

Rückbau von Kernkraftwerken – Fragen und Antworten

1.	Warum müssen Kernkraftwerke rückgebaut werden?	2
2.	Warum heißt es Rückbau und nicht Abriss?	2
3.	Warum kann man nicht angeben, wieviel Radioaktivität noch in der Anlage ist?	2
4.	Wie funktioniert die Überwachung des Betreibers durch die Behörde?	4
5.	Wie gelangt die Radioaktivität in die Anlage?	4
6.	Kann man Radioaktivität abwischen?	7
7.	Welche Unfallgefahren gibt es beim Rückbau?	7
8.	Kann man mit dem Rückbau schon beginnen, solange noch Brennelemente in der Anlage sind?	8
9.	Kann man Abfälle aus dem Rückbau als nichtradioaktiv freigeben?	9
10.	Welchen Schutz bieten die Freigabewerte?	10
11.	Welche Strahlenbelastungen resultieren aus Wiederverwendungen freigegebener Metalle?	11
12.	Option „Sicherer Einschluss“: Wäre es nicht ungefährlicher, die Anlage erst mal 50 Jahre stehen zu lassen?	13
13.	Wer zahlt für den Rückbau?	13
14.	Was ist eine „Grüne Wiese“?	14
15.	Ist Rückbau verantwortbar?	14
16.	Anhang	16
I.	Nuklidvektor	16
II.	Parameter beim Pfannenszenario als Punkt- und Volumenquelle	20

1. Warum müssen Kernkraftwerke rückgebaut werden?

Während des Betriebs eines Kernkraftwerkes werden Teilbereiche der Anlage auf verschiedenen Wegen radioaktiv. Selbst wenn die hochradioaktiven Brennelemente aus der Anlage entfernt sind, verbleiben darin noch sehr viele technische Einrichtungen, die so hoch radioaktiv belastet sind, dass eine konventionelle Entsorgung dieser Teile, ein Umgang damit oder ein konventioneller Abriss mit erheblichen Gefahren verbunden wäre. Alle diese Teile müssen beim Rückbau ausgebaut und entweder von radioaktiven Anhaftungen vollständig befreit oder, falls das nicht geht, geeignet zerkleinert und in Abfallcontainer für das Endlager verpackt werden.

2. Warum heißt es Rückbau und nicht Abriss?

Bei einem Abriss eines Hauses oder eines Bürogebäudes werden zuerst noch verwendbare Gegenstände entfernt oder ausgebaut. Toxische Bestandteile (wie zum Beispiel Asbest oder Teerpappe) werden vorher unter Schutzmaßnahmen entfernt. Dann kann der Abriss des Gebäudes ohne jede Einschränkung erfolgen und der Bauschutt landet auf einer Deponie oder im Recycling.

Beim Kernkraftwerk geht das nur beim konventionellen Teil, zum Beispiel beim Generator, den Kühltürmen oder den Notstromgebäuden. Beim Kontrollbereich, in dem sich radioaktiv belastete Gegenstände befinden können, geht das nicht. Hier müssen nacheinander alle Teile einzeln abgebaut werden. Das Vorgehen ähnelt dabei eher der Umkehr der Errichtungsphase. Auch bei der Errichtung eines Gebäudes kommt es ja auf die richtige Reihenfolge an, wann beispielweise Wasserleitungen verlegt werden oder die Feuermeldeeinrichtungen zu verlegen sind. Genauso ist es beim Rückbau: Alles hat seine richtige Reihenfolge, diesmal bei der systematischen Herausnahme der einzelnen Einrichtungen. Ähnlich wie vergessene Feuermeldeeinrichtungen den Bau eines Gebäudes erheblich verzögern und verteuern können, kann ein falsch geplanter Rückbau oder eine übersehene radioaktive Verschmutzung den gesamten Takt durcheinander bringen.

Der Begriff Rückbau ist also durchaus korrekt.

3. Warum kann man nicht angeben, wieviel Radioaktivität noch in der Anlage ist?

Die ungefähre Höhe der Radioaktivität in der Anlage kennt man schon vor dem Rückbau, weil diese auch während des Betriebs fortlaufend gemessen und überwacht wird. Zudem sind in Deutschland 27 Leistungsreaktoren stillgelegt und zum Teil abgerissen (siehe Tabelle), so dass man auf Erfahrungswerte zurückgreifen kann.

Um aber den genauen Zustand der einzelnen Komponenten beurteilen zu können, muss bei jedem Teil zuerst festgestellt und in einer Art Strahlenkataster festgehalten werden, wie hoch die Kontamination jedes Bestandteils ist. Da man an manche Teile erst dann herankommt, wenn zuvor andere Teile abgebaut sind, ist das Kataster zu Beginn noch unvollständig und wird erst im Laufe des Rückbaus vervollständigt und immer genauer.

So ist es zum Beispiel beim stählernen Reaktordruckbehälter nötig, Messproben aus verschiedenen Tiefen des Stahls zu entnehmen, weil die Kontamination mit Radioaktivität nicht überall gleich hoch ist. Dazu muss der gesamte Brennstoff aus der Anlage entfernt sein, weil vorher der Behälter noch für den Betrieb der Sicherheitssysteme für die Kühlung nötig ist. Dann muss man

bestimmte Einbauten im Behälter ausbauen, um an die entsprechenden Bereiche herankommen. Außerdem kann man den Behälter nicht einfach anbohren, solange er noch mit Wasser gefüllt ist.

Die Radioaktivität der einzelnen Teile, in die der Behälter später zerschnitten wird, muss spätestens beim Zwischen- und Endlagern des Abfalls bekannt sein und genau angegeben werden. Davor sind genaue Angaben über die Dosisleistung wichtiger, weil daraus die nötigen Schutzmaßnahmen für Beschäftigte festgelegt werden. Auch hierüber wird vernünftigerweise ein Kataster angelegt.

Abbildung 3-1: Bisher stillgelegte Leistungsreaktoren

Anlagenstandort	Abkürzung	Betreiber	Abschaltung	Antragstellung	Genehmigungserteilung	BE-Freiheit	Rückbauende
Isar 1	KKI-1	E.ON	06.08.11	04.05.12	-	-	-
Unterweser	KKU	E.ON	06.08.11	04.05.12	-	-	-
Biblis A	KWB-A	RWE	06.08.11	06.08.12	-	-	-
Biblis B	KWB-B	RWE	06.08.11	06.08.12	-	-	-
Neckarwestheim 1	GKN-1	EnBW	06.08.11	06.05.13	-	-	-
Philippsburg 1	KKP-1	EnBW	06.08.11	06.05.13	-	-	-
Krümmel	KKK	Vattenfall	06.08.11	-	-	-	-
Brunsbüttel	KKB	Vattenfall	?	01.11.12	-	-	-
Obrigheim	KWO	EnBW	11.05.05	21.12.04	28.08.08	-	2023
Stade	KKS	E.ON	14.11.03	23.07.01	07.09.05	30.04.05	2015
Würgassen	KWW	E.ON	26.08.94	25.09.95	14.04.97	31.10.96	2014
KNK Karkruhe	KNK	FZK	23.08.91	21.04.92	26.08.93	30.06.94	2019
Greifswald 1	KGR 1	EWN	18.12.90	17.06.94	30.06.95	22.09.95	2015
Greifswald 2	KGR 2	EWN	18.12.90	17.06.94	30.06.95	22.09.95	2015
Greifswald 3	KGR 3	EWN	18.12.90	17.06.94	30.06.95	22.09.95	2015
Greifswald 4	KGR 4	EWN	18.12.90	17.06.94	30.06.95	22.09.95	2015
Greifswald 5	KGR 5	EWN	18.12.90	17.06.94	30.06.95	22.09.95	2015
Rheinsberg	KKR	EWN	01.06.90	26.03.92	28.04.95	09.05.01	2014
Mülheim-Kärlich	KMK	RWE	09.09.88	12.06.01	16.07.04	01.07.02	-
AVR Jülich	AVR	FZJ	31.12.88	18.12.86	09.03.94	30.06.98	2017
Hamm-Uentrop	THTR-300	HKG	29.09.88	26.09.89	22.10.93	30.06.95	SE* (> 2027)
Kahl	VAK	RWE	25.11.85	01.08.85	05.05.88	25.04.89	24.09.10
MZFR Karlsruhe	MZFR	FZK	03.05.84	22.04.86	17.11.87	22.09.95	2015
Gundremmingen A	KRB-A	RWE	13.01.77	20.06.80	26.05.83	30.06.89	SE* (2006)
Lingen	KWL	RWE	05.01.77	13.06.83	21.11.85	SE*	SE* (> 2027)
Niederaichbach	KKN	FZK	31.07.74	23.01.75	21.10.75	-	17.08.95
Großwelzheim	HDR	HDG	20.04.71	15.07.74	16.02.83	-	15.10.96

BE-Freiheit: Brennelemente-Freiheit

SE*: Sicherer Einschluss der Anlage (Jahr der geplanten Beendigung)

4. Wie funktioniert die Überwachung des Betreibers durch die Behörde?

Mit Beginn der Stilllegung der Anlage erarbeitet der Betreiber den Rückbauantrag, der bei der zuständigen Genehmigungsbehörde eingereicht wird. Dieser stellt dar, wie der Rückbau erfolgen soll und welche Schutzmaßnahmen dabei angewendet werden sollen. Die Behörde prüft den Antrag im Hinblick auf die atomrechtlichen Belange und den Schutz der Umwelt, klärt Zweifel in den Antragsunterlagen. Daraufhin werden die Unterlagen ausgelegt, ein Erörterungstermin veranstaltet und vorgebrachte Einwendungen auf ihre Stichhaltigkeit überprüft. Am Ende bescheidet die Behörde den Antrag, in der Regel unter weiteren Auflagen.

Das weitere Vorgehen wird von den zuständigen Aufsichtsbehörden begleitet. Teilvorhaben wie zum Beispiel das Zerschneiden des Reaktordruckbehälters werden in Anträgen beschrieben, von der Aufsichtsbehörde überprüft und Zustimmungen erteilt, in der Regel ebenfalls mit zusätzlichen Auflagen. Durch Begehungen und Inaugenscheinnahme prüft die Behörde, ob das Vorgehen wie beantragt erfolgt oder ob zusätzliche Änderungen und Auflagen notwendig sind.

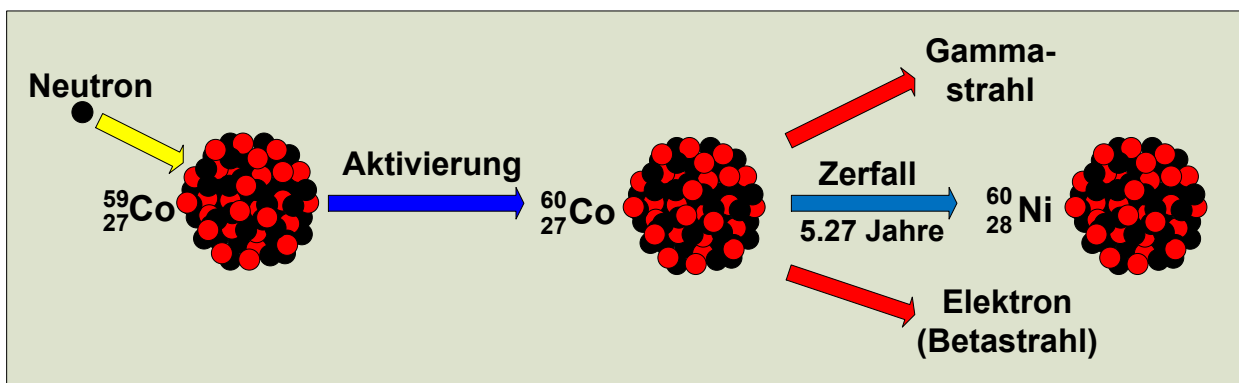
Bei Vorgängen, bei denen Messungen eine wichtige Rolle spielen, wie zum Beispiel bei der Freigabe von Materialien aus dem Kontrollbereich oder von Räumen zum konventionellen Abriss, beauftragt die Behörde Gutachter, die eigenständig Messungen vornehmen und so die betreibereigenen Messungen verifizieren. Auch diese Überprüfungen münden in behördlichen Bescheiden.

5. Wie gelangt die Radioaktivität in die Anlage?

Es gibt nur zwei prinzipielle Wege, wie Radioaktivität in die Anlage gelangt: durch Neutronenaktivierung oder durch aus den Brennelementen gelöste Spaltprodukte.

Zum einen produziert der Kernbrennstoff beim Betrieb in der Anlage Neutronen, um das Uran zu spalten. Die Neutronen dringen in Einbauten im Reaktor (Gestelle, Messgeräte, etc.) und in den Behälterstahl ein. Sie durchdringen ihn teilweise sogar und gelangen in das Biologische Schild, eine Betonstruktur, die den Reaktorbehälter umschließt. Alle diese Gegenstände nehmen Neutronen auf und es bilden sich in nichtradioaktiven Metallen oder Beton radioaktive Bestandteile.

Abbildung 5-1: Entstehung und Zerfall von radioaktivem Cobalt-60



Quelle: Darstellung Öko-Institut e.V.

Typisch für die Neutronenaktivierung ist, dass der gesamte Behälterstahl oder der Beton des Biologischen Schilts mehr oder weniger gleichmäßig mit aktivierten Bestandteilen durchsetzt ist, so dass eine Separierung radioaktiver und nichtradioaktiver Bestandteile in dem Stahl oder Beton gar nicht möglich ist, weil man dazu einzelne Atome sortieren müsste. Eine solche Komponente ist so durchdringend mit radioaktiven Bestandteilen durchsetzt, dass sie in jedem Fall radioaktiver Abfall ist, der in ein Endlager muss.

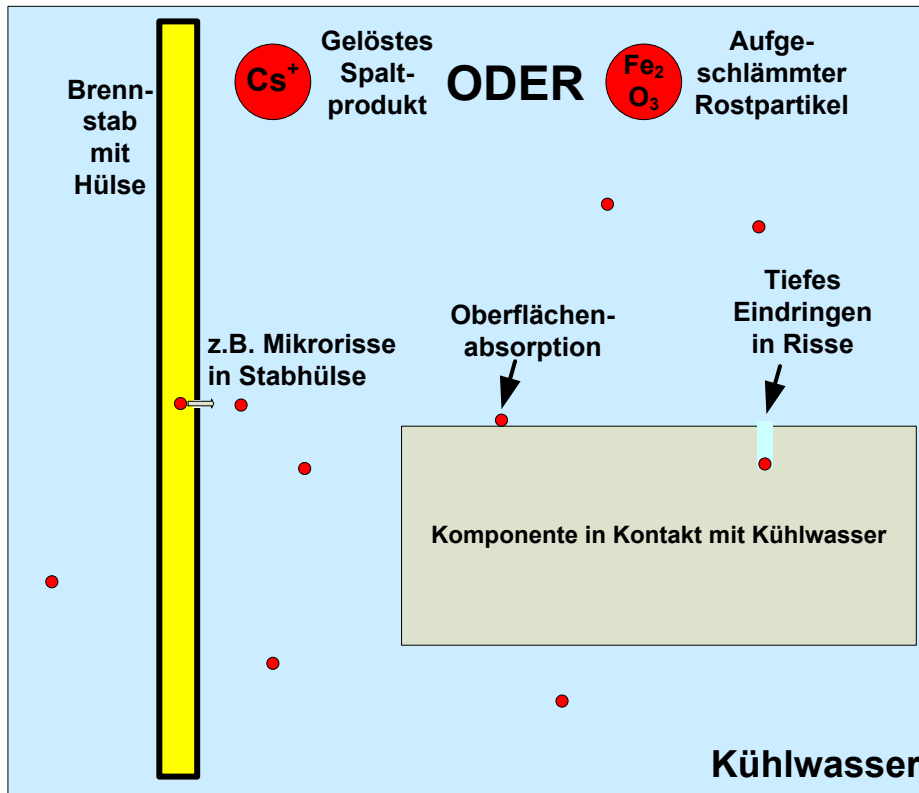
Welche radioaktiven Stoffe genau durch Neutronenaktivierung entstehen, ist davon abhängig, aus welchen Materialien der Behälterstahl oder das Biologische Schild gebaut sind. Da die unterschiedlichen Bestandteile eines Behälterstahls unterschiedlich gut Neutronen aufnehmen, können dabei sogar in Spuren vorhandene Nebenbestandteile im Stahl noch für den Radioaktivitätsgehalt wichtig werden. So hat jede von Neutronenaktivierung betroffene Komponente ein typisches Radioaktivitätsspektrum. Daher werden Angaben zu Aktivitätsgehalten oder zu wichtigen/unwichtigen Nukliden bei neutronenaktivierten Materialien erst durch Beprobung und genaue Messung der Komponenten zuverlässig (→ vgl. Frage 3. Warum kann man nicht angeben, wieviel Radioaktivität noch in der Anlage ist?).

Der zweite Weg, wie Radioaktivität in die Anlage gelangt, verläuft über undichte Brennelemente. In jeder Kernladung mit Brennelementen gibt es einzelne Brennstäbe mit feinen Haarrissen. Über diese feinen Haarrisse gelangen ausschließlich leicht verdampfbare und gut wasserlösliche Spaltprodukte wie Cäsium oder Strontium aus der Brennstabhülse durch Diffusion in das umgebende Kühlwasser. Uran und Plutonium im Brennstab gelingt es nicht, den Haarriss zu durchtunneln, dazu sind diese beiden Stoffe auch zu fest in die Brennstoffkeramik eingebunden.

Zur Kontamination des Kühlwassers trägt indirekt auch die Neutronenaktivierung bei, denn durch Abrieb gelangen Rost- oder Metallpartikel von der Oberfläche aktivierter Metalle in das Kühlwasser. Einerseits sind die Rostpartikel selbst aktiviert, weil sie dem Neutronenstrom des Reaktors ausgesetzt waren. Aber an der großen Oberfläche solcher Rostpartikel sammeln sich auch noch zusätzlich Spaltprodukte wie Cäsium. Solche hochradioaktiven Partikel befinden sich in Kühlwasser und gelangen mit diesem in den gesamten primären Kühlkreislauf (beim Druckwasserreaktor) und auch zur Turbine (beim Siedewasserreaktor). Das Kühlwasser wird zwar kontinuierlich von geladenen Teilchen und Partikeln gereinigt, im Betrieb stellt sich aber ein recht hohes Niveau an Kontamination des Kühlwassers ein. Die Höhe dieses Niveaus ergibt sich aus dem Umfang an Haarrissen im Brennstoff und aus dem Abrieb.

An allen Gegenständen, die mit dem Kühlwasser in Berührung kommen (Rohrleitungen, Pumpen, Ventile etc.), können sich gelöste Spaltproduktpartikel (Cäsium) oder aktivierte Rostpartikel an der Oberfläche abscheiden. Hat die Oberfläche Risse, so erfolgt je nach Partikelgröße auch ein Eindringen, je nach Risstiefe unterschiedlich tief.

Abbildung 5-2: Kontamination des Kühlwassers



Quelle: Darstellung Öko-Institut e.V.

Nach einigen Jahren Betrieb bildet sich daher auf allen Komponenten, die mit Kühlwasser in Berührung kommen, ein gleichmäßiger Kontaminationsbesatz. Es bildet sich ein Gleichgewicht zwischen neu abgelagerter Kontamination und durch Abrieb abgetragener Kontamination. Gelegentliche Dekontaminationen des Primärkreislaufs können dieses Niveau senken, aber schon nach kurzem Betrieb des Reaktors stellt sich wieder ein erhöhtes Niveau ein. Auf welchem Niveau sich das Gleichgewicht einstellt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und kann nur durch Messung am realen Objekt festgestellt werden.

Alle anderen Kontaminationsarten, die in der Praxis vorkommen, leiten sich von diesen beiden beschriebenen Mechanismen ab und sind Varianten derselben. Gelangt das Kühlwasser bei einer Tropfleckage auf einen Betonboden, wird auch dieser kontaminiert. Wird mit radioaktivem Abfall aus der Kühlwasserreinigung umgegangen und geht dabei Material verloren, werden Raumbereiche kontaminiert. Wird Kontamination durch Aufwischen oder Abtrag entfernt, entsteht radioaktive Waschflüssigkeit oder radioaktiver Sekundärabfall. Die Zusammensetzung dieser Kontamination entspricht genau der Zusammensetzung des Kühlwassers zu dem jeweiligen Betriebszeitpunkt, abzüglich des verdunsteten Wasseranteils.

6. Kann man Radioaktivität abwischen?

Eine Kontamination durch Neutronenaktivierung lässt sich nicht abwischen, da das Material gleichmäßig mit aktivierten Bestandteilen durchsetzt ist.

Bei einer Kontamination durch Sorption, d.h. durch Ansammlung gelöster Spaltproduktpartikel (Cäsium) aus den Brennelementen oder aktivierter Rostpartikel an der Oberfläche, ist dies teilweise möglich, weil ein Teil der Kontamination nur sehr locker auf der Oberfläche sitzt (→ vgl. Frage 5. *Wie gelangt die Radioaktivität in die Anlage?*). Dies kann tatsächlich mit einem einfachen Wischen entfernt werden kann, wie ein Flecken auf dem Boden. Damit verschwindet die Radioaktivität natürlich nicht, sie wechselt nur den Aufenthaltsort von der Oberfläche auf den Wischlappen, der dadurch seinerseits endzulagernder radioaktiver Abfall wird.

Allerdings gibt es auch fest auf der Oberfläche haftende oder gar tief in Risse eingedrungene Partikel, die mit einem einfachen Wischen nicht entfernbar sind, wie ein Tintenklecks auf der Haut oder Rotwein auf dem Hemd. In diesen Fällen muss man im Extrem die Oberfläche entfernen und so tief abtragen, wie die Risse reichen. Bei kontaminiertem Beton ist das die Regel, weil der von Natur aus sehr rissig ist. Hat die Kühlwasserpfüte einige Tage auf dem Beton herumgestanden, haben die radioaktiven Partikel schon die tiefsten Risse ausgemacht und sich dort hineinverkrochen.

Hat man die Kontamination von der Oberfläche entfernt, muss man dafür sorgen, dass sie nicht wieder auf die Oberfläche aufzieht. Die wässrigen Mittel, um das zu erreichen, ähneln in der Zusammensetzung handelsüblichen Haushaltsreinigern (Stichworte: EDTA, Polyphosphate, Zitronensäure). Bei Metallen (Rohrleitungen, Behälter) werden aber auch schärfere Säuren eingesetzt (Salpetersäure, Salzsäure). In der Fachsprache werden diese als Dekontmittel bezeichnet. Es werden große Mengen davon bei Rückbauvorhaben eingesetzt.

Kann die Kontamination auf diese Weise nicht entfernt werden, so wird bei Beton die Oberfläche sandgestrahlt, abgefräst oder abgesägt. Auch bei Metallen kommen Feilen, Fräsen und ähnliches zum Einsatz. Die bei diesen Verfahren entstehenden Stäube und Flüssigkeiten können radioaktive Partikel enthalten. Aus diesem Grund müssen sie sorgsam zurückgehalten werden, damit sich nicht auf benachbarte saubere Oberflächen aufziehen.

Die Grenze, welcher Behandlungsaufwand sich für welche Komponente noch rechnet, entscheidet darüber, ob die Komponente als radioaktiver Abfall zu entsorgen ist (gar kein Dekont) oder ob sie gereinigt wird, somit nicht mehr radioaktiv ist und den Kontrollbereich in Richtung konventioneller Abfall verlassen darf. Mit immer ausgefeilteren Dekontmethoden hat sich dieser Anteil in den letzten Jahren stetig erhöht, aber es gibt Grenzen.

7. Welche Unfallgefahren gibt es beim Rückbau?

Sind die bestrahlten Brennelemente aus dem Reaktor und dem Lagerbecken entfernt und in Trockenlagerbehälter verpackt, entfällt das Risiko großer Freisetzungen. Von kleinräumigen Freisetzungen radioaktiver Stoffe beim Rückbau wären allenfalls noch Beschäftigte innerhalb der Anlage tangiert, die Bevölkerung in der Umgebung wäre nicht mehr betroffen.

Nach der Entfernung der Brennelemente fallen nur noch ungewöhnliche und für die bestehende Mannschaft im Vergleich zum bisherigen Betrieb ungewohnte Arbeitsschritte an: Es wird nicht mehr unter höchsten Qualitätsansprüchen geschweißt, sondern mit dem Schneidbrenner zerschnitten und in Fässer abgelegt. Armaturen werden nicht mehr fachgerecht gewartet und geprüft, sondern einfach herausmontiert, gereinigt und als Abfall entsorgt. Die Arbeit erfolgt nicht

mehr nach standardisierter Betriebshandbuch-Vorgabe, jeder Arbeitsschritt ist nun sorgfältig im Hinblick auf die technischen Arbeitsabläufe, auf Nebenwirkungen für andere Arbeitsschritte und die dabei zu beachtenden Strahlenschutzvorkehrungen hin zu planen und von der Aufsichtsbehörde zu bestätigen. Der Rückbau erfordert eine immense Umstellung bei der Arbeitsorganisation, eine umfangreiche Neuqualifikation des verbleibenden Personals und auch die Überwindung von antrainierten Gewohnheiten.

Neu ist dabei auch, dass alle Arbeiten unter der Randbedingung auszuführen sind, eine Verschleppung kontaminierter Materialien in unkontaminierte Raumbereiche zu verhindern. Daher wird innerhalb der Anlage unter temporärer Einhausung z. B. mit Zelten gearbeitet, Stäube werden direkt am Ort ihrer Entstehung abgesaugt und gefiltert etc. Damit wird bei jedem einzelnen Arbeitsgang für einen Einschluss gesorgt und Freisetzungsmöglichkeiten wirksam unterbunden. Käme es dennoch zu solchen Freisetzungseignissen, steht immer noch der Einschluss im Gebäude und die Abluftreinigung des Kernkraftwerks zur Verfügung, so dass selbst bei solchen gravierenden Ereignissen keine nennenswerten Auswirkungen außerhalb der Anlage zu erwarten sind.

Erfolgen Arbeiten außerhalb des Gebäudes (zum Beispiel zur Entfernung von Bodenkontaminationen), wird ebenfalls mit Einhausungen gearbeitet, um eine Verschleppung von Kontamination durch Niederschläge oder Wind zu unterbinden.

8. Kann man mit dem Rückbau schon beginnen, solange noch Brennelemente in der Anlage sind?

Solange noch Brennelemente in der Anlage sind, sind alle technischen Systeme, die für die Aufrechterhaltung des Betriebs und der Kühlung des Lagerbeckens sowie zur weiteren Überführung von Brennelementen in Trockenlagerbehälter erforderlich sind, uneingeschränkt zu erhalten. Rückgebaut werden können nur solche technischen Systeme, die nur für den Reaktorbetrieb erforderlich waren und die von den zu erhaltenden Systemen physisch abgekoppelt werden können. Jeder Schritt, der in dieser Phase geplant und ausgeführt wird, muss vorher auf Vermaschungen mit Sicherheitssystemen und auf Rückwirkungsfreiheit geprüft werden. Daher sind in dieser ersten Phase des Rückbaus nur eingeschränkte Tätigkeiten ausführbar.

Das bedeutet aber nicht, dass es in dieser Phase nichts oder nur wenig zu tun gibt. Eine ganze Reihe von Einrichtungen kann bereits vollständig rückgebaut werden, ganze Räume können von nicht mehr benötigten Einbauten befreit werden, das Kontaminationskataster der Anlage kann vervollständigt werden, erst später auszuführende Schritte können geplant und, wenn nötig, an inaktiven Dummies erprobt werden.

Ein optimal geplanter Rückbau der Anlage berücksichtigt solche einschränkende Bedingungen und ihre Rückwirkungen auf die Arbeitsschritte, um Personal und Maschinen möglichst gleichmäßig auslasten zu können. Müssen einzelne Arbeitsschritte zeitlich verschoben werden, weil auf das Vorliegen der einzuhaltenden Bedingungen gewartet werden muss, sind Alternativen im Rückbauplan vorzusehen und eine geänderte Schrittabfolge puffert dies ab.

Das Vorhandensein von Brennstoff in der Anlage zwingt zwar dazu, alle Rückbauschritte sorgfältig auf ihre sicherheitstechnischen Rückwirkungen zu prüfen und entsprechend gewissenhaft zu planen. Das bedeutet aber nicht, dass der Rückbau der Anlage unangemessen verschleppt werden muss.

9. Kann man Abfälle aus dem Rückbau als nichtradioaktiv freigeben?

Neutronenaktivierte Stoffe, die über der Freigabegrenze aktiviert sind (was bei Materialien innerhalb des Reaktordruckbehälters die Regel ist), können grundsätzlich nicht als nichtradioaktiv freigegeben werden. Bei allen anderen Materialien ist der allergrößte Teil, aus denen ein Kontrollbereich physisch besteht (Metalle, Beton) nie mit Kühlwasser in Berührung gekommen, also in der Regel auch nicht radioaktiv. Das betrifft etwa die Hälfte der Masse des Kontrollbereichs. Da vorsichtshalber die Regel gilt, dass in einem Kontrollbereich per se alles als radioaktiv anzusehen ist, für das nicht mittels Messung positiv festgestellt wurde, dass es nicht radioaktiv ist, muss jeder Gegenstand, der den Kontrollbereich verlässt, ausgemessen werden. Die Vermutung, dass irgendetwas nicht radioaktiv belastet sei, gilt im Kontrollbereich nicht. Es ist messtechnisch festzustellen.

Für diese Messungen gibt es mittlerweile ausgefeilte Methoden. Sie alle fußen darauf, dass alle Rückbauabfälle im Kernkraftwerk immer auch Gammastrahler im Nuklidgemisch haben. Es genügt daher, möglichst genau die Gammazerfälle in einem Abfallgebilde (z. B. einem Fass) zu zählen und aus dem gemessenen Strahlungsniveau den Kontaminationszustand zu ermitteln. In einer vorher im Labor ausgemessenen Probe wird zudem anhand einer Vollanalyse (einer vollständigen Messung aller alpha-, beta- und gammastrahlenden Nuklide) der sogenannte Nuklidvektor ermittelt, also das Verhältnis aller einzelnen Nuklide des Gemisches zur Gesamtaktivität (→ vgl. *Anhang: Nuklidvektor*). Auf diese Weise lässt sich aus der Aktivitätsmessung am Einzelgebilde der Gehalt der Nuklide des gesamten Vektors in diesem Gebilde errechnen.

Für die vielen unterschiedlichen Gegenstände, die beim Rückbau zu entfernen sind, gilt natürlich nicht nur ein Einheitsvektor. Es werden vielmehr unterschiedliche Vektoren ermittelt und auf jeweils eine festgelegte Gruppe von Materialien angewendet. Die Methode ist in der Praxis sehr zuverlässig, da sich die Nuklidvektoren in realen Rückbauabfällen kaum verändern. Durch den radioaktiven Zerfall kurzlebiger Nuklide im Vektor ändern sich diese in vorausberechenbarer Weise und werden jährlich oder zweijährlich angepasst. Zudem wird noch gelegentlich durch erneute Vollanalyse der Vektor verifiziert (Vektorverifikation), so dass größere Änderungen in der Nuklidzusammensetzung erkennbar werden.

Erst wenn der Abfall die Messung erfolgreich absolviert hat, kann er behördlich freigegeben werden. Dazu wird der Messwert am Abfall mit dem Nuklidvektor umgerechnet, für jedes Nuklid mit dem Freigabewert der Strahlenschutzverordnung verglichen und diese Werte über den gesamten Vektor aufsummiert. Die Freigabe wird somit nicht aufgrund eines einzelnen Nuklids erteilt, sondern für das Gemisch insgesamt.

In der Praxis bleiben etwa 50 Prozent der Abfälle aus dem Kontrollbereich unter der (sehr niedrigen) Nachweisgrenze der Messung (in der Regel liegt die Erkennungsgrenze bei etwa 1/10 des Freigabewertes oder niedriger). Das gilt selbst für einen großen Teil der ehemals kontaminierten, aber erfolgreich dekontaminierten Abfälle, da bei der Dekontamination eher mehr als nötig gereinigt, abgefräst oder abgeflext wird, um den Freigabewert sicher zu unterschreiten.

Insgesamt kann man sagen, dass der allergrößte Teil der freigegebenen Abfälle unter der Nachweisgrenze bzw. leicht darüber liegt und nur ein sehr geringer Teil der Abfälle tatsächlich im Bereich des Freigabewertes liegen. Kollektivdosen und Aktivitäten, die errechnet werden unter der Annahme, sämtliche Materialien aus dem Rückbau seien mit dem zulässigen Freigabewert kontaminiert, haben daher keinen Bezug zur Wirklichkeit.

Auf die beschriebene Weise ist sichergestellt, dass nur tatsächlich gemessene Materialien den Kontrollbereich verlassen und dass diese die Freigabewerte auch einhalten. Möglicherweise vorhandene Restkontamination ist zwar messtechnisch erkennbar, die davon ausgehenden

Belastungen aber vernachlässigbar niedrig (vgl. → 10. Welchen Schutz bieten die Freigabewerte?).

10. Welchen Schutz bieten die Freigabewerte?

Der Definition der Freigabewerte liegt zugrunde, dass auf keinem denkbaren Belastungspfad (durch Direktstrahlung, über die Nahrung, durch Einatmen usw.) nach einer Freigabe eine Dosisbelastung von mehr als 10 $\mu\text{Sv/a}$ (Mikrosievert pro Jahr) für ein Individuum resultieren kann. Die Dosis von 10 $\mu\text{Sv/a}$ liegt um das 300-fache unter der natürlichen Hintergrundbelastung in Deutschland und um das 100- bzw. 60-fache unter den Grenzwerten für Emissionen aus kerntechnischen Anlagen (je nachdem mit welchem Emissionsgrenzwert verglichen wird). Und sie kann auch nur dann zustande kommen, wenn ein Mensch 37,5 Stunden pro Woche über das ganze Jahr

- bei Direktstrahlung neben einem mit dem Freigabewert kontaminierten Stahlzylinder (Radius 50 cm, Dicke 50 cm) steht oder
- den freigegebenen Stoff (1,2 mg/h) in dieser Zeit als Staub inhaliert (Inhalation) oder
- pro Jahr 20 g des freigegebenen Stoffs isst (Ingestion), wobei dessen Konzentration in der verzehrten Menge 10-fach höher angenommen wird als im Mittel des freigegebenen Materials.

Diese Szenarien sind an sich nicht besonders realistisch. Sie sind aber so vorsichtig definiert, um auf jeden Fall die Schutzanforderung sicher einzuhalten.

Erhält man eine Strahlenbelastung von 10 $\mu\text{Sv/a}$, entspricht das einem Risiko von eins zu 1,8 Millionen, daraus einen ernsthaften Gesundheitsschaden zu erleiden. Darin ist weder die geringe Wahrscheinlichkeit, jemals mit freigegebenen Abfällen in Kontakt zu kommen, noch die geringe Wahrscheinlichkeit enthalten, dass dieser Kontakt mit einem Material erfolgt, das bis zum Freigabewert kontaminiert wäre. Würde diese Wahrscheinlichkeiten einbezogen, dann wäre das Schadensrisiko noch niedriger.

Risiken in dieser Größenordnung werden als trivial bezeichnet. Sie sind so gering, dass sie für Entscheidungen des Individuums vernünftigerweise keine Rolle mehr spielen. Dem Vermeiden solcher Risiken steht auch kein ausreichender Nutzen mehr gegenüber. Dieses Risikopotential ist kompatibel mit trivialen Risiken bei konventionellen potentiell gefährlichen Technologien sowie der versicherungsrechtlichen Risikodefinition.

Diese sehr niedrigen Risikowerte wurden auch deshalb gewählt, damit bei der Freigabe großer Abfallmengen kein einziger Gesundheitsschaden resultieren kann und auch die Kollektivdosis begrenzt ist. Sie decken ferner auch Unsicherheiten ab, wie sie sich aus dem zunehmenden Erkenntnisfortschritt ergeben. Da es sich bei den Wirkungen der radioaktiven Strahlung um eine seit vielen Jahrzehnten intensiv erforschte und heute sehr genau bekannte Art der Gefährdung handelt, sind solche Erkenntnisfortschritte kaum noch relevant. Geringfügige Schwankungen bei Risikoeinschätzungen sind bei den sehr niedrig angesetzten Risikowerten der Freigabe ebenfalls kaum noch relevant.

11. Welche Strahlenbelastungen resultieren aus Wiederverwendungen freigegebener Metalle?

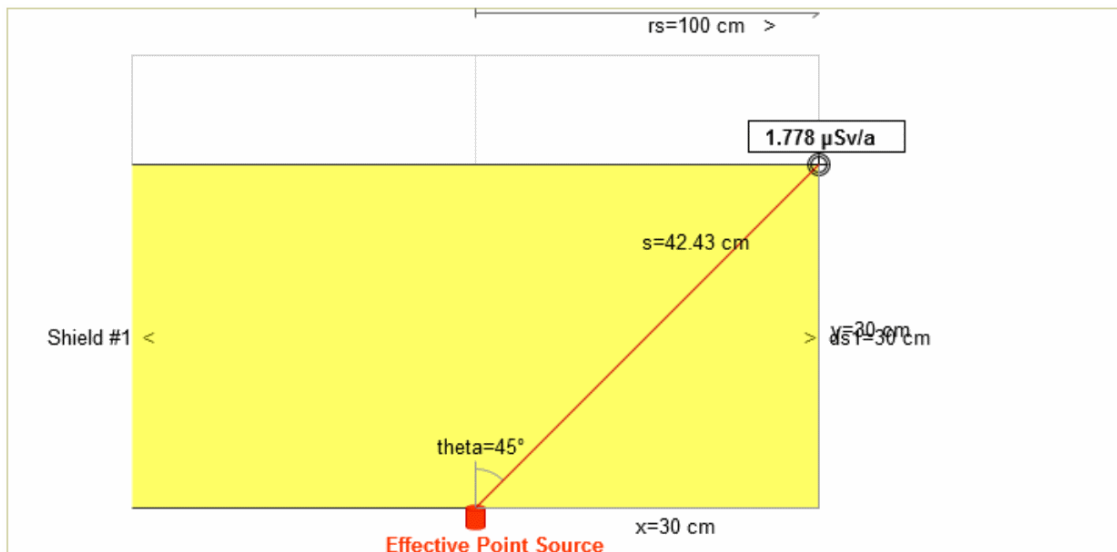
Bei der Wiederverwendung freigegebener Metalle werden häufig zwei Szenarien betrachtet: Das Metall gelangt nach der Freigabe in eine Bratpfanne oder wird als Feinstahl für die Herstellung einer Zahnspange verwendet. Im Folgenden werden die beiden Szenarien gerechnet. Diese Berechnungen lassen sich übrigens mit frei im Internet verfügbaren Rechenmitteln durchführen (<http://www.wise-uranium.org/rdcx.html>). Die damit erzielten Ergebnisse sind mit denjenigen vergleichbar, die sich aus der Anwendung genauer rechnender Tools auch ergeben.

Bratpfannenszenario:

Wir nehmen an, eine Guss-Bratpfanne bestehe aus drei Kilogramm Eisen und sei bis zum Freigabewert für Cobalt-60 (0,6 Bq/g – Becquerel pro Gramm) belastet.

Für einen Koch, der für 2.000 Stunden pro Jahr in 30 cm Abstand mit der Pfanne hantiert, bedeutet dies eine Strahlenbelastung durch eine Punktquelle von 1,8 $\mu\text{Sv/a}$ (Mikrosievert pro Jahr) durch Direktstrahlung (\rightarrow Berechnungsparameter siehe Anhang: Parameter beim Pfannenszenario als Punkt- und Volumenquelle).

Abbildung 11-1: Strahlenbelastung durch eine Punktquelle

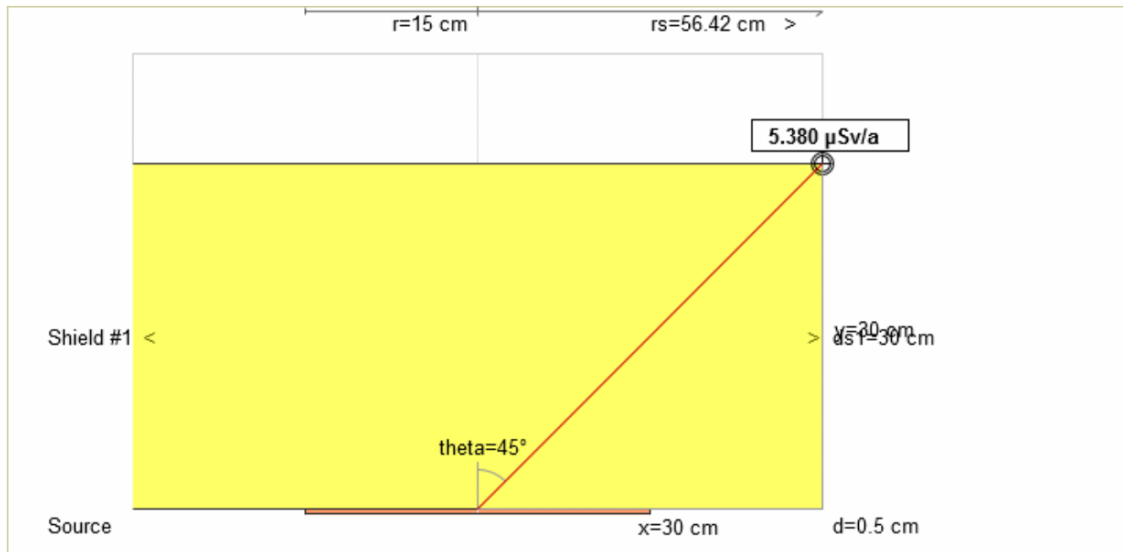


Quelle: <http://www.wise-uranium.org/rdcx.html>

Zur Beachtung: Zahlen in angelsächsischer Notation mit Dezimalpunkten statt Kommas

Betrachtet man die Pfanne hingegen als Volumenquelle (Durchmesser 30 cm, Tiefe 5 mm), ergeben sich bei einer Verwendung über 2.000 Stunden pro Jahr 5,4 $\mu\text{Sv/a}$.

Abbildung 11-2: Strahlenbelastung durch eine Volumenquelle



Quelle: <http://www.wise-uranium.org/rdcx.html>

Zur Beachtung: Zahlen in angelsächsischer Notation mit Dezimalpunkten statt Kommas

Die Stahlzusammensetzung spielt dabei praktisch keine Rolle, in Anwendung befindliche Nickel- und Chromlegierungen unterscheiden sich nur in der ersten Kommastelle. Die Dosis ist bei Annahme einer flächenhaft vorliegenden Quelle gegenüber einer Punktquelle um den Faktor 3 größer, beide Dosiswerte liegen aber deutlich unterhalb des 10 $\mu\text{Sv/a}$ -Kriteriums (\rightarrow vgl. Frage 10. Welchen Schutz bieten die Freigabewerte?).

Nutzt sich die gesamte Pfanne in zehn Jahren vollständig ab und wird der gesamte Abrieb mit der Nahrung von einer Person aufgenommen, dann resultieren im Fall der drei Kilogramm schweren Pfanne daraus jährlich 0,61 $\mu\text{Sv/a}$ durch Ingestion.

Zahnspangenszenario:

Unter der Annahme, eine Zahnspange aus einem Gramm Feinstahl sei mit dem Freigabewert für Cobalt-60 (0,6 Bq/g) belastet, würden daraus folgende Strahlenbelastungen resultieren:

Die Direktstrahlung beträgt lokal 14,4 $\mu\text{Sv/a}$ in 1 cm Abstand im Gewebe (Verweildauer: ganzjährig) und nimmt mit zunehmender Entfernung zur Quelle rasch ab. Für menschliches Gewebe in 5 cm Abstand zu dieser Quelle beträgt die Dosisbelastung nur noch 5,08 $\mu\text{Sv/a}$. Da im vorliegenden Rechenfall bis zur Freigabegrenze belasteter Stahl unterstellt wurde, in Realität aber bei der Stahlherstellung zwangsläufig eine Verdünnung mit unbelastetem Recyclingstahl eintritt (z. B. 1:10), sind beide Dosiswerte um das Zehnfache überschätzt und liegen eher bei 1,4 bzw. 0,5 $\mu\text{Sv/a}$. Alle genannten Dosisleistungen liegen im Bereich von bis zu 20 $\mu\text{Sv/a}$, entsprechend einem Risiko von 0 bis ca. eins zu einer Million für einen schweren Gesundheitsschaden. Sie halten daher das festgelegte Schutzniveau ein. Ingestion ist nicht zu besorgen, da sich der Feinstahl auch nach vielen Jahren Gebrauch nicht nennenswert auflöst oder abreibt und sich das enthaltene Cobalt-60 auch nicht selektiv herauslöst. Unterstellte man dennoch die vollständige Auflösung der 0,6 Bq Co-60, würden daraus 0,002 μSv an zusätzlicher Strahlenbelastung durch Ingestion resultieren.

Tatsächlich sind die Freigabewerte so vorsichtig definiert, dass sie solche Szenarien mühelos mit abdecken. Da bei der berechneten Strahlenbelastung in den beiden gerechneten Fällen keine Verdünnungseffekte (z. B. bei der Stahlherstellung) mit einberechnet sind, handelt es sich um Obergrenzen. In realen Fällen von Metallrecycling tritt Vermischung ein und die resultierende Individualdosis ist z. B. um den Faktor 10 noch niedriger als hier ermittelt.

12. Option „Sicherer Einschluss“: Wäre es nicht ungefährlicher, die Anlage erst mal 50 Jahre stehen zu lassen?

Bei einem sogenannten „Sicheren Einschluss“ wird die Anlage erst zu einem späteren Zeitpunkt zurückgebaut und bis dahin in einen stabilen Zustand überführt. Die Vorteile dieser Variante der Stilllegung sind gering, denn in dieser Zeit zerfällt praktisch nur Cobalt-60, aber nicht z. B. das ebenso gammaintensive Cäsium-137 oder gar das langlebige Nickel-59/-63. Da die meisten Arbeitsgänge in jedem Fall fernbedient und mit lokaler Staubfilterung ausgeführt werden müssen, ergibt sich aus der Verringerung der Cobalt-Aktivität praktisch keine Vereinfachung.

Dem gegenüber steht eine Reihe gravierender Nachteile: In 50 Jahren wäre keine Person mehr vorhanden, die die Anlage und ihre Betriebsgeschichte noch aus eigener Anschauung kennt. Auf vorhandene Pläne alleine ist aus Erfahrung kein Verlass, da diese im Detail oftmals nicht mit der tatsächlich errichteten Anlage übereinstimmen und darauf basierende Vorbereitungen deshalb scheitern. Auch Firmen mit Spezial-Knowhow im Rückbau gäbe es bis dahin vermutlich keine mehr, wenn alle anderen Anlagen bereits rückgebaut wären. Auch Strahlenschützer und Rückbauplaner dürften bis dahin rar geworden sein.

Hinzu kommt noch ein radiologisches Argument: Ist Cobalt-60 zerfallen, dann funktioniert das erprobte Verfahren über Nuklidvektoren nicht mehr, weil für metallische Rückbauabfälle kein leicht messbarer Bezugspunkt mehr vorhanden ist (→ vgl. Frage 9. *Kann man radioaktive Stoffe als nichtradioaktiv freigegeben?*). Dem immens erhöhten Messaufwand steht keinerlei Sicherheitsgewinn gegenüber.

Der „Sichere Einschluss“ bedeutet also im Vergleich zum sofortigen Rückbau erhebliche zusätzliche Risiken und Kosten. Nicht nur sind alle Arbeitsgänge auf jeden Fall nötig, ob sofort oder später. Hinzu kommt die lang andauernde Bewachung des Gebäudes, verbleibende Freisetzungsriskiken, die Unerfahrenheit des späteren Rückbaupersonals, die dann später fehlenden technischen und administrativen Strukturen und der denkbare Ausfall der Betreiberorganisation als Rückbauverantwortlicher als Risiko (→ vgl. Frage 13. *Wer zahlt für den Rückbau?*).

Insgesamt ist daher die sicherste Variante der zügige sofortige Rückbau mit dem vorhandenen erfahrenen und qualifizierten Personal.

13. Wer zahlt für den Rückbau?

Die meisten privaten Betreiber der Kernkraftwerke haben in den Bilanzen ihrer Aktiengesellschaften Rückstellungen gebildet, aus denen der Rückbau der Anlagen beglichen werden soll. Pro Anlage belaufen sich diese Rückstellungen auf 700 Millionen bis 1 Milliarden Euro. Aus Sicht des Öko-Instituts reichen diese Rückstellungen für einen gut organisierten Rückbau dieser Anlagen aus. Erhöhen sich die Kosten in unerwarteter Weise, zum Beispiel weil die Rückbauorganisation nicht optimal ist, ist zunächst die Aktiengesellschaft zahlungspflichtig. Gäbe es diese Aktiengesellschaft nicht mehr, müsste der Bund die Rückbauaufgabe weiterführen, was er schon im Falle der sechs DDR-Reaktoren in Greifswald und Rheinsberg getan hat.

Auch dieser Zusammenhang spricht dafür, den Rückbau der Anlagen so zügig wie möglich auszuführen. Nicht nur, weil die Rückstellungen durch Inflation kontinuierlich an Wert verlieren. Auch die Ausfallrisiken würden sich mit einem halben Jahrhundert „Sicherem Einschluss“ noch deutlich erhöhen und zusätzliche Maßnahmen zu deren langfristiger Sicherstellung wären erforderlich (→ vgl. Frage 12. Option „Sicherer Einschluss“: *Wäre es nicht ungefährlicher, die Anlage erst mal 50 Jahre stehen zu lassen?*).

14. Was ist eine „Grüne Wiese“?

Die „Grüne Wiese“ ist ein anschauliches Synonym dafür, dass nach dem Rückbau der Anlage keinerlei Hinterlassenschaften mehr vorliegen und das Gelände uneingeschränkt zu jedem beliebigen Zweck genutzt werden kann. Das ist der Fall, wenn bei allen möglichen Nutzungsarten gar keine oder nur noch Dosiswerte im Bereich von 0 bis 20 $\mu\text{Sv/a}$ (Mikrosievert pro Jahr) resultieren können (entsprechend einer Wahrscheinlichkeit von ca. eins zu einer Million für einen Gesundheitsschaden). Sollen einzelne Gebäude oder Infrastruktureinrichtungen für andere Zwecke weiter genutzt werden, müssen diese in einem Zustand an den Nachnutzer übergeben werden, der keinen radiologischen Einschränkungen mehr unterliegt. Das gilt im Prinzip auch für nicht-radiologische Kontaminationen, da der Nacheigentümer des Geländes auch die Verantwortung für gegebenenfalls hinterlassene konventionelle Altlasten mit übernimmt (Beispiele: PAK-belastete Fundamentreste, veraltete und abgenutzte Abwasserleitungen, problematische Baugrubenverfüllungen aus der Bauzeit).

Rechtlich erfolgt die Entlassung aus dem Atomrecht mit der Freigabe der letzten Gebäude zum konventionellen Abriss. Sind Kontaminationen aus der Anlage heraus in den Boden gelangt, unterliegt auch dieser der radiologischen Freigabe nach dem oben genannten Kriterium.

Fairerweise und zur Steigerung der Attraktivität für potenzielle Nachnutzer versetzt der Anlageneigentümer das Gelände in einen für den Nachnutzer günstigen Zustand. Im Falle der „Grünen Wiese“ wäre das beispielsweise das Aufbringen einer ausreichenden Kulturschicht und die erste Ansaat, bei industrieller Nachnutzung kann das der Erhalt oder der bedarfsgerechte Umbau vorhandener Infrastruktureinrichtungen sein.

15. Ist Rückbau verantwortbar?

Die Anlagen sind in jedem Fall zurückzubauen, um die radioaktiven Komponenten zu identifizieren, geordnet zu entfernen, radioaktive von nicht-radioaktiven Komponenten zu sortieren und radioaktive Komponenten sicher endzulagern. Diese Aufgabe ist mit der bestehenden Mannschaft in der Anlage am risikoärmsten möglich, weil die sich mit der Anlage, ihrer Betriebsgeschichte und den Vorkehrungen für den Strahlenschutz am besten auskennt. Daher sollte nach dem Abschalten der Anlage möglichst umgehend mit dieser Aufgabe begonnen werden (→ vgl. Frage 12. Option „Sicherer Einschluss“: *Wäre es nicht ungefährlicher, die Anlage erst mal 50 Jahre stehen zu lassen?*)

Die gegen den Rückbau und insbesondere gegen die Freigabe von Abfällen vorgebrachten Argumente und Bedenken sind nicht schlüssig und werden nicht von Fachleuten geteilt, die beim Rückbau tätig sind. Die Argumente basieren dabei im Wesentlichen auf Unkenntnis der realen Situation und spiegeln überwiegend emotionale Bedenken. Diese sind zwar verständlich, entbehren aber der sachlichen Grundlage und sollten nicht dazu Anlass geben, Rückbauvorhaben auf die lange Bank zu schieben. Die Anlagen für lange Zeiträume im betriebsfertigen Rohzustand zu belassen, bis auch die letzten Bedenken geklärt sein mögen, oder den Rückbau über

Jahrzehnte zu verzögern, wäre mit deutlich höheren Risiken verbunden als diese zügig zurückzubauen (→ vgl. Frage 12. Option „Sicherer Einschluss“: Wäre es nicht ungefährlicher, die Anlage erst mal 50 Jahre stehen zu lassen?).

Kontakt zum Öko-Institut

Gerhard Schmidt

Senior Researcher im Institutsbereich Nukleartechnik & Anlagensicherheit

Öko-Institut e.V., Büro Darmstadt

Tel.: +49 6151 8191-107

E-Mail: g.schmidt@oeko.de

Mandy Schoßig

Leiterin Öffentlichkeit & Kommunikation
Pressestelle

Öko-Institut e.V., Büro Berlin

Tel.: +49 30 405085-334

E-Mail: m.schoessig@oeko.de

Das Öko-Institut ist eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungsinstitute für eine nachhaltige Zukunft. Seit der Gründung im Jahr 1977 erarbeitet das Institut Grundlagen und Strategien, wie die Vision einer nachhaltigen Entwicklung global, national und lokal umgesetzt werden kann. Das Institut ist an den Standorten Freiburg, Darmstadt und Berlin vertreten.

16. Anhang

I. Nuklidvektor

Als Beispiel für einen Nuklidvektor ist im nebenstehenden Beispiel die Zusammensetzung eines Eindampfrückstands aus einem älteren Druckwasserreaktor dargestellt. Eindampfrückstände sind eingedampftes Kühlwasser und repräsentieren daher die wesentlichste Kontaminationsquelle in dieser Anlage. Ihre Zusammensetzung findet sich in ähnlicher Form

- bei allen Rohrleitungen, in denen Kühlwasser geflossen ist,
- auf der Oberfläche aller Behälter, in denen Kühlwasser aufbewahrt wurde,
- in allen Pumpen, die Kühlwasser gefördert haben, und
- bei allen Tropfleckagen, bei denen Kühlwasser aus undichten Pumpen und Rohrleitungen entwichen ist.

Ein großer Teil der Kontaminationsvorkommen in der Anlage ist hiermit abgedeckt. Nur aktivierte Anlagenteile haben eine davon sehr weit abweichende Zusammensetzung.

Dargestellt ist der prozentuale Anteil, den die Radioaktivität der einzelnen Radionuklide zur Gesamtaktivität beiträgt. Wie zu erkennen ist, tragen nur Eisen-55, Cobalt-60 und Cäsium-137 mit mehr als 10% zur Gesamtaktivität bei. Im Prozentbereich sind noch Nickel-63 und Europium-152 beteiligt. Alle anderen Radionuklide haben Beiträge von weniger als 1%. Das erste Aktinid in der Liste ist der vergleichsweise kurzlebige Betastrahler Plutonium-241 mit ca. 0,2% Beitrag. Der häufigste Alphastrahler ist noch Americium-241 mit 4 Tausendstel Prozentanteil. Alle anderen Alphastrahler (Plutonium-, Curium- und Uranisotope) tragen praktisch nicht zur Radioaktivität bei.

Radionuklid	%-Anteil an der Aktivitätskonzentration
Fe-55	42,270801
Co-60	28,851499
Cs-137	16,774127
Ni-63	9,393511
Eu-152	1,207737
Ni-59	0,503224
Sr-90/Y-90	0,335483
Cs-134	0,241547
Pu-241	0,228128
H-3	0,100645
Ag-108m	0,064413
Eu-154	0,020129
Am-241	0,003825
Pu-239/240	0,001879
Eu-155	0,001409
Pu-238	0,001208
Cm-243/244	0,000255
Cm-242	0,000067
U-235	0,000034
U-233	0,000034
U-234	0,000034
U-238	0,000013
Summe	100,000000

Nicht alle Radionuklide sind gleich gefährlich, bei gleicher Aktivität in Bq unterscheiden sich die Radionuklide erheblich in ihrer radiologischen Relevanz. Eine an der Gefährdung orientierte Einstufung ist in der folgenden Tabelle errechnet. Sie bewertet die Aktivitätsanteile nach derjenigen Konzentration in Bq/g, die bei der Freigabe von festen und flüssigen Stoffen nach Spalte 5 der Strahlenschutzverordnung 2012 noch zulässig wäre. Diese Freigabewerte stellen ein Maß für die Gefährlichkeit des jeweiligen Nuklids dar: Je größer dieser Wert, desto niedriger ist die Gefährdung.

Wie an der Reihenfolge des Eisen-55 zu erkennen ist, ist dasjenige Nuklid mit der höchsten Aktivität nunmehr auf Platz 7 abgerutscht. Es trägt nur noch 0,06% zur Gefährdung bei. Nur noch Cobalt-60 und Cäsium-137 tragen dazu nennenswert bei. Auch Nickel-63 als schwacher Betastrahler ist in den tieferen Bereich der Tabelle verschoben und weniger wichtig geworden. Bemerkenswert ist noch, dass auch nach dieser Gefährdungsbewertung die Alphastrahler Americium, Plutonium und Uran praktisch nicht zur Gefährdung beitragen: sie sind zwar vorhanden und nachweisbar, sind aber völlig unwichtig.

Oft wird gegen diese Nuklidvektoren eingewendet, dass die Hunderte von Radionuklide der Strahlenschutzverordnung, für die Freigabewerte definiert sind, damit gar nicht abgedeckt sei-

en. Da die meisten der dort aufgeführten Nuklide bei der Kernspaltung und Neutronenaktivierung erst gar nicht entstehen, wäre diese Erweiterung ein weitgehend sinnloses Unterfangen. Auch die Erweiterung der Vektoren um weitere zusätzliche Nuklide, deren Beitrag zur Aktivität oder zur Gefährdung nahezu Null ist, steigert zwar die Genauigkeit im Tausendstel Prozentbereich, bringt aber keine neuen Erkenntnisse.

Radionuklid	%-Anteil an der Aktivitätskonzentration	StrlSchV Spalte 5 Bq/g	A / G	%-Anteil am Freigabewert
Co-60	28,851499	0,1	288,514990	87,215311
Cs-137	16,774127	0,5	33,548255	10,141315
Eu-152	1,207737	0,2	6,038686	1,825437
Cs-134	0,241547	0,2	1,207737	0,365087
Sr-90/Y-90	0,335483	0,6	0,559138	0,169022
Ag-108m	0,064413	0,2	0,322063	0,097357
Fe-55	42,270801	200	0,211354	0,063890
Pu-241	0,228128	2	0,114064	0,034480
Eu-154	0,020129	0,2	0,100645	0,030424
Am-241	0,003825	0,05	0,076490	0,023122
Pu-239/240	0,001879	0,04	0,046968	0,014198
Ni-63	9,393511	300	0,031312	0,009465
Pu-238	0,001208	0,04	0,030193	0,009127
Cm-243/244	0,000255	0,07	0,003642	0,001101
Ni-59	0,503224	300	0,001677	0,000507
U-235	0,000034	0,3	0,000112	0,000034
H-3	0,100645	1000	0,000101	0,000030
Cm-242	0,000067	0,8	0,000084	0,000025
U-233	0,000034	0,4	0,000084	0,000025
U-234	0,000034	0,5	0,000067	0,000020
Eu-155	0,001409	30	0,000047	0,000014
U-238	0,000013	0,6	0,000022	0,000007
Summe	100,000000		330,807730	100,000000

Ein etwas anderes Bild ergibt sich, wenn der Eindampfrückstand (oder ein mit diesem kontaminiertes Teil) für 40 Jahre gelagert wird. Die Aktivitätsverhältnisse ändern sich dann entsprechend der Tabelle: Kurzlebige Nuklide wie z. B. Co-60 verlieren an Bedeutung, einige längerlebige Nuklide tragen prozentual höhere Anteile bei.

In der Tabelle ist der gleiche Nuklidvektor eines Eindampfrückstands nach 40 Jahren Zerfallszeit wiedergegeben. Erwartungsgemäß ist darin die Bedeutung des Co-60 deutlich niedriger, es hat den Rang mit Cs-137 getauscht. Insgesamt tragen sechs Nuklide noch mehr als 1% zum bewerteten Freigabeanteil bei.

Anzumerken ist noch, dass das ursprünglich nicht ausgewiesene Neptunium-237 aus dem Zerfall von Americium-241 nachgebildet wurde, aber nur einen vernachlässigbar niedrigen Beitrag ausmacht.

Radionuklid	%-Anteil an der Aktivitätskonzentration	StrlSchV Spalte 5 Bq/g	A / G	%-Anteil am Freigabewert	%-Anteil an der Aktivitätskonzentration t=40a	A/G t=40a	%-Anteil am Freigabewert t=40a
Cs-137	16,774127	0,5	33,548255	10,141315	45,062173%	0,901243	82,010996%
Co-60	28,851499	0,1	288,514990	87,215311	1,010469%	0,101047	9,195021%
Eu-152	1,207737	0,2	6,038686	1,825437	0,871204%	0,043560	3,963875%
Ag-108m	0,064413	0,2	0,322063	0,097357	0,349438%	0,017472	1,589903%
Sr-90/Y-90	0,335483	0,6	0,559138	0,169022	0,855823%	0,014264	1,297963%
Am-241	0,003825	0,05	0,076490	0,023122	0,067015%	0,013403	1,219646%
Pu-239/240	0,001879	0,04	0,046968	0,014198	0,012664%	0,003166	0,288102%
Ni-63	9,393511	300	0,031312	0,009465	48,042768%	0,001601	0,145726%
Pu-238	0,001208	0,04	0,030193	0,009127	0,005943%	0,001486	0,135211%
Pu-241	0,228128	2	0,114064	0,034480	0,239174%	0,001196	0,108821%
Eu-154	0,020129	0,2	0,100645	0,030424	0,005205%	0,000260	0,023682%
Ni-59	0,503224	300	0,001677	0,000507	3,394788%	0,000113	0,010297%
Cm-243/244	0,000255	0,07	0,003642	0,001101	0,000683%	0,000098	0,008877%
U-235	0,000034	0,3	0,000112	0,000034	0,000226%	0,000008	0,000687%
U-233	0,000034	0,4	0,000084	0,000025	0,000226%	0,000006	0,000515%
U-234	0,000034	0,5	0,000067	0,000020	0,000226%	0,000005	0,000412%
U-238	0,000013	0,6	0,000022	0,000007	0,000091%	0,000002	0,000137%
H-3	0,100645	1000	0,000101	0,000030	0,071946%	0,000001	0,000065%
Fe-55	42,270801	200	0,211354	0,063890	0,009898%	0,000000	0,000045%
Cs-134	0,241547	0,2	1,207737	0,365087	0,000002%	0,000000	0,000011%
Np-237	-	0,09	-	-	0,000001%	0,000000	0,000007%
Eu-155	0,001409	30	0,000047	0,000014	0,000036%	0,000000	0,000001%
Cm-242	0,000067	0,8	0,000084	0,000025	0,000000%	0,000000	0,000000%
Summe	100,000000		330,807730	100,000000	100,000000%	1,098930	100,000000%

Betrachtet man den Eindampfrückstand selbst in absoluten Konzentrationen, ergeben sich die in der Tabelle angegebenen Verhältnisse. Die Konzentrationen der Nuklide sind ferner mit den Freigabewerten der Strahlenschutzverordnung verglichen und die Nuklidverhältnisse aufsummiert. Man erkennt, dass der Abfall mit dieser Zusammensetzung auch nach 40 Jahren nicht freigebbar ist, da die Summe beim 1867-fachen der Freigabegrenze liegt. Insgesamt zehn Einzelnuclide liegen über der Freigabegrenze (Beitrag >1,0).

Nuklid	Aktivitätskonz.	Freigabe	Vielfache
	Bq/g	Bq/g	A/G
Cs-137	765,520	0,5	1.531,041
Co-60	17,166	0,1	171,659
Eu-152	14,800	0,2	74,001
Ag-108m	5,936	0,2	29,681
Sr-90/Y-90	14,539	0,6	24,231
Am-241	1,138	0,05	22,769
Pu-239/240	0,215	0,04	5,378
Ni-63	816,155	300	2,721
Pu-238	0,101	0,04	2,524
Pu-241	4,063	2	2,032
Eu-154	0,088	0,2	0,442
Ni-59	57,671	300	0,192
Cm-243/244	0,012	0,07	0,166
U-235	0,004	0,3	0,013
U-233	0,004	0,4	0,010
U-234	0,004	0,5	0,008
U-238	0,002	0,6	0,003
H-3	1,222	1000	0,001
Fe-55	0,168	200	0,001
Cs-134	0,000	0,2	0,000
Np-237	0,000	0,09	0,000
Eu-155	0,001	30	0,000
Cm-242	0,000	0,8	0,000
Summe			1.866,873

II. Parameter beim Pfannenszenario als Punkt- und Volumenquelle

Quelle: <http://www.wise-uranium.org/rdcx.html>, alle Zahlen in angelsächsischer Notation.

NORMAL ▾
Point Source Material Composition
RESET
HELP

Total amount: 3 kg of
 ----- Select Source Material, or enter individual concentrations below ----- ▾

Individual amounts below

Consider self-shielding of point source with: 7.87 rho_{so} - Source density [g/cm³]

Element / Nuclide	IMPORT		Element / Nuclide			Element / Nuclide		
Co-60	0.6	Bq/g ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
Fe	99	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
C	1	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾

NORMAL ▾
Volume Source Material Composition
RESET
HELP

----- Select Source Material, or enter individual concentrations below ----- ▾

7.87 rho_{so} - Source density [g/cm³]

Element / Nuclide	IMPORT		Element / Nuclide			Element / Nuclide		
Co-60	0.6	Bq/g ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
Fe	99	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
C	1	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾

Shield #1 Material Composition									
NORMAL							RESET		HELP
Air, Dry (Near Sea Level)									
0.001205 ρ_{sh1} - Shield density [g/cm ³]									
Element / Nuclide	IMPORT		Element / Nuclide			Element / Nuclide			
C	1.240e-2	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾	
N	75.53	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾	
O	23.17	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾	
Ar	1.282	wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾	
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾	
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾	
		wt_% ▾			wt_% ▾			wt_% ▾	