

Leukämie von Kindern und Adoleszenten in Niederzier

Vorwort zur 2. durchgesehenen Auflage

Die 1. Fassung dieses Beitrags wurde 1994 für die Einwohner der Gemeinde Niederzier verfasst, die wegen einer Häufung von Leukämien bei Kindern und Adoleszenten in ihrer Wohngemeinde Kontakt aufgenommen hatten.

Diese 2. Auflage wird 2025 für die Website des Autors mit der aktuellen Rechtschreibung verfasst.

Ausgangssituation

Von Einwohnern der Gemeinde Niederzier wird eine Häufung von Leukämien bei Kindern und Adoleszenten in ihrer Wohngemeinde berichtet. Im Folgenden soll eine erste Bewertung versucht werden. Tab. 1 gibt eine Übersicht über wichtige Daten zu den Erkrankungsfällen. Alle Erkrankten sind männlichen Geschlechts und sind an einer akuten lymphatischen Leukämie erkrankt.

Tab. 1: Erkrankungsfälle an akuter lymphatischer Leukämie in der Großgemeinde Niederzier, historisch nach Diagnosejahr geordnet,

Alter bei Diagnose¹

OT Ortsteil

N Niederzier

S Stammeln in Huchem-Stammeln

seit Datum bei Zuzug, wenn nicht ortsansässig

E Zuzug der Eltern

V Zuzug des Vaters

M Zuzug der Mutter

Med. Medizinische Strahlenbelastung mehr als zwei Jahren vor der Diagnose

KFA Entfernung zur Kernforschungsanlage Jülich (Mitte) in Metern, gerundet auf 100 m

U Entfernung zum Umspannwerk (Mitte), gerundet auf 100 m

Anm Anmerkung zu anderen Belastungen

Jahr	Alter	Ort	seit	Med.	KFA	U	Anm.
1990	5	N	1981 E	Schädel 2*	4700	900	Zeit der Rö?, Diagnose 3/90
1990	15	N	1975 E	keine	4800	800	2a Aufenthalt in Arnoldsweiler (ca. 10 km vom KFA)
1991	12	S	1979 M	keine	6000	1600	Füße 90, Kiefer 2*, Hand 11/91. Diagnose 12/91
1992	6	N	1984 V	keine	3800	1600	Nase 2* 8/91, Hüfte 2*4/92, Diagnose 10/92

Bei dem Umspannwerk handelt es sich um eine der größten Anlagen Europas. Die Wohnhäuser der erkrankten Kinder sind von den Hochspannungsleitungen selbst nicht unmittelbar betroffen. Etwa

¹ Ein in einer ersten Aufstellung dem Jahr 1991 zugeordnetes Kind von 3 Jahren hatte keine Leukämie, wie ursprünglich angenommen, sondern Nierenkrebs.

12 km im SW liegt Weißweiler mit einem Braunkohlekraftwerk. Viele Einheimische beziehen als Werksangehörige der „Reinbraun“ Braunkohlebriketts. Die Eltern der Kinder 1 und 2 klagen über Belästigung durch Rauch der privaten Kohleöfen. Im Osten grenzt der Ortsteil Niederzier an den Braunkohletagebau Hambach. Der Rand der Abbaugebietes liegt etwa 1.200-1.500 m östlich der Wohnhäuser der Kinder aus dem Ortsteil Niederzier. Ein Erdbeer Großproduzent im Ort spritzt sehr häufig seine Kulturen. Der Vater des Kindes 4 ist von Beruf Spritzlackierer.

Nur die Eltern des Kindes 3 versorgen sich mit Eiern freilaufender Hühner selbst.

Für die Kalkulation der zu erwartenden Fallhäufigkeit wird für die betreffenden Gemeinden die Anzahl der Kinder in den jeweiligen Altersklassen benötigt, die in den fraglichen Jahren in der Gemeinde gelebt haben (siehe Tab 2).

Tab. 2: In den Ortsteilen Niederzier (N) und Huchem-Stammeln (HS) wohnende Kinder unter 15 und 20 Jahren
(Quelle: Kreisverwaltung Düren).

	Kinder <15				Kinder <20			
	1990	1991	1992	1990-1992	1990	1991	1992	1990-1992
OT								
N	577	566	578	1721	764	764	774	2302
HS	708	720	751	2179	918	946	970	2834
Σ	1285	1286	1329	3900	1682	1710	1744	5136

Beurteilung

Zur Abschätzung der zu erwartenden Krankheitsfälle wurde so vorgegangen, dass die Zahl eher zu hoch als zu niedrig gegriffen ist. Der zeitliche Verlauf der im Kinderkrebsregister Mainz registrierten Fälle an Leukämie bei Kindern zeigt nach Keller et al. [1992] eine leichte Zunahme, die auf eine zunehmend bessere Erfassung seit Gründung des Registers im Jahr 1980 zurückgeführt wird. Durch die Inzidenzen wurde hier eine lineare Regression gerechnet und für die Jahre 1990 bis 1992 so die zu erwartenden mittleren Inzidenzen abgeschätzt. Diese nehmen mit den Jahren also weiter zu, obwohl denkbar ist, dass die Erfassungsquote eine Sättigungstendenz erkennen lassen müsste. Die Region Niederzier kann nach Keller et al. den Hochverdichtungsräumen zugeordnet werden., in der 97,7 % der durchschnittlichen Inzidenz der Bundesrepublik (alte Länder) beobachtet worden war. Tab. 3 zeigt die Resultate für die Abschätzung der Inzidenzen.

Die Inzidenz für die Altersgruppe der Kinder und Adoleszenten unter 20 Jahren wurde aus dem Krebsregister des Saarlandes mit 88,4 % der Altersgruppe der Kinder unter 15 Jahren auf die so ermittelten Inzidenzen übertragen.

Mit diesen Resultaten wird der Erwartungswert für die Fallzahlen an akuter Leukämie in den Ortsteilen Niederzier, Huchem-Stammeln abgeschätzt (s. Tab 4).

Tab. 3: Abschätzung der Inzidenzen an akuter Leukämie im Verlauf der Jahre 1990 bis 1992 für die Bundesrepublik Deutschland (Alte Länder) „ALD“ aufgrund des Verlaufs 1980 bis 1990 und für Niederzier unter Anwendung des Verhältnisses „hochverdichtetes Umland in Regionen mit großen Verdichtungsräumen“ (h.v.Uml.) zu „ALD“ mit 97,73%. Angabe als Neuerkrankung pro Jahr und 100.000 Kinder unter 15 Jahren.

	1990	1991	1992	1990-1992
ALD	4,45	4,52	4,59	4,52
Niederzier	4,34	4,42	4,49	4,42

Tab. 4: Abschätzung der Anzahl erwarteter Erkrankungsfälle an akuter Leukämie in den Ortsteilen Niederzier (N) und Huchem- Stammeln (HS) und beiden zusammen.

	Kinder <15				Kinder <20			
	1990	1991	1992	1990-1992	1990	1991	1992	1990-1992
OT								
N	0,025	0,025	0,026	0,076	0,029	0,030	0,031	0,090
HS	0,031	0,032	0,034	0,096	0,035	0,037	0,039	0,111
beise	0,056	0,067	0,06	0,172	0,065	0,067	0,069	0,201

Tab. 5 stellt dem die beobachteten Häufigkeiten gegenüber, Es ist zu erkennen, dass bereits das Auftreten eines Falles im Ortsteil Niederzier ungewöhnlich ist, natürlich ohne statistische Aussagekraft. Durch die Wiederholung in drei aufeinanderfolgenden Jahren wird das Phänomen bedeutsamer. Es verträgt sogar die „Verdünnung“ mit dem benachbarten Ortsteil Huchem- Stammeln und mit den Adoleszenten bis unter 20 Jahren, wodurch die gesamte Fallzahl auf vier zunimmt und damit das statistische Gewicht vergrößert wird. Die einseitige statistische Prüfung ist angezeigt, da die Leukämieinzidenz durch einen Einflussfaktor nur zunehmen kann.

Tab. 5: Anzahl der beobachteten Erkrankungsfälle an akuter Leukämie in den Ortsteilen Niederzier (N) und Huchem- Stammeln (HS) und beiden zusammen.

	Kinder <15				Kinder <20			
	1990	1991	1992	1990-1992	1990	1991	1992	1990-1992
OT								
N	1	0	1	2	2	0	1	3
HS	0	1	0	1	0	1	0	1
beide	1	1	1	3	2	1	1	4

Das Verhältnis der beobachteten zu den erwarteten Erkrankungsfällen zeigt in der Gruppe der Kinder und Adoleszenten unter 20 Jahren über den Zeitraum drei aufeinanderfolgender Jahre 1990 bis 1992 eine Erhöhung um etwas das Zwanzigfache (s. Tab. 6), ein statistisch hochsignifikanter

Befund. Die Berechnung von p erfolgte nach der Methode nach Traut² [Traut 1980, Traut und Scheid 1992].

Tab. 6: Verhältnis der beobachteten zu der erwarteten Häufigkeit von Erkrankungen an akuter Leukämie in den Ortsteilen Niederzier (N) und Huchem- Stammeln (HS) und beiden zusammen.

	Kinder <15				Kinder <20			
	1990	1991	1992	1990-1992	1990	1991	1992	1990-1992
OT								
N	39,9	0	38,5	26,3	68,1	0	32,5	33,4
p	0,02		0,03	0,003	0,004		0,03	0,001
HS	0	31,4	0	10,4	0	27,1	0	9
p		0,03		0,09		0,04		0,11
beide	17,9	17,6	16,8	17,4	30,9	15,0	14,4	19,9
p	0,05	0,06	0,06	0,008	0,002	0,007	0,07	0,00006

Vergleich mit dem Kinderkrebsregister

Bei dem naheliegenden Vergleich mit den Erhebungen der Arbeitsgruppe um Michaelis [Keller et al. 1992] ist zu beachten, dass die Gemeinde Niederzier dort der Entfernungszone 5-10 km zugeordnet worden war. Die Problematik dieser Zuordnung auf der Ebene von Großgemeinden ist daran zu erkennen, dass drei der hier aufgeführten vier Fälle weniger als 5 km von der KFA Jülich entfernt wohnen.

Aus Mainz wurden für den Zeitraum 1980 bis 1990 in der betreffenden Zone vier Erkrankungen an akuter Leukämie berichtet. Eine Überprüfung des Registers ergab, dass darunter (fälschlich wegen der grundsätzlichen Beschränkung des Registers auf Kinder unter 15 Jahren) für den Zeitraum 1990 auch das Kind mit dem Erkrankungsalter von 15 Jahren erfasst worden war. 1994 stellt sich das Bild so dar: In Titz (nördliche Nachbargemeinde in der Entfernungszone 5-10 km) fanden sich 1994, 1986 und 1990 je eine Erkrankung (bei einem Erwartungswert von etwa 0,05/Jahr) [Haaf und Michaelis 1993b]. In der Bilanz bleibt es also bei vier Erkrankungen im Zeitraum 1980-1990 in der Entfernungszone 5-10 km. In Titz wurde eine weitere Erkrankung bis 1992 registriert. Mit den drei Fällen in Niederzier ergeben sich also für die gesamte Entfernungszone 5-10 km im Zeitraum 1990-1993 fünf Fälle, alle in diesen beiden Gemeinden. In der dritten Gemeinde der Region, Aldenhoven im Westen der Atomanlage, war seit 1980 bis 1992 bei einem Erwartungswert von etwa 1,12 keine Erkrankung registriert worden. (Die Erwartungswerte sind einem Bericht des Kinderkrebsregisters IMSD (heute DKKR) entnommen und leiten sich aus einer Vergleichsinzidenz für 1982-1991 von 4,2/100.000 in der alten Ländern der Bundesrepublik Deutschland ab [Haaf, Michaelis 1993a]. Auch bei Betrachtung für die Zeit von 1990-1993 der gesamten Region 5-10 km stehen 0,73 erwarteten fünf beobachtete Fälle gegenüber, ein mit $p = 0,0009$ hochsignifikanter Befund. Nicht uninteressant ist, dass auch noch in der nächsten Entfernungszone 10-15 km mit zehn Fällen bei

² Herrn Traut danke ich für den Hinweis, dass für die Signifikanzprüfung seltener Ereignisse in einer großen, im Umfang bekannten Stichprobe wie kindlicher Leukämie, im Vergleich zu einem aus noch größeren Kollektiv gewonnenen Referenzwert dieselbe Methode angewendet werden kann, wie sie von ihm für die Signifikanzprüfung vermehrter Chromosomenaberrationen, ebenfalls seltene Ereignisse in einer relativ großen Stichprobe untersuchter Metaphasen entwickelt worden ist.

5,16 erwarteten sich in diesem Zeitraum eine mit $p = 0,038$ signifikante Fallhäufung findet. Die Signifikanz bleibt mit einem $p = 0,0038$ auch bei einer Zusammenfassung der gesamten 15 km-Region um die Atomanlage bestehen. Wobei den 15 Fällen eine Fallerwartung von 6,68 gegenübersteht, insgesamt also eine signifikante Verdopplung der Erkrankungsfälle.

Für das Zeitfenster 1983-1992 verträgt die Fallhäufung in den beiden Ortschaften Titz und Niederzier nicht nur die „Verdünnung“ auf die gesamte Region 5-10 km, sondern auch auf den Zeitraum von zehn Jahren. Sieben beobachtete Fälle stehen einem Erwartungswert von 2,31 gegenüber, ein mit $p = 0,01$ signifikanter Befund. Erst bei Betrachtung der gesamten Region bis 15 km über diesen Zeitraum geht die statistische Signifikanz verloren.

Die Schlussfolgerungen liegen nahe: Es muss eine Ursachenforschung angeschlossen werden. Es ist zu vermuten, dass von den zahlreichen belastenden Faktoren in der Umgebung diejenigen, die über lange Zeit einwirken, für das zeitliche Cluster weniger in Frage kommen. Sie sind allerdings als Promotionsfaktoren denkbar. Falls als Ursache ionisierende Strahlen in Betracht gezogen werden, muss neben einer höheren Strahlenempfindlichkeit von Kindern eine Freisetzung von Radioaktivität angenommen werden.

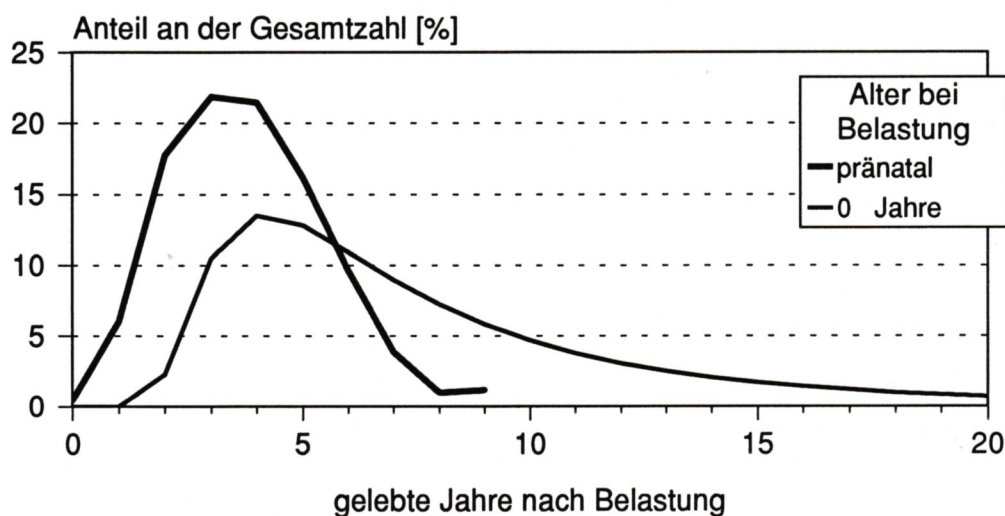
Eine frühestmögliche gemeinsame Belastung, deren Zeitpunkt durch Kind 4 (Alter sechs Jahre bei Erkrankung im Oktober 1992) bestimmt wird, müsste bei Einwirkung nach seiner Geburt in den Herbst 1986 datiert werden, bei einer teilweisen Belastung in der Schwangerschaft kann das gesamte Jahr 1986 in Frage kommen. Schließlich ist nach den Befunden von Gardner et al [1990], Roman et al. [1993] sowie Sorahan und Roberts [1993] eine Häufung kindlicher Leukämien auch nach einer Strahlenbelastung der Eltern, insbesondere durch Inkorporation von Radioaktivität, als Ursache denkbar.

Bei einer Strahlenbelastung im frühen Kindesalter liegt der Häufigkeitsgipfel der Todesfälle an akuter Leukämie etwas vier bis fünf Jahre nach der Belastung (s. Abb. 1). Bei einer pränatalen Belastung noch davor. Über den Zeitverlauf nach Belastung der Eltern liegen noch keine Daten vor.

In drei aufeinanderfolgenden Jahren treten im Häufigkeitsgipfel, den bei einer Belastung im Jahr 1985 auch das Kind mit dem frühesten Erkrankungsjahr 1990 schon erreicht haben kann, etwa ein Drittel der insgesamt ausgelösten Erkrankungen auf. Nach einem solchen hypothetischen Ereignis wären dann innerhalb von insgesamt zwei bis drei Jahrzehnten etwa 12 zusätzliche Erkrankungen zu erwarten.

Nach intensiven Untersuchungen der Region auf vorhandene Strahlenbelastungen muss auch an eine Belastung durch flüchtige und/oder kurzlebige radioaktive Stoffe gedacht werden, die sich 1994 dem Nachweis durch Messung entziehen und die bei einer Freisetzung möglicherweise wegen der durch Tschernobyl erhöhten Umweltradioaktivität nicht aufgefallen sind. Deshalb muss in der Umgebung der erkrankten Kinder, z. B. mit der biologischen Dosimetrie (Chromosomenanalyse), nach Spuren einer Strahlenbelastung geforscht werden.

Akute Leukämie nach Strahlenbelastung



Daten nach NIH 85-2748 und Stewart

Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der Häufung von akuter Leukämie nach einer Strahlenbelastung eines Kindes im Säuglingsalter

[NIH 1985] und während der Schwangerschaft [Stewart, Kneale 1970]

Hinzuweisen ist auch auf den Befund in der Studie aus Mainz, die in den sog. Planungsregionen in der Gesamtzone bis 15 km sowohl für die akute Leukämie der Kinder unter 15 Jahren als auch der Kinder unter 5 Jahren eine signifikante Häufung bei der Kontrastierung mit den Vergleichsregionen gefunden hatte. Unter den fünf Planungsregionen befand sich auch die Region um Borken, Standort eines ausgedehnten Braunkohleabbaus und eines konventionellen, mit Braunkohle betriebenen Elektrizitätswerkes. Dort zeigte sich ebenfalls eine Häufung kindlicher Leukämien.

Abschließend ist noch einmal auf den ungewöhnlichen, bei der kleinen Fallzahl statistisch allerdings nicht belastbaren Umstand hinzuweisen, dass alle Erkrankten männlichen Geschlechts sind. Das Geschlechterverhältnis bei der akuten Leukämie zeigt normalerweise eine höhere Betroffenheit des männlichen Geschlechts von etwa 55 % in den ersten Lebensjahren und nimmt auf Werte von über 60% im zweiten Lebensjahrzehnt zu. Über eine signifikante Häufung von Leukämie bei männlichen Kindern berichteten auch Grosche et al. [1987] im Radius von 5 km um den Forschungsreaktor Garching. Eine mit 90%-Vertrauenswahrscheinlichkeit nicht signifikante Häufung von Leukämie ebenfalls von männlichen Kindern fanden sie im Radius von 10 km um den Forschungsreaktor Neuherberg. Die Mainzer Studie macht zum Geschlechterverhältnis keine Angaben. Das Cluster in der Elbmarsch zeigte ebenso wie die Häufung um Ellweiler keine auffällige Geschlechterverteilung.

Zusammenfassung

Für die Jahre 1990-1992 werden aus den Ortsteilen Niederzier und Huchem-Stammeln der Gemeinde Niederzier, etwa 5 km südöstlich der Kernforschungsanlage Jülich gelegen, vier Erkrankungen an akuter Leukämie von Kindern und Adoleszenten unter 20 Jahren berichtet. Eine erste Analyse spricht für ein statistisch hochsignifikantes zeitliches und örtliches Cluster, das sich in die nördlich Nachbargemeinde Titz erstreckt. Der Befund verlangt nach weiteren Erhebungen und einer Ursachenforschung.

Quellen

1. Gardner, M.J., Snee, M.P., Hall, A.J., Powell, A.J., Downes, S., Terell, J.D.: Results of Case-Control Study of Leukaemia and Lymphoma among Young People near Sellafield Nuclear Plant in West Cumbria, *BMJ* 300 (1990), 423-429
2. Grosche, B., Hinz, G., Tsavachidis, C., Kaul, A.: Analyse der Leukämiemorbidity in Bayern in den Jahren 1976-1981, Bayer. Staatsmin. f. Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.): Materialien 41, 1987
3. Haaf, H.G., Michaelis, J.: Analyse der Erkrankungsrate für kindliche Malignome in der Gemeinde Niederzier, im Landkreis Düren sowie in der Umgebung der Kernforschungsanlage Jülich, *IMSD*, Manuskript 8/4/1993, 1993a
4. Haaf, H.G., Michaelis, J.: Letter to Public Health Office Düren, 8/6/93, 1993b
5. Ishimaru, M., Ishimaru, T., Belsky, J.L., Tomiyasu, T., Sadamori, N., Hishino, T., Tomonaga, M., Shimizu, N., Okada, H.: Incidence of Leukemia in Atomic Bomb Survivors, Hiroshima & Nagasaki, 1950 - 71, by Radiation Dose, Years after Exposure, Age, & Type of Leukemia, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Technical Report Series, RERF TR 10-76, 1976
6. Keller, B., Haaf, G., Kaatsch, P., Michaelis, J.: Untersuchung der Häufigkeit von Krebserkrankungen im Kindesalter in der Umgebung westdeutscher kerntechnischer Anlagen 1980-1990, *IMSD - Technischer Bericht*, Mainz, 1992
7. Möhner, M., Stabenow, R.: Childhood Malignancies around Nuclear Installations in the Former GDR, *Medizinische Forschung* 6 (1993), 59-67
8. Roman, E., Watson, A., Beral, V., Buckle, S., Bull, D., Baker, K., Ryder, H.: Case-control Study of Leukaemia and Non-Hodgkin's Lymphoma among Children aged 0-4 Years Living in West Berkshire and North Hampshire Health Districts, *BMJ* 306 (1993), 615-621
9. Sorahan, T., Roberts, P.J.: Childhood Cancer and Paternal Exposure to Ionizing Radiation: Preliminary Findings From the Oxford Survey of Childhood Cancers, *Amer. J. Ind. Med.* 23 (1993), 343-354
10. Traut, H.: A Method for Determining the Statistical Significance of Mutation Frequencies, *Biom. J.* 22 (1980), 73-78

Nachwort

1. Am 19.01.1994 fand aus Anlass der Erkrankungsfälle in Niederzier 1990-1992 um 19 Uhr auf Einladung des Gesundheitsamtes Düren eine öffentliche Podiumsdiskussion zum Thema „Leukämie - schicksalhafte oder vermeidbare Erkrankung?“ statt, zu der auch der Autor dieses Beitrags eingeladen wurde.

2. Auf diesen Beitrag wurde in einer Publikation zweier Mitarbeiter der Kernforschungsanlage Jülich verwiesen. Sie wird deshalb im Folgenden im Wortlaut wiedergegeben (offenkundige Tippfehler wurden korrigiert):

Kugelhaufenreaktoren – Status nach Erscheinen einer unabhängigen Expertenstudie zum AVR Jülich

Rainer Moormann, Aachen und Jürgen Streich, Frechen-Königsdorf

Nach dreijähriger Arbeit erschien Ende April 2014 ein Bericht unabhängiger Experten zum Kugelhaufenreaktor AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor) (Jülich), welcher in wesentlichen Punkten die seit 2006 geäußerten Vermutungen über verheimlichte schwere Zwischenfälle und Probleme bestätigt und Zweifel am Kugelhaufenreaktorkonzept artikuliert. Die Vorgeschichte dieses Expertenberichtes und seine wichtigsten Ergebnisse werden hier dargestellt und Schlussfolgerungen diskutiert. Die durch diesen Expertenbericht verursachte Diskussion veranlasste das Forschungszentrum Jülich (FZJ) am 14. Mai 2014, die Einstellung der noch laufenden Arbeiten zu Kugelhaufenreaktoren und der Unterstützung des chinesischen Kugelhaufenreaktorprojektes anzukündigen.

Hintergrund

Der AVR war der erste Kugelhaufenreaktor, ein Versuchs-AKW von 15 MW elektrischer Nettoleistung. Kugelhaufenreaktoren, die zu den **Hochtemperaturreaktoren (HTR)** gehören, gelten noch vielfach als ein in Deutschland erfundenes AKW-Konzept; tatsächlich wurden sie jedoch schon in den 1940er Jahren in den USA erdacht /7/, dort aber bald zugunsten von **Leichtwasserreaktoren (LWR)** aufgegeben. Der AVR, der viel Ähnlichkeit zu dem von Farrington Daniels 1945 zum US-Patent angemeldeten *pebble bed reactor* /7/ aufweist, wurde in Nachbarschaft zum FZJ von BBC/Krupp in den Jahren 1960-66 gebaut und von einem Konsortium aus diversen kleineren und mittelgroßen Elektrizitätsversorgern von 1967-88 betrieben. Das FZJ betreute das Projekt wissenschaftlich und glich die beim Betrieb entstehenden finanziellen Defizite, wie später bekannt wurde, größtenteils aus. Ursprünglich war ein AVR-Betrieb nur für wenige Jahre vorgesehen, um die Machbarkeit einer Energieerzeugung mit Kugelhaufenreaktoren zu demonstrieren. Da sich aber der Nachfolgereaktor THTR-300 (Hamm) um mehr als 10 Jahre verzögerte und schon in der Inbetriebnahmephase schwerste Probleme zeigte, wurde der AVR-Betrieb erheblich verlängert. Das wurde u.a. damit gerechtfertigt, dass der AVR als Prototypreaktor für die ab 1980 entwickelten kleinen modularen Kugelhaufenreaktoren zur Verfügung stehen müsse. Da der Rückbau ab 1989 außergewöhnliche Schwierigkeiten bereitete und der Bundesrechnungshof wegen enormen Kostensteigerungen (1989 geplant: 39 Mio DM, bis heute verbraucht: ca. 700 Mio €; heute geschätzte Gesamtentsorgungskosten: 1,5 bis 2 Mrd €) ein warnendes Gutachten verfasste, wurde der AVR 2003 vollständig von der öffentlichen Hand übernommen: Das FZJ übernahm die Verantwortung für die Brennelemente, die bundeseigenen **Energiewerke Nord (EWN)** den Reaktor. Die Entsorgungskosten, denen nur geringe Rückstellungen gegenüberstanden, hätten die früheren Betreiber weit überfordert.

Eine Beschreibung des Reaktors mit Abbildungen findet sich in Kapitel 3 von /1/, daher soll hier nur kurz auf den Aufbau eingegangen werden. Der Reaktorkern bestand aus ca. 100.000 tennisballgroßen Brennelementen, welche ihrerseits je ca. 10.000 beschichtete Brennstoffteilchen

(coated particles, Durchmesser ca. 0,9 mm) eingebettet in Graphit enthielten. Im Unterschied zu normalen Reaktor Brennelementen bilden Moderator (Graphit) und Brennstoff hier also eine Einheit, was das Abfallvolumen der Brennelemente sehr stark vergrößert. Gekühlt werden Kugelhaufenreaktoren nicht mit Wasser, das in Standardreaktoren als Kühlmittel und Moderator dient, sondern mit dem Edelgas Helium. Im Sekundärkreis, der die Turbine enthält, befindet sich aber Wasser bzw. Dampf unter hohem Druck. Ein Dampferzeuger, welcher über dem Kern angeordnet ist, übergibt die Wärme des Primärkühlmittels Helium an das Sekundärkühlmittel Wasser. Die Brennelemente werden über dem Kern an verschiedenen Positionen zugegeben und wandern langsam (4 Monate bis über 5 Jahre) aufgrund der Schwerkraft durch den Reaktor. Wenn sie unten angekommen verbraucht sind, werden sie entnommen, ansonsten oben wieder zurückgegeben. Ab 1974 wurde die Kühlmitteltemperatur des AVR auf 950°C angehoben, um die prinzipielle Eignung für Kohlevergasung (nukleare Prozesswärme) nachzuweisen.

Das Störfallspektrum eines Kugelhaufenreaktors unterscheidet sich wesentlich von demjenigen eines LWR und weist einige Ähnlichkeiten zu dem vom RBMK (Tschernobyl-Typ, ebenfalls graphitmoderiert) auf. Nicht Kühlmittelverlust oder Kühlungsausfall mit Kernschmelze bestimmen das Risiko, sondern Lufteinbruch mit Graphitbrand nach Leckagen und Wassereinbruch durch Lecks im Dampferzeuger: Wassereinbruch kann zu nuklearen Instabilitäten (Durchgehen des Reaktors) und durch chemische Reaktionen des Wasserdampfs mit dem Graphit bei höheren Temperaturen zur Bildung explosionsfähiger Gasgemische führen - beides mit Potential zur Zerstörung des Reaktors. Wassereinbrüche sind als Auslegungsstörfälle (früher GaU) von Kugelhaufenreaktoren definiert, d.h. die Beherrschbarkeit bestimmter Sequenzen von Wassereinbrüchen ist der Aufsichtsbehörde im Genehmigungsverfahren sowie bei jeder größeren Änderung des Betriebszustandes nachzuweisen. Von einigen Befürwortern des Kugelhaufenreaktors werden das Ausbleiben einer Kernschmelze und die Selbstabschaltung bei Temperatursteigerung immer noch als Beweis für seine „Katastrophenfreiheit“ propagiert, nicht ohne einen gewissen Erfolg in der öffentlichen Diskussion damit zu erzielen. Allerdings wiesen schon 1977 LWR-Vertreter darauf hin, dass der Kugelhaufenreaktor „andere schwere Störfälle kennt als der LWR“ und die angeblich generell höhere Sicherheit damit in Zweifel zu ziehen ist. Lothar Hahn, einer der Autoren des AVR-Expertenberichts, schrieb schon 1986: „Seit den Anfängen der Hochtemperaturreaktor-Entwicklung wird von interessierter Seite versucht, der Öffentlichkeit zu suggerieren, der HTR sei "inhärent" sicher. Diese geschickt eingefädelte Werbestrategie hat ohne Zweifel einen gewissen Erfolg gehabt, denn sie hat zu einer – selbst in der Atomenergiedebatte – beispiellosen Desinformation geführt. Wie kaum eine andere Behauptung der Atomindustrie beruht sie auf wissenschaftlich nicht haltbaren Annahmen und auf unzutreffenden Schlussfolgerungen. /12/“

Im Betrieb des AVR kam es zu mehreren gravierenden Ereignissen, die stark verspätet bzw. nur unvollständig kommuniziert wurden; nur die wichtigsten seien hier genannt:

1. Ab 1974 wurden große Mengen an besonders toxischen Spaltprodukten (Sr-90, Cs-137) aus den Brennelementen in den Primärkreis freigesetzt (je ca. 100 TBq), wo sie sich heute noch befinden, da es für Kugelhaufenreaktoren - anders als bei LWR - kein wirksames Verfahren zur Reinigung von Primärkreis/Kühlmittel gibt. Diese extreme Kontamination des Primärkreislaufs stellt ein wesentliches Hindernis beim Reaktorrückbau dar. Nach Angaben des Betreibers von 2000 ist der AVR die am stärksten mit Strontium kontaminierte Nuklearanlage weltweit, wobei das Strontium in der ungünstigsten Form, nämlich staubgebunden, vorliegt /2/.

2. Im Mai 1978 kam es zu einer Leckage im Dampferzeuger des AVR, wobei 25–30 t Wasser in den Primärkreis eindrangen. Der Vorgang wurde als Ereignis von untergeordneter sicherheitstechnischer Bedeutung heruntergespielt und durfte im FZJ damals nicht als Störfall bezeichnet werden (sondern nur als Störung, Vorfall, Ereignis...). 1999 wurde entdeckt, dass Grundwasser und Boden unter dem AVR, vermutlich als Folge dieses Störfalls, mit Sr-90 kontaminiert sind, was zu enormen Mehrkosten beim Rückbau führt. Das Rückbaukonzept musste daraufhin nämlich geändert werden: Um Grundwasser und Boden zu sanieren, muss der Reaktor

entfernt werden. Da der Reaktorbehälter wegen seiner extremen Kontamination aber nicht zerlegt werden kann, muss er als Ganzes (betonverfüllt, 2100 t) in ein eigens gebautes Zwischenlager im FZJ transportiert werden – eine weltweit bisher einmalige Aktion, die nach mehrjähriger Verzögerung nun im Herbst 2014 beginnen soll.

3. Ende 1987 wurde durch 1986 begonnene Messungen mit Monitorkugeln, die Schmelzdrähte enthielten, klar, dass die Temperaturen im Reaktorkern sehr viel höher waren, als berechnet. Da in vielen Monitorkugeln alle Schmelzdrähte geschmolzen waren, lässt sich das jedoch nicht gesichert quantifizieren. Normale Messsonden, die eine kontinuierliche Messungen von Temperaturen oder Neutronenflussdichte gestatten, sind im Kern von Kugelhaufenreaktoren nicht anwendbar, da sie durch den sich bewegenden Kugelhaufen zerdrückt werden. Als Folge dieser Ergebnisse wurde der Reaktorbetrieb im letzten Betriebsjahr 1988 stark eingeschränkt, vermutlich, da die notwendige Beherrschbarkeit eines Auslegungsstörfalls „Wassereinbruch“ wegen Bildung explosionsfähiger Gase nicht mehr gegeben war.

Bereits Anfang 1988 hatte ein Münchener Expertenteam um Jochen Benecke in einem Gutachten für die NRW-Landesregierung vor erheblichen Kritikalitätsproblemen bei Wassereinbruchstörfällen in Kugelhaufenreaktoren gewarnt und gewisse Parallelen zum Tschernobyl-Reaktor gesehen /3/. Das Gutachten wurde damals von der Landesregierung nicht veröffentlicht. Eine offene Diskussion dieses Gutachtens unterblieb bis 2007 daher. Es darf aber vermutet werden, dass dieses Gutachten eine Ursache für den unerwarteten Beschluss war, den AVR zum 31.12.1988 außer Betrieb zu nehmen. Ab 2006 führte eine kritische Interpretation der vorgenannten Fakten durch Rainer Moormann /4,5/ zu intensiven Auseinandersetzungen /8/. Moormann sieht die Ursache der extremen und für zukünftige Nuklearanlagen unakzeptablen AVR-Primärkreis-kontamination einerseits in den erhöhten Kerntemperaturen, andererseits in einer weit überschätzten Rückhaltefähigkeit für Spaltprodukte auch neuerer Kugelbrennelemente. Er erkennt zwar eine deutlich verbesserte Strontiumrückhaltung in neueren Brennelementen, weist aber auf eine markante Verschlechterung der Cäsiumrückhaltung hin. Moormann sieht zudem die Ursachen der überhitzten AVR-Kernbereiche als ungeklärt an und hält es für wahrscheinlich, dass sie in Kugelhaufenreaktoren generell auftreten können. Die Kugelhaufenbefürworter bestreiten die oben skizzierten drei Problemfelder im AVR zwar nicht mehr, interpretieren sie aber als AVR-spezifisch und schließen eine Wiederholung in eventuellen zukünftigen Reaktoren aus: Die extreme Kontamination soll auf angeblich schlechte Brennelemente zurückzuführen sein, da man erst seit 1980 gute Brennelemente habe herstellen können. Eine nennenswerte Radioaktivitätsfreisetzung aus modernen Brennelementen wird für Temperaturen unterhalb von 1600° C weiter ausgeschlossen. Die Ursachen der erhöhten Kerntemperaturen sollen auf unbeabsichtigte Kühlgasbypässe zurückzuführen sein, die sich in zukünftigen Reaktoren vermeiden lassen /10/. Die von Benecke und Moormann unterstellte Unterschätzung des realen Wassereinbruchs 1978 und des hohen Risiko von Wassereinbruchstörfällen allgemein wurden von den Kugelhaufenreaktorbefürwortern zurückgewiesen, während an der Version eines unbedeutenden Ereignisses 1978 und an der These vom grundsätzlich geringen Risiko von Wassereinbruchstörfällen im Kugelhaufenreaktor festgehalten wurde.

Zur Klärung dieser Auseinandersetzung wurde frühzeitig eine unabhängige Untersuchung gefordert, was das FZJ aber zurückwies. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass das FZJ seit den 1990er Jahren den Bau eines Kugelhaufenreaktors (PBMR) in Südafrika unterstützte und dieses Projekt durch die aufkommende Sicherheitsdiskussion zum AVR erheblich beeinträchtigt wurde, da der AVR in vielen entscheidenden Punkten als Vorbild für den südafrikanischen Reaktor diente. Es ist zu vermuten, dass das FZJ durch eine Expertengruppe zum AVR das südafrikanische Reaktorprojekt nicht noch weiter beeinträchtigen wollte, da das Projekt die wichtigste Stütze der Jülicher Reaktorentwicklung darstellte. Erst als die designierte neue NRW-Landesregierung im Sommer 2010 die Klärung dieser AVR-Probleme im Koalitionsvertrag festschrieb, das südafrikanische Reaktorprojekt im September 2010 zusammenbrach und durch den Fukushima-Unfall im März 2011 weiterer Druck auf das FZJ ausgeübt wurde, richteten das FZJ und die AVR / EWN im April 2011 eine entsprechende Expertengruppe ein. Dieser gehörten insgesamt vier -

sowohl AKW-kritische als auch AKW-freundliche - Mitglieder an. Diese Expertengruppe hörte die verschiedenen Positionen an und veröffentlichte ihren Bericht nach dreijähriger Arbeit am 26. April 2014. Das Votum erfolgte einstimmig. Aus Kapazitätsgründen konnten nur ausgewählte Themenkreise bearbeitet werden. Beispielsweise wird auf die möglicherweise undurchsichtige Rolle der Atomaufsicht im Abschlussbericht nicht näher eingegangen. Auch Moormann wird im Expertenbericht ausdrücklich für seine Unterstützung gedankt; das dürfte nach Einschätzung der Autoren dieses Artikels so zu interpretieren sein, dass von Seiten der AVR / des FZJ wichtige Informationen zu Problemen des AVR-Betriebes zurückgehalten wurden und nur über Moormann an die Expertengruppe gelangten.

Wesentliche Ergebnisse des Expertenberichtes

Die Expertengruppe

- sieht bei den Kugelhaufenreaktorentwicklern eine Überschätzung der eigenen Fähigkeiten („ausgeprägtes Überlegenheitsgefühl“, „Unfähigkeit zur Selbstkritik“, s. S. 14); das könnte eine mögliche Ursache der Reaktorprobleme sein;
- hält die Vermutung von Moormann für plausibel, dass die überhitzten Kernbereiche ursächlich für die hohe Primärkreiskontamination im AVR sind. Details lassen sich angesichts der unbefriedigenden Datenlage nach ihrer Meinung jedoch nicht ableiten;
- hält es für unverständlich, dass nicht unmittelbar nach Entdeckung des drastischen Anstiegs der Primärkreiskontamination Maßnahmen ergriffen wurden (s. S. 80);
- hält die Ursachen der überhitzten AVR-Kernbereiche – im Unterschied zu Behauptungen der Kugelhaufenreaktorbefürworter und in Einklang mit der Position von Moormann - für ungeklärt;
- verweist darauf, dass erste Temperaturmessungen im Kern bereits Anfang der 1970er Jahre auf Unregelmäßigkeiten hindeuteten und dass es schon 1977 Vermutungen gab, welche den drastischen Anstieg der Spaltproduktfreisetzung aus den Brennelementen mit Kernüberhitzungen in Verbindung brachten. Vor diesem Hintergrund äußert sie Unverständnis darüber, dass mit weiteren Temperaturmessungen zehn Jahre gewartet wurde;
- äußert daran, dass die von den Kugelhaufenbefürwortern behaupteten überlegenen Rückhalteeigenschaften moderner Kugelbrennelemente für radioaktive Spaltprodukte als nachgewiesen gelten können. Da nach ihrer Meinung diese behaupteten Rückhalteeigenschaften die Basis des Sicherheitskonzeptes von Kugelhaufenreaktoren darstellen, beziehen sich diese Zweifel auch auf die Sicherheit dieses Reaktortyps im Allgemeinen;
- hält die Einordnung des realen Wassereinbruchstörfalls 1978 in die ungefährlichste Kategorie (damals C) für unangemessen; sie hält eine Einordnung mindestens in Kategorie B, eventuell sogar in die höchste Kategorie A für erforderlich;
- verweist auf eine relativ geringe Anzahl von der Behörde gemeldeten AVR-Betriebsstörungen und listet einige Vorkommnisse auf, die hätten gemeldet werden müssen;
- hält die Einschätzungen von Benecke und Moormann zum hohen Gefährdungspotential von Wassereinbruchstörfällen für nicht widerlegt. Ihr wurden vom FZJ und der AVR keine belastbaren Unterlagen zu diesem Problemkreis vorgelegt und sie forderte nochmals dazu auf, entsprechende Dokumente, sofern verfügbar, nachzureichen (S. 59);
- bestätigt die Vermutung, dass die Betriebsmannschaft während des Wassereinbruchstörfalls 1978 das Reaktorschutzsystem mehrfach unzulässig manipuliert hat, um den Reaktor trotz des Störfalls wieder in Betrieb nehmen zu können;
- verweist auf eine auch nach dem damaligen Stand unzureichende Umgebungsüberwachung hinsichtlich radioaktiver Emissionen. So wurde abfließendes Grund- und Trinkwasser erst ab 1995 auf Tritium hin überwacht. Messungen zu eventuellen Kontaminationen im Grundwasser-gefüllten Keller unter dem Reaktor wurden bis 1999 (als eher zufällig Strontium im Regenwasserkanal entdeckt wurde) nie durchgeführt. Damit konnte die Boden-/Grundwasserkontamination aufgrund des Störfalls 1978 ihr problematisches Ausmaß annehmen. Von 1966–1973 funktionierte der

Tritiumfilter im Abgasstrom nicht, was wegen unterbliebener Messungen lange unentdeckt blieb. Die Direktstrahlung aus dem Reaktor war am Zaun zeitweise zu hoch.

Kommentare und Schlussfolgerungen

Der Expertenbericht begnügt sich weitgehend mit Tatsachenfeststellungen und überlässt es meist dem Leser, Schlussfolgerungen daraus zu ziehen. Zwei Ausnahmen sollen kurz angesprochen werden. Die eine betrifft die Qualität auch moderner Kugelbrennelemente, die als unzureichend nachgewiesen dargestellt wird mit entsprechenden Folgen für die sicherheitstechnische Gesamtbewertung. Dem ist uneingeschränkt zuzustimmen. Zum anderen werden radiologische Gesundheitsfolgen des AVR-Betriebs ausgeschlossen. Dieses erscheint uns angesichts der im Bericht dargestellten Unzulänglichkeiten als zu weitgehend und soll – vor dem Hintergrund des in der Jülicher Umgebung aufgetretenen Clusters von Kinderleukämie 1990-92 /6/ – hier diskutiert werden. Das Ausbleiben radiologischer Folgen wird im Expertenbericht mit einer Dosisberechnung untermauert, die versucht, durch Annahme möglichst ungünstiger Messwerte zu einer Obergrenze für die radiologische Dosis zu gelangen. Methodisch problematisch ist dieses eigentlich sinnvolle Vorgehen im Falle der Tritiuminkorporation über Grund- und Trinkwasser. Mangels Messwerten für die Zeit vor 1995 wird der höchste danach gemessene verwendet, ein Wert von November 1997. Es ist aber offensichtlich, dass in den Jahren nach 1978, als höchstwahrscheinlich zusammen mit Strontium (noch vorhanden) große Mengen an Tritium in das Grundwasser unter dem Reaktor gelangten, die Belastungen durch Tritiuminkorporation viel höher gewesen sein müssen. Das beim Wassereinbruch 1978 in den Reaktor gelangte Wasser enthielt nämlich im Vergleich zu Strontium etwa die 100-fache Tritiumaktivität. Da Tritium sich chemisch wie Wasser verhält, und das Grundwasser hier etwa 5 m/Tag fließt, ist dieses Tritium nach einigen Jahren nicht mehr nachweisbar. Hinzu kommt, dass eine zuverlässige Tritiumgesamtbilanz für den AVR nicht existiert. Hätte es weitere, bisher unbekannte Emissionen über den Grundwasser-/Trinkwasserpfad gegeben, so ließen sich diese heute nicht mehr identifizieren. Angesichts des insgesamt eher sorglosen AVR-Betriebs darf man Letzteres aber nicht ausschließen, zumal undichte erdverlegte Rohre am AVR 1999 entdeckt wurden, die noch zehn Jahre nach Betriebsende Tritium emittierten. Diese Argumente dürfen nicht so verstanden werden, als sei der AVR mit Sicherheit für das Leukämiecluster verantwortlich. Die Frage nach den Ursachen ist heute angesichts der skizzierten Unzulänglichkeiten schlicht nicht mehr klärbar, aber für ein sicheren Ausschluss des AVR als Ursache, wie im Expertenbericht angegeben, fehlt damit ebenso die Basis.

Wichtige Schlussfolgerungen, die aus dem Expertenbericht gezogen werden können, aber nicht oder nicht deutlich artikuliert werden, sind:

- Die Kugelhaufenreakorttechnologie ist nicht annähernd anwendungsreif.
- Das Kugelbrennelement wird hinsichtlich seiner Rückhalteeigenschaften für Spaltprodukte überschätzt.
- Die jahrzehntelange äußerst kostenintensive Kugelhaufenreaktorentwicklung in Deutschland war nur möglich, weil entscheidende Schwachstellen lange gezielt verheimlicht werden konnten (überhitzte Kernbereiche, Folgen des Wassereinbruchs, extreme Reaktorkontamination...). In Kenntnis dieser Schwachstellen wäre der Zufluss staatlicher Entwicklungsgelder höchstwahrscheinlich viel früher beendet worden und die Kugelhaufenreakorttechnologie hätte ein ähnlich frühes Ende gefunden wie andere zeitgleich begonnene deutsche Reaktorentwicklungen (Grosswelzheim, Niederaibach...)
- Die Jülicher Reaktorentwicklung genügt in der Gesamtdarstellung sowie in einzelnen Teildisziplinen (Brennelemententwicklung) nicht den Mindestanforderungen wissenschaftlicher Redlichkeit. Zwar hat das FZJ das auch für die fernere Vergangenheit eingeräumt /9/, aber die Veröffentlichungen der Jülicher Reaktorentwickler aus der jüngeren Zeit lassen unserer Meinung nach noch nicht erkennen, dass diese Grundregeln wissenschaftlicher Ehrlichkeit jetzt ausreichend

beherzigt werden, denn weiterhin bleiben hochproblematische Aspekte zum Kugelhaufenreaktor unerwähnt oder werden grob verharmlost /10,11/.

- Der AVR-Betrieb genügte wahrscheinlich nicht den Mindestanforderungen, die damals für den sicheren Betrieb eines AKW gefordert wurden. Das mit dem Betrieb verbundene Risiko war daher ungewöhnlich hoch.
- Der AVR-Betrieb erfolgte ohne ausreichende Rücksicht auf die Sicherheit; Hauptziel war vielmehr die Demonstration eines Dauerbetriebs unter extremen Bedingungen. Dieser Umstand ist zu einem wesentlichen Teil für die enormen Entsorgungskosten verantwortlich.
- Die undurchsichtige Rolle der NRW-Atomaufsicht, die dieses Debakel hätte verhindern können und müssen, bleibt noch aufzuklären.

Auswirkungen des Berichtes

Das FZJ bedauerte bei Erscheinen des Berichtes, dass im Jülicher Reaktorbereich in der Vergangenheit die Regeln guter wissenschaftlicher Praxis nicht immer eingehalten wurden /9/. Als wichtige unmittelbare Auswirkung des Berichtes ist die auf der Aufsichtsratssitzung des FZJ am 14. Mai 2014 auf Druck der FZJ-Gesellschafter angekündigte Beendigung der Entwicklungsarbeiten zu Kugelhaufenreaktoren zu nennen. Diese Entwicklungsarbeiten für zukünftige Reaktoren wurden, getarnt als Sicherheitsforschung, zeitweise entgegen dem Willen der FZJ-Gesellschafter unverändert fortgeführt. Höhepunkt war die umfangreiche, mehr als ein Jahrzehnt andauernde Jülicher Zuarbeit zum mittlerweile gescheiterten südafrikanischen Reaktorprojekt PBMR, für das u.a. die Kernaussage überwiegend im FZJ erstellt wurde. Auch wurden FZJ-Beiträge zum noch andauernden chinesischen Reaktorprojekt HTR-PM geliefert.

Als weniger offensichtliche Folge ist der sich beschleunigende Bedeutungsverlust der Kugelhaufenreakorteknologie in der internationalen AKW-Diskussion zu nennen. In den Jahren 2000 bis 2010 hatte die Kugelhaufenreakorteknologie eine auffällige Renaissance erlebt.

Schlussbemerkung

Insgesamt darf der Expertenbericht zum AVR als Erfolg gewertet werden. Für andere als problematisch bekannte deutsche AKW bietet sich also eine unabhängige Expertenuntersuchung ebenfalls an. Es wäre bei zukünftigen Untersuchungen aber sinnvoll, unabhängige staatliche Stellen als Auftraggeber der Untersuchungen zu wählen.

Die Autoren dieses Beitrags arbeiten derzeit an einem Buch zur deutschen Kugelhaufenreaktorentwicklung und ihren Problemen.

Literatur:

/1/ Der Versuchsreaktor AVR: Entstehung, Betrieb, Störfälle. Abschlussbericht der AVR-Expertengruppe. C. Küppers, L. Hahn, V. Heinzl, L. Weil, April 2014. http://www.fz-juelich.de/portal/DE/UEberUns/selbstverstaendnis/verantwortung/avr/Aktuelles/bericht-avr-expertengruppe_lang.pdf

/2/ E. Wahlen et al.: Status of the AVR decommissioning project with special regard to the inspection of the core cavity for residual fuel. Waste Management Symp. 2000, Tuscon, <http://www.wmsym.org/archives/2000/pdf/36/36-5.pdf>

/3/ J. Benecke et al.: Kritik der Sicherheitseinrichtungen und Sicherheitskonzepte des THTR 300 in Hamm und des Versuchsreaktors Jülich (AVR). Gutachten für die NRW-Landesregierung (1988); http://www.westcastor.de/Benecke_THTR_AVR_komplett.pdf

/4/ R. Moormann: A safety re-evaluation of the AVR pebble bed reactor operation and its consequences for future HTR concepts. Bericht Jül-4275 (2008) http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/3136/1/Juel_4275_Moormann.pdf

/5/ R. Moormann: AVR prototype pebble bed reactor. Kerntechnik (2009) <http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/3585/1/Moormann-Juwel.pdf>

- /6/ H. Kuni: A Cluster of Childhood Leukaemia in the Vicinity of the German Research Reactor Jülich. Strahlentelex, Berlin, 1998, p. 251-255. <http://www.kuni.org/h/neues/beitrag/6>
- /7/ F. Daniels: Neutronic reactor system, Patent US2809931, angemeldet Oktober 1945, <http://www.freepatentsonline.com/2809931.pdf>
- /8/ D. Deiseroth, A. Falter: Whistleblowing im nuklear-industriellen Komplex : Preisverleihung 2011 - Dr. Rainer Moormann. Berlin, BWV (2012), ISBN 978-3-8305-3021-3
- /9/ Stellungnahme des FZJ zum Expertenbericht. 26. April 2014 <http://www.fz-juelich.de/portal/DE/UeberUns/selbstverstaendnis/verantwortung/avr/Aktuelles/fz-stellungnahme-bericht-avr-expertengruppe.html>
- /10/ K. Verfondern: Consequences from the AVR Meltwire Experiments. (2012) http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-07-10-07-12-TM-NPTD/12_meltwire.pdf
- /11/ H. Nabielek: Cs release from AVR: the “Moormann problem” (2013) http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-06-10-06-12-TM-NPTD/24_cs_release.pdf
- /12/ L. Hahn: Grundsätzliche Sicherheitsprobleme beim Hochtemperaturreaktor und besondere Defizite beim THTR-300. Juni 1986 <http://www.reaktorpleite.de/htr-sicherheit-1986-l-hahn.html>