

# Lungenkrebsrisiko durch Quarzfeinstaub bei deutschen Uranbergbauarbeitern

## Lung cancer risk by silica in German uranium miners

Marion Sogl<sup>1</sup>, Dirk Taeger<sup>2</sup>, Dirk Pallapies<sup>2</sup>, Michaela Kreuzer<sup>1</sup>

### Abstract

In 1997 and 2012, the International Agency for Research on Cancer classified silica as carcinogenic to humans. However, the exposure-response relationship between silica and lung cancer, is internationally still controversially debated. In Germany in 2006 the relevant threshold for silica was repealed in view of the new Hazardous Substances Ordinance. Data from the German uranium miner cohort study of 58.677 workers in Thuringia and Saxony, the largest single study with individual data on occupational exposure of silica and radon, were used to investigate the relationship between silica and lung cancer in detail. In the follow-up period 1946–2003 2,995 miners died from lung cancer. With different regression models the excess relative risk for lung cancer per cumulative silica exposure in mg/m<sup>3</sup>-years was calculated. The Wismut study supports the evaluation of the IARC to classify silica as a carcinogenic substance. At higher exposure levels an elevated lung cancer risk was observed. In the range of the earlier threshold level no statistically significant increased risk for lung cancer was observed, however a slight risk cannot be ruled out completely. The results of this study were recently published (Sogl et al. 2012) and shall be presented here.

### Zusammenfassung

Quarzfeinstaub wurde 1997 und 2012 von der International Agency for Research on Cancer (IARC) als krebserregend für den Menschen eingestuft. Die Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen Quarzfeinstaub und Lungenkrebs wird jedoch nach wie vor international kontrovers diskutiert. In Deutschland ist seit 2006 der Grenzwert für Quarzfeinstaub aufgrund der neuen Gefahrstoffverordnung außer Kraft gesetzt worden. Im Rahmen der Wismut-Kohorte, die mit 58.677 ehemaligen Beschäftigten des Uranbergbaus in Thüringen und Sachsen die größte Einzelstudie mit individuellen Expositionsabschätzungen zu beruflichem Quarzfeinstaub und Radon darstellt, wurde deshalb der Zusammenhang zwischen Quarzfeinstaub und Lungenkrebs eingehend untersucht. Im Beobachtungszeitraum 1946 bis 2003 starben 2.995 Personen an Lungenkrebs. Mit Hilfe verschiedener Regressionsmodelle wurde das zusätzliche relative Risiko für Lungenkrebs pro Gesamtquarzfeinstaubexposition berechnet. Die Wismut-Studie bestätigt die Einschätzung der IARC, Quarzfeinstaub als krebserregende Substanz einzustufen. Im hohen Expositionsbereich wurde ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko beobachtet. In einem Expositionsbereich in Höhe des früheren Grenzwerts deutet sich in der deutschen Bergarbeiterstudie hingegen kein statistisch signifikant erhöhtes Lungenkrebsrisiko an, wobei ein geringfügiges Risiko jedoch nicht völlig auszuschließen ist. Die Ergebnisse dieser Studie wurden vor kurzem publiziert (Sogl et al. 2012) und sollen hier vorgestellt werden.

## Hintergrund

Quarzfeinstaub wurde 1997 und 2012 von der International Agency for Research on Cancer (IARC) als krebserregend für den Menschen eingestuft (IARC 1997; IARC 2012). Der 1972 festgelegte Wert der Maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK) von 0,15 mg/m<sup>3</sup> hat die neuen Erkenntnisse von später

publizierten großen internationalen Studien, wie beispielsweise Steenland et al. 2001, Chen et al. 2007 und anderen, nicht berücksichtigen können. Diese beschrieben zum Teil schon für deutlich niedrigere Expositionen gegenüber Quarzfeinstaub ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko. Der Grenzwert ist seit

<sup>1</sup> Bundesamt für Strahlenschutz.

<sup>2</sup> Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA).

2006 im Rahmen der neuen Gefahrstoffverordnung in Deutschland außer Kraft gesetzt. Auch die Form der Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen Quarzfeinstaub und Lungenkrebs ist nach wie vor umstritten. Ziel der vorliegenden Auswertung der deutschen Kohortenstudie zu ehemaligen Beschäftigten des Uranerzbergbaus Wismut (Wismut-Kohorte) war deshalb die Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen Quarzfeinstaub und Lungenkrebssterblichkeit. Die Wismut-Kohorte bietet aufgrund ihrer Größe (58.677 ehemalige Beschäftigte), dem Vorliegen von individuellen Abschätzungen zur Quarzfeinstaub- und Radonexposition, dem langen Beobachtungszeitraum (1946–2003), und der großen Anzahl von Lungenkrebssterbefällen (n=2.995) einen wertvollen Beitrag zu diesem Thema.

## Wismut-Bergbau

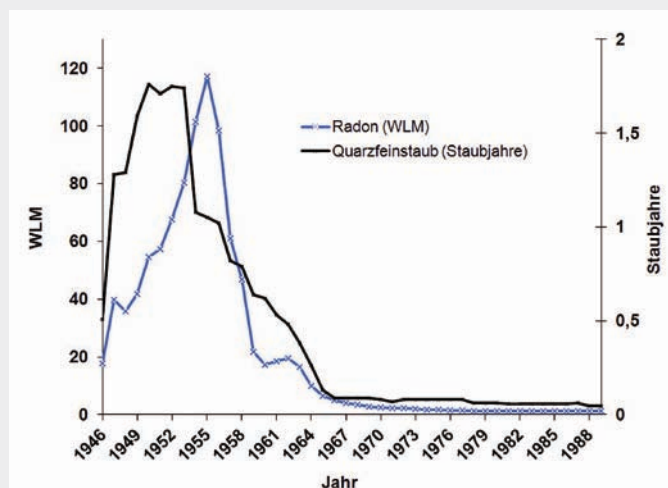
Der Bergbau hat in Sachsen und Thüringen eine jahrhundertlange Tradition. Nach dem Zweiten Weltkrieg kamen in großem Umfang der Abbau und die Verarbeitung von Uranerz hinzu. Zwischen 1946 und 1989 waren etwa eine halbe Million Personen im sächsisch-thüringischen Uranbergbau beschäftigt. Nach der Wiedervereinigung Deutschlands stellte die Wismut SDAG den Uranerz-Abbau zum 31. Dezember 1990 ein. Der Uranerzbergbau nahm zu einer Zeit seinen Aufschwung, als noch keine wirksamen Staubbekämpfungsmaßnahmen sowie Strahlenschutz-Vorschriften existierten, sodass die Bergarbeiter, zusätzlich zu schweren körperlichen Arbeitsbedingungen unter Tage, einer hohen

Belastung durch Quarzfeinstaubkonzentrationen und das radioaktive Edelgas Radon und seine Zerfallsprodukte ausgesetzt waren. Bis 1999 wurden 7.695 Lungenkrebserkrankungen bei den Wismut-Beschäftigten als strahlenbedingt anerkannt.

## Die Wismut-Kohorte

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) führt seit 1993 mit Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die Deutsche Uranbergarbeiterstudie durch. In Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) hat das BfS auf Basis einer Zufallsauswahl nach definierten Kriterien eine Kohorte von circa 59.000 ehemaligen Wismut-Arbeitern zusammengestellt. Es wurde für jede Person über Arbeitsunterlagen festgestellt, wann und wie lange sie welche Tätigkeit an welchem Arbeitsort (über Tage, unter Tage, Tagebau, Aufbereitung) und in welchem Bergbauobjekt ausgeübt hat. Daraus wurde für jedes Jahr, jede Tätigkeit und jeden Arbeitsort ein Belastungswert ermittelt und den Personen zugeordnet (sog. Job-Exposure-Matrix, JEM). Jährliche und kumulative Expositionen für Quarzfeinstaub sind in der Einheit Staubjahr festgelegt, wobei ein Staubjahr einer Belastung von  $1 \text{ mg/m}^3$  Quarzfeinstaub über eine Zeitperiode von 220 Schichten à 8 Stunden entspricht. Informationen zu ionisierender Strahlung basieren auf einer separaten JEM in der Einheit working level month (WLM). Ein WLM entspricht einer Exposition von 1 WL über einen Monat, das heißt 170 Arbeitsstun-

**Abbildung 1: Durchschnittliche jährliche kumulative Belastung durch Quarzfeinstaub in  $\text{mg/m}^3$ -Jahren sowie Radon und seine Zerfallsprodukte in Working Level Months (WLM) unter exponierten Kohortenmitgliedern nach Quarzfeinstaub (n=58.677) und Radon (n=50.468).**



den. Dabei ist 1 WL definiert als  $1,3 \times 10^3$  MeV (Megaelektronenvolt) potentieller Alpha Energie pro Liter Luft (Kreuzer et al. 2009).

Alle Kohortenmitglieder waren einer Quarzfeinstaubbelastung mit einer durchschnittlichen kumulativen Belastung von 5,9 und einem Maximum von 56 Staubjahren ausgesetzt. Der überwiegende Teil der Kohorte (86 %) war gegenüber ionisierender Strahlung exponiert, mit einer durchschnittlichen kumulativen Radonbelastung von 280 Working Level Months (WLM). Da Arsen nur in bestimmten sächsischen Abbaubetrieben auftrat, waren lediglich 31 Prozent der Bergarbeiter gegenüber Arsen exponiert, wobei ihre durchschnittliche kumulative Belastung  $121,2 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{-Jahre}$  betrug. Die Staub- sowie die Strahlenbelastung änderte sich im Laufe der Betriebszeit entscheidend. Während in den Anfangsjahren in vielen Schächten die Durchschnittswerte von Quarzfeinstaub je Schicht bei zum Teil über  $2 \text{ mg}/\text{m}^3$  lagen, verbesserte sich die Situation ab 1955 kontinuierlich durch die Einführung von Nassbohr-Verfahren und deutlich effektivere Schacht-Belüftungen (Dahmann et al. 2008). Dies führte zu einem Rückgang der Staubkonzentrationen um mehr als 97 Prozent. Ein ähnlicher Verlauf ist für Radon zu beobachten (**Abbildung 1**).

Für die Kohorte wird regelmäßig erfragt, wie viele der Personen zu einem bestimmten Stichtag an welcher Todesursache verstorben sind. Diese Abfrage (sogenanntes „Follow-up“) geschieht alle fünf Jahre über Einwohnermeldeämter und Gesundheitsämter. Das erste Follow-up bis Ende 1998, das zweite Follow-up bis Ende 2003 sowie das dritte Follow-up bis Ende 2008 sind bereits abgeschlossen.

## Statistische Methoden

Mit den Daten des zweiten Follow-up (1946–2003) wurde mit Hilfe verschiedener Regressionsmodelle die Form des Zusammenhangs zwischen der gesamten Quarzfeinstaubbelastung und dem daraus resultierenden Lungenkrebsrisiko ermittelt. Ein Zusammenhang zwischen Lungenkrebssterblichkeit und Radonexposition wurde in der Wismut-Kohorte bereits nachgewiesen (Walsh et al. 2010).

Der Zusammenhang zwischen kumulativer Quarzfeinstaubbelastung und Lungenkrebssterblichkeit wurde wie folgt berechnet: Zuerst wurde das relative Risiko in einem einfachen Modell mit Quarzfeinstaub in den Kategorien 0–0,5; 0,5–2; 2–5; 5–10; 10–20; 20–30; 30+  $\text{mg}/\text{m}^3\text{-Jahre}$  geschätzt. Anschließend wurden verschiedene Modellierungsansätze (linear, linear-quadratisch, Splinefunktion etc.) getestet, um die Form des Expositions-Wirkungs-Zusammenhangs zu untersuchen. Für den starken zusätzlichen Einflussfaktor Radon und den potentiellen Störfaktor Arsen wurde adjustiert. Bei der Adjustierung für Radon wurden Zeit-, Alters- und Expositionsraten-Effekte mit berücksichtigt.

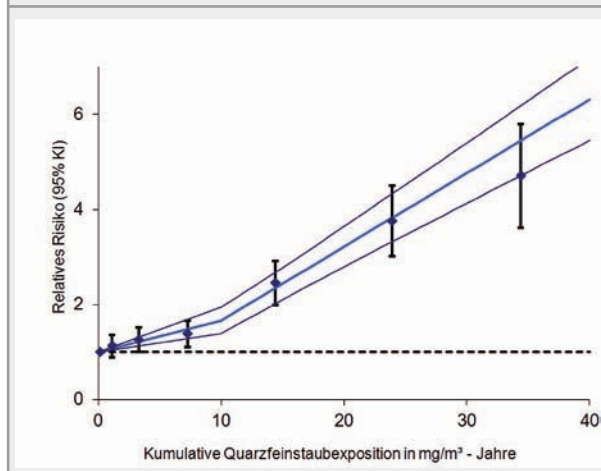
## Ergebnisse

### Zusammenhang zwischen Quarzfeinstaub und Lungenkrebs

Im Beobachtungszeitraum 1946 bis 2003 starben in der Kohorte insgesamt 20.748 Personen, davon 2.995 an Lungenkrebs. **Tabelle 1** zeigt das relative Risiko, an Lungenkrebs zu sterben, in Abhängigkeit von der kumulativen Quarzfeinstaubexposition

| Tabelle 1: Lungenkrebs-Sterberisiko nach kumulativer Quarzfeinstaubexposition in $\text{mg}/\text{m}^3\text{-Jahren}$ , 1946–2003.   |     |                  |                  |                        |                                   |
|--|-----|------------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Quarzfeinstaub in $\text{mg}/\text{m}^3\text{-Jahre}$  | Ø   | Personenjahre    | Anzahl der Fälle | RR 95% KI unadjustiert | RR 95%KI adj. für Radon und Arsen |
| 0–0,5  | 0,1 | 681.780          | 137              | 1,00 Referenz          | 1,00 Referenz                     |
| 0,5–2  | 1   | 394.559          | 283              | 1,12 (0,89 – 1,35)     | 0,95 (0,77 – 1,12)                |
| 2–5  | 3   | 274.523          | 356              | 1,26 (1,00 – 1,51)     | 0,96 (0,78 – 1,13)                |
| 5–10   | 7   | 238.032          | 430              | 1,38 (1,10 – 1,66)     | 0,86 (0,67 – 1,04)                |
| 10–20  | 14  | 264.140          | 936              | 2,45 (1,98 – 2,92)     | 1,14 0,87 – 1,40)                 |
| 20–30  | 24  | 108.502          | 664              | 3,76 (3,02 – 4,49)     | 1,51 (1,08 – 1,94)                |
| 30–56  | 34  | 23.151           | 189              | 4,71 (3,62 – 5,80)     | 2,02 (1,28 – 2,75)                |
| <b>Total</b>   |     | <b>1.984.687</b> | <b>2.995</b>     |                        |                                   |
| RR: Relatives Risiko; KI: Konfidenzintervalle;<br>Relatives Risiko, Baseline stratifiziert nach Alter in 5-Jahres-Gruppen und individuellem Kalenderjahr in 58 Kategorien.<br>RR adjustiert für Radon und Arsen mit exponentiellem Einschluss der Zeit-, Alters- und Expositionsraten-Effekte. |     |                  |                  |                        |                                   |

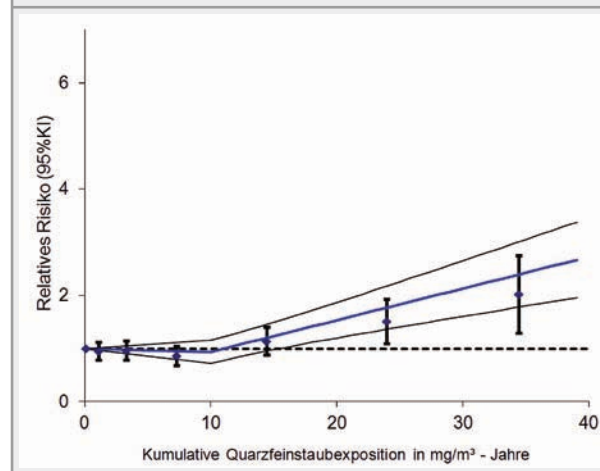
**Abbildung 2a: Relatives Lungenkrebssterberisiko durch Quarzfeinstaub. Kategorielle Analyse und lineares Splinemodell mit 95 Prozent Konfidenzintervallen, nicht adjustiert für Radon und Arsen.**



in der kategoriellen Analyse. Ohne Adjustierung für Radon und Arsen ist in allen Kategorien der Quarzexposition (außer für 0,5–2 Staubjahre) ein erhöhtes relatives Risiko im Vergleich zur Referenzkategorie 0–0,5 mg/m<sup>3</sup>-Jahre zu sehen. Nach Adjustierung für den starken zweiten Risikofaktor Radon sowie den potentiellen Risikofaktor Arsen gehen die Risiken deutlich zurück, bleiben aber in den Kategorien 20–30, 30+ mg/m<sup>3</sup>-Jahre statistisch signifikant erhöht. So hat beispielsweise ein Bergarbeiter, der einer Quarzfeinstaubbelastung von mehr als 30 Staubjahren ausgesetzt war, ein doppelt so hohes Risiko (RR=2,02, 95 % Konfidenzbereich (KI) = 1,28–2,75) an Lungenkrebs zu sterben, wie ein Bergarbeiter, der kaum einer Staubb Belastung (0–0,5 Staubjahre) ausgesetzt war.

Um die genaue Form des Expositions-Wirkungs-Zusammenhangs von Quarzfeinstaub und Lungenkrebs zu untersuchen, wurden verschiedene Modellierungsansätze verwendet und miteinander verglichen. Ein lineares Modell mit einem Knickpunkt bei 10 Staubjahren beschreibt die Daten am besten (**Abbildungen 2a** und **2b**). Ohne Berücksichtigung der beiden anderen Risikofaktoren ist ein statistisch signifikanter Anstieg im relativen Lungenkrebsrisiko sowohl im Bereich unter als auch über 10 Staubjahren zu beobachten (**Abbildung 2a**). Nach Berücksichtigung der Störgrößen Radon und Arsen geht das Risiko, an Lungenkrebs zu sterben, deutlich zurück, unterhalb von 10 Staubjahren ist es nicht mehr erhöht (**Abbildung 2b**). So beträgt das relative Risiko für einen Bergarbeiter, der einer Quarzfeinstaubbelastung

**Abbildung 2b: Relatives Lungenkrebssterberisiko durch Quarzfeinstaub. Kategorielle Analyse und lineares Splinemodell mit 95 Prozent Konfidenzintervallen, adjustiert für Radon und Arsen.**



von 5 Staubjahren ausgesetzt war 0,97 (95 % KI: 0,86; 1,08) gegenüber einem Nichtexponierten. Bei einer Staubb Belastung von 20 mg/m<sup>3</sup>-Jahre ist das relative Risiko 1,53 (95 % KI: 1,20; 1,87)-mal höher als bei einem Nichtexponierten.

### **Kombinierter Effekt zwischen Quarzfeinstaub und Radon**

**Tabelle 2** zeigt die Ergebnisse der kategoriellen Analyse des kombinierten Effekts von Radon und Quarzfeinstaub.

Es ist ein deutlicher Anstieg des relativen Risikos nur durch Quarzfeinstaub (Anstieg in den Spalten) sowie nur durch Radon (Anstieg in den Zeilen) zu sehen. Das Risiko in der höchsten Quarzfeinstaub- und Radon-Kategorie (> 30 mg/m<sup>3</sup>-Jahre und > 1000 WLM) ist 4,6-fach (95 % KI: 3,7–5,4) höher verglichen mit dem Risiko der gering Quarzfeinstaub- und Radon-Exponierten (< 10 mg/m<sup>3</sup>-Jahre und < 50 WLM). Weiterhin wurde die Form der Interaktion zwischen Quarzfeinstaub und Radon untersucht. Dabei zeigte sich das rein additive Modell statistisch signifikant besser geeignet als das multiplikative Modell. Somit scheint der Effekt zwischen Quarzfeinstaub und Radon eher additiv als multiplikativ zu sein.

### **Rauchen**

Rauchen ist der wesentliche Risikofaktor für Lungenkrebs. In der Kohorte liegen hierzu nur für wenige Personen Daten vor. Deshalb wurden in einer eingebetteten Fall-Kontroll-Studie zu Lungenkrebs



**Tabelle 2: Kombiniertes Risiko von kumulativer Quarzfeinstaubexposition und Radon auf das Lungenkrebsrisiko, 1946–2003.**

|                                  | Radon    |                    |               |                    |            |                    |        |
|----------------------------------|----------|--------------------|---------------|--------------------|------------|--------------------|--------|
|                                  | < 50 WLM |                    | 50 – 1000 WLM |                    | > 1000 WLM |                    | gesamt |
| Quarzfeinstaub<br>in mg/m³-Jahre | n        | RR (95% KI)        | n             | RR (95% KI)        | n          | RR (95% KI)        |        |
| < 10                             | 609      | 1,0 Referenz       | 585           | 1,52 (1,34 – 1,69) | 12         | 1,95 (0,83 – 3,07) | 1.206  |
| 10–20                            | 54       | 1,10 (0,79 – 1,41) | 663           | 2,45 (2,17 – 2,73) | 219        | 3,11 (2,62 – 3,61) | 936    |
| 20–30                            | 6        | 1,33 (0,26 – 2,41) | 238           | 3,11 (2,63 – 3,60) | 420        | 4,29 (3,64 – 4,74) | 664    |
| 30 +                             | 0        | -                  | 14            | 4,75 (3,25 – 6,25) | 147        | 4,56 (3,72 – 5,41) | 189    |
| Total                            | 669      |                    | 1.528         |                    | 798        |                    | 2.995  |

WLM: working level month; RR: Relatives Risiko; KI: Konfidenzintervalle.

(Schnelzer et al. 2010) basierend auf Daten aus den medizinischen Archiven oder über Angaben von Verwandten Informationen zum Rauchverhalten für 439 Fälle und 550 Kontrollen gesammelt. Es wurde kein statistisch signifikanter Trend in der Verteilung des Raucherstatus mit steigender Quarzfeinstaubbelastung beobachtet, weder für Fälle noch für Kontrollen. Der Anteil an Rauchern in der Gruppe der Kontrollen liegt konstant bei etwa 70 Prozent, in der Gruppe der Fälle bei rund 90 Prozent (**Abbildung 3**). Das Rauchverhalten scheint unabhängig von der Quarzfeinstaubbelastung zu sein und stellt somit keinen Hinweis für eine starke Störgröße dar.

## Bedeutung der Wismut-Studie für die Einschätzung der IARC

Die Wismut-Kohorte ist mit knapp 60.000 Personen die größte Einzelstudie zur gesundheitlichen Bedeutung von Quarzfeinstaub und Radon für Lungenkrebs. Sie umfasst einen langen Beobachtungszeitraum (1946–2003) mit knapp zwei Millionen Personenjahren. Bis 2003 sind 20.748 Bergarbeiter gestorben, davon etwa jeder siebte an Lungenkrebs (n=2.995). Für jede Person liegen individuelle Informationen zur Quarzfeinstaubbelastung sowie zu anderen krebserregenden Substanzen wie Radon und Arsen vor, welche die detaillierte Prüfung der Art des Expositions-Wirkungs-Zusammenhangs in einer Einzelstudie erlauben. Zusätzlich gibt es Informationen zum Rauchen aus einer eingebetteten Fall-Kontroll-Studie, welche die Evaluierung des potentiellen Störfaktors Rauchen ermöglichen.

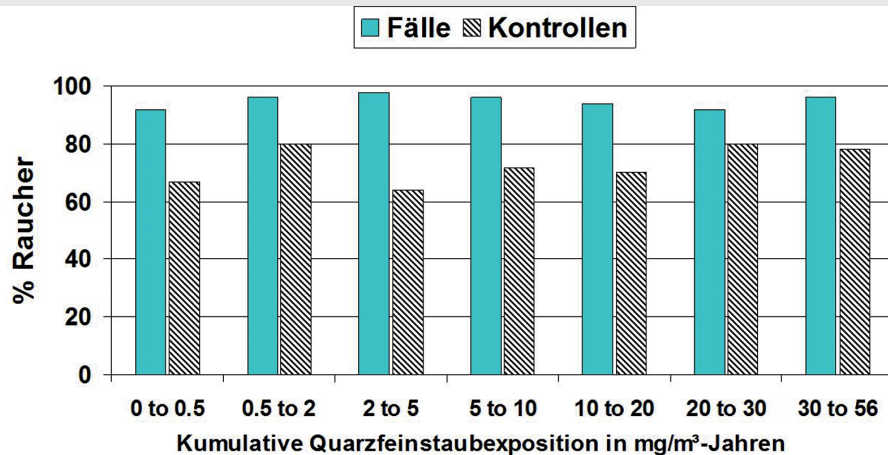
In Deutschland wurde 2006 der bis dahin gültige Grenzwert von 0,15 mg/m<sup>3</sup> (entspricht bei einer 40-jährigen Beschäftigungsdauer einem Wert von 6 mg/m<sup>3</sup>-Jahren) für Quarzfeinstaub außer Kraft gesetzt. Zurzeit wird diskutiert, ob für Quarzfeinstaub eine Expositions-Risiko-Beziehung abgeleitet werden kann, die die Angabe von Konzentrationen ermöglicht, die als tolerabel beziehungsweise akzeptabel anzusehen sind. Alternativ wird untersucht, ob die Angabe eines gesundheitsbasierten Arbeitsplatzgrenzwerts möglich ist. Derzeit gültige Grenzwerte liegen bei 0,05 mg/m<sup>3</sup> in den USA und bei 0,1 mg/m<sup>3</sup> in Großbritannien.

Steenland et al. (2001) zeigten in einer gepoolten Studie mit 65.980 Beschäftigten in Quarzfeinstaub-exponierten Industrien und 1.079 aufgetretenen Lungenkrebsfällen bereits ab einer Exposition von 2,0–5,4 mg/m<sup>3</sup>-Jahren ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko von 1,3 (95 % KI: 1,1–1,7) im Vergleich zu einer Exposition <0,4 mg/m<sup>3</sup>-Jahren. Allerdings waren die verschiedenen Studien der gepoolten Analyse sehr heterogen und sowohl für Rauchen als auch andere Störgrößen wurde nicht adjustiert. Die Konfidenzintervalle überlappen mit denjenigen der vorliegenden Studie.

Auf der anderen Seite kommen einige Studien zu dem Schluss, dass es keinen Hinweis dafür gibt, dass Quarzfeinstaub einen Risikofaktor für Lungenkrebs darstellt (Chen et al. 2007; Vacek et al. 2011).

Die Wismut-Studie bestätigt die Einschätzung der IARC, Quarzfeinstaub als krebserregende Sub-

**Abbildung 3: Anteil der Raucher unter den Fällen (n=439) und Kontrollen (n=550) aus einer eingebetteten Fall-Kontroll-Studie (Schnelzer et al. 2010) zu Lungenkrebs unter den Wismut-Bergarbeitern. Ein Raucher ist definiert als eine Person, die jemals in den letzten 20 Jahren vor ihrem Tod geraucht hat.**



stanz einzustufen. Im hohen Expositionsbereich wurde ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko beobachtet. In einem Expositionsbereich in Höhe des früheren Grenzwerts deutet sich in der deutschen Bergarbeiterstudie hingegen kein statistisch signifikant erhöhtes Lungenkrebsrisiko an. Ein geringfügiges Risiko ist jedoch nicht völlig auszuschließen.

## Literatur

Chen W, Bochmann F, Sun Y (2007): Effects of work related confounders on the association between silica exposure and lung cancer: a nested case-control study among Chinese miners and pottery workers. In: *Int Arch Occup Environ Health* 80: 320–326.

Dahmann D, Bauer HD, Stoyke G (2008): Retrospective exposure assessment for respirable and inhalable dust, crystalline silica and arsenic in the former German uranium mines of SAG/SDAG Wismut. In: *Int Arch Occup Environ Health* 81: 949–58.

IARC Monographs (1997): IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol 68: Silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils. International Agency for Research on Cancer. Lyon.

IARC Monographs (2012): IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol 100C: Arsenic, metals, fibres, and dust. International Agency for Research on Cancer. Lyon.

Kreuzer M, Schnelzer M, Tschense A et al. (2009): Cohort Profile: The German uranium miners cohort study (Wismut cohort), 1946–2003. In: *International Journal of Epidemiology*: 1–8.

Schnelzer M, Hammer GP, 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: 20–28.

Sogl M, Taeger D, Pallapies D et al. (2012): Quantitative relationship between silica exposure and lung cancer mortality in German uranium miners. In: *Br J Cancer* 107: 1188–1194.

Steenland K, Mannetje A, Boffetta P et al. (2001): Pooled exposure-response analysis and risk assessment for lung cancer in 10 cohorts of silica-exposed workers: an IARC multicentre study. In: *Cancer Causes Control* 12: 773–784. Erratum: *Cancer Causes Control* (2002) 13: 777.

Vacek P, Verma D, Graham W, Callas P, Gibbs G (2011): Mortality in Vermont granite workers and its association with silica exposure. In: *Occup Environ Med* 68: 312–318.

Walsh L, Tschense A, Schnelzer M et al. (2010): The influence of radon exposure on lung cancer mortality in German uranium miners, 1946–2003. In: *Radiat Res* 173: 79–90.

## Kontakt

Marion Sogl  
Bundesamt für Strahlenschutz  
Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit  
AG-SG 1.3 Strahlenepidemiologie  
85762 Oberschleißheim  
E-Mail: msogl[at]bfs.de

[BfS]