

# Gesundheitliche Folgen der beruflichen Strahlenbelastung im deutschen Uranbergbau

## Health effects of occupational radiation exposures among German uranium miners

*Maria Schnelzer, Nora Fenske, Linda Walsh, Michaela Kreuzer*

### Abstract

Several hundred thousand persons have been occupied in uranium mining in the former German Democratic Republic. The so-called "Wismut cohort" consists of nearly 60,000 of these workers and individual radiation exposures and other occupational exposures have been retrospectively assessed for them. Every five years, a mortality follow-up is conducted. By the end of 2008 25,438 persons (43% of the cohort) had died, 3,500 among them from lung cancer. Lung cancer mortality is thus twice as high as in the general population. This increase results mainly from radon exposures and to a lesser extent from silica exposures. For other diseases no significant relationship with occupational radiation exposures has been observed so far. Further results relevant for current radiation protection are expected with increasing follow-up period, particularly in the low-dose range.

### Zusammenfassung

Mehrere Hunderttausend Bergarbeiter waren in der ehemaligen DDR im Uranerzbergbau beschäftigt. Für fast 60.000 von ihnen – die sogenannte „Wismut-Kohorte“ – wurde in einer Studie die individuelle berufliche Belastung durch Strahlung und andere Risikofaktoren bestimmt. Alle fünf Jahre werden die Todesursachen verstorbener Kohorten-Mitglieder ermittelt. Bis Ende 2008 waren 25.438 Personen (43 % der Kohorte) verstorben, 3.500 von ihnen an Lungenkrebs. Dies entspricht im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung einer Verdoppelung der Lungenkrebssterblichkeit, welche vorwiegend auf die berufliche Radonbelastung und in geringerem Maß auch auf die Belastung mit Quarzfeinstaub zurückzuführen ist. Für andere Erkrankungen zeigte sich bisher kein nachweisbarer Zusammenhang mit der beruflichen Strahlenbelastung. Mit zunehmendem Beobachtungszeitraum sind weitere Erkenntnisse, insbesondere im Niedrig-Dosis-Bereich zu erwarten, die für den Strahlenschutz heute von besonderem Interesse sind.

## Hintergrund: Uranbergbau in der DDR

Mit dem Ende der DDR vor 25 Jahren endete auch der Uranbergbau in Thüringen und Sachsen (**Abbildung 1**).

Bis dahin zählte die DDR mit insgesamt mehr als 230.000 Tonnen gefördertem Uran zeitweise zu den größten Uranproduzenten der Welt. Schätzungen zufolge waren zwischen 1946 und 1989 mehr als 400.000 Personen bei der Uranbergbaugesellschaft „Wismut“ beschäftigt. Der Name „Wismut“ sollte über den eigentlichen Zweck der Bergbauaktivitäten hinwegtäuschen. Diese unterstanden anfangs direkt der sowjetischen Verteidigungsindustrie und wurden streng geheim gehalten (Wismut GmbH 1999). So war das Erzbergbaugelände zeitweilig militärisches Sperrgebiet, das die Beschäftigten nur

mit speziellen zweisprachigen Ausweisen, die sie anstelle ihrer Personalausweise erhalten hatten, betreten durften. Da die Sowjetunion zum Bau von Atombomben möglichst schnell große Mengen an Uran benötigte, erfolgten die Arbeiten in den Anfangsjahren mit großem Einsatz an Arbeitskräften, die zum Teil zwangsverpflichtet worden waren, unter extrem schlechten Arbeitsbedingungen. Diese verbesserten sich im Lauf der Zeit deutlich, und die anfangs sehr hohen Radon- und Quarzfeinstaubbelastungen nahmen stark ab. Anfang der 1970er Jahre erreichten sie internationale Standards. Insbesondere in den frühen Betriebsjahren waren viele Beschäftigte durch ihre Tätigkeit zahlreichen Gesundheitsbelastungen ausgesetzt. Vor allem die kurzlebigen Folgeprodukte des radioaktiven Gases

Radon, das aus dem uranhaltigen Gestein freigesetzt wird, führten zu einer hohen Strahlenbelastung. Bei diesen Folgeprodukten handelt es sich um die radioaktiven Schwermetalle Polonium, Wismut und Blei. Diese lagern sich großteils an Aerosolen und Staubteilchen in der Luft an, werden eingeatmet und zerfallen im Atemtrakt. Dabei entsteht energiereiche Alphastrahlung, die zu einer Schädigung der strahlenempfindlichen Zellen des Lungengewebes und so zur Entstehung von Lungenkrebs führen kann. Lungenkrebs war bereits früh als strahlenbedingte Berufskrankheit im Erzgebirge bekannt. In der DDR wurden bei Wismut-Bergarbeitern 5.492 Lungenkrebsfälle als Berufskrankheit anerkannt, nach der Wiedervereinigung kamen bis 2011 weitere 3.696 als Berufskrankheit anerkannte Fälle hinzu. Bis heute treten strahlenbedingte Lungenkrebserkrankungen bei ehemaligen Bergarbeitern auf.

## Die deutsche Uranbergarbeiter-Studie

Mit dem Ziel, die gesundheitlichen Folgen des Uranbergbaus wissenschaftlich zu untersuchen, baute das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit die weltweit größte Uranbergarbeiter-Kohorte mit annähernd 60.000 ehemaligen Wismut-Beschäftigten auf. Für jede Person in der Studie wurde die individuelle Strahlen- und Staubbelastung am Arbeitsplatz rekonstruiert. Für verstorbene Kohortenmitglieder werden die Todesursachen ermittelt. Somit bietet die Wismut-Studie eine einzigartige Möglichkeit, aktuelle Forschungsfragen auf der Basis eines großen Studienkollektivs, eines langen Beobachtungszeitraums und detaillierter individueller Informationen zu untersuchen. Einen Schwerpunkt der Forschung bildet dabei der Zusammenhang zwischen Radon und Lungenkrebs im Niedrigdosisbereich. Aus früheren Bergarbeiter-Studien ist bekannt, dass das Einatmen von Radon-Folgeprodukten das Lungenkrebsrisiko erhöht (National Research Council 1999; UNSCEAR 2008). Die genaue Form des Zusammenhangs, insbesondere im Niedrigdosisbereich, und mögliche Zusammenhänge mit anderen Erkrankungen sind jedoch umstritten. Ein weiterer

Abbildung 1: Lage der deutschen Uranbergbau-Region.



wichtiger Untersuchungsgegenstand der Studie ist das Zusammenwirken von Strahlung mit anderen Schadstoffen, wie zum Beispiel Quarzfeinstaub. Die Kohorte umfasst 58.982 Männer (**Tabelle 1**).

Im Mittel waren die Kohorten-Mitglieder etwa 14 Jahre bei der Wismut beschäftigt. Etwa 40 Prozent von ihnen haben ihre Beschäftigung vor 1955 aufgenommen, also in einer Zeit mit sehr hohen Strahlenbelastungen. Jeweils etwa 30 Prozent der Kohorten-Mitglieder begannen zwischen 1955 und 1970 beziehungsweise nach 1970 bei der Wismut zu arbeiten.

## Strahlenbelastung

Für jedes Kohorten-Mitglied wurde die individuelle Strahlenbelastung ermittelt. Dazu wurden Informationen zur Tätigkeit aus Lohn- und Gehaltsunterlagen tagesgenau mit Werten aus einer sogenannten „Job-Exposure-Matrix“ (Lehmann 1998; HVBG und BBG 2005) verknüpft. Diese Job-Exposure-Matrix enthält für über 900 verschiedene Berufe, circa 40 verschiedene Bergbauobjekte und die verschiedenen Arbeitsplätze (unter Tage, über Tage, Tagebau und Aufbereitung) jährliche Schätzwerte für die Strahlenbelastung. Diese beruhen auf vorhandenen Messungen und Expertenabschätzungen, die sich auf detaillierte Informationen zu den Bergbaubedingungen stützen. Jeder Person wurde für jedes Jahr jeweils ein Belastungswert für die Strahlenbelastung durch Radon und seine Folgeprodukte (in WLM<sup>1</sup>), durch externe Gamma-Strahlung (in Millisievert, mSv) und durch langlebige Radio-

<sup>1</sup> Das „Working Level Month“ (WLM) ist eine historische, speziell im Uranbergbau verwendete Einheit. Ein WLM entspricht einer Exposition von  $1,3 \times 10^3$  Megaelektronenvolt potenzieller Alpha-Energie pro Liter Luft über einen Zeitraum von einem Arbeitsmonat (170 Stunden).

Tabelle 1: Beschreibung der Kohorte, 1946–2008.		
Variable	Anzahl	(%)
<b>Kohorten-Mitglieder</b>	58.982	100%
<b>Vitalstatus</b>		
Lebend	31.406	53%
Verstorben	25.438	43%
Nicht zu ermitteln	2.138	4%
<b>Beginn der Beschäftigung</b>		
1946–1954	23.922	41%
1955–1969	16.907	29%
1970–1989	18.153	31%
<b>Ende der Beschäftigung</b>		
1946–1954	2.719	5%
1955–1969	19.594	33%
1970–1989	36.669	62%
<b>Gesamtbelastung durch (Mittelwert/Median/Maximum)<sup>1</sup></b>		
Radon (WLM)	280/33/3 224	
Externe Gamma-Strahlung (mSv)	47/16/909	
Langlebige Radionuklide (kBq/m <sup>3</sup> )	4/1/132	
<b>Personen mit bekannter Todesursache<sup>2</sup></b>	23.939	94%
<b>Ausgewählte Todesursachen (ICD-10-Code)</b>		
Bösartige Neubildungen (C00-C99)	7.780	
darunter Lungenkrebs (C34)	3.500	
Herz-Kreislauf-Erkrankungen (I00-I99)	9.039	
Atemwegserkrankungen (J00-J99)	2.357	
<sup>1</sup> unter den Exponierten.		
<sup>2</sup> unter den Verstorbenen.		

nuklide aus dem Uranstaub (in Kilobecquerel pro Stunde pro Kubikmeter, kBq/m<sup>3</sup>) zugeordnet. Diese Werte wurden dann für jede Person separat über die gesamte Dauer ihrer Wismut-Tätigkeit aufsummiert. Weiterhin wurde für verschiedene Organe (Lunge, Niere, Leber, Magen, rotes Knochenmark) die sogenannte „Organdosis“ berechnet (Marsh et al. 2008; Marsh et al. 2012). Diese ist insbesondere für die Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zwischen Strahlenbelastung und anderen Krebsarten als Lungenkrebs von Bedeutung, da bei gleicher Strahlenbelastung die Dosis für verschiedene Organe sehr unterschiedlich sein kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass die durchschnittliche jährliche Radonbelastung bis 1955 stark ansteigt und dann, nach Verbesserung der Belüftung in den Stollen, deutlich abnimmt. Die mittlere über die Tätigkeitsdauer aufsummierte (kumulierte) Radonbelastung der strahlenbelasteten Kohorten-Mitglieder liegt bei 280 WLM, das Maximum bei 3.224 WLM (Tabelle 1). Etwa 14 Prozent der Kohorten-Mitglieder

waren nicht strahlenexponiert. Diese hatten im Allgemeinen über Tage gearbeitet. Sie bildeten für die Studie eine interne Vergleichsgruppe. Die Belastung durch externe Gamma-Strahlung erreichte ihr Maximum erst in den 1960er Jahren, da sie vor allem vom Urangehalt des Gesteins und der Gewinnungstechnologie abhängt. Der Mittelwert der kumulierten Strahlenbelastung durch externe Gamma-Strahlung liegt bei knapp 50 mSv, das Maximum bei 909 mSv, für die Strahlenbelastung durch langlebige Radionuklide liegen die jeweiligen Werte bei 4 kBq/m<sup>3</sup> beziehungsweise 132 kBq/m<sup>3</sup>. Während die Strahlenbelastung durch Radon und seine Folgeprodukte sehr hoch ist, ist die Strahlenbelastung durch externe Gamma-Strahlung oder langlebige Radionuklide als vergleichsweise gering einzustufen.

## Todesursachen

Die Todesursachen verstorbener Kohorten-Mitglieder werden im Rahmen eines sogenannten

„Follow-up“ alle fünf Jahre durch Anfragen bei den Gesundheitsämtern und den Zentralarchiven in Sachsen und Thüringen ermittelt. Die Information, welche Personen verstorben sind, wird vorab von den Einwohnermeldeämtern erfragt. Bisher wurden drei Follow-up-Perioden bis Ende 1998, 2003 und 2008 abgeschlossen. Zurzeit wird das vierte Follow-up durchgeführt, in dem Todesursachen der bis Ende 2013 verstorbenen Kohorten-Mitglieder ermittelt werden. Im Beobachtungszeitraum 1946–2008, also bis zum Ende des dritten Follow-up, betrug die durchschnittliche Beobachtungsdauer in der Kohorte 37 Jahre. 43 Prozent der Kohorten-Mitglieder waren zu diesem Zeitpunkt verstorben (**Tabelle 1**). Für 94 Prozent der Verstorbenen konnte die Todesursache ermittelt werden. Die häufigste Todesursache waren Herz-Kreislauf-Erkrankungen gefolgt von Krebserkrankungen, darunter 3.500 Lungenkrebs-Todesfälle.

## Vergleich der Sterblichkeit mit der Allgemeinbevölkerung

Die Sterblichkeit in der Wismut-Kohorte wurde mit der Sterblichkeit der Allgemeinbevölkerung in Ostdeutschland verglichen (Kreuzer et al. 2008). Hierzu wurde das sogenannte „Standardisierte Mortalitätsratio“ (SMR) berechnet. Ist das SMR größer 1, so ist die Sterblichkeit in der Wismut-Kohorte höher als in der Allgemeinbevölkerung, ist das SMR kleiner 1, so ist die Sterblichkeit niedriger. Für diese Auswertung wurden die Daten des zweiten Follow-up benutzt. Detaillierte Daten zur Sterblichkeit der DDR-Bevölkerung liegen erst ab 1960 vor, daher umfasst der Auswertungszeitraum für diesen Vergleich die Jahre 1960 bis 2003. Die Lungenkrebssterblichkeit in der Kohorte ist etwa doppelt so hoch wie in der Allgemeinbevölkerung (Anzahl der Fälle,  $n=2.999$ ,  $SMR=2,03$ , 95 %-Konfidenzintervall (KI): 1,96–2,10). Diese starke Erhöhung der Lungenkrebssterblichkeit dürfte für eine leichte Erhöhung der Sterblichkeit insgesamt in der Kohorte ( $n=20.317$ ,  $SMR=1,10$ , 95 %-KI: 1,08–1,11) verantwortlich sein. Während sich die Sterblichkeit für die Gruppe aller Krebserkrankungen ohne Lungenkrebs nicht signifikant von der in der Allgemeinbevölkerung unterscheidet ( $n=3.340$ ,  $SMR=1,02$ , 95 %-KI: 0,98–1,05), werden für Leberkrebs ( $n=154$ ,  $SMR=1,26$ , 95 %-KI: 1,07–1,48) und Magenkrebs ( $n=588$ ,  $SMR=1,15$ , 95 %-KI: 1,06–1,25) erhöhte Werte beobachtet.

Das SMR ermöglicht keine Aussage darüber, welche Einflussgrößen für beobachtete Unterschiede verantwortlich sind. Hierzu ist eine Untersuchung des Sterblichkeitsrisikos in Zusammenhang mit der Höhe der Belastung notwendig.

## Sterblichkeit und Strahlenbelastung

Der Zusammenhang zwischen der Strahlenbelastung und dem Sterberisiko durch Lungenkrebs und andere Erkrankungen wurde mit Hilfe verschiedener Regressionsmodelle analysiert. Dabei wurde zum einen untersucht, um welchen Faktor sich das Risiko im Vergleich zum Risiko nicht Exponierter bei Vorliegen einer bestimmten Radonbelastung erhöht (Relatives Risiko, RR). Zum anderen wurde der Anstieg der Risikoerhöhung mit zunehmender Belastung unter Annahme eines linearen Zusammenhangs ermittelt (Excess Relative Risk, ERR).

### Lungenkrebs

Für die Lungenkrebssterblichkeit ist das relative Risiko in allen Belastungskategorien ab einer Gesamtradonbelastung von 50 WLM statistisch signifikant erhöht (Kreuzer et al. 2010). Das relative Risiko steigt annähernd linear mit der Radonbelastung an und zwar pro 100 WLM um 20 Prozent (95 %-KI: 17%–22%; Walsh et al. 2010a). Dieser Anstieg hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab. So sinkt er mit zeitlichem Abstand zur Exposition, aber selbst nach 35 Jahren ist das Risiko noch signifikant erhöht (Walsh et al. 2010b). Am stärksten ist die Erhöhung des radonbedingten Lungenkrebsrisikos 5 bis 14 Jahre nach Exposition in der Altersgruppe unter 55 Jahren. Unter diesen Bedingungen beträgt der Anstieg des relativen Risikos pro 100 WLM mindestens 57 Prozent und ist damit fast dreimal so hoch wie im Durchschnitt der Kohorte. Wurden bei der Analyse weitere potenzielle Einflussgrößen, wie externe Gamma-Strahlung, langlebige Radionuklide, Quarzfeinstaub oder Arsen berücksichtigt, zeigte sich keine bedeutsame Veränderung der Ergebnisse. Da für die Mehrzahl der Kohorten-Mitglieder keine Informationen zum Rauchen vorhanden sind, wurden in einer eingebetteten Fall-Kontroll-Studie zu Lungenkrebs Informationen zum Rauchverhalten erhoben. Es zeigte sich kein wesentlicher Einfluss des Rauchverhaltens auf das radonbedingte Lungenkrebsrisiko (Schnelzer et al. 2010). Der Zusammenhang zwischen Strahlenbelastung und Sterblichkeit wurde kürzlich auch in einer Untergruppe der Kohorte, den Erzaufberei-

tern, untersucht. Obwohl deren durchschnittliche Radonbelastung mit 8 WLM (Maximum 127 WLM) vergleichsweise gering ist, wurde ein statistisch signifikanter Zusammenhang zur Krebssterblichkeit beobachtet ( $n=159$ ,  $ERR/100$  WLM=171 %, 95 %-KI: 26 %–371 %), der vor allem auf eine Erhöhung der Lungenkrebssterblichkeit zurückzuführen ist (Kreuzer et al. 2014a).

### Andere Erkrankungen

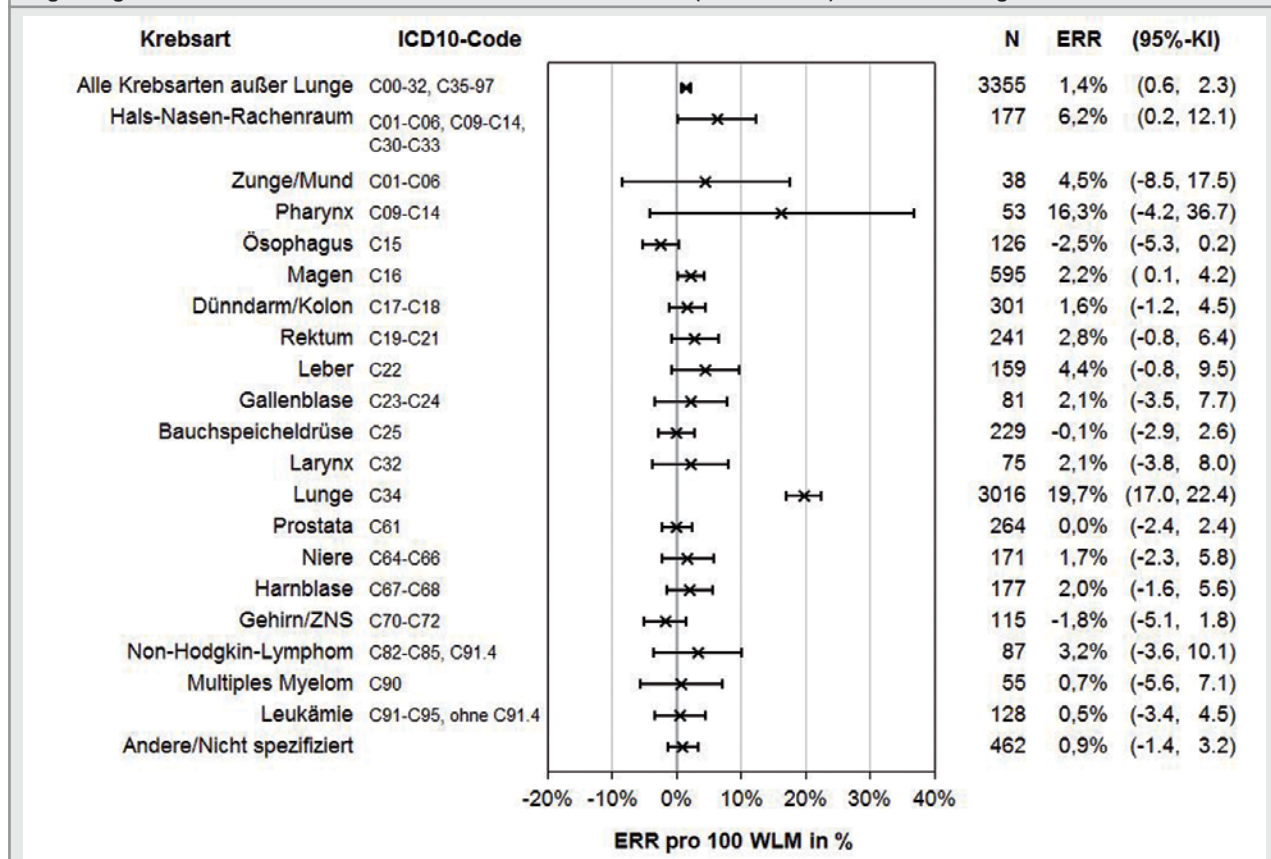
Betrachtet man die Gesamtheit aller Krebserkrankungen außer Lungenkrebs, so zeigt sich in der Kohorte eine geringe, aber statistisch signifikante Erhöhung der Sterblichkeit mit der Radonbelastung ( $ERR/100$  WLM=1,4 %, 95 %-KI: 0,6 %–2,3 %; Kreuzer et al. 2008; **Abbildung 2**).

Auch für die Mehrzahl der einzelnen Tumorlokalisationen ergibt sich ein positiver Zusammenhang zwischen Sterblichkeit und Radonbelastung (Kreuzer et al. 2008; Kreuzer et al. 2010; Walsh et al. 2010a). Diese Erhöhungen sind jedoch nicht signifikant. Die Befunde zum Zusammenhang zwischen Radonbelastung und Tumoren im Hals-Nasen-Rachenraum sind uneinheitlich. Während für das

Follow-up bis 2003 ein statistisch signifikanter Zusammenhang gefunden wurde (Kreuzer et al. 2010), zeigte sich für das Follow-up bis 2008 zwar wiederum ein erhöhtes Risiko, die Erhöhung war jedoch nicht mehr statistisch signifikant (Kreuzer et al. 2014b).

Im Gegensatz zum Hals-Nasen-Rachenraum, für den eine relativ hohe Organdosis aus der Radonbelastung resultiert, beträgt die Dosis für Organe außerhalb des Atemtraktes höchstens ein Hundertstel der Lungendosis. Die Dosis für diese Organe hängt hauptsächlich von der externen Gamma-Strahlung ab, daher wurden hierfür separate Risikoanalysen durchgeführt. Es ergab sich weder für die Sterblichkeit an Leukämie (Dufey et al. 2011), Magenkrebs (Kreuzer et al. 2012), Leberkrebs (Dufey et al. 2013) oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Kreuzer et al. 2010; Kreuzer et al. 2013a) ein statistisch signifikanter Zusammenhang mit der externen Gamma-Strahlung oder der daraus resultierenden Organdosis. Die entsprechende Strahlendosis ist jedoch sehr niedrig. Möglicherweise hat die Studie zurzeit noch nicht das Potenzial, so geringe Risiko-

**Abbildung 2: Zusätzliches Relatives Risiko (Excess Relative Risk, ERR) pro 100 WLM Radonbelastung in Prozent und zugehörige 95 %-Konfidenzintervalle für verschiedene Krebsarten (Sterblichkeit) im Beobachtungszeitraum 1946–2003.**



erhöhungen, wie sie aufgrund einer derart niedrigen Strahlendosis zu erwarten sind, zu entdecken.

Für einen Zusammenhang zwischen Radonexposition und der Sterblichkeit durch chronisch obstruktive Atemwegserkrankungen (COPD), wie er in einer ökologischen Studie zur häuslichen Radonbelastung (Turner et al. 2012) beobachtet wurde, wurden in der Wismut-Studie, trotz deutlich höherer Radonbelastung, ebenfalls keine Hinweise gefunden (Kreuzer et al. 2013b). Das Gleiche gilt für andere nicht-bösartige Atemwegserkrankungen.

## Ausblick

Mit jedem Follow-up vergrößert sich die Aussagekraft der Studie und die Ergebnisse zu bereits untersuchten Fragestellungen werden genauer. Außerdem werden laufend Auswertungen zu neuen Fragestellungen durchgeführt. Hinsichtlich Lungenkrebs werden die Daten der ab 1960 beschäftigten Bergarbeiter, deren Radonbelastung im Allgemeinen relativ gering ist und die zudem besonders zuverlässig bestimmt werden konnte, aktuell gesondert ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Analysen sind vor allem für die Bewertung des Risikos durch die Radonbelastung in Wohnungen relevant. Darüber hinaus ist geplant, die Gesundheitsrisiken nicht nur durch die Sterblichkeit (Mortalität), sondern auch durch das Auftreten von Neuerkrankungen (Inzidenz) zu untersuchen. So ist ein Abgleich zur Krebsinzidenz mit dem Gemeinsamen Krebsregister der neuen Länder in Vorbereitung. Gerade für Erkrankungen mit relativ geringer Sterblichkeit, wie Tumoren im Hals-Nasen-Rachenraum, sind von diesen Daten aufschlussreiche Ergebnisse zu erwarten. Darüber hinaus wurde am BfS eine Bioprobendatenbank aufgebaut, die Blutproben von hoch und niedrig exponierten Wismut-Beschäftigten und DNA aus dem Sektionsmaterial von Lungenkrebspatienten enthält. Dieses Material wird in molekularepidemiologischen Studien verwendet, um Faktoren für individuelle Strahlenempfindlichkeit zu untersuchen und Biomarker für Strahlenbelastung oder Erkrankungen zu entdecken. Um die Aussagekraft der Studie noch weiter zu erhöhen – insbesondere im Hinblick auf niedrige Strahlenbelastungen und seltene Erkrankungen – wird zudem eine gemeinsame Auswertung der europäischen Uranbergarbeiterdaten mit denen kanadischer und US-amerikanischer Uranbergarbeiter angestrebt.

Das BfS stellt die Daten der deutschen Uranbergarbeiter-Studie auch interessierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für eigene Auswertungen zur Verfügung. Informationen hierzu finden sich unter [http://www.bfs.de/en/bfs/forschung/Wismut/Wismut\\_cohort\\_proposals.html](http://www.bfs.de/en/bfs/forschung/Wismut/Wismut_cohort_proposals.html) (Abrufdatum: 14.02.2015).

## Fazit

Die deutsche Uranbergarbeiter-Studie trägt wesentlich zu einer Erweiterung des Wissens zu gesundheitlichen Auswirkungen der Strahlenbelastung durch Radon und seine Folgeprodukte und anderer Schadstoffe bei. Diese Erkenntnisse sind wichtig für den Strahlenschutz und bilden die wissenschaftliche Grundlage für Verfahren zur Anerkennung von Berufskrankheiten. Etwa die Hälfte der bisher beobachteten 3.500 Lungenkrebs-Todesfälle in der Kohorte sind auf die berufliche Strahlenbelastung, vor allem durch Radon und seine Folgeprodukte, zurückzuführen. Auch die berufliche Belastung durch Quarzfeinstaub spielt hierbei eine Rolle (Sogl et al. 2012; Sogl et al. 2013). Die anderen untersuchten beruflichen Belastungen liegen im Unterschied zu Radon und Quarzfeinstaub eher im Niedrigdosisbereich. Mit zunehmendem Beobachtungszeitraum und der Vergrößerung der Datenbasis durch gemeinsame Auswertungen mit anderen Kohorten sind für diesen Bereich, der für heute auftretende Strahlenbelastungen eine wichtige Rolle spielt, weitere wertvolle Erkenntnisse zu erwarten.

## Literatur

- Dufey F, Walsh L, Sogl M et al. (2013): Radiation dose dependent risk of liver cancer mortality in the German uranium miners cohort 1946-2003. In: *J Radiol Prot.* 33(1): 175–185.
- Dufey F, Walsh L, Tschense A et al. (2011): Occupational doses of ionizing radiation and leukemia mortality. In: *Health Phys.* 100(5): 548–50.
- HVBG und BBG (2005): Belastung durch ionisierende Strahlung, Staub und Arsen im Uranerzbergbau der ehemaligen DDR (Version 08/2005). Gera: Bergbau BG (BBG). St. Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) (CD-ROM).
- Kreuzer M., Dufey F, Laurier D et al. (2014a): Mortality from internal and external radiation exposure in a cohort of male German uranium millers, 1946-2008. In: *Int Arch Occup Environ Health.* Advance Access published Aug 19. DOI: 10.1007/s00420-014-0973-2.

- Kreuzer M, Dufey F, Marsh J et al. (2014b): Mortality from cancers of the extra-thoracic airways in relation to radon progeny in the Wismut cohort, 1946-2008. In: *Int J of Radiat Biol.* 90(11): 1030–5.
- Kreuzer M, Dufey F, Sogl M et al. (2013a): External gamma radiation and mortality from cardiovascular diseases in the German WISMUT uranium miners cohort study, 1946-2008. In: *Radiat Environ Biophys.* 52(1): 37–46.
- Kreuzer M, Sogl M, Brüske I et al. (2013b): Silica dust, radon and death from non-malignant respiratory diseases in German uranium miners. In: *Occup Environ Med.* 70: 869–875.
- Kreuzer M, Straif K, Marsh JW et al. (2012): Occupational dust and radiation exposure and mortality from stomach cancer among German uranium miners, 1946-2003. In: *Occup Environ Med.* 69(3): 217–23.
- Kreuzer M, Grosche B, Schnelzer M et al. (2010): Radon and risk of death from cancer and cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study: follow-up 1946-2003. In: *Radiat Environ Biophys.* 49(2): 177–85.
- Kreuzer M, Walsh L, Schnelzer M et al. (2008): Radon and risk of extrapulmonary cancers: results of the German uranium miners' cohort study, 1960-2003. In: *Br J Cancer* 99(11): 1946–53.
- Lehmann F, Hambeck L, Linkert KH et al. (1998): Belastung durch ionisierende Strahlung im Uranerzbergbau der ehemaligen DDR. St. Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften.
- Marsh JW, Blanchardon E, Gregoratto D et al. (2012): Dosimetric calculations for uranium miners for epidemiological studies. In: *Radiat Prot Dosim.* 149(4): 371–83.
- Marsh JW, Bessa Y, Birchall A et al. (2008): Dosimetric models used in the Alpha-Risk project to quantify exposure of uranium miners to radon gas and its progeny. In: *Radiat Prot Dosim.* 130(1): 101–106.
- National Research Council (1999): Health effects of exposure to radon (BEIR VI). Washington, D. C.: National Academy Press.
- Schnelzer M, Hammer G, Kreuzer M et al. (2010): Accounting for smoking in the radon-related lung cancer risk among German uranium miners: results of a nested case-control study. In: *Health Phys.* 98(1): 20–28.
- Sogl M, Taeger D, Pallapies D et al. (2013): Lungenkrebs durch Quarzfeinstaub bei Deutschen Uranbergarbeitern. In: *UMID* 3: 25–30.
- Sogl M, Taeger D, Pallapies D et al. (2012): Quantitative relationship between silica exposure and lung cancer mortality in German uranium miners, 1946-2003. In: *Br J Cancer* 107(7): 1188–94.
- Turner MC, Krewski D, Chen Y et al. (2011): Radon and lung cancer in the American Cancer Society cohort. In: *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 20(3):438–48.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) Effects of Ionizing Radiation (2008): UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly. New York: United Nations.
- Walsh L, Dufey F, Tschense A et al. (2010a): Radon and the risk of cancer mortality-internal poisson models for the German uranium miners cohort. In: *Health Phys.* 99(3): 292–300.
- Walsh L, Tschense A, Schnelzer M et al. (2010b): The influence of radon exposures on lung cancer mortality in German uranium miners, 1946-2003. In: *Radiat Res.* 173(1): 79–90.
- Wismut GmbH (1999): Chronik der Wismut. Chemnitz: Wismut GmbH. CD-ROM.

## Kontakt

Dr. Maria Schnelzer  
 Bundesamt für Strahlenschutz  
 Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit  
 AG-SG 1.3 Strahlenepidemiologie und Strahlenrisiko  
 85762 Oberschleißheim  
 E-Mail: mschnelzer[at]bfs.de

[BfS]