

höhung nach 1987 zugelassen werden. Dies ist nicht der Fall: Die Summe der Fehlerquadrate verringert sich nur von 178,95 auf 178,19 ( $p=0,732$ , F Test). Ein Langzeiteffekt von Tschernobyl auf das Geschlechterverhältnis ist in den bayerischen Daten also nicht nachweisbar.

Um zu prüfen, ob die Erhöhung des Geschlechterverhältnisses durch eine verminderte Zahl weiblicher oder eine vermehrte Zahl männlicher Geburten bedingt ist, wurde der Verlauf der Geburtenzahlen nach Geschlecht getrennt analysiert. Es zeigt sich, dass die beobachtete Erhöhung des Geschlechterverhältnisses im Januar 1987 auf eine gegenüber dem Erwartungswert um 6 Prozent erhöhte Zahl männlicher Geburten zurückzuführen ist ( $p=0,145$ ); die Zahl weiblicher Geburten war nur

unwesentlich um 0,7 Prozent erhöht ( $p=0,858$ ).

### Dosis-Wirkungsbeziehung

Um eine mögliche Abhängigkeit des Geschlechterverhältnisses von der Cäsium-Bodenbelastung zu untersuchen, wurden die Daten der Geburten in den 96 bayerischen Landkreisen in jedem der 156 Monate zusammen mit dem jeweiligen Landkreis-Mittelwert der Cäsium-Bodenbelastung (cs) benötigt. Da mögliche andere Einflüsse eine scheinbare Assoziation mit der Cäsiumbelastung schon vor Tschernobyl bewirken könnten, wird die Variable cs im gesamten Untersuchungszeitraum (1980 bis 1992) im Modell berücksichtigt. Außerdem wird wie oben ein möglicher Einfluss der Tschernobylstrahlung auf das Geschlechterverhältnis in den

restlichen Monaten des Zeitraums Mai 1986 bis Dezember 1987 zugelassen. Das Regressionsmodell hat damit die folgende Form:

$$y(t,cs) \sim \beta_0 + \beta_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (t - \beta_2)) + \beta_3 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (2t - \beta_4)) + cs \cdot (\beta_5 + \beta_6 \cdot d8687 + \beta_7 \cdot \text{Jan}87).$$

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse enthält Tabelle 2. Im Januar 1987 zeigt sich eine signifikante Beziehung zwischen Geschlechterverhältnis und der Cäsium-Belastung (siehe Abbildung 4); das Geschlechterverhältnis erhöht sich um 0,29 Prozent pro  $\text{kBq/m}^2$  ( $p=0,011$ ). Aber auch im Zeitraum Mai 1986 bis Dezember 1987 ist der Zusammenhang deutlich signifikant; das Geschlechterverhältnis erhöht sich um 0,07 Prozent pro  $\text{kBq/m}^2$  ( $p=0,008$ ).

1. Körblein A. Säuglingssterblichkeit und Geschlechterverhältnis

## Atom Müll

# „Risiken und Nebenwirkungen“ bei einer Flutung des Atommülllagers Asse II mittels Schutzfluid

## Kein Schutz gegen sicherheitsgefährdende chemische Prozesse

Von Rolf Bertram\*

„Man kann Probleme nicht mit Methoden lösen, die sie geschaffen haben.“ Albert Einstein (1879 – 1955)

Die Vollverfüllung – als eine Stilllegungsoption für Asse II – sieht vor, die oberen Bereiche der Schachanlage mit Beton zu verfüllen und unterhalb der 700-Meter-Sohle mit einer gesättigten Magnesiumchloridlösung (sogenanntem Schutzfluid) zu fluten. Dadurch würde früher oder später das gesamte auf der 725 Meter- und 750 Meter-Sohle eingelagerte radioaktive und nichtradioaktive Inventar sowie das zur Verfüllung der Einlagerungskammern verwendete Material in Kontakt mit der wässrigen Lösung

kommen.

Auch bei der Notfallplanung ist beim Eintritt des Notfalls eine Flutung mittels Schutzfluid vorgesehen. Auch hierbei würde das eingelagerte Material der Einwirkung der gesättigten Magnesiumchloridlösung ausgesetzt.

In beiden Fällen ist eine trockene Lagerung des Inventars unmöglich. Die geforderte Langzeitsicherheit (für 1 Million Jahre) ist bei Verfüllung mit Beton und Magnesiumchloridlauge nicht zu gewährleisten.

## Allgemeines

Im Falle einer Flutung würde bei der stofflichen Vielfalt des eingelagerten Inventars und den unüberschaubaren Möglichkeiten zur chemischen und strukturellen Materialumwandlung ein System hochkomplexer Wechselwirkungen vorliegen. In Gegenwart von Wasser in Form wässriger Lösungen und/oder durchfeuchteten Phasengemischen (z.B. Salzgrus) würden Prozesse aktiviert, die mit den derzeitigen Erkenntnissen zur Reaktionskinetik weder prognostizierbar noch abschätzbar sind. Eine Folge dieser Aktivierung sind mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ablaufende Produktbildungen über verzweigte und weitgehend unbekannte Reaktionswege. Es ist bekannt, dass diese neugebildeten Produkte in allen Aggregatzuständen auftreten und selbst hochreaktiv sein können. Primär entstandene Stoffe können Starter für weitere gekoppelte Folgereaktionen (Reaktionsketten, Verzweigungsreaktionen, etc.) mit weiteren Sekundärprodukten sein und

nach den atmosphärischen Atomwaffentests. Strahlentelex 2010 Feb; 554-555:1-5.

2. Scherb H, Voigt K. Trends in the human Geschlechterverhältnis at birth in Europe and the Chernobyl Nuclear Power Plant accident. *Reprod Toxicol.* 2007 Jun; 23(4):593-9.

3. Scherb H in: [http://www.strahlentelex.de/Tagungsreader\\_Berlin\\_2008-1.pdf#page=5](http://www.strahlentelex.de/Tagungsreader_Berlin_2008-1.pdf#page=5), S.95ff

4. Sperling K, Pelz J, Wegner RD, Dörries A, Grütters A, Mikelsen M. Significant increase in trisomy 21 in Berlin nine months after the Chernobyl reactor accident: temporal correlation or causal relation? *BMJ.* 1994 Jul 16;309(6948):158-62.

5. Zatsepin I, Verger P, Robert-Gnansia E, Gagnière B, Tirmarche M, Khmel R, Babicheva I, Lazjuk G. Down syndrome time-clustering in January 1987 in Belarus: link with the Chernobyl accident? *Reprod Toxicol.* 2007 Nov-Dec;24(3-4):289-95. ●

so fort. Das „Schutzfluid“ ist ein ideales Reaktionsmilieu, in dem die genannten Prozesse sogar stärker ablaufen als in reinem Wasser oder in ungesättigten Salzlösungen. Die Durchdringung der chemischen, strahlenchemischen und elektrochemischen Prozesse und eine wechselseitige Verstärkung führen zu Reaktionsnergismen, die nicht kontrollierbar und messtechnisch kaum erfassbar sind. Die zur Stabilisierung der Schachanlage vorgesehene Flutung mit einer wässrigen gesättigten Magnesiumchloridlösung bietet keinen Schutz gegen sicherheitsgefährdende chemische, elektrochemische und strahlenchemische Prozesse.

Systemtheoretisch handelt es sich um ein nichtlineares dynamisches Verhalten, das sich wegen der räumlichen Inhomogenitäten, der zeitlichen Schwankungen und der unübersichtlichen Kopplungsphänomene einer prozessbegleitenden Simulation entzieht. Im Fall Asse kommt hinzu, dass die einzelnen Pro-

zesse und Prozessorte – so sie denn bekannt sind – von ihrer chemischen und strukturellen Umgebung (Eigenschaften der Einbettungsmaterialien, Zustand der Einlagerungskammern) beeinflusst werden. Obwohl deterministische Ursachen die Prozessabläufe steuern, ist das Prozessverhalten insgesamt nicht vorhersehbar [1].

Die Langzeitdynamik ist danach geprägt durch ständige Veränderung der Systemparameter und damit auch der Systemdynamik.

### Chemische Prozesse in Gegenwart von wässrigen Lösungen

Bei chemischen Prozessen ist zu unterscheiden zwischen thermisch und nichtthermisch kontrollierten chemischen Reaktionen [2]. Bei Letzteren erfolgt die für eine Reaktion erforderliche Energiezufuhr nicht durch Wärme (d.h. thermisch) sondern durch energiereiche Strahlung (Radiochemie) oder elektrisch (Elektrochemie). Art und Geschwindigkeit der Energieabsorption am Ort der Reaktion sind ganz verschieden. Während sich bei den thermisch aktivierten Reaktionen der gesamte Reaktionsraum relativ langsam erwärmt, erfolgt die nichtthermische Aktivierung momentan und gezielt an einem begrenzten Molekülensemble. In Bruchteilen von Sekunden wird durch Alpha-, Beta- und Gammastrahlung eine Vielfalt von reaktionsfähigen Spezies wie Radikationen, Radikale und angeregte Teilchen erzeugt.

Die Besonderheit der Kinetik nichtthermisch aktivierter Gesamt- oder Teilreaktionen insbesondere bei inhomogener Verteilung von Radionukliden und permanenter Energiezufuhr durch radioaktive Strahlung [3] besteht darin, dass es infolge der gleichzeitig und ständig ablaufenden Diffusions-, Solvatations- und Relaxationsvorgänge weder zu einem Thermodynamischen

Gleichgewicht noch zu einem Fließgleichgewicht („steady state“) kommen kann. Auch die Irreversible Thermodynamik ist nicht geeignet, solche Vorgänge zu erfassen.

### Asse-relevante Prozesse

Die grundsätzliche Problematik – wenn auch nicht ausdrücklich auf Asse bezogen – wurde teilweise bereits 1993 von BREWITZ [4] richtig umrissen: „Unsere bisherigen sicherheitsanalytischen Arbeiten haben aufgezeigt, daß die Korrosion der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle mit ihrer Zementmatrix durch NaCl- oder Q-Laugen und die Bildung eines stark von diesen Prozessen abhängigen chemischen Milieus die Mobilisierung der Radionuklide bzw. die Bildung von Löslichkeitsgrenzen und die Ausfällung mit der Bindung an Korrosionsprodukte bestimmt. Die Frage ist, welche Radionuklide in welchen Konzentrationen letztlich in Lösung bleiben und über Auspressvorgänge in das überlagernde Deckgebirge freigesetzt werden können.“

In einem Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) aus dem Jahre 2003 [22] wird folgendes ausgeführt: „Gelangend wässrige Lösungen in das Nahfeld eines Endlagers, unterliegen die Abfallgebinde sowie die umliegenden geotechnischen Barrieren einer Vielzahl chemischer Reaktionen. Durch ablaufende Lösungs- und Transport-Prozesse können Radionuklide aus den Abfallgebänden remobilisiert und aus dem Nahfeld eines Endlagers transportiert werden.“

Nach den vorliegenden Dokumentationen zu den eingelagerten chemischen und chemotoxischen Stoffen [5] und zum nuklidspezifischen Aktivitätsinventar [6] sind derzeit zahlreiche reaktionsfähige Stoffe in der Schachanlage Asse II vorhanden. In Gegenwart von Feuchte, insbesondere aber beim Kontakt mit

wässrigen Lösungen, kommt es unvermeidbar zu vielfältigen Prozessabläufen. Im Falle einer Flutung mit Magnesiumchloridlauge würden zusätzlich große Mengen an Lösungswasser, Magnesium und Chlorid vorliegen. Da technisch hergestellte Laugen unter anderem Spuren von Blei, Quecksilber und Arsen enthalten, würde bei den großen Füllvolumina der Eintrag dieser toxischen Schwermetalle den Anteil der ohnehin vorhandenen Schadstoffe erhöhen. Auch durch den bereits eingebrachten und weiter zur Verfüllung und Stabilisierung vorgesehenen Beton werden erhebliche Mengen an toxischen Metallen wie Cadmium, Blei, Arsen, Chrom, Quecksilber, Uran, Thorium und viele andere eingetragen [7,8]. Es ist bekannt, dass diese Stoffe durch Auslaugung des Betons früher oder später in Lösung gehen [9]. Ein Transport dieser schadstoffhaltenden und kontaminierten Lösungen über Poren, Risse und klüftige Strukturen ist trotz technischer Barrieren nicht auszuschließen.

### Gasbildende Prozesse

Die in 2005 erstellte ISTECS-Studie „Realistische und maximale Gasbildung in der Schachanlage Asse“ [10] ist ein Versuch, einem Auftrag nachzukommen, der mit der gewählten Methodik und den unrealistischen und zum Teil unzutreffenden Grundannahmen nicht erfüllt werden konnte. Da diese Studie gegenwärtig als Orientierung bei zu treffenden Entscheidungen und Maßnahmen dient, werden hier im Folgenden einige grundsätzlichen Defizite benannt.

### Grundsätzliche Defizite der ISTECS-Studie

#### Die Nichtberücksichtigung synergistischer Effekte

In der Studie werden die verschiedenen gasbildenden Prozesse recht umfassend dargestellt – aber so, als würden sie unbeeinflusst voneinander

ablaufen. Dabei ist lange bekannt und nachgewiesen, dass die auf verschiedenen Ursachen beruhenden Reaktionen und deren Produkte miteinander in Wechselwirkung stehen.

#### Die Nichtberücksichtigung der lokalen Dosisleistungen bei den radiolytischen Betrachtungen

Der Annahme, dass es aufgrund der „geringen akkumulierbaren Dosis“ nur „zu einer praktisch vernachlässigbaren Gasbildung“ durch Radiolyse käme, wäre nur zu folgen, wenn die berechnete Gesamtaktivität des schwach- und mittellaktiven Inventars über alle Gebinde und über alle Einlagerungskammern gleichmäßig verteilt wäre. Aber genau das ist nicht der Fall. Nach den vorliegenden „Begleitlisten“ unterscheiden sich die „maximalen Dosisleistungen an der Außenseite der Fässer“ um mehr als vier Zehnerpotenzen. Die radiolytischen Vorgänge an einem Fass mit 7000 rem/h (an der Außenseite) sind völlig verschieden von einem Fass, dessen Dosisleistung unter 1 rem/h liegt. Nicht die Gesamtaktivität ist ein Maß für die Auslösung strahlenchemischer Reaktionen, sondern die Aktivität am Reaktionsort. Von dort aus kann sich das Reaktionsgeschehen durch gebildete Radikale in benachbarte Bereiche relativ schnell fortpflanzen. In Asse existieren Bereiche mit hoher Aktivität und damit auch mit hoher radiolytischer Gasbildungsrate. Bei Freisetzung von Alpha- und Beta-Radionukliden infolge defekter Gebinde wäre zusätzlich eine Gasbildung insbesondere durch Alpha-Radiolyse zu berücksichtigen.

Dass in der Studie die Gasbildung durch Radiolyse als nur gering eingeschätzt wird, verwundert um so mehr, als es bezüglich der Unsicherheit der Gasbildungsrate dort heißt (S.81/82): „Die Abschätzung der radiolytischen Gasbildung hat eine sehr große Unsicher-

heit. (...) Die Unsicherheiten aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Gasbildungsrate (Lösungszusammensetzung, Metalle, Oberflächen, Oberflächenbeschaffenheit, Abfallzusammensetzung) können nur zum Teil durch eine Auswertung vieler Experimente herausgemittelt werden. Die Unsicherheit der gemittelten Gasbildungsraten für die standortspezifischen Bedingungen der Schachanlage Asse in Abhängigkeit vom pH-Wert wird in der vorliegenden Berechnung auf eine Größenordnung geschätzt.“

### Die Nichtberücksichtigung der oben charakterisierten nichtthermischen Reaktionskinetik

Bei nichtthermischer Energieübertragung ist der Anteil reaktionsfähiger Spezies gegenüber der thermischen Energieübertragung dadurch erheblich erhöht, dass ein größerer Teil der Moleküle die Schwelle der Aktivierungsenergie übersteigt (s.S. 233,234 in [2]).

Als Beispiele für nichtbeachtete Prozesse mögen folgende in der Literatur beschriebene Reaktionen dienen:

- Wasserstoff kann nicht nur mit Luftsauerstoff und Chlorgas explosive Gemische bilden (Knallgas, Chlorknallgas) sondern auch mit Stickoxiden [11].
- Bekannt ist, dass beim Kontakt zwischen Atommüll und hochsalinaren Laugen Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Methan und andere Kohlenwasserstoffe entstehen [12].
- Bekannt ist auch, dass in spaltproduktreichen Bitumen- und Zementprodukten durch Radiolyse zündfähige Gasgemische entstehen, was besonders bei abgeschlossenen Bereichen ohne Bewetterung zu beachten ist [9].
- Auch durch radiolytische Zersetzung der vorhandenen Kohlenwasserstoffe können entflammbar und explosive Gasgemische entstehen [14, 16, 24].

Durch Zündquellen ausgelöst kann es zu heftigen Gasreaktionen (Deflagration, Explosion, Detonation) kommen. Als Zündquellen kommen infrage Alpha-, Beta-, Gammastrahlung, Elektrische Funkenbildung, Selbsterhitzung durch Reaktionswärme und Adiabatische Kompressionen.

Zu den Folgen gasbildender Prozesse hat die Reaktorsicherheitskommission (RSK) bereits 2005 [14] wie folgt Stellung genommen: „Bei einem undurchlässigen Wirtsgestein können die Gasdrücke bei entsprechender Gasbildung den Gebirgsdruck überschreiten.“

### Nichtberücksichtigung der realistische Randbedingungen

In der Studie werden unter „Phasen der Gasbildung“ (S.58) methodisch korrekt drei „geflutete“ Phasen unterschieden. Der Verlauf der Gasbildung in den jeweiligen Phasen wird jedoch unter der Annahme „konstanter physikalisch-chemischer Randbedingungen“ beschrieben. Wie oben dargelegt, ist die Realität bei Flutung aber gekennzeichnet durch ständig sich ändernde Randbedingungen und damit auch durch sich ständig ändernde Gasbildungsverläufe.

Da in der Studie eine Vielzahl von Einflüssen nicht berücksichtigt, der Anteil der schwachaktiven Abfälle an der Gasbildung hoch unterschätzt und die Gasbildung unter unrealistischen Randbedingungen abgeschätzt wurde, ist sie weit davon entfernt, die tatsächlich ablaufende Gasbildung zu beschreiben. Von der Ermittlung einer „maximalen Gasbildung“ kann daher keine Rede sein.

### Heterogene Prozesse

#### Allgemeines

Nach Auflösung der Behälter und deren Ummantelung durch Korrosion und Auslaugung würde ein auf das umgebende Salz (kompakt oder

Salzgrus) übergreifendes vielkomponentiges Mehrphasensystem in einer hochvernetzten Struktur mit einer Fülle von aneinander grenzenden Phasen vorliegen. Da Reaktionsgeschwindigkeiten in Grenzsichten in der Regel diffusionsgesteuert sind, wird die ständige Veränderung der Porosität, der Kompaktion und der Permeabilität des Reaktionsraumes sowohl für den Flüssigkeits- wie für den Gastransport eine bedeutende Rolle spielen [19].

Grenzsichten sind bevorzugte Orte für reaktionsauslösende Primärprozesse. Auf diesem Sachverhalt beruht die in der chemischen Reaktions- und Verfahrenstechnik mit Erfolg zur Produktsteigerung eingesetzte heterogene Katalyse. Dabei wird ausgenutzt, dass innerhalb der Grenzsichten – zum Beispiel zwischen festen und flüssigen Phasen – kurzreichende extreme Kräfte auftreten, die in der Lage sind, potentielle Reaktionspartner zur Reaktion anzuregen. Grenzsichten dieser Art treten durch die vermischten also dicht aneinander grenzenden Inventarkomponenten in großer Zahl auf, beispielsweise als filmartige Wasserschichten in den Kontaktzonen von durchfeuchteten porösen Strukturen oder von feuchtem Schüttgut (hier Salzgrus). Die geschwindigkeitsbestimmenden Schritte zwischen Fest/Flüssig-Reaktionen werden durch den An- und Abtransport der an der Reaktion beteiligten Komponenten kontrolliert (Diffusion). Der Verlauf von Grenzsicht-Reaktionen ist wegen der vielen und zeitlich und räumlich variierenden Einflussgrößen kaum abzuschätzen. Nur unter stark vereinfachenden Annahmen und unter Zuhilfenahme der Perkolationstheorie [16] könnte es gelingen, den Trend der vorhandenen Kopplungen zwischen Permeabilitäts- und Porositätsverhalten zu modellieren.

### Strahlenchemische Prozesse in Grenzsichten

Über strahlenchemische Prozesse in heterogenen Systemen, deren Eigenschaften vorrangig durch Grenzsichtstrukturen geprägt sind, gibt es wenig belastbare Daten. Trotz vieler Beobachtungen über die Einwirkung ionisierender Strahlen ist eine allgemein anerkannte Kinetik für strahlenchemische Reaktionen in Grenzsichten noch nicht entwickelt.

Durch Absorption der permanent einwirkenden ionisierenden Strahlung werden die reaktionsfördernden Eigenschaften der Grenzsicht wesentlich bestimmt. Es werden Prozesse ausgelöst, die in unbestrahlter Situation und in homogener Phase gar nicht oder nur mit verminderter Ausbeute auftreten [2].

Die Erkenntnisse aus radiolytischen Untersuchungen in Salzlaugen sowie daraus abgeleitete Berechnungen zur Erstellung einer Reaktionskinetik sind – weil an Modellsubstanzen und unter unrealistischen Annahmen durchgeführt [17] – für die Verhältnisse in Asse nur von geringem Wert.

### Elektrochemische Prozesse

In dem überwiegend unsortierten Komponentengemisch ist mit Phasenkontakten aller Art zu rechnen. Da sich im Grenzsichtbereich Feldstärken über 1 Million Volt pro Meter (V/m) aufbauen und dadurch Molekül-Orbitale bis zur Reaktionsfähigkeit deformiert werden, sind Grenzflächen zwischen Phasen bevorzugter Ort für elektrochemische Reaktionen. Im dynamischen Asse-System ist lokal begrenzt mit fluktuierenden elektrischen Feldern und schwankender Migration zu rechnen, mit Prozessen also, die diverse elektrochemische Reaktionen unterschiedlicher Geschwindigkeit und weitreichender Kopplung ermöglichen.

An Phasenübergängen zwischen den vorhandenen Ionen- und elektronenleitenden Phasen laufen unvermeidbar potentialbildende Prozesse ab. Als Ionenleiter kommen Elektrolytlösungen (Salzlösungen), als Elektronenleiter vorrangig Metalle aber auch halbleitende Materialien (z.B. Me-Oxide und -Sulfide) in Betracht. Damit ist die Ausbildung jedweder Art von elektrodenähnlichen Anordnungen (z.B. galvanische Zellen) gegeben, deren Wirkung entscheidend vom Material und von der Struktur (kristallin, amorph) abhängt (z.B. Misch-, Mikro- und Nanoelektroden) [18].

Bisher nicht systematisch untersucht sind die Eigenschaften von fest/flüssig Grenzschichten, bei denen beide Partner – also z.B. Salzlauge und Metall – mit Radionukliden kontaminiert sind. Wegen der starken kurzreichenden Strahlung werden im Realfall ASSE insbesondere Alphastrahler enthaltende Phasen zu beachten sein.

Unter der herrschenden ionisierenden Strahlung können an halbleitenden Kontaktschichten (z.B. Rost) stromliefernde Zellen (photoelektrischer Effekt) entstehen.

Bei der Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten werden mit Sicherheit auch korrosionsfördernde Lokalelemente (Lochfraß) gebildet, durch die Korrosionsprodukte zum Beispiel in Form von Deckschichten und Gasen entstehen. Bekannt ist, dass in der Regel korrosive Prozesse durch ionisierende Strahlung verstärkt werden [20].

An Mehrphasengrenzen – z.B. Gas // Metall/Halbleiter // Elektrolyt – ist auch die Bildung von brennstoffzellenähnlichen Anordnungen möglich. Bekannt ist, dass die Oberflächenaktivität an der Grenze zum Gas (z.B. Wasserstoff) wesentlich von der Morphologie, den Poreneffekten und den Strahlungsver-

hältnissen abhängt.

Da alle Elemente im Inventar vorhanden sind, ist sogar durch zufälligen Kontakt geeigneter Materialien und Radionukliden die Bildung stromliefernder Radionuklid-Batterien möglich [21].

### Fazit

Eine Flutung des Atommüll-lagers sowohl als Stilllegungsoption wie als Notfallmaßnahme ist mit einem hohen Risiko verbunden. Durch den Kontakt des eingelagerten Inventars mit Salzlauge kommt es zu einer Vielzahl von chemischen und strahlenchemischen Reaktionen. Die Bildung von gefährlichen Gasen und kontaminierten Flüssigkeiten und eine Mobilisierung dieser Schadstoffe sind unvermeidbar. Ein Transport radioaktiven und persistenten chemotoxischen Materials bis in die Biosphäre kann nicht ausgeschlossen werden.

Mit der Flutung würde in ungeordneter Weise eine „nicht-rückholbare Endlagerung“ geschaffen. Eine Bergung oder eine Kontrolle des Atommülls wäre damit für alle Zeiten ausgeschlossen.

1. J. M.T. THOMPSON, H. B. STEWART, „Nonlinear Dynamics and Chaos“, Wiley-VCH, 2002.
2. W. STILLER, „Nichtthermisch aktivierte Chemie, Einführung in ihre Phänomene, Elementarprozesse und Anwendungen“, VEB- Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1987.
3. E. I. GRIGORIEV, L. I. TRAKHTENBERG „Radiation-chemical processes in solid phase: theory and application, Kap.8, Heterogeneous Radiation chemical processes“, CRC Press, Inc., 1996.
4. W. BREWITZ, GSF - IFT, „Natürliche Analoga: Eine zusätzliche Möglichkeit zum Langzeitsicherheitsnachweis für geologische Endlager; Überblick über bisherige nationale und internationale Arbeiten“, Workshop Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, 4. + 5. November 1993.
5. B. Buchheim, H. MEYER, M. THOLEN, „Bestimmung des In-

ventars an chemischen und chemotoxischen Stoffen in den eingelagerten radioaktiven Abfällen der Schachanlage Asse- Abschlussbericht“, März 2004.

6. U. GERSTMANN, H. MEYER, M. THOLEN, „Bestimmung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars der Schachanlage Asse – Abschlussbericht“, Aug. 2002.

R. BERTRAM, „Auswirkungen des durch die korrigierte Plutonium-Menge veränderten nuklidspezifischen Aktivitätsinventars der Schachanlage Asse auf die bisher vorliegenden Stellungnahmen und Gutachten insbesondere zur Strahlenexposition“, AGO, 2009.

R. BERTRAM, „Zum Kriterienpapier des BfS, 11. Okt. 2009“, AGO-Sitzung 15./16. 2009 in Karlsruhe.

7. B. BUCHHEIM, H. MEYER, G. STOLZENBERG, „Bestimmung eines Quellterms für chemische und chemotoxische Stoffe in den Einlagerungsbereichen der Schachanlage Asse mit radioaktiven Abfällen und Versatzstoffen – Abschlussbericht November 2006, GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit Forschungsbergwerk Asse.

8. B. KIENZLER, u.a. „Langzeit Auslaug- und Korrosionsexperimente an zementierten 1:1 Gebinden in der Schachanlage Asse – Probenahme und Auswertung“ 2003, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7059, Oktober 2004.

9. E. SMAILOS, W. DIEFENBACHER, E. KORTHAUS, W. COMPER, „Berechnungen zur Radiolysegasbildung und Wärmeentwicklung bei der Einlagerung von radioaktiven Bitumen- und Zementprodukten in unterirdischen Lagerräumen“, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2076, März 1978.

10. G. BRACKE, W. MÜLLER, „Realistische und maximale Gasbildung in der Schachanlage Asse“, ISTec - A - 979, Juli 2005.

11. K. L. CASHDOLLAR u.a. „Laboratory Flammability Studies of Mixtures of Hydrogen, Nitrous Oxide, and Air“, WHC-WM-ES-219, Rev. Westinghouse Hanford Company, Richland Washington, 1992.

12. W. K. HOLLIS, K. VELARDE u.a. „Gas generation from contact of radioactive waste and brine“, J. Radioanalytical and Nuclear Chem., Vol. 235, 235-

239, Nos 1 – 2 (1998).

13. K. LIEKHUS, I. ZLO-CHOWER, S. DJORDJEVIC, C. LOEHR, „Predicting Flammability of Gas Mixtures containing volatile organic Compounds“, NIOSHTIC-2 No. 20020734 (2000)

14. RSK-Stellungnahme „Gase im Endlager“, Kap. 6.2 „Druckaufbau durch Gasbildung“, 379. Sitzung (2005).

15. LaVERNE J. A. „Hazardous and Corrosive Gas Production in the Radiolysis of Water/Organic Mixtures in Model TRU Waste“, Project 90107, University of Notre Dame, Pacificchem (2006)

16. STAUFFER D., A. AHARONNY, „Perkolationstheorie eine Einführung“, VCH-Verlag, Weinheim (1995).

17. M. KELM, E. BOHNERT, „A Kinetic Model for the Radiolysis of Chloride Brine, Its Sensitivity against Model Parameters and a Comparison with Experiments“, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6977, Forschungszentrum Karlsruhe, April 2004.

18. B. BUCHHEIM, H. von FELLEBERG, D. ROHR, „Ermittlung von Art und Menge Chemotoxischer Stoffe in allen Arten Radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes – CHEMISCHER ABBAU ODER AUFBAU CHEMOTOXISCHER ORGANISCHER STOFFE IN RADIOAKTIVEN ABFÄLLEN – ANHANG F – Bundesamt für Strahlenschutz BfS (2005).

19. H. FRÖHLICH u.a., „Durchlässigkeit von Steinsalzversatz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von zeitlich veränderlichen Überlagerungsdrücken und Lösungsvermögen“, Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Förderkennzeichen: 02E 8876 und 02E 8886, (1999).

20. A. V. BJALOBZESKIJ, „Korrosion durch Radioaktive Strahlung“, Akademie-Verlag, Berlin, (1971).

21. K. J. EULER (Hsg.), „Energie-Direktumwandlung“, Verlag Thiemig, München (1967).

22. Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe, „Untersuchungen zur Sicherheit von Endlagern für radioaktive Stoffe nach ihrem Verschluß“, BMU - 2003 - 618, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (2003).

23. G. FÖLDIAK, „Radiation Chemistry of Hydrocarbons“ Theoretical Foundations of Ra-

diation Chemistry, Elsevier Scientific Publishing Company (1981).

\* Prof. Dr. Rolf Bertram, bertramrolf@aol.com, Physiker, Prof. em. am Institut für

Physikalische und Theoretische Chemie der TU Braunschweig. Bertram ist Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates von Attac-Deutschland, Mitglied des wissenschaftli-

chen Beirates der Arbeitsgemeinschaft Schacht Konrad e.V. und Mitglied der Begleitgruppe Asse-II sowie der Arbeitsgruppe Optionenvergleich der Bundesministerien

für Bildung und Forschung (BMBF) sowie für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). ●

## Atommüll-Transporte

# „Einmal in 10 Millionen Jahren“ erwartet die GRS einen größeren Transportunfall zum Lager Konrad

## Transportstudie Konrad 2009 veröffentlicht

Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) in Köln hat eine neue „Transportstudie Konrad 2009“ veröffentlicht, die die möglichen radiologischen Auswirkungen von Transporten radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zum Endlager Konrad bei Salzgitter untersucht und bewertet. Die mit Mitteln des Bundesumweltministeriums geförderte Studie kommt zu dem Ergebnis, daß diese Transporte zu keinem relevanten radiologischen Risiko für Mensch und Umwelt führen.

Die Untersuchungen der GRS betrachten die Szenarien eines normalen, unfallfreien Transports und das eines Transportunfalls. In dem Szenario des unfallfreien Transports wurde dabei für die in der betrachteten Region lebende und arbeitende Bevölkerung eine Strahlenexposition von maximal 0,02 Millisievert pro Jahr (mSv/a) effektive Dosis abgeschätzt. Gemessen an der natürlichen Strahlenexposition von durchschnittlich 2,1 mSv/a und dem gesetzlichen Grenzwert von 1 mSv/a sei das sehr gering, meint man bei der GRS. Für die mit dem Transport befaßten Arbeitskräfte wie Rangierer, Lokführer und LKW-Fahrer werden Werte von maximal 0,1 bis 0,6 mSv/a erwartet. Aufgrund

dieser niedrigen Werte sei eine Einstufung des Transportpersonals als beruflich strahlenexponierte Personen nach der Strahlenschutzverordnung im Zusammenhang mit den Transporten zum Endlager Konrad in der Regel nicht erforderlich, heißt es. Der gesetzliche Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen liegt bei 20 mSv/a.

Um das Risiko von Unfällen abzuschätzen, hat die GRS eine probabilistische Transportunfallrisikoanalyse durchgeführt. Wesentliche Einflussgrößen sind hierbei – gemessen an allgemeinen Unfallstatistiken – Häufigkeit und Schwere von Unfällen, die Eigenschaften von Abfällen und Transportbehältern sowie die Bedingungen der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre, wird erklärt. Bei derzeit 50 Transporten wöchentlich und 2.300 im Jahr erwartet man bei der GRS statistisch einmal in 260 Jahren einen Transportunfall, bei dem Radioaktivität in die Umwelt gelangt. In 99 von 100 Fällen soll dabei die berechnete effektive Dosis unter 0,3 mSv liegen. Eine Strahlenexposition von maximal 8 mSv wird einmal in 10 Millionen Jahren erwartet. Bei der Berechnung dieser Werte wurde angenommen, daß eine betroffene Person über einen

Zeitraum von 50 Jahren und in einem Abstand von 150 Metern den durch den Unfall freigesetzten radioaktiven Stoffen ausgesetzt ist, ohne daß Gegenmaßnahmen, wie Dekontamination oder Verzehverbote ergriffen wurden, wird erklärt.

Grundlage der Berechnungen bilden die zum Zeitpunkt der Studie erfaßten radioaktiven Abfälle, die für die Einlagerung im Endlager Konrad vorgesehen sind. Sie weisen ein Volumen von rund 110.000 Kubikmeter auf. Dies entspricht in etwa der Menge, die innerhalb eines zehnjährigen Zeitraums angeliefert und eingelagert werden kann, umfaßt aber noch nicht zusätzliche Abfälle, die möglicherweise aus dem havarierten Lager Asse hinzukommen sollen. 56 Prozent der bisher betrachteten Abfälle sollen aus der Forschung stammen, 41 Prozent aus Betrieb und Stilllegung von Atomkraftwerken sowie der kerntechnischen Industrie und die restlichen drei Prozent aus Technik und Medizin.

Rund 20 Prozent der gesamten radioaktiven Abfälle sollen über die Straße und etwa 80 Prozent mit dem normalen Güterverkehr über die Schiene angeliefert werden.

Erstmals hatte die GRS 1991 eine Transportstudie zum Endlager Konrad durchgeführt. Da sich der Stand der Datenerhebungen und von Wissenschaft und Technik zwischenzeitlich weiterentwickelt habe, sei eine Überarbeitung der Studie vor dem Hintergrund des aktuellen Planungs- und Erkenntnisstandes notwendig gewesen, wird erklärt.

Sentuc, F.-N., W. Brücher et al.: Transportstudie Konrad 2009, Si-

cherheitsanalyse zur Beförderung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad, GRS-256, Dez. 2009, [www.grs.de/module/layout\\_upload/transportstudie\\_konrad\\_2009\\_final\\_online.pdf](http://www.grs.de/module/layout_upload/transportstudie_konrad_2009_final_online.pdf) ●

## Atomwirtschaft

# Uranhexafluorid

In Deutschland lagern derzeit in der Urananreicherungsanlage Gronau circa 4.700 Tonnen Uranhexafluorid (UF<sub>6</sub>). Diese Menge nennt die Bundesregierung in einer Antwort (Bundestagsdrucksache 17/253 vom 16.12.2009) auf eine Kleinen Anfrage von Bündnis 90/Die Grünen über die Lagerung und Sicherung von Uranhexafluorid. Den Urandurchsatz in der Anlage Gronau schätzt die Bundesregierung für das Jahr 2009 auf rund 4.550 Tonnen, nach jeweils 4.450 Tonnen in den beiden Jahren zuvor. In ihrer Anfrage hatten sich die Grünen zudem danach erkundigt, weshalb Uranhexafluorid als „Wertstoff“ und nicht als Atommüll eingestuft werde. Mit dem Verweis auf das Atomgesetz (AtG) schreibt die Regierung, daß es sich bei mit Uran-235 angereichertem UF<sub>6</sub> um einen Kernbrennstoff handle. UF<sub>6</sub> mit natürlicher Isotopenzusammensetzung und an Uran-235 abgereichertem UF<sub>6</sub> werde hingegen als sonstiger radioaktiver Stoff klassifiziert. (Vergl. Strahlentelex 550-551 v. 3.12.2009, S.8, [www.strahlentelex.de/Stx\\_09\\_550\\_S06-08.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_09_550_S06-08.pdf)). Uranhexafluorid ist leicht flüchtig und kann mit Wasser (Luftfeuchtigkeit) heftig zu Flußsäure reagieren. Damit ist es eine potentielle Gefahr für die örtliche Bevölkerung. ●