

**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:** - (2015)

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

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.01.2025

**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 2015  
Résultats 2015



### 8 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

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



# Inhatverzeichnis / Sommaire

<b>8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen</b>	<b>113</b>
Zusammenfassung	113
Emissionen aus den Kernanlagen	
Ergebnisse 2015	113
Emissionen von Kohlenstoff-14 ( <sup>14</sup> C)	125
<b>8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen</b>	<b>128</b>
Zusammenfassung	128
Ergebnisse 2015	128
<b>8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)</b>	<b>129</b>
Zusammenfassung	129
Übersicht	129
Systeminstandhaltung und -ergänzung	131
Systemverfügbarkeit und Störungen	131
Qualitätssicherung	132
Messergebnisse	132
<b>8.4 Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)</b>	<b>134</b>
Zusammenfassung	134
Einleitung	134
Radiochemische Trennmethode (Boden)	135
Staubfangplatten	135
Resultate und Diskussion	136
<b>8.5 Les installations nucléaires et l'environnement</b>	<b>137</b>
Résumé	137
Introduction	137
Méthodologie	138
Mesures dans le milieu aquatique	141
Situation radiologique du site démantelé de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens	142
Conclusions	143
<b>8.6 Environnement du CERN (mesures OFSP)</b>	<b>144</b>
Résumé	144
Programme de surveillance de l'OFSP	144
Mesures de l'exposition ambiante	144
Mesures dans le milieu atmosphérique	145
Mesures dans le milieu terrestre	146
Mesures dans le milieu aquatique	147
Conclusions	148
<b>8.7 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)</b>	<b>149</b>
Résumé	149
Le CERN	149
Programme de surveillance	151
Résultats 2015	151
Conclusions	155

## 8.1 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

**F. Cartier**  
**R. Habegger**  
**A. Leupin**  
Eidg. Nuklearsicherheits-  
inspektorat  
Industriestrasse 19  
5200 Brugg

### Zusammenfassung

*Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2015 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB1 und KKB2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimite. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene, zehnjährige Kinder und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.*

### Emissionen aus den Kernanlagen Ergebnisse 2015

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in der Figur 1a für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Figur 1b enthält eine Aufschlüsselung der Abgaben der Kernkraftwerke nach Monat. 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 2015. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c aufgelistet. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen. Figur 2 zeigt für die vier schweizerischen Kernkraftwerke den Verlauf der in der Umgebung berechneten Dosen für «meistbetroffene Personen» über die letzten 20 Jahre.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitabgabelimite eingehalten. Zur Überprüfung der Messverfahren der Kernanlagen hat das ENSI an rund 190 Proben eigene gamma-spektrometrische Messungen durchgeführt (inkl. Teilnahme an Ringvergleichen zur Sicherstellung der eigenen Messqualität). Dabei wurden Aerosol- und Jodfilter sowie Abwasserproben aus den Anlagen stichprobenweise analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abgabereglemente eingehalten werden.

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

Beim KKM ist die Erhöhung der flüssigen radioaktiven Abgaben während dem Revisionsstillstand durch die etwa alle fünf Jahre anstehende Torusreinigung im Berichtsjahr gegenüber den übrigen Monaten erhöht.

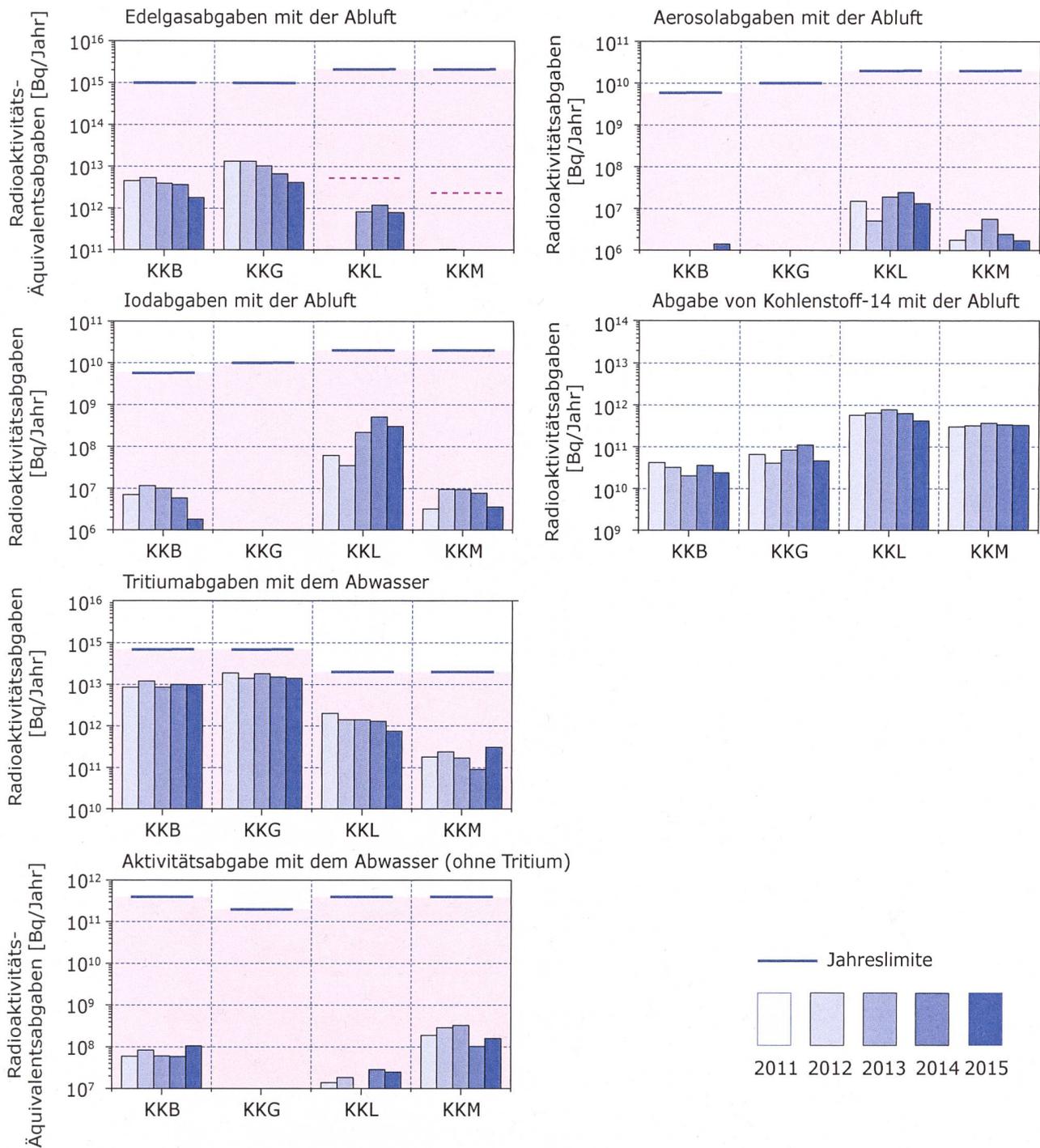
Aufgrund des vermehrten Öffentlichkeitsinteresses werden die Emissionen von Kohlenstoff-14 ( $^{14}\text{C}$ ) am Ende des Kapitels behandelt.

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 rund 0.001 mSv, und beim KKM und KKL etwa 0.004 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2015 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet das ENSI eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von weniger als

0.007 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und vom ENSI unabhängig voneinander durchgeführten Berechnungen zeigen, dass unter ungünstigen Annahmen die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) erfolgten im Berichtsjahr Einlagerungen von 3 Transport- und Lagerbehältern mit hochaktivem Abfall aus Sellafield, von Glaskokillen mit mittelaktivem Abfall aus LaHague sowie von Brennelementen aus dem KKM. In der Konditionieranlage wurden grosse Mengen verschiedensten Materials angeliefert und konditioniert. Bei der Plasmaanlage fand 2015 eine Verbrennungskampagne im Frühling statt. Die für das Jahr 2015 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag unterhalb von 0.001 mSv.



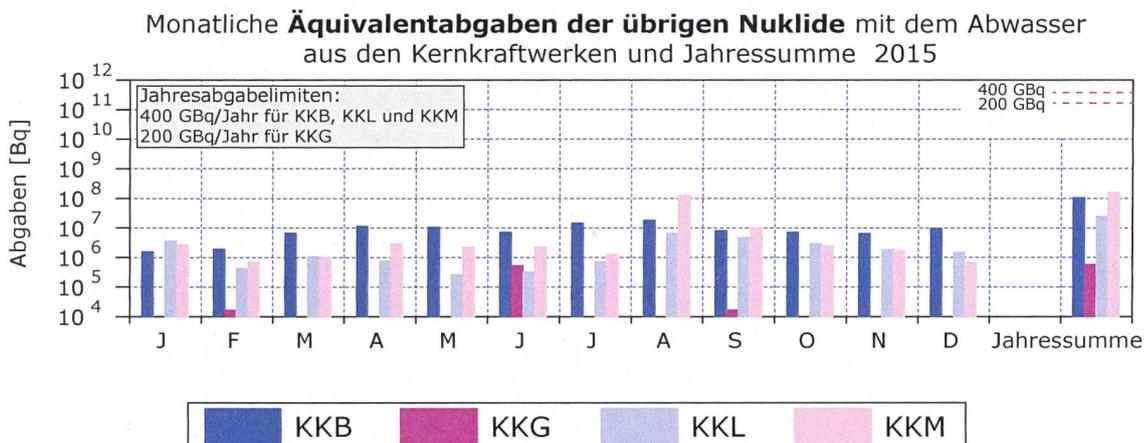
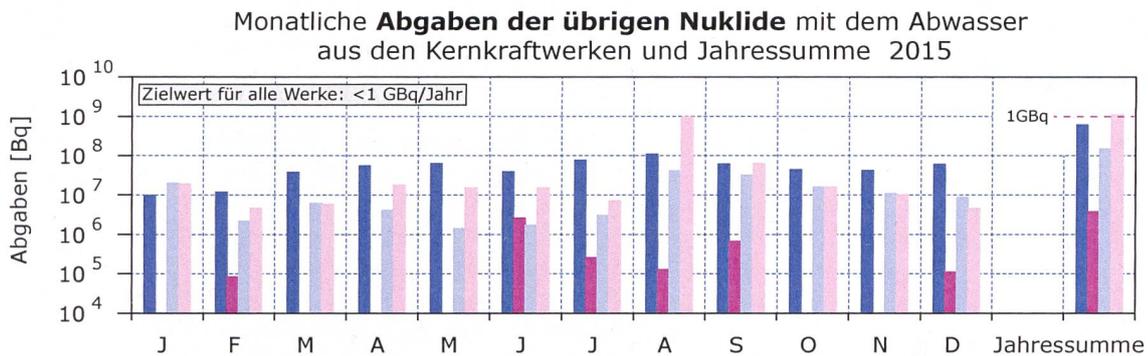
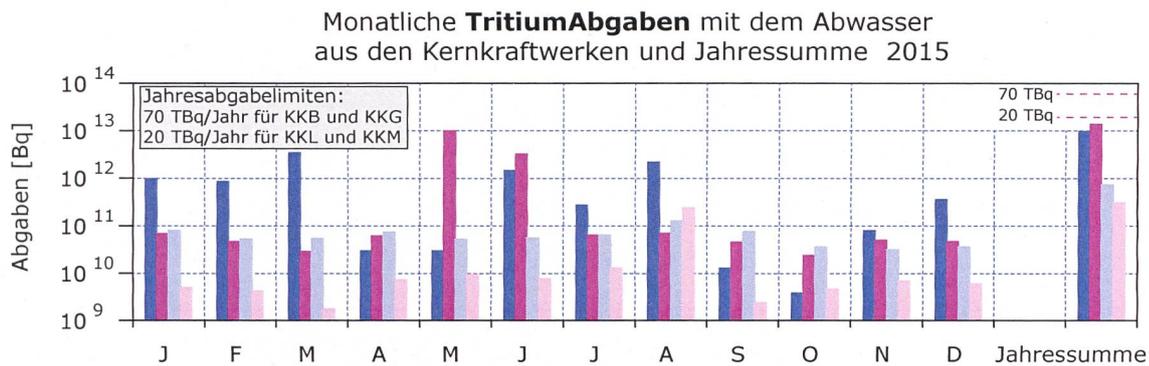
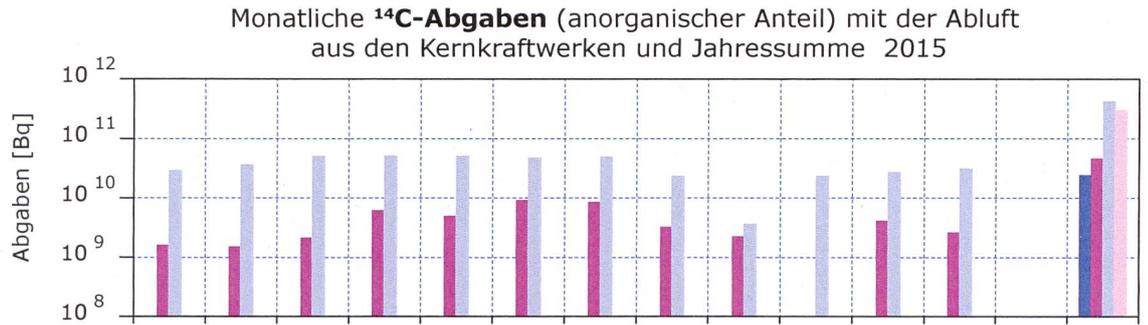
**Figur 1a:** Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und mit dem Abwasser in den letzten fünf Jahren (2011 bis 2015) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten.

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

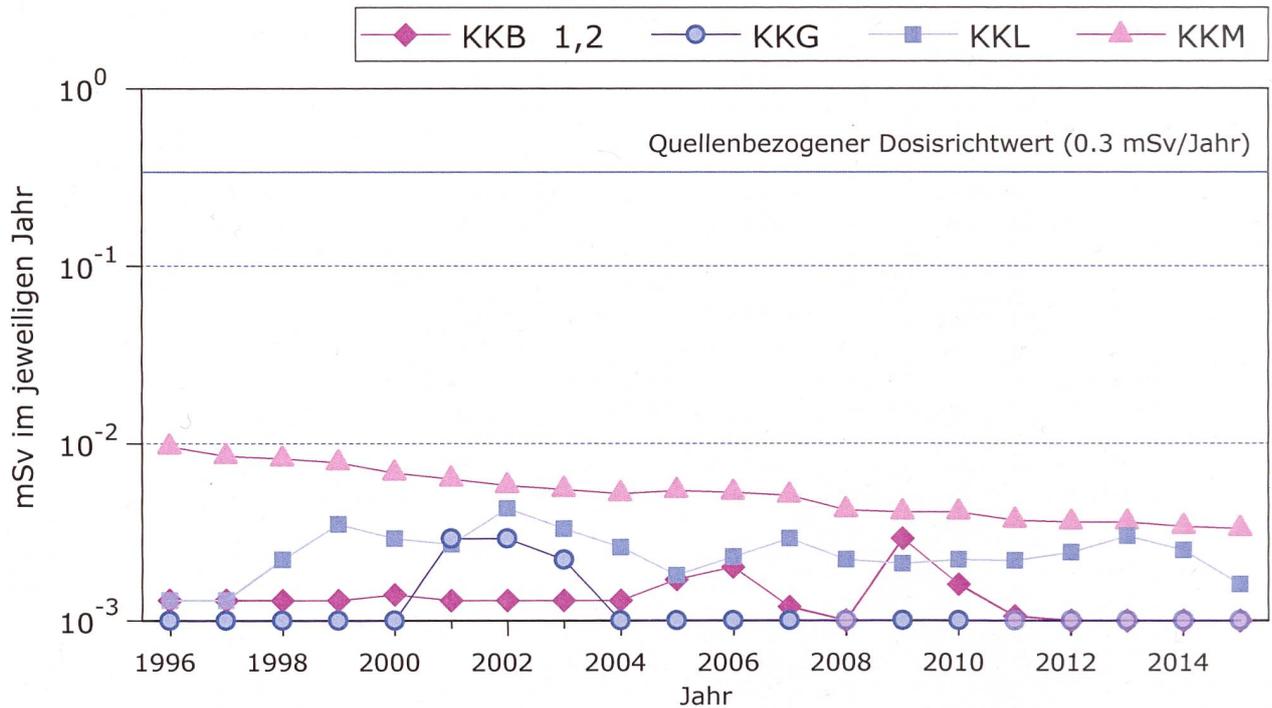


**Figur 1b (Teil 1):** Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2015 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.

8.1 Emissionen aus den Kernanlagen - @BAG 2016



**Figur 1b (Teil 2):** Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre und das Abwasser im Jahr 2015 aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.



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

**abelle 1:**

sammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2015 für die Kernkraftwerke und das Zentrale Nuklidlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung. (Anmerkungen siehe Text)

Kernkraftwerk	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>	Prozent der Limite	mSv/Jahr		
			Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Bq pro Jahr		Erw.	10j Kind	1j Kind
KB1	Abwasser 5'200 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	6.2·10 <sup>8</sup>	-	4·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	9.9·10 <sup>12</sup>	9.9·10 <sup>12</sup>	7·10 <sup>13</sup>	14 %	<0.001	<0.001	<0.001
	KB2 Abluft	Edelgase	5.6·10 <sup>12</sup>	1.8·10 <sup>12</sup>	1·10 <sup>15</sup>	0.2%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.4·10 <sup>6</sup>	-	6·10 <sup>9</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: <sup>131</sup> I	1.0·10 <sup>6</sup>	-	4·10 <sup>9</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	2.4·10 <sup>10</sup>	-	-	-	<0.001	<0.001	0.0012
<b>Dosis total</b>						<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.0012</b>	
KG	Abwasser 7'173 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.3·10 <sup>5</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	<3.7·10 <sup>12</sup>	<4.1·10 <sup>12</sup>	1·10 <sup>15</sup>	<0.5%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.3·10 <sup>5</sup>	-	1·10 <sup>10</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: <sup>131</sup> I	5.6·10 <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>	4.6·10 <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>	
KL	Abwasser 13'326 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.5·10 <sup>8</sup>	-	4·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	7.5·10 <sup>11</sup>	7.5·10 <sup>11</sup>	2·10 <sup>13</sup>	4 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	1.4·10 <sup>12</sup>	7.9·10 <sup>11</sup>	2·10 <sup>15</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.3·10 <sup>7</sup>	-	2·10 <sup>10</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Iod: <sup>131</sup> I	3.0·10 <sup>8</sup>	3.0·10 <sup>8</sup>	2·10 <sup>10</sup>	1.5 %	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	4.2·10 <sup>11</sup>	-	-	-	0.0016	0.0021	0.0035
<b>Dosis total</b>						<b>0.0016</b>	<b>0.0022</b>	<b>0.0038</b>	
KM	Abwasser 4'875 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	1.1·10 <sup>9</sup>	-	4·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	3.1·10 <sup>11</sup>	3.1·10 <sup>11</sup>	2·10 <sup>13</sup>	1.5 %	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	Edelgase	3.0·10 <sup>10</sup>	-	2·10 <sup>15</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Aerosole	1.7·10 <sup>6</sup>	-	2·10 <sup>10</sup>	<0.1%	0.0024	0.0023	0.0022
		Iod: <sup>131</sup> I	3.6·10 <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>	3.3·10 <sup>11</sup>	-	-	-	<0.001	0.0011	0.0018
<b>Dosis total</b>						<b>0.0033</b>	<b>0.0034</b>	<b>0.0041</b>	
ZL	Abwasser 446 m <sup>3</sup>	Nuklidgemisch ohne Tritium	5.0·10 <sup>8</sup>	-	2·10 <sup>11</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	9.0·10 <sup>8</sup>	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001
	Abluft	β-/γ-Aerosole	4.5·10 <sup>3</sup>	-	1·10 <sup>9</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		α-Aerosole	1.0·10 <sup>4</sup>	-	3·10 <sup>7</sup>	-	<0.001	<0.001	<0.001
		Kohlenstoff: <sup>14</sup> C in CO <sub>2</sub>	2.6·10 <sup>8</sup>	-	1·10 <sup>12</sup>	<0.1%	<0.001	<0.001	<0.001
		Tritium	7.9·10 <sup>8</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 2015 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung - (Fussnoten siehe Text).

	PSI Ost				
	Hochka- min	Saphir, Proteus	Forschungs- labor	Betriebs- Gebäude radioaktive Abfälle	Bundes- zwischenlager
<b>Abgaben im Abwasser<sup>1,2</sup> [Bq/a]</b>					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
<b>Abgaben über die Abluft<sup>1,2</sup> [Bq/a]</b>					
Edelgase und andere Gase	-	-	-	-	-
$\beta/\gamma$ -Aerosole, ohne Iod	$1.0 \cdot 10^7$	-	$2.7 \cdot 10^4$	-	$3.6 \cdot 10^4$
$\alpha$ -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$4.1 \cdot 10^6$	-	-	-	-
Tritium als HTO	$3.0 \cdot 10^{11}$	-	-	$3.8 \cdot 10^{10}$	$2.1 \cdot 10^{10}$
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>4</sup></b>	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%

	PSI West			Gesamtanlage des PSI <sup>1,2</sup>		
	Zentrale Fortluft- anlagen	Injektor II	C-Labor	Abwasser 1'201 m <sup>3</sup>	Abluft	Aequivalent- abgaben
<b>Abgaben im Abwasser<sup>1,2</sup> [Bq/a]</b>						
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	$1.7 \cdot 10^8$	-	$3.7 \cdot 10^7$
Tritium	-	-	-	$6.2 \cdot 10^{11}$	-	-
<b>Abgaben über die Abluft<sup>2,4</sup> [Bq/a]</b>						
Edelgase und andere Gase	$1.9 \cdot 10^{14}$	$1.0 \cdot 10^9$	-	-	$1.9 \cdot 10^{14}$	$4.0 \cdot 10^{14}$
$\beta/\gamma$ -Aerosole, ohne Iod	$4.4 \cdot 10^{10}$	$2.6 \cdot 10^6$	$4.3 \cdot 10^3$	-	$4.4 \cdot 10^{10}$	-
$\alpha$ -Aerosole	-	-	-	-	-	-
Iod (Summe aller Isotope)	$1.3 \cdot 10^8$	-	-	-	$1.3 \cdot 10^8$	$3.6 \cdot 10^7$
Tritium als HTO	$7.8 \cdot 10^{11}$	-	-	-	$1.1 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: $^{14}\text{C}$ in $\text{CO}_2$	-	-	-	-	-	-
<b>Jahresdosis<sup>3</sup> [mSv/Jahr] für:</b>						
Erwachsene	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015		<b>&lt; 0.007</b>
Kind 10j	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015		<b>&lt; 0.007</b>
Kleinkinder	0.006	< 0.00015	< 0.00015	< 0.00015		<b>&lt; 0.007</b>
<b>Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert<sup>4</sup></b>	4.0 %	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%		<b>&lt; 5.0%</b>

**Table 3a:**

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2015:

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

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]						
	$\beta/\gamma$ -Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
<sup>3</sup> H		9.9·10 <sup>12</sup>	1.4·10 <sup>13</sup>	7.5·10 <sup>11</sup>	3.1·10 <sup>11</sup>	6.2·10 <sup>11</sup>	9.0·10 <sup>8</sup>
<sup>7</sup> Be						1.8·10 <sup>5</sup>	
<sup>22</sup> Na						2.6·10 <sup>5</sup>	1.3·10 <sup>5</sup>
<sup>24</sup> Na		6.5·10 <sup>6</sup>					
<sup>35</sup> S						1.8·10 <sup>7</sup>	
<sup>46</sup> Sc						5.9·10 <sup>3</sup>	
<sup>47</sup> Ca						9.0·10 <sup>4</sup>	
<sup>47</sup> Sc						4.1·10 <sup>5</sup>	
<sup>51</sup> Cr				5.0·10 <sup>6</sup>	2.0·10 <sup>7</sup>		2.1·10 <sup>5</sup>
<sup>54</sup> Mn		2.5·10 <sup>6</sup>		9.4·10 <sup>6</sup>	1.8·10 <sup>8</sup>	5.6·10 <sup>4</sup>	4.1·10 <sup>5</sup>
<sup>56</sup> Co						4.1·10 <sup>3</sup>	
<sup>57</sup> Co		5.2·10 <sup>4</sup>				1.5·10 <sup>4</sup>	
<sup>58</sup> Co		2.2·10 <sup>7</sup>		3.0·10 <sup>6</sup>	1.1·10 <sup>8</sup>	2.4·10 <sup>3</sup>	
<sup>59</sup> Fe							
<sup>60</sup> Co		7.7·10 <sup>7</sup>	8.4·10 <sup>4</sup>	1.1·10 <sup>8</sup>	7.4·10 <sup>8</sup>	7.6·10 <sup>6</sup>	8.4·10 <sup>6</sup>
<sup>65</sup> Zn		9.6·10 <sup>4</sup>		8.4·10 <sup>6</sup>	5.5·10 <sup>7</sup>		
<sup>88</sup> Y						2.4·10 <sup>3</sup>	
<sup>89</sup> Sr		5.2·10 <sup>5</sup>	1.4·10 <sup>6</sup>		1.3·10 <sup>6</sup>		
<sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y		7.5·10 <sup>5</sup>	9.4·10 <sup>5</sup>		5.1·10 <sup>5</sup>	3.8·10 <sup>7</sup>	
<sup>95</sup> Nb							
<sup>95</sup> Zr							
<sup>99m</sup> Tc		4.0·10 <sup>6</sup>	6.8·10 <sup>4</sup>				
<sup>99</sup> Mo			5.5·10 <sup>5</sup>				
<sup>110m</sup> Ag		3.5·10 <sup>6</sup>			2.4·10 <sup>5</sup>	5.3·10 <sup>4</sup>	
<sup>111</sup> In						5.6·10 <sup>5</sup>	
<sup>122</sup> Sb		1.2·10 <sup>6</sup>					
<sup>124</sup> Sb		9.5·10 <sup>7</sup>		3.5·10 <sup>6</sup>	2.2·10 <sup>6</sup>		2.4·10 <sup>5</sup>
<sup>125</sup> Sb		4.5·10 <sup>7</sup>		1.3·10 <sup>6</sup>			2.4·10 <sup>7</sup>
<sup>123m</sup> Te		2.9·10 <sup>7</sup>	6.8·10 <sup>5</sup>				
<sup>132</sup> Te		2.5·10 <sup>6</sup>	1.1·10 <sup>5</sup>				
<sup>125</sup> I						9.5·10 <sup>4</sup>	
<sup>131</sup> I		5.1·10 <sup>6</sup>		4.1·10 <sup>6</sup>			
<sup>132</sup> I							
<sup>133</sup> I		9.7·10 <sup>5</sup>					
<sup>133</sup> Ba						4.7·10 <sup>3</sup>	
<sup>134</sup> Cs		2.5·10 <sup>6</sup>		2.6·10 <sup>5</sup>		2.5·10 <sup>4</sup>	1.2·10 <sup>7</sup>
<sup>137</sup> Cs		3.2·10 <sup>8</sup>		2.6·10 <sup>6</sup>	2.8·10 <sup>6</sup>	5.9·10 <sup>7</sup>	4.3·10 <sup>8</sup>
<sup>140</sup> La							
<sup>144</sup> Ce		3.3·10 <sup>5</sup>					
<sup>160</sup> Tb						3.7·10 <sup>4</sup>	
<sup>161</sup> Tb						5.3·10 <sup>6</sup>	
<sup>172</sup> Lu						1.3·10 <sup>5</sup>	
<sup>173</sup> Lu						1.5·10 <sup>5</sup>	
<sup>177</sup> Lu						3.9·10 <sup>7</sup>	
<sup>207</sup> Pb						2.1·10 <sup>4</sup>	
$\alpha$ -Strahler	*)		1.5·10 <sup>5</sup>	3.5·10 <sup>5</sup>	1.2·10 <sup>5</sup>		*)
<sup>234/238</sup> U						1.5·10 <sup>5</sup>	
<sup>239/240</sup> Pu		5.6·10 <sup>3</sup>				4.2·10 <sup>4</sup>	
<sup>238</sup> Pu/ <sup>241</sup> Am		2.1·10 <sup>4</sup>				4.2·10 <sup>4</sup>	
<sup>242</sup> Cm		2.7·10 <sup>4</sup>					
<sup>243/244</sup> Cm		5.9·10 <sup>5</sup>					

\*) Angabe umfasst für das KKB und ZZL das 4. Quartal 2014 bis und mit dem 3. Quartal 2015

**Tabelle 3b:**

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Edelgase und Iod 2015:

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

Nuklid β/γ-Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
<b>Gase. Edelgase</b>						
Tritium	2.9·10 <sup>11</sup>	4.8·10 <sup>11</sup>	6.9·10 <sup>11</sup>	3.9·10 <sup>10</sup>	1.1·10 <sup>12</sup>	7.9·10 <sup>8</sup>
<sup>11</sup> C					2.9·10 <sup>13</sup>	
<sup>14</sup> C (CO <sub>2</sub> )	2.4·10 <sup>10</sup>	4.6·10 <sup>10</sup>	4.2·10 <sup>11</sup>	3.3·10 <sup>11</sup>		
<sup>13</sup> N					3.0·10 <sup>13</sup>	
<sup>15</sup> O					1.2·10 <sup>14</sup>	
<sup>18</sup> F					9.3·10 <sup>11</sup>	
<sup>24</sup> Ne					1.5·10 <sup>12</sup>	
<sup>41</sup> Ar			1.7·10 <sup>9</sup>		4.9·10 <sup>12</sup>	
<sup>85</sup> Kr						
<sup>85m</sup> Kr	5.4·10 <sup>10</sup>		2.2·10 <sup>10</sup>			
<sup>87</sup> Kr						
<sup>88</sup> Kr	8.9·10 <sup>10</sup>					
<sup>127</sup> Xe					5.5·10 <sup>7</sup>	
<sup>133</sup> Xe	4.8·10 <sup>12</sup>		3.2·10 <sup>11</sup>			
<sup>135</sup> Xe	6.5·10 <sup>11</sup>		4.5·10 <sup>11</sup>	1.9·10 <sup>9</sup>		
<sup>135m</sup> Xe			5.9·10 <sup>11</sup>			
<sup>138</sup> Xe			3.3·10 <sup>10</sup>			
EG-Aequiv.				2.8·10 <sup>10</sup>		
EG: β-total		< 3.7·10 <sup>12</sup>				
Andere						
<b>Iod</b>						
<sup>123</sup> I					7.9·10 <sup>7</sup>	
<sup>124</sup> I					1.9·10 <sup>6</sup>	
<sup>125</sup> I					4.9·10 <sup>7</sup>	
<sup>131</sup> I	1.0·10 <sup>6</sup>	5.6·10 <sup>5</sup>	3.0·10 <sup>8</sup>	3.6·10 <sup>6</sup>	3.0·10 <sup>5</sup>	
<sup>133</sup> I	4.2·10 <sup>6</sup>			1.0·10 <sup>7</sup>		

**Table 3c:**

Abgaben der Kernanlagen mit der Abluft, Aerosole 2015:

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

Nuklid β/γ-Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
<sup>7</sup> Be						
<sup>24</sup> Na						
<sup>38</sup> S					2.3·10 <sup>9</sup>	
<sup>39</sup> Cl					9.4·10 <sup>10</sup>	
<sup>51</sup> Cr		2.2·10 <sup>4</sup>				
<sup>54</sup> Mn			5.3·10 <sup>4</sup>	1.6·10 <sup>5</sup>		
<sup>57</sup> Co		7.6·10 <sup>3</sup>				
<sup>58</sup> Co				1.5·10 <sup>5</sup>		
<sup>60</sup> Co			2.2·10 <sup>5</sup>	1.1·10 <sup>6</sup>	2.5·10 <sup>6</sup>	2.2·10 <sup>2</sup>
<sup>65</sup> Zn				2.4·10 <sup>5</sup>		
<sup>75</sup> Se					2.7·10 <sup>4</sup>	
<sup>77</sup> Br					1.4·10 <sup>7</sup>	
<sup>80m</sup> Br					1.3·10 <sup>10</sup>	
<sup>82</sup> Br					9.2·10 <sup>8</sup>	
<sup>89</sup> Sr			8.5·10 <sup>5</sup>			
<sup>95</sup> Nb		6.5·10 <sup>3</sup>				
<sup>99m</sup> Tc					1.3·10 <sup>6</sup>	
<sup>103</sup> Ru		2.5·10 <sup>3</sup>				
<sup>106</sup> Ru		1.9·10 <sup>4</sup>				
<sup>110m</sup> Ag		1.8·10 <sup>4</sup>				
<sup>123m</sup> Te						
<sup>125</sup> Sb						
<sup>131</sup> I (Aerosol)			8.4·10 <sup>6</sup>			
<sup>134</sup> Cs						
<sup>137</sup> Cs				7.3·10 <sup>4</sup>		
<sup>140</sup> Ba			2.1·10 <sup>6</sup>			
<sup>140</sup> La			1.7·10 <sup>6</sup>			
<sup>141</sup> Ce		3.3·10 <sup>3</sup>				
<sup>144</sup> Ce		4.8·10 <sup>4</sup>				4.3·10 <sup>3</sup>
<sup>181</sup> Re					1.1·10 <sup>8</sup>	
<sup>182</sup> Re					3.8·10 <sup>8</sup>	
<sup>183</sup> Re					1.8·10 <sup>7</sup>	
<sup>182</sup> Os					2.1·10 <sup>7</sup>	
<sup>183</sup> Os					3.9·10 <sup>8</sup>	
<sup>183m</sup> Os					8.1·10 <sup>8</sup>	
<sup>185</sup> Os					2.7·10 <sup>7</sup>	
<sup>185</sup> W					9.2·10 <sup>8</sup>	
<sup>191</sup> Pt					4.8·10 <sup>6</sup>	
<sup>192</sup> Au					1.1·10 <sup>10</sup>	
<sup>193</sup> Au					1.4·10 <sup>8</sup>	
<sup>194</sup> Au					4.6·10 <sup>6</sup>	
<sup>192</sup> Hg					9.4·10 <sup>8</sup>	
<sup>193m</sup> Hg					3.8·10 <sup>8</sup>	
<sup>194</sup> Hg					4.6·10 <sup>6</sup>	
<sup>195</sup> Hg					2.9·10 <sup>10</sup>	
<sup>195m</sup> Hg					1.3·10 <sup>8</sup>	
<sup>197m</sup> Hg					1.5·10 <sup>8</sup>	
<sup>203</sup> Hg					9.0·10 <sup>6</sup>	
Nicht spezifizerte	1.4·10 <sup>6</sup>					
α-Aerosole	1.7·10 <sup>4</sup>	4.6·10 <sup>4</sup>	6.3·10 <sup>4</sup>	2.7·10 <sup>4</sup>		1.0·10 <sup>4</sup>

### 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. Die Abnahme des dadurch verursachten Dosisbeitrags über die Jahre ist in der Figur 2 deutlich erkennbar. Der Dosisbeitrag der Aerosole, welche im Berichtsjahr abgegeben wurden, ist demgegenüber vernachlässigbar und liegt in der Grössenordnung der anderen schweizerischen Kernkraftwerke.

**Iod:** Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von <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 3 nicht aufgeführt.

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

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

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

## Emissionen von Kohlenstoff-14 ( $^{14}\text{C}$ )

Kohlenstoff-14 ( $^{14}\text{C}$ ) ist ein radioaktives Nuklid, welches mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren unter Aussendung eines  $\beta^-$ -Teilchens in stabilen Stickstoff ( $^{14}\text{N}$ ) zerfällt. Das  $^{14}\text{C}$  wird in der oberen Erdatmosphäre auf natürliche Weise gebildet. Dabei treten hochenergetische Teilchen der kosmischen Strahlung in Wechselwirkung mit den Atomen der oberen Atmosphäre und erzeugen über eine ganze Kaskade von Kernreaktionen unter anderem auch langsame Neutronen. Diese wiederum reagieren mit dem Stickstoff und dem Sauerstoff der Atmosphäre und erzeugen dabei  $^{14}\text{C}$ . Die natürliche  $^{14}\text{C}$ -Produktion und dessen Zerfall sind dabei in der Erdatmosphäre im Gleichgewicht. Zu beachten ist, dass die Dosisrelevanz des  $^{14}\text{C}$  in hohem Mass von der chemischen Form abhängt: liegt das  $^{14}\text{C}$  anorganisch, das heisst in Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) gebundener Form vor, so wird dieser Kohlenstoff über Photosynthese in die Pflanze aufgenommen, gelangt damit in die Nahrungskette und wird über den Verzehr von Nahrungsmitteln (Ingestion) in den menschlichen Körper aufgenommen. In organischen Verbindungen eingebautes  $^{14}\text{C}$ , z.B. in der Form von Methan ( $\text{CH}_4$ ) gelangt nicht in die Nahrungskette, sondern kann nur durch Einatmen (Inhalation) in den menschlichen Körper gelangen. Bei gleicher  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Luft ist aber der Dosisbeitrag durch Inhalation um Grössenordnungen kleiner als derjenige durch Ingestion. Da  $\text{CH}_4$  in der Atmosphäre eine mittlere Lebensdauer von vielen Jahren hat, ist nur anorganisch vorliegendes  $^{14}\text{C}$  in der Form von  $\text{CO}_2$  dosisrelevant.

Neben den natürlich ablaufenden Mechanismen, durch welche  $^{14}\text{C}$  entsteht, gibt es eine Reihe von künstlichen Prozessen, durch welche die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Umgebung lokal oder global erhöht wird. Als wichtigstes Beispiel sind hier die oberirdischen Atomwaffentests in den späten 50er und den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts zu nennen, durch welche sich die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Atmosphäre kurzzeitig nahezu verdoppelte. Seit dem Verbot der oberirdischen Atomwaffentests Mitte der 60er-Jahre nahm die  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätskonzentration durch den Eintrag ins Meer kontinuierlich ab und liegt heute wieder etwa auf dem ursprünglichen Niveau vor 1950 (vgl. dazu Kapitel 7.1).

Auch in Kernkraftwerken wird über dieselben Reaktionen mit Neutronen wie in der Atmosphäre  $^{14}\text{C}$  produziert, d.h. aus Sauerstoff im Oxid-Brennstoff und im Kühlmittel ( $^{17}\text{O}$ , n- $\alpha$ -Reaktion) und aus Stickstoffverunreinigungen im Brennstoff und Kühlmittel ( $^{14}\text{N}$ , n-p-Reaktion). Die Produktionsrate ist dabei primär vom Neutronenfluss im Reaktor und damit von der Reaktorleistung, aber auch von der

Menge des im Neutronenfeld vorhandenen Sauerstoffs und Stickstoffs abhängig. Die Produktion von  $^{14}\text{C}$  ist in einem Siedewasser grösser als die eines Druckwasserreaktors. Dies wird gemäss Studien aus den frühen 1980er Jahren damit in Zusammenhang gebracht, dass der Stickstoffgehalt im Kühlmittel von Siedewasserreaktoren als Folge von Lufteinbrüchen im Kondensator höher ist als in einem Druckwasserreaktor.

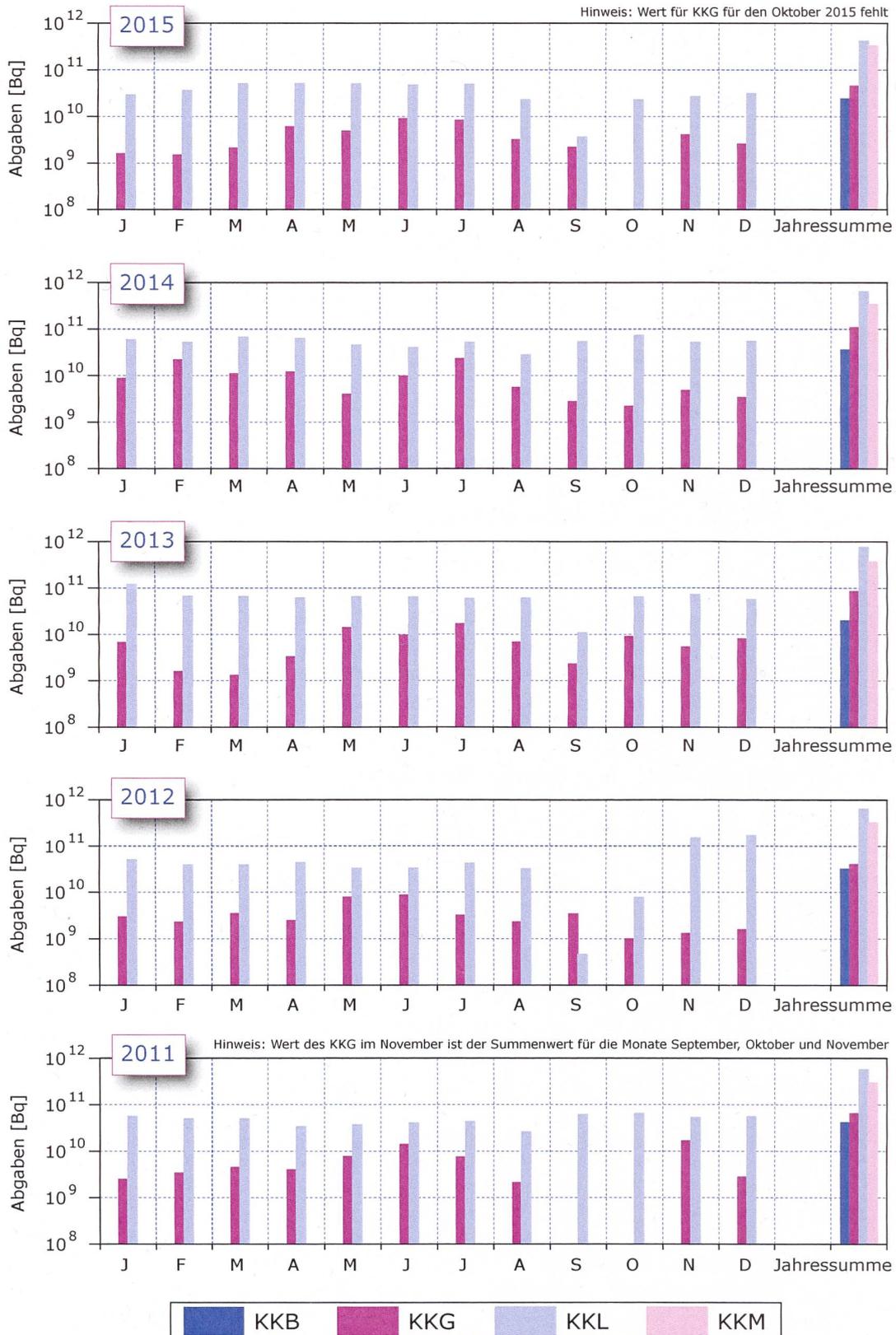
Die jährliche Abgabemenge von  $^{14}\text{CO}_2$  liegt pro Kernkraftwerk unterhalb von  $10^{12}$  Bq. Diese Abgaben verursachen am Hauptaufschlagpunkt lokal Erhöhungen der  $^{14}\text{C}$ -Konzentrationen in der Luft und in den dort wachsenden Pflanzen von bis zu 20% des natürlichen Untergrundwertes. Auf Grund der unterschiedlichen chemischen Verhältnisse im Kühlmittel wird das  $^{14}\text{C}$  gemäss Literaturangaben und Messungen in Siedewasseranlagen fast zu 100% in der Form von  $\text{CO}_2$  an die Umgebung freigesetzt, während in Druckwasseranlagen erfahrungsgemäss etwa 20-40% der Emissionen in der Form von  $\text{CO}_2$  und der Rest in der Form von Methan freigesetzt werden.

Die Figuren 1a und 3 zeigen in den relevanten Teilfiguren den Verlauf der dosisrelevanten, anorganischen  $^{14}\text{C}$ -Abgaben aus den Kernkraftwerken über die letzten 5 Jahre. Die jährlichen Schwankungen der Abgaben liegen relativ zum Mittelwert der jeweiligen Anlage in der Grössenordnung von Faktor 2 bis 3 nach oben und unten. Innerhalb der Jahre schwanken die monatlich gemessenen anorganischen  $^{14}\text{C}$ -Abgaben etwa um Faktor 5 um den Jahresmittelwert (Figur 3). Bei Druckwasserreaktoren sind die Abgaben während der Revision in der Regel etwas höher als im Normalbetrieb (Öffnen der Systeme, Temperaturwechsel während des An- und Abfahrens). Bei Siedewasserreaktoren sind sie in der Revision selbst deutlich tiefer, danach aber signifikant erhöht, solange der im Kühlmittel gelöste oder eingelagerte Stickstoff noch nicht ausgegast ist.

Vor der Inbetriebnahme des Kernkraftwerks Leibstadt wurde Anfang der 80er Jahre ausführlich diskutiert, ob eine Limitierung des  $^{14}\text{C}$  und gegebenenfalls Rückhaltesysteme in den Kernkraftwerken erforderlich sind. Aufgrund der Tatsache, dass die möglichen  $^{14}\text{C}$ -Abgaben nach oben durch physikalische Randbedingungen (insbesondere die Reaktorleistung) begrenzt sind und die zu erwartende Dosis deutlich unter  $10 \mu\text{Sv}$  pro Jahr liegt, kann auch heute davon abgesehen werden.

Anders sieht die Situation in der Plasmaverbrennungsanlage des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen (ZZL) aus, in der unter anderem auch

Monatliche **<sup>14</sup>C-Abgaben (anorganischer Anteil)**  
mit der Abluft aus den Kernkraftwerken und Jahressumme 2011 - 2015



**Figur 3:** Abgaben von anorganischem <sup>14</sup>C der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (für KKG und KKL aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten).

$^{14}\text{C}$ -haltige Abfälle verarbeitet werden. Hier sind die Abgaben nicht durch physikalische Randbedingungen begrenzt, sondern von der Anzahl und dem Inhalt der verarbeiteten Abfälle abhängig. Aus diesem Grund sind beim ZZL für die  $^{14}\text{C}$ -Abgaben (und für Tritium) formelle Abgabelimiten festgelegt und zusätzlich wurde bestimmt, dass Verbrennungskampagnen für  $^{14}\text{C}$ -haltige Abfälle vornehmlich ausserhalb der Vegetationsperioden im Winter zu erfolgen haben.

Das ENSI berücksichtigt bei den Dosisberechnungen (siehe Fig. 2) seit mehr als 20 Jahren die formell nicht limitierten  $^{14}\text{C}$ -Abgaben mit, da diese seit einigen Jahren aufgrund der geringen übrigen Abgaben die Dosis dominieren. 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 dreissig 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. Im Jahr 2015 war das KKB 1 ab dem 13.3 für den Rest des Jahres abgestellt, im Block 2 wurde zwischen dem 14.8 bis zum 23.12 ein langer Revisionsstillstand durchgeführt. Die  $^{14}\text{C}$ -Abgaben des KKB bewegen sich trotzdem etwa in der Grössenordnung der Vorjahre (Fig. 3), was darauf hindeutet, dass der Abgabezeitpunkt von  $^{14}\text{C}$  weniger von dessen tatsächlichem Produktionszeitpunkt, sondern eher vom Betriebszustand der Anlage (z.B. Stillstand) und den dadurch unterschiedlichen Rückhaltebedingungen abhängt.

Alle Schweizer Kernkraftwerke haben auch 2015 die  $^{14}\text{C}$ - und die  $^3\text{H}$ -Aktivität in der Abluft gemessen. Der Dosisbeitrag von  $^{14}\text{C}$  wurde aus den Messwerten ermittelt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die  $^{14}\text{C}$ -Abgaben aus den schweizerischen Kernkraftwerken zwar im Normalbetrieb der Kernkraftwerke über die Ingestion von Nahrungsmitteln den grössten Beitrag zur Dosis in der Umgebung der Anlagen liefern. Dieser Beitrag liegt aber bei einigen wenigen Prozent des quellenbezogenen Dosisrichtwertes und ist somit radiologisch nicht relevant.

## 8.2

# Ortsdosis und Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen

**F. Cartier**  
**A. Leupin**  
 Eidg. Nuklearsicherheits-  
 inspektorat  
 Industriestrasse 19  
 5200 Brugg

### Zusammenfassung

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

### Ergebnisse 2015

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

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise vierteljährlich vom ENSI durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen etwa  $0.08 \mu\text{Sv/h}$  (natürlicher Untergrund) und  $0.28 \mu\text{Sv/h}$  ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf dem maximalen Momentanwert am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca.  $1.8 \text{ mSv}$  (ohne natürlichen Untergrund) resultieren. Die vom KKM ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben für das Berichtsjahr nach Subtraktion des natürlichen Untergrundes von ca.  $0.7 \text{ mSv}$  eine Dosiserhöhung von etwa  $0.7 \text{ mSv}$ .

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben des ENSI während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen  $0.06 \mu\text{Sv/h}$  (natürlicher Untergrund) und  $0.16 \mu\text{Sv/h}$  ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca.  $0.9 \text{ mSv}$  pro Jahr. Die höchste, mit den TLD am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Abzug des natürlichen Untergrundes von  $0.6 \text{ mSv}$ ) beträgt  $0.7 \text{ mSv}$ .

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  $0.4 \text{ mSv}$  ohne natürlichen Untergrund. Im Jahr 2013 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des PSI ermittelte Wert ca.  $0.32 \text{ mSv}$  (ohne natürlichen Untergrund von ca.  $0.6 \text{ mSv}$ ).

Beim KKB und KKG wurde am Zaun weder mittels TLD resp. EDIS noch bei den vierteljährlichen Stichproben des ENSI eine signifikante Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt. Bei beiden Blöcken des KKB wurden im Berichtsjahr der Deckel des Reaktordruckbehälters ausgetauscht. Die alten Deckel des Reaktordruckbehälters wurden dabei durch eine zusätzliche Öffnung im Containment aus dem Reaktorgebäude ausgeschleust und ins Zwischenlager des KKB verbracht. Das ENSI hat diese Arbeiten jeweils mit einer speziellen Messkampagne zur Überwachung der Ortsdosisleistung in der Umgebung der Anlage überwacht; dabei konnten ausserhalb des Betriebsareals keine signifikanten Erhöhungen der Ortsdosisleistung festgestellt werden.

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

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

## 8.3

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

**F. Cartier**  
**B. Bucher**  
**R. Habegger**  
 Eidg. Nuklearsicherheits-  
 inspektorat  
 Industriestrasse 19  
 5200 Brugg

### Zusammenfassung

Das MADUK-System umfasst ein **Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke und Einrichtungen zur Übernahme von Anlageparametern (ANPA) und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken**. Dieses 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 Dosisleistungswerten 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.

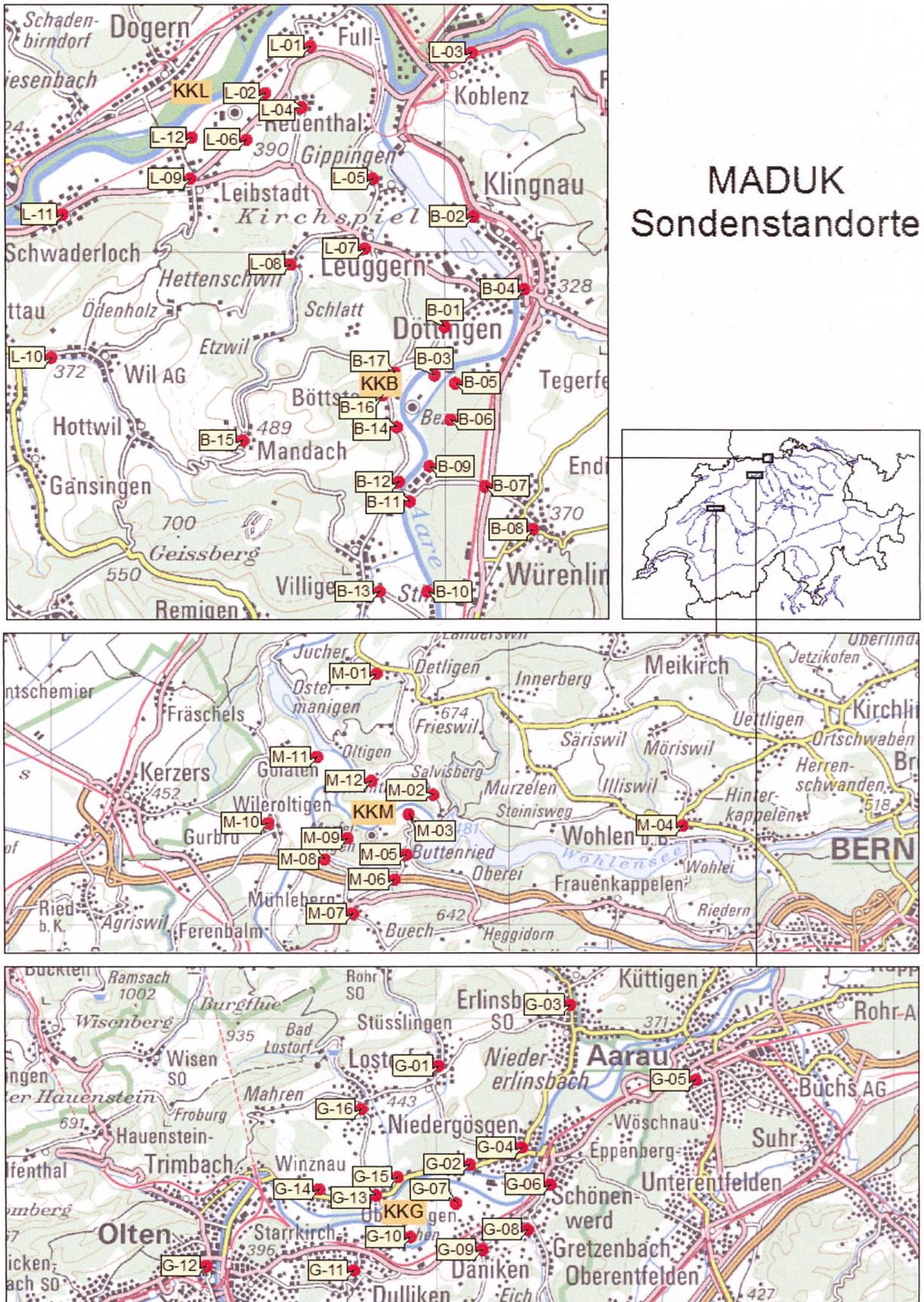
Die Messwerte im Jahr 2015 lagen im üblichen Rahmen wie in früheren Jahren. Alle registrierten Erhöhungen waren auf Washout-Effekte natürlicher Radionuklide zurückzuführen. Es wurden keine Dosisleistungserhöhungen festgestellt, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückgeführt werden konnten.

### Übersicht

Das MADUK-Netz zur automatischen 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 66 Messstationen zählen kann. Die Geiger-Müller-Zählrohre in den MAKUK-Sonden ermitteln die Gamma-Dosisleistung im Messbereich von 10 nSv/h (Niederdosiszählrohre) bis 10 Sv/h (Hochdosiszählrohr). Die MADUK-Zentrale des ENSI verarbeitet und archiviert die Daten, sorgt im Bedarfsfall für eine sofortige Alarmierung der ENSI-Notfallorganisation und sichert die Daten langfristig. Des Weiteren sorgen verschiedene Subsysteme für den Datenaustausch

mit externen und internen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie die Systeme ADAM und JRODOS/LASAT im ENSI. Die Abbildung 1 zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.

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



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

8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke - @BAG 2016

## Systeminstandhaltung und -ergänzung

Auf die Gesamtnotfallübung im Herbst 2015 hin wurde die Übernahme der Ausbreitungsdaten aus dem neuen Ausbreitungssystem JRODOS/LASAT implementiert und operationalisiert. Die JRODOS/LASAT-Daten ersetzen die bis dahin verwendeten APDPIC-Daten und dienen zur Abklärung und Plausibilisierung von erhöhten Dosisleistungsmesswerten.

Im Dezember 2015 wurde eine neue Web-Applikation lanciert, mit der alle beim ENSI archivierten Messdaten des MADUK-Messnetzes seit 1994 online abgerufen werden können. Die Zehnminuten-, Stunden- und Tagesmittelwerte können entweder als Verlaufskurven dargestellt oder als csv-File heruntergeladen werden ([www.ensi.ch/de/themen/messwerte-um-schweizer-kkw](http://www.ensi.ch/de/themen/messwerte-um-schweizer-kkw)).

Aufgrund von gehäuften Defekten an Messsonden reichte das vorhandene Ersatzmaterial nicht mehr aus, die defekten Sonden zeitgerecht zu ersetzen. Deshalb wurden drei zusätzliche Messsonden beschafft.

## 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 hohe Verfügbarkeit. Im Berichtsjahr führten vor allem geplante Unterhaltsarbeiten zu längeren Unterbrüchen. Bei KKB1 (21. März bis 27. Mai) und KKB2 (24. August bis 28. Oktober) wurden wie vorgesehen während der langen Stillstände die Anlageninformationssysteme erneuert und die Schnittstelle zum ENSI angepasst. Zudem kam es aufgrund von weiteren Unterhaltsarbeiten bei KKB1 und KB2 insgesamt zu Unterbrüchen von 71.1 Stunden und bei KKG von 13.8 Stunden. Nach Zuschaltungstests von Simulatordaten führten Softwareprobleme bei Erfassungsrechnern des ENSI zu Unterbrüchen von zweimal 3.7 Stunden bei KKG und 19.8 Stunden bei KKL. Der Ausfall eines Servers bei KKM führte zu einem Unterbruch von 22.8 Stunden.

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Störungen an den MADUK-Messstationen mit Störungsdauer, Dauer des permanenten Datenverlustes und Ursache der Störung.

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

Station	Störungsdauer [h]	Permanenter Datenverlust [h]	Ursache
B-01	29.5	29.5	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
B-01	92.8	92.8	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
B-01	146.0	146.0	Korrupte lokale Datenbank des Datenloggers
B-04	805.4	805.4	Defekte Messsonde (fehlendes Ersatzmaterial)
B-05	66.0	66.0	Umbauarbeiten am Stationsstandort
B-05	1.0	1.0	Batteriewechsel
B-09	6.0	6.0	Defekte Messsonde
B-12	11.7	11.7	Defekte Messsonde
B-15	64.5	64.5	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
B-15	1361.5	1361.5	Defekte Messsonde (fehlendes Ersatzmaterial)
B-16	30.0	30.0	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
G-05	1.8	1.8	Defekte Messsonde
L-01	12.5	12.5	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
L-03	12.6	12.6	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
L-04	42.0	42.0	Defekte Messsonde
L-06	34.4	34.4	Blockierter Datenlogger
L-07	23.3	23.3	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
L-12	12.6	12.6	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger
M-07	33.3	33.3	Kommunikationsstörung, blockierter Datenlogger

Die Stationselektronik lief auch im 2015 grösstenteils zuverlässig. Es wurden jedoch vermehrt blockierte Datenlogger nach kurzen Unterbrüchen in der Kommunikation festgestellt. Das Fehlerbild liess sich jedoch in der Teststation nicht nachproduzieren. In der zweiten Jahreshälfte waren in kurzer Zeit mehrere Defekte an Messsonden zu verzeichnen, die teilweise durch Dritte verursacht wurden. Für zwei Standorte war in der Folge kein Reservematerial verfügbar. Zudem verzögerten sich die Reparaturen und Ersteinrichtungen der Messsonden, sodass bei den Stationen B-04 und B-15 sehr lange Ausfälle zu verzeichnen waren. Da dies bereits 2014 einmal der Fall war, wurden Ende 2015 zusätzlich drei Messsonden als Redundanz beschafft.

2015 waren überdurchschnittlich viele Kommunikationsunterbrüche zu den Messstationen zu verzeichnen, deren Ursachen nicht immer festgestellt werden konnten. Der längste Kommunikationsunterbruch von 587 Stunden war auf Umbauarbeiten bei der Station B-01 nach Besitzerwechsel des Standortes zurückzuführen. Nach erneuten Kommunikationsproblemen bei der Station L-05 wurde Mitte Juli ein Technologiewechsel vorgenommen. Seither läuft die Kommunikation zur Station stabil. Bei der Station B-10 führten defekte Router zu Unterbrüchen von 111 und 90 Stunden. Schliesslich wurde nach weiteren gehäuften Unterbrüchen die Leitung ersetzt. Weitere defekte Router mussten bei den Stationen B-01 und B-15 ersetzt werden. Ein Leitungswechsel erfolgte bei der Station B-16 (75 Stunden Unterbruch). Bei der Station L-10 verursachte ein defekter Baustein in der Fernmeldezentrale einen Unterbruch von 154 Stunden. Bei allen Kommunikationsstörungen konnten die Daten nachträglich lückenlos archiviert werden.

Im Berichtsjahr lag die gemäss Managementhandbuch des ENSI bestimmte Systemverfügbarkeit bei 98.9% (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Die Verfügbarkeit der Dosisleistungsdaten aller MADUK-Stationen im Archiv betrug 99.85%.

### Qualitätssicherung

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

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 Messverhalten der Sonden wird zwischen den Eichungen mit halbjährlichen Funktionstests geprüft. Bei den Genauigkeitstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate der Niederdosis- und Hochdosis-Zählrohre überprüft. Mit einer <sup>137</sup>Cs-Quelle werden bei jeder Sonde während ca. 40 Minuten erhöhte Werte 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 2015 wurden zwei Funktionsprüfungen durchgeführt. Dabei erfüllten alle Sonden die Prüfkriterien.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden an den MADUK-Sondenstandorten Messungen mittels in-situ-Gammaskpektrometrie durchgeführt. Bei diesen in-situ-Messungen wird der Gehalt an radioaktiven Nukliden im Boden bestimmt, daraus die Dosisleistung bestimmt und mit den Messwerten der Vorjahre verglichen. 2015 wurden Messungen bei den Sonden der Messringe Gösigen und Leibstadt durchgeführt. Die Messwerte lagen an allen Messorten im Bereich der früheren Jahre. Es wurden keine Untersuchungsschwellen verletzt.

### Messergebnisse

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

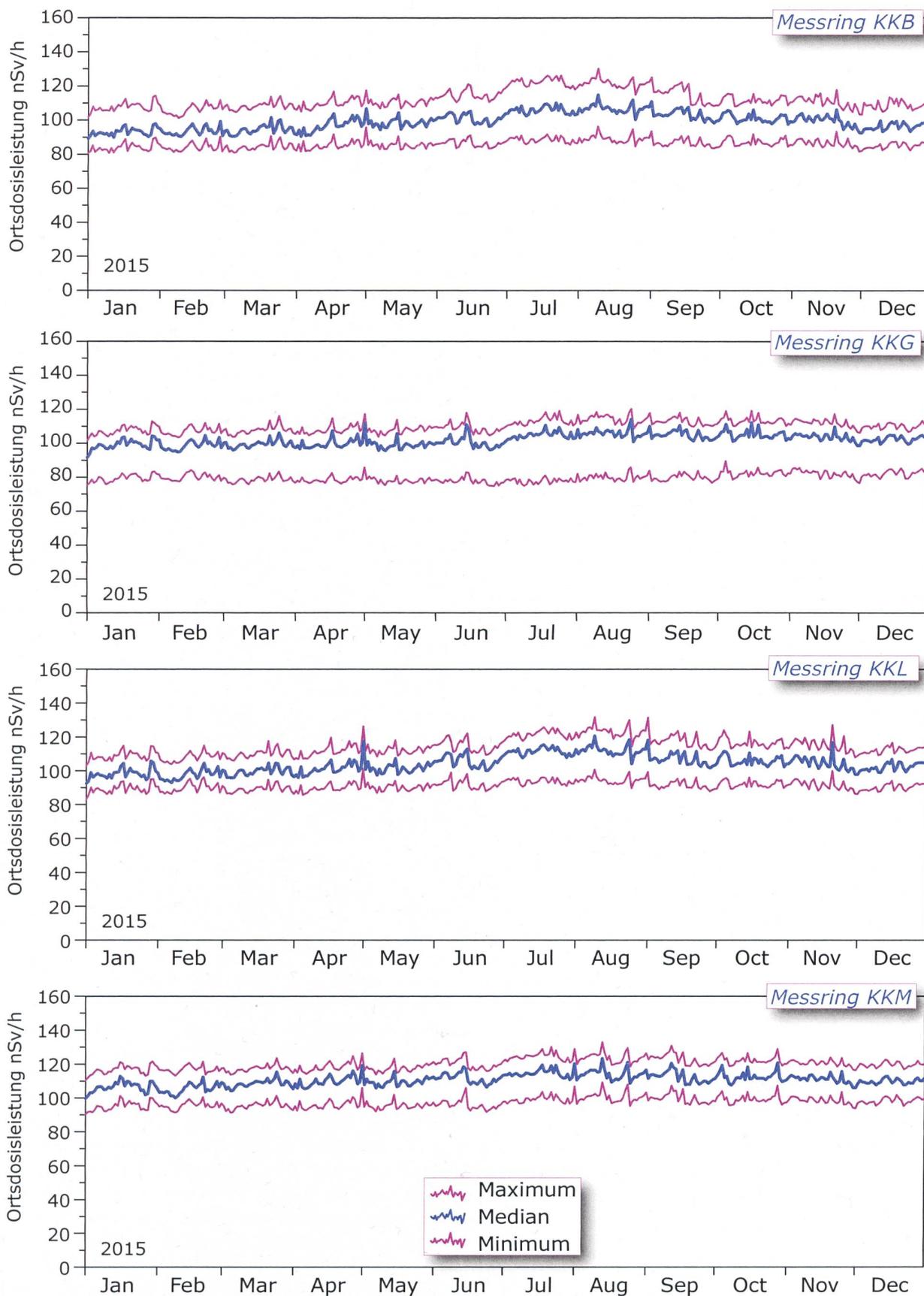
Die jährliche Überprüfungskampagne der NADAM Sonden an den Standorten, an denen auch eine MADUK-Station in Betrieb ist, führte 2015 bei keiner MADUK-Sonde zu wesentlichen Erhöhungen der Messwerte.

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

**Tabelle 2:**  
Auflistung der Nettodosisleistungsschwellwertüberschreitungen im Jahr 2015.

Datum	Station	Dauer [h]	Max. NDL [nSv/h]	Max. ODL [nSv/h]
23.1.2015 01:00	L-02	1.2	100	202
18.8.2015 22:30	B-13	0.7	76	217

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



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

## 8.4 Überwachung des zentralen Zwischenlagers (ZWILAG)

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

### Zusammenfassung

Seit 1997 führt das PSI im Rahmen der Immissionsüberwachung Radionuklidmessungen an Waldbodenproben und Staubfangplatten aus der Umgebung des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (ZWILAG Würenlingen) durch. Das Vaseline auf den Staubfangplatten wird  $\gamma$ -spektrometrisch ausgewertet, wobei anthropogene Radionuklide wie  $^{241}\text{Am}$  und  $^{137}\text{Cs}$  sowie natürliche Radionuklide wie  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  gemessen werden. Bei den Bodenproben folgt nach der  $\gamma$ -spektrometrischen Messung eine radiochemische Trennung zur Bestimmung von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlern ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ). 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. 20-60 Bq/kg (2015). Diese Abnahmen sind mit dem radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von  $^{137}\text{Cs}$  beträgt 30.17 Jahre) und mit einer begrenzten Aufenthaltszeit in der oberen Bodenschicht zu erklären. Die Abnahmen für die anthropogenen Radioisotope  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{239+240}\text{Pu}$  sind ähnlich signifikant, zumal diese Radionuklide schon sehr viel früher (Beginn der 60iger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts) als Fallout der A-Bombentest in die Bodenschichten eingetragen wurden. So sanken die Aktivitätskonzentrationen für  $^{90}\text{Sr}$  von 6-10 Bq/kg (1997) auf 1-3 Bq/kg und diejenigen für  $^{239+240}\text{Pu}$  von 0.4-0.9 Bq/kg (1997) auf 0.1-0.7 Bq/kg im Jahr 2015. Die konstanten Isotopenverhältnisse von  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  (ca. 0.03) und  $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$  (ca. 0.4) zeigen deutlich, dass die gemessenen Werte für die Aktiniden den oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests vor ca. 60 Jahren zuzuschreiben sind. In den Bodenproben wurden neben den anthropogenen Radionukliden auch typische Aktivitätskonzentrationen der U- und Th-Zerfallsreihen von 20-40 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 200 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 aus der Anlage feststellen zu können, wurden vor der Inbetriebnahme im Rahmen des Projektes Beweissicherung umfangreiche Radionuklid-Messungen an Bodenproben in der unmittelbaren Umgebung des Areals durchgeführt. (Details in [1]). Diese Analysen dienen der Erfassung der Konzentrationen kosmogener (z.B.  $^7\text{Be}$ ), terrestrischer ( $^{40}\text{K}$  sowie Radionuklide

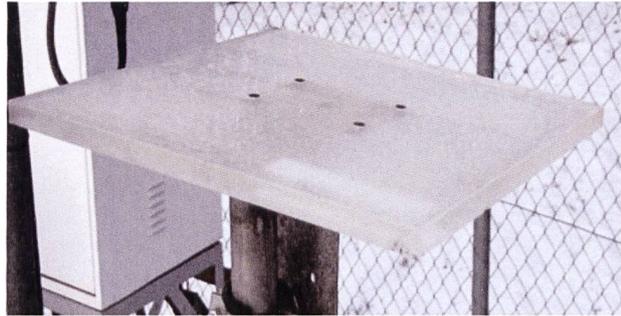
aus den U- und Th-Zerfallsreihen) und insbesondere anthropogener Radioisotope ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ) resultierend aus Aerosol-Fallout infolge von Kernwaffentests und dem Chernobyl-Ereignis. 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 des ZWILAG angebracht. Diese Platten werden monatlich ausgewechselt und die Konzentrationen Photonemittierender Radioisotope  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  bestimmt.

## 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 Nass- und Trockenveraschung wird die Probe in 8 M  $\text{HNO}_3$  unter Kochen während 1 Stunde ausgelaugt, so dass die oberflächlich adsorbierten Fallout-Produkte in Lösung gehen. Durch die Zugabe von  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Oxidation) beim Auslaugen, liegt das Plutonium vorwiegend als  $\text{Pu}^{4+}$  vor. Die Lösung, welche die Fraktionen von Pu, Am und Cm, aber auch U und Th enthält, wird sodann von der festen Phase über Filtration getrennt.

Diese Leach-Lösung wird dann direkt auf eine Anionenaustauscher-Kolonnen (Bio-Rad AG 1-X2, 100-200 mesh) gegeben und durch Zugabe von HCl und  $\text{HNO}_3$ -Waschlösungen werden potentiell bei der  $\alpha$ -Spektrometrie interferierende Radionuklide abgetrennt, 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 zusammengesteckte Kolonnen geführt, einer U/TEVATM-Kolonnen zur Retention von U und Th und einer DGATM-Kolonnen, die Am und Cm absorbiert. Die Elution von Am/Cm erfolgt mit einer schwach-salzsäuren  $\text{NaNO}_2$  Lösung. Da Am in sehr geringen Konzentration vorliegt, ist ein weiterer Purifikations-schritt, die Trennung von den Lanthanoiden, mit einer TEVA-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. Nach der Elektrodeposition werden die Messpräparate über 3 Tage mit hochauflösender  $\alpha$ -Spektrometrie gemessen (alle Details in [1]).

Das Radionuklid  $^{90}\text{Sr}$  (reiner  $\beta$ -Strahler) wird nach dem Leaching und einer Vorkonzentration via Oxalat-Fällung auf einer Sr-SpecTM-Kolonnen in 3 M  $\text{HNO}_3$ -Medium fixiert und mit verdünnter Salpetersäure eluiert. Das Eluat wird mit der Szintillationsflüssigkeit Ultima GoldTM LLT vermischt und anschliessend im Flüssigkeitszintillationszähler gemessen.



**Figur 1:**  
Staubfangplatte am Zaun des ZWILAG-Areals.

## 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 ausgetauscht. 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.  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{241}\text{Am}$ .

## Niederschlag

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

## Resultate und Diskussion

Die Resultate der Radionuklid-Messungen in Bodenproben sind in Tabelle 1 für die anthropogenen Radioisotope ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) und 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 das Spaltprodukt  $^{90}\text{Sr}$  etwas höher sind (1-3 Bq/kg). Signifikant darüber liegen die Resultate für  $^{137}\text{Cs}$  (10-60 Bq/kg). Der Grund hierfür ist der Beitrag von Fallout-Caesium aus dem Chernobyl-Reaktorunfall. Über die Isotopenverhältnisse von  $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$  (im Mittel 0.4) und  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  ( $0.03 \pm 0.01$ ) kann gefolgert werden, dass der Beitrag der anthropogenen Aktiniden ausschliesslich aus den atmosphärischen Kernwaffentests vor ca. 50 Jahren stammt [1,2]. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Aktivitätskonzentrationen der Fallout-Radioisotope der letzten Jahre. Ebenfalls eingetragen sind die Werte für  $^{226}\text{Ra}$  (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 und im säkularen Gleichgewicht mit ihren langlebigen Mutternukliden stehen. Wenn man die Aktivitätskonzentrationen über die spezifischen Aktivitäten in Massenkonzentrationen umrechnet, ergeben sich für  $^{238}\text{U}$  2-3 ppm und für  $^{232}\text{Th}$  5-9 ppm, d.h. typische Werte für Böden und Gesteine der Erdkruste in der Schweiz.

**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  $^{131}\text{I}$ ) und natürlich vorkommende terrestrische Isotope ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) im Verlauf der letzten Jahre (2012-2015) in Bodenproben Umgebung ZWILAG. Alle Werte in Bq/kg Trockengewicht.

Isotop	2012	2013	2014	2015
$^{90}\text{Sr}$	2 - 4	1 - 3	1 - 3	1 - 3
$^{131}\text{I}$	< 1	< 1	< 1	< 1
$^{134}\text{Cs}$ (1)	< 1	< 1	< 1	< 1
$^{137}\text{Cs}$	10 - 80	20 - 60	20 - 60	10 - 60
$^{238}\text{Pu}$	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03
$^{239+240}\text{Pu}$	0.1 - 0.7	0.2 - 0.7	0.1 - 0.7	0.1 - 0.7
$^{241}\text{Am}$	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
$^{226}\text{Ra}$	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30
$^{228}\text{Ra}$	20 - 40	20 - 40	20 - 40	20 - 40

(1) Die Halbwertszeit von  $^{134}\text{Cs}$  beträgt nur 2.06 Jahre, d.h. das Radioisotop konnte in den Jahren 2012-2015 als Fallout-Isotop nach dem Chernobyl-Ereignis von 1986 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.

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

## Literaturliste

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

## 8.5

# Les installations nucléaires et l'environnement

S. Estier  
P. Beuret  
G. Ferreri  
A. Gurtner  
T. Marti  
M. Müller  
P. Steinmann  
Section radioactivité  
de l'environnement  
URA / OFSP  
3003 Berne

### Résumé

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

*Hormis ces quelques exemples, les résultats des mesures environnementales ne diffèrent pas 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 de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois aux autorités.

La surveillance se poursuit par la mesure des immissions des centrales nucléaires (concentrations radioactives effectivement mesurées dans l'environnement). Tous les compartiments environnementaux sont examinés, de l'air jusqu'aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma in situ) complètent ces analyses en permettant d'évaluer directement la radioactivité déposée au sol. Ce programme de surveillance, coordonné par l'OFSP,

englobe non seulement les propres mesures de l'Office mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut de radiophysique (mesures alpha et bêta), du laboratoire de Spiez ( $^{90}\text{Sr}$  dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aéroradiométrie etc.), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université de Berne ( $^{14}\text{C}$  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. 4.4
Mesures in situ	Ch. 3.1
Sol et herbe ( $\gamma$ , $^{90}\text{Sr}$ )	Ch. 4.6
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 (voir chapitre 8.1). En effet, les niveaux de radioactivité à la source permettent une détection plus aisée et plus exhaustive des radionucléides rejetés. Leur impact sur l'environnement et l'homme est ensuite déterminé sur la base de modèles de transfert, basés sur des hypothèses conservatrices. En complément, les mesures dans l'environnement servent à vérifier ces modèles et à établir un bilan local réaliste de la radioactivité naturelle et artificielle.

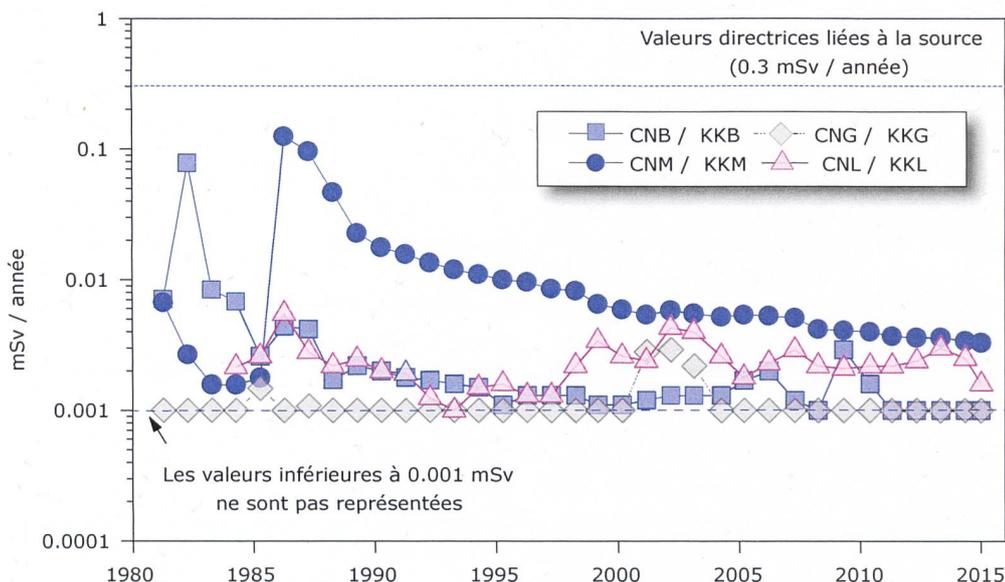
## Méthodologie

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

## Résultats

### Mesures à la source (émissions)

Les mesures parallèles de l'exploitant, de l'IFSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que les 4 centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (KKB 1 et 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) et Mühleberg (KKM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2015 (voir Chap. 8.1).



**Figure 1:**

Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2015 (données IFSN). La valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an (rayonnement direct compris) est représentée à titre de comparaison.

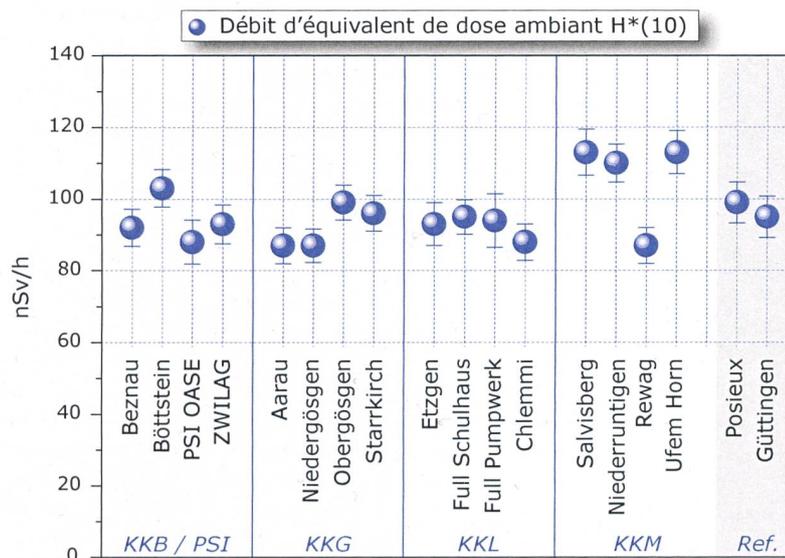
La figure 1 présente l'impact des rejets sur la population avoisinante en termes de doses. En tenant compte des rejets des années précédentes, ces dernières se sont échelonnées en 2015 entre 0.001 et 0.004 mSv. La contribution majeure provient des rejets atmosphériques (essentiellement du  $^{14}\text{C}$ ), avec à Mühleberg une contribution rémanente des résines contaminées en  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$  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).

### Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante à la clôture et au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres thermoluminescents (TLD) et par des mesures périodiques effectuées par l'IFSN à la clôture des installations. Les résultats de cette surveillance ont mis en évidence une contribution clairement mesurable du rayonnement direct en certains points de la clôture des réacteurs à eaux bouillantes, à savoir, Leibstadt et Mühleberg, ainsi que, dans une moindre mesure, au PSI (voir Chapitre 8.2). A Mühleberg, l'évaluation des TLD disposés à la clôture de la centrale a montré une élévation

de la dose annuelle de 0.7 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel qui s'élève à 0.7 mSv/an). La dose annuelle supplémentaire la plus élevée enregistrée à la clôture de la centrale de Leibstadt à l'aide des TLD atteint également 0.7 mSv (après soustraction du bruit de fond naturel de 0.6 mSv/an). La valeur limite d'immissions pour le rayonnement direct a ainsi été respectée par toutes les installations en 2015. 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 Posieux ou Güttingen, situées hors de leur influence.



**Figure 2:**

Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiante  $H^*(10)$  effectués en 2015 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1 m du sol. Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisé).

## 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 2015 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 1.6 et 8.3 et entre 0.2 et 2.5 mBq/m<sup>3</sup> (mesures OFSP et PSI). Le seul radionucléide d'origine artificielle régulièrement détectés dans l'ensemble des stations est le  $^{137}\text{Cs}$  (valeur maximale de  $1.8 \pm 0.7 \mu\text{Bq/m}^3$ ), provenant de la remise en suspension d'anciennes contaminations (essais d'armes atomiques des années 50 et 60 ainsi que l'accident de Tchernobyl). Ces concentrations sont comparables à celles enregistrées sur les sites de référence.

Des traces de  $^{60}\text{Co}$  ont par ailleurs été décelées dans les filtres aérosol du voisinage de la centrale nucléaire de Gösgen en janvier (mesure simultanée de 4 filtres hebdomadaires). La mesure individuelle des filtres hebdomadaires a montré que ce radionucléide n'était présent que durant la période allant du 20.01 au 27.01.2015. L'activité mesurée ( $5 \pm 1 \mu\text{Bq/m}^3$ ) représente 0.0003 % de la valeur limite d'immission dans l'air pour le  $^{60}\text{Co}$ . La comparaison avec les rejets déclarés par la centrale nucléaire de Gösgen et le fait qu'aucun autre radionucléide d'origine artificielle ne soit présent sur le filtre laisse penser qu'il s'agit certainement d'une contamination croisée du filtre après prélèvement. En effet, le prélèvement est effectué par un collaborateur de la centrale et l'activité totale présente sur le filtre est de l'ordre de 0.05 Bq de  $^{60}\text{Co}$ , qui n'est pas décelable par un moniteur de contamination classique, mais seulement par des mesures spectrométriques très sensibles.

Notons finalement que du  $^{24}\text{Na}$ , radionucléide artificiel de courte période (demi-vie de 15h) produit par exemple dans les accélérateurs de particules, a sporadiquement été mesuré sur les filtres à grand débit de la station de Klingnau, située à quelques km de l'Institut Paul Scherrer. La concentration maximale mesurée s'élève à  $80 \pm 38 \mu\text{Bq/m}^3$  et ne représente qu'une infime fraction de la valeur limite d'immissions dans l'air fixée dans l'OraP à 100 Bq/m<sup>3</sup>.

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, le seul émetteur gamma d'origine artificielle dont l'activité spécifique est parfois supérieure à la limite de détection est le  $^{137}\text{Cs}$ .

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 2015 inférieures à la limite de détection de 2 Bq/l. Les concentrations de tritium enregistrées dans les pluies du voisinage des centrales nucléaires, du PSI et du ZWILAG sont restées proches des seuils de détection de 1 à 2 Bq/l avec ponctuellement des valeurs plus élevées, notamment au voisinage de Beznau.

**Tableau 2:**  
Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2015.

Lieu	Valeur min/ max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruntigen * (environs KKM)	< 2 - 2.5	< 2.0
Niedergösgen * (environs KKG)	< 2 - 2.4	< 2.0
Full (environs KKL) *	< 2 - 4.1	< 2.0
Beznau (environs KKB) **	2.8 - 30	3.8
PSI **	< 1.4 - 19.4	2.3
ZWILAG **	< 1.4 - 10.2	2.4

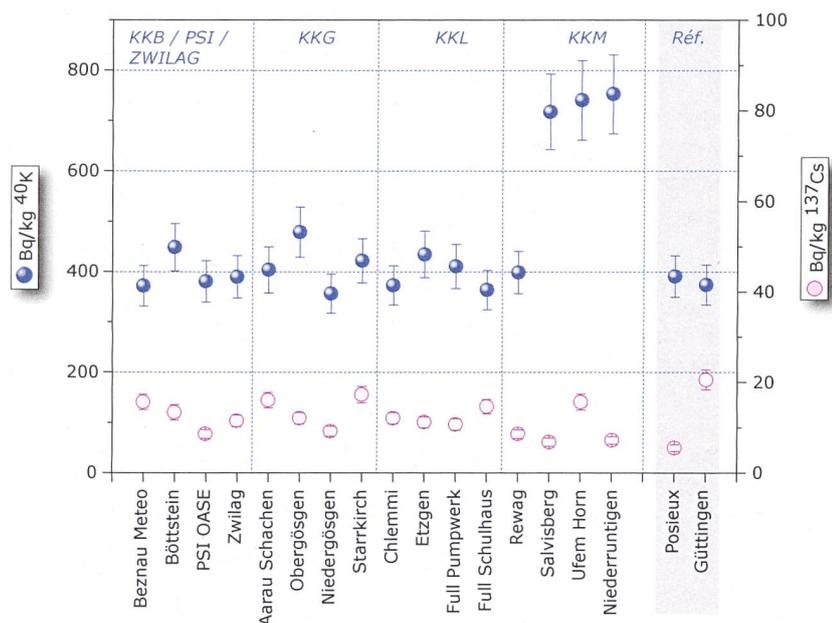
\* mesures OFSP / \*\* mesures PSI

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le  $^{14}\text{C}$ . Les mesures de ce radionucléide dans les feuillages, poursuivies depuis de nombreuses années par l'université de Berne, ont ainsi mis en évidence en 2015 une augmentation maximale, par rapport à la station de référence, de 154 pour mille aux environs de la centrale de Leibstadt. Les doses qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales ne représentent cependant que quelques micro-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 mesuré 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 2015 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

**Figure 3:**

$^{137}\text{Cs}$  et  $^{40}\text{K}$  (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) analysés par l'OFSP en 2015 (couche 0-5 cm). Les valeurs mesurées à Posieux et Güttingen sont représentées à titre de comparaison (grisées).

à titre d'exemple les concentrations de  $^{40}\text{K}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  mesurées dans les sols prélevés par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires en 2015. Il est intéressant de remarquer que les concentrations plus importantes de  $^{40}\text{K}$  (naturel) mesurées sur trois sites des environs de la centrale de Mühleberg (cf. figure 2) sont responsables des valeurs de débit de dose légèrement plus élevées enregistrées en ces endroits (voir figure 2).

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 de ces mesures confirment que les valeurs enregistrées au voisinage des installations nucléaires ne se distinguent pas de celles mesurées sur les sites de référence.

Les denrées alimentaires constituent le prochain compartiment susceptible de transférer les radionucléides jusqu'à l'homme. Les résultats des mesures de la radioactivité dans les aliments, coordonnées par l'OFSP en étroite collaboration avec les laboratoires cantonaux, n'ont pas révélé de marquage attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires. Les mesures additionnelles de l'OFSP, en particulier celles du programme germano-suisse au voisinage de Leibstadt dans les produits agricoles et les poissons ont confirmé ce constat, puisqu'aucun émetteur gamma d'origine artificielle, hormis le  $^{137}\text{Cs}$  attribuable à d'anciennes contaminations, n'a été décelé dans ces échantillons. Les résultats des me-

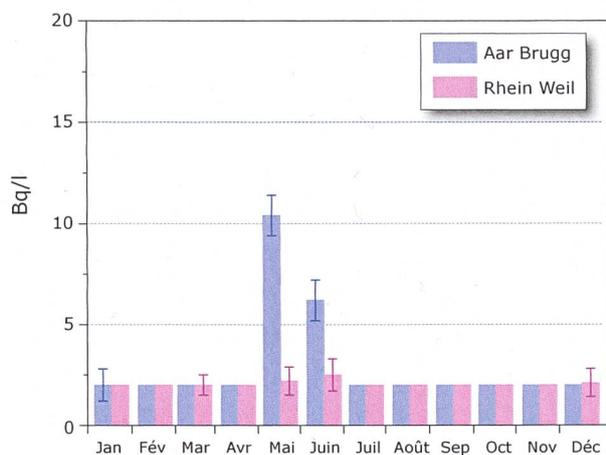
sures de  $^{90}\text{Sr}$  effectuées par l'Institut de Radiophysique dans des échantillons de lait et de céréales prélevés au voisinage des centrales nucléaires ainsi que de fruits et légumes prélevés au voisinage de Leibstadt ne se distinguent pas de ceux enregistrés ailleurs sur le plateau suisse.

### Mesures dans le milieu aquatique

L'EAWAG procède à des analyses mensuelles d'échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin collectés en continu, et de manière proportionnelle au débit, aux stations de Hagneck/BE (en aval de KKM), Klingnau (aval de KKB) et Pratteln (aval KKL). Depuis la réduction significative des rejets par la centrale de Beznau 1, la majeure partie des produits d'activation tels que le  $^{54}\text{Mn}$ , le  $^{58}\text{Co}$  et le  $^{60}\text{Co}$  rejetée dans les eaux fluviales proviennent de la centrale de Mühleberg. Les rejets les plus importants ont eu lieu au mois d'août pendant la période de révision. Toutefois, en 2015, contrairement aux années précédentes aucune trace de ces radionucléides n'a pu être mise en évidence dans les échantillons d'eau de la station de Hagneck ; le même constat est valable pour le  $^{137}\text{Cs}$ . A Klingnau, en revanche des traces de  $^{60}\text{Co}$  ont été mesurées dans les échantillons d'eau de mars et avril, accompagné pour ce dernier, de  $^{137}\text{Cs}$ . Les deux valeurs de  $^{60}\text{Co}$  étaient toutefois très proches des limites de détection et s'accompagnent d'incertitudes de mesure élevées.

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

Les concentrations mensuelles en  $^3\text{H}$  enregistrées en 2015 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.



**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 2015.

Contrairement aux échantillons d'eaux, les traces des rejets liquides de Mühleberg, et en particulier de  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  et même de  $^{65}\text{Zn}$  ont pu être mises en évidence dans les échantillons mensuels de sédiments prélevés dans l'Aar à Hagneck, essentiellement pendant et après la période de révision. Dans les échantillons de sédiments prélevés à Klingnau et Pratteln, le  $^{60}\text{Co}$  et le  $^{54}\text{Mn}$  ne sont présents que de façon sporadique. A noter que le  $^{58}\text{Co}$  n'a été décelé qu'à une seule reprise dans les échantillons de sédiments prélevés à Klingnau alors que sa concentration restait inférieure à la limite de détection à Pratteln. Dans cette dernière station en revanche, du  $^{65}\text{Zn}$  a pu être mesuré en avril alors que les activités de ce radionucléide sont restées inférieures aux limites de détection dans les échantillons de ce même mois à Hagneck et Klingnau. Ceci s'explique par les rejets en  $^{65}\text{Zn}$  par la centrale nucléaire de Leibstadt au cours de ce mois (voir Figure 5 du chapitre 4.4 et chapitre 8.1).

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

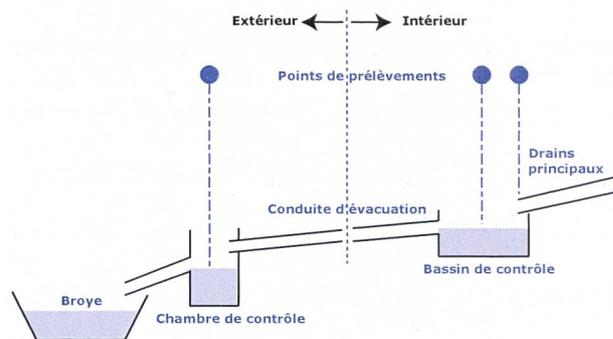
Un échantillon de plantes aquatiques a été prélevé dans chacune des stations de surveillance : l'échantillon prélevé à Hagneck (08.10.15) a présenté un marquage en  $^{54}\text{Mn}$  (10 Bq/kg) et en  $^{60}\text{Co}$  (45 Bq/kg), alors que du  $^{54}\text{Mn}$  (9 Bq/kg), du  $^{65}\text{Zn}$  (24 Bq/kg) et du  $^{137}\text{Cs}$  (3 Bq/kg) a été mesuré dans celui de Klingnau (7.7.2015). Dans l'échantillon de Pratteln (9.10.15) des traces de  $^{60}\text{Co}$  (4 Bq/kg), de  $^{131}\text{I}$  (13 Bq/kg) et de  $^{137}\text{Cs}$  (7 Bq/kg) ont été enregistrées.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar et le Rhin en aval de KKM, KKB et KKL en 2015 n'ont pas révélé la présence de radionucléide d'origine artificielle. Le constat est le même pour la mesure des eaux des nappes phréatiques.

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

#### (site soustrait à la législation sur les installations nucléaires)

La surveillance du site de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens effectuée sur mandat de 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 bassin de contrôle est un bassin de collecte où sont réunies les eaux de drainage provenant des 9 drains principaux du système de drainage ; la chambre de contrôle est située juste avant le rejet dans la Broye (voir Figure 5). Les prélèvements étaient effectués manuellement par un membre du personnel du dépôt de conservation des objets culturels du



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

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.

Suite aux concentrations accrues de tritium enregistrées dans le système de drainage entre fin 2011 et début 2012 (valeur maximale de 230 Bq/l) des collecteurs automatiques ont été installés en remplacement des prélèvements manuels au printemps 2012. Un programme de surveillance renforcé avait également été mis en place, mais les résultats des mesures complémentaires ayant démontré que l'augmentation d'activité en  $^3\text{H}$  était due à un phénomène ponctuel, la surveillance a depuis lors repris son rythme normal (pour les détails concernant cette augmentation et sur les résultats de cette surveillance rapprochée, voir chapitre 8.6 du rapport «Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse 2012»).

En 2015, l'IRA a poursuivi ses analyses selon le programme usuel. Pour la mesure des émetteurs gamma et du tritium, les échantillons d'eaux collectés toutes les 4h aussi bien par le collecteur automatique de la CdC que de celui du BdC sont réunis pour former un mélange mensuel pour chaque site. Une aliquote de ce mélange est ensuite envoyé à l'IRA pour analyse. Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence dans ces échantillons en 2015. Les résultats montrent en effet que les activités du  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$  sont restées inférieures aux limites de détection de 0.3 à 1.5 Bq/l.

Les mélanges mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le  $^3\text{H}$  est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de la concentration en tritium mesurées en 2015 dans les échantillons du BdC et de la CdC se sont élevées à  $6.9 \pm 1.0$  Bq/l et  $6.7 \pm 1.3$  Bq/l respectivement. Elles se situent ainsi en dessous des valeurs moyennes enregistrées au cours de la période 2001 et 2010 (env. 15 Bq/l), ce qui est attendu compte tenu de la décroissance radioactive.

Pour la mesure du  $^{90}\text{Sr}$ , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Aucun échantillon collecté n'a présenté des activités supérieures à la limite de détection de 7 mBq/l.

## Conclusions

L'impact radiologique des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été minime en 2015.

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

Les mesures effectuées dans tous les compartiments environnementaux ont mis en évidence un faible marquage du milieu : la détection du rayonnement direct, du  $^{14}\text{C}$  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 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 Berne

**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 2015 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Même si des traces de radioisotopes, produits dans les installations du centre de recherche, ont pu être détectées, les activités maximales enregistrées sont restées nettement inférieures aux limites suisses et leur impact radiologique peut être considéré comme minime.*

### Programme de surveillance de l'OFSP

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

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

A noter qu'après une longue période d'arrêt pour maintenance (depuis février 2013), le LHC a été progressivement remis en service au printemps 2015. Les installations du CERN étaient donc toutes en fonction au cours de l'année sous revue.

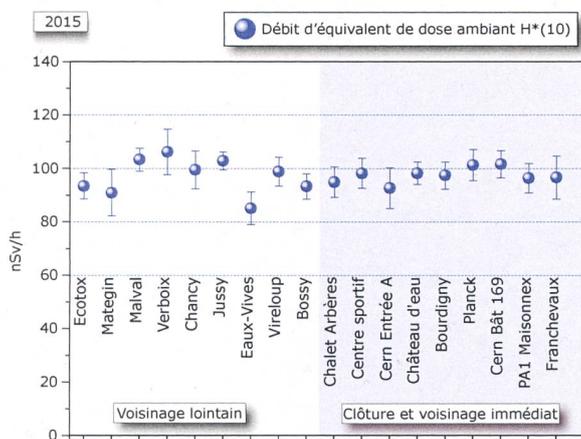
### Mesures de l'exposition ambiante

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 2015, 5 d'entre eux étant situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français). En plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma, la dose des neutrons a également été évaluée.

Les résultats de ces mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique (IRA) sur mandat de l'OFSP, ont montré que les doses des photons enregistrées au cours de l'année 2015 correspondent partout

à l'irradiation naturelle (environ 0.2 mSv par trimestre), y compris aux emplacements situés à l'intérieur de la clôture. Les doses des neutrons sont restées faibles ou inférieures à la limite de détection de 0.02 mSv sauf en deux points, situés à l'intérieur de l'enceinte du site de Meyrin, à proximité du synchrotron à protons (PS) et du booster du PS (PSB). Les doses observées restent cependant peu élevées (entre 0.1 et 0.35 mSv par trimestre) par rapport aux valeurs atteintes par le passé (jusqu'à environ 1 mSv au point 11). Notons que les doses des neutrons enregistrées au premier trimestre 2015 sont restées proches de l'irradiation naturelle, en raison des faibles intensités des faisceaux durant cette période.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en septembre 2015 sur 9 sites du voisinage proche du CERN et 9 sites distants n'ont par ailleurs montré aucune influence du centre de recherche sur l'exposition ambiante due au rayonnement gamma. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ( $H^*(10)$ ) pour les gammas se sont échelonnées entre 85 et 106 nSv/h et se situent dans le domaine de variation de l'irradiation naturelle (moyenne des sites limitrophes:  $97 \pm 3$  nSv/h; moyenne des sites distants  $97 \pm 7$  nSv/h).



**Figure 1 :** Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  effectuées par l'OFSP en 2015 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.

## Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau RADAIR située au CERN et mesurant en continu la radioactivité alpha et bêta des aérosols (voir Chap. 4.2) n'a pas signalé d'anomalie en 2015. Depuis 2007, un moniteur d'iode est également installé sur le site du CERN, pour la surveillance de  $I^{131}$  gazeux. Aucune valeur supérieure à la limite de détection de 50-60 mBq/m<sup>3</sup> 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 ne montre toutefois pas de différence notable entre les concentrations de  $^7\text{Be}$  mesurées en 2015 dans les filtres aérosols de la station du CERN et celles enregistrées dans les stations situées hors de son influence.

**Tableau 1 :**

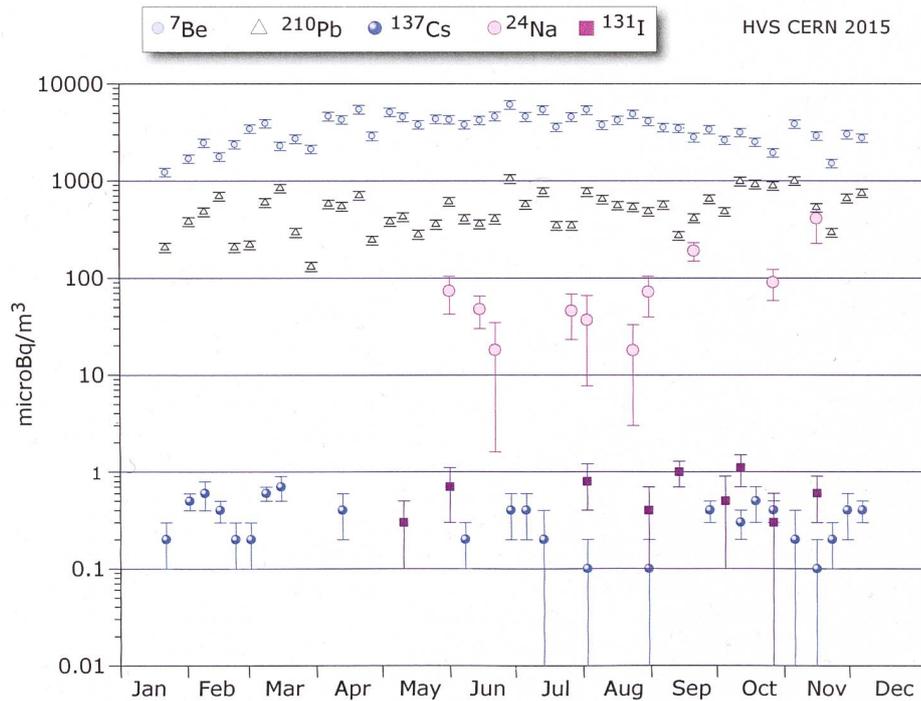
Concentrations du  $^7\text{Be}$  mesurées en 2015 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les stations situées hors influence.

Station de collection à haut débit	Valeur min/ max	Moyenne
	(mBq/m <sup>3</sup> )	(mBq/m <sup>3</sup> )
CERN (Meyrin/GE)	1.2 - 6.1	3.6
Posieux/FR	1.3 - 7.0	3.7
Klingnau/AG	1.1 - 7.5	3.6
Güttingen/TG	1.1 - 6.3	3.4
Cadenazzo/TI	1.7 - 6.8	4.2

Des traces de  $^{22}\text{Na}$ , également d'origine naturelle, ont été détectées à plusieurs reprises (valeurs comprises entre 0.1 et 0.7  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ).

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 sont restées inférieures à 1  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .

Les seuls radioisotopes attribuables aux activités du CERN sporadiquement mis en évidence dans les filtres aérosols en 2015 sont le  $^{24}\text{Na}$  et le  $^{131}\text{I}$  (valeurs comprises entre  $18 \pm 15$  et  $410 \pm 180$   $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  et entre  $0.3 \pm 0.2$  et  $1.1 \pm 0.4$   $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  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 ( $I^{131}$  est uniquement produit par l'installation ISOLDE).



**Figure 2:** Concentrations de divers radioisotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2015.

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 2015 pour ces radionucléides ne représentent qu'environ 0.0004% (pour le  $^{24}\text{Na}$ ) et 0.00004% (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.

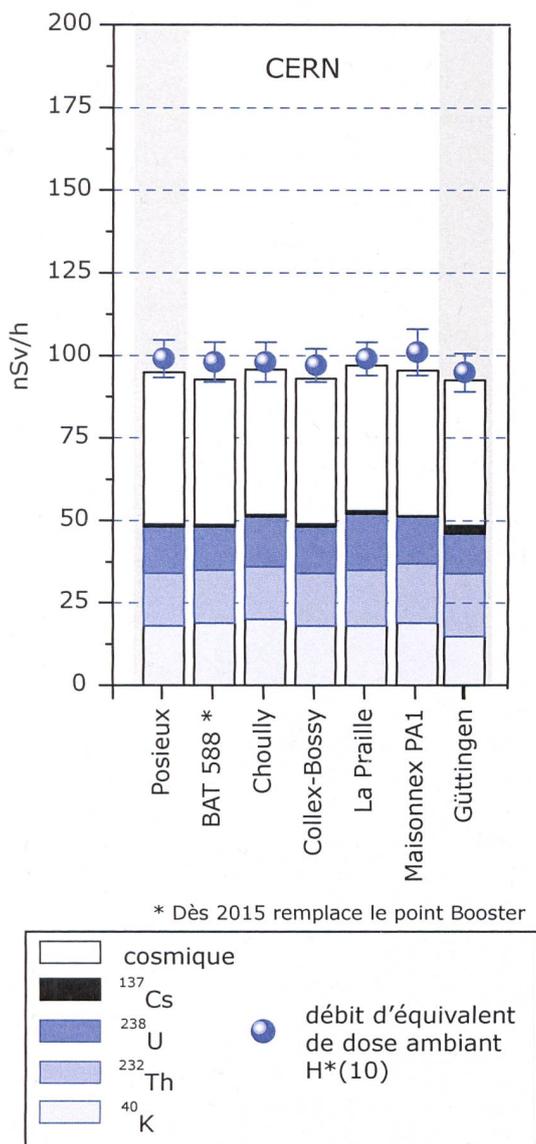
### Mesures dans le milieu terrestre

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 2015 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 Posieux/FR ou Güttingen/TG (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au chapitre 3.1).

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux prélevés au voisinage proche (mais en dehors de l'enceinte) du centre de recherche ont confirmé ce constat. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans

des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioéléments d'origine naturelle, dont les concentrations prédominent, on y détecte encore les traces des injections artificielles des essais nucléaires des années 50 et 60 et dans une moindre mesure de l'accident de Tchernobyl.

L'analyse d'un échantillon de terre prélevé dans l'enceinte du CERN, sur le site de Meyrin, a toutefois révélé la présence de traces de produits d'activation tels que  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{152}\text{Eu}$ . Les prélèvements ont été répétés et les résultats ont confirmé la présence localisée de ces radionucléides (valeurs maximales :  $36.4 \pm 0.9$  Bq/kg pour le  $^{22}\text{Na}$ ,  $4.4 \pm 0.4$  Bq/kg pour le  $^{54}\text{Mn}$ ,  $9.8 \pm 0.4$  Bq/kg pour le  $^{60}\text{Co}$ ,  $0.6 \pm 0.1$  Bq/kg pour le  $^{134}\text{Cs}$  et  $25.6 \pm 0.7$  Bq/kg pour le  $^{152}\text{Eu}$ ). Il s'avère que des travaux souterrains ont été effectués pour renforcer un blindage près d'une ligne de faisceau ; la terre excavée à cet endroit et dont certains éléments avaient été activés lors du fonctionnement des accélérateurs a été entreposée durant les travaux puis remise à son emplacement initial. La terre échantillonnée provient d'un reliquat de la terre entreposée. Si les radionucléides détectés sont bien attribuables aux activités du CERN, il est à noter que toutes les activités mesurées sont bien inférieures aux limites d'exemption (au maximum 1% de LE par radionucléide) et que la terre contenant ces produits d'activation n'a pas été utilisée en dehors de l'enceinte



**Figure 3:** Contributions individuelles au débit d'exposition ambiante déterminées par spectrométrie gamma in situ pour les sites voisins du CERN examinés en 2015, et comparaison avec les résultats obtenus à Posieux/FR et Güttingen/TG.

du centre de recherche et en grande partie remplacée à son emplacement initial à plusieurs mètres de profondeur. Le risque pour la santé de la population et pour l'environnement lié à la présence de ces produits d'activation au voisinage des lignes de faisceau est donc négligeable, mais montre que les activités du CERN peuvent conduire à un marquage de l'environnement.

## Mesures dans le milieu aquatique

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle, à l'exception de rares traces de <sup>137</sup>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. Ce constat s'applique également aux concentrations de tritium des échantillons mensuels d'eau du Nant d'Avril.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par l'Institut F.-A. Forel à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme a fait l'objet d'un rapport spécifique<sup>1</sup>.

Entre le 14 novembre 2014 et le 11 novembre 2015, 23 échantillons d'eau ont été prélevés (échantillonnage proportionnel au débit effectué à l'aide d'un collecteur automatique) avec une intégration des prélèvements de 6 à 22 jours. Suite à une panne de l'échantillonneur, la période du 26 février au 6 mars 2015 est manquante. En dehors du <sup>40</sup>K et des isotopes des séries primordiales (<sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th), seuls 3 radioisotopes ont été détectés dans les échantillons d'eau brute (non filtrée) prélevés dans le Nant d'Avril. Les activités maximales sont celles du <sup>7</sup>Be (maximum de  $0.46 \pm 0.04$  Bq/l enregistré en juin), avec une moyenne de 0.17 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 m<sup>3</sup>/période) par l'activité spécifique du radionucléide. Le flux annuel estimé de <sup>7</sup>Be pour la période 2014-2015 est ainsi de 980 MBq au minimum et de 1'130 MBq au maximum et se situe dans la fourchette inférieure des valeurs enregistrées au cours des périodes précédentes.

Le deuxième radionucléide mis en évidence dans les eaux du Nant d'Avril est le <sup>137</sup>Cs (maximum de 2.9 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 <sup>137</sup>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.

<sup>1</sup> J.-L. Loizeau et Ph. Arpagaus, Rapport N°16 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2014 - Novembre 2015; Institut F.-A. Forel (Décembre 2015).

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

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de <sup>7</sup>Be et de <sup>137</sup>Cs dans tous les échantillons. Les activités mesurées pour ces deux isotopes sont résumées dans le tableau 2. Aucun autre émetteur gamma d'origine artificielle n'a pu être décelé dans les échantillons de sédiments au cours de la période sous revue.

**Tableau 2:**  
Résumé des résultats des mesures effectuées par l'Institut F.-A. Forel dans les sédiments du Nant d'Avril durant la période novembre 2014 à novembre 2015 (13 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max	Moyenne	Médiane
	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
<sup>7</sup> Be	338 - 1'002	632	567
<sup>137</sup> Cs	3.3 - 10.0	5.8	6.2

Afin de mettre en évidence d'éventuelles augmentations des immissions radioactives dans le milieu aquatique dues au fonctionnement du LHC, des sédiments et des bryophytes sont par ailleurs prélevés une fois par an aux 8 principaux points de rejets des eaux du LHC et analysés par l'Institut Forel. Les activités spécifiques mesurées dans les échantillons de sédiments se sont échelonnées, en 2015, entre 96 et 737 Bq/kg pour le <sup>7</sup>Be et entre 4.1 et 17.0 Bq/kg pour le <sup>137</sup>Cs. Pour les bryophytes, les résultats montrent des activités spécifiques en <sup>7</sup>Be variant entre < 330 et 2'447 Bq/kg et entre 3.4 et 13.5 Bq/kg pour le <sup>137</sup>Cs. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus en 2005, 2006 et 2008 alors que le LHC n'était pas encore en fonction (programme point zéro LHC) ne montre pas la présence de nouveaux radioisotopes ni d'augmentation significative des radionucléides présents.

En résumé, si l'on exclut le <sup>7</sup>Be, puisque les résultats des mesures effectuées ne peuvent mettre en évidence une origine anthropique, le seul radionucléide attribuable aux activités du centre de re-

cherche décelé sous forme de traces non quantifiables dans le milieu aquatique en 2015 est le <sup>22</sup>Na dans les eaux. Les radioéléments produits par les installations du CERN tels que <sup>54</sup>Mn, <sup>57</sup>Co, <sup>58</sup>Co, <sup>60</sup>Co, mis en évidence par le passé dans le Nant d'Avril, n'ont été retrouvés ni dans les eaux, ni dans les sédiments, ni dans les bryophytes durant l'année sous revue.

## Conclusions

Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec l'institut F.-A. Forel, a montré que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement et la population avoisinante a été minime en 2015.

L'ensemble des résultats ont montré la prédominance des radioéléments d'origine naturelle. La détection de traces de radionucléides attribuables aux activités du CERN, comme le <sup>24</sup>Na et le <sup>131</sup>I dans l'air et le <sup>22</sup>Na dans l'eau ou encore de produits d'activation dans la terre à proximité des lignes de faisceau, n'a été possible que grâce à la mise en œuvre de techniques de prélèvement et de mesure d'une très grande sensibilité, dépassant le cadre des contrôles réglementaires. Les activités maximales des radioisotopes artificiels provenant des activités du CERN mesurées dans l'environnement ne représentent en effet que d'infimes fractions des valeurs limites fixées par la législation suisse en radioprotection.

## 8.7 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)

**F. Malacrida**  
**P. Vojtyla**  
 CERN  
 Organisation européenne pour la recherche nucléaire  
 Unité santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE)  
 1211 Genève 23

### Résumé

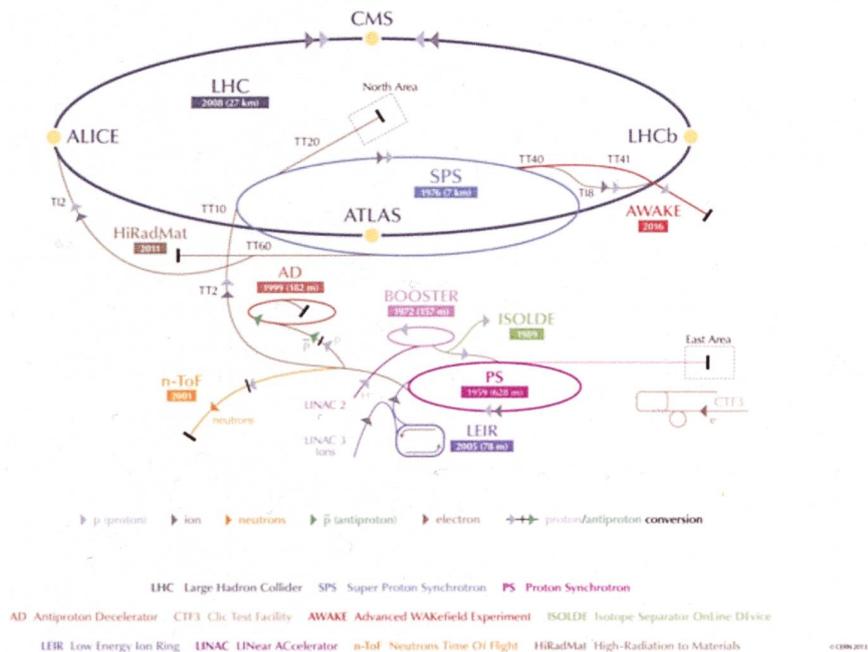
Les résultats du programme de surveillance du CERN combinés aux calculs de dose pour les populations des groupes de référence ont démontré, à l'instar des années précédentes, que, pour 2015, l'Organisation a respecté la limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1]. La dose effective délivrée aux membres du public Suisse a été inférieure à 0.016 mSv, soit 5.3% de la limite. Les concentrations de radionucléides sont restées inférieures à 3.5% des limites applicables dans tous les échantillons environnementaux. De fait, le marquage de l'environnement induit par les activités du CERN demeure très faible.

### Le CERN

Le CERN, l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Le CERN a son siège à Genève et ses installations sont situées d'un côté et de l'autre de la frontière franco-suisse. Il a pour mission la re-

cherche fondamentale en physique des particules afin de découvrir les constituants et lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière: les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la nature. Les instruments qu'utilise le CERN sont

### CERN's Accelerator Complex



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

des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent les résultats de ces collisions.

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

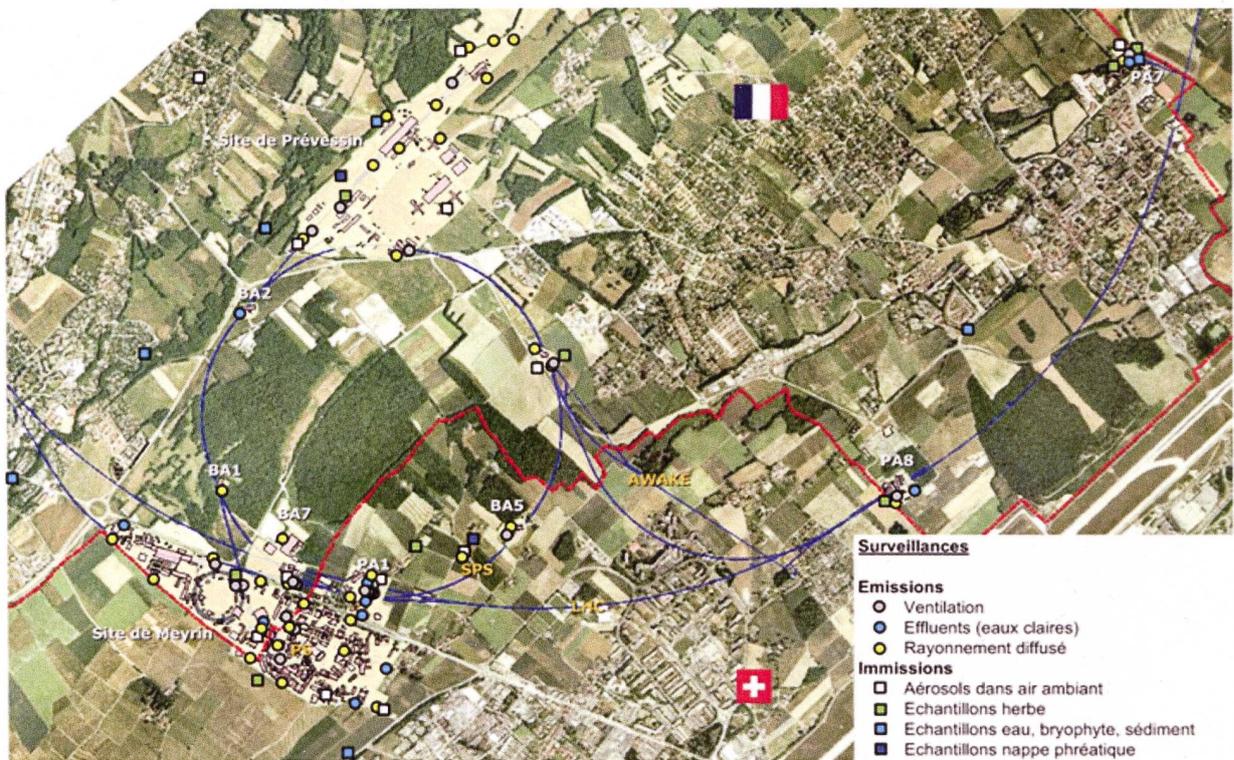
### Aspects environnementaux

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 néces-

sitent d'être ventilés et une fraction de la radioactivité produite dans l'air peut être émise dans l'atmosphère par le biais de cheminées. De manière similaire, l'eau de refroidissement des systèmes ainsi que l'eau d'infiltration des tunnels souterrains doivent être évacuées. Ces effluents peuvent contenir des substances radioactives. Le rayonnement diffusé, les rejets gazeux et les effluents sont surveillés en continu (voir ci-dessous).

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

Lorsque les accélérateurs sont arrêtés, l'émission atmosphérique de gaz de demi-vies courtes et le rayonnement diffusé cessent. Néanmoins, le bé-



**Figure 2 :** Région frontalière franco-suisse : sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS) et du Grand collisionneur d'hadrons (LHC), situation des stations de surveillance et lieux d'échantillonnage du CERN ; ceux qui concernent le territoire suisse y sont tous représentés, excepté le point de collecte des échantillons de l'Allondon qui est hors-carte.

8.8 Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN) - @OFSP 2016

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

## Programme de surveillance

Le CERN, en tant que responsable de ses installations, se doit de réaliser son propre programme de surveillance environnemental, qui est élaboré en tenant compte des sources d'émission avérées et potentielles. Des stations de surveillance du rayonnement diffusé se situent aux lieux où ces rayonnements ont pu être observés ou prédits 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 2015, 41 stations de ce type étaient en opération. Les points d'extraction d'air, d'où des substances radioactives peuvent être émises, sont équipés de stations de surveillance qui mesurent en continu les radionucléides gazeux à demi-vie courte et échantillonnent les aérosols sur des filtres périodiquement analysés en laboratoire. En 2015, 40 stations étaient en opération. De manière similaire, les points de rejet des eaux claires qui sont déversées dans les eaux de surfaces (rivières) sont équipés de stations de surveillance de l'eau (13 stations en 2015) ; les eaux claires incluent les eaux de refroidissement des circuits secondaires, les eaux d'infiltration des tunnels et les eaux météoriques. Ces stations mesurent en continu les radionucléides de demi-vies courtes et collectent des échantillons d'eau analysés périodiquement en laboratoire. Deux stations contrôlent indépendamment les eaux de refroidissement et d'infiltration du SPS et du LHC.

Les niveaux de rayonnement diffusé mesurés ainsi que le bilan des rejets vers l'atmosphère et les cours d'eau sont utilisés pour quantifier l'impact dosimétrique, par le biais de modèles environnementaux et radiologiques reconnus [2,3]. La surveillance des émissions est complétée par la surveillance des immissions, qui est un processus impliquant

la collecte d'échantillons environnementaux et leur analyse en laboratoire. Les résultats doivent corrélérer avec les prédictions, confirmant ainsi qu'aucun rejet incontrôlé n'a été effectué et que les modèles utilisés sont adéquats. Cette surveillance implique un échantillonnage en continu des aérosols contenus dans l'air ambiant (11 stations), des échantillons d'herbe (12 points d'échantillonnage), d'eau, de bryophytes (mousses) et de sédiments dans les cours d'eau (13 points), de l'eau des nappes phréatiques (7 points), ainsi que des échantillons de produits d'agriculture locaux, tels que p. ex. blé, graines de tournesol, asperges et vin.

Les positions des stations de surveillance des émissions et du rayonnement diffusé ainsi que les points de collecte des échantillons destinés à être mesurés en laboratoire dans le cadre de la surveillance des immissions sont présentés en Figure 2.

## Résultats 2015

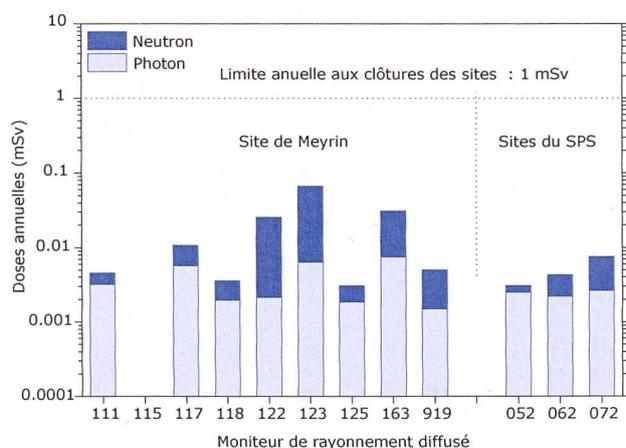
### Activités du CERN et opération des accélérateurs en 2015

Le premier long arrêt (Long Shutdown 1 LS1), permettant d'effectuer la mise à niveau et la consolidation de nombreuses installations du CERN, avait débuté le 16 février 2013 et s'est officiellement terminé le 5 avril 2015, avec le redémarrage progressif du LHC. Les périodes d'exploitation des injecteurs du LHC (PSB, PS, SPS) se sont étendues de début février à mi-décembre. En comparaison avec 2014, l'année a fait l'objet d'intensités de faisceau relativement élevées, notamment pour pouvoir délivrer les particules nécessaires aux expériences de la Zone Nord de Prévessin, notamment NA62 et COMPASS.

La nouvelle expérience NA62 qui a démarré courant juin 2015 permettra d'effectuer un test décisif du modèle standard par le biais de la mesure d'une désintégration rare du Kaon+. En parallèle, l'Organisation est en train de construire la nouvelle installation MEDICIS rattachée à ISOLDE, qui servira à produire des radio-isotopes pour des applications médicales. La construction de MEDICIS a nécessité l'agrandissement du bâtiment accueillant les laboratoires de Type A d'ISOLDE et la séparation de la ventilation des laboratoires de celle de la zone cible. La séparation de la ventilation a impliqué la construction d'une cheminée de rejet raccordée aux laboratoires d'ISOLDE et aux réservoirs de stockage du gaz du système de vide. Pour cette raison, la nouvelle cheminée de rejet a fait l'objet d'une surveillance bien que tous les laboratoires ne soient pas encore opérationnels.

### Rayonnement diffusé

La principale source de rayonnement diffusé sur le site de Meyrin est le complexe du PS. Une petite fraction des neutrons produits dans les accélérateurs peut diffuser à travers le blindage, gagner en hauteur, puis, en interagissant avec les composants de l'air, être redirigés vers le sol. C'est le phénomène dit du skyshine et le public résidant de manière permanente aux abords des barrières du site peut être exposé à ce rayonnement. Dans le cadre du processus d'optimisation des installations du CERN, le blindage du PS avait été renforcé durant le LS1. L'efficacité de ce renforcement a pu être confirmée par le biais de mesures effectuées à son voisinage. De plus, l'équivalent de dose ambiant tel que mesuré à la barrière du site proche du groupe de popu-



**Figure 3:** Doses ambiantes équivalentes annuelles nettes enregistrées par les moniteurs de rayonnement diffusé (CERN, 2015).

lation de référence a été mesuré comme étant deux fois inférieur en 2015 par rapport à 2012, avant le renforcement du blindage. Par ailleurs, la dose efficace au public en 2015 est très probablement surestimée car elle ne tient pas compte de la distance du groupe de population de référence par rapport à la clôture du CERN. La Figure 3 présente les doses équivalentes ambiantes telles que mesurées par les moniteurs de rayonnement diffusé localisés aux abords des sites situés en Suisse.

### Rejets de substances radioactives dans l'atmosphère

Les rejets de substances radioactives par les cheminées dans l'atmosphère qui concernent le territoire suisse sont résumés au Tableau 1. Dû à la faible hauteur des cheminées ainsi qu'aux courtes demi-vies des radionucléides émis, l'impact est minime et reste local. Les radionucléides se répartissent en quatre catégories: les gaz radioactifs de demi-vie courtes  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{15}\text{O}$  et  $^{41}\text{Ar}$ ; le  $^7\text{Be}$ ; l'activité bêta total (majoritairement  $^{32}\text{P}$  et  $^{33}\text{P}$ ) et le tritium ( $^3\text{H}$ ).

L'expérience ISOLDE produit des petites quantités d'iode radioactif ( $^{123}\text{I}$ ,  $^{124}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{126}\text{I}$ ,  $^{130}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ), résultat de l'irradiation par des protons de cibles lourdes. Les quantités rejetées en 2015 sont de 337 MBq, (ne figurent pas en Tableau 1), induisant une dose au groupe de population de référence de 0.0002 mSv. L'opération des laboratoires d'ISOLDE et MEDICIS a conduit au rejet de très faibles quantités de gaz (Xe, Kr), d'iode et de tritium, principalement induit par la vidange des réservoirs de stockage du gaz provenant des systèmes du vide.

Les rejets atmosphériques sont comparables à 2012 (avant le LS1) mais la dose efficace associée a été calculée comme étant sensiblement plus faible. Les données météorologiques telles que mesurées près du site de Meyrin du CERN par un anémomètre ultrasonique durant les dernières années ont permis de recalculer plus fidèlement les coefficients de conversion (exprimés en [Sv/Bq]), qui étaient jusqu'alors trop conservatifs.

### Rejets de substances radioactives dans les cours d'eau

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

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

La station de surveillance au SPS BA2 qui contrôle les effluents liquides de la Zone Nord de Prévessin a été renouvelée et il a été dès lors possible de mettre en évidence des faibles rejets en  $^{24}\text{Na}$  (demi-vie de 15h). Des faibles concentrations en  $^7\text{Be}$  ont été mesurées dans l'échantillon d'eau du mois d'octobre ( $2.1 \pm 0.8 \text{ Bq/L}$ ). Le Tableau 2 présente les rejets de 2015, mais seulement pour les points de rejet où des radionucléides en concentrations supérieures aux limites de détection ont été mesurés. L'indice bêta global résiduel, c'est-à-dire corrigé pour la présence de  $^{40}\text{K}$  naturel dans l'eau, est attribué au  $^{22}\text{Na}$  exclusivement. Par conséquent, les rejets déclarés en bêta/gamma ( $^{22}\text{Na}$ ) sont surestimés car une fraction ou la totalité de l'indice bêta global résiduel est en réalité induit par des radionucléides d'origine naturelle.

**Tableau 1:**  
Rejets radioactifs dans l'air (CERN, 2015).

Origine du rejet	Station(s)	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
PS BOOSTER	VMS175	120	0.5	66	1.5	3.6
Anneau principal PS	VMS176 VMS177 VMS178 VMS179	526	3.4	<LD	< LD	49
TT10 injection PS-SPS	VMS011	28	6.5	52	1.8	1.4
TT70 transfert PS-SPS	VMS173	76	0.2	0.004	<LD	3.2
SPS BAS	VMS051	42	0.6	<LD	0.01	7.4
MEDICIS	VMS169	33	<LD	<LD	<LD	70
ISOLDE	VMS170	39	10.6	<LD	0.5	18
n-TOF	VMS171	3.5	5.4	0.03	0.004	48
East Area	VMS181	14	2.9	36	1.0	0.3
Evaporation tritium	NA**	3.2	<LD	<LD	<LD	1.6

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

**Tableau 2:**  
Rejets radioactifs dans les cours d'eau (CERN, 2015).

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	WMS021	0.67	58	184	Le Lion (F)
Site de Meyrin Sud-est	WMS101	2.20	4.0	60	Nant d'Avril (CH)
Site de Meyrin Ouest	WMS103	0.32	0.8	7.6	Le Lion (F)
AD infiltration	WS104	0.03	0.04	1.6	STEP*
Site SPS BA6 + site LHC PA1	WMS910	1.26	0.9	29.3	Nant d'Avril (CH)
Site LHC PA7	WMS970	0.01	0.03	0.6	Affluent du Marquet (F/CH)
CNGS**, rejet par le site du LHC PA8	WMS980	0.10	0.16	3.4	Le Nant (F)

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

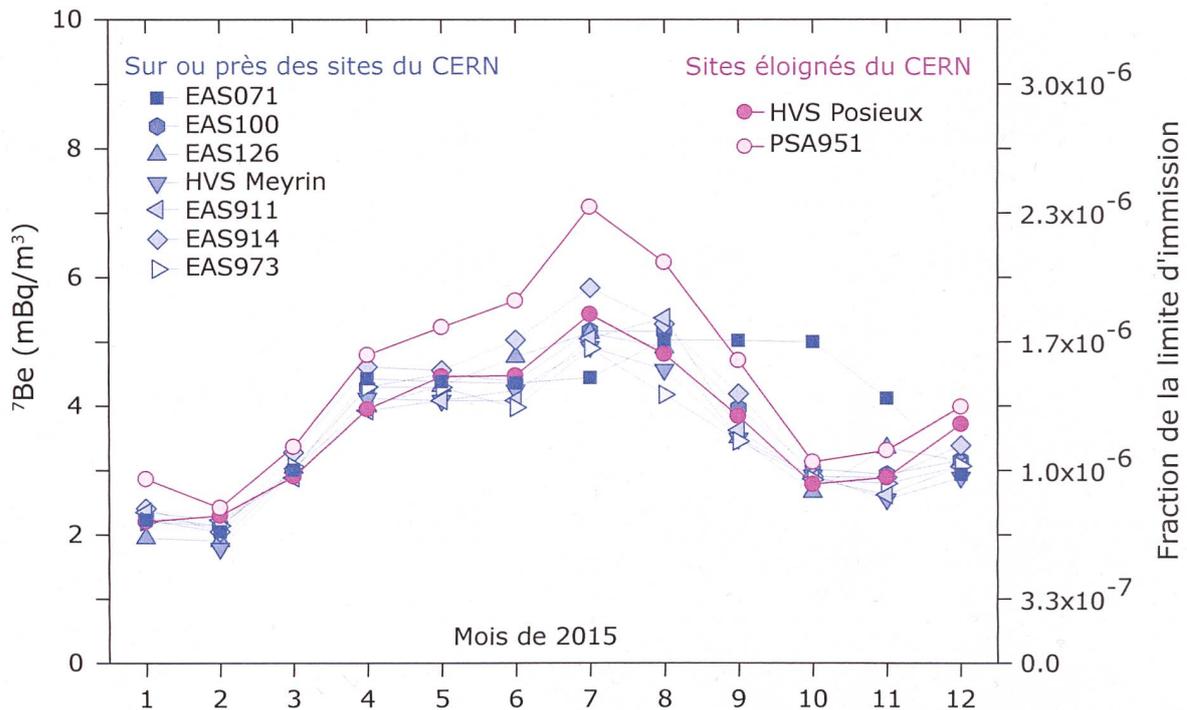
### Surveillance des immissions

Le Béryllium-7 (<sup>7</sup>Be) est un radioélément faiblement radiotoxique, produit dans l'air par les particules de haute énergie. Il possède une grande affinité aux aérosols, ce qui permet de l'utiliser comme marqueur de rejets dans l'atmosphère de particules radioactives en suspension dans l'air provenant des accélérateurs (voir Tableau 1). Cependant, ce radioélément est également produit naturellement par les rayonnements cosmiques en atmosphère. Aux latitudes moyennes, la concentration en <sup>7</sup>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 <sup>7</sup>Be, car elles précipitent les aérosols en suspension dans l'air. La Figure 4 montre la concentration de <sup>7</sup>Be dans l'air ambiant collecté dans deux types de stations:

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

Les valeurs mesurées proches et loin des sites du CERN ont toutes corrélées, prouvant ainsi que la majeure partie de l'activité en <sup>7</sup>Be mesurée est d'origine naturelle. La mesure de l'échantillonneur d'aérosols à haut volume EAS973 situé au LHC-PA7 a été suffisamment sensible pour détecter le <sup>22</sup>Na naturel, aussi produit par rayonnements cosmiques. 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 VMS907 du LHC PA7 n'ont pas mis de <sup>22</sup>Na en évidence.

Concernant l'environnement aquatique, des faibles concentrations en radionucléides artificiels ont été mesurées dans un échantillon de bryophytes (mousses) prélevé dans la rivière le Lion (F). Les



**Figure 4:** Activités du  $^7\text{Be}$  mesurées par le biais de 8 stations d'échantillonnage dont 7 sont situées sur ou proches des sites du CERN. EAS71: site du SPS BA-7. EAS100: site CERN de Meyrin. EAS126: proche du PS. EAS914: site du LHC PA1. EAS911: proche d'une ferme de Meyrin. EAS973: échantillonneur CERN à haut débit sur le site du LHC PA7 proche de Collex-Bossy/GE. HVS Meyrin, HVS Posieux: échantillonneurs OFSP à haut débit, le premier se situant sur le site CERN de Meyrin et le second à Posieux/Fribourg [4].

radionucléides proviennent de la Zone Nord du site de Prévessin (F) et la somme de leurs activités spécifiques est équivalente à 3.5% de la limite d'exemption [5] ( $^7\text{Be}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ). Les bryophytes sont d'excellents bioaccumulateurs de pollution. Alors que la mesure de l'eau de rivière est une valeur instantanée, ces végétaux, qui peuvent être assimilés à des collecteurs, permettent d'identifier des radionucléides ayant été présents dans l'eau. Aucun autre radionucléide provenant du CERN n'a pu être détecté dans les autres échantillons d'eau, de bryophytes et de sédiments. Tous les échantillons susmentionnés ont été collectés en septembre. Bien que les radionucléides aient été mesurés dans des échantillons provenant du territoire français, ils sont mentionnés dans ce présent rapport car la rivière le Lion rejoint l'Allondon, qui termine son cours dans le Rhône. Le Nant d'Avril, dont le flux est principalement alimenté par les eaux de rejet du CERN durant les périodes sèches, fait depuis 1998 l'objet de contrôles réguliers par l'Institut Forel de l'Université de Genève, mandaté par l'Office Fédéral de la Santé Publique (se référer au chapitre précédent).

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

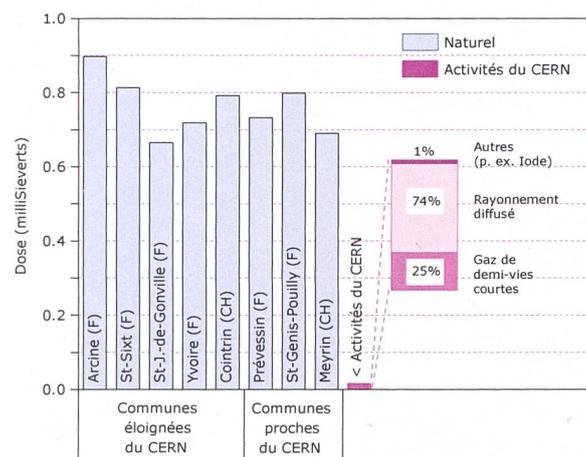
#### Impact radiologique

La dose effective reçue par les membres du groupe de référence pour le site de Meyrin du CERN en 2015 a été calculée à partir des valeurs d'activités des substances rejetées dans l'air et l'eau, en utilisant un modèle de diffusion amélioré basé sur les directives [2,3]. La valeur de dose résultante est de 0.016 mSv, qui doit être comparée avec la valeur limite de dose fixée dans la réglementation du CERN [1] à 0.3 mSv pour les membres du public (5%). De fait, en 2015 et comme pour les années précédentes, la dose effective est restée considérablement en dessous des limites réglementaires. La dose effective totale de 0.016 mSv est induite pour un tiers par les rejets de gaz de demi-vies courtes et deux tiers par le rayonnement diffusé. Celle-ci est légèrement supérieure aux objectifs de dose de

0.01 mSv que se fixe le CERN. Néanmoins, il n'a pas été possible de tenir compte de l'éloignement du groupe de population de référence par rapport au site de Meyrin lors du calcul de la dose efficace induite par le rayonnement diffusé. Conséquemment, la dose efficace est très probablement surestimée.

Le groupe de population de référence exposé aux rejets d'effluents liquides dans le Nant d'Avril a reçu une dose inférieure à 0.0001 mSv.

Le rayonnement diffusé et les rejets en gaz de demi-vies courtes contribuent à > 95% à la dose susmentionnée de 0.016 mSv. Ceux-ci sont surveillés en continu, garantissant ainsi un temps de réaction optimal en cas de dégradation de fonctionnement des installations.



**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 0.006 mSv doit être comparée à la valeur limite de dose de 0.3 mSv fixée dans la réglementation du CERN [1].

## 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, pour l'année 2015 et à l'instar des années précédentes, que l'Organisation a largement respecté la valeur limite de 0.3 mSv/a fixée dans la réglementation du CERN [1].
2. Des techniques de mesure sensibles ont permis de détecter des radionucléides en faibles concentrations dans un seul échantillon environnemental. Les valeurs de concentration sont néanmoins restées inférieures à 3.5% des limites applicables. De fait, le marquage de l'environnement par les activités du CERN demeure très faible.
3. En 2015, 99% de la dose effective aux membres du public des groupes de référence provenait du rayonnement diffusé et des rejets de gaz de demi-vies courtes 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 0.016 mSv avec la dose équivalente annuelle mesurée en plusieurs endroits éloignés des sites CERN.

## Références

- [1] Code F Rev., Radioprotection – Manuel de radioprotection, CERN (2006)..
- [2] Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), Calcul de l'exposition aux radiations ionisantes dans l'environnement due à l'émission de substances radioactives par les installations nucléaires, IFSN-G14/f rév.1 (2009).
- [3] Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
- [4] S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement : Résultats des mesures 2015 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2016). 2014 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2015).
- [5] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2014), Annexe 3.

## Glossaire

<b>AD</b>	Décélérateur d'antiprotons
<b>AWAKE</b>	Advanced WAKEfield Experiment (en construction, exploitation en 2016)
<b>CLIC</b>	Compact Linear Collider, projet impliquant un collisionneur linéaire
<b>CTF3</b>	CLIC Test Facility, installation de test pour le projet CLIC
<b>HIRADMAT</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