



**Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz
und Überwachung der Radioaktivität
(KSR)**

**Commission fédérale de la protection contre les
radiations et de surveillance de la radioactivité
(CPR)**

**Strahlenmesstore am
Eingang von Kehrlichtverbrennungsanlagen**

Bern, 15. Dezember 2011

Gutgeheissen an der Plenarsitzung vom 18. März 2011

Bezugsadresse:

Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität
Bundesamt für Gesundheit
3003 Bern

Verteiler:

KSR-Mitglieder:

Experten der KSR:

BAG

BAFU

SUVA

KOMABC

KSH

NAZ

PSI

IRA

UVEK

Deutschland (SSK, FS)

Frankreich (SFRP, ASN)

Dieser Bericht kann unter folgender Adresse heruntergeladen werden:

www.ksr-cpr.ch

Strahlenmesstore am Eingang von Kehrichtverbrennungsanlagen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

2. Risiken beim Verbrennen einer radioaktiven Quelle

- Festlegung des Risikos
- Betrachtete Wirkungen
- Eintrittswahrscheinlichkeit und betrachtete Szenarien
- Abschätzung der Wirkungen
- Abschätzung der Risiken

3. Schlussfolgerungen

Anhang 1: Berechnung der effektiven Folgedosis für die Bevölkerung in der Nähe einer Kehrichtverbrennungsanlage

Anhang 2: Inventar der radioaktiven Quellen, die sich möglicherweise im angelieferten Abfall bei einer Kehrichtverbrennungsanlage befinden könnten

Anhang 3: Liste der Kehrichtverbrennungsanlagen

Arbeitsgruppe: François Bochud (KSR, Leitung), Michel Hammans (SUVA), André Herrmann (KSR), Reto Linder (BAG)

Dank: Michael Hügi (BAFU)

1 Einleitung

Auch wenn die Gesetzgebung im Zusammenhang mit der Verwendung und dem Transport von Strahlenquellen vorschreibt, dass Strahlenquellen jederzeit unter Kontrolle bleiben müssen, kommt es vor, dass diese in den Abfall gelangen. In der Schweiz wird der Grossteil des Abfalls von Kehrichtverbrennungsanlagen beseitigt, welche Strahlenquellen mit Hilfe von Messtoren bei der Anlieferung von Abfall nachweisen können. Diese Messung radioaktiver Strahlung ist einfach und schnell und erfolgt während des Wägens. Nachgewiesen werden können allerdings nur Quellen mit Gammastrahlung ausreichender Energie oder Bremsstrahlung, die durch Beta-Teilchen hoher Energie erzeugt wird.

Die Situation in der Schweiz und in den benachbarten Ländern kann wie folgt zusammengefasst werden:

- In der Schweiz sind die Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) laut Strahlenschutzverordnung (StSV) nicht verpflichtet, angelieferten Abfall mit Detektoren auf Radioaktivität zu prüfen. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU/OFEV) und das Bundesamt für Gesundheit (BAG/OFSP) erwägen jedoch eine Strategieänderung. Die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) legt fest, dass die Betreiber einer KVA bei der Annahme von Abfällen kontrollieren müssen, ob diese zugelassen sind. Ausdrücklich verboten ist es, Abfälle auf Deponien abzulagern, die nach der Strahlenschutzgesetzgebung behandelt werden müssen (Art 32.2.e TVA).
- In Frankreich müssen KVA und Deponien gemäss dem «Code de l'environnement» sicherstellen, dass die von ihnen bearbeiteten Produkte nicht radioaktiv sind.
- In Belgien dürfte demnächst ein Königlicher Erlass unterzeichnet werden, der KVA und Deponien verpflichtet, angeliefertes Material auf Radioaktivität zu überprüfen (ebenso die Altmetallhändler).
- In den Niederlanden besteht keine Pflicht zur Kontrolle der Abfälle, lediglich Altmetallhändler müssen die Radioaktivität des eingehenden Materials prüfen.
- In Deutschland besteht keine gesetzliche Verpflichtung, die Betreiber von Kehrichtverbrennungsanlagen haben aber freiwillig beschlossen, Radioaktivitätsmessungen vorzunehmen (ebenso wie grosse Altmetallhändler).

Von den 29 Kehrichtverbrennungsanlagen, die am 8.12.2010 beim BAG gemeldet und in Anhang 3 aufgeführt sind, besitzen 11 eine Eingangsmessung. 2009 entsprach dies einem Anteil von 44% der in der Schweiz verarbeiteten Abfälle. Das BAG hat für diese Anlagen eine Richtlinie¹ herausgegeben, in der das entsprechende Messverfahren und Vorgehen beschrieben ist.

Der vorliegende Bericht verfolgt folgende Ziele:

1. Beschreibung der Risiken im Zusammenhang mit dem Verbrennen einer Strahlenquelle.
2. Erstellen von Empfehlungen zur Verwendung von Strahlungsmessgeräten bei der Anlieferung von Abfällen in den KVA.

¹ Merkblatt BAG L-10-01 "Vorgehen bei Anlieferung radioaktiver Stoffe in Kehrichtverbrennungsanlagen", 13.03.2009, <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/02883/02885/02890/index.html?lang=de>

2 Risiken beim Verbrennen einer radioaktiven Quelle

Definition des Risikos

Das Risiko (R) entspricht dem Produkt von Wirkung (I) und Eintrittswahrscheinlichkeit (P):

$$R = I \cdot P$$

In dem von uns betrachteten Fall entspricht die Wirkung der effektiven Dosis, der eine nichtberuflich strahlenexponierte Person ausgesetzt sein könnte. Die **Eintrittswahrscheinlichkeit** entspricht der Zahl der potenziellen Ereignisse pro Jahr. Wir haben uns an Artikel 94 StSV orientiert, der die akzeptablen bzw. nicht akzeptablen Risikobereiche anhand der Eintrittswahrscheinlichkeit (pro Jahr) und der effektiven Dosis (in mSv) festlegt. Im Gegensatz zu Artikel 94 StSV, der sich auf ein einzelnes Unternehmen bezieht, haben wir das gesamte Gebiet der Schweiz betrachtet. Die Matrix zur Beziehung zwischen Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung ist in Abbildung 1 dargestellt. Die verschiedenen Farben haben folgende Bedeutungen:

- Grüner Bereich: akzeptabel
- Gelber Bereich²: mittel
- Roter Bereich: inakzeptabel

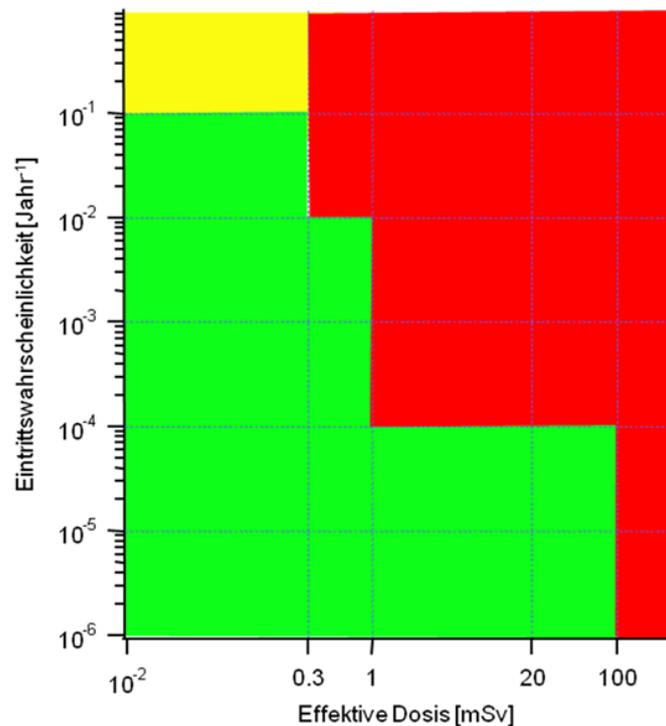


Abbildung 1: Matrix zum Strahlenrisiko. Angegeben ist die Eintrittswahrscheinlichkeit als Funktion der Wirkung (effektive Dosis). Der rote Bereich gilt nach Artikel 94 StSV als inakzeptabel

² Für eine genauere Übereinstimmung mit Artikel 94 StSV müsste die in dieser Matrix gelb dargestellte Fläche grün eingefärbt sein. Die Arbeitsgruppe ist jedoch der Ansicht, dass eine Situation, aus der häufiger als alle 10 Jahre effektive Dosen zwischen $10 \mu\text{Sv}$ und 0.3 mSv resultieren könnten, genauer untersucht werden sollte.

Betrachtete Wirkungen

Abbildung 2 zeigt das Schicksal einer radioaktiven Quelle in einer KVA. Es wurden nur die radiologischen Wirkungen nach Eintritt der Quelle in die KVA berücksichtigt. Bei den festen Rückständen des Verbrennungsvorgangs (dargestellt mit (1) und (2) in Abbildung 2) wurde davon ausgegangen, dass sich eine Person während 1 Stunde in einem Abstand von 1 m einer **externen Bestrahlung** exponiert ist. Für die flüchtigen radioaktiven Abfälle, welche durch die Filter hindurchtreten können, wurde angenommen, dass die gesamte betrachtete Aktivität in die Abluft der Anlage gelangen kann und dies eine **interne Kontamination** der Bevölkerung in der Umgebung zur Folge hat. Die Verteilung der radioaktiven Stoffe in der Luft wurde aufgrund der Richtlinie G14 des ENSI³ mit Unterstützung des PSI geschätzt (siehe Anhang 1). Für die Nuklide (vor allem im medizinischen Bereich), die nicht in der Richtlinie G14 vorkommen, wurde ein einfaches, von der SUVA entwickeltes Modell verwendet⁴ (siehe Anhang 1). Zur Festlegung der Größenordnungen wurde unter vorsichtigen Annahmen von einer Kaminhöhe von 50 m ausgegangen.

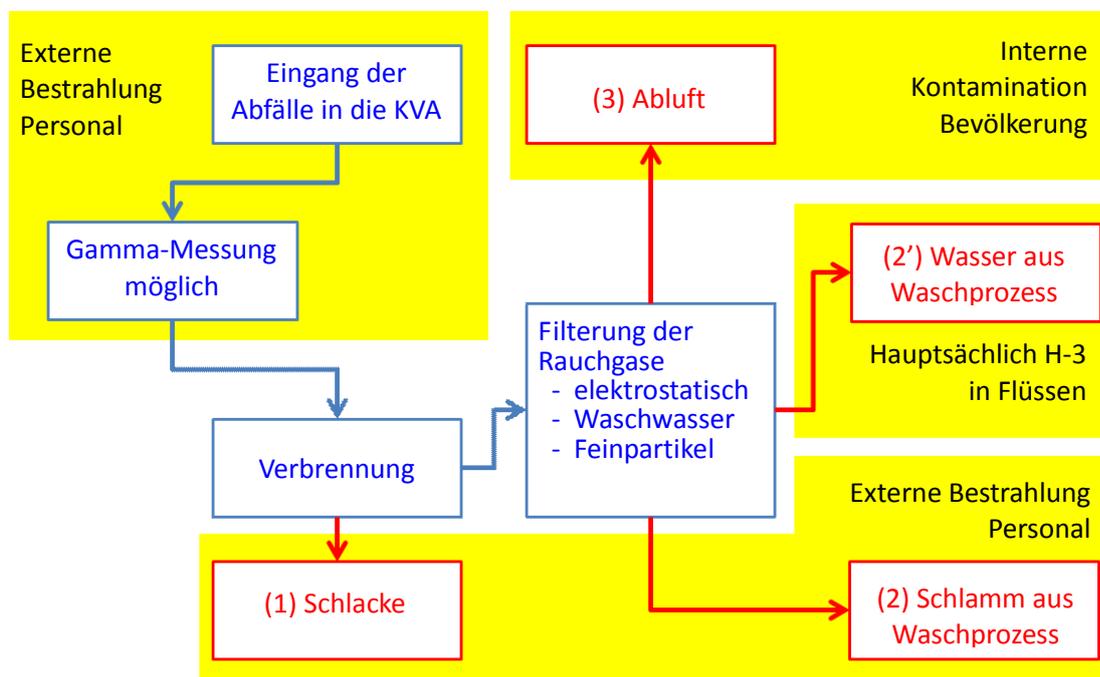


Abbildung 2: Allgemeines Schema zum Schicksal einer radioaktiven Quelle in einer Kehrichtverbrennungsanlage.

Abbildung 3 gibt einen Überblick zu den berücksichtigten Wirkungen bei der Verbrennung einer radioaktiven Quelle. Die effektive Folgedosis E_{50} für die Bevölkerung in der Umgebung wird aufgrund der aus dem Kamin austretenden Radioaktivität berechnet. Die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ für das (nichtberuflich strahlenexponierte) Personal wird anhand einer externen Bestrahlung verursacht durch die in der Schlacke und im Schlamm verbleibende Aktivität berechnet unter Beizug der Koeffizienten der StSV (Spalte 6 in Anhang 3 StSV).

³ Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, Richtlinie ENSI-G14. Ausgabe Februar 2008, Revision 1 vom 21. Dezember 2009.

⁴ Dokument der SUVA, Emission an die Abluft (SUVA), 18.10.2002

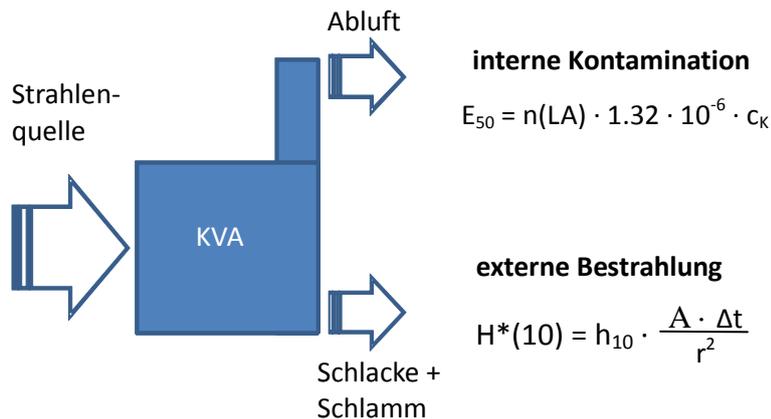


Abbildung 3 : Mögliche Wirkungen nach der Verbrennung einer radioaktiven Quelle

Eintrittswahrscheinlichkeit und betrachtete Szenarien

Eine Einschätzung des Risikos kann nur erfolgen, wenn die mit den Nukliden verbundenen Szenarien und die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens zuvor festgelegt werden. Dieses Vorgehen ist gezwungenermassen mit einer gewissen Subjektivität verbunden, welche die Arbeitsgruppe unter Berücksichtigung der folgenden Informationsquellen einzuschätzen versuchte:

- Von der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) gemeldete INES-Ereignisse
- Statistiken der Metallgiessereien und Metallrückgewinnungsbetriebe in der Schweiz, die über Strahlenmessgeräte verfügen
- Statistiken zu den Entsorgungsaktionen radioaktiver Abfälle des BAG
- Vom BAG geführte Liste der Strahlenquellen hoher Aktivität
- Maximale Aktivität in den nuklearmedizinischen Zentren

Genauere Angaben zu diesen Daten sind in Anhang 2 aufgeführt. Die Arbeitsgruppe hat entschieden, die Strahlenquellen der Atomindustrie nicht zu berücksichtigen, da sie für das Risiko im Zusammenhang mit den Kehrichtverbrennungsanlagen nicht relevant sind.

Wir haben drei wichtige Situationen unterschieden: **(1)** Regelmässige Ereignisse, die in Kehrichtverbrennungsanlagen bereits beobachtet wurden; **(2)** potenzielle Ereignisse, bei denen die in der Schweiz verzeichneten Quellen hoher Aktivität involviert sind und **(3)** potenzielle Ereignisse, bei denen hohe Aktivitäten der grossen nuklearmedizinischen Zentren in der Schweiz involviert sind. Obwohl auch dieser Fall bereits beobachtet wurde, haben wir aus dem Ausland kommende Quellen radioaktiver Strahlung nicht berücksichtigt. Die Variabilität innerhalb der Schweiz ist genügend gross, so dass die Ereignisse ausländischen Ursprungs in der gesamten Unsicherheit der nationalen Ereignisse eingeschlossen sind.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser drei unterschiedenen Situationen und die damit verbundenen typischen Aktivitäten werden nachfolgend geschätzt:

1. Aufgrund der in den vergangenen zehn Jahren beobachteten Ereignisse in Kehrichtverbrennungsanlagen der Schweiz lassen sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten **regelmässiger Ereignisse** schätzen. Da diese Ereignisse nur in KVA mit Strahlenmessgeräten festgestellt werden konnten, haben wir angenommen, dass die Situation grundsätzlich in allen KVA ähnlich ist, was eine wahrscheinlich eher vorsichtige Einschätzung ergab, da es sich bei den KVA mit Strahlenmessgeräten gleichzeitig eher um die grössten Anlagen handelt. Die

Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Ereignisse wurde für die Gesamtheit der KVA geschätzt, indem die bei 3 KVA beobachtete Häufigkeit mit dem Faktor 29/3 multipliziert wurde. Dadurch ergaben sich die folgenden Eintrittswahrscheinlichkeiten für die gesamte Schweiz und für regelmässige Ereignisse:

Nuklid	Typische Aktivität [MBq]	Bei 3 KVA beobachtete Häufigkeit	Eintrittswahrscheinlichkeit für die Gesamtheit der KVA in der Schweiz ⁵
I-131	10	2/Jahr	20/Jahr
Ra-226	200	1/5 Jahre	2/Jahr
Th-nat	2	1/10 Jahre	1/Jahr

2. Die INES-Ereignisse zeigen, dass sehr unterschiedliche radioaktive Materialien im Umlauf sind. Ausserdem können auch in stark reglementierten Ländern selbst Strahlenquellen hoher Aktivität, wie sie in der Gammagrafie oder Brachytherapie verwendet werden, verloren gehen oder entwendet werden. Es lässt sich a priori nicht ausschliessen, dass eine solche Strahlenquelle eines Tages in eine Kehrriechverbrennungsanlage gelangt. Solche **Ereignisse** werden als **potenziell** erachtet und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich nicht auf der Grundlage von beobachteten Häufigkeiten abschätzen. Die Arbeitsgruppe schlägt vor, die Wahrscheinlichkeit, dass eine vom **BAG verzeichnete Strahlenquelle hoher Aktivität** in eine Kehrriechverbrennungsanlage gelangt, bei 1/10'000 Jahren festzulegen⁶. Bei den in der Schweiz erfassten Quellen hoher Aktivität handelt es sich mehrheitlich (90%) um Am-241, Co-60, Cs-137 und Ir-192. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden berechnet, indem die Zahl der Quellen mit der Wahrscheinlichkeit 1/10'000 Jahren multipliziert wurde. Für die gesamte Schweiz und für alle potenziellen Ereignisse, die Quellen hoher Aktivität betreffen, wurden folgende Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnet:

Nuklid	Typische Aktivität ⁷ [MBq]	Anzahl Quellen in der Schweiz ⁸	Eintrittswahrscheinlichkeit für die Gesamtheit der KVA in der Schweiz ⁹
Co-60	9'000	270	1/27 Jahre
Cs-137	70'000	149	1/67 Jahre
Ir-192	100'000	110	1/91 Jahre
Am-241	5	291	1/34 Jahre

3. Zusätzlich zu den vom BAG verzeichneten Strahlenquellen hoher Aktivität wird auch die potenziell auftretende Situation berücksichtigt, bei der die gesamte Aktivität eines bestimmten Radionuklids aus einem **grossen nuklearmedizinischen Zentrum** in eine Kehrriechverbrennungsanlage gelangt. Auch hier wird für ein gegebenes Nuklid davon ausgegangen, dass es mit einer Wahrscheinlichkeit von 1/10'000 Jahre fälschlicherweise oder durch böswillige Absicht in eine KVA gelangen kann. Aus der Tatsache, dass es in der Schweiz 9 grosse nuklearmedizinische Zentren gibt¹⁰, lässt sich eine Wahrscheinlichkeit von 1/1'111

⁵ Häufigkeit bei 3 KVA dividiert durch 3 und multipliziert mit der Anzahl KVA in der Schweiz.

⁶ Für eine Grössenvorstellung: 10'000 Jahre sind mit dem Zeitraum vergleichbar, der seit der Erbauung der Pyramiden von Gizeh verstrichen ist (4500 Jahre).

⁷ Es wurden 100'000 LA berücksichtigt.

⁸ Es wurde das Verzeichnis des BAG vom 22.02.2010 berücksichtigt, das 920 Quellen hoher Aktivität umfasst.

⁹ 1/10'000 Jahre pro Quelle multipliziert mit der Anzahl Quellen in der Schweiz.

¹⁰ Genf (1), Lausanne (1), Bern (1), Aarau (1), Basel (1), Zürich (3), St. Gallen (1)

Jahre ableiten. Das ergibt folgende Eintrittswahrscheinlichkeiten für die gesamte Schweiz und für potenziell auftretende Ereignisse im Zusammenhang mit Strahlenquellen hoher Aktivität aus nuklearmedizinischen Zentren:

Nuklid	Typische Aktivität [MBq]	Eintrittswahrscheinlichkeit für die Gesamtheit der KVA in der Schweiz
F-18	10'000	1/1'111 Jahre für jedes Nuklid
Ga-68	1'400	
Tc-99m	100'000	
In-111	370	
I-123	740	
I-125	185	
I-131	7'400	
Sm-153	4'000	
Re-186	400	

Abschätzung der Wirkungen

Welcher Anteil der Radionuklide über die Kamine abgegeben wird, hängt ab von Faktoren wie die Temperatur, der eingesetzte Rauchgas-Waschprozess oder die chemische Form. Bestimmte Radionuklide, wie zum Beispiel Am, Th, Re, Tc, Ir, Co oder Sm, werden so gut wie nie mit der Abluft emittiert werden (ohne schwerwiegende technische Ausfälle). Andere werden mit hoher Wahrscheinlichkeit vollständig oder teilweise mit der Abluft abgegeben, wie zum Beispiel C, I, Cs, In, Te, Ga. Tritium liegt zu 99% in Form tritiumhaltigen Wassers vor. Wir haben die Wirkungen für die beiden folgenden Extremsituationen berechnet: Die Inkorporation, wenn die flüchtigen Nuklide in die Abluft gelangen, und die externe Bestrahlung in 1 m Entfernung während einer Stunde, wenn angenommen wird, dass die nicht-flüchtigen Nuklide vollständig in der Schlacke verbleiben.

1. Regelmässige Ereignisse

Nuklid	Halbwertszeit	Aktivität [MBq]	E ₅₀ [mSv] 100% in Abluft	H*(10) [mSv] 100% in Schlacke
I-131	8.04 d	10	0.0009	-
Ra-226	1600 a	200	-	0.0002
Th-nat	1.4E10 a	2	-	0.00071

2. Potenziell auftretende Ereignisse mit Strahlenquellen hoher Aktivität

Nuklid	Halbwertszeit	Aktivität [MBq]	E ₅₀ [mSv] 100% in Abluft	H*(10) [mSv] 100% in Schlacke
Am-241	432.2 a	5	-	0.000095
Co-60	5.271 a	9'000	-	3.294
Cs-137	30.0 a	70'000	10.6	6.4
Ir-192	74.02 d	100'000	-	13.1

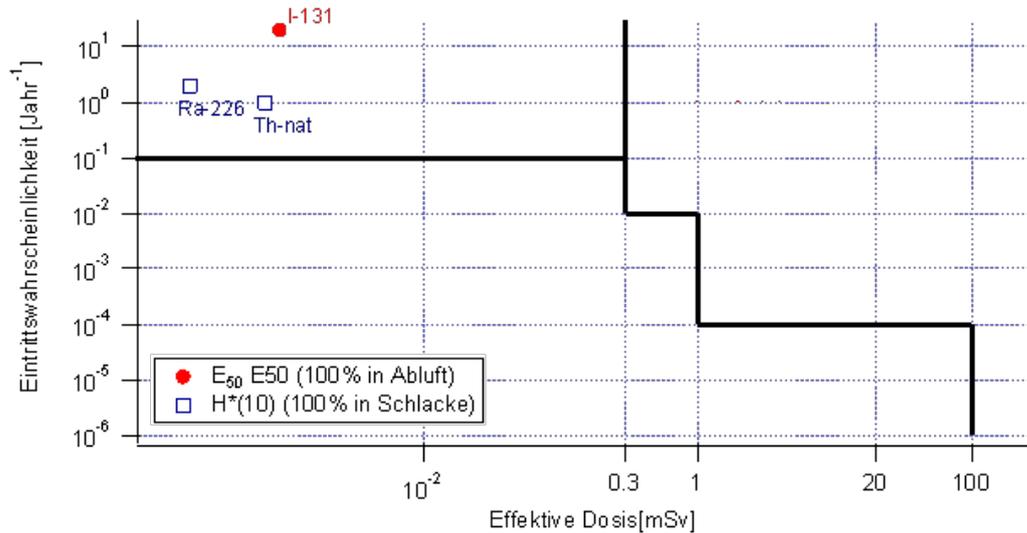
3. Potenziell auftretende Ereignisse mit Strahlenquellen aus den grossen nuklearmedizinischen Zentren

Nuklid	Halbwertszeit	Aktivität [MBq]	E ₅₀ [mSv] 100% in Abluft	H*(10) [mSv] 100% in Schlacke
F-18	109.77 m	10'000	~0	-
Ga-68	68.0 m	1'400	0.0019	0.21
Tc-99m	6.02 h	100'000	-	2.2
In-111	2.83 d	370	0.0015	0.030
I-123	13.2 h	740	~0	-
I-125	60.14 d	185	0.012	-
I-131	8.04 d	7'400	0.51	-
Sm-153	46.7 h	4'000	0.048	0.064
Re-186	90.64 h	400	-	0.0016

Abschätzung der Risiken

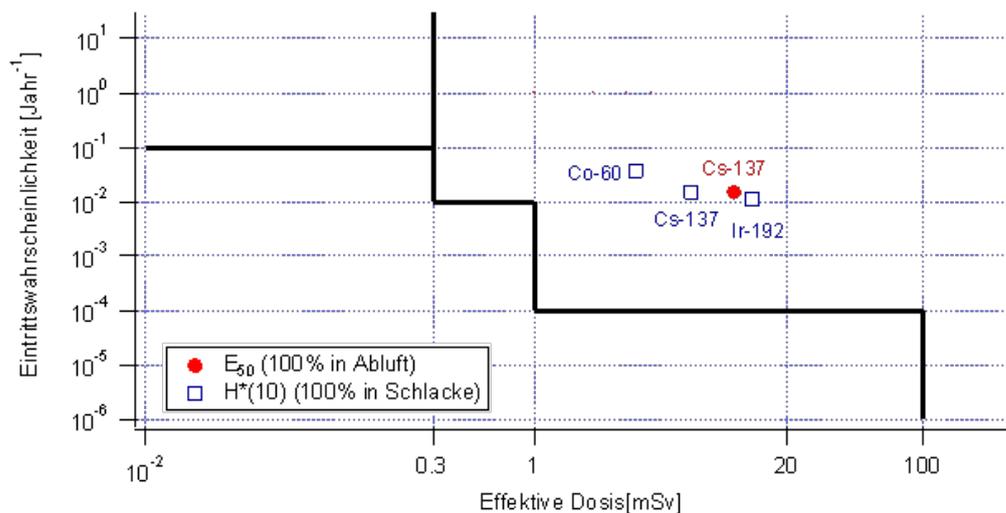
Die Werte für die Eintrittswahrscheinlichkeiten und für die Wirkung wurden für die drei betrachteten Situationen mit der Risikomatrix von Abbildung 1 dargestellt .

1. Regelmässige Ereignisse



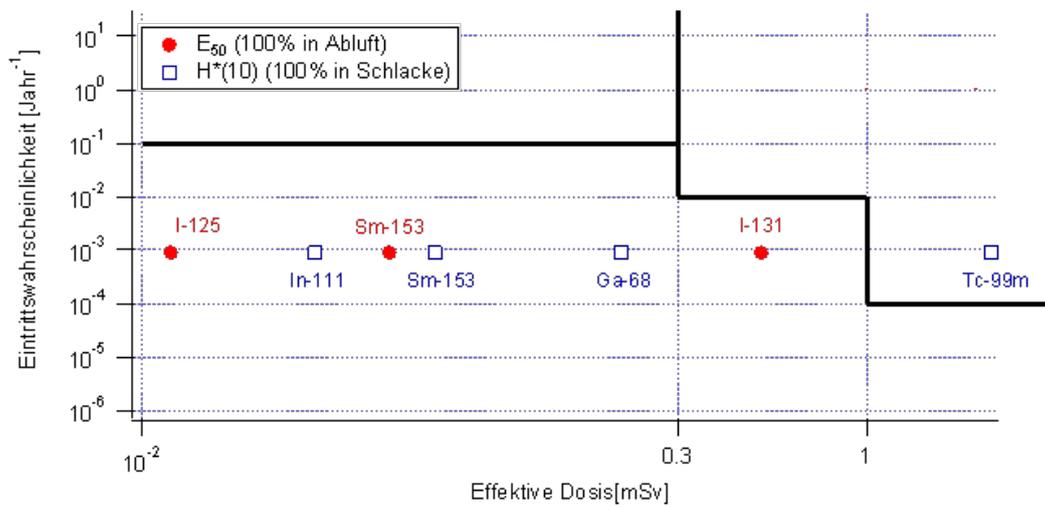
- Es lässt sich feststellen, dass sich das Risiko im mittleren Bereich bewegt, wenn I-131 vollständig in die Abluft gelangt oder wenn sich Ra-226 oder Th-nat in der Schlacke befindet.

2. Potenziell auftretende Ereignisse mit Strahlenquellen hoher Aktivität



- Mit Ausnahme des Werts für Americium in der Schlacke (nicht in dieser Grafik dargestellt, da die effektive Dosis weniger als 0,01 mSv beträgt) liegen alle Werte im Bereich eines inakzeptablen Risikos.

3. Potenziell auftretende Ereignisse mit Strahlenquellen aus den grossen nuklearmedizinischen Zentren



- Alle Werte sind im akzeptablen Bereich, ausser Tc-99m in der Schlacke.

4. Zusammenfassung der Risiken

- Die Verbrennung flüchtiger Radionuklide (I-131, Cs-137) kann zu problematischen oder inakzeptablen Risiken für die Bevölkerung führen.
- Durch nicht-flüchtige Gammanuklide kann es zu inakzeptablen Risiken für die Mitarbeitenden der Kehrlichtverbrennungsanlagen kommen.

3 Schlussfolgerungen

- Falls die Vorschriften von den Bewilligungsinhabern eingehalten werden, sollte es bei den KVA keine Probleme geben.
 - Die Anwender von radioaktiven Quellen müssen die rechtlichen Vorschriften einhalten und sicherstellen, dass diese Quellen richtig entsorgt werden.
 - Die Behörden müssen sich in diesem Bereich vor allem auf die Weiterverfolgung der Quellen bei den Bewilligungsinhabern konzentrieren.
- Die im vorliegenden Bericht untersuchten Bestrahlungsszenarien bei der Verbrennung radioaktiver Abfälle zeigen, dass dabei inakzeptable Risiken entstehen könnten.
- Messungen bei der Anlieferung von Abfällen in die KVA sind aus folgenden Gründen sinnvoll:
 - Es lassen sich damit inakzeptable Risiken vermeiden, die von radioaktiven Quellen mit Gammastrahlung ausgehen.
 - Dies hat indirekt auch Auswirkungen auf die Präventionsmassnahmen bei den Anwendern der Quelle: Die Tatsache, dass ein Verstoss festgestellt werden kann, ist für die Anwender radioaktiver Quellen Anlass, die Vorschriften künftig einzuhalten.
 - Dies kann das Vertrauen der Bevölkerung in die KVA stärken.
- Die Grenzen eines solchen Detektionssystems müssen klar kommuniziert werden. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass Strahlenmesstore Quellen mit Alpha- oder Beta-Strahlung nur dann identifizieren können, wenn diese auch Gammastrahlung oder hochenergetische Bremsstrahlung abgeben.
- Empfehlungen:
 - KVA sollten bei der Anlieferung das Vorhandensein von Gammastrahlung in den Abfällen messen können.
 - KVA sollten Strahlungsmessungen in ihr Qualitätssicherungsprogramm aufnehmen. Dies bedeutet insbesondere, dass sie klare Verfahren festlegen und ihr Personal entsprechend schulen müssen.
 - Es soll in Zusammenarbeit mit den Behörden eine einheitliche Vorschrift zum Kontrollprozess (Nachweisgrenze, Alarmschwelle usw.) und das Vorgehen beim Feststellen radioaktiver Strahlung festgelegt werden.
 - Das Merkblatt L-10-01 des BAG sollte entsprechend angepasst werden.
 - Es sollte die Schaffung eines Fonds erwogen werden, mit dem die Kosten für das Auffinden und die Entsorgung einer radioaktiven Quelle gedeckt werden können, wenn der Urheber nicht gefunden werden kann (ein guter Ausgangspunkt könnte das belgische Modell sein).
 - Die Gesetzgebung zum Strahlenschutz sollte gegebenenfalls entsprechend angepasst werden (insbesondere die Empfehlung oder Verpflichtung zur Messung und die Schaffung eines Fonds).
 - Es sollte eine Ausweitung auf Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle, Zementwerke und andere Müllverwertungsanlagen (Mülldeponien) in Betracht gezogen werden, basierend auf den gemachten Erfahrungen aus den Messungen bei den KVA.

Anhang 1: Berechnung der effektiven Folgedosis für die Bevölkerung in der Nähe einer Kehrlichtverbrennungsanlage

1.A Berechnungen gemäss dem SUVA-Modell

Nachfolgend ist das SUVA-Dokument «Emission an die Abluft» vom 18.10.2002 aufgeführt, das im vorliegenden Bericht zur Schätzung der effektiven Folgedosis E_{50} im Anschluss einer gasförmigen Emission durch ein Kamin verwendet wurde.

Emission an die Abluft

1. Abschätzung der Konzentration in der Luft

$$c = \chi_k \cdot Q$$

C = Luftkonzentration am kritischen Ort gemäss Tabelle 1 (Bq/m^3)

χ_k = Kurzzeit Ausbreitungsfaktor, gemäss Tabelle 1 [s/m^3]

Q = Quellterm, abgegebene Aktivität pro Zeiteinheit [Bq/s]

2. Dosisabschätzung

Effektive Folgedosis E_{50} durch Inhalation von radioaktiven Stoffen am kritischen Ort. Es spielt keine Rolle in welchem Zeitintervall der radioaktive Stoff an die Abluft abgegeben wird, vorausgesetzt die Person hält sich dauernd am kritischen Ort auf und der Kurzeitenausbreitungsfaktor (Windrichtung, Windgeschwindigkeit) ändern sich nicht (Ableitung der Formel, siehe Anhang).

$$E_{50} = n(LA) \cdot 1.32 \cdot 10^{-6} \cdot \chi_k$$

E_{50} = effektive Folgedosis nach Inhalation [Sv]

$n(LA)$ = Anzahl Bewilligungsgrenzen, die an die Abluft abgegeben werden

χ_k = max. Kurzeitenausbreitungsfaktor [s/m^3]

Abgabehöhe	χ_k	kritischer Ort	Wetterkategorien
100 m	$1.4 \cdot 10^{-5} s/m^3$	500 m	schwach labil
50 m	$6.3 \cdot 10^{-5} s/m^3$	200 m	schwach labil
35 m	$1.1 \cdot 10^{-4} s/m^3$	200 m	neutral
30 m	$1.5 \cdot 10^{-4} s/m^3$	200 m	neutral
25 m	$2.2 \cdot 10^{-4} s/m^3$	100 m	schwach labil
20 m	$3.4 \cdot 10^{-4} s/m^3$	100 m	schwach labil
15 m	$5.3 \cdot 10^{-4} s/m^3$	100 m	neutral

Tabelle 1: Für die verschiedenen Wetterkategorien und Abgabehöhen wird der ungünstigste Kurzeitenausbreitungsfaktor χ_k für eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s angegeben. Für höhere Windgeschwindigkeiten ist χ_k durch die Windgeschwindigkeit zu dividieren.

Bemerkungen: Die effektive Folgedosis wird überschätzt wenn Langzeitabgaben berechnet werden sollen, da der Kurzzeitausbreitungsfaktor nur eine Windrichtung mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von nur 1 m/s berücksichtigt.

3. Effektive Folgedosis E_{50} nach Abgabe von 1 GBq an die Abluft

Es wird die effektive Folgedosis nach Inhalation berechnet (Ausnahme C-14 Ingestion). Für die „Inhalationsdosis“ spielt es keine Rolle in welchem Zeitintervall der radioaktive Stoff an die Abluft abgegeben wird, wenn sich die Person dauernd am kritischen Ort (Tab. 1) aufhält (Ausnahme: C-14 Ingestion).

Nuklid	n(LA)/GBq	Abgabehöhe			
		15 m	25 m	50 m	100 m
HTO	3.3	2 nSv	1 nSv	300 pSv	60 pSv
C-14 (markiert)	111	80 nSv	30 nSv	9 nSv	2 nSv
$^{14}\text{CO}_2$	1.25	1 nSv	400 pSv	100 pSv	20 pSv
I-125	1'430	1 μSv	400 nSv	120 nSv	30 pSv
Am-241	$5.0 \cdot 10^6$	3.5 mSv	1.5 mSv	400 μSv	90 μSv
Ra-226	$5.0 \cdot 10^5$	350 μSv	150 μSv	40 μSv	9 μSv
Sr-90	$1.7 \cdot 10^4$	12 μSv	5 μSv	1 μSv	300 nSv
C-14 Ing. *)		540 nSv/a	220 nSv/a	70 nSv/a	10 nSv/a

*) Es wird angenommen, dass eine erwachsene Person während einem Jahr täglich 600 g Gemüse und Obst¹¹ konsumiert (entsprechend 90 g Kohlenhydrate bzw. 32 g resorbierbarer Kohlenstoff), das am kritischen Ort angebaut wurde.

Ableitung

Luftkonzentration

$$C = Q \cdot \chi_K \text{ [Bq/m}^3\text{]} \quad (1)$$

C = Luftkonzentration \cdot [Bq/m³]

Q = Quellterm, abgegebene Aktivität pro Zeiteinheit [Bq/s]

χ_K = Kurzzeit Ausbreitungsfaktor gemäss Tabelle 1 [s/m³]

$$Q = A/T \text{ [Bq/s]} \quad (2)$$

A = abgegebene Aktivität [Bq]

T = Zeitdauer der Abgabe [s]

Dosisabschätzung

$$E_{50} = C \cdot V \cdot e_{\text{inh}} \quad (3)$$

E_{50} = effektive Folgedosis [Sv]

V = eingeatmetes Luftvolumen [m³]

e_{inh} = Dosisfaktor Inhalation [Sv/Bq]

$$V = 2.64 \cdot 10^{-4} \cdot T \text{ [m}^3\text{]} \quad (4)$$

$2.64 \cdot 10^{-4}$ = Atemrate des «Reference Man» [m³/s]

¹¹ NAZ Bericht aus dem Jahr 1988 (200g/Tag Gemüse, 100 g/Tag Kartoffeln, 300 g/Tag Obst).

T = Zeitdauer Atmen [s]

$$A = \frac{n(LA) \cdot 0.005}{e_{inh}} \text{ [Bq]} \quad (5)$$

n(LA) = Anzahl Bewilligungsgrenzen

0.005 = effektive Folgedosis [Sv], wenn 1 LA eingeatmet wird

1 + 2

$$C = \frac{A}{T} \cdot \chi_K \text{ [Bq/m}^3\text{]} \quad (6)$$

3 + 4

$$E_{50} = C \cdot 2.64 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot e_{inh} \text{ [Sv]} \quad (7)$$

5 + 6

$$C = \frac{n(LA) \cdot 0.005 \cdot \cancel{S}_K}{e_{inh} \cdot T} \quad (8)$$

7 + 8

$$E_{50} = \frac{n(LA) \cdot 0.005 \cdot \cancel{S}_K \cdot 2.64 \cdot 10^{-4} \cdot \cancel{T} \cdot \cancel{e}_{inh}}{\cancel{e}_{inh} \cdot \cancel{T}}$$

$E_{50} = n(LA) \cdot 1.32 \cdot 10^{-6} \cdot \chi_K \text{ [Sv]}$

1.B Berechnungen gemäss der Richtlinie IFSN/ENSI G14

Die Berechnungen wurden von Olaf Gebhardt vom PSI durchgeführt.

Ausbreitungsfaktoren für verschiedene effektive Abgabehöhen: 25m, 50m, 100m

Maximum aus 3 Immissionspunkten: 100m, 200m, 500m

Bevölkerungsgruppen: Einjährige und Erwachsene; Topologie: Flaches Gelände

Höhe	25 m	50 m	100 m
Nuklid	MAXD_tot	MAXD_tot	MAXD_tot
	Sv/Bq	Sv/Bq	Sv/Bq
H-3	4.40E-18	1.25E-18	2.79E-19
C-14	2.10E-15	5.98E-16	1.33E-16
F-18	1.64E-17	7.34E-18	2.73E-18
Co-60	1.05E-13	5.06E-14	2.14E-14
Sr-90	3.78E-13	1.75E-13	7.19E-14
Tc-99m	7.40E-18	3.37E-18	1.31E-18
I-123	2.00E-16	6.83E-17	2.06E-17
I-125	2.02E-13	6.89E-14	2.09E-14
I-131	2.54E-13	8.67E-14	2.62E-14
Cs-137	3.29E-13	1.52E-13	6.25E-14
Re-186	1.12E-15	5.08E-16	2.06E-16
Ir-192	5.44E-14	2.54E-14	1.05E-14
Ra-226	6.48E-12	2.97E-12	1.21E-12
Am-241	3.34E-12	1.14E-12	3.42E-13

Anhang 2: Inventar der radioaktiven Quellen, die sich möglicherweise im angelieferten Abfall bei einer Kehrichtverbrennungsanlage befinden können

In diesem Anhang soll ein Inventar der Aktivitäten zusammengestellt werden, die möglicherweise in eine Kehrichtverbrennungsanlage gelangen könnten. Wir haben die folgenden Situationen berücksichtigt:

1. INES-Ereignisse, die in den vergangenen 10 Jahren an die IAEO gemeldet wurden;
2. Ereignisse, die in der Schweiz in den vergangenen Jahren in Kehrichtverbrennungsanlagen beobachtet wurden;
3. Ereignisse, die in der Schweiz in den vergangenen Jahren in Metallgiessereien und bei Schrotthändlern beobachtet wurden;
4. Entsorgungsaktionen des BAG;
5. vom BAG verzeichnete Strahlenquellen hoher Aktivität;
6. in nuklearmedizinischen Zentren verfügbare maximale Aktivitäten;
7. in Laboratorien in der Schweiz potenziell vorhandene maximale Aktivitäten.

Im vorliegenden Bericht wurden nur die Punkte 2, 3, 5 und 6 für die Abschätzungen der Risiken direkt verwendet.

INES-Ereignisse

Es wurden alle INES-Ereignisse der vergangenen 10 Jahre (01.01.2000 bis 13.08.2010) untersucht. Berücksichtigt wurden die Ereignisse mit einer Strahlenquelle, bei denen die Quelle möglicherweise in die Abfallentsorgung gelangen könnte.

Diese Ereignisse sind interessant, da es sich um einen Teil der wirklich vorgefallenen Ereignisse handelt, nämlich diejenigen, die zu einer Meldung an die IAEO führten. Zu beachten ist jedoch, dass es sich nur um einen Bruchteil der tatsächlich stattgefundenen Ereignisse handelt, da die Meldung von INES-Ereignissen freiwillig ist. Im untersuchten Zeitraum wurde kein in der Schweiz aufgetretenes Ereignis gemeldet¹², obwohl hier eine radioaktive Quelle in einem Spital verloren gegangen ist und regelmässig Strahlenquellen bei Schrotthändlern und in Kehrichtverbrennungsanlagen festgestellt werden.

Die detaillierten Daten zu jedem gemeldeten Ereignis sind unten in chronologischer Reihenfolge aufgeführt. Daraus lassen sich die folgenden wichtigsten Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Rotterdamer Hafen ist Drehscheibe eines Grossteils der nach Westeuropa eingeführten Waren. Die gemeldeten Beispiele zeigen, dass sich radioaktive Quellen in **sehr vielfältigen Materialien** befinden können und nicht nur in Altmetall.
- Verluste von **per Flugzeug transportierten** radioaktiven Sendungen (im Allgemeinen medizinischer Bestimmung) werden nur durch Frankreich gemeldet. Diese Quellen können im Allgemeinen nicht mehr aufgefunden werden. Es gibt keinen Grund zur Annahme, dass sich dies in den anderen Ländern nicht ähnlich verhält. Deshalb muss in Betracht gezogen

¹² Im untersuchten Zeitraum hat die Schweiz allerdings 5 Ereignisse im Zusammenhang mit dem Betrieb der Kernreaktoren und ein Problem mit den Vorschriften für den Transport zwischen der ETHZ und dem PSI gemeldet.

werden, dass per Flugzeug transportierte Quellen auch in der Schweiz verloren gehen können.

- Mehrere Beispiele zeigen, dass radioaktive Quellen auch «irrtümlich» gestohlen werden können, z.B. wenn sich eine Quelle in einem Fahrzeug befindet. Nach einem Diebstahl kann die **gestohlene Quelle** in die Abfallentsorgung gelangen.
- Strahlenquellen für die **Gammagrafie** gehen hauptsächlich in Indien verloren oder werden dort gestohlen. Es wurden jedoch auch Fälle in Italien, Griechenland, den USA, Japan, Peru und Ägypten gemeldet. Es lässt sich deshalb nicht ausschliessen, dass dies auch in der Schweiz vorkommen kann.
- Die am häufigsten betroffenen Radionuklide waren **Cs-137 und Ir-192**. Folgende Nuklide waren involviert (aufgeführt in absteigender Reihenfolge ihrer Häufigkeit und mit der jeweiligen Aktivität):
 - Cs-137 (20) (max. 70'000 MBq)
 - Ir-192 (17) (max. 3'700'000 MBq)
 - I-125 (4) (max. 28 MBq)
 - Co-60 (3) (max. 200'000 MBq)
 - I-131 (3) (max. 5'150 MBq)
 - Sr-90 (3) (max. 4'600 MBq)
 - Am/Be (2) (max. 300'000 MBq)
 - Am-241(2) (max. 1'480 MBq)
 - Eu-152 (2) (max. 7'200 MBq)
 - Mo-99 (1) (max. 52'000 MBq)
 - Pm-147(1) (max. 185'000 MBq)
 - Rh-186 (1) (max. 374 MBq)
 - Th-201 (1) (max. 30'800 MBq)
 - U (1) (max. 1.1 MBq)

Nuklid	Aktivität [MBq]	Datum	Beschreibung des Ereignisses	Betroffenes Land	Herkunftsland
Co-60	200000	08/2010	mit Co-60 kontaminiertes Metall im Hafen von Genua	Italien	Saudiarabien
Cs-137	9000	08/2009	Kontamination in einer Garage 0.81mSv/h (bei d=1m, A=9GBq)	Armenien	
Am/Be	300000	08/2009	Diebstahl einer Quelle an der Universität Birschand im Iran	Iran	
Cs-137	480	06/2009	Holz aus Litauen, gemessen in Aosta (Italien); 300 Bq/kg; 1.6 Millionen kg.	Italien	Litauen
Am-241	0.04	12/2008	vom armenischen Zoll konfiszierte Quelle	Armenien	
Ir-192	370000	04/2008	Diebstahl einer Quelle für die Gammagrafie in Chiba (Japan); Quelle später in einem Fluss aufgefunden	Japan	
Co-60	38	09/2007	Fund von Plastiktaschen mit kontaminierten Metallringen am Rotterdamer Hafen (25 kBq Co-60 pro Tasche)	NL	Indien
Ir-192	600000	08/2007	Diebstahl einer Quelle für die Gammagrafie; Quelle nicht wiederaufgefunden	Indien	
Ir-192	1850000	04/2007	Diebstahl einer Quelle für die Gammagrafie; Quelle nicht wiederaufgefunden	Indien	
Co-60	1.6	12/2006	Fund von Plastiktaschen mit kontaminierten Metallringen am Rotterdamer Hafen (38 kBq Co-60 pro Tasche)	NL	Indien
Cs-137	1110	04/2007	Fund einer Cs-137-Quelle in der Original-Abschirmung mit Resten rezyklierten Metalls	Libanon	

Nuklid	Aktivität [MBq]	Datum	Beschreibung des Ereignisses	Betroffenes Land	Herkunftsland
			am Hafen von Tripolis (Libanon)		
Cs-137	70000	02/2007	Fund einer Strahlenquelle bei einem Metallhändler	NL	Iran
Ir-192	290000	11/2006	Verlust einer Quelle für die Gammagrafie; Quelle nicht wiederaufgefunden	Indien	
Cs-137	9250	11/2006	Diebstahl einer Strahlenquelle in der Kohlenindustrie	Indien	
I-125	0.258	09/2006	Verlust einer Strahlenquelle beim Lufttransport zwischen Frankreich und Österreich	Frankreich	Österreich
Ir-192	3700000	09/2006	Diebstahl eines Lastwagens mit einer Quelle in Texas (USA); Lastwagen und Quelle wurden 3 Tage später in 5 km Entfernung aufgefunden	USA	
Ir-192	500000	05/2006	Verlust einer mit dem Fahrrad transportierten Quelle für die Gammagrafie; Quelle nicht wiederaufgefunden	Indien	
Mo-99	52000	07/2006	Verlust einer Strahlenquelle beim Lufttransport zwischen Frankreich, Belgien und Spanien	Frankreich	Spanien
Cs-137	4000	06/2006	Fund einer Strahlenquelle in Altmetall im Hafen von Rotterdam	NL	
I-131	5150	05/2006	Verlust einer Strahlenquelle beim Lufttransport zwischen Frankreich und Tunesien	Frankreich	Tunesien
Ir-192	1920000	11/2005	Diebstahl einer Quelle für die Gammagrafie; Fahrzeug und Quelle wurden 3 Monate später in 150 km Entfernung wieder aufgefunden	Italien	
Ir-192	1860000	08/2005	Verlust einer Quelle für die Gammagrafie; Quelle nicht wiedergefunden	Indien	
Cs-137	11100	04/2005	Fund von drei Strahlenquellen in Altmetall im Hafen von Rotterdam	NL	
Ir-192	1630000	05/2005	Verlust einer Strahlenquelle im Meer (Louisiana, USA); Bergung nicht möglich	USA	
Eu-152	7200	11/2004	Fund einer Strahlenquelle in Altmetall	Slowenien	Kroatien
I-125	0.477	09/2004	Verlust einer Strahlenquelle am Flughafen Prag	Tschechische Republik	
U	1.1	09/2004	Verlust einer Strahlenquelle (Uranium-Hexafluorid) während des Transports	Frankreich	
Cs-137	4.3	09/2004	Diebstahl von 2 Strahlenquellen in einer Mine	Chile	
I-125	1.43	09/2004	Verlust einer Strahlenquelle beim Lufttransport	Frankreich	Kuba
Rh-186	374	02/2004	Verlust einer Strahlenquelle beim Lufttransport	Frankreich	Deutschland
Ir-192	1856000	03/2004	Diebstahl von 4 Quellen; die Quellen wurden 4 Monate später unbeschädigt wiedergefunden	Italien	
Cs-137	11710	12/2003	Verlust einer Strahlenquelle bei der Renovation einer Lagerhalle in Louisiana; Quelle wurde nicht wiedergefunden	USA	

Sr-90	4600	11/2003	Fund einer Strahlenquelle in Altmetall in Rotterdam	NL	Nigeria
Cs-137	2500	07/2003	Fund einer Strahlenquelle in Altmetall	Slowenien	
Cs-137	4000	08/2003	Fund einer Strahlenquelle in Altmetall in Rotterdam	NL	Venezuela
Cs-137 Am-241	296 1480	04/2003	Diebstahl von zwei Strahlenquellen aus einem Lieferwagen in Lima; Quellen wurden nicht wiedergefunden	Peru	
Ir-192	138000	04/2003	Diebstahl einer Quelle für die Gammagrafie; Quelle nicht wiedergefunden	Indien	
Cs-137	1450	01/2003	Verlust einer Strahlenquelle in einem Spital; Quelle wurde in einer 60 km entfernten Abfalldeponie in 2m Tiefe wieder aufgefunden	Peru	
Cs-137	300	10/2002	Diebstahl einer Strahlenquelle; Quelle intakt wieder aufgefunden	GB	
Sr-90	940	08/2002	Fund von 9 Quellen in Rotterdam (Aktivitäten zwischen 71 und 138 MBq)	NL	Armenien
Eu-152	2000	07/2002	Fund einer Strahlenquelle bei einem holländischen Metallhändler	NL	Deutschland oder Tschech. Republik
Ir-192	730000	07/2002	Quelle für die Gammagrafie in einem Bus für den öffentlichen Transport vergessen und nie wiedergefunden	Indien	
Cs-137	44000	05/2002	Quelle ohne Abschirmung auf einer Baustelle in Montana vergessen und 2 Tage später wieder aufgefunden	USA	
Ir-192	9250	04/2002	Verlust einer Strahlenquelle eines Spitals in Alabama; Quelle wurde schnell in 3m Tiefe in einer Mülldeponie wieder aufgefunden	USA	
Ir-192	150000	01/2002	Verlust einer Quelle auf einer Baustelle; Quelle in der Abschirmung eine Woche später in 400m Entfernung von der letzten Verwendung unter Trümmern wieder aufgefunden	Griechenland	
Cs-137 Am/Be	296 1480	01/2002	Diebstahl von Quellen bei einem offiziellen Transport	Peru	
Cs-137	740	01/2002	Quelle in Altmetall wiederaufgefunden	Griechenland	
Ir-192	370000	10/2001	Diebstahl eines Lastwagens mit der transportierten Quelle; Quelle nicht wiederaufgefunden	Belgien	
Sr-90	16	07/2001	Fund einer Quelle unbekannter Herkunft in Rotterdam	NL	
Cs-137	1480	12/2000	Fund einer Quelle in einer Stahlproduktionsfabrik	Griechenland	
I-131	3470	11/2000	Verlust eines per Flugzeug transportierten Pakets	Frankreich	Griechenland
Th-201	30800	11/2000	Verlust eines per Flugzeug transportierten Pakets	Frankreich	Ungarn
Ir-192	11100	09/2000	Fund einer Quelle auf der Strasse durch einen Chauffeur; Quelle nicht wiedergefunden	Peru	
Cs-137	1000	09/2000	Fund einer Strahlenquelle in Altmetall in Rotterdam	NL	Ägypten
Cs-137	2701	06/2000	Verlust einer Quelle in einem Spital; Quelle	Indien	

trotz Durchsuchen des Mülls nicht wiedergefunden					
I-131	2180	06/2000	Verlust eines per Flugzeug transportierten Pakets	Frankreich	Spanien
Ir-192	1480000	06/2000	Fund einer gestohlenen Strahlenquelle in einem Wohnhaus; 2 Personen aufgrund der Strahlung verstorben und 2 Personen ernsthaft erkrankt	Ägypten	
I-125	28	05/2000	Verlust von drei Quellen (3x 9.25 MBq) beim Lufttransport	Frankreich	
Pm-147	185000	03/2000	Verlust einer Quelle beim Transport	Frankreich	

Statistiken der Kehrichtverbrennungsanlagen

Nachfolgend ist eine Schätzung dazu aufgeführt, wie häufig radioaktive Quellen in **drei Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen** mit Strahlenmessgeräten nachgewiesen werden. Diese Schätzung beruht auf den beim BAG eingegangenen Meldungen. Wenn zusätzlich die Beobachtungen aus Lausanne und Genf berücksichtigt werden, lässt sich feststellen, dass nuklearmedizinische Zentren immer wieder irrtümlich Abfälle im Zusammenhang mit Diagnostika oder therapeutischen Produkten unsachgemäss entsorgen.

Da nur ein geringer Teil der KVA über Strahlenmessgeräte verfügt, ist die Zahl der Vorfälle in Wirklichkeit sicher grösser.

Schätzung des BAG aufgrund der gemeldeten Fälle

Nuklid	Beschreibung des Ereignisses	Typische Aktivität [MBq]	Häufigkeit des Nachweises
I-131	Abfälle aus der Jodtherapie gelangen in den Hauskehricht	10	2/a
Ra-226	Radium aus Uhrenindustrie in der Verbrennungsschlacke	200	1/5a
Th-nat	Anlieferung von Glasabfällen mit thoriumhaltigen Glaslinsen	2	1/10a

Anlage Tridel (Lausanne)

Nuklid	Datum	Beschreibung des Ereignisses	Aktivität [MBq]
I-131	02/2009	aus Österreich kommend; Messung der Dosisleistung	0.6
In-111	11/2008	Nuklearmedizin CHUV; Dosisleistung an der Oberfläche des Sacks 20 uSv/h (A geschätzt mit d=0.2m)	10
Tc-99m	07/2008	nuklearmedizinischer Abfall aus einer privaten Praxis in der Stadt Lausanne; Dosisleistung in 10 cm Entfernung: 6 uSv/h	3

Anlage Cheneviers (Genf)

Nuklid	Datum	Beschreibung des Ereignisses	Aktivität [MBq]
I-131	07/2010	Abfall eines privaten nuklearmedizinischen Zentrums	
Tc-99m	2009	Chauffeur (ehemaliger Patient nach nuklearmedizinischer Behandlung)	
Tc-99m I-131	vor 2008	Universitätsspital	
Ra-226	06/2002		25
Tc-99m	02/1999	1 mSv/h an Oberfläche	

Statistik der Metallgiessereien und der Metallrückgewinnungsbetriebe

Gemäss den von der SUVA gesammelten Daten melden die Metallrückgewinnungsbetriebe ungefähr zwei Ereignisse pro Jahr. Es ist jedoch zu vermuten, dass mehr Ereignisse auftreten und dass diese pro Halbjahr zusammengefasst sind.

Die Arbeitsgruppe geht davon aus, dass die Statistiken der Metallgiesserei Gerlafingen (siehe unten) zuverlässiger sind und als Modell für die Häufigkeit der Ereignisse in Metallgiessereien und Metallrückgewinnungsanlagen in der Schweiz gelten können. Es lässt sich feststellen, dass es etwa **6 Ereignisse pro Jahr** gibt, hauptsächlich mit **Ra-226 und Co-60**. Erstaunlicherweise ist Cs-137 nicht betroffen. Es wurden folgende Häufigkeiten und maximalen Aktivitäten beobachtet:

- Ra-226 (22) (max. 0,208 MBq)
- Co-60 (6) (max. 0,038 MBq)
- Am-241 (3) (max. 210 MBq)
- Th-nat (2) (max. 0,116 MBq)
- U-nat (1) (max. 0,016 MBq)

Von der Metallgiesserei Gerlafingen zwischen 2002 und 2007 gemeldete Ereignisse

Nuklid	Datum	Aktivität [MBq]
Co-60	03/2002	0.019
U-nat	05/2002	0.016
Ra-226	10/2002	0.023
Ra-226	03/2003	0.035
Co-60	04/2003	0.038
Ra-226	05/2003	0.027
Ra-226	06/2003	
Ra-226	08/2003	
Co-60	10/2003	0.015
Ra-226	10/2003	0.028
Co-60	10/2003	0.01
Ra-226	12/2003	0.018
Ra-226	01/2004	0.029
Ra-226	05/2004	0.176
Ra-226	09/2004	0.043
Ra-226	10/2004	0.028
Am-241	10/2004	0.63
Ra-226	12/2004	0.053
Ra-226	04/2005	0.035
Ra-226	05/2005	0.095
Ra-226	05/2005	0.047
Th-nat	10/2005	
Th-nat	02/2006	0.116
Ra-226	03/2006	0.145
Ra-226	03/2006	0.208
Ra-226	04/2006	0.05

Nuklid	Datum	Aktivität [MBq]
Ra-226	04/2006	0.045
Ra-226	06/2006	0.088
Co-60	06/2006	
Ra-226	08/2006	
Am-241	09/2006	210
Ra-226	11/2006	0.025
Co-60	01/2007	0.008
Am-241	08/2007	0.106

Statistik der Entsorgungsaktionen des BAG 2009

Nachfolgend sind die im Jahr 2009 gesammelten Abfälle dargestellt. Es lässt sich feststellen, dass es sich hauptsächlich um **Ra-226** und um **natürliches Uran** handelt. Es wurden folgende Häufigkeiten und maximalen Aktivitäten beobachtet:

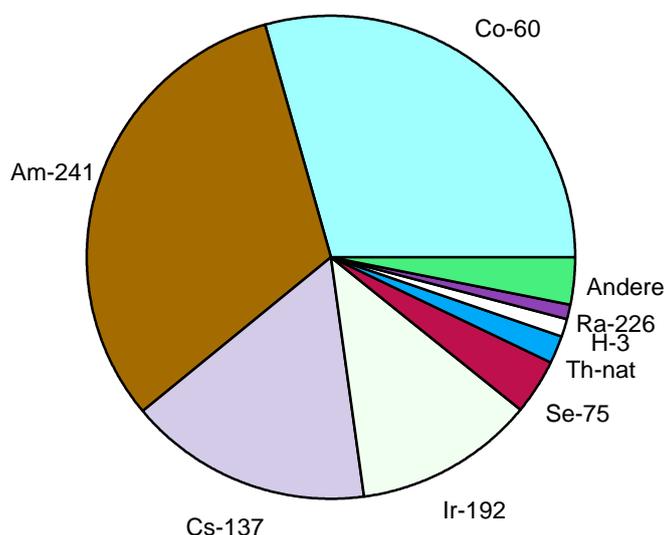
- Ra-226 (15) (max. 37 MBq)
- U-nat (15) (max. 450 MBq)
- Th-nat (5) (max. 0,37 MBq)
- Am-241 (3) (max. 0,888 MBq)
- H-3 (1) (max. 372 MBq)
- Th-232 (1) (max. 0,037 MBq)
- U-238/Pa-234 (1) (max. 0,1 MBq)

Nuklid	Art der Quelle	Aktivität [MBq]	Nuklid	Art der Quelle	Aktivität [MBq]
U-nat	Uranylacetat	0.140	U-nat	Uran-Gewicht	372
U-nat	Uranylacetat	0.420	Ra-226	Uhr Radium	37
U-nat	Uranylacetat	0.050	Th-nat	Thorium Pulver	0.37
Ra-226	Radiumquelle	0.0037	U-nat	Uran Stab	25
Th-nat	Glühstrumpf	0.110	Ra-226	Radiumquelle (Stift)	0.054
Ra-226	Ra-Quelle	0.080		Radiumquelle in	
Am	Feuermelder	0.030	Ra-226	Abschirmung	0.370
Th-nat	Glühstrumpf	0.120	Ra-226	Radiumquelle (Stift)	0.048
U-nat	Uranylacetat	0.070			
Ra-226	Radiumquelle (Trink-Kur)	0.250	Ra-226	Radium Trink-Kur	0.010
Ra-226	Radiumquelle	0.333	U-nat	Uranylacetat 5%	0.840
	Radiumquelle (Stift),		U-nat	Uranylacetat 5%	0.840
Ra-226	Mineralien	0.150	U-nat	Uranylacetat	0.840
Ra-226	Stifte	0.040	U-nat	Uranylacetat	0.090
Am-241	Stifte	0.037	U-		
Th-nat	Glühstrumpf	0.110	238/Pa-	U-238/Pa-234	
Th-232	Th-Quelle	0.037	234	Isotopgenerator	0.100
Ra-226	Radiumquelle (Stift)	0.008	U-nat	Uranylacetat	0.030
U-nat	Mineralien Uran	0.800	H-3	Tritium-Lösungen	372
Th-nat	Mineralien Thorium	0.100			
U-nat	Uranoxyd-Pulver	88			
Ra-226	Uhrenzeiger Radium	0.100			
Am-241	Antistatikpinsel	0.888			
Ra-226	2 Radiumquellen (Stift)	0.090			
U-nat	Uranylacetat	0.070			
Ra-226	Radiumquelle (Stift)	0.0033			
U-nat	Uran-Gewicht	450			

Vom BAG geführte Liste der Strahlenquellen hoher Aktivität

Quellen hoher Aktivität sind bei einer unsachgemässen Entsorgung am kritischsten. In der Schweiz führt das BAG deshalb eine Liste mit den Strahlenquellen der höchsten Aktivitäten. Nachfolgend ist eine Liste mit den Quellen aufgeführt, deren Aktivität mindestens 100'000 mal die Bewilligungsgrenze (LA) beträgt oder die eine externe Dosisleistung von mehr als 1 mSv/h in einer Entfernung von 1 m aufweisen. Anhand dieser Liste lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für Vorfälle nicht abschätzen, sie führt jedoch die in der Schweiz gegenwärtig vorhandenen Strahlenquellen auf, die möglicherweise in die Abfallentsorgung gelangen könnten.

Gemäss Auskunft von R. Linder (BAG) waren am 13.01.2011 rund 700 Quellen hoher Aktivität erfasst. Da für dieses Datum die Aufteilung nach Nukliden nicht vorliegt, beruht das untenstehende Diagramm auf dem Inventar vom 13.02.2010. Es lässt sich feststellen, dass es sich bei **90%** der Quellen um **Am-241, Co-60, Cs-137 und Ir-192** handelt.



Wenn davon ausgegangen wird, dass die Quellen sehr gut überwacht werden und dass diese Quellen durchschnittlich nur einmal in 10'000 Jahren (seit Beginn des Neolithikums) aus dem Überwachungszyklus geraten, dann bedeutet dies, dass es in der Schweiz durchschnittlich alle 10 Jahre zu einem Ereignis kommt.

Nuklide	Anzahl Quellen
Am-241 ¹³	291
Co-60	270
Cs-137	149
Ir-192	110
Se-75	34
Th-nat	17

Nuklide	Anzahl Quellen
H-3	11
Ra-226	9
U-nat	7
Cf-252	5
Pu-239	4
Po-210	3
U-238	3
Pu-238	2

¹³ davon entfallen 55 Quellen auf die Bezeichnung Am-241N

Nuklide	Anzahl Quellen
Am-243	1
Cm-244	1
Pu-240	1
U-234	1
U-235	1

In nuklearmedizinischen Zentren verfügbare maximale Aktivitäten

Es werden regelmässig Quellen aus nuklearmedizinischen Zentren in Kehrlichtverbrennungsanlagen nachgewiesen. Für eine vorsichtige Schätzung wurde vom Fall ausgegangen, dass die gesamte Aktivität eines bestimmten Nuklids in die Abfallentsorgung gelangt. In der unten stehenden Tabelle sind die zu einem bestimmten Zeitpunkt im nuklearmedizinischen Institut des Universitätsspitals Lausanne vorhandenen maximalen Aktivitäten der Nuklide aufgeführt.

Nuklid	Aktivität [MBq]	Anmerkung
I-131	7'400	
Tc-99m	100'000	erster Tag der Elution
I-123	740	
In-111	370	
F-18	10'000	
I-125	185	
Ga-68	1'400	
Re-186	400	
Sm-153	4'000	
Sr-89	180	Betastrahler
Y-90	2'000	Betastrahler

Man kann annehmen, dass das CHUV über ein nuklearmedizinisches Institut repräsentativer Grösse für die Schweiz verfügt. Es wird davon ausgegangen, dass die folgenden sieben Städte über ein nuklearmedizinisches Zentrum verfügen:

- Genf
- Lausanne
- Bern
- Basel
- Zürich
- St. Gallen
- Bellinzona

Liste der potenziellen Aktivitäten in Schweizer Laboratorien

Zusätzlich zu den oben aufgeführten hohen Aktivitäten wurde auch die maximale Aktivität geschätzt, die sich zu einem gegebenen Zeitpunkt in allen Schweizer Laboratorien zusammen befinden kann. In der unten stehenden Tabelle sind die Aktivitäten nach Laboratorium mit Angabe der betroffenen Nuklide aufgeführt. **Aufgrund dieser Liste lässt sich das Risiko leider nicht abschätzen**, da die Mehrheit der Laboratorien mehrere Nuklide verwendet und diese nur mit dem Begriff «verschiedene» zusammengefasst werden. Der Nutzen dieser Liste besteht darin, dass sie das potenzielle Risiko zeigt sowie die grosse Zahl von Quellen, die sich in Schweizer Laboratorien befinden.

Gemäss dieser Liste werden am häufigsten die folgenden 7 «Nuklide» verwendet:

- verschiedene (82)
- I-131 (22)
- H-3 (16)
- Th-nat (8)
- C-14 (6)

- Pm-147 (4)
- Sm-nat (4)

Jede Zeile der unten stehenden Tabelle entspricht der Bewilligung eines Laboratoriums.

Nuklid	Aktivität [MBq]	Nuklid	Aktivität [MBq]	Nuklid	Aktivität [MBq]
verscd.	200000	verscd.	1000000	verscd.	370
verscd.	100000	verscd.	20000	verscd.	40000
Sm-nat	407	verscd.	30000	verscd.	370
Sm-nat	800	verscd.	50000	verscd.	2000
Am-241	5000	verscd.	150000	verscd.	10000
H-3	2000000000	verscd.	1000	verscd.	50000
Pm-147	10000000	verscd.	500	verscd.	370000
Pm-147	40000000	verscd.	10000	verscd.	1000
verscd.	40000	verscd.	11000	verscd.	7400
H-3	7400000000	verscd.	3.7000000	verscd.	1000
Kr-81m	20000	verscd.	18500000	verscd.	10000
Kr-81m	75000	verscd.	111000000	verscd.	40
verscd.	1000	verscd.	555	verscd.	50
verscd.	1000000	verscd.	1000	verscd.	1000000
verscd.	10000000	verscd.	10000	verscd.	370
verscd.	3700	verscd.	10000000	verscd.	12000
verscd.	10000	verscd.	500000	verscd.	100000
verscd.	10000	verscd.	3000	verscd.	37
verscd.	1000	verscd.	10	verscd.	25000
verscd.	370000	verscd.	500	verscd.	10000
verscd.	5000	verscd.	500000	verscd.	40000
verscd.	500	verscd.	10000	verscd.	100
verscd.	740	verscd.	37000	verscd.	100000000
verscd.	10000	verscd.	100000	C-14	40000000
verscd.	3000000	verscd.	37000	Pm-147	4000000
verscd.	30000	verscd.	120000	Pm-147	3000000
Th-nat	10000	Sm-nat	0.8	Ir-192	1.5000000
verscd.	3700000	Th-nat	250	H-3	200000000
verscd.	37000	Sm-nat	0.002	Ra-226	4000
verscd.	10000	verscd.	37000	H-3	150000000
verscd.	370000	verscd.	10000	C-11	70000000
verscd.	74	verscd.	4000	F-18	50000000
verscd.	37000	verscd.	120000	N-13	70000000
verscd.	50000	verscd.	150000	O-15	70000000
verscd.	5000	verscd.	3700	U-nat	350
verscd.	100	verscd.	1000	Ac-225	500

Nuklid	Aktivität [MBq]
C-14	5000000
I-131	185000
Co-60	20000
C-14	2000000
H-3	20000000
H-3	20000000
Ra-226	370
H-3	15000000
Th-nat	3
Mo-99	700000
U-235	109
C-14	1000000
H-3	10000000
H-3	10000000
Bi-213	10000
Th-227	100
C-14	900000
Th-nat	2.4
I-125	70000
P-32	200000
S-35	500000
U-nat	35
I-131	37000
I-131	37000
I-131	37000
I-131	30000
I-131	30000
Sr-87m	5000000
P-32	100000
Ac-225	40
Th-nat	1
I-131	22.2000
C-14	370000
H-3	3700000
F-18	2000000
H-3	4000000
H-3	3700000
H-3	3700000
H-3	3700000
I-131	20000

Nuklid	Aktivität [MBq]
I-131	18000
I-131	18500
U-nat	14
Y-90	100000
Th-nat	0.626
I-131	14800
Cs-137	20000
I-131	14000
In-113m	5000000
Tc-99m	5000000
P-32	50000
U-238	20
I-131	11000
I-131	11000
I-125	15000
H-3	2000000
I-131	10000
Gd-153	40000
I-131	10000
Y-90	60000
Tc-99	40000
I-131	10000
I-131	10000
I-131	10000
H-3	2000000
Th-nat	0.390
Th-nat	0.370
P-33	74000
Sr-90	1000
I-131	7500
Ga-67	300000
Rb-81	1000000
I-131	7400
I-131	7400
S-35	70000
Mg-28	40000
Tl-201	900000
Tl-204	100000
P-33	50000
Cl-36	12000

Nuklid	Aktivität [MBq]
Sm-153	74000

Anhang 3: Liste der Kehrichtverbrennungsanlagen

Dieser Anhang enthält ein Inventar der 29 Kehrichtverbrennungsanlagen in der Schweiz mit den jeweiligen jährlich behandelten Abfallmengen und der Angabe, ob eine Strahlungsmessung vorhanden ist. Die meisten Informationen wurden von Dr. Michael Hügi (BAFU) am 08.12.2010 geliefert.

Kanton	Ort	Abfallmenge 2009 [t]	Strahlungsmessung vorhanden	Bemerkung
FR	Posieux	86'620	nein ¹⁴	
GE	Les Cheneviers	260'526	ja	
NE	La Chaux-de-Fonds	53'654	nein ¹⁵	
NE	Colombier	55'349	nein ¹⁶	
VD	Tridel	178'264	ja	
VS	Gamsen	40'557	nein	
VS	Sion	61'924	nein	
VS	Monthey	153'949	ja	
AG	Buchs (AG)	120'972	nein	
AG	Oftringen	72'528	nein	vorgesehen für 2011
AG	Turgi	122'284	ja	
BE	Bern	103'254	mobiler Detektor	ab 2012 fest installiert
BE	Brügg (Biel)	46'994	nein	
BE	Thun	131'704	ja	
BS	Basel	211'891	nein ¹⁷	
LU	Luzern	89'278	nein ¹⁸	
SO	Zuchwil	220'697	ja	
GL	Niederurnen	112'910	ja	
GR	Trimmis	88'726	nein	
SG	Buchs (SG)	176'123	nein	
SG	St. Gallen	70'195	nein	
SG	Bazenheid	102'517	ja	
TG	Weinfelden	141'148	ja	
ZH	Zürich I + II	375'584	nein	
ZH	Winterthur	119'452	nein	
ZH	Horgen	71'017	nein	
ZH	Hinwil	200'617	nein	
ZH	Dietikon	87'059	nein	
TI	Giubiasco	44'145	ja	
	Total	3'599'938	11	18

In der untenstehenden Grafik werden die KVA danach aufgeführt, ob sie über eine Strahlungsmessung verfügen, sowie nach der 2009 behandelten Abfallmenge. Es lässt sich feststellen, dass im Allgemeinen grössere KVA eher über eine Strahlungsmessung verfügen als kleinere. Bemerkenswert ist die Ausnahme der grössten Kehrichtverbrennungsanlage (Zürich I + II), die auf eine Strahlungsmessung verzichtet.

¹⁴ Gemäss telefonischer Auskunft von François Bochud vom 25.05.2011 verfügt die KVA nur über einen mobilen Detektor, der im Bedarfsfall verwendet werden kann.

¹⁵ Gemäss telefonischer Auskunft von François Bochud am 25.05.2011.

¹⁶ Gemäss telefonischer Auskunft von François Bochud am 25.05.2011.

¹⁷ Gemäss Auskunft von André Herrmann am 18.03.2011.

¹⁸ Gemäss telefonischer Auskunft von François Bochud am 25.05.2011.

