

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: Kritikalitätssicherheit in der Stilllegungs und Nachbetriebsphase
Autor: Thiel, J.
Erscheinungsjahr: 2006
Unterlagen-Nr.: P 246
Revision: 01
Unterlagenteil:



Zusammenfassung

Die im ERAM eingelagerten niedrig- und mittelradioaktiven Abfälle enthalten nur sehr geringe Mengen an Spaltstoffen. Dies ist eine Folge der radionuklid-spezifischen Inventarbegrenzungen, die in den Endlagerungsbedingungen festgeschrieben wurden. Die tatsächlich eingelagerten Spaltstoffmassen für die relevanten, durch thermische Neutronen spaltbaren Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 sind – mit Ausnahme von U-235 – kleiner als die entsprechenden kleinsten kritischen Kugelmassen der jeweiligen reinen Radionuklide bei optimaler Moderation und Reflexion durch Wasser. Im Falle des Radionuklids U-235 ist die Spaltstoffmasse über das Endlager so verteilt, dass in jedem Einlagerungsbereich die kleinste kritische Kugelmasse von 800 g unterschritten wird. Die Möglichkeit einer Kritikalität ist daher während der Stilllegungsphase ausgeschlossen.

In dem für die Nachbetriebsphase relevanten Zeitraum von 1 Million Jahren kann es infolge des radioaktiven Zerfalls von Pu-239 und anderer höherer Aktiniden zu einer Zunahme des U-235-Inventars kommen. Die Massenzunahme ist jedoch so gering, dass auch in der Nachbetriebsphase die Möglichkeit einer Kritikalität ausgeschlossen werden kann.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	3
Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen	5
1. Einleitung	6
2. Spaltstoffe in den radioaktiven Abfällen	7
2.1 Aktivität der relevanten Spaltstoffe	7
2.2 Masse der relevanten Spaltstoffe	7
3. Höhere spaltbare Aktiniden in den radioaktiven Abfällen	8
3.1 Aktivität der höheren spaltbaren Aktiniden	8
3.2 Masse der höheren spaltbaren Aktiniden	9
4. Bewertung der Kritikalitätssicherheit im ERAM	10
4.1 Stilllegungsphase	12
4.2 Nachbetriebsphase	12
5. Literatur	15

Gesamtseitenzahl der Unterlage: 16

Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tabelle 1: Aktivität relevanter spaltbarer Radionuklide zu Beginn der Stilllegung	7
Tabelle 2: Spezifische Aktivität relevanter spaltbarer Radionuklide	8
Tabelle 3: Masse relevanter spaltbarer Radionuklide zu Beginn der Stilllegung	8
Tabelle 4: Aktivität der höheren spaltbaren Aktiniden zu Beginn der Stilllegung	9
Tabelle 5: Spezifische Aktivität der höheren spaltbaren Aktiniden	9
Tabelle 6: Masse der höheren spaltbaren Aktiniden zu Beginn der Stilllegung	10
Tabelle 7: Charakteristische Daten relevanter spaltbarer Radionuklide zur Beurteilung der Kritikalitätssicherheit	11
Tabelle 8: Charakteristische Daten der höheren spaltbaren Aktiniden zur Beurteilung der Kritikalitätssicherheit	11

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Bild 1: Zeitliche Entwicklung von Spaltstoffmassen in der Nachbetriebsphase	14

1. Einleitung

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wird seit 1971 für die Endlagerung niedrig- und mittelradioaktiver Abfälle genutzt. Seit September 1998 werden als Folge eines Gerichtsbeschlusses keine radioaktiven Abfälle mehr zur Endlagerung angenommen.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Stilllegung des Endlagers Morsleben mit den bis zum 28. September 1998 eingelagerten radioaktiven Abfällen beantragt. Hierfür ist gemäß § 9b Abs. 1 Atomgesetz (AtG) /1/ eine Planfeststellung erforderlich und gemäß § 9b Abs. 4 AtG i.V.m. § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG nachzuweisen, dass die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden bei der Stilllegung der Anlage getroffen ist.

Als eine der zu erfüllenden Voraussetzungen zur Erreichung der grundlegenden Schutzziele wird in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /2/ die Durchführung einer Sicherheitsanalyse vorgeschrieben.

Für die Stilllegungsphase ist nachzuweisen, dass bei der Handhabung und Lagerung von spaltstoffhaltigen radioaktiven Abfällen die Unterkritikalität im bestimmungsgemäßen Betrieb, bei Störfällen sowie bei Einwirkungen von außen stets sichergestellt ist. Für die Nachbetriebsphase ist nachzuweisen, dass auf der Basis der zu erwartenden geologischen und physikalischen Veränderungen des stillgelegten Endlagers über einen Zeitraum von 1 Million Jahren die Kritikalitätssicherheit gewährleistet ist.

Für die Kritikalitätssicherheit der eingelagerten spaltstoffhaltigen radioaktiven Abfälle sind nur die durch thermische Neutronen spaltbaren radioaktiven Stoffe relevant. Hierzu zählen entsprechend AtG § 2 die "besonderen spaltbaren Stoffe" in Form der Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241. Darüber hinaus gibt es noch weitere Radionuklide (höhere Aktiniden), die durch thermische Neutronen spaltbar sind. Diese sind wegen ihres geringen Vorkommens in den radioaktiven Abfällen von untergeordneter Bedeutung für die Kritikalitätssicherheit.

2. Spaltstoffe in den radioaktiven Abfällen

Im Folgenden werden die zu Beginn der Stilllegung im ERAM vorhandenen Inventare der für die Kritikalitätssicherheit relevanten thermisch spaltbaren Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 angegeben. Bezugsdatum für die Aktivitätsangaben ist der 30.06.2005.

2.1 Aktivität der relevanten Spaltstoffe

Zu Beginn der Stilllegung liegen in den einzelnen Einlagerungsbereichen des ERAM gemäß /3, 4/ die in Tabelle 1 angegebenen Aktivitätsinventare der Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 vor. In der 7. Spalte ist die Gesamtaktivität des jeweiligen Radionuklids im ERAM aufgeführt. Diese ergibt sich als Summe der Werte in den Spalten 2 bis 6.

Tabelle 1: Aktivität relevanter spaltbarer Radionuklide zu Beginn der Stilllegung

Radionuklid	Aktivität in Bq					ERAM ges.
	Südfeld	Nordfeld	Westfeld	Ostfeld	Zentralteil	
U-233	3,7E+03	2,0E+04	4,0E+06	9,6E+05	4,6E+03	5,0E+06
U-235	2,0E+06	3,7E+04	6,0E+07	2,0E+07	8,5E+03	8,2E+07
Pu-239	1,1E+09	8,4E+06	6,6E+10	1,7E+09	1,9E+06	6,9E+10
Pu-241	2,9E+11	1,6E+10	9,4E+11	1,1E+11	1,6E+08	1,4E+12

2.2 Masse der relevanten Spaltstoffe

Die geeignete Größe zur Beurteilung der Kritikalitätssicherheit ist nicht die Aktivität der Spaltstoffe, sondern die dazu äquivalente Masse. Die der Aktivität $A^{(i)}$ des Radionuklids i entsprechende Spaltstoffmasse $m^{(i)}$ ist gegeben durch

$$m^{(i)} = \frac{A^{(i)}}{A_{spez}^{(i)}}, \quad (1)$$

mit

$$A_{spez}^{(i)} = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}^{(i)}} \cdot \frac{N_A}{M_{mol}^{(i)}} : \quad \text{spezifische Aktivität}$$

und

$$T_{1/2}^{(i)} : \quad \text{Halbwertszeit,}$$

$$M_{mol}^{(i)} : \quad \text{molare Masse,}$$

$$N_A = 6,02214 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} : \quad \text{Avogadro-Konstante.}$$

Für die spezifische Aktivität ergeben sich damit die in Tabelle 2 angegebenen Werte. Die Halbwertszeiten stimmen mit den Angaben in der Karlsruher Nuklidkarte /5/ überein.

Tabelle 2: Spezifische Aktivität relevanter spaltbarer Radionuklide

Radionuklid	molare Masse in g/mol	Halbwertszeit in a	spezifische Aktivität in Bq/g
U-233	233	1,592E+05	3,566E+08
U-235	235	7,038E+08	7,998E+04
Pu-239	239	2,411E+04	2,296E+09
Pu-241	241	1,435E+01	3,825E+12

Die zu der nuklidspezifischen Aktivität in Tabelle 1 äquivalente Masse der Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 ergibt sich gemäß (1) zu:

Tabelle 3: Masse relevanter spaltbarer Radionuklide zu Beginn der Stilllegung

Radionuklid	Masse in g (Bezugsdatum: 30.06.2005)					
	Südfeld	Nordfeld	Westfeld	Ostfeld	Zentralteil	ERAM ges.
U-233	1,0E-05	5,6E-05	1,1E-02	2,7E-03	1,3E-05	1,4E-02
U-235	2,5E+01	4,6E-01	7,5E+02	2,5E+02	1,1E-01	1,0(3)E+03
Pu-239	4,8E-01	3,7E-03	2,9E+01	7,4E-01	8,3E-04	3,0E+01
Pu-241	7,6E-02	4,2E-03	2,5E-01	2,9E-02	4,2E-05	3,7E-01

3. Höhere spaltbare Aktiniden in den radioaktiven Abfällen

Aus Gründen der Vollständigkeit werden nachfolgend auch die im ERAM zu Beginn der Stilllegung vorhandenen Inventare der höheren spaltbaren Aktiniden angegeben. Diese Stoffe sind für die Kritikalitätssicherheit nur dann von Bedeutung, wenn sie in angereicherter und chemisch abgetrennter Form in den radioaktiven Abfällen vorkommen. Dies ist jedoch bei den im ERAM eingelagerten radioaktiven Abfällen nicht der Fall.

3.1 Aktivität der höheren spaltbaren Aktiniden

Gemäß den Angaben in /3, 4/ liegen im ERAM zu Beginn der Stilllegung folgende Aktivitätsinventare höherer spaltbarer Aktiniden vor:

Tabelle 4: Aktivität der höheren spaltbaren Aktiniden zu Beginn der Stilllegung

Radionuklid	Aktivität in Bq					ERAM ges.
	Südfeld	Nordfeld	Westfeld	Ostfeld	Zentralteil	
Np-237	1,5E+07	1,2E+05	1,6E+07	5,4E+07	3,1E+04	8,5E+07
Am-241	9,4E+10	5,8E+08	1,1E+11	1,4E+10	2,3E+07	2,2E+11
Am-242m	1,6E+07	6,2E+05	1,6E+08	6,8E+07	1,5E+05	2,5E+08
Am-243	2,2E+07	3,5E+04	5,9E+07	1,4E+07	8,9E+03	9,5E+07
Cm-243	3,9E+03	0,0E+00	7,2E+05	4,6E+03	0,0E+00	7,3E+05
Cm-244	1,6E+09	1,8E+06	4,0E+09	1,0E+09	4,4E+05	6,6E+09
Cm-245	5,0E+05	8,3E+02	1,4E+06	3,6E+05	2,1E+02	2,3E+06
Cm-247	0,0E+00	0,0E+00	2,6E+04	3,4E+02	0,0E+00	2,6E+04
Cf-249	3,2E+04	0,0E+00	5,5E+04	5,0E+05	0,0E+00	5,9E+05
Cf-251	1,1E+03	0,0E+00	1,9E+03	2,0E+04	0,0E+00	2,3E+04

3.2 Masse der höheren spaltbaren Aktiniden

Analog zu Tabelle 2 ergibt sich für die spezifische Aktivität der höheren spaltbaren Aktiniden:

Tabelle 5: Spezifische Aktivität der höheren spaltbaren Aktiniden

Radionuklid	molare Masse in g/mol	Halbwertszeit in a	spezifische Aktivität in Bq/g
Np-237	237	2,144E+06	2,603E+07
Am-241	241	4,322E+02	1,270E+11
Am-242m	242	1,41 E+02	3,877E+11
Am-243	243	7,370E+03	7,386E+09
Cm-243	243	2,91 E+01	1,871E+12
Cm-244	244	1,810E+01	2,995E+12
Cm-245	245	8,500E+03	6,352E+09
Cm-247	247	1,56 E+07	3,433E+06
Cf-249	249	3,506E+02	1,515E+11
Cf-251	251	8,98 E+02	5,869E+10

Für die durch thermische Neutronen spaltbaren höheren Aktiniden erhält man gemäß (1) folgende äquivalenten Massen:

Tabelle 6: Masse der höheren spaltbaren Aktiniden zu Beginn der Stilllegung

Radionuklid	Masse in g (Bezugsdatum: 30.06.2005)					
	Südfeld	Nordfeld	Westfeld	Ostfeld	Zentralteil	ERAM ges.
Np-237	5,8E-01	4,6E-03	6,1E-01	2,1E+00	1,2E-03	3,3E+00
Am-241	7,4E-01	4,6E-03	8,7E-01	1,1E-01	1,8E-04	1,7E+00
Am-242m	4,1E-05	1,6E-06	4,1E-04	1,8E-04	3,9E-07	6,5E-04
Am-243	3,0E-03	4,7E-06	8,0E-03	1,9E-03	1,2E-06	1,3E-02
Cm-243	2,1E-09	0,0E+00	4,0E-07	2,5E-09	0,0E+00	4,0E-07
Cm-244	5,3E-04	6,0E-07	1,3E-03	3,3E-04	1,5E-07	2,2E-03
Cm-245	7,9E-05	1,3E-07	2,2E-04	5,7E-05	3,3E-08	3,6E-04
Cm-247	0,0E+00	0,0E+00	7,8E-03	1,0E-04	0,0E+00	7,8E-03
Cf-249	2,1E-07	0,0E+00	3,6E-07	3,3E-06	0,0E+00	3,9E-06
Cf-251	1,9E-08	0,0E+00	3,2E-08	3,4E-07	0,0E+00	3,9E-07

4. Bewertung der Kritikalitätssicherheit im ERAM

Die im ERAM eingelagerten niedrig- und mittelradioaktiven Abfälle enthalten nur sehr geringe Mengen an Spaltstoffen. Dies wird deutlich, wenn die insgesamt im ERAM zu Beginn der Stilllegung vorliegenden Spaltstoffmassen (Tabelle 3) verglichen werden mit den kleinsten Spaltstoffmassen, die unter festgelegten Bedingungen (Art des Spaltstoffes, Geometrie, moderiertes/unmoderiertes System etc.) für eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion mindestens erforderlich sind (kleinste kritische Massen).

In Tabelle 7 werden zum Vergleich die im Handbuch zur Kritikalität der GRS /6/ angegebenen kleinsten kritischen Kugelmassen der jeweiligen reinen Radionuklide bei optimaler Moderation und Reflexion durch Wasser herangezogen. Es zeigt sich, dass selbst unter diesen, für das Eintreten einer Kritikalität optimalen Randbedingungen die angegebenen kleinsten kritischen Kugelmassen nur bei U-235 erreicht werden. Es ist dabei zu beachten, dass diese Betrachtungen sehr konservativ sind, da in einem realen Nuklidgemisch immer auch Neutronen absorbierende Radionuklide vorhanden sind. Beispielsweise tritt das thermisch spaltbare Radionuklid U-235 nicht in reiner Form, sondern immer zusammen mit dem reaktivitätsmindernden Radionuklid U-238 auf. So beträgt die kleinste kritische Kugelmasse für 5 % angereichertes Uran nach /6/ bereits 37,7 kg.

Tabelle 7: Charakteristische Daten relevanter Spaltstoffe zur Beurteilung der Kritikalitätssicherheit

Radionuklid	Spaltstoffmasse relevanter Radionuklide zu Beginn der Stilllegung in g	kleinste kritische Kugel- masse in g
U-233	< 1	570
U-235	1030	800
Pu-239	30	510
Pu-241	< 1	260

Eine entsprechende Gegenüberstellung für die höheren spaltbaren Aktiniden ist in Tabelle 8 angegeben. Zum Vergleich werden hier die sogenannten "subcritical limits" gemäß der Norm ANSI/ANS-8.15-1981 /7/ herangezogen.

Tabelle 8: Charakteristische Daten der höheren spaltbaren Aktiniden zur Beurteilung der Kritikalitätssicherheit

Radionuklid	Masse höherer thermisch spaltbarer Aktiniden zu Beginn der Stilllegung in g	"subcritical limits" gemäß ANSI/ANS-8.15-1981 in g
Np-237	3,3	20000
Am-241	1,7	16000
Am-242m	< 1,0E-03	13
Am-243	< 1,0E-01	25000
Cm-243	< 1,0E-06	90
Cm-244	< 1,0E-02	3000
Cm-245	< 1,0E-03	30
Cm-247	< 1,0E-02	900
Cf-249	< 1,0E-05	10
Cf-251	< 1,0E-06	5

Aus Tabelle 8 ist zu ersehen, dass die Massen der höheren thermisch spaltbaren Aktiniden zu Beginn der Stilllegung um mindestens drei Größenordnungen unter den jeweiligen "sub-critical limits" liegen. Für die Kritikalitätssicherheit des ERAM sind die höheren thermisch spaltbaren Aktiniden daher nicht relevant.

Die geringen im ERAM eingelagerten Spaltstoffmassen sind u. a. eine Folge der in der Dauerbetriebsgenehmigung /8/ festgelegten generellen Begrenzung der α -Aktivität auf 0,4 GBq pro m^3 Abfallvolumen. Da alle relevanten durch thermische Neutronen spaltbaren Radionuklide α -Strahler sind, werden dadurch die Spaltstoffkonzentrationen so begrenzt, dass das thermische Spaltstoffsystem nicht kritisch werden kann. Das Spaltnuklid Pu-241 ist als β -Strahler eine Ausnahme, es liegt jedoch immer in einem Gemisch zusammen mit α -Strahlern (z. B. Pu-239, Pu-240, Am-241) vor, wobei es einen Anteil von maximal 15 % am gesamten Plutonium einnimmt.

Aufgrund der aus den Langzeitsicherheitsanalysen abgeleiteten nuklidspezifischen Inventarbegrenzungen, die nach Wiederaufnahme des Einlagerungsbetriebes 1994 in den Endlagerungsbedingungen /9/ festgeschrieben wurden, besteht zusätzlich zur Konzentrationsbegrenzung auch eine Massenbeschränkung für die insgesamt im ERAM einlagerbaren Spaltstoffe. Mit Ausnahme von U-235 sind die aufgrund dieser Beschränkung zulässigen Massen der relevanten thermisch spaltbaren Radionuklide kleiner als die entsprechenden kleinsten kritischen Kugelmassen in Tabelle 7.

4.1 Stilllegungsphase

Die zu Beginn der Stilllegung insgesamt im ERAM eingelagerten Spaltstoffmassen für die relevanten durch thermische Neutronen spaltbaren Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 sind – mit Ausnahme von U-235 – kleiner als die entsprechenden kleinsten kritischen Kugelmassen der jeweiligen reinen Radionuklide bei optimaler Moderation und Reflexion durch Wasser (s. Tab. 7). Im Falle des Radionuklids U-235 ist die Spaltstoffmasse über das Endlager so verteilt (s. Tab. 3), dass in jedem Einlagerungsbereich die kleinste kritische Kugelmasse von 800 g unterschritten wird.

In der Stilllegungsphase des ERAM kann daher die Bildung einer kritischen Masse ausgeschlossen werden. Eigenständige Untersuchungen zum Nachweis der Unterkritikalität im bestimmungsgemäßen Stilllegungsbetrieb, bei Störfällen sowie bei Einwirkungen von außen sind nicht erforderlich.

4.2 Nachbetriebsphase

In dem für die Nachbetriebsphase relevanten Zeitraum von 10^6 Jahren ist für einige spaltbare Radionuklide eine Massenzunahme infolge des radioaktiven Zerfalls höherer Aktiniden zu berücksichtigen. In Bild 1 ist die zeitliche Entwicklung der Spaltstoffmassen von U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 in der Nachbetriebsphase dargestellt. Bei U-235 ist die Massenzunahme so gering (ca. 20 g), dass auch nach 10^6 Jahren die kleinste kritische Kugelmasse von 800 g in jedem Einlagerungsbereich unterschritten wird. Bei U-233 nimmt zwar die Masse um ca. den Faktor 20 zu, die kleinste kritische Kugelmasse von 570 g (s. Tab. 7) wird jedoch auch nach 10^6 Jahren um mehr als 3 Größenordnungen unterschritten.

Zur Berechnung der kleinsten kritischen Kugelmassen ist in der Nachbetriebsphase nicht reines Wasser, sondern eine gesättigte wässrige Steinsalzlösung als Moderator und Reflektor zu unterstellen. Damit ergeben sich wesentlich höhere Werte für die kleinsten kritischen Kugelmassen. Nach /10/ erhält man für U-235 anstelle von 800 g einen Wert von 6960 g und für 5 % angereichertes Uran anstelle von 37,7 kg ein Wert von 1077,3 kg.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass auch in der Nachbetriebsphase die Bildung einer kritischen Masse ausgeschlossen werden kann. Eine genauere Analyse des Einflusses geologischer, geophysikalischer und geochemischer Veränderungen des stillgelegten Endlagers auf die Kritikalitätssicherheit ist für das ERAM daher nicht erforderlich.

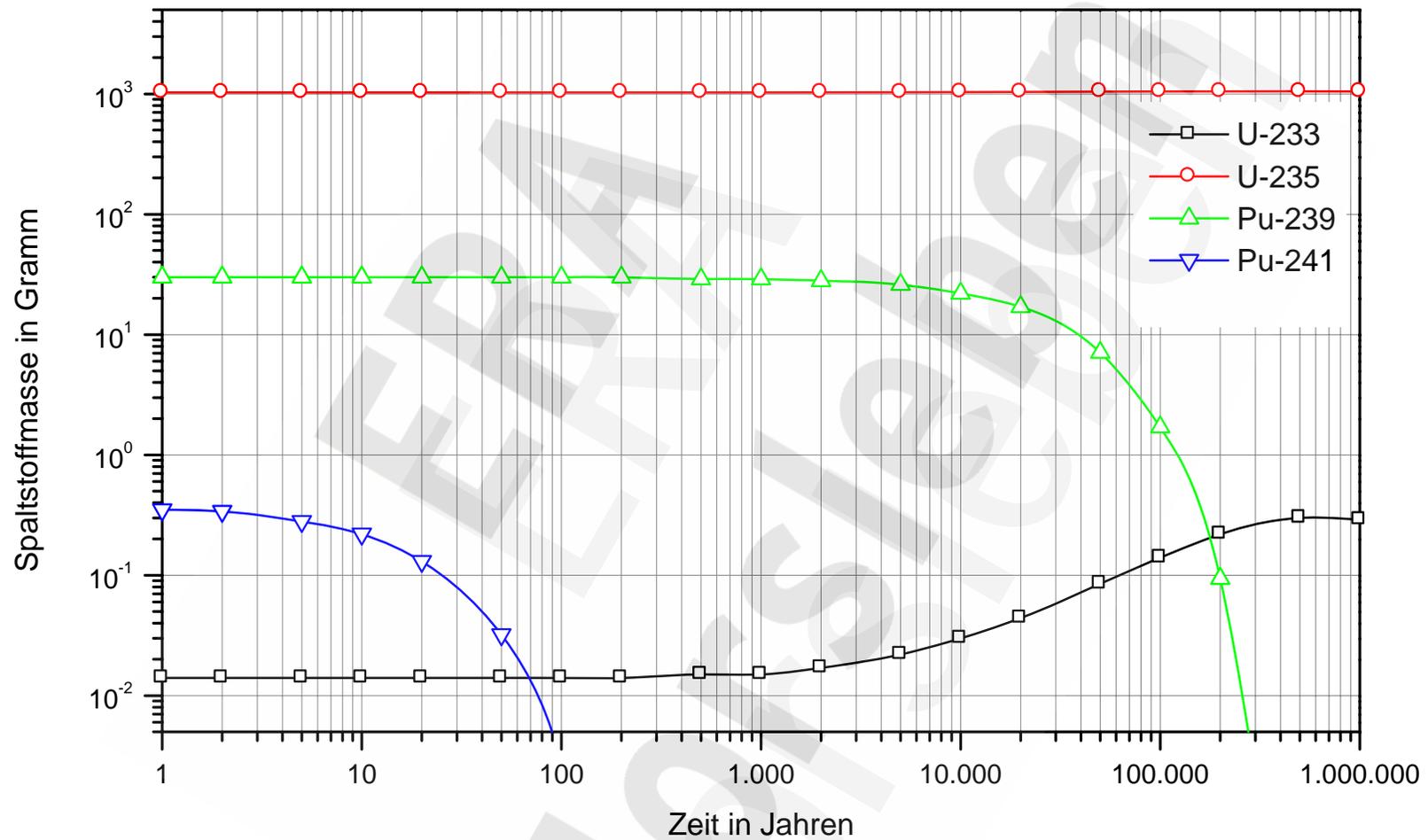


Bild 1: Zeitliche Entwicklung von Spaltstoffmassen in der Nachbetriebsphase

5. Literatur

- /1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985, BGBl. I, S. 1565, zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 12.08.2005, BGBl. I, S. 2365, ber. S. 2976.
- /2/ Bundesministerium des Inneren (BMI)
Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk
GMBl. 13, 11.05.1983, S. 220.
- /3/ *K. Kugel*
Entsorgung radioaktiver Abfälle im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM),
Einlagerungszeitraum 1971 bis 1991
BfS ET-IB-109-REV-2, Dezember 2006, Salzgitter.
- /4/ *K. Kugel*
Entsorgung radioaktiver Abfälle im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM),
Einlagerungszeitraum 1994 bis 1998
BfS ET-IB-110-REV-2, Januar 2007, Salzgitter.
- /5/ *G. Pfennig, H. Klewe-Nebenius, W. Seelmann-Eggebert*
Karlsruher Nuklidkarte, 6. Auflage 1995, korrigierter Nachdruck 1998
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH – Technik und Umwelt.
- /6/ *W. Heinicke, H. Krug, W. Thomas, W. Weber, B. Gmal*
Handbuch zur Kritikalität, Bd. I bis III
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH,
Ausgabe Juni 1998, Garching.
- /7/ American National Standard for Nuclear Criticality
Control of Special Actinide Elements,
ANSI/ANS-8.15-1981
(Die Norm wurde 1995 in der alten Fassung bestätigt).
- /8/ Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz
Genehmigung vom 22.04.1986 zum Dauerbetrieb des Endlagers für
radioaktive Abfälle Morsleben.

- /9/ *K. Kugel, W. Noack, H. Giller, B.-R. Martens, P. Brennecke*
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle und Maßnahmen zur Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Teil I: Endlagerungsbedingungen, Stand: August 1996
Bundesamt für Strahlenschutz, Fachbereich Nukleare Entsorgung und Transport
BfS ET-IB-85, August 1996, Salzgitter.
- /10/ *E. F. Moser, B. Gmal*
Daten zur Kritikalität von Uran in salinärer Umgebung
Technische Notiz vom 15.09.2003
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching.

ERA
Morsleben