

Radioaktive Abfälle, lösbares oder unlösbares Problem?

Dr. sc. nat. Walter Rüegg, November 2014

„Nichts macht den Menschen argwöhnischer, als wenig zu wissen“. Francis Bacon, englischer Philosoph und Staatsmann (1561-1626).

Contents

1	Einleitung	2
1.1	Wie gefährlich sind radioaktive Abfälle?	2
1.2	Euphorie und Phobie	2
2	Radioaktive Strahlen	4
2.1	Wie wirken radioaktive Strahlen?	4
2.2	Grenzwerte.....	7
3	Risikokommunikation	8
4	Radioaktive Abfälle.....	11
4.1	Wie bestimmt man das Risiko von Abfällen?	11
4.2	Zusammensetzung von hochradioaktiven Abfällen	11
4.3	Wie giftig sind hochradioaktive radioaktive Abfälle?.....	12
4.4	Mengen	17
5	Vergleich mit anderen Giftstoffen.....	17
5.1	Arsen und andere chemische Giftstoffe	17
5.2	Sondermüll und Giftgas.....	19
5.2.1	Schweiz	19
5.2.2	Ganze Welt.....	19
5.3	Bergbauabfälle (Tailings)	20
6	Abfälle aus andern Energieerzeugern	23
6.1	Kohlekraftwerke und die Lecks von Fukushima	23
6.2	Photovoltaik.....	24
7	Natürliche Radioaktivität	25
7.1	Alles strahlt.....	25
7.1.1	Natürliche Radioaktivität der Schweiz.....	26
8	Die Endlagerung.....	27
8.1	Hochradioaktive Abfälle.....	27
8.2	Vergleich mit Lagerstätten von toxischen Mineralien	29
9	Der Naturreaktor und das Endlager von Oklo (Gabun)	30
10	Zusammenfassung und Schlusswort	32

1 Einleitung

1.1 Wie gefährlich sind radioaktive Abfälle?

In der Öffentlichkeit ist man sich einig: Radioaktive Abfälle zählen zu den gefährlichsten Stoffen welche die Menschheit erzeugt. Aber wie gefährlich sind sie wirklich, etwa im Vergleich zu unserem toxischen Sondermüll? Eine interessante Antwort findet man auf der Web-Site der grössten Schweizer Sondermülldeponie in Köliken (SMDK), FAQ: „Sind in der SMDK extrem gefährliche Stoffe eingelagert?“ Antwort:

*„Nein. Entgegen allen Gerüchten und Vermutungen gibt es keine konkreten Hinweise auf eingelagerte Stoffe von extremer Gefährlichkeit, wie z.B. auf explosive Stoffe oder gar radioaktiv belastete Materialien.“*¹

Radioaktiv belastete Materialien beanspruchen also einen Spitzenplatz unter den extrem gefährlichen Stoffen. Die hochradioaktiven Abfälle von Kernkraftwerken sind die stärksten Strahlenquellen die es auf diesem Planeten gibt. Somit dürften sie unvorstellbar gefährlich sein. Ein Vergleich mit anderen toxischen Stoffen oder mit all unserem Sondermüll wäre aber trotzdem interessant: Sind hochradioaktive Abfälle Millionen, Billionen oder gar Trillionen mal toxischer als „normale“ Gifte wie Blei, Cadmium, Zyankali, Arsen, Quecksilber usw.? Und hat es davon Milliarden mal mehr tödlicher Dosen? Wir werden in den nachfolgenden Kapiteln solche Vergleiche durchführen - und ziemlich staunen.

1.2 Euphorie und Phobie

Der dominierende Aspekt bei der Beurteilung der Kernkraft ist die Angst vor der radioaktiven Strahlung. Diese Angst entstand in den 50er und 60er Jahren des letzten Jahrhunderts, nach einer langen Periode mit positiver Einstellung zu solchen Strahlen. Natürlich war man sich damals den Gefahren sehr wohl bewusst: Um 1930, etwa 30 Jahren nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen und der Radioaktivität, waren alle wesentlichen negativen Wirkungen von hohen Dosen ionisierender² Strahlen bekannt: Akute Strahlenkrankheiten (forderten über 100 Todesopfer und mehrere 1000 Verletzten), Krebsinduktion, Mutationen und genetische Veränderungen. Mehrere tausend Zifferblattmahlerinnen („Radium-Girls“) wurden in den 20er-Jahren sehr hohen Dosen ausgesetzt. Mehrere Hundert litten an akuter Strahlenkrankheiten und –Verletzungen (mehr als bei Tschernobyl!). Etwa 30 dieser Arbeiterinnen überlebten diese Akutphase nicht, zudem verstarben später etwa 80 an Knochenkrebs (Grund: Ingestion von Radium). Es gab viele fette Schlagzeilen und aufsehenerregende Prozesse, immerhin wurden die Arbeiterinnen relativ grosszügig entschädigt.

Es kann also keine Rede davon sein, dass man früher (in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts) die Gefahren nicht kannte. Aber beim damals vorherrschenden Fortschrittsglauben fokussierte man sich in

¹ SMDK, <http://www.smdk.ch> (Stand 3.7.2014)

² Ionisierende Strahlen führen zu starken Veränderungen („Ionisationen“) von Atomen und Molekülen, Biomoleküle können beschädigt werden und nicht mehr funktionieren. Zu den ionisierenden Strahlen zählen neben den radioaktiven Strahlen (aus Kernzerfällen) auch die Röntgenstrahlen.

der wissenschaftlichen Forschung und in den Medien auf den gesundheitlichen Nutzen dieser Strahlen. Es gab kaum eine Universität, welche nicht auf diesem Gebiete tätig war. Bei kleinen Dosen zeigten die vielen wissenschaftlichen Untersuchungen überraschend oft positive Effekte wie Wachstumsförderung, Lebensverlängerung und Therapieerfolge bei vielen Krankheiten und Verletzungen. Die Folge war eine fast euphorische Einstellung zur Radioaktivität. Man streute radioaktiven Dünger auf die Felder, genoss radioaktiv angereicherte Lebensmittel (z.B. Brot, Bier, Schokolade), reinigte anschliessend die Zähne mit radioaktiver Zahnpasta, kleidete sich in radioaktiver Unterwäsche (inkl. Säuglinge), benutzte radioaktive Kosmetika und Medikamente und badete im radioaktiven Wasser von Heilbädern.



Abbildung 1-1 In der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurden Lebensmittel, Medikamente und sogar Babywolle mit radioaktiven Substanzen angereichert.

Thermalquellen lösen, bedingt durch die hohe Temperatur des Wassers, besonders viele Mineralien aus dem Gestein. Uran kommt in jedem Boden vor, im Durchschnitt findet man etwa 6 Gramm pro Kubikmeter (neben etwa 60 anderen von Natur aus radioaktiven Substanzen). Die Folge: Alle Heilquellen sind mehr oder weniger mit radioaktiven Elementen angereichert. Die Kurorte stritten sich früher wer das radioaktivste Wasser hat, Werte bis über 50'000 Bq/l³ waren (und sind immer noch) keine Seltenheit. Zum Vergleich: Der heutige Grenzwert für Cs-137 im Trinkwasser liegt in Japan bei 10 Bq/l. Radiotoxisch sind die im Heilwasser vorhandenen Radionuklide vergleichbar mit Cs-137. Schadet es der Gesundheit, wenn man solches radioaktiv „verseuchtes“ Heilwasser trinkt oder darin badet? Eine Jahrtausend alte Erfahrung, aber auch eine ganze Reihe von neueren wissenschaftlichen Studien belegen genau das Gegenteil.

³ Bq (Becquerel) ist ein Mass für die Radioaktivität (Anzahl Zerfälle pro Sekunde).

Nach dem zweiten Weltkrieg und insbesondere in den 60er-Jahren des letzten Jahrhunderts kippte der Fortschrittsglauben in grossen Teilen der westlichen Industriegesellschaft in eine Technikfeindlichkeit um. Entsprechend konzentriert sich auch die Forschung auf die negativen Aspekte der Technik. Und für die Medien sind negative Nachrichten sowieso viel wertvoller als Positive. Man kämpfte heute gegen Gentechnik, grosse Industrieanlagen, Individualverkehr, Pestizide, Kunstdünger, industrielle Nahrungsmittel, Handystrahlung und vieles mehr. Unter anderem kam auch die positive Einstellung zur radioaktiven Strahlung zu einem Ende, vordergründig vor allem auf Grund von Befürchtungen über ein starkes Ansteigen von Erbschäden (die sich dann in den 60er Jahren als unbegründet erwiesen), aber auch auf Grund von Ängsten vor einem Nuklearkrieg. Heute herrscht eine eigentliche Phobie⁴ vor Strahlen aller Art. In den Medien und in gewissen politischen Kreisen werden selbst die allerwinzigsten Strahlendosen dämonisiert. Das Grundübel: Die Risiken werden nicht quantifiziert und mit anderen Risiken verglichen. Zum Beispiel mit der natürlichen Strahlung. Aber ohne Vergleiche können wir Risiken nicht richtig bewerten und einordnen. In den nachfolgenden Kapiteln werden wir solche Vergleiche anstellen.

2 Radioaktive Strahlen

2.1 Wie wirken radioaktive Strahlen?

Radioaktive Strahlen haben nicht grundlegend andere gesundheitliche Folgen als „normale“ Giftstoffe. Hohe Einmaldosen (Schockdosen) bewirken akute Erkrankungen (Strahlenkrankheit), deren Symptome denjenigen einer starken Chemotherapie mit Zytostatika sehr ähnlich sind. Dies ist kein Zufall, denn in beiden Fällen werden vorwiegend die sich schnell teilenden Epithelzellen⁵ und die Blutstammzellen im Knochenmark angegriffen. Bei einer hohen, aber nicht tödlichen Schockdosis folgt nach der Erholung von der akuten Phase (typisch einige Wochen) praktisch immer eine jahrzehntelange, völlig normale Lebensphase. Die wichtigste Ausnahme: In seltenen Fällen kann innert wenigen Jahren eine Leukämie oder ein Schilddrüsenkrebs ausbrechen. Aber selbst bei einer Dosis knapp unter der tödlichen sind weniger als 3% der Bestrahlten davon betroffen. Glück im Unglück: Im Gegensatz zu den „Alterskrebsen“ können diese Krebsarten in der Mehrzahl der Fälle geheilt werden. Sehr hohe Strahlendosen können auch die Wahrscheinlichkeit für Linsentrübungen (Katarakte, grauer Star) erhöhen und bei sehr hohen Hautdosen zu üblen Narbenbildungen führen.

Leider gibt es auch Langzeitwirkungen: Im Alter kann eine Krebserkrankung etwas früher ausbrechen als bei Unbestrahlten. Auch in dieser Beziehung unterscheiden sich die radioaktiven Strahlen nicht grundsätzlich von den vielen anderen krebserregenden (genauer gesagt: krebsfördernden) Giften, wie z.B. Tabakrauch. Diese Langzeitwirkungen kann man als Krebswahrscheinlichkeit (oder Anzahl Krebstote) quantifizieren. Da eine allfällige Erkrankung erst nach Jahrzehnten auftritt, ist es aussagekräftiger, die Anzahl verlorener Lebensjahre anzugeben.

⁴ Krankhafte, irrationale Angst

⁵ Epithelzellen bedecken alle inneren und äusseren Körperoberflächen, Beispiele: Hautzellen, Darmzellen.

Die biologisch wirksame Dosis misst man heute in Sievert (Sv)⁶, 4-5 Sv auf einmal sind in der Hälfte der Fälle tödlich. Verteilt man hingegen diese Dosis über viele Jahre wirkt sie kaum gesundheitsschädlich. Dies zeigt sich eindrücklich bei den Bewohnern von Gebieten mit sehr hoher natürlicher Radioaktivität und bei vielen Tierversuchen. Bei Schockdosen (Einmaldosen) zeigen sich ab etwa 0.1 Sv (100 mSv) erste Langzeiteffekte (leicht erhöhte Krebsrate im Alter). Man beobachtete bei den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki bei einer Bestrahlung von einem Sv etwa 10% mehr Krebserkrankungen im Alter, bzw. eine dadurch verursachte mittlere Verkürzung der Lebensspanne um etwa 1.4 Jahre. Pro Sv verteilter Dosis geht man, etwas willkürlich, von etwa 8 Monaten Lebensdauerreduktion aus, allerdings ist dieser Wert sehr umstritten. Tatsache ist, dass selbst bei 5 Sv (einer tödlichen Einmal-Dosis), verteilt über das ganze Leben, keine negativen gesundheitlichen Folgen beobachtet werden können (Bewohner von Ramsar, der bekannteste und beliebteste Kurort des Iran und unzählige Tierversuche).

Erbschäden konnten beim Menschen, selbst bei sehr hohen Dosen (Atombombenopfer), nie beobachtet werden, wohl aber ein Anstieg der Aborte. Eine starke Bestrahlung des Fetus kann die spätere geistige Entwicklung beeinträchtigen.

Alle diese Fakten, und insbesondere die Tatsache, dass unter 100 mSv keine negativen Effekte mehr sichtbar sind, werden von den wissenschaftlichen Gremien, wie z.B. der UNO-Organisation UNSCEAR, ausdrücklich anerkannt. Trotzdem wird heute die LNT-Hypothese (Linear, No Threshold) allgemein angewendet: Es gibt keine Schwelle und die (nicht nachweisbaren) Wirkungen von Kleinstdosen werden linear aus hohen Dosen „errechnet“. Der „Schaden“ ist dabei streng proportional zur Dosis. Auch die winzigste Dosis könnte gemäss dieser Hypothese einen Krebsfall auslösen (mit einer winzigen Wahrscheinlichkeit). Mit LNT ist die Regulierung (Grenzwerte) sehr einfach. Zudem wird argumentiert, dass man damit auf der sicheren Seite sei. Alle Gesundheits- und Strahlenschutzbehörden (inkl. WHO) vertreten LNT. In weiten Kreisen wird aber vergessen, dass LNT eine unbeweisbare Arbeitshypothese ist. Die Medien und die Öffentlichkeit sind der festen Meinung, dass es wissenschaftlich bewiesen ist, dass auch die aller kleinste Dosis schädlich ist. Vergessen wird dabei, dass der Durchschnittsmensch ordentlich radioaktiv ist (unser Körper hat eine Radioaktivität von etwa 8000 Bq, d.h. pro Sekunde finden 8000 Zerfälle statt), zusammen mit der Strahlung aus dem Boden und dem Weltraum werden wir in jeder Sekunde von mindestens 20'000 Strahlenteilchen natürlichen Ursprungs getroffen. Dies ist ein Durchschnittswert. Es gibt Gebiete mit hoher natürlicher Radioaktivität in welchen die Menschen lebenslang von mehr als einer Million Strahlenteilen getroffen werden, Sekunde für Sekunde, ohne klinisch messbare Schäden. Ganz im Gegenteil: Die meisten dieser Gebiete haben einen gesundheitlich besonders guten Ruf (als Kurorte). Inzwischen sind die Mechanismen, welche zu gesundheitlich positiven Effekten von kleinen (natürlichen oder künstlichen) Strahlendosen führen recht gut bekannt.

Bei der Bestimmung der Langzeitfolgen einer radioaktiven Bestrahlung kämpft man mit zwei grossen Problemen:

1. Die Symptome sind nicht spezifisch, d.h. alle der Strahlung zugeschriebenen Krankheiten (zur Hauptsache verschiedene Krebsarten) kommen auch „natürlich“ vor, sie unterscheiden sich in keiner Weise von „normalen“ Krankheiten. Die Strahlung kann lediglich den Zeitpunkt des

⁶ Das Sievert (Sv) ist die von einer Strahlung in einem kg Gewebe abgegebene Energie, zusätzlich findet eine Korrektur statt welche die Strahlenart und die Empfindlichkeit des Gewebes oder Organs berücksichtigt. Bei Ingestion oder Inhalation wird die „Aufenthaltsdauer“ der inkorporierten radioaktiven Substanzen ebenso berücksichtigt wie die Verteilung im Körper.

Eintretens vorverschieben bzw. die Eintretenshäufigkeit beeinflussen. Die „natürliche“ Krebsrate beträgt im Durchschnitt etwa 40%, 25% sterben daran. Diese Raten sind aber sehr grossen örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Dadurch wird es äusserst schwierig, die Wirkung kleiner Strahlendosen zu studieren. Nur eines ist klar: Kleinstdosen haben, wenn überhaupt, nur eine äusserst kleine Wirkung.

2. Die Latenzzeiten betragen durchschnittlich mehrere Jahrzehnte, nach einer so langen Zeitspanne ist es äusserst schwierig, alle anderen Einflussgrössen genau zu berücksichtigen.

Diese beiden Probleme führen dazu, dass die meisten Studien über kleine Strahlendosen nicht eindeutige Resultate zeigen. Zehntausende von Forschungsarbeiten wurden darüber veröffentlicht, durch eine geschickte Auswahl kann jede gewünschte Aussage „bewiesen“ werden: Kleinstdosen sind ab 0 mSv schädlich, Dosen um 100 mSv sind gesundheitsfördernd oder Dosen bis 1 Sv/J sind ohne gesundheitliche Folgen.

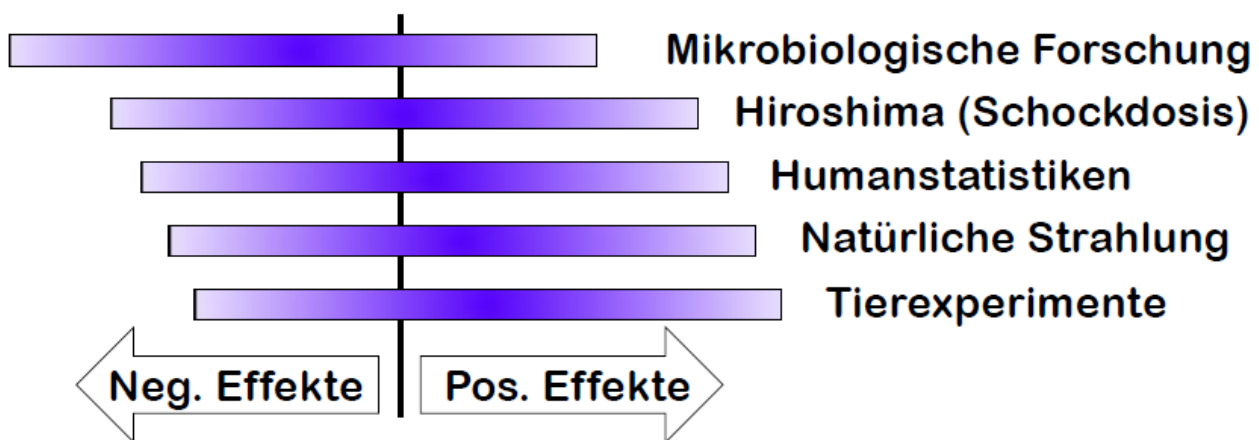


Abbildung 2-1 Die Resultate von Forschungsarbeiten der letzten 100 Jahre über kleine Dosen streuen um den Nulleffekt herum, die meisten Arbeiten zeigen grosse statistische und methodische Unsicherheiten. Gewisse Trends lassen sich aber dennoch erkennen.

Betrachtet man die Gesamtheit der Arbeiten (siehe Abbildung 2-1), kann man doch einige Trends erkennen. So zeigen viele (aber nicht alle) molekularbiologischen Untersuchungen negative Effekte (Erzeugung von Schäden in Zellen, z.B. DNA-Defekte). Die statistischen Untersuchungen bei gewollten oder ungewollten Bestrahlungen von Menschen weisen die gesamte Bandbreite, von positiven zu negativen Effekten auf, mit einer gewissen Tendenz zu positiven Effekten (bei kleinen Dosen). Tierexperimente sind aussagekräftiger, man kann Tiere, z.B. Labormäuse, unter streng identischen Bedingungen halten und studieren. Hier zeigen sich oft positive Effekte von kleinen Strahlendosen (längeres Leben, weniger Krebs). Mittlerweile versteht man die Mechanismen, welche zu solchen positiven Effekten führen, recht gut⁷. Viele namhafte Radiobiologen und Nuklearmediziner sind heute überzeugt, dass kleine Dosen eher nützen als schaden.

⁷ Eine gute wissenschaftliche Zusammenfassung findet man hier: <http://www.energie-fakten.de/pdf/hormesis.pdf>

Radioaktive Strahlen kann man, wie viele andere Gifte auch, weder riechen noch fühlen. Einen „Vorteil“ haben sie aber: Man kann sie sehr leicht messen. Einfache Warngeräte gibt es bereits für unter 100\$, ab ca. 200\$ erhält man schon so empfindliche Geräte dass man damit die natürliche Umweltstrahlung genau messen kann. Eine so einfache Überwachung ist bei den meisten anderen Giftstoffen unmöglich.

2.2 Grenzwerte

Es gibt keine chemische oder physikalische Einwirkung auf Lebewesen, die auch nur annähernd so gut erforscht wurde wie die radioaktiven Strahlen; in den letzten 110 Jahren wurden dafür Milliarden ausgegeben. Natürlich gibt es bei jeder Dosis oder Einwirkung, ob chemisch oder radioaktiv, eine untere Grenze, unter der die gesundheitlichen Auswirkungen unmessbar klein werden. Diese liegt bei den radioaktiven Strahlen bei etwa 100 mSv auf einmal (Schockdosis) und bei gegen 1 Sv auf ein Jahr verteilt. Es ist vernünftig, zur Vorsicht Grenzwerte deutlich unterhalb dieser Schwelle anzusetzen. Bei den radioaktiven Strahlen aber übertreibt man heute eindeutig. Sowohl die Grenzwerte als auch die Evakuationswerte liegen weit unter der natürlichen Strahlenbelastung aus dem Boden. Die Umgebung von Fukushima wurde auf Grund solcher extrem tiefer Grenzwerte evakuiert. Selbst ohne jede Evakuierung wären die gesundheitlichen Folgen unter der Nachweisgrenze.

Soll man sich überhaupt um hypothetische Risiken, die zu klein sind um beobachtet zu werden, kümmern? Da heute eine Null-Risiko-Mentalität herrscht, lautet die klare Antwort: Ja. Diese Haltung mag auf den ersten Blick vernünftig erscheinen (Vorsorgeprinzip). Man sollte aber nicht überreagieren: Es macht keinen Sinn, Grenzwerte für ein einzelnes Risiko extrem viel tiefer zu setzen als für alle anderen Risiken. Wir setzen dann falsche Prioritäten, verschwenden sehr grosse Geldsummen (vor allem im Gesundheitswesen) und lenken von wichtigeren Risiken ab. Entgegen den Vorgaben im Schweizerischen Strahlenschutzgesetz (Art.18) werden die Toleranz- und Grenzwerte für radioaktive Nuklide in Lebensmitteln um Größenordnungen strenger reguliert als andere krebserregende Stoffe, wie z.B. Arsen oder Feinstaub.

Bereits 1902, wenige Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen, schlug man einen Toleranzwert (ca. 100 mSv/Tag) vor. 1924 wurde 700 mSv/Jahr empfohlen. Dieser Wert wurde bis 1950 sukzessive auf 150 mSv/J gekürzt. Auf Grund von Befürchtungen über starke genetische Wirkungen und der allgemeinen Angst vor einem Nuklearkrieg wurde die LNT-Hypothese eingeführt. Obwohl sich die Befürchtungen betreffend den genetischen Wirkungen (Mutationen) als unbegründet erwiesen, wurde der Grenzwert von der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) bis 1991 auf 1 mSv/J abgesenkt. Der Schwerpunkt der Ängste verlagerte sich auf die Krebserkrankungen. Das Dilemma: Die Menschen werden durchschnittlich mit etwa 3 mSv/J aus natürlichen Quellen bestrahlt, mit Spitzen bis gegen 1 Sv/J, ohne sichtbare negative Folgen. In der Schweiz beträgt der Durchschnittswert etwa 4.5 mSv/J, mit Spitzen über 100 mSv/J (in den Alpen). Man kann sich fragen, was für einen Sinn ein Grenzwert von 1 mSv/J für künstliche Strahlen macht wenn dieser durch die natürliche Strahlung weit überschritten wird. Die Fachleute sind sich einig, dass kein Unterschied zwischen „natürlichen“ und „künstlichen“ Strahlen besteht, es sind genau die gleichen Strahlen.

Noch fragwürdiger erscheinen die Evakuationsempfehlungen der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP), und anderer Gremien im Falle einer Nuklearkatastrophe. Wendet

man diese auf die natürliche Strahlung an, so müsste man allein in Europa Millionen von Menschen umgehend evakuieren, unter anderem auch die meisten Bewohner der Alpen.

Toleranzdosis

Fragwürdig erscheint auch die Einführung des sogenannten „Toleranzwertes“ bei Lebensmitteln. Eigentlich hat man ja den Grenzwert, die Notwendigkeit eines zusätzlichen, sehr viel tiefer liegenden Toleranzwertes ist schwer zu verstehen. Beim Toleranzwert gelten die Lebensmittel als verunreinigt („kontaminiert“), man „darf“ sie aber konsumieren. Doch wer will schon „kontaminierte“ Lebensmittel essen? Das wichtigste Radionuklid bei Nuklearkatastrophen ist in der Regel Cs-137, der entsprechende Grenzwert bei Lebensmitteln liegt in der Schweiz bei 1250 Bq/kg, der Toleranzwert bei 10 Bq/kg. Isst man ein kg mit 10 Bq Cs-137 ergibt sich eine winzige Strahlendosis von 0.14 uSv⁸, etwa 1-2 % der durchschnittlichen natürlichen Tagesdosis und 1/35'000'000 einer tödlichen Dosis bzw. etwa ein Millionstel der Dosis mit ersten negativen Effekten. Eine entsprechende Toleranzdosis bei Wein wäre $3.5 \text{ l} / 35'000'000 = 1/10$ Millionstel Liter oder 0.1 mg. In einem Liter frischem Regenwasser findet man typisch 100-1000 Bq/l natürliche radioaktive Substanzen, die aus der Atmosphäre ausgewaschen werden, Spitzenwerte von über 100'000 Bq/l wurden gemessen (entspricht radiotoxisch etwa 50'000 Bq Cs-137/l). Was ist der Sinn von Grenz- und Toleranzwerten, die von der natürlichen Strahlung ständig bei weitem überschritten werden, ohne dass gesundheitliche Schäden zu beobachten sind?

Regulierung ab 10 uSv pro Jahr

Die Euphorie der 30er-Jahre hat ins Gegenteil umgeschlagen, heute herrscht eine irrationale Angst, eine eigentliche Phobie, vor winzig kleinen Dosen. Dies führte zu einer schwer zu begreifenden Überregulierung: Auf Grund der Empfehlungen der internationalen Fachverbände (ICRP) wird in den meisten Ländern, unabhängig vom Grenzwert von 1 mSv/J und von der natürlichen Dosis von einigen mSv/J, jede zusätzliche „vermeidbare“ Jahresdosis ab 10 uSv gesetzlich streng reguliert (unter Strafandrohung). Mit bis zu drei Jahren Gefängnis wird bestraft, wer eine offensichtlich unnötige Bestrahlung verursacht (Art. 43, Schweizer Strahlenschutzgesetz). Die „verbotene“ Jahresdosis von 10 uSv wird in etwa einem Tag von der durchschnittlichen natürlichen Dosis erreicht, oder bei einem 2-3 stündigen Flug. Einige Tage Skiferien in den Alpen führen zu einer Zusatzdosis, die ein Mehrfaches von 10 uSv beträgt. Ein Vergleich mit einem Alltagsrisiko: Eine Jahresdosis von 10 uSv entspricht risikomässig etwa 50 Schritten pro Tag (tödliches Sturzrisiko). Diese extrem tiefen Regulierungswerte haben auch zur Folge, dass z.B. eine Zahnarztpraxis (und die betreffende Kontrollbehörde) einen grossen administrativen Aufwand betreiben muss (persönliche Dosimetrie, monatliche Kontrollen), ganz abgesehen von den teuren baulichen Massnahmen (mit Blei abgeschirmte Röntgenkammern). Die Kosten tragen die Patienten.

3 Risikokommunikation

Um das Risiko einer Strahlen- oder Giftdosis abzuschätzen, kann man diese mit der tödlichen Dosis vergleichen. Noch wichtiger wäre aber die Kenntnis des NOAEL (no observed adverse effect level). Dies ist die Gift- oder Strahlendosis, bei welcher man, nach bestem Wissen und Gewissen, keine negativen

⁸ 1 uSv (Mikrosievert) ist ein Millionstel eines Sieverts

Effekte auf die Gesundheit mehr feststellen kann. Von diesem Schwellenwert ausgehend, kann man bei der Festlegung von Grenz- oder Toleranzwerten einen Sicherheitsfaktor einführen (z.B. 10 oder 100, aber nicht Millionen). Diesen Sicherheitsfaktor sollte man offen kommunizieren. Der Sicherheitsfaktor soll die unterschiedlichen Empfindlichkeiten (z.B. Kinder, Schwangere, Kranke) und sonstige Unsicherheiten berücksichtigen. Das resultierende Risiko sollte nicht extrem viel tiefer sein als die üblichen, alltäglichen Risiken, insbesondere auch nicht wesentlich tiefer liegen als die maximalen natürlichen Expositionen ohne messbare negative Folgen. Aussagen wie: «Der Grenzwert wurde um das Tausendfache überschritten» sind ohne gleichzeitige Angabe des Schwellenwertes/NOAEL und des benutzten Sicherheitsfaktors sinnlos. Man suggeriert beim Überschreiten des Grenzwertes oder des Toleranzwertes einen gesundheitlichen Schaden, obwohl man im Falle der radioaktiven Strahlen noch weit davon entfernt sein kann. Genau diesen Kommunikationsfehler machen praktisch alle Behörden, aber auch die meisten Medien.

Zu einer guten Risikokommunikation gehören auch Vergleiche mit anderen Risiken. Ohne solche Vergleiche kann man ein Risiko nicht einordnen und Prioritäten setzen. Die nachfolgende Aufstellung zeigt einige Beispiele von Langzeitriskiken. Angegeben ist der Einfluss auf die Lebensdauer (vor allem durch Krebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen) von einigen Faktoren. Ein positives Vorzeichen bedeutet eine Verlängerung der durchschnittlichen Lebensdauer. Die ersten vier Beispiele basieren auf der Extrapolation (LNT) von hohen Dosen oder Werten, zum Teil handelt es sich nur um grobe Schätzungen. In Klammern ist die Strahlendosis mit der gleichen gesundheitlichen Langzeitwirkung (Lebensdauerverkürzung) aufgeführt.

- Eine Zigarette rauchen: -10 min (=30 uSv)
- 1 mSv (Grenzwert pro Jahr): -6 Std. (=40 Zig.)

- Ein Apfel essen: +40 min (=0.1 mSv)
- Eine Stunde Sport: +6 Stunden (=1 mSv)

- Sozioökonomischer Status (max/min): -10 Jahre (>10 Sv)
- 10% Reduktion des BIP (Wirtschaftskrise): -1 Jahr (=1.4 Sv)
- Feinstaub, 40 ug/m3 PM10, dauernd: -1 Jahr (=1.4 Sv)

Der Lebensstandard (sozioökonomischer Status) hat einen sehr starken Einfluss auf die Gesundheit. Die unterste soziale Schicht muss mit etwa 10 Jahren weniger Lebenserwartung rechnen verglichen mit der Obersten. Sinkt der Lebensstandard (z.B. auf Grund einer lange andauernden Wirtschaftskrise) so ist dies ebenso gefährlich wie eine sehr starke Bestrahlung. In beiden Fällen nimmt die durchschnittliche Lebenserwartung ab, vor allem auf Grund von Krebserkrankungen und Herz-Kreislauf-Krankheiten.

Feinstaub ist der von der Öffentlichkeit am meisten unterschätzte Umwelteinfluss. Die aufgeführten 40 ug/m3⁹ werden im Zentrum von verkehrsreichen Städten oft überschritten. Der Grenzwert (Schweiz) liegt bei 20 ug/m3, der NOAEL (Schwellendosis) ebenfalls. In der Schweiz muss man im Mittelland mit Durchschnittswerten von etwa 20 ug/m3 Feinstaub rechnen, längs den Verkehrsachsen und in den Städten sind es aber deutlich mehr: In Zürich werden 94% der Bevölkerung einer Schadstoffdosis von über 20 ug/m3 ausgesetzt¹⁰. Diese Verschmutzungen haben eine Verkürzung der Lebensdauer um etwa 7 Monate zur Folge, bzw. verursachen etwa 3000-4000 Todesfälle pro Jahr (in der Schweiz, gemäss Angaben des Bundesamtes für Umweltschutz). Eine Radioaktivitäts-Dosis von etwa 1 Sv hätte ähnliche

⁹ 1 ug (Mikrogramm) ist ein Millionstel Gramm

¹⁰ NZZ vom 18.10.2013

Auswirkungen. In der Evakuationszone von Fukushima wird eine Dosis von 1 Sv nur an einigen wenigen Stellen erreicht. Der Mittelwert bei einem Daueraufenthalt in der Kernzone (no-entry zone) beträgt 300-400 mSv, evakuiert wurde ab etwa 50 mSv. Die überraschende Schlussfolgerung: Die Luftbelastung im Mittelland und ganz besonders in unseren Städten ist ein grösseres Gesundheitsrisiko als die Verstrahlung in der Evakuationszone von Fukushima (siehe Abbildung 3-1).

Diese Abbildung zeigt auch einen Vergleich mit der natürlichen Strahlung im Alpengebiet. Mit Erstaunen stellt man fest, dass die Lebensdosen in den Alpen etwa gleich gross sind wie die Lebensdosen im Evakuationsgebiet von Fukushima. Ganz offensichtlich liegen die Evakuationslimiten bei einer radioaktiven Verseuchung extrem tief (weit unter dem NOAEL), ganz im Sinne der LNT-Hypothese und des sogenannten Vorsorgeprinzips¹¹. Man versucht auch kleinste, rein hypothetische Risiken zu eliminieren und vergisst dabei, dass auch grosse Teile der Alpen von Natur aus radioaktiv „verseucht“ sind. Eigentlich müsste man sie sofort evakuieren und als „No-Entry“-Zone absperren. Und etwas anderes zeigt sich auch: Fliehen die Bewohner der Fukushima-Evakuationszone nach Tokyo, kommen sie vom Regen in die Traufe: Die Luftverschmutzung in solchen Grossstädten ist gesundheitsmässig wesentlich schlimmer als die Strahlung in der Evakuationszone von Fukushima. Auf diesen frappierenden Umstand wurde schon 2007 in einer wissenschaftlich fundierten Arbeit hingewiesen¹². In Tokyo sterben jährlich über 13'000 Menschen als Folge der schlechten Luftqualität¹³.

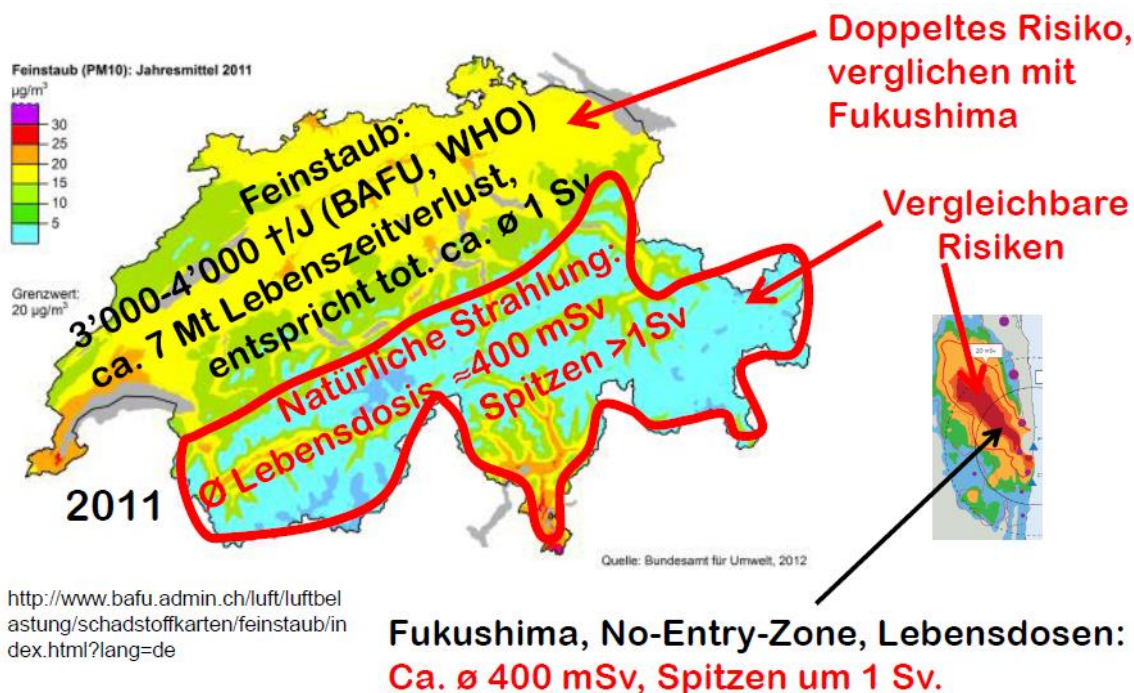


Abbildung 3-1 Feinstaub im Mittelland, natürliche Strahlung in den Alpen und die Strahlenbelastung in der Evakuationszone von Fukushima.

¹¹ Dieses Prinzip zielt darauf ab, auch bei nur vermuteten Risiken (z.B. auf Grund der LNT-Hypothese) vorsorgliche Massnahmen zu erlassen. Dies kann dazu führen, dass auch extrem kleine Risiken reguliert werden, ungeachtet der damit verbundenen Nachteile (z.B. Vernachlässigung anderer, viel grösserer Risiken).

¹² <http://www.biomedcentral.com/1471-2458/7/49>. Jim T Smith. Are passive smoking, air pollution and obesity a greater mortality risk than major radiation incidents? BMC Public Health 2007, 7:49, 3 April 2007

¹³ Ein ausgezeichnete wissenschaftliche Artikel: Model calculated global, regional and megacity premature mortality due to air pollution. J. Lelieveld et al. <http://www.atmos-chem-phys.net/13/7023/2013/acp-13-7023-2013.pdf>

4 Radioaktive Abfälle

4.1 Wie bestimmt man das Risiko von Abfällen?

Bei Giftstoffen oder Strahlen wird das gesundheitliche Risiko durch zwei Faktoren beeinflusst: Der erste Faktor ist der Schaden, welche eine bestimmte Stoffmenge oder Einwirkung verursachen kann. Bei Giftstoffen ist dies die Toxizität (Giftigkeit), sie kann z.B. als tödliche Dosis angegeben werden. Der zweite Faktor ist die Expositionswahrscheinlichkeit. Sie beschreibt, wie gut der Giftstoff von der Biosphäre ferngehalten werden kann bzw. wie gross die Wahrscheinlichkeit ist, dass wir dem Giftstoff ausgesetzt werden. Dieser Faktor wird stark durch die vorhandene Menge, deren Verteilung, „Verpackung“ und Lagerungsart beeinflusst.

Da die Expositionswahrscheinlichkeit mit grossen Unsicherheiten behaftet ist, kann man sich zunächst auch nur auf die Grösse der Giftmenge beschränken. Das wohl beste Mass dafür ist die gesamte Anzahl tödlicher Dosen, die diese Menge enthält oder die gesamte Anzahl verlorener Lebensjahre durch Krebsfälle. Um dies zu berechnen, müssen wir die Toxizität der verschiedenen Stoffe kennen. Für eine ehrliche, ganzheitliche Betrachtung, z.B. der Kernenergie oder der Photovoltaik, muss die gesamte Kette, vom Bergbau bis zur Entsorgung, berücksichtigt werden.

Was ist eine „tödliche Dosis“? Meist wird die semiletale Dosis (LD50), d.h. die Menge Giftstoff oder Strahlung die 50% der Betroffenen nicht überlebt, als tödliche Dosis bezeichnet. Wir werden im Folgenden bei der Berechnung der Anzahl tödlicher Dosen jeweils $2 \cdot \text{LD50}$ benutzen. Ein Problem ist die Bestimmung von LD50. Bei vielen Giftstoffen gibt es kaum Humandaten und Tierversuche zeigen selbst zwischen nahe verwandten Arten grosse Unterschiede. Zudem wird die Aufnahme des Giftstoffes stark von der physikalischen und chemischen Form beeinflusst. So werden wasserunlösliche Stoffe bei Ingestion (Aufnahme über die Nahrung) kaum aufgenommen. Die chemische Form schliesslich hat einen grossen Einfluss auf die biologische Wirkung. Zum Beispiel ist metallisches Arsen mässig toxisch, das Oxyd hingegen (Arsenik) extrem. Ähnliche Unterschiede findet man bei den radioaktiven Abfällen: In unlöslicher Form sind sie bei Ingestion sehr viel weniger toxisch als in gut löslicher Form. Zudem muss auch die „Aufenthaltsdauer“ im menschlichen Körper berücksichtigt werden. Gewisse Stoffe, wie z.B. Strontium oder Plutonium, können viele Jahre lang im Körper bleiben. Die Dosisangabe in Sv berücksichtigt diese Unterschiede. Für die Berechnung des „toxischen Potentials“ werden wir in der Regel den schlimmsten Fall benutzen, und zwar sowohl bei den radioaktiven Abfällen als auch bei „normalen“ Giftstoffen.

4.2 Zusammensetzung von hochradioaktiven Abfällen

Ein modernes 1 GW-Kernkraftwerk verbraucht pro Jahr rund 20 Tonnen leicht angereichertes Uranoxid (UO₂). Etwa eine Tonne davon besteht aus dem gut spaltbaren U-235, der Rest aus U-238. Das U-235 wird beim Betrieb bis auf einen Rest von ca. 200 kg gespalten, daraus entstehen die hochradioaktiven Spaltprodukte (ca. 800 kg). Daneben „erbrütet“ der Reaktor aus U-238, dem Hauptbestandteil des Brennstoffes, etwa 200 kg Plutonium (Pu-239) und einige weitere Transurane, extrem schwere Elemente „jenseits“ von Uran.

Abgebrannte Brennelemente bestehen also zu 95% immer noch aus Uran. Dieses Uran, sowie das leicht spaltbare Plutonium (Pu-239) kann durch eine Wiederaufbereitung zurück in den Kreislauf gebracht werden. Das Plutonium wird zur Energiegewinnung benutzt (ersetzt U-235) und gleichzeitig vernichtet. Die Abfälle bestehen dann im Wesentlichen „nur“ noch aus den relativ schnell abklingenden Spaltprodukten. Für die Endlagerung werden diese in ein extrem schwer lösliches Glas eingeschmolzen („Verglasung“, meist 5% Abfälle, 95% Glas). Im Falle einer Wiederaufbereitung reduziert sich das Volumen der Abfälle von typisch 50 m³ (ganze Uran-Brennelemente) auf ca. 7 m³ pro Kraftwerk und Jahr.

Ganz grob kann man die hochradioaktiven Abfälle in zwei Kategorien einteilen:

1. **Spaltprodukte:** Dies sind die stark strahlenden „Trümmer“, die bei der Spaltung von Uran oder Plutonium entstehen. Am gefährlichsten sind Cs-137 und Sr-90 (je etwa 30 Jahre Halbwertszeit). Die Spaltprodukte sind mehrheitlich relativ kurzlebig, emittieren viele Gammastrahlen (Gefahr durch externe Bestrahlung) und sind meist entweder gasförmig, leicht flüchtig und/oder gut wasserlöslich. So lassen sich etwa 100 g Cäsium (Cs) in einem Liter Wasser lösen. Da sie sich leicht ausbreiten können, müssen sie gut unter Verschluss gehalten werden. Nach spätestens 300 Jahren sind sie auf ein praktisch ungefährliches Mass abgeklungen (siehe Abbildung 4-2).
2. **Aktiniden:** Damit bezeichnet man das unverbrauchte Uran und die durch Neutroneneinfang entstandenen, schweren Elemente („Transurane“). Die gefährlichsten Isotope sind die Transurane Pu-239, Pu-240 und Am-241. Uran ist ein so schwacher Strahler, dass er kaum ins Gewicht fällt. Uran ist ein Schwermetall und chemisch viel gefährlicher/toxischer als auf Grund der Strahlung. Die Transurane zeichnen sich durch sehr lange Halbwertszeiten aus (Pu-239: 24'000 Jahre). Sie sind praktisch alle hochschmelzend und extrem unlöslich in Wasser (etwa 0.000'002 g pro Liter). Sie bleiben selbst in wasserführenden Schichten an Ort und Stelle und stellen nur direkt am Lagerort eine Gefahr dar. Sie sind zur Hauptsache Alpha-Strahler¹⁴ und deshalb praktisch ausschliesslich bei Ingestion (Aufnahme über die Nahrung) gefährlich.

4.3 Wie giftig sind hochradioaktive radioaktive Abfälle?

Bei den radioaktiven Abfällen ist man sich einig, dass der schlimmste Fall die Inkorporation ist, d.h. wenn die Substanzen über die Nahrungskette in den menschlichen Körper gelangen. Anfänglich kann aber auch ein Schaden bei einer Bestrahlung von aussen auftreten. Eine ähnliche „Distanzwirkung“ findet man bei allen Giftstoffen die gasförmig sind (z.B. Kohlenmonoxyd, Chlor, Bhopal-Gift MIC, Ammoniak) oder Dämpfe abgeben (z.B. Quecksilber, Brom). Und natürlich haben alle Feinstäube eine Distanzwirkung die weit über derjenigen der radioaktiven Strahlung liegen.

Nach einigen 100 Jahren wird die Strahlung der hochradioaktiven Elemente praktisch bedeutungslos, siehe Abbildung 4-1. Der Grund dafür ist das Abklingen der kurzlebigen Spaltprodukte, vor allem Cs-137 und Sr-90, beides Gamma-Strahler (Gamma-Strahlen durchdringen Materie relativ gut) mit etwa 30 Jahren Halbwertszeit. Eine Tonne abgebranntes Uran, frisch aus dem Reaktor, in einem Meter Abstand und ohne jede Abschirmung ist innert wenigen Sekunden tödlich. Aber die Strahlung klingt schnell ab,

¹⁴ In Luft haben diese Strahlen nur eine Reichweite von wenigen cm und können weder Kleider noch die oberste Hautschicht durchdringen.

nach 40 Jahren wird die tödliche Dosis erst in einigen Minuten erreicht. Nach einigen 100 Jahren kann man sich mehrere Stunden davor aufhalten ohne messbare Auswirkung auf die Gesundheit. Die radioaktiven Abfälle sind aber in einem dickwandigen Transport- oder Lagerbehälter eingeschlossen. Ist dieser zudem mit 80 cm Bentonit¹⁵ umhüllt, so ist die Strahlung von Anfang an praktisch unmessbar, auf jeden Fall weniger als die natürliche Umweltstrahlung.

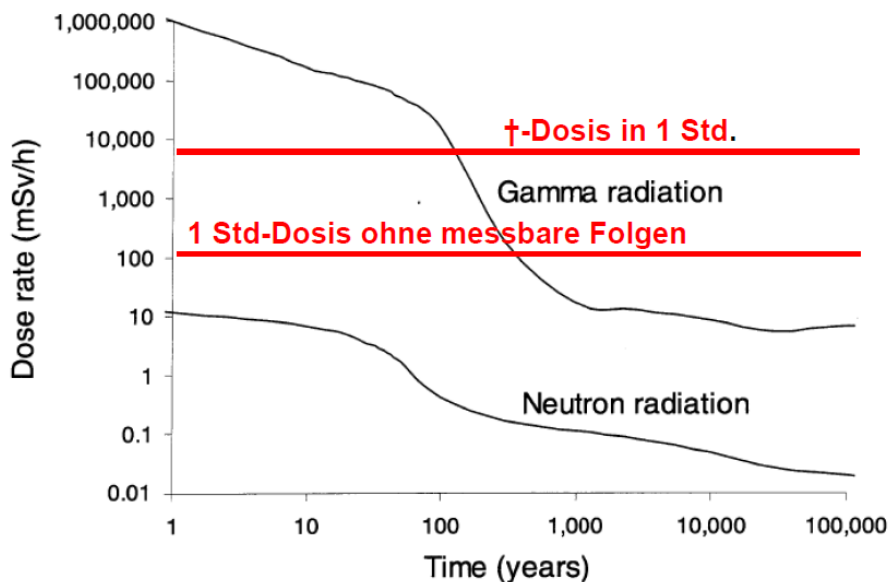


Abbildung 4-1 Externe Strahlung von einer Tonne hochradioaktivem Abfall (abgebrannter Brennstoff) in einem Meter Abstand ohne jede Abschirmung. Die Strahlung wird in mSv pro Stunde angegeben. In 10 m Abstand beträgt die Dosis weniger als 1%. 4500 mSv auf einmal überleben 50% der Bestrahlten nicht.
<http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR%2097-13webb.pdf>

Wie giftig sind die hochradioaktiven Abfälle bei Ingestion? Der verbrauchte Brennstoff, in Form von Uranoxid (UO₂) mit den Spaltprodukten und dem Plutonium, ist bei Beginn der Endlagerung (40-50 Jahre nach der Entnahme aus dem Reaktor) äusserst toxisch. Isst ein Erwachsener etwa 25 mg davon könnte es theoretisch tödlich sein (semiletale Dosis). Allerdings ist UO₂ eine harte, extrem unlösliche Keramik, die gefährlichen Spaltprodukte und die Aktiniden sind in dieser Matrix fest eingeschlossen. Selbst als Pulver gegessen kann unser Körper kaum etwas davon aufnehmen, innert kurzer Zeit wird praktisch alles auf natürlichem Wege wieder ausgeschieden. Die tödliche Dosis dürfte deshalb in der Gegend von einem Gramm liegen. Die gleichen Überlegungen gelten für verglaste Abfälle, diese sind anfänglich ähnlich toxisch wie das UO₂ der Brennelemente, aber sie zerfallen wesentlich schneller. Wie sieht der Vergleich mit „normalen“ Giftstoffen aus?

Bei Beryllium, Nikotin, Arsen (Arsenik), Strychnin (Rattengift), Zyankali, Blausäure, Quecksilber und ähnlichen Giften ist die tödliche Dosis für Menschen zwischen 30 mg und einigen 100 mg, also vergleichbar mit verbrauchtem Kernbrennstoff vor der Endlagerung. Viele Giftstoffe, natürliche wie auch künstliche, sind Hundert mal, Tausend mal oder gar Millionen mal toxischer.

¹⁵ Bentonit ist ein Tonmineral das stark absorbierend wirkt und dadurch Giftstoffe bindet, wird auch als Medizin verwendet. Zudem quillt es im Wasser und dichtet ab.

Used fuel radiotoxicity over time

http://web.mit.edu/nse/pdfs/07_ansannualmtg/ANS_07%20%28Hanson%29.pdf

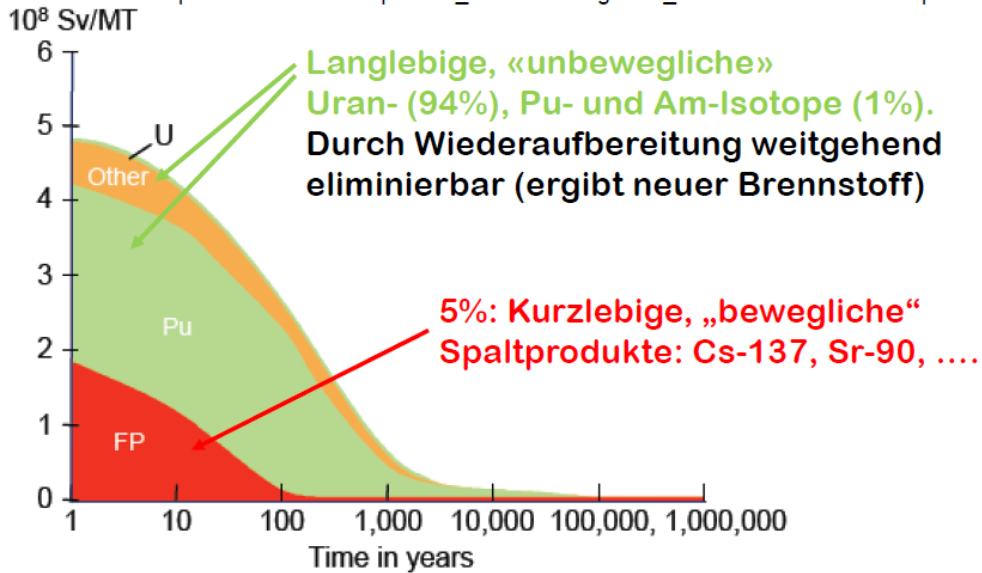


Abbildung 4-2

Zeitlicher Verlauf der Giftigkeit der verschiedenen Anteile im hochradioaktiven Abfall. FP: Spaltprodukte, Pu: Plutonium-Isotope, U: Uran. Die y-Achse weist eine lineare Skala auf, Angabe in 100 Millionen Sv pro Tonne Brennstoff bei Ingestion.

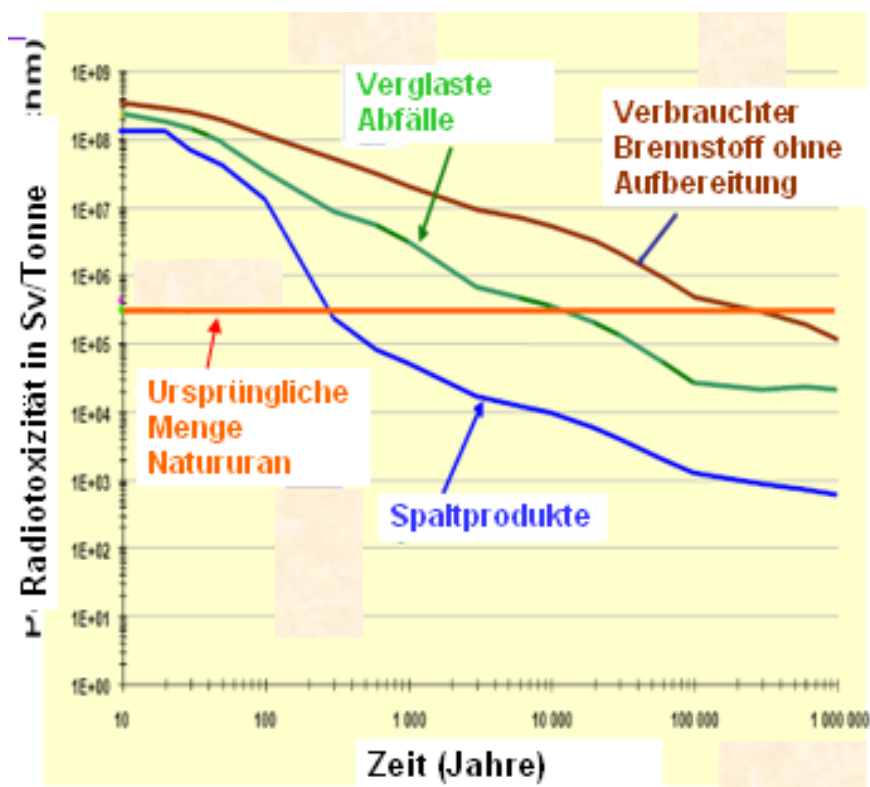


Abbildung 4-3 Toxizität von radioaktivem Abfall (Brennelement, verglasten Abfälle und Spaltprodukte) in Sv/Tonne Schwermetall (Uran und Transurane). Die Zahlen können je nach Abbrand und Reaktortyp etwas variieren. Die Zeit wird in Jahren nach der Entnahme aus dem Reaktor angegeben.

Abbildung 4-3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Giftigkeit bei Ingestion (d.h. Aufnahme über die Nahrung) von einer Tonne verbrauchtem Brennstoff (obere braune Kurve). Brennelemente ohne Aufbereitung klingen relativ langsam ab, vor allem wegen des langlebigen Pu-239. Erst nach etwa 200'000 Jahren ist die Giftigkeit von Brennelementen unter derjenige von Natururan gesunken (Menge die erforderlich war, um den Kernbrennstoff herzustellen). Allerdings ist Natururan nicht besonders radiotoxisch. Man müsste theoretisch mehrere kg auf einmal essen um eine tödliche Strahlendosis zu erhalten. Uran als Schwermetall ist aber „chemisch“ bereits ab ca. 10 g tödlich. Uran kann also betreffend Giftigkeit mit Blei, Eisen oder Kupfer verglichen werden, die Strahlung spielt praktisch keine Rolle.

Der Vergleich mit Natururan ist etwas willkürlich, immerhin gestattet er eine interessante Schlussfolgerung: Die Nutzung von Uran führt langfristig zu einer radiologischen „Entgiftung“ der Erde. Dank Kernenergienutzung besitzt die Erde nach rund 200'000 Jahren weniger Radioaktivität als vorher. Man kann diese Tatsache auch so formulieren: Im Urankern ist viel Energie gespeichert, sie wird im Laufe von einigen Milliarden Jahren durch den natürlichen radioaktiven Zerfall von Uran und deren Tochterprodukte nach und nach freigesetzt. Diese Energiemenge kann man in einem Kernreaktor sofort freisetzen und in elektrischen Strom verwandeln. Das Resultat: Nach dem Abklingen der Spaltprodukte hat man viel weniger Energie (in Form von Radioaktivität) als vorher.

Werden die radioaktiven Abfälle einer Wiederaufbereitung zugeführt, so erreicht man die natürliche Radioaktivität des ursprünglichen Urans bereits nach etwa 10'000 Jahren. Werden zudem alle Aktiniden (schwere Elemente) „vernichtet“, d.h. durch Neutronenbeschuss in kurzlebige Elemente verwandelt, ist Erde bereits nach etwa 300 Jahren insgesamt weniger radioaktiv als vorher. Allerdings ist die Aktinidenvernichtung (Transmutation) heute noch unwirtschaftlich. Die neue Reaktorgeneration (IV) könnten dies aber ändern.

Es ist sehr erstaunlich, dass in der Öffentlichkeit das relativ langsame Abklingen eines Teiles der radioaktiven Abfälle als gravierender Nachteil empfunden wird. Immerhin zerfallen sie, ganz im Gegensatz zu „normalen“ Giftstoffen wie Arsen und andere Schwermetalle.

Semiletale Dosen bei Ingestion (Schockdosis, worst case)

Alter	50 Jahre	1'000 Jahre	100'000 Jahre
Giftstoff			
Brennstoff* (UO ₂ -Keramik)	25 mg – 1 g	0.25 g – 10g	7.5 g – 300 g
Verglaste rad. Abfälle*	25 mg – 1 g	0.50 g – 20 g	100 g – 4 kg
Chemische Gifte	Ricin, VX: 1 mg Beryllium: 30 mg Strychnin: 50 mg Nicotin: 50 mg Arsenik: 100 mg	Blausäure: 0.2 g Thallium: 1g Tailings max: 3 g Pb, Cu, U: 10 g Coffein: 15 g	Fe: 10 g Aspirin: 15 g Kochsalz: 200 g Tailings ø: 300 g Zucker: 2 kg

* Berechnet aus Angaben von CEA/2004, KIT, NAGRA

Rot (worst case): Extrahierte Spaltprodukte (Cs, Sr...) und Aktiniden (U, Pu...) ausserhalb Glas/Keramik-Matrix.

Grün (best case): Werte innerhalb Glas- oder Keramik-Matrix (realistisch bei Ingestion von Abfällen), nur grobe Schätzung möglich.

Abbildung 4-4 Semiletale Dosen von hochradioaktiven Abfällen und von chemischen Stoffen. VX ist ein modernes Giftgas, als „Tailings“ werden die Bergbauabfälle bezeichnet.

Aus der Tabelle (Abbildung 4-4) kann entnommen werden, dass nach etwa 100'000 Jahren die tödliche Dosis zwischen 7.5 g (aus UO₂-Keramik extrahiert) und 4 kg (Abfälle im Glas) liegt. Eine solche Substanz kann kaum noch als Giftstoff betrachtet werden. Zum Vergleich: Kupfer oder Eisen sind ab ca. 10 g tödlich, Aspirin oder Paracetamol (frei erhältliche Schmerzmittel), ab 10-15 g. Berücksichtigt man die extrem schlechte Löslichkeit der Abfälle, so muss man realistisch bei UO₂ mit mindestens 100 g rechnen, bei verglasten Abfällen wohl mit mindestens einem kg.

Natürlich kann man mit aufwändigen chemischen Verfahren die Giftstoffe aus den Abfällen extrahieren, konzentrieren und in eine Form bringen welche vom Körper gut aufgenommen wird. Man könnte auf diese Art aus einer Tonne UO₂-Abfall nach 100'000 Jahren immer noch etwa 60'000 tödliche Giftpillen herstellen. Diese Menge kann man aber auch aus 400 m³ normaler Erde gewinnen. Mit den darin enthaltenen natürlichen Elementen wie Arsen, Blei, Bor, Cadmium, Beryllium, Quecksilber usw. können mindestens gleich viele tödliche Giftdosen hergestellt werden. Man kann dies auch so formulieren: Vermischt man eine Tonne radioaktiven Abfall mit 400 m³ Erde (ein Würfel von weniger als 8 m Kantenlänge), so sind die natürlichen chemischen Giftstoffe nach 100'000 Jahren gefährlicher als die Radioaktiven. Bei verglasten Abfällen genügen 30 m³. Mit anderen Worten: Wenn verglaste Abfälle im Laufe von 100'000 Jahren durch den Lagerbehälter dringen und im Umkreis von 2 m das Erdreich „verseuchen“, so enthält diese Erde im Mittel mehr natürliche Giftstoffe als die Abfälle.

Manchmal wird die Abfallmenge eines Kernkraftwerkes mit dem Fallout einer Atombombe verglichen. In der Tat sind die Spaltprodukte in beiden Fällen ähnlich zusammengesetzt. Ein 1 GW-Kraftwerk erzeugt pro Jahr etwa 1000 mal mehr Spaltprodukte als die Hiroshimabombe. Der Vergleich hinkt aber: Die Hiroshimabombe tötete durch die Druckwelle und den Feuersturm, durch die Hitzestrahlung und

durch die etwa eine Sekunde dauernde Primärstrahlung während der Explosion. Die Spaltprodukte im Fallout spielten demgegenüber praktisch keine Rolle. Der extrem heisse Feuerball erreichte den Boden bei weitem nicht. In einem solchen Fall steigen die verdampften Bombenreste samt den Spaltprodukten in die höheren Schichten der Atmosphäre und verweilen dort längere Zeit. Bis sie nach Wochen bis Jahre auf die Erde zurückfallen, sind sie so stark abgeklungen und verdünnt, dass sie viel kleinere Dosen verursachen als die natürliche Strahlung. Die Ausnahme: Bei tiefen Explosionen gegen schwer verbunkerte, militärische Ziele berührt der Feuerball den Boden, grosse Mengen Spaltprodukte werden lokal deponiert. Diese können, falls man sich nicht schützt (Keller oder Schutzraum), in den ersten Tagen zu sehr hohen und lebensbedrohenden Dosen führen.

4.4 Mengen

Die schweizerischen Kernkraftwerke produzieren heute jährlich etwa 70 t verbrauchten Kernbrennstoff (ca. 20 t pro GW). Früher wurde ein Teil davon wiederaufbereitet und verglast (heute in der Schweiz und in Deutschland verboten, trotz den damit verbundenen Vorteilen). Bei Beginn der Endlagerung entspricht dies 10^7 bis 10^9 tödlicher Dosen jährlich (je nach Löslichkeit). Alle schweizerischen Kernkraftwerke produzieren innert 50 Jahren ein Abfallvolumen von ca. 1250 m³ (11x11x11m) netto oder 7500 m³ in den Endlagerbehälter verpackt (20x20x20m). Nach Angaben der Nagra wird das toxische Inventar im Jahre 2035 etwa $5 \cdot 10^{11}$ Sv betragen, entsprechend etwa $5 \cdot 10^{10}$ tödlicher Dosen. Eine gewaltige, hochkonzentrierte Giftmenge, die sorgfältig behandelt werden muss. Aber in einem einzigen Kubikkilometer Boden hat es von Natur aus eine noch grössere chemische Giftmenge.

Die 450 Kernkraftwerke auf dieser Welt erzeugen pro Jahr etwa 10'000 t abgebrannten Kernbrennstoff (entspricht einem Würfel von etwa 10 m Kantenlänge). Davon wird etwa ein Drittel wiederaufbereitet, Tendenz steigend: Die weltweiten Kapazitäten werden auf etwa 6000 t/Jahr ausgebaut. Bei Aufnahme über die Nahrung ergibt eine grobe Abschätzung 10^9 bis 10^{11} tödliche Dosen pro Jahr (je nach Löslichkeit). Rein theoretisch könnte man die Menschheit damit bis zu 15 mal umbringen¹⁶. Eine enorme Giftmenge, die einen grossen Respekt verlangt. Aber die grösste?

5 Vergleich mit anderen Giftstoffen

5.1 Arsen und andere chemische Giftstoffe

Betrachten wir Arsen, ein giftiges Element. Arsen wird heute vor allem als Bestandteil von Bleilegierungen (z.B. in Akkumulatoren oder Bleimunition), in Messing, in elektronischen Bauelementen (Dotierung von Halbleitern), in Holzschutzmitteln und für Arzneien benutzt. Früher wurde es auch ausgiebig als Pflanzenschutzmittel und als beliebtes Gift für Morde eingesetzt. Es wird heute fortlaufend in grösseren Mengen im Bergbau und vor allem bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Gas freigesetzt (Erze, Kohle und fossile Brennstoffe enthalten z.T. beachtliche Mengen Arsen). Die

¹⁶ Wird diese Zahl zitiert, möchte ich sehr bitten fair zu sein und gleichzeitig auch die Zahlen von anderen Giftstoffen zu zitieren (z.B. von Arsen oder vom gesamten Sondermüll). Das Gleiche gilt auch für alle anderen Angaben über Giftmengen.

Rezyklierungsrate bei Arsen liegt unter 1% ¹⁷, d.h. praktisch alles Arsen landet in der Umwelt, nur ein kleiner Teil kommt in ein Endlager (Untertagedeponie).

Arsen in seiner oxidierten Form (As_2O_3 , Arsenik) ist ein sehr starkes Gift. Die tödliche Dosis bei einem Erwachsenen (LD50) beträgt etwa 100 mg. Arsenik ist genotoxisch und fruchtschädigend. Die Nachkommen haben oft einen kleineren IQ. Arsen führt aber auch zu einer sehr starken Erhöhung der Krebsraten, mit langen Latenzzeiten (Jahrzehnte). Eine der besten bisherigen epidemiologischen Untersuchungen ergab Krebsraten, die diejenigen der Raucher noch übersteigen¹⁸. LNT wird auch angenommen, d.h. bereits kleinste Arsen-Konzentrationen werden als schädlich angesehen. In der Tat bewirkt bereits eine Konzentration von 200 Milliardstel Arsen (200 ppb) im Trinkwasser eine Verdopplung der Krebsraten¹⁹. Millionen von Menschen, besonders in Bangladesch, China, Chile und Thailand, sind davon betroffen. Arsen müsste eigentlich viel grössere Ängste auslösen als radioaktive Substanzen.

Pro Jahr produziert die Industrie weltweit etwa 50'000 Tonnen Arsen. Die Kohlekraftwerke stossen jährlich etwa 80'000 Tonnen aus, zusammen mit den Bergbauemissionen und einigen anderen Quellen dürften es insgesamt etwa 150'000 Tonnen pro Jahr sein²⁰. Rechnet man mit einer semiletalen Dosis von 100 mg (LD50), so erhält man $7 \cdot 10^{11}$ tödliche Dosen. Die Menschheit könnte man damit etwa 100 mal pro Jahr umbringen. Diese Giftmenge ist wesentlich grösser als diejenige aller nuklearen Abfälle zusammen ($10^{11}/\text{J}$). Nur ein kleiner Teil des Arsens endet im Sondermüll, viel wird aber illegal entsorgt oder einfach in die Luft geblasen (Kohlekraftwerke). Man kann abschätzen, dass mit jedem Atemzug mehrere Milliarden Arsen-Atome in unsere Lunge geraten.

Aber es kommt noch schlimmer: Arsen zerfällt nicht. Die Bedrohung bleibt auch nach einer Milliarde Jahre unverändert bestehen (so lange dürfte die Erde noch bewohnbar sein). Selbst wenn man die Arsen-Abfälle in 10'000 m Tiefe lagert, mit einem Mehrfachen an Sicherheiten und Barrieren als bei den radioaktiven Abfällen: Dieses Problem ist aus heutiger Sicht wirklich unlösbar. Und die Mengen sind gigantisch. Diese Tatsachen werden in den Medien und der Öffentlichkeit weitgehend verdrängt. Ausnahmen bestätigen die Regel:

„600 Meter unter der Erde lagert in einer alten Kaligrube genug Arsen, um alles Leben auf der Erde auszulöschen. Und Arsen ist nur eines der Gifte in Herfa-Neurode, der größten Untertagedeponie der Welt: Quecksilberhaltiges, Furane, Dioxine, alles, was für die Oberwelt zu gefährlich ist, wird in Fässern und Kunststoffpaketen verpackt und in die Tiefe befördert.“²¹

Die gleichen Abschätzungen und Überlegungen wie bei Arsen kann man für viele weitere Substanzen machen (Blei, Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Chlor, Phosphor, um nur einige zu nennen), z.T. ergeben

¹⁷ Science VOL 337 10 August 2012, S. 690 ff: Challenges in Metal Recycling

¹⁸ http://www.physics.harvard.edu/~wilson/arsenic/arsenic_project_introduction.html

¹⁹ Byrd D.M. et al, Carcinogenic risks of inorganic arsenic in perspective. International Arch Occupational Environmental Health, 68:484-494, 1996.

²⁰ Ohne die noch wesentlich grösseren Mengen Arsen in den Bergbauabfällen (Tailings).

²¹ Zitat aus <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/1183411/> . In dieser Deponie in Hessen landen auch hochtoxische Abfälle aus der Schweiz. Im Gegensatz zu radioaktiven Abfällen ist dieser Export nicht verboten, eine unerklärliche Asymmetrie.

sich noch grössere Giftmengen als bei Arsen. Allerdings sind die Rekyclierungsraten in der Regel höher als bei Arsen (Quecksilber zwischen 1-10%, Cadmium 10-25%, Kupfer >50%, Blei 90-95%).

5.2 Sondermüll und Giftgas

5.2.1 Schweiz

Wie vergleichen sich die radioaktiven Abfälle mit unserem Sondermüll? In der Schweiz muss jährlich 1-2 Million Tonnen Abfall als Sondermüll behandelt werden. Ungefähr 250'000 Tonnen davon muss endgelagert werden. Ein Teil des Sondermülls kann man durch Hitze zerstören, aber viele Gifte, z. B. alle Schwermetalle, sind unzerstörbar, deren Endlagerung müsste im Prinzip für etwa 1 Milliarde Jahre (!) konzipiert werden, so lange dürfte die Erde bewohnbar sein. Die Abschätzung des toxischen Potentials des Sondermülls ist schwierig, die genaue Zusammensetzung ist nicht bekannt. Geht man von einer semiletalen Dosis von durchschnittlich 100 g aus, so muss man mit bis zu 10^{10} (10 Milliarden) tödlichen Dosen rechnen. Wie vergleicht sich dies mit den hochradioaktiven Abfällen? Statt ein bis zwei Millionen Tonnen pro Jahr hat man weniger als 100 Tonnen hochradioaktiver Abfälle mit etwa 10^9 tödlichen Dosen. Man kann es wenden und drehen wie man will: Unser Sondermüll ist betreffend Anzahl tödlicher Dosen gefährlicher als unsere hochradioaktiven Abfälle, ganz besonders wenn man deren Abklingen berücksichtigt. Und es ist viel einfacher, die vergleichsweise sehr kleine Menge an hochradioaktivem Abfall sicher von der Biosphäre fernzuhalten.

5.2.2 Ganze Welt

Die Menschheit produziert jährlich um die 10 Milliarden Tonnen Sondermüll (ohne die noch grössere Menge an Bergbauabfällen). Mit 100 g für eine semiletale Dosis erhält man eine Giftmenge von rund $5 \cdot 10^{13}$ tödlichen Dosen. Nur ein sehr kleiner Teil davon wird unschädlich gemacht, legal entsorgt oder rezykliert, mit dem Rest müssen wir leben. Die Folgen: Etwa eine Million Todesfälle jährlich²².

Das grösste Endlager für toxische Abfälle befindet sich in Deutschland (Herfa-Neurode, Hessen), siehe Abbildung 5-1. In dieser Deponie lagern etwa 2,7 Millionen Tonnen Giftmüll, davon 220.000 Tonnen quecksilberhaltige Abfälle, 127.000 Tonnen Cyanid-Abfälle, 690.000 Tonnen mit polychlorierten Dibenzodioxine und Dibenzofurane verseuchter Abfall und 83.000 Tonnen arsenhaltige Abfälle²³. Gewaltige Mengen, manchmal merken dies sogar die Medien²⁴. Die Abfälle befinden sich meist in dünnwandigen Fässern oder in Kunststoffgebinden. Ist ein Schacht voll, wird er einfach zugemauert. Würde man mit radioaktiven Abfällen so umgehen wäre dies ein unerhörter Skandal. Aber eigentlich wären selbst die hochradioaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken das viel kleinere Problem: Sie sind in dickwandigen Stahlbehälter eingeschlossen und nach einigen 1000 Jahren praktisch zerfallen. Die chemisch-toxischen Elemente hingegen sind nach einer Milliarde Jahren immer noch genau gleich

²² Nature, Vol 497, 16 May 2012 und Environ. Health Perspect. <http://dxdoi.org/10.1289/ehp.1206127> (2013)

²³ http://de.wikipedia.org/wiki/Untertagedeponie_Herfa-Neurode, Dezember 2013

²⁴ Zitat aus <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/1183411/> : „600 Meter unter der Erde lagert in einer alten Kaligrube genug Arsen, um alles Leben auf der Erde auszulöschen. Und Arsen ist nur eines der Gifte in Herfa-Neurode, der größten Untertagedeponie der Welt: Quecksilberhaltiges, Furane, Dioxine,»

gefährlich. Interessanterweise sind in den „chemischen“ Deponien selbst kurzlebige, schwach radioaktive Abfälle nicht zugelassen. Dabei wären diese, verglichen mit den oben erwähnten chemisch-toxischen Abfällen, richtig harmlos.



Abbildung 5-1 Weltgrösstes Chemie-Endlager: Sondermülldeponie Herfa-Neurode (Hessen). Aus: http://www.beobachter.ch/natur/natuerlich-leben/abfall-recycling/artikel/sondermuell_aus-den-angen-aus-dem-sinn

Bei den chemischen Kampfstoffen die es zu entsorgen gilt, sieht es auch schlimm aus. Vom Nervengift VX existieren, vor allem in Russland, noch etwa 11'000 Tonnen (2013). 1 mg ist tödlich, dies ergibt die gewaltige Menge von rund 10^{13} tödlicher Dosen, genügend um (theoretisch) die gesamte Menschheit 1000 mal umzubringen.

5.3 Bergbauabfälle (Tailings)

Enorme Giftmengen befinden sich auch in den Abfällen (Tailings) vom Bergbau. Beim Abbau von Kohle entstehen unvorstellbare 20 Milliarden Tonnen Tailings pro Jahr, weitere Milliarden Tonnen beim Erzabbau. Erze enthalten meistens wesentlich weniger als 1% Metall, der Rest ist Abfall. Der Standardprozess: Die Erze werden in riesigen Mühlen zu feinem Sand gemahlen und anschliessend in starken Säuren oder Laugen aufgelöst. Das Metall wird in einem nächsten Schritt durch chemische Prozesse herausgelöst, übrig bleiben gewaltige Mengen toxischer Schlämme („Tailings“), siehe Abbildung 5-2.



Abbildung 5-2 Tailings (Bergbauabfälle) einer Kupfermine in Spanien. Die tödliche Dosis (LD50) solcher Abfälle beträgt im Durchschnitt etwa 300 g, mit Spitzenwerten um 3 g (nur die verbleibenden Erzbestandteile, ohne die Säuren oder Laugen zu berücksichtigen). Uranminen weisen ähnliche Werte auf (inklusive der radioaktiven Stoffe).
 Aus: <http://www.doka.ch/BuntmetalltailingsDoka.pdf>, Untersuchungen im Auftrag des Bundesamtes für Umweltschutz.

Auch beim Abbau und beim Aufbereiten von Uranerzen werden beträchtliche Abfallmengen erzeugt. Für den Betrieb eines 1 GW-Kernreaktors müssen pro Jahr etwa 170 t Uran abgebaut werden (mit Wiederaufbereitung und/oder Reaktoren der neuesten Generation sind es weniger). Bei einem durchschnittlichen Urangehalt im Erz von 0.2% erzeugt man dabei eine Abfallmenge von 85'000 t. Eine sorgfältige Untersuchung über die Zusammensetzung dieser Tailings und deren Emissionen führte das PSI durch²⁵, die Arbeit wird auch von Greenpeace zitiert. Mit Hilfe dieser Arbeit lassen sich die Giftmengen, gemessen in Anzahl tödlicher Dosen, abschätzen. Diese sind beachtlich, etwa 100 Millionen pro Jahr, aber nicht auf Grund des Urans. Es dominieren die „normalen“ Giftstoffe wie Arsen, Selen, Quecksilber, Cadmium, Blei usw., siehe Abbildung 5-3. Diese Stoffe finden sich in Konzentrationen die typisch 10 bis 100 mal höher sind als sonst im Boden. Der Urananteil ist ebenfalls rund 100 mal höher. Die radioaktive Strahlung ist aber vergleichsweise unbedeutend: Dank der extrem langen Halbwertszeit strahlt Uran nur sehr schwach, die Giftigkeit wird von den chemischen Eigenschaften dominiert (Uran ist ein Schwermetall, toxisch vergleichbar mit Blei). Einzig das Radon, welches beim Zerfall von Uran entsteht, ist direkt über den Abfällen von gewisser Bedeutung. Dies alles

²⁵ <http://www.doka.ch/PSIuraniumtailingsDoka.pdf>

bedeutet nicht, dass die Giftstoffe in diesen Abfällen harmlos sind. Aber gegenüber den Mengen, welche sich in einem einzigen km^3 normaler Erde befinden (2.6 Milliarden Tonnen, darunter je mehrere Tausend Tonnen Uran, Arsen, Blei, Beryllium u.s.w.) sind sie klein. Die Mengen sind ebenfalls winzig klein gegenüber denjenigen aus den Abfällen aus Kohle-, Eisen- oder Buntmetallminen. Die mittlere Zusammensetzung der Abfälle ist bei allen Minen ähnlich, siehe Abbildung 5-3.

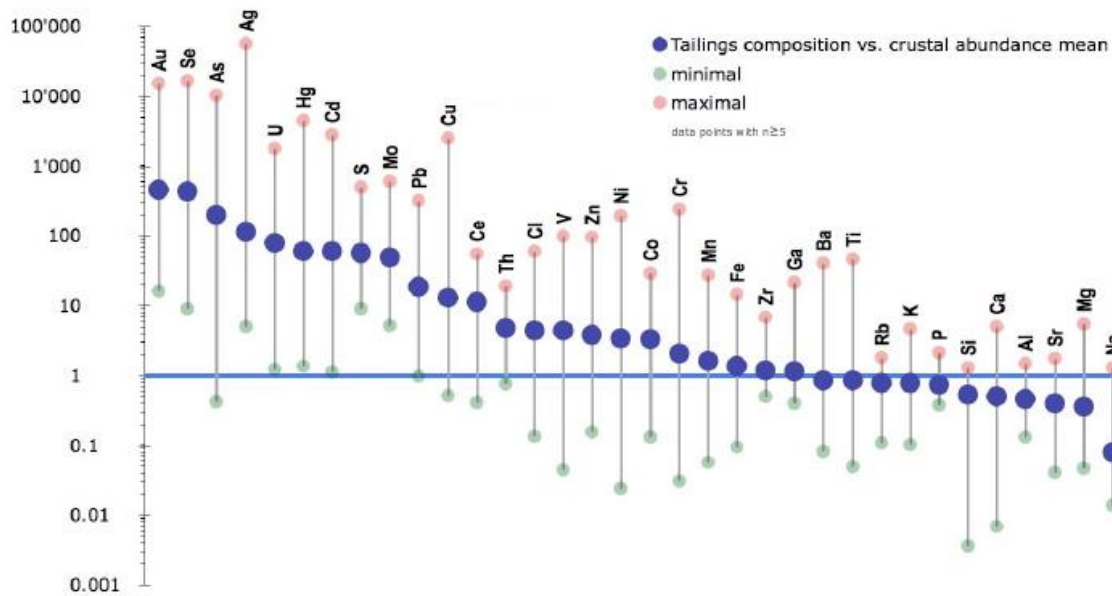


Fig. 4.1 Average mean composition of uranium tailings relative to the average global crustal abundance, sorted by rank. Please note logarithmic y-axis. A value of 1 (blue line) means "tailings content identical to average global crustal abundance". Elements with larger than crustal concentrations (>1) are found on the left. The values for minimal/maximal do not represent a confidence interval, but the found extrema. Only elements with more than 5 data points from literature are shown.

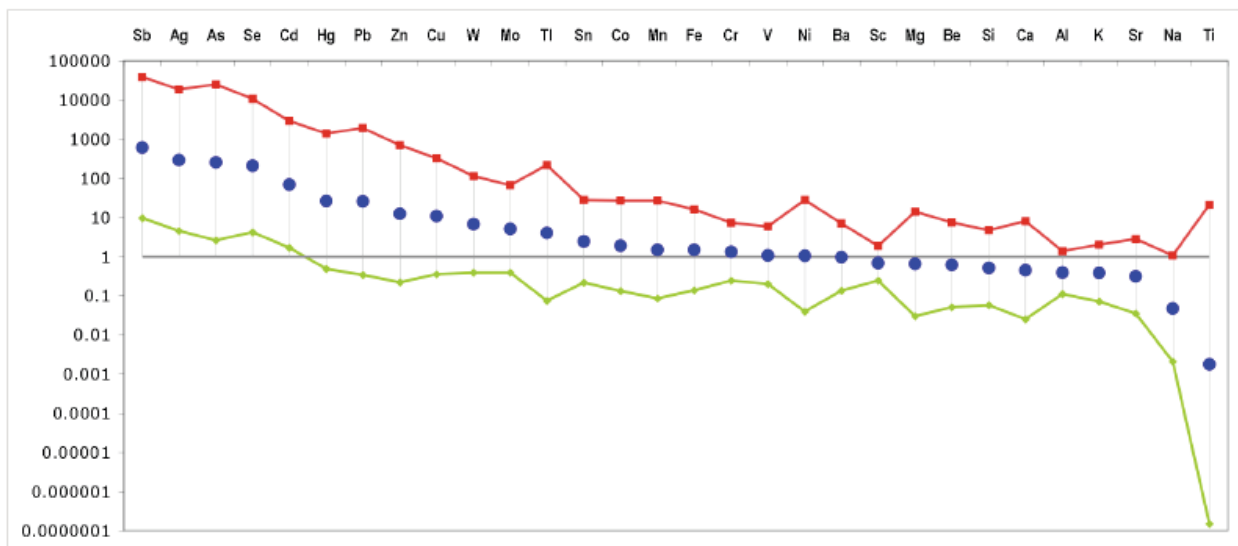


Abb. 3.2 Vergleich der Tailingsgehalte (inkl. Konfidenzintervall) mit durchschnittlichen Erdkrusten-Konzentrationen. Lesebeispiel: "Tailings enthalten im Mittel fast 1000-mal mehr Antimon als die Erdkruste, aber ungefähr gleich viel Nickel".

Abbildung 5-3 Zusammensetzung der Abfälle von Minen im Vergleich mit der durchschnittlichen Erdkrustenkonzentrationen. Oben: Uranminen (<http://www.doka.ch/PSluraniumtailingsDoka.pdf>), Unten: Buntmetallminen (<http://www.doka.ch/BuntmetalltailingsDoka.pdf>). Man beachte die ähnliche Zusammensetzung.

Weltweit werden pro Jahr über eine Milliarde Tonnen Metalle produziert. Die Menge der in den dadurch „produzierten“ Tailings enthaltenen Giftstoffe (in Anzahl tödlicher Dosen) übersteigen die aller radioaktiven Abfälle um mehrere Zehnerpotenzen. Immer wieder verursachen die Bergwerksabfälle grössere Katastrophen, auch in Europa. So brach am 4.10.2010 in Ungarn ein Tailing-Damm, 1 Million m³ toxischen Schlamms, unter anderem mit 50 t Arsen, ergoss sich auf über 40 km². Die Giftmenge entspricht etwa derjenigen der nuklearen Abfälle der Schweiz in einem Jahr. 10 Tote, 150 Verletzte und 350 zerstörte Häuser waren die unmittelbaren Folgen. Es gibt etwa 3500 solcher Dämme weltweit, davon brechen 2-5 pro Jahr²⁶.

6 Abfälle aus andern Energieerzeugern

6.1 Kohlekraftwerke und die Lecks von Fukushima

Kohle enthält im Mittel 1.3ppm Uran²⁷, 3.2ppm Thorium, 10-20ppm Arsen sowie eine ganze Reihe weiterer Giftstoffe. Ein Vergleich zwischen einem Kohlekraftwerk und einem Kernkraftwerk mit gleicher Leistung (je 1 GW) ist sehr interessant:

Ein grosses Kohlekraftwerk verbraucht 4-7 Millionen t Kohle pro Jahr, erzeugt einige 100'000 t Asche, inklusive rund 20 t Uran und Thorium. Ein Teil davon gelangt in die Atmosphäre und erzeugt in der Umgebung des Kraftwerkes eine Jahresdosis von typisch 100 uSv²⁸. Bei einem Kernkraftwerk beträgt die entsprechende Dosis im Mittel etwa 1 uSv pro Jahr, selten 10 uSv/J. Aber selbst 100 uSv ist mindestens 20 mal weniger als die durchschnittliche natürliche Untergrundstrahlung.

Auf Grund der radioaktiven Stoffe in der Kohle emittiert ein Kohlekraftwerk etwa 10'000-20'000 Bq α -Strahler pro Sekunde. Dies wäre bei einem Kernkraftwerk ein Skandal, man würde es sofort stilllegen. Diese Menge entspricht etwa 1'000'000'000 Bq (gleich 1000 MBq oder 1 GBq) pro Tag und ist radiotoxisch wesentlich gefährlicher als alles was täglich (2013) in Fukushima durch Lecks ins Grundwasser und später in den Ozean gelangt. Und es gibt tausende von Kohlekraftwerke weltweit.

Aber bereits früher hat man jedes Augenmass verloren: 2001 wurde in den Medien von einem „Zwischenfall“ in einem Kernkraftwerk in Japan berichtet (NZZ 11.11.2001). Ein internes Leck von 20'000 Bq pro Stunde (nicht Sekunde!) verursachte die Aufregung, in die Umwelt ist nichts abgegeben worden. Dass eine solche Menge lächerlich klein ist gehört leider nicht zum Allgemeinwissen: In einem

²⁶ <http://www.infomine.com/publications/docs/Martin2000.pdf>

²⁷ ppm = parts per million, d.h. 1 ppm ist ein Millionstel

²⁸ <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=coal-ash-is-more-radioactive-than-nuclear-waste> und http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/1981/1981_02.pdf?__blob=publicationFile

Kubikmeter Boden hat es von Natur aus im Durchschnitt etwa 3'000'000 Bq, und selbst in unserem Körper befinden sich rund 8'000 Bq (8 kBq) natürlichen Ursprungs.

Kohle enthält aber auch Arsen, dies summiert sich zu ca. 60 t pro Jahr und Kraftwerk. Das Arsen ergibt etwa $3 \cdot 10^8$ tödliche Dosen. Und Arsen ist nur eines einer ganzen Reihe von toxischen und krebserregenden Substanzen, die durch ein Kohlekraftwerk freigesetzt werden. So werden auch tonnenweise Cadmium, Quecksilber, Selen, Blei und weitere Schwermetalle freigesetzt. Dazu kommt noch SO₂, NO_x, alle Partikel (Feinstaub), organische und anorganische Gifte, und vom CO₂ wollen wir erst gar nicht reden. Es besteht kein Zweifel, dass ein Kohlekraftwerk insgesamt sehr viel mehr tödliche Giftdosen erzeugt als ein Kernkraftwerk gleicher Leistung.

6.2 Photovoltaik

Etwa 50 km² Photovoltaikfläche mit hohem Wirkungsgrad erzeugen unter guten Bedingungen insgesamt gleich viel Strom wie ein 1 GW-Kern- oder Kohlekraftwerk. Für eine solche Produktion muss sie gut 10-fach überdimensioniert werden (für eine Spitzenleistung von 10 GW), denn während der meisten Zeit scheint die Sonne nicht. Eine solche riesige Fläche von Solarmodulen benötigt um etwa 50 mal mehr Kupfer, 100 mal mehr Aluminium, 5 mal mehr Eisen und sehr viel mehr seltene Elemente im Vergleich zu einem Kernkraftwerk gleicher Leistung. Es ist unbestritten dass bei der Herstellung solcher Solarkraftwerke viel mehr Energie benötigt wird und auch viel mehr Schadstoffe und CO₂ erzeugt werden als beim Bau eines herkömmlichen Kraftwerkes. Schauen wir uns dies am Beispiel von Kupfer etwas näher an.

Photovoltaikanlagen benötigen bei einer angenommenen Lebensdauer von 25 Jahren etwa 250 kg Kupfer pro GWh²⁹. Hochgerechnet auf 8 TWh (entspricht der Jahresleistung eines 1 GW-Kernkraftwerkes) macht dies etwa 2000 t pro Jahr aus. Bei einem durchschnittlichen Kupfergehalt im Erz von 0.5% ergeben sich jährlich 400'000 t Bergbauabfälle (entspricht ca. 660 Millionen tödlicher Dosen), etwa das Sechsfache wie beim Uranabbau (ca. 100 Millionen tödlicher Dosen/GWJ). Die Giftmengen in den hochradioaktiven Abfällen betragen etwa 400 Millionen tödlicher Dosen/GWJ. Die Schlussfolgerung: Die Photovoltaik produziert bereits durch den Verbrauch von Kupfer eine etwa gleich grosse Giftmenge wie die Kernenergie (Uranminen plus hochradioaktive Abfälle). Und Kupfer ist nur einer von vielen in grossen Mengen benötigten Stoffen, die zudem – leider – nicht erneuerbar sind.

Aber die toxischen Bergbauabfälle sind nur ein Teil der Giftstoffe. Solarzellen und Wechselrichter enthalten auch toxische Stoffe. Solarzellen mit einer Dünnschicht aus Cadmium-Tellurid sind kostengünstiger als die klassischen Zellen aus Silizium (der Wirkungsgrad ist allerdings kleiner). Für ein CdTe-Photovoltaik-Kraftwerk mit einer Fläche von 80 km² (entspricht etwa einem 1 GW-Kraftwerk) werden gegen viertausend Tonnen Cadmium und Tellur verbraucht (zusammen mit den Herstellungsverlusten). Pro Jahr entspricht dies etwa $1 \cdot 10^8$ tödlicher Giftdosen, also kaum weniger als die radioaktiven Abfälle eines KKW's. Nach Angaben von Firstsolar (führender Hersteller von Dünnschichtzellen) erzeugt man bei siliziumbasierten Zellen insgesamt mehr Schadstoffe als mit Dünnschichtzellen.

Egal welche Zellentechnologien man benutzt, in spätestens 20-25 Jahren wird sich das Problem stellen, was man mit den vielen ausgedienten Zellen und Wechselrichter machen sollte (Rezyklierung und/oder

²⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Copper_in_renewable_energy, 15.6.2014

Endlagerung). 40-80 km² Photovoltaik erzeugen am Ende ihrer Lebenszeit gegen 1 Millionen Tonnen Sondermüll (Elektroschrott). Man kann nur wünschen, dass dieses Problem mit der gleichen Sorgfalt wie bei den radioaktiven Abfällen behandelt wird. Allerdings droht dann die Photovoltaik unbezahlbar zu werden.

Es besteht kaum ein Zweifel, dass die Photovoltaik betreffend „erzeugter“ Giftmengen pro produzierte Strom-Energieeinheit schlechter dasteht als die Kernenergie. So kommt auch das Labor für Energiesystem-Analysen des PSI nach verschiedenen, sehr sorgfältigen Untersuchungen zum Schluss: Die Ökotoxizität von Photovoltaikanlagen ist wesentlich höher als diejenige von Kernkraftwerken (bei gleicher Energieerzeugung)³⁰. Selbst Windkraftwerke zeigen eine höhere Ökotoxizität als Kernkraftwerke, allerdings sind die Unterschiede hier nicht so gross. Auch in diesem Falle liegt der Grund bei den viel höheren Materialmengen. Wasserkraftwerke sind bei der Stromerzeugung die Musterknaben, sie unterbieten alle anderen Technologien betreffend ökologischen Belastungen und Ressourcenverbrauch.

Die Photovoltaik-Energieerzeugung hat aber auch einen Vorteil: Die Primärenergie, die Sonneneinstrahlung, ist kostenlos³¹, sauber und erneuerbar. In vielen Fällen eine sinnvolle Technologie. Betrachtet man aber die ganze Kette, vom Bergwerk bis zur Entsorgung, muss festgestellt werden, dass die Photovoltaik insgesamt alles andere als sauber und erneuerbar ist. Trotzdem kann die Photovoltaik bei uns als „sauber“ deklariert werden: Die Giftmengen beim Bergbau werden nicht bei uns erzeugt, und die ausgedienten Zellen und Wechselrichter, oder zumindest die darin enthaltenen Giftstoffe, können problemlos ins Ausland abgeschoben werden. Aber diese Betrachtungsweise ist ethisch nicht ganz unproblematisch.

Für Länder mit vielen Kohlekraftwerken, wie z.B. Deutschland, gilt diese Argumentation nur eingeschränkt: Falls die Photovoltaik den schmutzigen Kohlestrom ersetzt ist die Bilanz insgesamt klar positiv, zumindest was die Giftmengen und die Umweltbelastung betrifft.

7 Natürliche Radioaktivität

7.1 Alles strahlt

Die Erde ist seit Anbeginn der Zeiten radioaktiv. Alle unsere Elemente sind nuklearer Abfall, sie wurden im Innern von Sternen oder bei deren Explosion durch Kernreaktionen erzeugt (die wichtigste Ausnahme ist Wasserstoff, dieser entstand beim Urknall). Heute existieren nur noch die extrem langlebigen Radionuklide wie Uran-238, Thorium 232 oder Kalium-40 mit Halbwertszeiten von Milliarden von Jahren. Die Mengen sind immer noch beachtlich, die Erdkruste enthält Millionen mal mehr Radioaktivität als alle Kernkraftwerke dieser Welt je erzeugen können. In einem m³ Erde hat es mehrere Gramm Uran und Thorium, mit den Tochternukliden insgesamt etwa 3 Millionen Bq (3 MBq).

³⁰

http://www.energiestiftung.ch/files/textdateien/infomaterial/fachtagungen/fachtagung08/08_09_12_praesentation_hirs_chberg.pdf.

³¹ Streng genommen, ist auch Uran oder Kohle kostenlos: Der Berg schickt keine Rechnung. Das „Sammeln“ der Energie (Bergbau oder Solarzellen) kostet aber.

Deshalb ist ausnahmslos alles radioaktiv: Die Luft, das Wasser, alle Nahrungsmittel, der Teller aus dem wir essen und unser Körper. Und auch der Punkt am Ende dieses Satzes. Die radioaktiven Substanzen im Boden sind nicht gleichmässig verteilt, es gibt Orte mit sehr hoher Konzentration. Interessanterweise entstanden ausgerechnet dort viel besuchte Kur- und Ferienorte (Ramsar, Guarapari, Ischia, Lurisia, Merano, Bad Gastein, Ikaria usw.) und der Aufenthalt dort gilt als ausgesprochen positiv für die Gesundheit. Die Strahlenintensität an solchen Orten kann diejenige in der unmittelbaren Umgebung des Unglücksreaktors von Tschernobyl leicht überschreiten.

Unsere Böden sind von Natur aus radioaktiv, alles relativ harmlose Stoffe von Mutter Natur? Nicht ganz, viele dieser Substanzen sind Alpha-Strahler mit sehr hohen Energien, mit Dosisfaktoren³², die zum Teil schlimmer sind als diejenigen von Plutonium-239 (die angeblich giftigste Substanz auf dieser Welt³³). So ist natürliches oder künstliches Polonium-210 (Po-210), auch ein Alpha-Strahler, um Grössenordnungen giftiger. Damit wurde der russische Ex-Agent Litwinenko im November 2006 umgebracht. Fische und Meeresfrüchte, sowie gewisse Pilze und Pflanzen reichern das im Boden und im Meerwasser natürlich vorkommende Po-210 stark an. Po-210 ist etwa 100 mal toxischer als Cs-137, das wichtigste Radionuklid bei Reaktorunfällen (z.B. Fukushima). In Japan beträgt der Grenzwert für Cs-137 in Trinkwasser 10 Bq/l. Konsequenterweise müsste man den Konsum von Fischen und von Meeresfrüchten verbieten. Meerfische enthalten typisch 10 Bq/kg Po-210 (entspricht etwa 1000 Bq Cs-137), Meeresfrüchte wie Muscheln und Krabben noch mehr (Werte bis über 200 Bq/kg wurden gemessen). Schon bei einem moderaten Konsum erhält man sehr viel höhere Dosen als durch Trinkwasser mit 10 Bq Cs-137/l.

7.1.1 Natürliche Radioaktivität der Schweiz

Mengenmässig sieht es bei der natürlichen Bodenaktivität wie folgt aus: Auf der Fläche der Schweiz (ca. 40'000 km²) dürften die ersten 30 m Boden, ganz grob, etwa 9 Millionen Tonnen Uran und etwa 30 Millionen Tonnen Thorium enthalten. Dazu kommen noch über 60 weitere radioaktive Substanzen. Diese Menge entspricht mindestens 10¹¹ tödlichen Dosen, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass die Urankonzentration in der Schweiz über dem Weltdurchschnitt liegt.

Und nun zu den Abfällen: Bis 2030 sammeln sich in der Schweiz hochradioaktive Abfälle mit einer gesamten Giftdosis von etwa $5 \cdot 10^{10}$ an. Im Klartext: Alle unsere hochradioaktiven Abfälle bis 2030 enthalten anfänglich eine Giftmenge die kleiner ist als die aller natürlichen radioaktiven Substanzen bis 30 m unter unseren Füßen. Der praktische Unterschied ist aber gross: Diese natürlichen Stoffe finden sich in unseren Äckern, Gemüsegärten und Kinderspielflächen. Und „natürlich“ auch in unseren Lebensmitteln, im Wasser, in der Luft und in unserem Körper. Die Abfälle hingegen werden extrem gut verpackt, in Stahlbehälter von 25-40 cm Wandstärke. Die Behälter sollten später in über 500 Tiefe in wasserundurchlässige Gesteinsschichten eingebettet werden. Diese Schichten sind seit über 100 Millionen Jahren stabil. Falls ein Supervulkan, ein Riesenmeteorit oder ein anderes Ereignis diese Gesteinsschichten plötzlich an die Oberfläche bringen, haben wir - und vermutlich die gesamte Menschheit - ganz andere Sorgen. Falls diese nach einem solchen Ereignis überhaupt noch existiert.

³² Der Dosisfaktor ist der Umrechnungsfaktor zwischen der Radioaktivitätsmenge (in Bq) und der „Giftigkeit“, bzw. der Dosis (in Sv).

³³ Eine völlig unsinnige Behauptung. Man geht davon aus, dass man etwa 1 Gramm Plutonium schlucken muss um umzukommen (der Körper scheidet praktisch alles umgehend wieder aus). Nur als lungengängiger Feinstaub (< als einige um) kann Plutonium, eingeatmet, auch in ug-Mengen gefährlich sein.

8 Die Endlagerung

8.1 Hochradioaktive Abfälle

Heute herrscht die Meinung vor, dass die hochradioaktiven Abfälle, gut „verpackt“ und in fester, wasserunlöslicher Form, für alle Zeiten möglichst tief in die Erde versenkt werden müssen. Die Argumente: Sie sind so extrem gefährlich, dass nur die sicherste, aufwändigste und teuerste Endlagerung in Frage kommt. Und schon gar nicht dürfen wir den zukünftigen Generationen solche gewaltigen Giftmengen hinterlassen. Wie wir weiter oben gesehen haben, sind die radioaktiven Abfälle, verglichen mit den anderen toxischen Abfällen, ein relativ kleines Problem. Aber wir haben ein gewaltiges emotionales Problem damit, also müssen sie möglichst aus dem Blickfeld. Koste es was es wolle.

Die radioaktiven Abfälle lässt man vor einer Endlagerung 40-50 Jahre abklingen. Die Strahlung ist dann so stark abgeklungen, dass sie relativ einfach zu handhaben sind. Zudem hat auch die Wärmeentwicklung stark abgenommen, die Gefahr von chemischen Prozessen und/oder Gasentwicklung wird dann minimal. Da die lokalen politischen Widerstände gegenüber einer Endlagerung bei uns sehr gross sind, wird die Entscheidung über den Standort immer wieder hinausgeschoben. Bei den relativ kleinen Mengen ist eine längere Zwischenlagerung kein grosses Problem. In der Schweiz kann eine einzige Halle von 68 x 41 m (Zwischenlager Würenlingen) alle hochradioaktiven Abfälle von mehreren Jahrzehnten Kernenergienutzung aufnehmen.

Um die gefährlichen Stoffe in den Abfällen über eine möglichst lange Zeitspanne von der Umgebung fernzuhalten, ist ein Mehrbarrierensystem vorgesehen. Die erste Barriere stellt der Kernbrennstoff selber dar, die Radionuklide sind in einer extrem unlöslichen Keramik- oder Glasmatrix eingesperrt. Die nächste Barriere besteht aus einem Stahl- oder Kupferbehälter mit einer Wandstärke von typisch 40 cm. Diese Schutzbehälter halten die unglaublichsten Belastungen aus: Abwurf aus 800 m Höhe von einem Helikopter, Beschuss mit einer Flugzeugturbine mit nahezu Schallgeschwindigkeit, Explosion zusammen mit einem Flüssiggastankwagen, Zusammenstoss mit einem Zug mit 160 km/h³⁴. Der Lagerbehälter wird von etwa 80 cm wasserundurchlässigem Bentonit umhüllt. Dieser Stoff zeichnet sich durch ein grosses Absorptionsvermögen für Giftstoffe aller Art aus. Bei einem allfälligen Leck soll das Bentonit herauskommenden Substanzen absorbieren (viel wird zwar nicht herauskommen, die Abfälle bestehen aus Glas oder Keramik). Das Ganze soll in geologisch stabilen Schichten endgelagert werden. Da sich diese Schichten seit über 100 Millionen Jahren nicht geändert haben, ist anzunehmen dass sie auch für die nächsten 100'000 Jahre stabil bleiben. Als Wirtsgesteine werden Salz (Deutschland), Granit (Finnland und Schweden), Ton (Schweiz und Frankreich) und Tuff (USA) vorgesehen.

Es ist klar, dass eine solche aufwändige Endlagerung extrem teuer ist. Man rechnet mit 400'000 bis 800'000 \$ pro Tonne hochradioaktivem Abfall. Auf Grund der sehr kleinen Mengen wirkt sich dies aber nur wenig auf den Strompreis aus.

Radioaktive Abfälle weisen gegenüber den meisten chemischen Abfällen drei „Vorteile“ auf: 1. Dank der radioaktiven Strahlung sind sie sehr leicht zu überwachen. 2. Sie zerfallen, d.h. mit der Zeit werden sie immer weniger gefährlich. Den radioaktiven Abfällen wird oft vorgeworfen, dass ein (kleiner) Teil

³⁴ <http://www.kernbrennstoff.de/inhalte/brennstoffkreislauf/transport-lagerbeaelter.html>

nur langsam zerfällt. Immerhin zerfallen sie, im Gegensatz zu Blei, Arsen, Quecksilber, Cadmium usw. 3. Die Mengen sind vergleichsweise sehr klein, wasserunlöslich und chemisch stabil.

Wie soll man mit den radioaktiven Abfällen umgehen? Obwohl es verführerisch ist, die Abfälle unwiderruflich in tiefe geologische Schichten zu vergraben, sollte man folgende Aspekte berücksichtigen:

1. Wissenschaft und Technik bleiben nicht stehen. Erst seit etwa 100 Jahren weiss man überhaupt von der Existenz des Atomkerns. In 100 Jahren werden sich unser Wissen und unsere Möglichkeiten vervielfacht haben. Bereits heute ist im kleinen Massstab die Transmutation, die Umwandlung radioaktiver Isotope in weniger gefährliche, möglich (aber noch unwirtschaftlich). Aber es gibt ausgereifte Konzepte eines geschlossenen Reaktor-Kreislaufes mit Transmutation und die interessante Möglichkeit, die heutigen „Abfälle“ als Brennstoff in neuen Generationen von Brutreaktoren zu benutzen. Geschlossenen Reaktor-Kreisläufe mit flüssigem Brennstoff haben zudem den Vorteil dass sie inhärent sicher ausgelegt werden können, d.h. im Reaktorkern steckt nur wenig verbrauchter Brennstoff, mit viel zu wenig Energie um eine Kernschmelze herbeizuführen, selbst wenn sämtliche Kühleinrichtungen versagen.
2. Wollen wir wirklich potenziell wertvolle Roh- und Energiestoffe vergraben? Ein Kernkraftwerk erzeugt im Laufe seines Einsatzes Abfälle mit einem Marktwert (2008) von etwa einer Milliarde Franken³⁵. Die „Abfälle“ enthalten neben viel unverbrauchtem Brennstoff auch eine ganze Reihe seltener Elemente (z.B. das extrem teure Rhodium, aber auch das sehr wertvolle Palladium und Ruthenium). Vielleicht sind unsere Nachfahren froh, ein solches Rohstofflager zur Verfügung zu haben (wir gehen heute recht verschwenderisch mit unseren Rohstoffen um). Die radioaktiven Isotope in den Abfällen könnten in Zukunft in der Medizin sowohl für diagnostische als auch für therapeutische Zwecke wertvolle Stoffe sein.
3. Die Krebssterblichkeit geht in allen Industrienationen langsam aber sicher zurück, etwa 1-2% pro Jahr. Eine ganze Reihe von Krebsarten sind bereits heilbar. Beim heutigen Trend dürfte der Krebs in etwa 30-50 Jahren seinen Schrecken weitgehend verloren haben. Dann sind aber auch die Gefahren der Radioaktivität kein grosses Thema mehr, da Krebs das Hauptproblem darstellt.

In der Schweiz könnte man sich als gut zugängliches Lager eine der grossen, unbenutzten Alpenfestungen vorstellen (falls eine Zwischenlagerung im Mittelland emotional als zu unsicher empfunden wird). Das Volumen der Abfälle ist nicht sehr gross (in 50 Jahren etwa 7500 m³ „verpackte“ Abfälle, ein Würfel von etwa 20x20x20m). Eine Alpenfestung wäre mit kleinem Aufwand gut zu bewachen und sicher gegen Terroristen, Flugzeugabstürze und Wasserstoffbomben. Diese Variante würde einen kleinen Bruchteil der vorgesehenen Kosten für ein Tiefenlager benötigen. Die gesparten zweistelligen Milliardenbeträge könnten für die zukünftigen Generationen auf die Seite gelegt werden. Diese können dann selber entscheiden, ob die Abfälle endgelagert werden sollten oder ob das vorgesehene Geld und/oder die Abfälle nicht besser verwendet werden können.

³⁵ Commercial Value of Used Nuclear Fuel Reprocessed with Elements Separated, Purified and Reduced to Metals. By Edwin D. Sayre, Engineering Consultant, 408 356 2769, pbmpilot@comcast.net

http://www.nist.gov/tip/wp/pswp/upload/164_commercial_value_used_nuclear_fuel_reprocessed.pdf

8.2 Vergleich mit Lagerstätten von toxischen Mineralien

Können Endlager für radioaktive Substanzen eine Gefahr für zukünftige Generationen darstellen, welche Bergbau betreiben, aber das Wissen um diese Lager verloren haben? Nach einigen hundert Jahren wird die Gefahr durch externe Bestrahlung im Vergleich zur Giftigkeit bei Einnahme praktisch bedeutungslos. Wie vergleichen sich die Giftmengen in einem Endlager mit den Giftmengen in einer natürlichen Lagerstätte eines toxischen Elementes? Klar ist, dass viele Mineralien, z.B. auf Arsen-, Thallium-, Blei- oder Beryllium-Basis mindestens so gefährlich sind wie radioaktive Abfälle nach einigen hundert Jahren. Und die Giftmengen können beträchtlich sein, wie folgende Abschätzung zeigt:

Man kennt heute etwa 130 Blei-Lagerstätten, quer über die ganze Welt verstreut. Man schätzt, dass darin etwa 70 Millionen Tonnen wirtschaftlich abbaubares Blei enthalten sind. Wenn wir annehmen, dass die gesamte Bleimenge das Doppelte beträgt, so ergeben die 140 Millionen Tonnen ein toxisches Potential von gegen 10^{13} tödlichen Dosen. Dies sind mehr als in sämtlichen radioaktiven Abfällen der Menschheit in 50 Jahren. Es besteht kein Zweifel, dass in den Erzlagerstätten unserer Erde wesentlich mehr Gift enthalten ist, als alle Kernkraftwerke dieser Welt je erzeugen können.

Bergbau ist seit je her ein gefährliches Unternehmen, jährlich sterben mehrere 1000 Bergmänner. Die grösste Gefahr geht von einstürzenden Strukturen und von Gas- oder Staubexplosionen aus, ferner stellen die Stäube und die giftigen Gase für die Atmungsorgane eine grosse Langzeitgefahr dar (Krebs, Silikose). Es ist schwer vorzustellen, dass ein radioaktives Lager nach einigen hundert Jahren eine grössere Gefahr darstellt. Die Menschen müssten mit aufwändigen chemischen Verfahren die Gefahrenstoffe aus der extrem unlöslichen Keramik- oder Glasmatrix herauslösen und einnehmen. Eines scheint mir auch völlig klar: Geht der Menschheit in einigen hundert Jahren das Wissen über radioaktive Strahlen verloren, so fand ein weltweiter, totaler Kollaps der heutigen Zivilisation statt. Der kleine überlebende Rest hat dann ganz andere Probleme als sich um radioaktive Lager tief unter der Erde zu kümmern.

9 Das Endlager von Oklo (Gabun)



Abbildung 9-1 Eine Uran-Lagerstätte in Oklo, Gabun

Abbildung 9-1 zeigt etwas sehr erstaunliches: Das Innere eines alten Kernreaktors. Dieser spaltete einige 100 mal soviel Uran wie die Hiroshimabombe. Doch der Reihe nach:

Natururan besteht heute zu genau 0.7202% aus dem gut spaltbaren U-235, der Rest aus U-238. Dieses Verhältnis gilt global. Umso grösser war die Sensation, als 1972 in Uranerzen aus dem Tagebau von Oklo, Gabun (Westafrika) ein Gehalt von nur 0.7171% gemessen wurde, später fand man sogar Proben mit nur 0.296%. Die einzig mögliche Erklärung: Ein Teil der U-235-Kerne wurde gespalten. Die Lagerstätte ist etwa 1.8 Milliarden Jahre alt. Da U-235 schneller zerfällt als U-238 war damals der Anteil von U-235 wesentlich höher, etwa 3%, gerade „richtig“ für einen Leichtwasserreaktor. Für eine Kettenreaktion benötigt man noch Wasser (als Moderator). Dringt Regen- oder Grundwasser in ein solches Uranlager, so können die Bedingungen für eine Kettenreaktion erfüllt sein: Ab etwa 25% Wassergehalt und 30% Urananteil im Erz kann eine Kettenreaktion entstehen³⁶. In der Tat fand man an mehreren Stellen mit sehr hohem Urangehalt (teilweise über 50%) genau die erwarteten Isotopenanomalien die ein solcher Reaktor hinterlassen würde. Dies gestattete eine Rekonstruktion der damaligen Vorgänge.

³⁶ <http://www.zsr.uni-hannover.de/folien/oklo.pdf>

The Oklo Open-Pit Uranium Mine

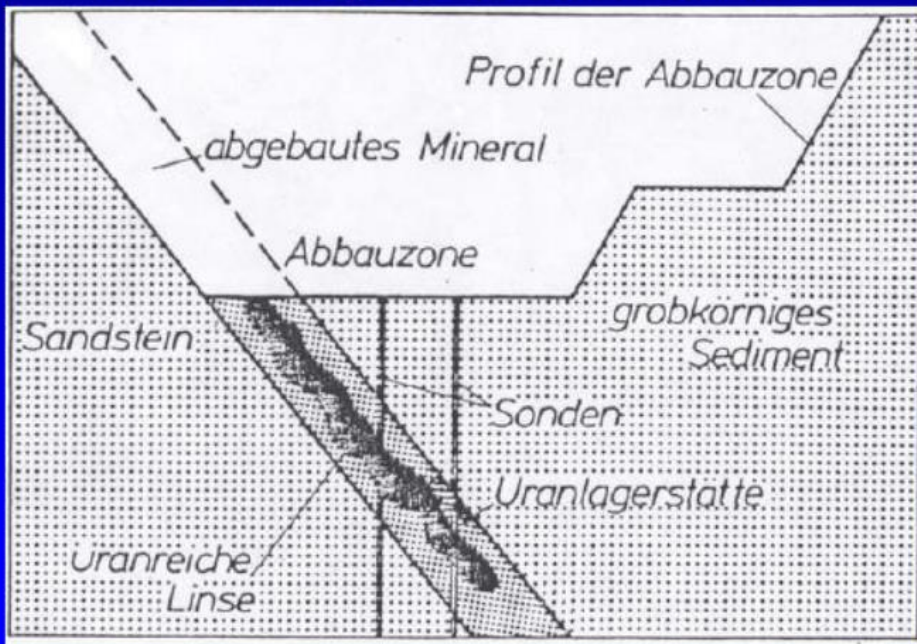


Abbildung 9-2 Naturreaktor von Oklo, Gabun. Heute wird hier Uran abgebaut.

Es besteht kein Zweifel, dass vor 1.8 Milliarden Jahren in den Uranerzlagern von Oklo mehrere (vermutlich 17) wassermodierte Reaktoren im Betrieb waren. Ein solcher Naturreaktor hat einen Durchmesser von einigen m und regulierte sich von selbst: Nach etwa 30 min. Betrieb stieg die Temperatur auf 250-450°C, alles Wasser verdampfte, die schnellen Spaltneutronen wurden nicht mehr moderiert, die Kettenreaktion brach zusammen. Nach 2-3 Std. Abkühlung trat wieder Wasser ein und der Reaktor startete von neuem. Insgesamt fanden viele Millionen solcher Zyklen statt.

Im Laufe der Zeit (über 100'000 Jahre) wurden 5-6 t U-235 gespalten. Dies entspricht etwa sechs Jahren Betrieb eines modernen 1 GW-Reaktors. Brutreaktionen fanden naturgemäss auch statt, etwa 1-2 t Plutonium-239 wurden produziert. Was ist mit diesen 6-8 t hochradioaktivem Abfall geschehen? Mit Hilfe einer genauen Analyse der örtlichen Verteilung der Reaktionsprodukte kann die Wanderung der verschiedenen Komponenten des Abfalls rekonstruiert werden.

Trotz des zyklischen Aufheizens auf einige 100 °C und der ständigen „Wasserspülung“ zeigte sich, dass alle Aktiniden (Uran, Neptunium, Plutonium) sowie Niob, Yttrium, Technetium, Zirkonium, und die seltenen Erdmetalle in der Reaktorzone verblieben sind. Im Gegensatz dazu sind praktisch alle Spaltprodukte, nämlich alle Edelgase, das Iod und die anderen leichtflüchtigen und/oder leichtlöslichen Elemente (Cäsium, Barium), aber auch Molybdän, Cadmium und Blei aus der Reaktorzone verschwunden. Dabei muss beachtet werden, dass in diesem historischen Endlager keinerlei technische Barrieren vorhanden waren (Glas oder Keramik, dickwandiger Stahlbehälter), die Stoffe in siedendem Wasser lagen und die geologischen Bedingungen nicht hätten schlechter sein können (poröses, wasserdurchlässiges Sedimentgestein).

Die Aktiniden, allen voran das Plutonium, stellen bei der Lagerung von hochradioaktiven Abfällen nach etwa hundert Jahren das grösste toxische Problem dar. Wenn diese Stoffe es in 1.8 Milliarden Jahren

nicht geschafft haben sich zu bewegen, so dürfen wir unsere geplanten Tiefenlager als 110% sicher betrachten.

Neben Oklo gibt es noch andere natürliche Lagerstätten von radioaktiven Substanzen. Die zweitgrößte Uranlagerstätte der Welt befindet sich in Cigar Lake, Saskatchewan (Kanada). Diese Lagerstätte existiert seit etwa 1.3 Milliarden Jahren.

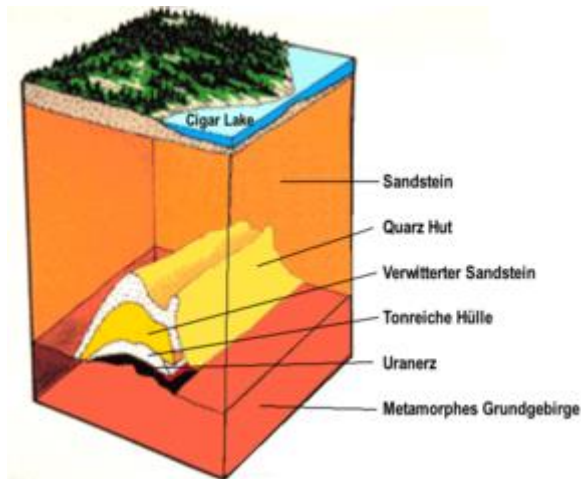


Abbildung 9-3 Prototyp eines Endlagers: Die Uranlagerstätte von Cigar Lake in Kanada (http://de.wikipedia.org/wiki/Cigar_Lake)

Die Lagerstätte in 450 m Tiefe ist rund 2 km lang und bis zu 100 m breit, bei einer Dicke von 1 bis 20 m. Das Uranoxid erreicht an einigen Stellen eine Konzentration von knapp 21 Prozent. Eine Tonschicht schirmt das Uran von der Umgebung ab. Selbst 1.3 Milliarden Jahre genüßten nicht, um Uran oder seine radioaktiven Tochterprodukte aus der Lagerstätte heraustreten zu lassen. Bereits in einer geringen Entfernung von Erzkörper kann keine erhöhte Radioaktivität mehr festgestellt werden, und schon gar nicht an der Oberfläche. Dieses natürliche Endlager demonstriert sehr eindrücklich die gute Eignung von Tonschichten für ein Endlager.

10 Zusammenfassung und Schlusswort

Sind die hochradioaktiven Abfälle also harmlos? Nein, sicher nicht: Die anfänglichen Giftmengen sind riesig. Sie müssen mit dem nötigen Respekt behandelt werden. Dies gilt in verstärktem Ausmass auch für andere toxischen Abfälle, diese verursachen Opferzahlen in Millionenhöhe (WHO), Jahr für Jahr. Aber wir vergleichen nicht, und so kommt es, dass wir uns zu viel um kleine Risiken fürchten und zu wenig um grosse. Wir müssen dieses „Wahrnehmungslücke“ verkleinern, sonst riskieren wir viele falsche Entscheidungen mit negativen Folgen für unsere Gesellschaft und vor allem für unsere Gesundheit. Das Problem: Bei den radioaktiven Strahlen gehen die Medien, die Behörden, die Politik und die Interessensverbände genaueren Angaben darüber aus dem Weg (einige wenige Ausnahmen bestätigen die Regel). Vergleiche mit anderen Giften oder Gefahren sind tabu. Oft wird argumentiert, dass die „Atomlobby“ die Gefahren verharmlost, dass wir noch zu wenig darüber wissen, dass die Gefahren möglicherweise stark unterschätzt werden.

Ist es wirklich denkbar, dass wir die Gefahren von radioaktiven Substanzen, trotz über 100 Jahren intensiver Forschung, unterschätzen? Dass alle bisherigen Abschätzungen um den Faktor 10 oder gar

100 falsch sind, wie gewisse Kreise behaupten? Eine solche Unterschätzung ist meiner Meinung nach ausgeschlossen: Wir akkumulieren in der Schweiz von künstlichen und natürlichen Quellen eine durchschnittliche Lebensdosis von etwa 0.45 Sv, bei einem Faktor 10 wäre man bei einer tödlichen Einmal-Dosis, praktisch alle würden an Krebs erkranken. Und es gibt grössere Bevölkerungsgruppen (in Iran oder in Brasilien) die sogar mehrere Sv akkumulieren, diese müssten bei einer Unterschätzung um einen Faktor 10 schon lange tot sein. Sind sie aber nicht, im Gegenteil, sie erfreuen sich bester Gesundheit.

Eine Überschätzung der Risiken um Faktor 10 ist für den Fall einer längeren Bestrahlungsdauer eher wahrscheinlich. Die heutigen Risikoberechnungen beruhen hauptsächlich auf den Daten der Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki, d.h. auf Einmal-Dosen, die in weniger als einer Sekunde abgegeben wurden (Schockdosis). Aber verteilt man eine solche Dosis über eine längere Zeitspanne (kontinuierliche Bestrahlung) so zeigt sich oft keine oder nur eine kleine (manchmal sogar positive) Wirkung³⁷. Dies wird von der natürlichen Untergrundstrahlung und von vielen Tierversuchen bestätigt.

Die Grundfrage, ob das Problem der radioaktiven Abfälle lösbar oder unlösbar ist, hat zwei Antworten:

1. Für gewisse Kreise ist dieses Problem unlösbar:

„Atommüll ist das gefährlichste Abfallprodukt der Industriegesellschaft des 20. Jahrhunderts, und das langlebigste Erbe unserer Zivilisation. Für Tausende von Jahren sind radioaktive Abfälle eine ständige Bedrohung für Mensch und Umwelt ...“

„Bereits seit beinahe 50 Jahren versucht die Atomindustrie, eine Lösung zu finden. Vergeblich – es gibt keine Lösung, die solch gefährliches Material über solch lange Zeiträume dauerhaft wegschliessen kann.“³⁸

2. Meine Gegenthese:

Die sichere Entsorgung aller toxischen Abfälle unserer Zivilisation ist ein heute technisch und ökonomisch unlösbares Problem:

- zu gross sind die Mengen (Milliarden von Tonnen/J)
- zu verteilt sind die Stoffe (Luft, Wasser, Boden)
- zu lange die Zeiträume (Milliarden von Jahren)

Ein Entsorgungsproblem ist aber lösbar:

Bei den nuklearen Abfällen ist ein sicheres Fernhalten von der Biosphäre technisch und wirtschaftlich möglich.

³⁷ Dieses Verhalten zeigt sich bei praktisch allen Giftstoffen und Einwirkungen: Eine einmalige Schockdosis wirkt viel schlimmer als die gleiche Dosis, verteilt auf einen längeren Zeitraum. Fünf Liter Wein in wenigen Stunden sind tödlich, 5 Liter Wein, verteilt auf einen Monat, sind bekömmlich.

³⁸ Zitat aus: <http://info.greenpeace.ch/de/atom/atommuell/index> (2007)

