

Im BfS-Bericht sind auch Zahlen für die Einzelstandorte genannt. Besonders auffällig ist die Erhöhung mit  $SIR=2,77$  im Nahbereich des KKW Grafenrheinfeld. Die Abbildung zeigt die SIR (O/E-Werte: beobachtete/erwartete Fälle) in den drei Entfernungszonen um das KKW Grafenrheinfeld und die Regressionskurve. Die Entfernungsabhängigkeit der SIR ist hier deutlicher als für alle vier Standorte zusammengekommen. Im 5-km Nahbereich ist die Prävalenz hochsignifikant erhöht gegenüber der Prävalenz in der 5- bis 15-km Zone ( $p=0,0005$ ). Im 15-km Umkreis des KKW Grafenrheinfeld ist  $SIR=1,25$  ( $p=0,017$ ).

Die Erhöhung der Fehlbildungsrate um alle Standorte zusammengefasst ist nicht allein durch die Erhöhung um den Standort Grafenrheinfeld bedingt. Auch an den restlichen drei Standorten ist die Fehlbildungsrate im 10-km Nahbereich signifikant erhöht gegenüber Entfernungen größer als 10 km ( $p=0,034$ ). Im gesamten 15-km Umkreis ist  $SIR=1,10$  ( $p=0,069$ ).

## Strahlenbiologie

# Für Auger-Elektronen aussendende Radioisotope lassen sich keine Werte für die dosisabhängige relative biologische Wirksamkeit (RBW-Werte) angeben

Das Bild von sogenannten Auger-Elektronen emittierenden Radioisotopen in der Strahlenbiologie beginnt sich zu wandeln und in jedem Fall zu differenzieren. Wegen unerwarteter experimenteller Ergebnisse ließen sich keine Werte für das Konzept der dosisbasierten relativen biologischen Wirksamkeit (RBW-Werte) bestimmen. Derartige

Angaben müssen nun mit großem Vorbehalt betrachtet werden. Das erklären die Autoren des im Mai 2008 in der Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit veröffentlichten Abschlußberichtes (BMU-2008-712) über „Untersuchungen der Auger-Emitter abhän-

Die BfS-Autoren weisen in der Diskussion ihrer Ergebnisse darauf hin, dass für isolierte und multiple Fehlbildungen, die 86% aller Fehlbildungen ausmachen, von der Existenz einer Schwellendosis ausgegangen wird, die um mehrere Größenordnungen über den Dosen durch die Emissionen der Kernkraftwerke liegen. Somit könnten,

so die BfS Autoren, die beobachteten Auffälligkeiten nicht ursächlich mit der Strahlung der Kernkraftwerke zusammenhängen. Dennoch ist zur Zeit eine umfassende Untersuchung von Fehlbildungen im Umkreis von deutschen Kernkraftwerken in Arbeit, die von der Universitätskinderklinik Mainz im Auftrag des Bundesamtes für Strah-

lenschutz durchgeführt wird. Sie wird voraussichtlich Ende 2008 abgeschlossen sein.

1 van Santen F, Irl C, Grosche B, Schoetzau A. Untersuchungen zur Häufigkeit kindlicher bösartiger Neubildungen und angeborener Fehlbildungen in der Umgebung bayerischer kerntechnischer Anlagen. Bericht des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) vom November 1995. ●

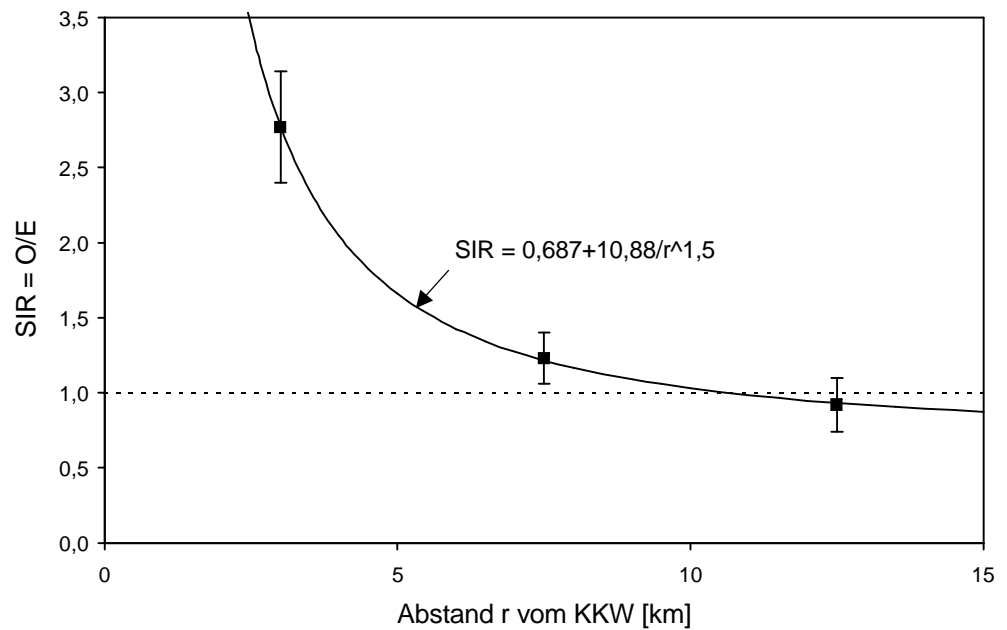


Abbildung: **Standardisiertes Inzidenzverhältnis** (standardised incidence ratio, SIR) **von Fehlbildungen in der Umgebung des Kernkraftwerks Grafenrheinfeld, 1984-1991, und Regressionskurve.** Die Fehlerbalken bedeuten 1 Standardabweichung.

gigen biologischen Wirksamkeit zur Ermittlung des Strahlungs-Wichtungsfaktors für Auger-Elektronen“ am Forschungszentrum Jülich.

Ursprüngliches Ziel des Forschungsvorhabens war es, die strahlenbiologische Toxizität der Auger-Elektronen emittierenden Jod-Isotope Jod-123 und Jod-125 allein auf der Grundlage der jeweiligen Energiedosis zu bestimmen. Bei gleichem chemischen Verhalten der Auger-Emitter, so die Vorstellung zuvor, sollten Unterschiede in der biologischen Wirksamkeit einzig auf die unterschiedliche Anzahl der pro Zerfall von beiden Isotopen emittierten Auger-Elektronen und somit auf die Energiedosis zurückzuführen sein. Bisherige Überlebensexperimente zeigten zu-

dem eine etwa doppelt so starke Wirkung von Jod-125 gegenüber Jod-123, wie das entsprechend den jeweiligen Energiedosiswerten zu erwarten war und auch bei Modellrechnungen zur Simulation von komplexen Doppelstrangbrüchen im Träger der Erbinformation (DNA) gefunden wurde.

Sogenannte Auger-Elektronen aussendende Radionuklide haben eine starke radiotoxische Wirkung, weil bei ihrem Zerfall nicht wie beim reinen Beta-Zerfall nur ein einziges Elektron, sondern eine Vielzahl niederenergetischer Elektronen das Radionuklid verläßt. Am Zerfallsort wirken diese Elektronen dann wie eine dicht ionisierende Hoch-LET-Strahlung. Für sie gibt es keine allgemein akzeptierten

Strahlungs-Wichtungsfaktoren. Seit den ersten Versuchen, den Schadensmechanismus bei Auger-Elektronen aussendenden Radioisotopen zu erklären, wird auch die Möglichkeit einer sogenannten Coulomb-Explosion erwogen – zusätzlich zu den Auger-Elektronen: Wird das Jod-Atom in einer inneren Schale ionisiert, bewirkt das in gleicher Weise eine Elektronen-Kaskade, wie sie durch Elektronen-Einfang etwa im Falle des instabilen Jod-125 hervorgerufen wird.

Statt der erwarteten lediglich größenmäßigen strahlentoxischen Unterschiede zwischen den beiden Jod-Isotopen, so berichten nun die Autoren, zeigte sich aber, daß offensichtlich nicht die Dosis für

Auswirkungen mit deutlich qualitativen Unterschieden in den biologischen Reaktionen verantwortlich war. Die an menschlichen Nieren-Zellkulturen mit einer Reihe verschiedener Methoden zum Teil erstmals mit Auger-Elektronen-Emittern durchgeführten Untersuchungen deuteten unter anderem darauf hin, daß DNA-inkorporiertes Jod-123 eher zu einem apoptischen, durch genetische Informationen programmierten Zelluntergang führt, während der Zerfall von Jod-125 vorwiegend nekrotische Prozesse nach Ausfall der Zellfunktionen (Zelltod) nach sich zieht.

In gleicher Weise sei auch die im theoretischen Teil der Untersuchung behandelte Coulomb-Explosion einzustufen,

erklären die Autoren weiter. Die mit semi-empirischen quantenmechanischen Methoden durchgeführten Berechnungen ergaben demnach, daß nahezu jeder Zerfall eines Jod-123- beziehungsweise Jod-125-Nuklids eine Coulomb-Explosion und damit eine Zerstörung des Joddesoxyuridin-Moleküls (IUdR-Molekül) bewirkt, bei dem die Methylgruppe des Thymidins in der DNA durch eines der Jod-Isotope ersetzt ist. Der dieser Explosion zugrunde liegende Mechanismus, für dessen Eintreten innerhalb der DNA es bisher keinen experimentellen Nachweis gebe, könne weder einer Strahlenwirkung zugeordnet werden, noch sei er dosisabhängig. Darüber hinaus sei zum gegenwärtigen Zeitpunkt auch nicht klar,

welchen molekular- beziehungsweise zellbiologischen Schaden eine solche Explosion hervorrufe. In jedem Fall müsse die Coulomb-Explosion aber als ein schwerwiegender Effekt angesehen werden, der zusätzlich zur Schädigung durch die Auger-Elektronen auftritt und deren Wirkung an der DNA verstärke.

Th.D.

F. A. H. Schneeweiss, A. Turtoi, E. Pomplun, G. Sutmann: Untersuchungen der Auger-Emitter abhängigen biologischen Wirksamkeit zur Ermittlung des Strahlungs-Wichtungsfaktors für Auger-Elektronen, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben StSch 4421 am Forschungszentrum Jülich, Mai 2008, BMU-Schriftenreihe RS, BMU-2008-712, ISSN 1612-6386, [www.bmu.de/41499](http://www.bmu.de/41499).

## Slowakei

# Havarien ohne Ende im KKW A1 in Jaslovske Bohunice

**Das KKW A1 in Jaslovske Bohunice in der Slowakei sollte als erstes tschechoslowakisches Atomkraftwerk ein Prototyp werden. Nach fast 16 Jahren Bauzeit ging es im Dezember 1972 ans Netz und lief kaum sieben Jahre. Die Geschichte dieses KKW ist eine Kette von Havarien, aber selbst heute – 31 Jahre nach der endgültigen Abschaltung – wird über diese Havarien und ihre Auswirkungen nicht offen geredet. Insofern ist der Beitrag von Michal Pisko in der slowakischen Zeitung SME vom 12. Mai 2008, über den wir hier berichten, bemerkenswert.**

Das KKW Bohunice A1 war eine Entwicklung der Skoda-Werke. Vom Reaktortyp her handelte es sich um einen mit CO<sub>2</sub>-Gas gekühlten schwerwassermoderierten Reaktor, in

dem auch Graphit eingesetzt wurde. Als Kernbrennstoff wurde Natururan eingesetzt. Insgesamt stellte er eine Initiative dar, das sowjetische Atommonopol zu unterlaufen, die von den Russen mit Mißfallen beäugt wurde. Der Reaktor wies eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Tschernobyl-Reaktor RBMK auf: auch im KKW A1 gab es Druckröhren und die Brennelemente konnten auch bei ihm im laufenden Betrieb ausgewechselt werden.

In kurzer Folge ereigneten sich zwei schwere Unfälle. 1976 schoß während des Brennelementewechsels bei laufendem Betrieb ein Brennelement aus dem Reaktorkern und tötete einen Arbeiter. Es trat radioaktives Kohlendioxid in den Reaktorraum aus. Dabei konnten sich zwei weitere Mitarbeiter des Kernkraft-

werks nicht mehr retten und ersticken, da die Notausgänge versperrt waren. „Es kam zu einer Bestrahlung von Mitarbeitern im Bereich der Grenzwerte und eine radioaktive Freisetzung an die Umwelt. Das Gelände des KKW war belastet.“ – so Dusan Viktory von der Gesundheitsbehörde heute. Während des Unfalls hatten die zuständigen Ämter geschwiegen. Das KKW schrammte haarscharf an einer Kernschmelze vorbei.

Am 22. Februar 1977 wurde die Anlage beim Wiederbefüllen mit Brennstäben schwer beschädigt und ist seit 1979 dauerhaft abgeschaltet. Bei dem Unfall schmolzen einige Brennelemente, weil das Verpackungs- und Feuchtigkeitsabsorptionsmaterial Silikagel nicht von einem Brennelement entfernt worden war und dann den Kühlkanal verstopfte. Es wurden 4 GBq (Giga-Becquerel) radioaktive Strahlung mit dem Wasserdampf in die Umgebung freigesetzt. Der Unfall wird in der internationalen Unfallstatistik als Stufe 4 der INES-Skala geführt.

„Durch die Beschädigung ist Schwerwasser (D<sub>2</sub>O) in den

Kühlkreislauf gekommen. Die rasante Feuchtigkeitserhöhung hat alle Brennstäbe beschädigt“, beschreibt das staatliche Unternehmen JAVYS, das sich mit der Dekontamination des KKW befaßte, den Unfall. Bei diesem Unfall gaben die Gesundheitsbeamten ernste Folgen zu: „Die radioaktiven Stoffe sind in die Atmosphäre entwichen und auch in die Oberflächengewässer gelangt. Nachdem man radioaktive Stoffe in den Abwasserkanal abgelassen hat, war die Radioaktivität auch im Fluß Dudvah gemessen worden“, sagte Dusan Viktory. Er meint aber, daß eine ernste radioaktive Belastung dank der Winterszeit vermieden worden wäre: „Die Vegetation ruht, die Menschen bewegen sich nicht in Flussnähe und Wasser wird nicht zur Bewässerung benutzt.“

Trotz der erheblichen Schäden bemühte sich die Regierung, das Prestige-KKW reparieren zu lassen. „Infolgedessen waren weitere große Mengen an hochradioaktiven Materialien geschaffen worden“, sagte Lubica Kupke-Siposova von der Umweltschutzorganisation Za Matku Zem.