Bq/kg m.s.) ont été mises en évidence dans l'échantillon du mois de septembre. Ces valeurs élevées s'expliquent probablement par une fraction de sédiments attachés aux plantes plus importante en raison des travaux effectués dans le canal. Notons encore que ces trois radionucléides ont été régulièrement mesurés dans les échantillons de plantes aquatiques prélevées à Hagneck en 2012, mais avec des concentrations généralement beaucoup plus faibles. Dans les plantes aquatiques prélevées à Klingnau et Pratteln, les activités de ces 3 radionucléides sont en revanche restées inférieures aux limites de détection de 5 à 10 Bq/kg.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar en aval de KKM, KKG et KKB en 2012 n'ont pas révélé la présence de radionucléide d'origine artificielle. Le constat est le même pour l'examen des eaux des nappes phréatiques.

## Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2012. Les doses résultant du fonctionnement des centrales nucléaires pour la population avoisinante sont restées nettement inférieures aux limites réglementaires. Les calculs effectués à partir des rejets effectifs et du rayonnement direct en se basant sur des modèles de transfert jusqu'à l'homme indiquent que l'impact dosimétrique des centrales nucléaires n'a pas dépassé la valeur directrice liée à la source de 0.3 mSv par an. Les calculs de dose effectués de manière indépendante par le PSI et les autorités ont montré que les doses pour la population avoisinante générées par le centre de recherche sont également restées nettement inférieures à la valeur directrice liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour l'ensemble du site PSI/ZWILAG.

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

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



## 8.6

# La surveillance radiologique du site de l'ancienne centrale nucléaire de Lucens

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

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

**P. Froidevaux, J.A. Corcho Alvarado, F. Barraud, K. Garcia, F. Bochud**

Institut de Radiophysique, Rue du Grand Pré 1, 1007 Lausanne, Suisse

### Résumé

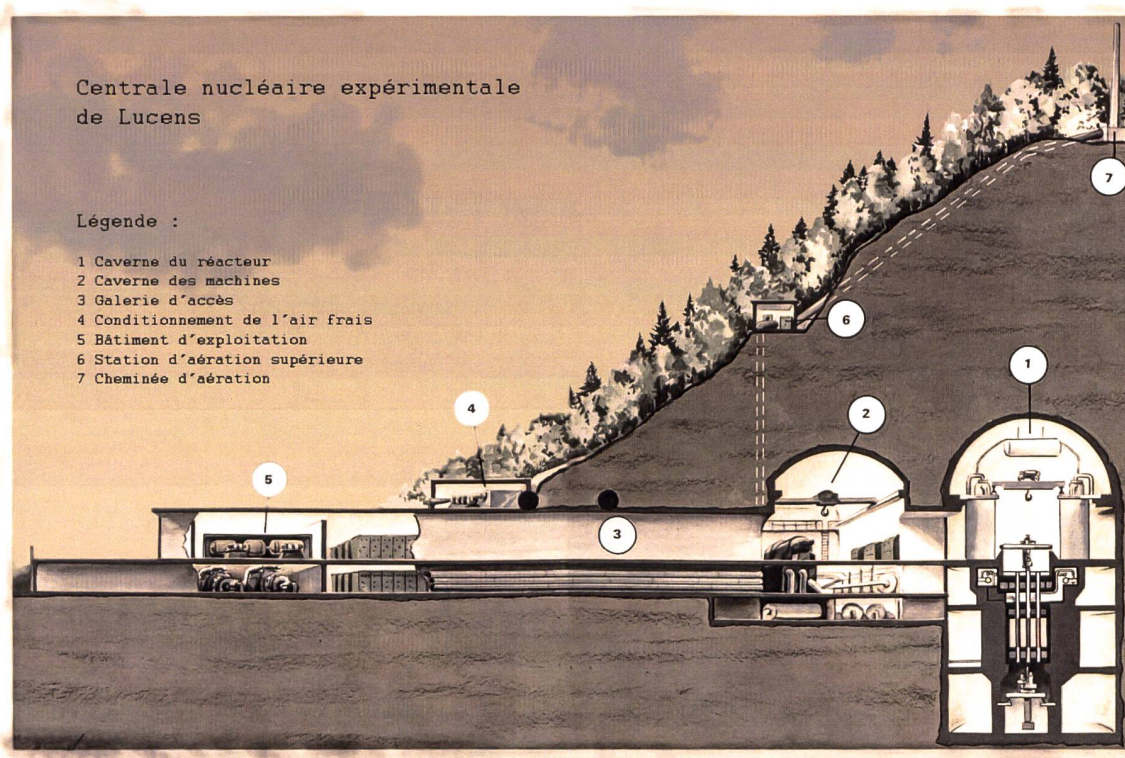
Dans le cadre de la surveillance radiologique du site de l'ancienne centrale nucléaire de Lucens, des concentrations accrues en tritium ont été enregistrées dans les systèmes de drainage entre fin 2011 et début 2012. Bien que la concentration maximale de tritium enregistrée (230 Bq/l) soit restée nettement inférieure à la valeur limite d'immissions, l'OFSP a pris la décision de renforcer la surveillance du site au moyen de prélèvements journaliers d'échantillons d'eau en différents points du système de drainage, complétés par des campagnes de mesures dans les eaux, les sédiments et les plantes aquatiques de la Broye. Près de 200 échantillons ont ainsi été prélevés et analysés entre mars et juin 2012. Aucune valeur élevée n'a plus été enregistrée dans les eaux de drainage, confirmant qu'il s'agissait d'un phénomène ponctuel. Les résultats des mesures des échantillons prélevés dans la Broye ont par ailleurs permis d'exclure tout marquage de l'environnement par des radionucléides provenant de l'ancienne centrale nucléaire.

### Introduction

La centrale nucléaire de Lucens était une installation nucléaire expérimentale souterraine construite à deux kilomètres au sud-ouest de Lucens, sur la rive gauche de la Broye. Une galerie d'accès longue de 100 m débouchait sur trois cavernes, creusées dans la molasse, destinées respectivement au réacteur, à la turbine et à la piscine de stockage des éléments combustibles (voir Figure 1). Le réacteur utilisait de l'uranium légèrement enrichi comme combustible, de l'eau lourde comme modérateur et du dioxyde de carbone comme caloporteur. Un défaut de refroidissement, dû au colmatage des canaux de circulation du gaz caloporteur par des produits de corrosion des gaines de magnésium protégeant les barreaux de combustibles, entraîna la fusion partielle du cœur du réacteur lors du démarrage de l'installation, le 21 janvier 1969<sup>1</sup>.

La caverne du réacteur, qui fut sévèrement contaminée lors de l'accident, a été décontaminée et le réacteur démantelé au cours des années suivantes. L'installation a été définitivement désaffectée en 1992 par remplissage de la caverne du réacteur et de la piscine d'entreposage du combustible par du béton, avec mise en place d'un système de drainage. L'objectif de ce système de drainage est d'éviter que d'éventuelles contaminations, lessivées par le passage des eaux d'infiltration aux travers des cavernes murées, n'atteignent les eaux de la nappe phréatique et ne s'y accumulent. Les eaux d'infiltration sont donc drainées, diluées avec les eaux de drainage provenant d'autres parties de la mon-

<sup>1</sup> Pour plus de détails sur la construction de la centrale nucléaire expérimentale de Lucens (CNEL), l'accident du 21 janvier 1969 ainsi que ses conséquences radiologiques, consulter le dossier de l'IFSN consacré à la CNEL à l'adresse: <http://www.ensi.ch/fr/dossiers-2/centrale-nucleaire-de-lucens>



**Figure 1:**  
Plan de l'ancienne centrale nucléaire expérimentale de Lucens (Image IFSN).

tagne, puis évacuées et rejetées dans la Broye. Les rejets éventuels sont ainsi fortement dilués dans l'environnement.

La majeure partie du site, à l'exception d'une parcelle où étaient stockés 6 fûts contenant des déchets radioactifs, a été soustraite à la législation sur les installations nucléaires sur décision du conseil fédéral en 1995. L'OFSP, autorité responsable de la surveillance de la radioactivité dans l'environnement en Suisse, a été chargé de maintenir une surveillance du site pour une durée supplémentaire de 30 ans.

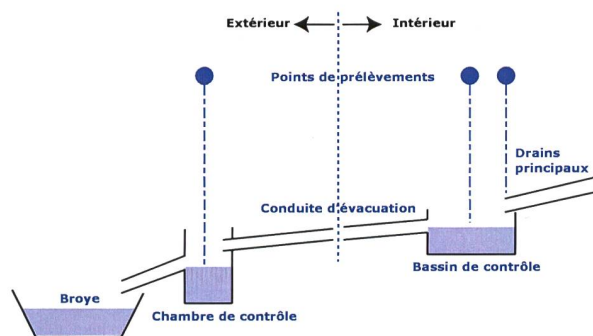
Les six conteneurs de déchets radioactifs ont été acheminés en 2003 au centre de stockage intermédiaire pour déchets radioactifs (ZWILAG) de Würenlingen et la dernière parcelle a alors été déclassée en 2004.

## Surveillance du site jusqu'à début 2012

### Le programme

La surveillance du site mise en place par l'OFSP se résumait, jusqu'à début 2012, au prélèvement de deux échantillons d'eau, l'un dans le bassin de contrôle (BdC) et l'autre dans la chambre de contrôle (CdC) tous les 15 jours environ. Le bas-

sin de contrôle est un bassin de collecte où sont réunies les eaux provenant des 8 drains principaux du système de drainage; la chambre de contrôle est située juste avant le rejet dans la Broye (voir Figure 2). Les prélèvements étaient effectués manuellement par un membre du personnel du dépôt de conservation des objets culturels du Canton de Vaud, qui occupe maintenant l'ancienne caverne des machines. Les échantillons étaient ensuite envoyés à l'Institut de Radiophysique (IRA) à Lausanne, chargé des analyses de la radioactivité (émetteurs gamma, tritium ( $^3\text{H}$ ) et  $^{90}\text{Sr}$ ) sur mandat de l'OFSP.



**Figure 2:**  
Représentation schématique du système de drainage.



L'IRA recevait les échantillons d'eau tous les 2-3 mois (soit 8 à 12 échantillons par envoi). Pour la mesure des émetteurs gamma, les deux prélèvements du mois pour un site (CdC ou BdC) étaient mélangés et mesurés ensemble (mélange mensuel). On groupait de la même manière les échantillons pour la mesure du  $^3\text{H}$ . Pour la mesure de  $^{90}\text{Sr}$ , les mélanges mensuels de deux mois consécutifs étaient encore mesurés ensemble (soit 6 mesures par an par site).

### Les résultats

Au cours des 15 dernières années, aucun émetteur gamma ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) n'a pu être mis en évidence dans les échantillons d'eau prélevés dans la CdC et le BdC (concentrations inférieures à la limite de détection de 0.2 - 0.5 Bq/l). Les activités du  $^{90}\text{Sr}$  sont également restées inférieures à la limite de détection de 5 - 7 mBq/l.

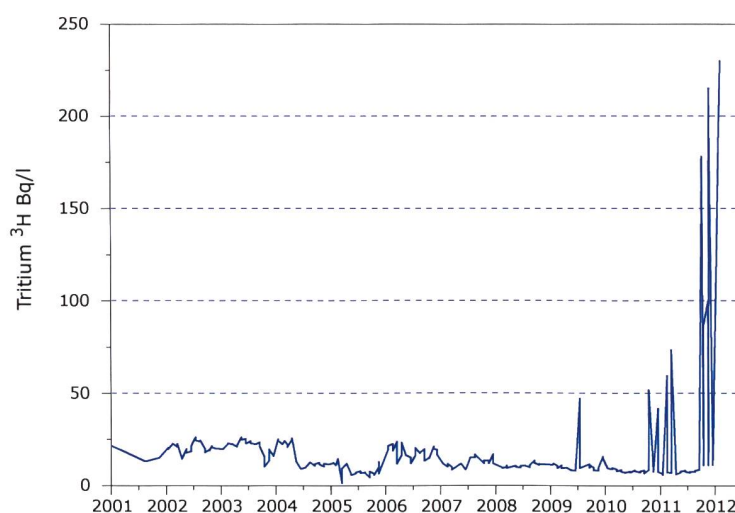
La figure 3 montre les résultats des mesures du tritium dans les eaux du système de drainage (BdC et CdC) de l'ancienne centrale de Lucens effectuées par l'IRA au cours des 11 dernières années (231 mesures). Les teneurs en  $^3\text{H}$  mesurées se situaient, jusqu'en 2010, entre 10 et 20 Bq/l (valeur moyenne pour la période 2001 à 2010 : 15 Bq/l env.). Notons qu'une eau de surface ne dépasse habituellement pas 3 Bq/l. Ces résultats reflètent les traces de l'accident de 1969.

Entre fin 2010 et début 2011, une augmentation de l'activité en  $^3\text{H}$  dans certains prélèvements a été observée (activité maximale de 73 Bq/l en mars 2011). Ce phénomène s'est ensuite arrêté pour

reprendre au dernier trimestre 2011 de façon accentuée et atteindre une valeur de 230 Bq/l dans l'échantillon de février 2012. L'échantillon en question présentait par ailleurs une activité en  $^{137}\text{Cs}$  mesurable de 0.5 Bq/l. Notons que la concentration en  $^{90}\text{Sr}$  est, quant à elle, restée inférieure à la limite de détection.

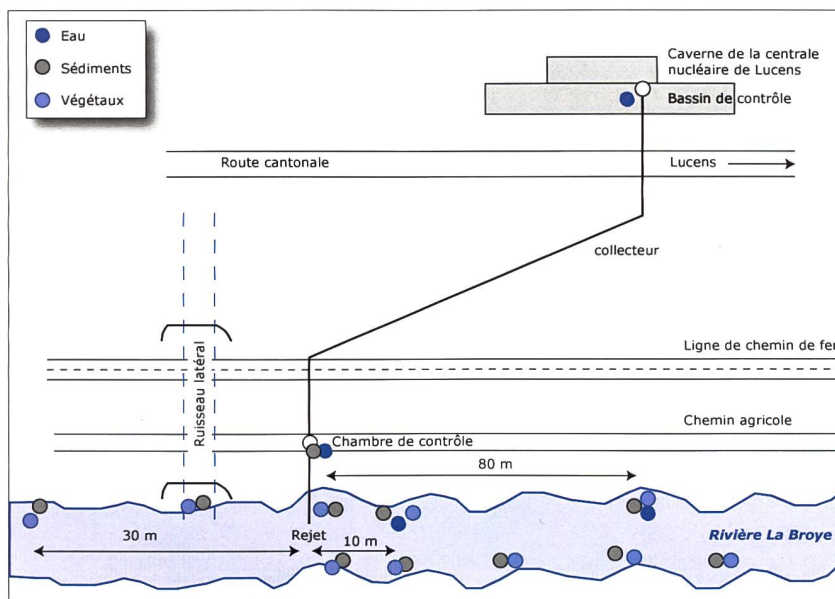
Les concentrations maximales de tritium enregistrées dans les eaux du système de drainage de l'ancienne centrale de Lucens sont restées nettement inférieures à la valeur limite d'immission fixée dans l'ORaP à 12'000 Bq/l pour le tritium dans les eaux accessibles au public et n'ont donc, à aucun moment, représenté un danger pour la santé. Les résultats des mesures du dernier trimestre 2011 et du premier trimestre 2012 ont toutefois mis en évidence une situation anormale (augmentation d'un facteur 15 environ par rapport à la valeur moyenne 2001-2010, avec une tendance à la hausse et une valeur mesurable pour le  $^{137}\text{Cs}$  dans l'échantillon de février) qu'il était nécessaire de suivre avec attention.

Notons par ailleurs que suite à l'observation de ces activités plus élevées, les échantillons bimensuels ont été remesurés séparément par l'IRA: la concentration était nettement plus faible dans l'un (10 Bq/l) et doublait dans l'autre. Ce résultat indique que l'augmentation d'activité était ponctuelle (pics d'activité). Le programme de surveillance mis en place jusqu'alors, avec des prélèvements manuels bimensuels, s'avérait donc insuffisant pour apprécier la situation de manière réaliste.



**Figure 3:**

Concentrations du tritium dans les eaux de l'ancienne centrale de Lucens mesurées par l'IRA entre 2001 et début 2012 (231 mesures).



**Figure 4:**  
Plan des prélèvements effectués le 14 et le 27 avril 2012 dans la Broye.

## Programme de surveillance complémentaire mis en place en 2012

Fin mars 2012, l'OFSP a donc pris la décision de renforcer la surveillance du site afin de pouvoir quantifier avec plus de précision l'importance des rejets de radioactivité dans l'environnement provenant de l'ancienne centrale de Lucens et, si possible, d'en déterminer l'origine. Les mesures prises par l'OFSP ont été les suivantes:

- Mise en place d'une surveillance en continu des eaux de drainage. A partir du 16 avril 2012 un prélèvement journalier manuel a été effectué dans la chambre et le bassin de contrôle, jusqu'à l'installation de collecteurs automatiques le 02 mai 2012.
- Etude détaillée du système de drainage sur la base des plans fournis par l'IFSN, et prélèvements complémentaires d'échantillons d'eaux provenant de différents points du système de drainage afin de tenter de déterminer l'origine des fuites de tritium observées. Cette étude a été complétée par l'examen de l'inventaire des activités encore présentes sur le site.
- Organisation de deux campagnes de prélèvements d'échantillons d'eaux, de sédiments et de plantes aquatiques dans la Broye afin de quantifier les niveaux de radioactivité (notamment de  $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{90}\text{Sr}$ ) dans l'environnement et de répondre à la question d'un éventuel marquage par des rejets en provenance de l'ancienne centrale de Lucens.

## Résultats du programme de mesures complémentaires 2012

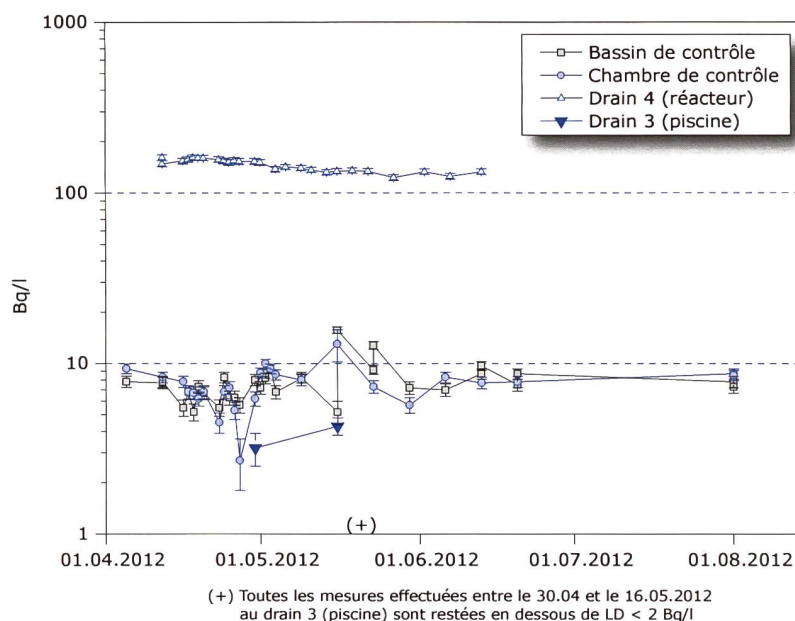
### Analyse du tritium dans les eaux du système de drainage

Des prélèvements d'eau ont été réalisés directement dans les drains n° 3 (collecte des eaux de drainage de la caverne où était située la piscine de stockage du combustible) et n° 4 (collecte des eaux de drainage de la caverne du réacteur), en plus des prélèvements habituels dans le bassin de contrôle (lieu de réunion de 8 drains, dont le n°3 et le n°4) et la chambre de contrôle. Ces prélèvements ont été effectués, tous les jours, manuellement depuis le 16.04 jusqu'au 02.05. A cette date, des collecteurs automatiques (prélèvement toutes les 6h) ont été installés à la sortie du drain n°4, dans le bassin de contrôle et la chambre de contrôle. Les échantillons collectés par l'automate situé à la sortie du drain n°4 ont été analysés tous les 2 à 3 jours puis chaque semaine, ceux prélevés automatiquement dans le bassin de contrôle et la chambre de contrôle ont été analysés chaque semaine.

Les résultats des mesures du tritium effectuées dans les eaux des différents éléments du système de drainage après la mise en place de la surveillance rapprochée sont représentés sur la figure 5.

On notera tout d'abord qu'aucune concentration de tritium supérieure à 20 Bq/l n'a plus été enregistrée ni dans le bassin de contrôle, ni dans la chambre de contrôle après la mise en place du programme de surveillance renforcée. Si de tels résultats excluent la possibilité de déterminer l'origine des augmen-



**Figure 5:**

Résultats des analyses du tritium dans les eaux des différents éléments du système de drainage de l'ancienne centrale nucléaire de Lucens obtenus dans le cadre la surveillance renforcée mise en place par l'OFSP au printemps 2012.

tations enregistrées fin 2011 et début 2012, ils démontrent que le phénomène était ponctuel et qu'un suivi régulier à long terme (prélèvement automatique et en continu) est nécessaire pour appréhender de manière réaliste la situation. Remarquons également que les concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  enregistrées dans ces échantillons (BdC et CdC) sont toutes restées inférieures aux limites de détection.

La figure 5 montre en revanche que l'eau en provenance du drain 4 (caverne du réacteur) présente une concentration plus élevée de tritium, de l'ordre de 140 Bq/l. Etant donné la dilution qui s'opère au niveau du bassin de contrôle, nous pouvons conclure qu'elle est responsable des activités de l'ordre de 10 - 20 Bq/l enregistrées habituellement dans les échantillons de la chambre et du bassin de contrôle. Les activités étant restées stables au cours de la période de surveillance complémentaire, il n'est par contre pas possible d'affirmer que l'eau en provenance de ce drain est responsable des concentrations élevées enregistrées fin 2011-début 2012. Les eaux en provenance du drain 4 présentent par ailleurs des activités très faibles, mais mesurables de  $^{137}\text{Cs}$  (env. 0.5 Bq/l), les concentrations en  $^{90}\text{Sr}$  restant inférieures à la limite de détection.

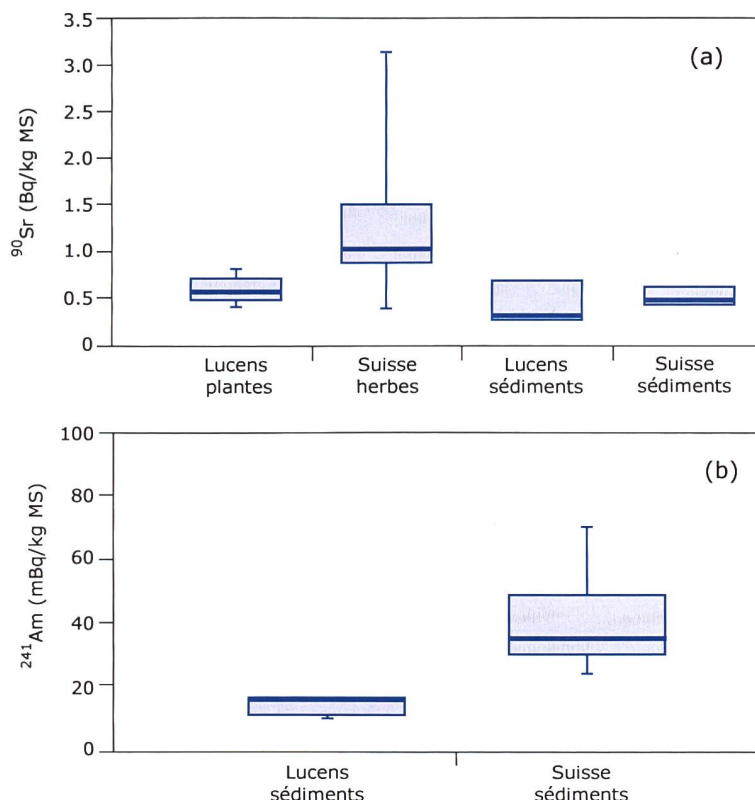
La surveillance complémentaire ayant démontré que l'augmentation enregistrée était due à un phénomène ponctuel, un rythme de surveillance normal des eaux du système de drainage a pu être réintroduit dès la fin juin, avec toutefois le maintien d'un collecteur d'eau automatique.

### Résultats des mesures des échantillons prélevés dans la Broye

Les concentrations de tritium enregistrées dans les échantillons d'eau provenant de la Broye n'ont pas dépassé 3 Bq/l.

Sur 23 échantillons de plantes aquatiques et de sédiments prélevés dans la Broye, en amont et en aval du point de rejet, seul un échantillon de végétaux a présenté une activité en  $^{137}\text{Cs}$  supérieure à 1 Bq/kg MS. Des mesures du tritium organiquement lié (OBT) ont également été effectuées dans les plantes aquatiques : toutes les activités étaient inférieures à la limite de détection de 2 Bq/kg MS.

La figure 6 montre que les sédiments et les plantes aquatiques prélevés dans la Broye ne présentent pas non plus de marquage en  $^{90}\text{Sr}$ , en  $^{239+240}\text{Pu}$  ou en  $^{241}\text{Am}$  attribuable à l'ancienne centrale nucléaire de Lucens. Les activités enregistrées dans les échantillons prélevés en amont et en aval du point de rejet sont en effet comparables et typiques de celles enregistrées ailleurs en suisse romande (provenance essentiellement des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60).

**Figure 6:**

Représentation de la médiane et des 25 et 75 % percentiles pour la comparaison entre les mesures de  $^{90}\text{Sr}$  dans les plantes et les sédiments pour le site de Lucens et le reste de la Suisse en 2012 (a) et pour la comparaison entre les mesures de  $^{241}\text{Am}$  dans les sédiments pour le site de Lucens et le reste de la Suisse (2009-2012) (b).

## Conclusions

La surveillance et les techniques de mesure, très sensibles, mises en œuvre par l'OFSP et l'IRA ont permis de déceler des concentrations anormales de  $^3\text{H}$  sur le site de l'ancienne centrale nucléaire de Lucens, accidentée en 1969. Même si les valeurs mesurées sont restées 50 fois inférieures aux limites légales et ne présentaient pas de danger pour la santé de la population, l'augmentation enregistrée justifiait un suivi approfondi de la situation. Un programme de mesures complémentaires a donc été mis en œuvre pour tenter d'en déterminer l'origine.

Les résultats de la surveillance rapprochée (200 analyses supplémentaires en 3 mois) n'ont pas permis de déterminer l'origine des niveaux plus élevés de tritium mesurés dans les eaux de drainage de l'ancienne centrale de Lucens fin 2011 et début 2012, car les concentrations étaient retombées au niveau de celles enregistrées jusqu'en 2010.

Ils ont toutefois montré que le drain 4, collectant les eaux de drainage de la caverne du réacteur, pré-

sentait une fuite permanente de tritium, avec une concentration de l'ordre de 140 Bq/l. Ce drain est responsable des activités de l'ordre de 10-20 Bq/l enregistrées habituellement dans les échantillons de la chambre et du bassin de contrôle.

Les mesures effectuées dans les eaux, les sédiments et les plantes aquatiques prélevées dans la Broye n'ont montré aucun marquage de l'environnement par des substances radioactives attribuables à l'ancienne centrale de Lucens.

Finalement, la surveillance complémentaire ayant démontré que le phénomène était ponctuel, un rythme de surveillance normal a pu être réintroduit dès la fin juillet, avec toutefois le maintien d'un collecteur d'eau automatique.

## Remerciements

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Monsieur C. Pittet pour l'engagement et la flexibilité dont il a fait preuve, en particulier au cours de la période de surveillance renforcée du site.



## 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 la Commission de Sécurité 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 2012 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.

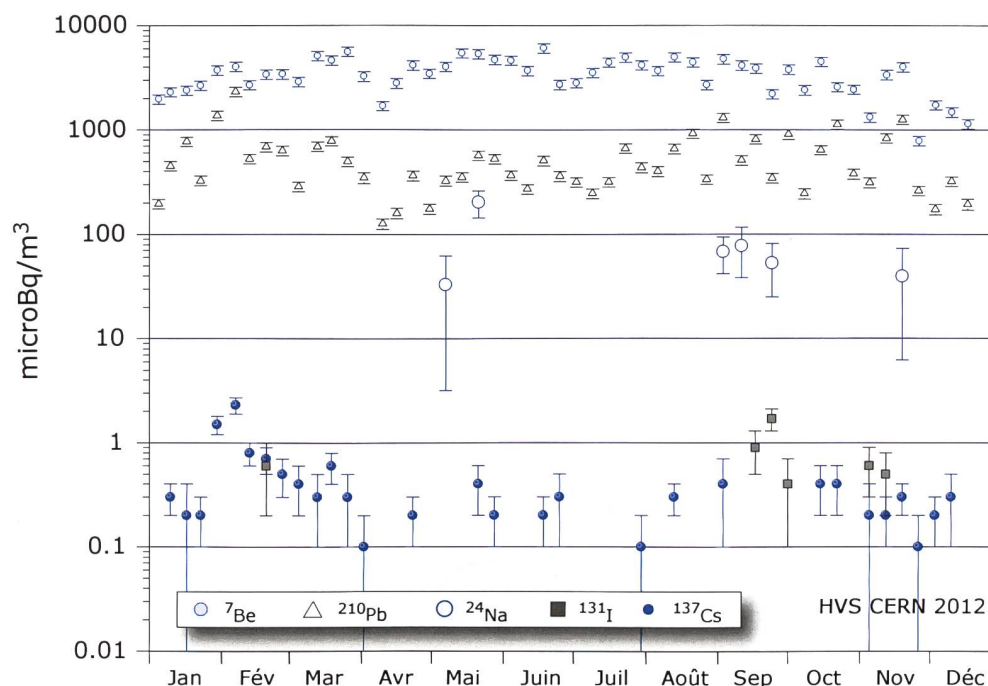
#### Programme de surveillance de l'OFSP

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  $^3\text{H}$  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 se sont poursuivies en 2012. Un programme spécial de suivi du point zéro LHC a été initié par l'OFSP et l'ASN en 2012 afin d'évaluer l'impact du LHC sur l'environnement et la population avoisinante après env. 3 ans de fonctionnement. Les résultats de cette campagne de mesure, qui s'est déroulée en septembre 2012 et à laquelle



**Figure 1:** Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2012.

plusieurs laboratoires suisses ainsi que l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) / F ont participé, feront l'objet d'une publication séparée à paraître fin 2013.

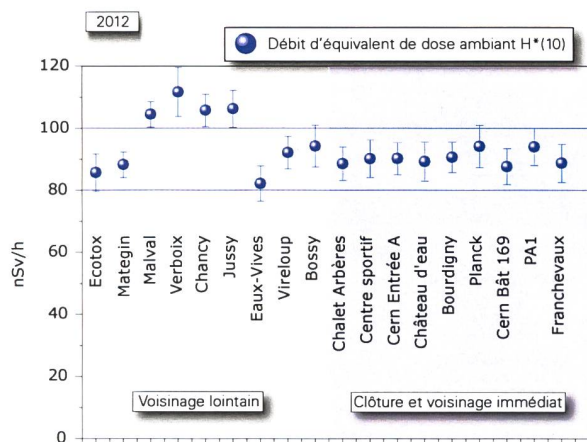
## Mesures de l'exposition ambiante

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 2012, 5 d'entre eux

étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français). En plus de l'équivalent de dose ambiante 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 observés correspondaient généralement 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). Seules les doses de neutrons enregistrées au 2<sup>ème</sup> trimestre 2012 (10.04 au 04.07. 2012) par les dosimètres placés au voisinage des puits d'aération PA1 du LHC et TI2 du tunnel de transfert SPS (Super Proton Synchrotron) - LHC ont enregistré des doses de neutrons légèrement supérieures à l'irradiation naturelle, avec une incertitude de mesure assez élevée (maximum de  $0.064 \pm 0.034$  mSv au point TI2).

Comme les années précédentes, des doses de neutrons plus élevées (jusqu'à 0.68 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/CH. Sur le site de Prévessin/F, l'équivalent de dose ambiante des photons, relevé au 4<sup>ème</sup> trimestre, a atteint 0.5 mSv.



**Figure 2:** Mesures du débit d'équivalent de dose ambiante  $H^*(10)$  effectuées par l'OFSP en 2012 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 septembre 2012 sur 9 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants n'ont par ailleurs montré aucune influence du centre de recherche sur l'exposition ambiante. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ( $H^*(10)$ ) dû au rayonnement gamma se sont échelonnées entre 82 et 112 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes:  $90 \pm 7$  nSv/h; moyenne des sites distants  $97 \pm 11$  nSv/h).

## Mesures dans le milieu atmosphérique

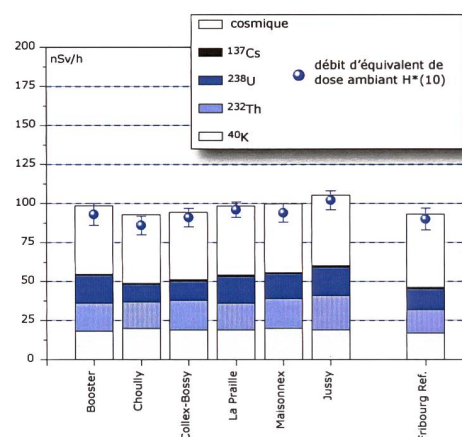
La station de mesure du réseau RADAIR située au CERN et mesurant en continu la radioactivité alpha et bêta des aérosols (voir Chap. 4.1) n'a pas signalé d'anomalie en 2012. Depuis 2007, un moniteur d'iode est également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de l' $^{131}\text{I}$  gazeux. Aucune valeur supérieure à la limite de détection de  $0.1 \text{ Bq/m}^3$  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  $^7\text{Be}$  et  $^{210}\text{Pb}$  (cf figure 2). Le cas du  $^7\text{Be}$  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  $^7\text{Be}$  mesurées en 2012 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  $^{22}\text{Na}$ , également d'origine naturelle, ont été détectées à plusieurs reprises (valeurs comprises entre  $0.1$  et  $0.8 \text{ } \mu\text{Bq/m}^3$ ).

En ce qui concerne les radioéléments d'origine artificielle, des traces de  $^{137}\text{Cs}$  provenant de la remise en suspension des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl ont, comme partout en Suisse, été détectées à plusieurs reprises, mais les activités n'ont pas dépassé  $2.3 \pm 0.4 \text{ } \mu\text{Bq/m}^3$ .

Les seuls radioisotopes attribuables aux activités du CERN sporadiquement mis en évidence dans les filtres aérosols sont le  $^{24}\text{Na}$  et le  $^{131}\text{I}$  (valeurs comprises entre  $40 \pm 33$  et  $203 \pm 59 \text{ } \mu\text{Bq/m}^3$ )<sup>(1)</sup>

1 Ces activités ont été calculées à la date de référence correspondant au début de la période de collection, en supposant une accumulation constante de  $^{24}\text{Na}$  au cours de la période de collection et en tenant compte de sa décroissance au cours de la même période. 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.



**Figure 3:**

Contributions individuelles au débit d'exposition ambiante déterminées par spectrométrie gamma in situ pour les sites voisins du CERN examinés en 2012, et comparaison avec les résultats obtenus à Jussy (site distant) ainsi qu'à Fribourg.

et entre  $0.5 \pm 0.3$  et  $1.7 \pm 0.4 \text{ } \mu\text{Bq/m}^3$  respectivement). Ces radionucléides, d'une demi-vie de 15 h pour le  $^{24}\text{Na}$  et de 8 jours pour le  $^{131}\text{I}$ , sont produits dans les accélérateurs de particules du centre de recherche (l' $^{131}\text{I}$  est uniquement produit par l'installation ISOLDE).

Notons encore que l'impact radiologique de ces traces de  $^{24}\text{Na}$  et de  $^{131}\text{I}$  est tout à fait négligeable, puisque les concentrations les plus élevées enregistrées en 2012 pour ces radionucléides ne représentent qu'environ  $0.0002 \%$  (pour le  $^{24}\text{Na}$ ) et  $0.00006 \%$  (pour le  $^{131}\text{I}$ ) 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  $^7\text{Be}$  mesurées en 2012 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
	( $\text{mBq/m}^3$ )	( $\text{mBq/m}^3$ )
CERN (Meyrin/GE)	0.8 – 6.1	3.4
Oberschrot/FR	1.0 – 7.0	3.7
Klingnau/AG	0.8 – 6.5	3.1
Güttingen/TG	1.1 – 5.5	3.4
Monte Ceneri/TI	1.0 – 7.1	4.0



## 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 2012 n'ont pas indiqué d'apport artificiel attribuable aux activités du CERN: la figure 3 montre en effet que les valeurs mesurées au voisinage proche du centre de recherche sont tout à fait comparables à celles relevées dans des sites hors de son influence, tels que Jussy, situé à l'opposé du canton de Genève 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, n'a par ailleurs pas révélé d'impact notable du fonctionnement du collisionneur en termes d'exposition ambiante ou de production de radionucléides.

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

## Mesures dans le milieu aquatique

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle, à l'exception de traces de  $^{137}\text{Cs}$ , provenant de l'érosion des sols anciennement contaminés. Les concentrations en tritium dans ces échantillons étaient par ailleurs toutes inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l. La valeur maximale enregistrée pour le tritium dans les échantillons mensuels d'eau du Nant d'Avril s'est élevée à  $2.4 \pm 0.6$  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 octobre 2011 à novembre 2012 a fait l'objet d'un rapport spécifique<sup>2</sup>.

En dehors du  $^{40}\text{K}$  et des isotopes des séries primor-

diales ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ), 3 radioisotopes ont été détectés dans les échantillons d'eau brute (non filtrée) prélevés dans le Nant d'Avril.

Les activités maximales sont celles du  $^7\text{Be}$  (maximum de  $0.98 \pm 0.07$  Bq/l), avec une moyenne de 0.22 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  $\text{m}^3/\text{période}$ ) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de  $^7\text{Be}$  pour la période 2011 - 2012 est ainsi de 792 MBq au minimum et de 1'060 MBq au maximum et se situe en-dessous de la moyenne des périodes de mesure précédentes.

Le deuxième radionucléide mis en évidence dans les eaux du Nant d'Avril est le  $^{137}\text{Cs}$  (maximum de 6 mBq/l). Ce radionucléide a été détecté exclusivement sur les particules (mesuré sur les filtres), ce qui montre qu'il est fortement associé à celles-ci, malgré une acidification de l'échantillon. Le  $^{137}\text{Cs}$  provient de l'érosion des sols, qui entraîne des particules contaminées par les retombées des essais nucléaires dans l'atmosphère et de la catastrophe de Tchernobyl.

Le troisième radionucléide est le  $^{22}\text{Na}$ , détecté dans 9 échantillons bimensuels, avec une valeur maximale de 9 mBq/l. Très peu de données récentes sont disponibles sur les flux naturels de  $^{22}\text{Na}$ . Comme le  $^7\text{Be}$ , du  $^{22}\text{Na}$  est produit dans la stratosphère par rayonnement cosmique. Tokuyama et al.<sup>3</sup> mesurent au Japon un flux atmosphérique de  $^{22}\text{Na}$  de 4 ordres de grandeur inférieurs à celui du  $^7\text{Be}$ , 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  $^{22}\text{Na}$  mesurée dans les eaux du Nant d'Avril en 2012 ne représente toutefois que 0.015% 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  $^7\text{Be}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  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  $^{54}\text{Mn}$ , de  $^{65}\text{Zn}$  ou des isotopes de cobalt ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) n'a plus été détectée dans les sédiments du Nant d'Avril.

<sup>2</sup> J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus et K. Loizeau, Rapport N°13 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Octobre 2011 - Novembre 2012; Institut F.-A. Forel (Décembre 2011).

<sup>3</sup> H. Tokuyama and S. Igarashi; Seasonal Variation in the Environmental Background Level of Cosmic-Ray-Produces  $^{22}\text{Na}$  at Fukui City, Japan. J. Environ. Radioactivity 38:147-161 (1998).



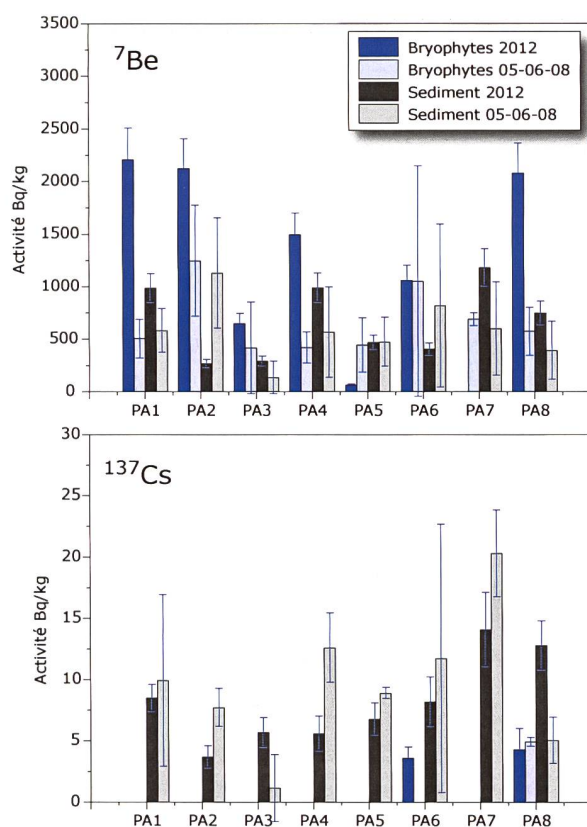
Afin de mettre en évidence d'éventuelles augmentations des immissions radioactives dans le milieu aquatique dues au fonctionnement du LHC, des sédiments et des bryophytes ont par ailleurs été prélevés une fois au cours de l'année aux 8 principaux points de rejets des eaux du LHC et analysés par l'Institut Forel. Les activités mesurées dans les échantillons de sédiments se sont échelonnées entre 270 et 1'183 Bq/kg pour le  $^7\text{Be}$  et entre 3.7 et 14.1 Bq/kg pour le  $^{137}\text{Cs}$ . Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en  $^7\text{Be}$  variant entre 63 et 2'210 Bq/kg et entre < 2 et 4.3 Bq/kg pour le  $^{137}\text{Cs}$ . 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  $^7\text{Be}$  dans les bryophytes prélevés aux points de rejet PA1, PA2 et PA8 sont élevées et dépassent la gamme d'activité enregistrée sur les mêmes sites lors des périodes témoins; elles restent toutefois dans des gammes de valeurs déjà observées dans le Nant d'Avril.

En résumé, si l'on exclut le  $^7\text{Be}$  dont la fraction produite par les installations du CERN est incertaine, le seul radionucléide attribuable aux activités du centre de recherche décelé dans le milieu aquatique en 2012 est le  $^{22}\text{Na}$ . Les radioéléments produits par les installations du CERN tels que  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ , mis en évidence par le passé dans le Nant d'Avril, n'ont en effet été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes durant l'année sous revue.

**Tableau 2:**

Résumé des résultats des mesures effectuées par l'Institut F.-A. Forel dans les sédiments du Nant d'Avril durant la période octobre 2011 à novembre 2012 (12 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max [Bq/kg]	Moyenne [Bq/kg]	Médiane [Bq/kg]
$^7\text{Be}$	434 - 1'634	977	923
$^{137}\text{Cs}$	7.8 - 19.4	12.7	11.8



**Figure 4:** Activités du  $^7\text{Be}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  dans les bryophytes et les sédiments aux points de rejet du LHC en 2012. Les valeurs 05-06-08 correspondent aux moyennes des résultats des campagnes de mesures effectuées au cours des périodes témoins 2005-2006-2008.

## 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 2012.

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 ( $^{24}\text{Na}$  et  $^{131}\text{I}$  dans l'air ou  $^{22}\text{Na}$  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 radio-isotopes artificiels provenant des activités du CERN sont en effet nettement inférieures aux limites suisses et donc sans conséquence d'un point de vue radiologique.

## 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)

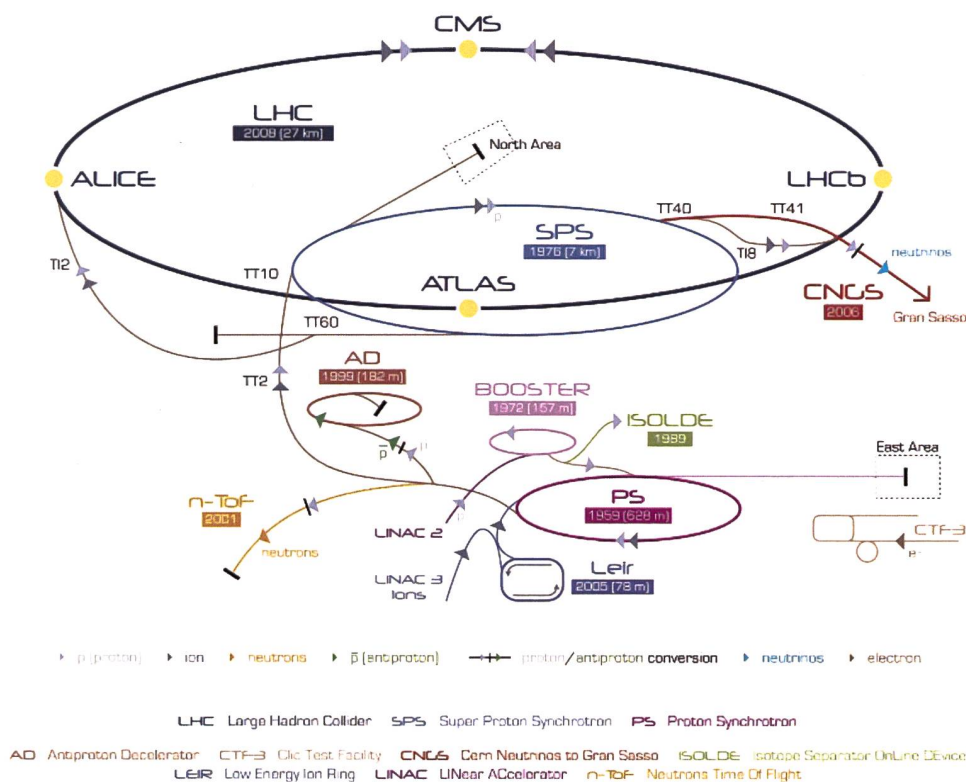
1211 Genève 23

## 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 2012. La dose effective délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.022 mSv, soit <8% de la valeur directrice. Les concentrations de radionucléides sont restées inférieures à 0.5% des limites applicables dans tous les échantillons environnementaux. De fait, l'impact radioécologique 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. Le CERN a son siège à Genève (Meyrin) et ses installations sont situées d'un côté et de l'autre de la frontière franco-suisse. Il a pour mission la recherche fondamentale en physique des particules afin de découvrir les constituants et lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière: les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en



**Figure 1:**

Le complexe des accélérateurs du CERN (voir Glossaire).



collision, les physiciens appréhendent les lois de la nature. Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent le résultat de ces collisions.

En 2012 les accélérateurs et zones expérimentales susceptibles d'avoir un impact radiologique sur l'environnement étaient les suivants (voir Fig.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 Préveessin (Zone Nord) en France. Une fraction de ces protons est injectée dans les deux anneaux de stockage aux sens de rotation opposés du Large Hadron Collider

(LHC). Les particules y atteignent une énergie de 4 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](http://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 de l'accélération, de l'extraction et de la collimation des faisceaux. Les accélérateurs sont blindés et les plus puissants d'entre eux sont situés profondément sous terre, de telle manière à ce que seule une fraction infime des rayonnements traverse ces protections; ce type de rayonnement est nommé rayonnement diffusé. Les tunnels des accélérateurs et les zones expérimentales nécessitent d'être ventilés et une fraction de la radioac-



**Figure 2:** Région frontalière franco-suisse: sites de Meyrin et de Préveessin 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 du CERN; ceux qui concernent le territoire suisse y sont tous représentés, excepté le point de collecte des échantillons de l'Allondon qui est hors-carte.



tivité 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 requière une instrumentation parfaitement ajustée et la moindre dérive, un événement normal et récurrent, engendre des pertes concertées de faisceau. Ces écarts sont immédiatement détectés et, en fonction de leur amplitude, peuvent conduire à un arrêt automatique quasi instantané des machines. Les radionucléides produits sont des émetteurs gamma et beta de relativement courtes demi-vies et de faibles radiotoxicités. 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 prédis par des calculs. Chaque station est équipée d'une chambre d'ionisation dédiée à la mesure en continu des photons et des particules chargées et pénétrantes, comme les muons, ainsi que d'un moniteur de neutrons. En 2012, 41 stations de ce type étaient en opération. Les positions des stations situées en bordure de site CERN et qui concernent le territoire suisse 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 2012, 32 stations étaient en opération; les positions des stations qui concernent le territoire suisse 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 2012). Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vie

courte et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire (points bleus, Fig. 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<sup>1,2</sup>. 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 corrélérer 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 2012

### Opération des accélérateurs en 2012

En 2012, tous les accélérateurs du CERN ont été en opération de février à mi-décembre. Les faisceaux du LHC ont été exploités tout au long de l'année à un peu plus de la moitié de l'énergie nominale, soit 2 x 4 TeV. Des émissions de radionucléides gazeux de demi-vie courtes (se référer au paragraphe «Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère») ont été détectées aux sites LHC PA3 (Crozet, F), PA5 (Cessy, F) et PA7 (Collex-Bossy, CH, et Ferney Voltaire, F). Les quantités impliquées sont toutes 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, F); l'air de cette zone est rejeté aux points 5 et 7. L'impact radiologique du LHC est resté très faible: 5 µSv dus aux rejets atmosphériques au LHC PA7.

### Rayonnement diffusé

La Figure 3 présente la dose ambiante équivalente mesurée par les moniteurs de rayonnements dif-

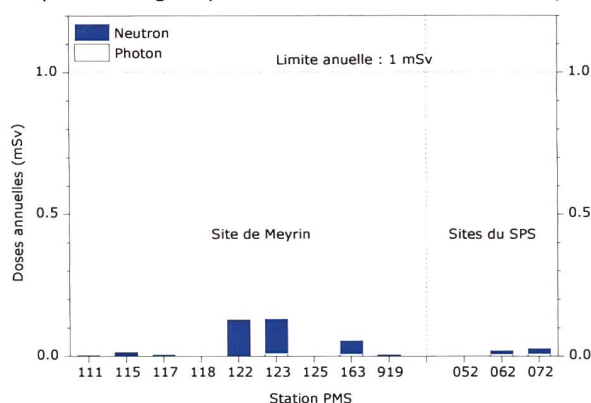
1 Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, HSK-R-41/d (Juli 1997).

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).



fusés qui concernent le territoire suisse. Les moniteurs situés autour des sites du SPS ont uniquement enregistré des fluctuations de l'ordre du bruit de fond naturel. 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 13% de la limite de dose annuelle<sup>3,4</sup>. 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.



**Figure 3:** Doses ambiantes annuelles nettes enregistrées par les moniteurs de rayonnements diffusés (CERN, 2012).

### 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. Les radionucléides se répartissent en quatre catégories : les gaz radioactifs de demi-vie courtes  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{15}\text{O}$ , et  $^{41}\text{Ar}$ ; le  $^7\text{Be}$ ; l'activité beta total (majoritairement  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ) et le tritium ( $^3\text{H}$ ). Les valeurs tritium sont surestimées car elles dérivent d'une méthode d'évaluation très conservatrice. L'impact radiologique du tritium est cependant négligeable (voir plus loin). Les valeurs d'émissions en iode ( $^{123}\text{I}$ ,  $^{124}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{126}\text{I}$ ,  $^{130}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ , et  $^{133}\text{I}$ ) ainsi

qu'en émetteurs alpha de demi-vies courtes provenant de l'installation ISOLDE ne figurent pas dans le Tableau 1: 227 MBq d'iode radioactif, 16 kBq de  $^{212}\text{Bi}$ , 13 kBq de  $^{212}\text{Pb}$  et 593 kBq de  $^{214}\text{Pb}$ . 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 trois catégories: (a) le tritium sous forme aqueuse (HTO), (b) l'activité beta total imputable en grande majorité au  $^{22}\text{Na}$  et (c) les rejets d'émetteurs de positrons de demi-vie courtes ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{15}\text{O}$ ). Le Tableau 2 présente les rejets de 2012, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés. L'eau rejetée depuis le site LHC PA1 dans le Nant d'Avril contenait des faibles concentrations de radionucléides de demi-vie courte. Les activités rejetées ne figurent pas dans le Tableau 2: elles sont de 6.7 GBq. L'activation du circuit d'eau brute du LHC, un phénomène anticipé, en est la principale origine.

### Surveillance des immissions

Le  $^7\text{Be}$  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 latitudes moyennes, la concentration en  $^7\text{Be}$  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  $^7\text{Be}$ , car elles précipitent les aérosols en suspension dans l'air. La figure 4 montre la concentration de  $^7\text{Be}$  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

3 Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).

4 Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2012), Annexe 3.

**Tableau 1:**

Radioactivité du CERN rejetée dans l'air en 2012.

Origine du rejet	Station	Air rejeté	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>14</sup> O, <sup>15</sup> O, <sup>41</sup> Ar	<sup>7</sup> Be aérosol	Bêta aérosol	Tritium
		10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	TBq	MBq	MBq	GBq
Anneau principal PS	PMV174	280	26	940	33	9
PS BOOSTER	PMV175	270	3	280	8	1
TT10 injection PS-SPS	PMV11	290	5	210	9	14
Ventilation SPS, BA5	PMV51	380	2	0.05	0.01	8
HIRADMAT	PMV70	7	0.01	<0.01	<LD	<LD
ISOLDE	PMV170	80	12	7	0.6	11
n-TOF	PMV171	5	7	<LD	0.01	3
TT60 extr. SPS-Ouest*	PMV172	140	<LD	<LD	<LD	<LD
TT70 transfert, PS-SPS	PMV173	60	0.5	0.02	<LD	55
TI2 transfert, SPS-LHC	PMV200	120	<LD	<LD	<LD	<LD
LHC PA1	PMV901	620	<LD	<LD	<LD	<LD
LHC PA1, ATLAS	PMV911-14	620	<LD	<LD	<LD	<LD
LHC PA8, LHC-b	PMV982	360	<LD	<LD	<LD	<LD
LHC PA7, collimateurs	PMV907	670	10	0.09	<LD	<LD

\*) pas de faisceau dans le tunnel

**Tableau 2:**

Radioactivité du CERN rejetée dans l'eau en 2012.

Origine du rejet	Station	Quantité d'eau	Tritium	Bêta/gamma ( <sup>22</sup> Na)	Rejeté dans:
		10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	GBq	MBq	
Site de Prévessin, SPS	PMW21	0.33	12	71	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	PMW101	2.4	4	20	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Nord-est	PMW102	0.18	0.01	0.53	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	PMW103	0.49	0.54	<LD	Le Lion (F)
AD infiltration	PMW104	0.03	0.06	3.5	STEP*
Site SPS BA6 + site LHC PA1	PMW910	2.0	0.7	<LD	Nant d'Avril (CH)
CNGS, rejet par le site du LHC PA8	PMW980	0.05	0.54	0.39	Le Nant (F)

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

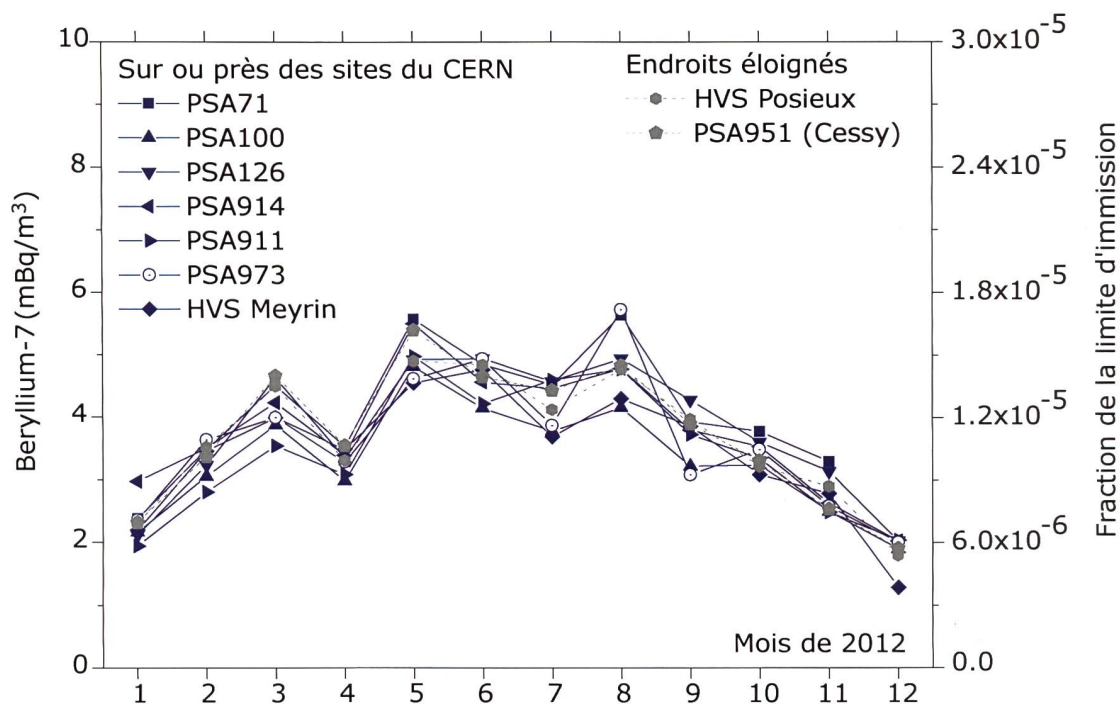
(HVS Posieux/FR). Toutes les courbes suivent la même tendance, prouvant ainsi que la majeure partie de l'activité en <sup>7</sup>Be mesurée est d'origine naturelle. La possible contribution provenant des accélérateurs du CERN n'a en aucun cas excédé 1.7 mBq/m<sup>3</sup>, soit 0.0005% des limites d'immersion suisses<sup>5</sup>. La mesure de l'échantillonneur d'aérosols à haut volume PSA973 situé au LHC-PA7 a été suffisamment sensible pour détecter le <sup>22</sup>Na naturel, aussi produit par rayonnement cosmique. Les quantités mesurées, soit <0.001 mBq/m<sup>3</sup>, 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 <sup>22</sup>Na en évidence.

Concernant l'environnement aquatique, des faibles concentrations de <sup>54</sup>Mn ont pu être détectées dans un échantillon de bryophytes (mousses) et dans deux échantillons de sédiments du Lion (F), prélevés en aval du point de rejet PMW21 (comparer avec le Tableau 2). L'eau provient des zones expérimentales du CERN. L'échantillon de bryophytes contenait 52 ± 5 Bq/kg sec, tandis que les sédiments présentaient des concentrations de respectivement 0.4 ± 0.1 et 0.2 ± 0.1 Bq/kg sec. La concentration maximale mesurée ne représente que 0.5% de la limite d'exemption suisse<sup>5</sup>. La mesure de l'échantillon instantané de l'eau prélevée dans le Nant (F) a

<sup>5</sup> Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2012), Annexe 3.



**Figure 4:**

Activités en  $^7\text{Be}$  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 Posieux: Échantillonneurs OFSP à haut débit, le premier se situant sur le site CERN de Meyrin et le second à Posieux/Fribourg<sup>6</sup>. PSA951: Cessy, France.

révélé une valeur de concentration tritium très légèrement supérieure aux valeurs dites naturelles:  $4.5 \pm 1 \text{ Bq/L}$ , soit 0.04% de la valeur limite d'immission suisse<sup>7</sup>. Les bryophytes sont d'excellents bio accumulateurs de pollution; alors que la mesure de l'eau de rivière est une valeur instantanée, ces végétaux, qui peuvent être assimilés à des collecteurs, permettent d'identifier des radionucléides ayant été présents dans l'eau. Aucun autre radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les autres échantillons d'eau, de bryophytes et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collectés entre fin septembre et 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. Aucun

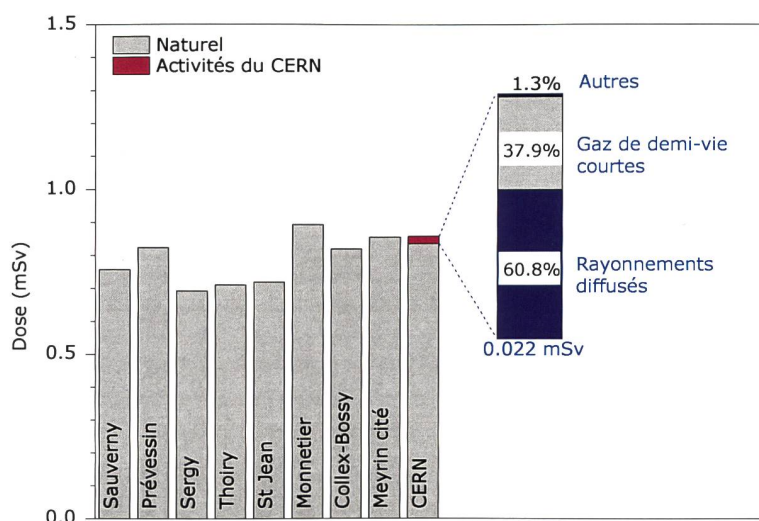
radionucléide provenant des effluents du CERN n'a pu être mesuré dans le Nant d'Avril, dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches. Cette rivière fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève. En 2012, leurs méthodes de détection caractérisées par leur extrême sensibilité ont permis de révéler à neuf reprises du  $^{22}\text{Na}$  dans l'eau de rivière, imputable au CERN. Les concentrations sont restées inférieures à  $0.009 \text{ Bq/L}$ <sup>8</sup>, soit 0.015% de la limite d'immission<sup>6</sup>.

Aucun radionucléide produit au CERN n'a pu être mis en évidence dans aucun des autres échantillons environnementaux analysés; le marquage de l'environnement par des radionucléides produits au CERN est négligeable.

6 S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement : Résultats des mesures 2012 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2013).

7 Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2012), Annexe 3.

8 J.-L. Loizeau, Ph. Arpagaus et K. Loizeau, Rapport No 13 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Octobre 2011 - Novembre 2012, Université de Genève, Genève (2012) p. 8.



**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 0.022 mSv doit être comparée à la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv<sup>10</sup>.

## Impact radiologique

La dose effective, reçue par les membres du groupe de référence pour le site de Meyrin du CERN en 2012, 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<sup>9,10</sup>. La valeur de dose résultante est de 0.022 mSv, qui doit être comparée avec la valeur guide pour les membres du public de 0.3 mSv, comme définie en<sup>11</sup> (<8%). De fait, en 2012 et comme pour les années précédentes, le CERN a entièrement respecté les réglementations relatives à la radioprotection. La dose effective totale de 0.022 mSv a consisté pour 60.8% en rayonnements diffusés et pour 37.9% en rejets de radionucléides gazeux à demi-vie courte. Les autres radionucléides et voies d'exposition ont contribué d'à peine 1.3%. La dose effective résultant du rejet des radionucléides contenus dans les effluents du site LHC PA1 est de 0.0002 mSv.

Les contributeurs majeurs sont surveillés en continu, garantissant ainsi un temps de réaction optimal en cas de dégradation de fonctionnement des installations.

## 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 2012;
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 0.5% des limites applicables. De fait, l'impact radioécologique du CERN a été négligeable;
3. En 2012, >98% 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 0.022 mSv avec la dose équivalente annuelle mesurée en plusieurs endroits éloignés des sites CERN.

9 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).

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

11 Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006).



## Glossaire

<b>AD</b>	Décélérateur d'antiprotons
<b>CLIC</b>	Compact Linear Collider, projet impliquant un collisionneur linéaire
<b>CNGS</b>	CERN neutrinos to Gran Sasso, source de neutrinos pour les expériences souterraines situées au Gran Sasso (IT)
<b>CTF3</b>	CLIC Test Facility, installation de test pour le projet CLIC
<b>HIRAD-MAT</b>	Hi Irradiation to Materials, tests d'irradiations de matériaux
<b>ISOLDE</b>	Isotope Separator On-Line Device – Séparateur de radio-isotopes en ligne
<b>LEIR</b>	Low Energy Ion Ring, stockage des ions lourds avant leur accélération par le PS
<b>LHC</b>	Large Hadron Collider – Grand collisionneur d'hadrons
<b>LINAC2</b>	Accélérateur linéaire pour les protons, injecteur du PSB
<b>LINAC3</b>	Accélérateur linéaire d'ions lourds, injecteur du LEIR
<b>n-TOF</b>	neutron Time-Of-Flight, expérience impliquant une source de neutrons de spallation
<b>PSB</b>	Proton Synchrotron Booster – accélérateur injecteur pour le PS et pour l'ISOLDE
<b>PS</b>	Synchrotron à protons
<b>SPS</b>	Super synchrotron à protons