

Wissenschaftliche Stellungnahme
zu der Berufskrankheit Nr. 2402 der Anlage 1 zur Berufskrankheiten-Verordnung
„Erkrankungen durch ionisierende Strahlen“

- Bek. des BMAS vom 24.10.2011 - IVa 4-45222-2402 -
GMBI. 2011, Nr. 49-51, S. 983-993

Der Ärztliche Sachverständigenbeirat „Berufskrankheiten“ beim Bundesministerium für Arbeit und Soziales gibt zu der genannten Berufskrankheit folgende wissenschaftliche Stellungnahme ab; diese Stellungnahme ersetzt das bisherige Merkblatt zu der Berufskrankheit (Bek. des BMA vom 13.05.1991, BArbBl. (1991) Nr. 7-8 S. 72 ff.):

I. Vorkommen und Gefahrenquellen

A. Anwendungen ionisierender Strahlung

Ionisierende Strahlen sind in der Lage, aus Atomen bzw. Molekülen Elektronen abzutrennen. Man unterscheidet Photonenstrahlung (Röntgenstrahlen, Gammastrahlen) und Teilchenstrahlung (Alphastrahlen, Betastrahlen, Protonen, andere beschleunigte Ionen und Neutronen).

Der Einsatz ionisierender Strahlung in der Industrie und Medizin umfasst einen weiten Anwendungsbereich. Dieser reicht von der Verwendung von Ionisationsrauchmeldern mit einer sehr geringen Gefährdung beim bestimmungsgemäßen Umgang bis hin zu Großbestrahlungsanlagen mit einem sehr großen Radioaktivitätsinventar und einem damit verbundenen sehr hohen Gefährdungspotential.

1. Strahlungsarten

Je nach Herkunft der Strahlung unterscheidet man verschiedene Strahlungsarten. Künstlich erzeugte ionisierende Strahlung unterscheidet sich hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Menschen nicht von der überall vorhandenen ionisierenden Strahlung aus natürlichen Strahlenquellen.

Röntgenstrahlen werden in Röntgengeräten durch das Auftreffen von beschleunigten Elektronen auf die Anode erzeugt. Die Strahlungsenergie der entstehenden Röntgenstrahlung hängt von der Beschleunigungsspannung ab. Erst ab einer anliegenden Spannung von mehr als 5.000 Volt ist eine Strahlungsgefährdung zu betrachten.

Radioaktive Stoffe sind Elemente, die von selbst zerfallen und dabei – je nach Radionuklid - verschiedene Strahlungsarten aussenden können. Es gibt Alpha-, Beta- und Gammastrahler. Die ersten beiden Strahlungsarten gehören zur sogenannten Teilchenstrahlung. Alphateilchen sind zweifach positiv geladene Heliumatome und Betateilchen können Elektronen oder deren Antiteilchen, die Positronen, sein.

Meist sind die Radionuklide aber keine reinen Alpha- oder Betastrahler, sondern es entsteht zusätzlich auch noch Gammastrahlung. Diese unterscheidet sich hinsichtlich Ihrer Natur nicht von der Röntgenstrahlung. Beide gehören zur elektromagnetischen Strahlung. Die Röntgenstrahlung entsteht in der Atomhülle, die Gammastrahlung im Atomkern. Bei sehr schweren Radionukliden wie Uran können zusätzlich auch noch Neutronen freigesetzt werden. Auf hohe Energien beschleunigte Elektronen oder Ionen können auf der getroffenen Materie selbst wieder die vorgenannten Strahlungsarten auslösen.

2. Anwendungsbeispiele

Eine weit verbreitete Anwendung ionisierender Strahlung kommt in der medizinischen Diagnostik und Therapie zum Einsatz. Insbesondere bei der interventionellen Radiologie, in der Unfallchirurgie, bei kardiologischen Untersuchungen und in der Nuklearmedizin kann das medizinische Personal beruflich bedingt einer Strahlenexposition ausgesetzt sein. In der Nuklearmedizin werden etwa 20 verschiedene Radionuklide zur Diagnostik und Therapie verwendet.

Im Uranerzbergbau der früheren DDR (WISMUT) waren die Bergleute je nach Einsatz zum Teil erheblichen Strahlenexpositionen durch die Inhalation von Radon und den staubförmigen Radionukliden des Urans und dessen Folgeprodukten ausgesetzt. In den ersten Jahren wurden dabei kaum Strahlenschutzmaßnahmen getroffen, was je nach Arbeitsplatz zu erheblichen Expositionen führen konnte. Auch heute können an untertägigen Arbeitsplätzen und in Betrieben der Wasserwirtschaft noch Radonexpositionen auftreten, in der Regel allerdings in deutlich geringerer Expositionshöhe.

Röntgengeräte werden in der Industrie zur Materialprüfung, zur Positionierung, zur Füllstandsmessung, zur Dickenmessung und zur Dichtemessung eingesetzt. In der Medizin werden sie zur Diagnose und zur Therapie verwendet.

Eine der häufigsten Anwendungen in Fertigungsbetrieben sind sogenannte „Vollschutzgeräte“ zum Beispiel zur Qualitätssicherung oder zur Positionierung von Bauteilen. Es handelt sich dabei um Röntgengeräte, die so konstruiert sind, dass auch ein in

Strahlenschutzfragen unkundiger Laie das Gerät ohne Risiko bedienen kann. Eine etwas niedrigere Schutzstufe haben die bauartzugelassenen „Hochschutzgeräte“.

Bei den Feinstruktur-Röntengeräten werden Materialeigenschaften untersucht. Aufgrund der hohen Dosisleistungen besteht bei diesen Geräten die Möglichkeit einer lokalen hohen Strahlenexposition z. B. an den Händen.

Auch in sogenannten Störstrahlern entsteht Röntgenstrahlung. Bei bestimmten technischen Anwendungen wird diese nicht gewünschte Störstrahlung freigesetzt. Dies ist z. B. in Elektronenröhren wie Thyratrons, Klystrons, Wanderfeldröhren und Bildschirmröhren der Fall. Auch in Elektronenmikroskopen, bei der Erzeugung von Radarstrahlung, in Elektronenstrahlschweißgeräten und in Elektronenstrahlverdampfungsanlagen entsteht diese Störstrahlung.

Bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung werden Werkstücke mittels ionisierender Strahlung untersucht, wie z. B. die Qualität von Schweißnähten oder der Zustand von Brückenlagern. Diese Prüfungen müssen oft unter ortsveränderlichem Einsatz erfolgen. Zudem erfordern die zu durchstrahlenden Werkstücke meist eine höhere Energie der eingesetzten Strahlung. Aus diesem Grund werden neben Röntengeräten auch umschlossene Gammastrahler für diese Prüfungen eingesetzt. Verwendung finden überwiegend die Isotope Cs-137, Co-60, Ir-192 und Se-75. Die Aktivitäten liegen zwischen einem GBq und einem TBq. Die verwendeten Strahlenquellen erzeugen unabgeschirmt eine relativ hohe Dosisleistung und bergen somit ein großes Gefährdungspotential.

Bei der Herstellung von Endlosbahnen muss die Materialdicke beim Herstellungsprozess kontinuierlich überwacht werden. Diese Messaufgabe lässt sich bei laufenden Bahnen ohne Berührung des Materials mittels ionisierender Strahlen zuverlässig bewerkstelligen. Daher kommen in vielen dieser Fertigungsbetriebe entsprechende Dickenmessgeräte zum Einsatz. Je nach Messanforderung ist die Ausführung dieser Dickenmessgeräte mit umschlossenen radioaktiven Quellen oder mit Röntengeräten möglich.

In vielen galvanischen Betrieben, aber auch in anderen Fertigungsbetrieben, wird die Schichtdicke von aufgetragenen Oberflächenvergütungen mittels Schichtdickenmessgeräten überprüft. Bei diesen Geräten handelt es sich um spezielle Röntengeräte, die über die rückgestreute Röntgenstrahlung die Schichtdicke und je nach Ausführung gleichzeitig auch die Zusammensetzung der Oberflächenschicht messen können. Die Geräte gibt es auch als tragbare Röntgenfluoreszenzgeräte (RFA).

In Ionisationsrauchmeldern kommen geringe Mengen von Alphastrahlern zum Einsatz. Überwiegend wird das Nuklid Am-241 mit Einzel-Aktivitäten bis etwa 33 kBq eingesetzt. Früher wurde auch Ra-226 verwendet.

Bei radiometrischen Messungen zur Bestimmung der Füllstandshöhe in Behältern werden Gammastrahler wie Co-60 oder Cs-137 verwendet. Die verwendeten Aktivitäten liegen in der Größenordnung bis zu einigen GBq. Damit keine Mitarbeiter gefährdet werden, die sich in der Nähe des Behälters aufhalten müssen, sind die umschlossenen Strahler so abgeschirmt, dass außerhalb des Behälters kaum noch Strahlung austritt. Bei den meisten Anwendungen dieser Art der radiometrischen Messung ist der Kontrollbereich daher auf einen kleinen Bereich um den Strahler herum begrenzt. Messeinrichtungen dieser Art gibt es auch als Durchflussmeseinrichtungen, als Flächengewichtsmeseinrichtung, als Feuchtegehaltmeseinrichtung oder zur Bestimmung der Schütthöhe von Materialien auf Fließbändern.

In Großbestrahlungseinrichtungen werden bestimmte Produkte mit sehr hohen Dosen bestrahlt. Dieses Verfahren wird z. B. zur Sterilisation von medizinischen oder kosmetischen Produkten oder zur Veränderung von Materialeigenschaften wie Kunststoffen angewendet. In diesen Anlagen kommen sehr große Co-60-Strahlenquellen mit Aktivitäten bis zu 1.016 Bq zum Einsatz. Die Dosisleistung in der Anlage beträgt mehrere kGy pro Stunde. Aufgrund der sehr restriktiven Strahlenschutzmaßnahmen liegen die amtlichen Dosiswerte der Mitarbeiter in diesen Anlagen jedoch fast immer unterhalb der Erkennungsgrenze der Dosimeter.

In Beschleuniger-Anlagen kann während des Betriebes auch eine sehr hohe Dosisleistung auftreten. Es gibt Elektronenbeschleuniger die z. B. bei der Vernetzung von Kunststoffen eingesetzt werden oder auch Ionenbeschleuniger im Forschungsbereich oder zur Krebstherapie.

Der Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen ist im industriellen Bereich im Wesentlichen in der Kerntechnik, bei der Herstellung von Radiometriegegeräten und bei der Herstellung bestimmter Produkte zu finden.

Das fliegende Personal (Piloten und Besatzung) ist beruflich bedingt einer Strahlenexposition durch die in den üblichen Flughöhen erhöhte kosmische Strahlung ausgesetzt.

B. Expositionsmöglichkeiten

Bei der Exposition gegenüber ionisierender Strahlung muss man grundsätzlich zwischen einer Strahlenexposition von außen und einer Inkorporation, d. h. der Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper unterscheiden. Ein Maß für die Höhe der Exposition ist die Dosis, wobei zwischen verschiedenen Dosisbegriffen unterschieden wird.

Zum Schutz der Beschäftigten und der Bevölkerung legen die maßgebenden Rechtsvorschriften, die Röntgenverordnung und die Strahlenschutzverordnung, eine Vielzahl von Strahlenschutzmaßnahmen fest. Grundsätzlich wird in diesen Verordnungen zwischen der genehmigungsbedürftigen, der anzeigebedürftigen und der genehmigungs- und anzeigefreien Anwendung ionisierender Strahlung unterschieden.

1. Genehmigungs- und anzeigefreie Anwendungen

Bei den letztgenannten ist – abgesehen von Stör- oder Unfällen – nur von einer sehr geringfügigen Expositionsmöglichkeit auszugehen. Beispiele hierfür sind die Verwendung von Ionisationsrauchmeldern, der Betrieb von bestimmten Störstrahlern mit sehr geringer Strahlungsemission und der geringfügige Umgang mit radioaktiven Stoffen unterhalb der sogenannten Freigrenzen nach Strahlenschutzverordnung.

2. Anzeigebedürftige Anwendungen

Bei Anwendungen, die eine etwas höhere Strahlenmenge freisetzen können, fordert der Gesetzgeber eine Anzeige an die Behörde. Typische Anwendungen sind z. B. der Betrieb von bauartzugelassenen Röntgengeräten, wie Vollschutzgeräten, der Betrieb von bestimmten Störstrahlern und der Betrieb von bestimmten Beschleunigern. Die Expositionshöhe der Beschäftigten bei diesen Anwendungen liegt oft unterhalb von einem mSv jährlich. Eine dosimetrische Überwachung der an solchen Anwendungen tätigen Personen ist daher meist nicht erforderlich.

3. Genehmigungsbedürftige Anwendungen

Bei fast allen Anwendungen, bei denen eine Genehmigung erforderlich ist, liegt auch ein erhöhtes Gefährdungspotential vor, weshalb die dort tätigen Personen auch dosimetrisch überwacht werden müssen. Als Anwendungsbeispiele seien genannt: Tätigkeiten im Kernbrennstoffkreislauf, die zerstörungsfreie Materialprüfung, die Herstellung von radiometrischen Messeinrichtungen, der Betrieb von Beschleunigern, die Verwendung von Röntgengeräten zur Diagnostik oder Therapie und die Tätigkeit in der Nuklearmedizin.

Eine jährliche Dosis oberhalb von einem mSv ist dann möglich. Die meisten der über 300.000 beruflich strahlenexponierten Personen in Deutschland haben jedoch Jahresdosiswerte unterhalb von 5 mSv. Nur einige wenige erreichen die Größenordnung des Jahresgrenzwerts von 20 mSv und in ganz wenigen Fällen kann dieser aufgrund von unfallartigen Ereignissen oder Störfällen überschritten werden.

4. Externe Exposition

Bei einer ganzen Reihe von Anwendungen ionisierender Strahlung kann nur eine externe Exposition auftreten. Dies sind z. B. alle Röntgenanwendungen. Dies betrifft auch Elektronenbeschleuniger und Störstrahler bis zu einer Spannung von einer Million Volt.

Beim Umgang mit radioaktiven Stoffen unterscheidet man zwischen sogenannten „offenen radioaktiven Stoffen“ und „umschlossenen radioaktiven Stoffen“. Die Definition ist in der Strahlenschutzverordnung niedergelegt. Bei den letztgenannten ist die Aktivität so umhüllt, dass bei üblicher betriebsmäßiger Beanspruchung ein Austritt dieser Stoffe und somit eine Inkorporation ausgeschlossen sein sollte. Bei diesen Anwendungen ist zunächst also nur mit einer externen Exposition zu rechnen.

5. Inkorporationen

Bei diversen Anwendungen im industriellen und medizinischen Bereich wird mit offenen radioaktiven Stoffen umgegangen. So z. B. in der Kerntechnik, bei der Herstellung von umschlossenen Strahlenquellen, bei der Herstellung bestimmter Produkte, in der Forschung und bei nuklearmedizinischen Diagnostiken und Therapien. Die Arbeitsschutz- und Strahlenschutzbestimmungen sind heute so ausgerichtet, dass beim normalen Betriebsablauf Inkorporationen beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen so gering wie möglich gehalten werden. Bei Stör- und Unfällen kann es jedoch zu höheren Freisetzungen und damit verbundenen höheren Inkorporationen kommen.

Bei der Radiometrie und der Werkstoffprüfung werden umschlossene Strahlenquellen verwendet. Bei Stör- oder Unfällen kann es im Extremfall aber auch zu einer Beschädigung der Umhüllung und zu einem Austritt radioaktiver Stoffe kommen. Dann ist auch immer mit einer Inkorporation zu rechnen.

Teilchen- oder Elektronenbeschleuniger sowie Störstrahler, die mit einer Spannung oberhalb von einer Million Volt betrieben werden, können künstliche radioaktive Stoffe erzeugen, die dann in der Regel auch offene radioaktive Stoffe sind.

In den menschlichen Körper aufgenommene Radionuklide können je nach Radionuklid und chemischer Zusammensetzung unterschiedlich lange im Körper verbleiben und währenddessen dort zu einer Strahlenexposition führen. Ein Teil der Aktivität kann über Urin und Stuhl wieder abgegeben werden, bei einigen Radionukliden verbleibt jedoch ein großer Teil im Körper und reichert sich in bestimmten Organen an.

Die Zeit, nach der nur noch die Hälfte der ursprünglich aufgenommenen Aktivität vorhanden ist, nennt man „effektive Halbwertszeit“. Sie setzt sich aus der physikalischen Halbwertszeit und der biologischen Halbwertszeit zusammen. Biologische Halbwertszeiten können je nach Nuklid im Bereich weniger Tage (z. B. Tritium, wenn es in Form von Tritiumwasserstoff oder Tritiumwasser aufgenommen worden ist) oder bei vielen Jahren liegen (z. B. Strontium).

C. Expositionsermittlungen

Für Zwecke des Risikovergleichs und für präventive Maßnahmen ist die Größe der effektiven Dosis eingeführt worden. Ein Schätzwert für diese Größe ist z. B. der Messwert, der mit den amtlichen Dosimetern bei beruflich strahlenexponierten Personen gemessen wird. Diese Dosiswerte werden auch im Strahlenpass eingetragen, der für solche Personen gesetzlich vorgeschrieben ist, die in fremden Anlagen tätig werden und dort mehr als 1 mSv pro Jahr erhalten können.

Nach Inkorporationen kann die Dosis mittels aufwändiger Berechnungsverfahren aus diversen Messungen abgeschätzt werden. Da aufgenommene Radionuklide meist eine längere Verweildauer im menschlichen Körper haben, berechnet man dabei die sogenannte 50-Jahre-Folgedosis. Das ist die Dosis, die im Laufe der 50 Jahre nach Inkorporation im Körper entsteht. In diesen Fällen werden z. B. Messungen der Urin- oder Stuhlausscheidungen, Ganzkörpermessungen oder Messungen der Raumluftaktivitätskonzentration herangezogen. Auch die daraus resultierenden und zu dokumentierenden Dosiswerte sind meist Werte der effektiven Dosis. Sie werden aus buchungstechnischen Gründen und zum Zweck der Prävention gemäß den Forderungen der Strahlenschutzverordnung dem Jahr der Zufuhr zugeschrieben. Bei Berufskrankheitenverfahren muss man jedoch im Einzelfall prüfen, welcher Anteil dieser gesamten Inkorporationsdosis bis zum Zeitpunkt der Diagnose angefallen ist.

Die Abschätzung der beruflichen Strahlenexposition ehemaliger Beschäftigter der SAG/SDAG Wismut erfolgt über eine sogenannte Job-Exposure-Matrix (JEM) (Lehmann et al. 1998), die speziell für Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren von der Bergbau-Berufsgenossenschaft (BBG) in Gera entwickelt wurde und in Zusammenarbeit mit der

Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) in ein automatisiertes Computerprogramm umgesetzt wurde. Die JEM liefert Informationen zur jährlichen Exposition gegenüber Radon und seinen Folgeprodukten in Working Level Months* (abgekürzt WLM), externe Gammastrahlung in mSv und langlebige Radionuklide in kBq/m³. Dies geschieht in Abhängigkeit von Expositionsjahr (1946-1990), Tätigkeit, Tätigkeitsort (über Tage, unter Tage, Aufbereitung, Tagebau, etc.) und Bergbauobjekt. Insgesamt wurden dazu mehr als 1.000 verschiedene Tätigkeiten hinsichtlich ihrer Exposition in Relation zur Referenzkategorie eines Hainers unter Tage bewertet sowie 35 verschiedene Bergbauobjekte. Da im Wismut-Untertagebau auch mit der Exposition gegenüber weiteren Arbeitsstoffen mit genotoxischer humankanzerogener Potenz zu rechnen ist, ist für die Frage der beruflichen Verursachung eines Lungenkrebses auch die gemeinsame Wirkung von ionisierender Strahlung und des/der anderen Lungenkanzerogene zu beurteilen. Dabei ist zu prüfen, ob die verschiedenen Einwirkungen jede für sich eine wesentliche Teilursache im Sinne des Berufskrankheitenrechts waren. Es ist auch daran zu denken, dass die Einwirkungen nicht notwendigerweise parallel, sondern konsekutiv aufgetreten sind. Weitere Hinweise finden sich im Anhang 4.

Im Hinblick auf die Kausalitätsfrage in einem Berufskrankheitenverfahren ist ausschließlich die Dosis im erkrankten Organ maßgebend. In Abhängigkeit der Expositionsbedingungen, insbesondere in Abhängigkeit der Energie der Strahlung, kann diese Organdosis von der effektiven Dosis deutlich unterschiedlich sein. Im speziellen Einzelfall sollte die Berechnung der relevanten Organdosis durch einen erfahrenen Dosimetristen durchgeführt werden, insbesondere wenn Inkorporationen zur Exposition beigetragen haben.

Ist von der betroffenen Person kein Dosimeter getragen worden, so kann man auch retrospektiv eine Dosis abschätzen. Durch die biologische Dosimetrie kann bei einmaligen Expositionen ab etwa 50 mSv bis 100 mSv aufgrund von Veränderungen im Blut eine Dosis abgeschätzt werden. Hilfreich kann in Einzelfällen der Nachweis von langlebigen Radikalen in Zähnen mit Hilfe der Elektronen-Spin-Resonanz-Technik sein. Es gibt auch die Möglichkeit, durch Messung der Ortsdosis an der Emissionsquelle eine Dosis für die betroffene Person zu bestimmen, wenn die Aufenthaltszeit der Person im Strahlungsfeld bekannt ist.

II. Pathophysiologie

Alle energiereichen ionisierenden Strahlen lösen beim Auftreffen auf Materie physikalischchemische Reaktionen aus, die im lebenden Gewebe zu Störungen der Zelltätigkeit, zum Zelltod und damit zu funktionellen und morphologischen

Veränderungen führen können. Durch die Körperoberfläche, d. h. von außen einwirkende ionisierende Strahlen (externe Exposition) haben im Organismus bei identischer Dosis im Zielorgan prinzipiell die gleiche Wirkung wie die Strahlen, die von inkorporierten (über Atem- und Verdauungswege oder Haut und Schleimhaut) radioaktiven Stoffen ausgehen (interne Exposition).

Das Ausmaß der biologischen Wirkung ist abhängig von physikalischen Komponenten, wie

1. absorbierter Strahlenmenge (Dosis),
2. Strahlenart,
3. zeitlicher Verteilung der Dosis (Dosisleistung, ein- oder mehrmalige Bestrahlung in kürzeren oder längeren Zeitabständen),
4. räumlicher Verteilung der Dosis (Ganzkörperbestrahlung, lokale Bestrahlung)

und von biologischen Faktoren, wie

5. Alter, Geschlecht, Gesundheits- und Ernährungszustand, Temperatur des exponierten Individuums,
6. Strahlenempfindlichkeit des betroffenen Gewebes.

Bei Inkorporation spielen die physikalische Halbwertszeit und das Stoffwechselverhalten des radioaktiven Stoffes eine entscheidende Rolle.

III. Krankheitsbild und Diagnose

Man unterscheidet deterministische und stochastische Strahlenwirkungen. Bei den deterministischen Wirkungen muss eine Schwellendosis überschritten werden, damit der Effekt eintritt; bei den stochastischen Strahlenwirkungen wird im Strahlenschutz keine Schwellendosis angenommen.

A. Akuter Strahlenschaden nach Ganzkörperbestrahlung

Der akute Strahlenschaden nach Ganzkörperbestrahlung beruht meistens auf einem Unfall. Im Vordergrund stehen bei Dosen über 1 Gy zunehmend Schäden der Zellerneuerungssysteme für Blut und des Darmepithels. Das Bild der akuten Strahlenkrankheit aggraviert mit steigender Dosis und ist gekennzeichnet durch das sogenannte akute Strahlensyndrom. Hierzu gehören u. a. in der Frühphase Kopfschmerzen, Übelkeit, Brechreiz, Abgeschlagenheit, Appetitmangel und später insbesondere

Infektanfälligkeit sowie Blutgerinnungsstörungen mit Blutungen in Haut und Schleimhäuten; auch blutige Durchfälle und Erbrechen können auftreten. Bei entsprechend hoher Dosis (2 Gy und höher) fällt bereits in den ersten Stunden bis Tagen nach dem Strahleninsult die Lymphozytenzahl im zirkulierenden Blut ab; die übrigen Blutelemente (Granulozyten, Thrombozyten, Erythrozyten) folgen dosisabhängig und entsprechend ihrer biologischen Lebenszeit in späteren Tagen, da die Zellerneuerung im Knochenmark geschädigt ist.

B. Akuter lokaler Strahlenschaden nach Teilkörperbestrahlung

Bei Bestrahlung größerer Körperabschnitte können die Symptome des lokalen Schadens mit den unter A genannten Allgemeinerscheinungen verbunden sein.

1. Ein akuter Schaden der Haut infolge beruflicher Tätigkeit ist vorwiegend an den Händen lokalisiert und beginnt mit einem meist juckenden Erythem, das je nach Dosis in Wochen, Tagen oder Stunden mit wechselnder Intensität in Erscheinung tritt. Sehr hohe Dosen verursachen Nekrose (Ulcus).
2. Ein akuter Schaden der Schleimhaut kann etwas früher als der akute Schaden der Haut auftreten und besteht wie dieser in Erythem, Erosion mit Blutungen und ggf. Nekrose.
3. Ein akuter Schaden des Auges äußert sich überwiegend in einer entzündlichen Veränderung der Bindehaut.
4. Ein akuter Schaden der Keimdrüsen äußert sich in temporärer oder dauernder Sterilität mit Amenorrhoe bzw. Oligo-Azoospermie.

Die unter Ziff. 1 bis 4 genannten Schäden sind nur bei Einwirkung höherer Dosen (1 Gy und höher) zu erwarten.

C. Chronischer allgemeiner Strahlenschaden nach Ganzkörperbestrahlung

Ein chronischer allgemeiner Strahlenschaden nach Ganzkörperbestrahlung kann sich durch einmalige Einwirkung einer hohen Strahlendosis als Folge einer akuten Strahlenschädigung wie auch durch wiederholte Einwirkung kleinerer Dosen entwickeln. Die unter A geschilderten Symptome können bei geringeren Strahlendosen bzw. geringer Dosisleistung fehlen oder in abgeschwächter Form auftreten, und dennoch werden später Strahleneffekte hervorgerufen (s. Abschnitt E).

D. Chronischer lokaler Strahlenschaden nach Teilkörperbestrahlung

Akute oder chronische Teilkörperbestrahlungen verursachen Spätschäden (s. Abschnitt E). Besondere Beachtung verdient:

1. Bei externer Bestrahlung kommt es immer zu einer Exposition der Haut. Ein chronischer Schaden der Haut äußert sich nach hohen Strahlendosen (mehrere Gy und höher) in Atrophie mit pergamentartiger Beschaffenheit der Haut sowie in Pigmentverschiebung, ungleichmäßiger Pigmentierung, Trockenheit infolge Störung der Talg- und Schweißdrüsenabsonderung, Dauerepilation, trockener Abschilferung, Verhornung, Rhagadenbildung und Teleangiektasie. Außerdem können Wachstumsstörungen mit Längsriffelung und Brüchigkeit der Nägel auftreten. Ekzeme und schmerzhafte Ulzerationen sowie Hyperkeratosen und Hautkarzinome sind möglich.
2. Chronischer Schaden der Atemwege und der Lunge: U. a. kommt es bei der Förderung von Pechblende-Erz, welches Radium, dessen Zerfallsprodukte und andere radioaktive Stoffe enthält, durch Inhalation zur lokalen Exposition der Atemwege. Nach mehrjähriger Einwirkungszeit können chronische Schäden (z. B. Lungenfibrosen) und Lungenkrebs (sog. „Schneeberger Lungenkrankheit“) auftreten. Die Zerfallsprodukte des Radiums (Radon u. a.), welche vorwiegend über die Atemwege aufgenommen werden, spielen dabei eine wichtige Rolle.
3. Chronische Schäden an anderen Organen können auch durch Strahleneinwirkung inkorporierter radioaktiver Stoffe auftreten. Sie finden sich am häufigsten bei den sogenannten kritischen Organen, d. h. denjenigen Organen, in denen sich radioaktive Stoffe bevorzugt ablagern (z. B. Schilddrüse für Jod, Knochen für Strontium, Polonium u. a.).

E. Strahlenspätsschäden

Strahlenspätsschäden können sowohl nach einmaliger Einwirkung einer hohen Dosis als auch nach langzeitiger oder wiederholter Einwirkung kleiner Dosen auftreten. Der Strahlenexposition folgt eine längere symptomfreie Latenzzeit; eine akute Strahlenkrankheit muss dabei nicht vorausgegangen sein. Neben o. g. Spätsschäden der Haut und der Atemwege sind vor allem Leukämien und andere maligne Tumoren, ggf. auch benigne Tumoren, als strahlenbedingte Spätsschäden bedeutsam (s. Anhang 2). Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Erkrankungen ist dosisabhängig. Zu beachten sind als Strahlenspätsschäden auch Katarakte, von denen man bis vor kurzem annahm, dass sie zu den deterministischen Effekten gehören und dementsprechend mit Schwellendosen einhergehen. Dies wird inzwischen in Frage gestellt, da mehrere umfangreiche Datensätze darauf hindeuten, dass für den Fall, dass überhaupt Schwellendosen existieren, diese deutlich niedriger liegen als früher angenommen (also deutlich niedriger als etwa 2 Gy nach akuter und etwa 6 Gy nach chronischer Exposition). Die wissenschaftliche Diskussion auf diesem Gebiet ist zur Zeit noch nicht abgeschlossen.

IV. Weitere Hinweise

Bei der Beurteilung, ob eine Erkrankung auf eine Strahlenexposition zurückzuführen ist, ist immer der individuelle Fall zu betrachten. So ist die Überschreitung von Grenzwerten kein Kriterium für die Kausalität im Rahmen der Beurteilung wie auch die Einhaltung der Grenzwerte nicht automatisch eine Verneinung des Kausalzusammenhanges begründet. Die ICRP-Strahlungswichtungsfaktoren können nicht verwendet werden, vielmehr sind beispielsweise nach Photoneneinwirkung die tatsächlich aufgetretenen Photonenenergien zu berücksichtigen; Basis für die Risikobetrachtungen sind immer die Strahlendosen, die in dem für die Erkrankung kritischen Organ aufgetreten sind; falls Anhaltspunkte für eine erhöhte Strahlenempfindlichkeit vorliegen, so ist dies zu berücksichtigen. Daher sind eine eingehende Arbeitsanamnese unter Berücksichtigung technischer Einzelheiten am Arbeitsplatz, der Ergebnisse der Personen- und Ortsdosismessungen, anderer unter II genannter physikalischer und biologischer Faktoren sowie der für den Arbeitsplatz getroffenen Strahlenschutzmaßnahmen von entscheidender Bedeutung.

Besonders ist zu prüfen, ob es sich beim Umgang mit radioaktiven Stoffen um offene oder umschlossene Präparate gehandelt hat. Bei Arbeiten mit offenen Präparaten ist die Möglichkeit einer Kontamination oder Inkorporation gegeben. Ggf. ist der Nachweis inkorporierter radioaktiver Stoffe im Körper und in den Körperausscheidungen in speziell hierfür eingerichteten Instituten zu führen.

Bei soliden Tumoren kann als Strahlendosis, die so niedrig ist, dass die gruppenbezogene Risikoerhöhung 10 % (d. h. $RR=1.1$, $ERR=0.1$) in der Regel nicht überschreitet und daher im Einzelfall eine Zusammenhangswahrscheinlichkeit $> 50\%$ unter Berücksichtigung aller individuellen Risikofaktoren in der Regel nicht erreicht wird, eine Dosis von kleiner 50 mSv im relevanten Organ für Nicht-Radon Exposition bzw. 20 WLM kumulative Radonexposition betrachtet werden, s. Anhang 3.

Die Beurteilung der Strahleneinwirkung ist in der Regel schwierig und sollte daher ggf. in Zusammenarbeit mit einem Strahlenbiologen/-physiker/-epidemiologen erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit für die Verursachung oder Beschleunigung der Entstehung (insgesamt die Zusammenhangswahrscheinlichkeit) einer Erkrankung durch eine Strahlenexposition hängt von der Dosis, dem Geschlecht, dem Alter bei Exposition, dem Alter bei Diagnose und individuellen Risikofaktoren wie einer Vorbelastung oder einer genetischen Prädisposition ab. Eine Rolle spielt aber auch das Organsystem bzw. die Art des Tumors, vgl. Anhang 2.

Der positive Wahrscheinlichkeitsbeweis der Verursachung liegt bei alleiniger beruflicher Exposition gegenüber ionisierender Strahlung in der Regel vor, wenn die Zusammenhangswahrscheinlichkeit > 50 % beträgt.

Die Anhänge 2, 3 und 4 sind zu beachten.

Anhang 1 Glossar

1. Ionisieren bedeutet das Abtrennen von Elektronen aus dem Atomverband, wobei die ionisierten Atome oder die ionisierten Moleküle in einen Zustand veränderter chemischer und dadurch auch biologischer Reaktionsbereitschaft gelangen.
2. Ionisierende Strahlen sind energiereiche Wellen- (Quanten- oder Photonen-) bzw. Teilchen-(Korpuskular)-strahlen, die beim Durchgang durch Materie die Atome zu ionisieren vermögen.
3. Direkt ionisierende Strahlen sind alle elektrisch geladenen Teilchen, wie z. B. schnelle Elektronen oder Betastrahlen, Alphastrahlen, Protonen usw.
4. Indirekt ionisierende Strahlen sind Röntgen- und Gammastrahlen sowie Neutronen, die durch Wechselwirkung mit Atomen direkt ionisierende Strahlen erzeugen. Zwar ionisieren auch die indirekt ionisierenden Strahlen im ersten Schritt, aber der Hauptteil der Ionisationen erfolgt anschließend über die entstandenen direkt ionisierenden Strahlen.
5. Von außen wirkende Strahlen sind solche, die von einer außerhalb des Körpers sich befindenden Strahlenquelle in den Körper einwirken (externe Exposition).
6. Von innen wirkende Strahlen sind solche Strahlen, die von inkorporierten radioaktiven Stoffen im Körper ausgehen (interne Exposition).
7. Inkorporation ist die Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper. Dies kann durch Einatmen (Inhalation), Verschlucken (Ingestion), durch die intakte Haut (Resorption) oder durch das Eindringen in Wunden erfolgen.
8. Kontamination ist eine Verunreinigung durch radioaktive Stoffe.
9. Umschlossene Strahler sind radioaktive Stoffe, die ständig von einer allseitig dichten, festen, inaktiven Hülle umschlossen oder in festen inaktiven Stoffen ständig so eingebettet sind, dass bei üblicher betriebsmäßiger Beanspruchung ein Austritt radioaktiver Stoffe mit Sicherheit verhindert wird; eine Abmessung muss mindestens 0,2 cm betragen.
10. Offene Strahler sind radioaktive Stoffe, die nicht von festen Stoffen umhüllt oder in inaktiven Stoffen eingebettet sind. Ein Austreten radioaktiver Stoffe und Kontamination sowie Inkorporation sind möglich.
11. Als Einheit der Strahlendosis (Ionendosis) gilt: „Coulomb pro Kilogramm" (C/kg). Die alte Einheit ist das „Röntgen" (R); Umrechnungsfaktor: $1 \text{ C/kg} = 3879 \text{ R}$.
12. Als Einheit der absorbierten Dosis (Energiedosis) gilt das „Gray" (Gy). Die alte Einheit ist das „Rad" (rd). Umrechnungsfaktor: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$.
13. Die Äquivalentdosis „Sievert" (Sv) wird als Einheit im Strahlenschutz verwendet. Sie berücksichtigt die unterschiedliche biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlenqualitäten. Die Strahlenqualität wird bestimmt durch die Strahlenart und -energie.

Zur Berücksichtigung der biologischen Wirksamkeit sind Bewertungsfaktoren (q) festgelegt ($Sv = Gy \times q$). Die alte Einheit ist das „Rem“ (rem). Umrechnungsfaktor: $1 Sv = 100 rem$.

14. Die Organdosis ähnelt stark der Äquivalentdosis. Allerdings wird in diesem Fall die Energiedosis mit dem der einwirkenden Strahlenart entsprechenden Strahlungswichtungsfaktor multipliziert.
15. Die Dosisleistung ist die Dosis/Zeit. Sie wird z. B. in „Gy/h“, oder „Sv/h“ bzw. „mSv/h“ usw. gemessen.
16. Als Einheit der Radioaktivität gilt das „Becquerel ($1 Bq = 1 \text{ Zerfall/s}$)“; eine Umrechnung von „Bq“ in „Gy“ oder „Sv“ ist nur bei genauer Kenntnis u. a. der Art des Strahlers und des Expositionspfades (z. B. externe, interne Bestrahlung) sowie der Kinetik des radioaktiven Stoffes und anderer Faktoren möglich.
17. Die physikalische Halbwertszeit (HWZ) ist die Zeit, in der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atome zerfallen ist (Nach 2 HWZ ist noch $1/4$, nach 3 HWZ noch $1/8$ usw. der ursprünglichen Aktivität vorhanden.).
18. Die biologische Halbwertszeit ist die Zeit, nach der nur noch die Hälfte der ursprünglich im Körper inkorporierten radioaktiven Stoffe vorhanden ist. Sie ist insbesondere abhängig von Stoffwechselfvorgängen.
19. Die effektive Halbwertszeit resultiert aus der gemeinsamen Berücksichtigung von physikalischer und biologischer Halbwertszeit. Effektive HWZ = $\frac{\text{Physikalische HWZ} \times \text{Biologische HWZ}}{\text{Physikalische HWZ} + \text{Biologische HWZ}}$.
20. Das relative Risiko (RR) bezeichnet das Verhältnis der Erkrankungswahrscheinlichkeit der Personen, die gegenüber einer gewissen Dosis d exponiert sind im Vergleich zu den Personen, die nur gegenüber der natürlichen Strahlung exponiert sind. Als Exzessrisiko ERR wird $RR-1$ bezeichnet.
21. Für die Angabe der Strahlenexposition im Uranerzbergbau wird der Dosisbegriff Working Level Month (WLM) verwendet. Dabei entspricht der Einheit Working Level (WL) eine Exposition gegenüber den Radonzerfallsprodukten mit einer Energie der α -Strahlung in Höhe von 130.000 MeV pro Liter Luft. Wirkt diese Alpha-Energiekonzentration einen Arbeitsmonat (170h) lang, so wird diese Dosis 1 Working Level Month, abgekürzt WLM genannt. Bei angenommenen 2.000 Arbeitsstunden pro Jahr entspricht 1 WLM etwa 5 mSv .

Anhang 2: Strahlenempfindlichkeit der Organe im Hinblick auf das Risiko für bösartige Tumoren

Strahlenempfindlichkeit	Lokalisation, bzw. Tumorart
Hoch	Brustkrebs
	Kolon
	Alle Leukämien außer CLL
	Lunge
	Magen
	Knochen / Bindegewebe
	epitheliale Hauttumoren
	Ösophagus
	Leber
	Pharynx
	Harnblase
Mittel	Hirn / ZNS
	Ovarien
	Speicheldrüse
	Schilddrüse
Niedrig	Lymphome
	Niere
	Prostata
	Rektum
	Malignes Melanom
	Dünndarm
	Uterus
	Multiples Myelom
	CLL
	Zunge / Mundhöhle
	Gallenblase
	Larynx
	Pankreas

Erläuterungen zur vorstehenden Liste

Die Liste wurde im Wesentlichen erstellt auf der Basis der Durchsicht des UNSCEAR Berichts 2006 (UNSCEAR, 2006). Die Begründung für die Einstufung ergibt sich aus der beigefügten Tabelle, in der die jeweiligen Zitate aus dem UNSCEAR-Bericht aufgeführt sind.

Die Angaben zur Wismut basieren auf einer Analyse von (Kreuzer et al., 2008). Es fällt dabei auf, dass UNSCEAR für die Organe „Zunge/Mund“, „Gallenblase“, „Pharynx“ und „Larynx“ keine eigenen Angaben macht. Hier wurde nur auf (Kreuzer et al., 2008) zurückgegriffen.

Allgemein wird die chronisch lymphatische Leukämie als nicht strahleninduzierbar angesehen. Sie wurde hier aber mit aufgenommen, da sich zum einen UNSCEAR hierzu vorsichtig ausdrückt (s. Buchstabe Y in der UNSCEAR-Tabelle), es zum anderen einige Arbeiten gibt, die eine Verursachung von CLL durch ionisierende Strahlung nicht ausschließen - s. als Übersicht (Linnet et al., 2007), ansonsten etwa (Boice et al., 2006) für strahlenexponierte Beschäftigte oder (Rericha et al., 2006) für Uranbergarbeiter. Eine noch nicht publizierte Arbeit von Tomasek geht in die gleiche Richtung wie die von (Rericha et al., 2006).

Auch die Radarkommission hat eine Übersicht über die durch ionisierende Strahlung induzierbaren Tumoren erstellt (Radarkommission, 2003). Sie nimmt in ihrem Bericht vornehmlich Bezug auf (Boice et al., 2006) sowie auf BEIRV (BEIR, 1990) und UNSCEAR 1994 und 2000.

Anhang 3 Standarddosen mit geringer Verursachungswahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tumoren:

Die Zusammenhangsbeurteilung bei einer Strahleneinwirkung ist in der Regel schwierig und sollte daher ggf. in Zusammenarbeit mit einem Strahlenbiologen/-physiker/-epidemiologen erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit für die Verursachung oder Beschleunigung der Entstehung (insgesamt die Zusammenhangswahrscheinlichkeit) einer Erkrankung durch eine Strahlenexposition hängt von

- der Dosis,
 - dem Geschlecht,
 - dem Alter bei Exposition,
 - dem Alter bei Diagnose und
 - individuellen Risikofaktoren wie einer Vorbelastung oder einer genetischen Prädisposition
- ab. Eine Rolle spielt aber auch das betroffene Organ bzw. die Art des Tumors, vgl. Anhang 2. Die folgenden Ausführungen gelten für solide Tumoren. Für Leukämien sollte wegen der komplizierteren Situation (sehr starke Abhängigkeit von der Zeit nach Exposition und vom Alter bei Exposition, Wirkungen auch nach relativ niedrigen Strahlendosen) differenziert entsprechend den Besonderheiten des Einzelfalls verfahren werden.

Mit Hilfe empirisch abgeleiteter Formeln auf der Basis epidemiologischer Daten lassen sich Zusammenhangswahrscheinlichkeiten, die auch als Verursachungswahrscheinlichkeiten bezeichnet werden, unter Berücksichtigung der o .g. Faktoren ermitteln. Vereinfacht ausgedrückt bezeichnet eine solche Zusammenhangswahrscheinlichkeit bei bestimmten Rahmenbedingungen (Dosis, Geschlecht, Alter bei Exposition, Alter bei Diagnose etc.) die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der aufgetretene Tumor durch die Strahlung verursacht wurde. Der positive Wahrscheinlichkeitsbeweis der Verursachung liegt in der Regel vor, wenn die Zusammenhangswahrscheinlichkeit mehr als 50 % beträgt, womit mehr dafür als dagegen spricht, dass der aufgetretene Tumor der Strahlung als Ursache zugeschrieben werden kann.

Dieses ist eine Verfeinerung des im Berufskrankheitenrecht, z. B. beim Lungenkrebs durch Asbest, vielfach angewendeten Prinzips der Verdopplungsdosis in dem Sinne, dass beispielsweise bei einer kumulativen Asbestexposition von 25 Faserjahren die Verdopplungsdosis D^* , also $RR(D^*)=2$, beträgt, mithin die Verursachungswahrscheinlichkeit als $(RR(D^*)-1)/RR(D^*)=(2-1)/2= 50 \%$ errechnet wird. Während bei den BK-Nrn. 4104, 4113 und 4114 nur die Exposition berücksichtigt wird, können und müssen bei der ionisierenden

Strahlung die o. g. individuellen Faktoren zur Ermittlung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit herangezogen werden.

Die Komplexität der Ermittlung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit für ionisierende Strahlen, insbesondere die Vielzahl der zu berücksichtigenden Faktoren, impliziert, dass kein einfacher kumulativer Dosisgrenzwert (ausgedrückt als mSv im relevanten Organ für Nicht-Radonexposition, bzw. WLM für die kumulative Radonexposition) angegeben werden kann.

Allerdings legen epidemiologische Untersuchungen und Modellrechnungen nahe, dass für eine Dosis von < 50 mSv in relevanten Organen für Nicht-Radonexposition, bzw. < 20 WLM kumulative Radonexposition in der Regel eine gruppenbezogene Risikoerhöhung von 10 % (d. h. RR=1.1, ERR=0.1) nicht überschritten wird. Anders ausgedrückt: der Anteil der beruflich verursachten, strahlenbedingten Tumoren in dieser Gruppe ist geringer als 10 %, was in der Regel das Verfehlen der Kriterien für eine arbeitsbedingte Verursachung des aufgetretenen Tumors implizieren wird.

Anhang 4 Berufsruppentypische, potentiell synkanzerogene Einwirkungen für Untertagebergleute der SDAG Wismut

Stand der medizinisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse zur „Synkanzerogenese“

Als „Synkanzerogenese“ gilt die Erhöhung der Kanzerogenese infolge aufeinander folgender oder gleichzeitiger Exposition gegenüber zwei oder mehr Kanzerogenen, üblicherweise des DNA-reaktiven (gentoxischen) Typs (vgl. Williams und Iatropoulos, 2001). Diese Interaktion stellt im Falle von Kanzerogenen des gentoxischen Typs einen Summationseffekt der genetischen Defekte der Stoffe dar.

Gewöhnlich tritt die Erhöhung in einem Zielorgan auf, in dem beide Kanzerogene eine Tumorwirkung erzeugen.

Nach Streffer, 2002, führen gentoxische Substanzen, die wie ionisierende Strahlen die initialen DNA-Schäden bei der Entwicklung von Krebs und Mutationen hervorrufen, nach kombinierten Expositionen im allgemeinen zu additiven Effekten mit dem Ergebnis „1 + 1 = 2“, oder sogar „1 + 1 + 1 = 3“.

Substanzen, die die Reparatur von DNA-Schäden nach Exposition durch ionisierende Strahlen hemmen, können überadditive Effekte hervorrufen. Dies gilt zum Beispiel für die bekanntermaßen Krebs erzeugenden Schwermetalle.

Substanzen, die das Gleichgewicht zwischen Zellverlust und Zellerneuerung nach einer Strahlenwirkung stören, können überadditive Effekte verursachen. Eine der zahlreichen Störmöglichkeiten solcher Substanzen besteht darin, dass sie die Kontrollstationen des Zellzyklus-Kontrollsystems ausschalten. Dadurch kann z. B. eine bereits begonnene DNA-Verdoppelung ungehemmt fortschreiten, bevor die strahlenbedingten Schäden in den Elternsträngen repariert sind. Im Falle fehlerhaft reparierter, als Matrizen dienender DNA-Elternstränge kommt es dann zu weiteren, Krebs induzierenden Veränderungen in den DNA-Tochtersträngen.

Nach Greim, 2006, ist aufgrund der Erkenntnisse zur Krebsentstehung Synkanzerogenese immer dann zu erwarten, wenn sich mehrere Kanzerogene aufgrund ihrer Mechanismen bei der Initiation oder Promotion in ihrer Wirkung verstärken. In jedem Falle ist davon auszugehen, dass eine gleichzeitige oder aufeinander folgende Exposition gegenüber mehreren Initiatoren oder Initiatoren und Promotoren den kanzerogenen Effekt verstärkt.

Insgesamt ist hiernach bei der kombinierten Einwirkung von ionisierender Strahlung und gentoxischen Arbeitstoffen, insbesondere auch beim Lungenkrebs, von einer mindestens additiven Synkanzerogenese auszugehen.

Primär gentoxisch-ionisierende Einwirkungen im Untertage-Bergbau der SDAG Wismut

Nach der Legaldefinition der BK-Nr. 2402 „Erkrankungen durch ionisierende Strahlung“ beruht die Anwendung dieser Listenkrankheit im Einzelfall beim „Schneeberger Lungenkrebs“ (pathoanatomisch: Lungenkarzinom, bzw. Bronchialkarzinom) monokausal auf der Feststellung von Art und Ausmaß der direkt und indirekt ionisierenden Strahlung. Zu berücksichtigen ist dabei, dass unterschiedliche Strahlungsqualitäten bei gleicher Energie-Einwirkung zu unterschiedlichen Krebsrisiken führen. Die absorbierten Organdosiswerte in Gy sind daher mit dem dimensionslosen Qualitätsfaktor für die biologische Wirksamkeit der entsprechenden Strahlenart in Sv zu multiplizieren [$Sv = Gy \times \text{Qualitätsfaktor}$]. Der Faktor hat den Wert 1 für Röntgen-, Gamma- und Beta-Strahlung, und für Alpha-Strahlung den Wert 20. Er liegt bei Neutronenstrahlung je nach Energie zwischen 2 und 20. Bei der effektiven Dosis werden die Äquivalent-Dosen in den einzelnen Organen des Körpers gewichtet und aufsummiert.

Eine entsprechende strahlendosimetrische Bewertung der unterschiedlichen Strahlungsqualitäten ist im Rahmen der sicherheitstechnischen Amtsermittlung zur Abschätzung der Verursachungswahrscheinlichkeit speziell bei Erkrankungen an Lungenkrebs hierzulande eingeführt, vgl. „Gutachten Jacobi I“, 1992. Das gleiche gilt für extrapulmonale Krebserkrankungen, vgl. „Gutachten Jacobi II“, 1994 und „Gutachten Jacobi III“, 1997.

Gentoxische Lungenkanzerogene als BK-Listenstoffe im Untertage-Bergbau der SDAG

Wismut

Im Untertage-Bergbau der SDAG Wismut ist neben dem Vorkommen der verschiedenen Strahlungsqualitäten an zahlreichen Arbeitsplätzen mit dem Vorkommen weiterer Arbeitsstoffe mit gentoxischer und z. T auch promovierender humankanzerogener Potenz zu rechnen. So ist beispielsweise aus einer Fall-Kontroll-Studie bekannt, dass von $n = 1.578$ untersuchten Wismut-Bergleuten jeder Vierte (24,5 %) über Koexpositionen gegenüber Asbestfaserstaub berichtete (Brüske-Hohlfeld et al., 2006).

Für mehrere solcher genotoxischer Humankanzerogene gilt jeweils eine eigene Nr. der BK-Liste als Berufskrebserkrankung.

Für das Zielorgan Atemtrakt handelt es sich mit weitgehend direktem Bezug zur Untertagetätigkeit der ehemaligen Wismutbergleute um

- Quarzstaub (BK-Nr. 4112),
- Asbestfaserstaub (BK-Nr. 4104),
- Arsen oder seine Verbindungen (BK-Nr. 1108).

Bisher weniger festgestellt sind für den Untertage-Bergbau der SDAG Wismut ggf. vorkommende koexpositionelle Einwirkungen von Pyrolyse-Produkten aus organischem Material. Diese z. B. bei Grubenbränden auftretenden Pyrolyseprodukte mit der Bezeichnung polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) vom Typ des Benzo[a]pyrens können ebenfalls Lungenkrebs als eine neue Listen-BK des Atemtraktes verursachen (s. BK-Nr. 4113 - BMAS 2009).

Literatur:

- BEIR (1990): Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V, Washington, D.C.: National Academy Press
- BEIR VII: Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. National Academy Press, Washington, D. C., 2006
- BK-Report 2/2006, HVBG, Sankt Augustin (2006) 18 - 30
- BMAS (2007): Wissenschaftliche Begründung für die Berufskrankheit „Lungenkrebs durch das Zusammenwirken von Asbestfaserstaub und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen“. Bekanntmachung des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales vom 01.02.2007 - IVa 4-45222, GMBI. 23 (2007) 474 - 495
- BMAS (2009): Berufskrankheit Nr. 4113 „Lungenkrebs durch polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe bei Nachweis der Einwirkung einer kumulativen Dosis von mindestens 100 Benzo[a]pyren-Jahren $[(\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Jahre}]$ - Zweite Verordnung zur Änderung der Berufskrankheiten-Verordnung vom 11.06.2009, BGBl. I S. 1273
- Boice JD, Cohen SS, Mumma MT, Dupree Ellis E, Eckerman KF, Leggett RW, Boecker BB, Brill AB, Henderson BE (2006) Mortality among radiation workers at Rocketdyne (Atomics International), 1948-1999. Radiat Res 166: 98-115
- Boice JD, Land CE, Preston DL (1996) Ionizing Radiation. In Cancer Epidemiology and Prevention, Schottenfeld D, Fraumeni JF (eds), pp 319-354. New York: Oxford University Press
- Brüske-Hohlfeld, I., A. Schaffrath-Rosario, G. Woelke, J. Heinrich, M. Kreuzer, L. Kreienbrock, H.-E. Wichmann: Lung cancer risk among former Uranium Miners of the Wismut Company in Germany. Health Phys. 90, 3 (2006) 208 - 216
- Dempke, W.: Lehrbuch der Hämato-Onkologie; Huber Verlag, Bern 2007
- DeVita, V. T., Hellmann, S. und Rosenberg, S. A.: Cancer: Principles & Practice of Oncology; 8. Aufl. . Lippincott, Philadelphia, 2008
- DFG: Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. MAK- und BATWerte-Liste. Mitteilung 44, Wiley-VCH 2008, Krebs erzeugende Arbeitsstoffe, S. 139 - 149
- Greer, J. P., Foerster, J., Rodgers, G. M., Paraskevas, F., Glader, B., Arber, D. A., Means, R. T. Jr.: Wintrobe's Clinical Hematology, 12th edition. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2008
- Greim, H.: Synkanzerogenese - eine Übersicht zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand. Fachgespräch des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften und der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin. Hennef 25.-26.11.2005. BK-Report 2/2006, Sankt Augustin, S. 83 – 87
- B. Grosche, M. Kreuzer, M. Kreisheimer, M. Schmelzer, A. Tschense: Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946 - 1998. Brit. J. Cancer 95 (2006) 1280-1287
- Hallier, E.: Synkanzerogenese – Wechselwirkungen zwischen krebserzeugenden Noxen am Arbeitsplatz. Kommunique der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. Zbl. Arbeitsmed. 54 (2004) 147-149
- ICRP: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; ICRP Publ. 103.. Elsevier, 2008
- ILO, IAEA, WHO: "Approaches to attribution of detrimental health effects to occupational ionizing radiation exposure and their application in compensation programmes for cancer";

Niu, S.; Deboodt, P.; Zeeb, H. (eds.); Occupational Safety and Health Series 73, 2010, S. 1 - 99

Jacobi, W., K. Henrichs, D. Barclay: Verursachungs-Wahrscheinlichkeit von Lungenkrebs durch die berufliche Strahlenexposition von Uran-Bergarbeitern der Wismut-AG. („Gutachten Jacobi I“). Hrsg.: Institut für Strahlenschutz der BG der Feinmechanik und Elektrotechnik und der BG der chemischen Industrie, Köln (1992) 1 – 58

Jacobi, W., P. Roth: Risiko und Verursachungswahrscheinlichkeit von extrapulmonalen Krebserkrankungen durch die berufliche Strahlenexposition von Beschäftigten der ehemaligen Wismut AG. („Gutachten Jacobi II“). GSF-Bericht, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg (1994)

Jacobi, W., P. Roth, D. Nosske: Mögliches Risiko und Verursachungs-Wahrscheinlichkeit von Knochen- und Leberkrebs durch die berufliche Alpha-Strahlen-Exposition von Beschäftigten der ehemaligen Wismut-AG. („Gutachten Jacobi III“). GSF Bericht. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg (1997)

Kreuzer, M., A. Brachner, F. Lehmann, K. Martignoni, H.-E. Wichmann, B. Grosche: Characteristics of the German uranium miner's cohort study. Health Phys. 83, 1 (2002) 26 - 34

Kreuzer, M., L. Walsh, M. Schmelzer, A. Tschense, B. Grosche: Radon and risk of extrapulmonary cancers: results of the German uranium miners' cohort study, 1960 - 2003. Brit. J. Cancer 99 (2008) 1946 - 1953

Lehmann F, Hambeck L, Linkert KH, et al. Belastung durch ionisierende Strahlung im Uranerzbergbau der ehemaligen DDR. Abschlussbericht zu einem Forschungsvorhaben. Hrsg.: Bergbauberufsgenossenschaft (BBG) in Gera und Hauptverband für gewerbliche Berufsgenossenschaften (HVBG) in St. Augustin, 1998.

Linnet MS, Schubauer-Berigan MK, Weisenburger DD, Richardson DB, Landgren O, Blair A, Silver S, Field RW, Caldwell G, Hatch M, Dores GM (2007) Chronic lymphocytic leukaemia: an overview of aetiology in light of recent developments in classification and pathogenesis. Br J Haematol 139: 672-86

Möhner, M., I. Brüske-Hohlfeld, H.-E. Wichmann: Lungenkrebsrisiko bei Uranbergarbeitern der Wismut AG durch kombinierte berufliche Noxen am Beispiel von Strahlen- und Asbest-Exposition. Zbl. Arbeitsmed. 48 (1998) 398 - 407

Möhner, M., M. Lindtner, H. Otten: Ionizing radiation and risk of Laryngeal Cancer among German Uranium Miners. Health Phys. 95, 6 (2008) 725 - 733

Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., Suyama, A., Mabuchi, K.: Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. Radiat Res 160(4):381-407, 2003

Radarkommission (2003) Bericht der Expertenkommission zur Frage der Gefährdung durch Strahlung in früheren Radareinrichtungen der Bundeswehr und der NVA Berlin: Bundeswehr.

Rericha V, Kulich M, Rericha R, Shore DL, Sandler DP (2006) Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: a case-cohort study. Environ Health Perspect 114: 818-22

Schubauer-Berigan, M. K., R. D. Daniels, L. E. Pinkerton: Radon Exposure and Mortality Among White and American Indian Uranium Miners: An Update of the Colorado Plateau Cohort. Amer. J. Epidemiol. 169, 6 (2009) 718 – 730

Streffer, C. et al.: Umweltstandards. Band 5 Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung. Kombinierte Expositionen und ihre Auswirkungen auf den Menschen und seine Umwelt. Kap. 2.3 Kombinierte Einwirkungen von Strahlen und Stoffen. Springer Berlin (2000) 107-170

UNSCEAR (1994) Sources and Effects of Ionizing Radiation Vienna: United Nations.

UNSCEAR (2000) Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Effects Vienna: United Nations.

UNSCEAR: Sources, Effects and Risks of Ionizing. United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York, 2000

UNSCEAR (2006) Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Effects of Ionizing Radiation Vienna: United Nations.

UNSCEAR: Sources, Effects and Risks of Ionizing, United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York, 2006

Walsh L, Tschense A, Schnelzer M, Dufey F, Grosche B, Kreuzer M (2010) The influence of radon exposures on lung cancer mortality in German uranium miners, 1946-2003. *Radiat Res* 173: 79-90

Wichmann H.-E., Möhner. M., Brüske-Hohlfeld I.: Lungenkrebsrisiko durch die berufliche Strahlenexposition in Kombination mit Asbest- und anderen relevanten zusätzlichen Expositionen von Uran-Bergarbeitern der Wismut AG. Gutachterliche Stellungnahme im Auftrag der Bergbau-Berufsgenossenschaft. GSF-EP S 7/96, Neuherberg, 1996

Williams, G. M., M. J. Iatropoulos: Principles of Testing for Carcinogenicity. In: Hayes W. A. (Ed.): Principles and Methods of Toxicology. 4. Edition, Taylor & Francis, Philadelphia 2001, 959 - 1000

Woitowitz, H.-J.: Berufsbedingter Lungenkrebs - offene Fragen: Synkanzerogenese. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* 37 (2002) 118 - 127