

Beitragsserien

Beitragsserie: Abschätzung der Schadstoffexposition in Abhängigkeit von Expositionsszenarien und Nutzergruppen

Autoren: Steffen Stubenrauch, Reinhold Hempfling, Norbert Simmleit (Institut Fresenius GmbH, Geschäftsbereich Fresenius Umwelt Consult, Im Maisel 14, D-65232 Taunusstein-Neuhof), Thomas Mathews, Peter Doetsch (focon Ingenieurgesellschaft mbH, Theaterstr. 106, D-52062 Aachen)

- Teil I: Grundlagen und Vorschläge zur Ableitung von Aufnahme-raten am Beispiel Trinkwasser
 Teil II: Vorschläge für orale Aufnahme-raten von Boden, Badeseewasser und Nahrungsmitteln des Eigenanbaus
 Teil III: Vorschläge für inhalative Aufnahme-raten
 Teil IV: Vorschläge für die Ableitung dermalen Aufnahme-raten

Präambel

Durch die zunehmenden Schadstoffbelastungen des Menschen über die verschiedenen Umweltmedien gewinnt die Abschätzung der daraus resultierenden Gesundheitsgefahren vermehrt an Bedeutung. Eine Ermittlung der Schadstoffbelastung macht es zunächst erforderlich, die Aufnahme schadstoffbelasteter Kontaktmedien (z.B. Boden, Wasser oder Staub) durch den exponierten Menschen zu ermitteln. Die vier Beiträge liefern hierzu im Rahmen einer quantitativen Expositionsabschätzung

Vorschläge für orale, inhalative und dermale Aufnahme-raten sowie Möglichkeiten einer umweltmedizinischen Beurteilung der errechneten Dosisraten. Im Verlauf der vorgeschlagenen Vorgehensweisen kann über eine standortspezifisch angepasste Abschätzung der Schadstoffexposition eine realistische und flexible Beurteilung von Schadstoffbelastungen, bezüglich der daraus resultierenden Gesundheitsgefahren auch bei sehr differenzierten Nutzungsverhältnissen durchgeführt werden.

Abschätzung der Schadstoffexposition in Abhängigkeit von Expositionsszenarien und Nutzergruppen

III. Vorschläge für inhalative Aufnahme-raten

Steffen Stubenrauch, Reinhold Hempfling, Norbert Simmleit, ¹Peter Doetsch

Institut Fresenius, Geschäftsbereich Fresenius Umwelt Consult, Im Maisel 14, D-65232 Taunusstein-Neuhof

¹ focon Ingenieurgesellschaft mbH, Theaterstraße 106, D-52062 Aachen

Zusammenfassung

Eine umweltmedizinische Beurteilung der Schadstoffbelastung des Menschen erfordert zunächst, dessen äußere Schadstoffexposition abschätzen zu können. Hierzu wurden in den bisherigen Teilen orale Aufnahme-raten für verschiedene Expositionsszenarien vorgeschlagen. Um die Durchführung derartiger Expositionsabschätzungen auch für komplexe Nutzungen zu ermöglichen, werden nutzergruppen- und expositionsszenariospezifisch weitere Vorschläge für inhalative Aufnahme-raten erarbeitet. Die vorgeschlagenen Aufnahme-raten dienen, gemeinsam mit gemessenen Schadstoffkonzentrationen in den entsprechenden Kontaktmedien, zur Abschätzung der von Menschen aufgenommenen Schadstoffdosen und ermöglichen durch einen Vergleich mit tolerierbaren Schadstoffdosen eine Beurteilung von inhalativen Schadstoffexpositionen. Um auch komplexe Nutzungen mit mehreren relevanten Aufnahmepfaden beurteilen zu können, wird desweiteren eine Betrachtung über alle Aufnahmepfade zu einer Gesamtkörperbelastung durchgeführt.

1 Einleitung

Nachdem die vorhergehenden beiden Teile dieser Studie ausführlich auf die Notwendigkeit der Festlegung von nutzergruppen- und expositionsszenariospezifischen Aufnahme-raten bei der umweltmedizinischen Beurteilung der Belastung des Menschen durch Umweltschadstoffeeingängen und hierzu entsprechende Vorschläge für orale Aufnahme-raten von Kontaktmedien vorgeschlagen wurden (STUBENRAUCH et al., 1994 a und b), sollen in diesem Teil inhalative Aufnahme-raten diskutiert werden. Hierbei erfolgt eine weitgehende Ausrichtung der Expositionsszenarien auf die **Altlastenproblematik**. Inhalative Aufnahme-raten werden u.a. für das Expositionsszenario „Wohnhaus“ berechnet. Dieses Szenario ist dabei für alle definierten Nutzergruppen (Säuglinge (S), Kleinkinder (K1), Kinder (K2), Jugendliche (J) und Erwachsene (E) als relevant zu betrachten (STUBENRAUCH et al., 1994 a).

Bei den Expositionsszenarien „gewerblich genutzte Gebäude“ (ausschließlich von Erwachsenen frequentiert), „Sport- und Bolzplätze“ (Flächen sportlicher Aktivitäten, in erster Linie Ballspiele) sowie „abgeschlossene Industrie- und Gewerbeflächen“ (gewerblich genutzte oder brachliegende Flächen die ausschließlich von Erwachsenen frequentiert werden können) sind dagegen lediglich bestimmte Nutzergruppen exponiert, so daß nur für die relevanten Gruppen Aufnahmeraten abgeleitet werden. Die Abschätzung der inhalativen Aufnahme von Schadstoffen am Arbeitsplatz in geschlossenen Räumen basiert dabei auf anderen Maßstäben, so daß die vorliegenden Abschätzungen für diese Thematik nur bedingt eine Anwendung finden können.

Im vorangegangenen zweiten Teil dieser Studie (STUBENRAUCH 1994 b) erfolgte neben der Ableitung oraler Aufnahmeraten weiterhin die aufnahmepfadspezifische Addition der einzelnen Expositionspfade (Boden-oral, Trinkwasser-oral, etc.) und die Bildung der Verhältnisse der errechneten aufnahmepfadspezifischen täglichen resorbierten Dosisraten (PDI) zur aufnahmepfadspezifischen tolerierbaren täglichen Dosisrate (TRD). Der vorliegende Artikel soll nun auf Grundlage dessen die Möglichkeit erörtern, die Schadstoffbelastung des Menschen über unterschiedliche Aufnahmepfade im Sinne einer Gesamtkörperbelastung zu einem Gesamtrisikoindex (GRI) zusammenzufassen.

Bei allen vorgeschlagenen Werten handelt es sich um langfristige, durchschnittliche Angaben. Akute Schadstoffexpositionen, bei denen es zu wesentlich höheren Aufnahmeraten kommen kann, werden hier nicht behandelt.

2 Inhalative Aufnahmeraten für Schadstoffe in Innenräumen

Gasförmige oder an Stäuben gebundene Schadstoffe können z.B. bei Altlasten über die Boden- oder Außenluft in nahegelegene Gebäude gelangen und dort zu einer Belastung der Innenraumluft führen. Flüchtige Schadstoffe oder schadstoffhaltige Stäube können jedoch auch direkt aus schadstoffbelasteten Gebäudeteilen emittieren. Einer solchen Belastung wird durch die Expositionsszenarien „Wohngebäude“ und „gewerblich genutzte Gebäude“ Rechnung getragen (vgl. STUBENRAUCH et al., 1994 a).

Für die Expositionsabschätzung ist es von grundlegender Bedeutung, durchschnittliche Aufnahmeraten (IR) sowie die unterschiedlichen Expositionshäufigkeiten (EFR) zu ermitteln. Die gewonnenen Daten können dann zu, auf das Körpergewicht (BW) bezogenen, täglichen Aufnahmeraten (DIR) berechnet werden (→ Formel 1).

$$\text{DIR} [\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{d}] = \text{IR} [\text{m}^3/\text{h}] \cdot \text{EFR} [\text{h}/\text{d}] : \text{BW} [\text{kg}] \quad (1)$$

Für das Expositionsszenario „Wohngebäude“ stellen Kleinkinder, Schwangere und Kranke die potentiell am stärksten exponierte Nutzergruppe dar. Als besonders empfindliche Personengruppen befinden sie sich den größten Teil des Tages innerhalb der Wohnung. Kinder halten sich dagegen bereits in erhöhtem Maße außerhalb der Wohnung auf (Spie-

len, Kindergarten, Schule). Berufstätige Erwachsene sind in der Regel einen großen Teil der Tageszeit außerhalb der Wohnung und somit eine geringere Zeitdauer exponiert. Hausfrauen und Mütter halten sich ähnlich lange in der Wohnung auf wie ihre Kinder.

Unter worst-case-Gesichtspunkten kann nach KEIDING und BORG (1990) von einer maximalen Expositionsdauer von 24 Stunden ausgegangen werden. Für eine realistische Beurteilung sind jedoch geringere, jährliche Durchschnittswerte von Relevanz, wenn eine Abwesenheit durch Spaziergänge, Einkäufe, Urlaube etc. berücksichtigt wird. In eine solche Abschätzung müssen verschiedene Expositionszeiten für die unterschiedlichen Jahreszeiten und für die Wochenenden mit einfließen. Über längere Zeit bettlägerige alte oder kranke Erwachsene, die sich täglich bis zu 24 h im Gebäude aufhalten, müssen dabei nicht explizit betrachtet werden, da sie durch weitaus sensiblere Nutzergruppen wie etwa Säuglinge mitberücksichtigt sind.

Für Säuglinge (S) und Kleinkinder (K1) wird davon ausgegangen, daß sie die Wohnung mindestens für durchschnittlich 3 Stunden täglich verlassen, um gemeinsam mit einem Erwachsenen einzukaufen, zu spielen o.ä. Die Expositionshäufigkeit wird daher mit 21 h/d angenommen. Die Expositionshäufigkeit für die Nutzergruppe Kinder (K2) wird mit durchschnittlich 18 h/d, für Jugendliche (J) 15 h/d und für Erwachsene (E) ebenfalls mit 21 h/d vorgeschlagen. Bei den hier relevanten Erwachsenen ist dabei von Personen auszugehen, die zuhause arbeiten (z.B. Hausfrauen und Mütter) und somit ähnliche Zeiträume im Haus verbringen wie Kleinkinder.

Aus medizinischen Untersuchungen existiert eine Reihe von Daten zu durchschnittlichen Atemraten. Angaben zu altersabhängigen Größen liegen dabei nur in geringerem Umfang vor. SRU (1990) sowie EIKMANN und MICHELS (1991) geben für Kleinkinder ein durchschnittliches Atemvolumen von 5 m³/d an. Zudem wird darauf hingewiesen, daß . . . „Kinder aufgrund höherer Bewegungsintensität mehr Schadstoffe mit der Atemluft pro kg Körpergewicht inhalieren und daher im Vergleich zu Erwachsenen stärker belastet werden können.“ EPA (1993) gibt für Erwachsene 20 m³/d an; für Kinder zwischen 1 und 6 Jahren werden durchschnittlich 12 m³/d abgeschätzt. Sehr differenziert aufgeführte Werte existieren bei EPA (1989). Hier werden aktivitätsabhängige Atemraten für alle Altersgruppen angegeben. Unter Berücksichtigung dieser Angaben wurden durchschnittliche tägliche Atemvolumina von 1,2 m³/d für S, 3 m³/d für K1, 12 m³/d für K2, 16 m³/d für J und 20 m³/d für E ausgewählt und hieraus entsprechende Aufnahmeraten errechnet (→ Box 1 und Tabelle 1). Die Abhängigkeit der ermittelten Werte von Aufnahmerate und Expositionshäufigkeit zeigt Abb. 1.

Box 1

Berechnungsbeispiel für Kleinkinder (BW = 10 kg):

$$\begin{aligned} \text{DIR} &= \text{IR} \cdot \text{EFR} : \text{BW} \\ \text{DIR} [\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{d}] &= (0,13 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 21 \text{ h}/\text{d}) : 10 \text{ kg} = \\ &0,26 \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{d} \end{aligned}$$

Tabelle 1: Expositionsdaten für die inhalative Aufnahme von Schadstoffen aus der Innenraumluft

Expositionsszenarien	Nutzergruppe	Kurzbeschreibung	DIR [m³/kg Körpergewicht und Tag]
Wohngebäude	S	Exposition 21 h/d, Atemrate 1,2 m³/d (0,05 m³/h) = 1,05 m³/d	0,2 (0,21)
	K1	Exposition 21 h/d, Atemrate 3 m³/d (0,13 m³/h) = 2,6 m³/d	0,3 (0,26)
	K2	Exposition 18 h/d, Atemrate 12 m³/d (0,5 m³/h) = 9 m³/d	0,5 (0,45)
	J	Exposition 15 h/d, Atemrate 16 m³/d (0,66 m³/h) = 10 m³/d	0,3 (0,25)
	E	Exposition 21 h/d, Atemrate 20 m³/d = 17,5 m³/d	0,3 (0,25)
gewerblich genutzte Gebäude	S	nicht relevant	/
	K1	nicht relevant	/
	K2	nicht relevant	/
	J	nicht relevant	/
	E	Exposition 5 h/d, Atemrate 20 m³/d (0,83 m³/h) = 4,16 m³/d	0,1 (0,06)

^a Die tägliche Aufnahmerate (DIR) ist ein gerundeter Wert, die Zahlen in Klammern geben den nicht gerundeten Wert wieder

Abänderungen der Expositionshäufigkeit ergeben sich, wenn es sich bei dem zu betrachtenden Gebäude um ein gewerblich genutztes Gebäude handelt. In diesem Fall ist von einer 8stündigen Exposition pro Arbeitstag auszugehen, wobei nur Erwachsene als relevante Nutzergruppe zu berücksichtigen sind. Auf den Jahresdurchschnitt betrachtet, bedeutet dies bei 254 Arbeitstagen abzüglich 25 Tagen Urlaub eine durchschnittliche Exposition von ca. 5 h/d. Als relevante Atemrate für Erwachsene wird wiederum von 20 m³/d ausgegangen (→ Tabelle 1).

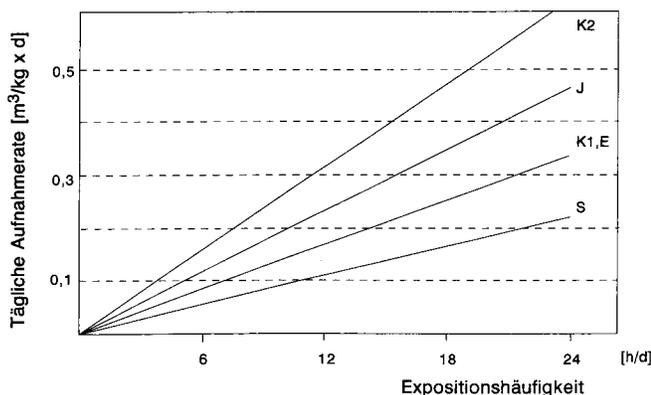


Abb. 1: Nutzergruppenspezifische Aufnahmeraten für inhalative Aufnahme schadstoffbelasteter Innenraumluft

3 Inhalative Aufnahmeraten schadstoffbelasteter Stäube im Freien

Besonders in den trockenen Sommermonaten ist bei offenen, nicht bewachsenen oder versiegelten Flächen mit hohen Staubeentwicklungen zu rechnen. Sind solche Stäube mit Schadstoffen belastet, gelangen sie über die Lunge in den Körper und stellen dort eine Gefährdung des exponierten Menschen dar. Stäube werden dabei als disperse Verteilung fester Stoffe in Gasen definiert, die u.a. durch Aufwirbelung z.B. von Böden oder Tennenbelagsmaterialien entstehen können (EIKMANN et al., 1993). Staubeentwicklung und Staubaufnahme sind stark von der Nutzung und dem vorliegenden Untergrund abhängig und deshalb schwer abschätzbar. Generell ist bei der Betrachtung des inhalativen Staubpfades mit der Aufnahme von partikelgebundenen Schadstoffen zu rechnen, wenn größere Flächen nicht mit Vegetation oder einem anderen Belag wie z.B. Asphalt bedeckt sind. Offenbar wird durch Begehen oder normale Freizeitaktivität nicht ausreichend Bodestaub aufgewirbelt, um eine erhöhte inhalative Aufnahme partikelgebundener Schadstoffe in gefährlichen Größenordnungen zu verursachen (EINBRODT et al., 1985, REICH und FRELS, 1992). Dagegen sind bei intensiver Nutzung der Fläche, z. B. durch Sport, umfangreichen Fahrzeugverkehr oder Erdarbeiten höhere Belastungen zu erwarten, zumal bei solch intensiven Nutzungen auch mit entsprechend hohen Atemraten gerechnet werden muß. Schwebstaubmessungen über Sportplätzen mit Belägen aus ehemaligem Haldenmaterial und Bleikonzentrationen zwischen 1 und 3,7 Gew.% ergaben, daß bei trockenem Wetter nach verschiedenen Spiel- und Freizeitaktivitäten toxikologisch bedenkliche Bleigehalte in der Luft auftreten können. Daraus ließ sich eine Belastung berechnen, die auf eine Gefährdung von Fußballspielern hinwies (DRESCH et al., 1976). Ähnlich hohe, durchschnittliche Staubkonzentrationen können ebenfalls infolge staubemittlernder Arbeiten auf gewerblich genutzten Flächen auftreten.

Als relevante Nutzungen für die inhalative Aufnahme schadstoffbelasteter Stäube können somit Sport- und Bolzplätze sowie Industrie- und Gewerbeflächen angenommen werden. Diesen Nutzungen ist durch die entsprechend definierten Expositionsszenarien, für die im folgenden Aufnahmeraten vorgeschlagen werden, Rechnung getragen (vgl. STUBENRAUCH et al., 1994 a).

Die inhalative Aufnahme gasförmiger Schadstoffe aus der Außenluft im Bereich von Altlasten wird hier nicht berücksichtigt, da sie mengenmäßig aufgrund der hohen Verdünnungsraten im Freien i.d.R nicht ins Gewicht fällt.

Für die umfassende Abschätzung der standortunabhängigen Exposition bei der Betrachtung von Staubebelastungen sind folgende grundlegenden Fragen zu klären:

- Bestimmung der lungengängigen Fraktion,
- Quantitative Aussagen über die mögliche Staubeentwicklung,
- Reduzierung der Staubeemission durch Niederschläge und andere Faktoren,
- Retention von Staubeilchen in der Lunge,
- Festlegung von Atemrate und Expositionsfrequenz für unterschiedliche Aktivitäten und in Abhängigkeit der relevanten Nutzergruppen.

3.1 Bestimmung der lungengängigen Fraktion

Zur Beurteilung der toxischen Wirkung von luftgetragenen Stäuben sind eine Reihe verschiedener chemischer und physikalischer Parameter wichtig, die aber – je nach Art der Einwirkung und der physiologischen Wirkung – eine unterschiedlich große Bedeutung besitzen. So sind neben der chemischen Zusammensetzung vor allem das Teilchengrößenspektrum, die Oberflächenbeschaffenheit und die geometrische Form der Teilchen wichtige Faktoren zur Einschätzung der biologischen Wirksamkeit von Stäuben (DANNECKER et al., 1982).

Schwebstäube als die kleinsten luftgetragenen Partikel, die gemeinsam mit den Rauchen und Nebeln zu den Aerosolen zählen, werden vom Menschen überwiegend über die Atmung aufgenommen. Wegen der speziellen Beschaffenheit der menschlichen Atmungsorgane ergeben sich durch besondere Abscheide- und Elutionsprozesse im menschlichen Organismus unterschiedlich große Aufnahmeraten für Partikel bzw. deren Inhaltsstoffe (DANNECKER et al., 1982).

Als relevante Kornfraktion für die inhalative Aufnahme von Stäuben geben EIKMANN und KLOKE (1992) $< 5 \mu\text{m}$ an. EPA (1989) schätzt die relevante Fraktion mit $< 10 \mu\text{m}$ ab. Nach DANNECKER et al. (1982) werden grobe Stäube ($> 3,5 \mu\text{m}$) vom Nasen- und Rachenraum überwiegend zurückgehalten und dort relativ schnell abtransportiert (biologische Halbwertszeit von vier Minuten), so daß der Alveolarbereich weitgehend geschützt ist vor den möglicherweise toxischen Grobstäuben. Ähnliches geschieht im Bereich von Luftröhre und Bronchien, wo die Flimmerhärchen zusammen mit einer Schicht von Bronchialschleim für den raschen Abtransport (biologische Halbwertszeit 10–60 min) abgelagerter Teilchen sorgen (DANNECKER et al., 1982).

Feine Stäube ($< 3,5 \mu\text{m}$) können bis in den Alveolarbereich der Lunge vordringen und werden daher als „lungengängiger Staub“ bezeichnet. Über Diffusions- und Sedimentationsvorgänge werden, abhängig vom aerodynamischen Durchmesser der Teilchen, bis zu 60 % des Aerosols abgeschrieben. Die Massenteilchen werden allmählich von den Phagozyten eliminiert, wobei eine wesentlich längere biologische Halbwertszeit von einem Tag bis zu einem Jahr anzunehmen ist. Hierdurch wird verständlich, daß die im Alveolarbereich zurück gehaltenen Aerosolanteile wesentlich intensiver eluiert werden und die löslichen Anteile viel stärker in die Flüssigkeitskreisläufe des Blutes und der Lymphe gelangen. Die spezifisch toxische oder kanzerogene Wirkung gelöster Schadstoffe kann sich hier besser entfalten, als es beispielsweise im Nasen-Rachen-Raum oder im Magen-Darm-Trakt im allgemeinen der Fall ist (DANNECKER et al., 1982). EIKMANN et al. (1993) beziffern die Depositionsrate im Alveolarbereich für Partikel $< 2 \mu\text{m}$ mit 100 % und für Partikel zwischen $2 - 10 \mu\text{m}$ mit 80 %.

Im allgemeinen darf somit angenommen werden, daß die toxische Wirksamkeit einer bestimmten Luftstaubspezies zwar von der Stoffzusammensetzung abhängig ist, aber mit kleiner werdendem aerodynamischen Durchmesser der Teilchen, wegen der zunehmenden Eluierbarkeit und der sich ändernden Deponierungswahrscheinlichkeit im Körper wesentlich ansteigt (DANNECKER et al., 1982).

Untersuchungen von DANNECKER, et al. (1982) zeigten, daß die Maxima der Staubmassenkonzentration „urbaner Aerosole“ im Größenbereich von $< 0,5 \mu\text{m}$ und $3 - 7 \mu\text{m}$ liegen. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, daß eine Reihe umweltrelevanter Elemente gerade im lungengängigen Feinstaub angereichert werden und dort außerdem gut löslich sind, wodurch eine hohe biologische Verfügbarkeit dieser Elemente besonders im Alveolarbereich gegeben ist (\rightarrow Tabelle 2).

Auch durch Untersuchungen von LAHMANN und JANDER (1987) wurde gezeigt, daß sich in urbanen Stäuben Schwermetalle wie Blei-, Cadmium- und Kupfer im Korngrößenbereich $< 3 \mu\text{m}$ zu mindestens 71 % anreichern.

Diese Ausführungen machen deutlich, daß der Bereich der lungengängigen Staubfraktion allgemein mit $< 5 - 10 \mu\text{m}$ angegeben werden kann. Deshalb wird vorgeschlagen, die inhalative Aufnahme von Schadstoffen aus der lungengängigen Fraktion $< 10 \mu\text{m}$ im Schwebstaub als relevant zu betrachten.

Tabelle 2: Anreicherung von Schwermetallen im Feinkornanteil von urbanem Schwebstaub (DANNECKER et al., 1982)

Element	Anreicherung in der Fraktion	Elutionsverhalten pH 5–6
As	$< 0,5 - 1,5 \mu\text{m}$	70–95 %
Cd	$< 0,5 - 1,5 \mu\text{m}$	überwiegend leicht löslich
Co	$3 - 30 \mu\text{m}$	steigt zum Feinstaub hin an (ca. 50 %)
Mo	$3 - 30 \mu\text{m}$	steigt zum Feinstaub hin an (70–95 %)
Ni	$< 0,5 - 1 \mu\text{m}$ und $3 - 30 \mu\text{m}$	steigt zu den Feinstäuben hin stark an (bis ca. 90 %)
Se	$< 0,5 - 1,5 \mu\text{m}$	–
V	$< 0,5 - 1,5 \mu\text{m}$	steigt zum Feinstaub hin an
Cu	$< 0,5 \mu\text{m}$ und $3 - 30 \mu\text{m}$	–

3.2 Quantitative Aussagen über die mögliche Staubentwicklung

Angaben zum Staubanteil in der Atemluft existieren u.a. von EIKMANN und KLOKE (1992). Von den Autoren wurden Werte von $20 - 500 \text{ mg Staub/m}^3$ mit einem Anteil inhalierbaren Feinstaubes von $10 - 90 \%$ angegeben. Konkretere Aussagen hierzu liegen bei DRESCH et al. (1976) vor. Im Rahmen von Messungen auf einem Sportplatz bei aktiver Spielsituation in einer Höhe von $1,50 \text{ m}$ kam es zu einer maximalen Staubkonzentration von 20 mg/m^3 . Der Anteil an Feinstaub $< 8 \mu\text{m}$ lag dabei nach DRESCH et al. (1976) bei 92 %. Zusätzliche Messungen von DRESCH et al. (1976) kamen zu noch höheren Ergebnissen bezüglich der Staubentwicklung. Durch kontinuierliches Aufschlagen eines Brettes in 2 m Entfernung vom Meßgerät konnten z.B. bis zu 500 mg Staub/m^3 gemessen werden. In Untersuchungen von REICH und FRELS (1992) wurden Staubmessungen bei simulierten Gartenarbeiten (dauerhaftes Harken und zeitweises Fegen unbewachsener Flächen) durchgeführt. Mit Hilfe ei-

nes in 88 cm Höhe angebrachten „personal air samplers“ wurde eine durchschnittliche Staubkonzentration von $5,8 \text{ mg/m}^3$ ermittelt. Ein in 1,5 m Höhe angebrachtes KleinfILTERGERÄT erbrachte einen durchschnittlichen Meßwert von $2,7 \text{ mg/m}^3$.

Diese Angaben weiter in Abhängigkeit des vorhandenen Untergrundes zu differenzieren, erscheint unserer Ansicht nach z. Zt. nicht realisierbar. Auch das Heranziehen von Winderosionsmodellen ermöglicht es nicht, definitive Aussagen zur untergrundabhängigen Staubbelastung zu treffen, da die Bedingungen bei Erosionsereignissen sich völlig von denen unterscheiden, die in expositionsrelevanten Fällen zu betrachten sind. Auch über die Betrachtung von Bodenarten und deren Anteil an lungengängiger Fraktion sind konkretere Aussagen nicht möglich. Hier ist jedoch zu bedenken, daß Böden, die zu großen Staubemissionen neigen, einen relativ geringeren Feinkornanteil haben als Böden, die nicht so leicht stauben, aber dafür einen größeren lungengängigen Feinkornanteil besitzen. Zu berücksichtigen wäre auch der organische Anteil im Boden, der Schadstoffe ebenfalls stark sorbiert und gleichzeitig einen wesentlichen Anteil des Gesamtstaubes bildet. Eine untergrund- oder bodenartabhängige Differenzierung erscheint aus diesen Gründen nicht sinnvoll.

Zur Festlegung des durchschnittlichen Staubanteils in der Luft erscheint daher eine Anlehnung an DRESCH et al. (1976) und REICH und FRELS (1992) sinnvoll. Dabei soll den höheren Aktivitäten auf „Bolz- und Sportplätzen“, durch einen höheren Staubanteil in der Luft Rechnung getragen werden. In diesem Sinne wird vorgeschlagen, für „Bolz- und Sportplätze“ von einer durchschnittlichen Staubkonzentration in der Luft (C_{OA}) von 10 mg/m^3 und für „Industrie- und Gewerbeflächen“ von 5 mg/m^3 auszugehen. Für letztere Nutzung kann jedoch auch ein Wert entsprechend dem MAK-Wert von 6 mg/m^3 (EIKMANN, 1993) herangezogen werden. Da bei den Messungen von DRESCH et al. (1976) festgestellt wurde, daß der lungengängige Staubanteil $< 8 \mu\text{m}$ einen Anteil am Gesamtstaub von 92 % besitzt und Fraktionen $< 10 \mu\text{m}$ als relevant betrachtet werden sollen, scheint es gerechtfertigt, den Anteil des inhalierbaren Feinstaubes dem Gesamtstaub gleichzusetzen.

Gerade im Rahmen der gewerblichen Nutzungen, wie etwa Bau- und Sanierungsarbeiten, Tätigkeiten auf Lagerflächen oder anderen Aktivitäten kann es einzelfallspezifisch zu deutlich unterschiedlichen, stark von den abgeschätzten 5 mg/m^3 abweichenden Staubkonzentrationen kommen. Für eine Expositionsabschätzung sollte daher soweit als möglich auf repräsentative Staubmessungen zurückgegriffen werden. Ist dies nicht möglich, so können ggf. angepaßte Werte in Beziehung zu den oben genannten Daten abgeschätzt werden. Hierfür kann es von Nutzen sein, auf Erfahrungswerte aus dem Bereich der Staubprognose für technische Anlagen o.ä. zurückzugreifen.

Bei allen Expositionsabschätzungen in diesem Bereich sollte darauf geachtet werden, daß mitzunehmender Versiegelung und Bedeckung der Fläche ein Rückgang der Staubkonzentration zu erwarten ist.

3.3 Reduzierung der Staubemissionen durch Niederschläge und andere Faktoren

Für die Abschätzung der Exposition über den Pfad Boden-Staub ist es von Bedeutung, die Niederschlagsverhältnisse mit in die Betrachtungen einzubeziehen. Es kann davon ausgegangen werden, daß relevante Staubkonzentrationen in der Luft nur bei niederschlagsfreiem Wetter zu erwarten sind. Von Einfluß ist hierbei jedoch nicht nur der Niederschlag an sich, sondern auch dessen Art und die Jahreszeit, in der er fällt. So ist in den Wintermonaten aufgrund der geringeren Sonneneinstrahlung und der niedrigeren Temperaturen generell seltener mit Witterungen zu rechnen, bei denen es zu einer relevanten Staubemission kommt.

Nach Daten aus dem Hydrologischen Atlas der Bundesrepublik Deutschland der Jahre 1931 – 1960 liegt die mittlere jährliche Zahl der Tage mit Niederschlag $> 1 \text{ mm}$ bei 122,5 d, was etwa einem Drittel der Jahrestage entspricht. Berücksichtigt sind hierbei nicht die Niederschlagsereignisse, die als Niesel bezeichnet werden und einen Tropfendurchmesser von durchschnittlich $< 0,1 \text{ mm}$ haben (WEISCHET, 1983).

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß in den Monaten April bis Oktober die Ausnutzung von Sport-/Bolzplätzen, aber auch der Anteil von Außenarbeiten am größten ist und außerdem aufgrund der schnelleren Austrocknung durch die erhöhte Sonneneinstrahlung die Staubentwicklung besonders hoch ist. In dieser Jahreszeit sind Niederschlagsereignisse in Form von Nieselregen nicht relevant. Auch in diesem Zeitraum sind durchschnittlich $1/3$ der Monatstage Tage mit Niederschlag, wobei nicht jedes Niederschlagsereignis ganz-tägig zu einer Verhinderung der Staubeinstehung führt.

Daraus folgt, daß im Winterhalbjahr generell mit geringeren, im Sommerhalbjahr mit höheren Staubemissionen zu rechnen ist. Es erscheint daher angebracht, die Zahl der Tage mit relevanten Staubemissionen auf „Bolz-/Sportplätzen“ und „Industrie- und Gewerbeflächen“ im Jahresmittel um $1/3$ (Feuchtefaktor (FeuF) = 0,66) zu reduzieren. Die Unterschiede bezüglich Nutzungsintensität und Klima zwischen Sommer- und Winterhalbjahr werden mit diesem Faktor weitgehend ausgeglichen und gemittelt. Die regionalen Unterschiede der monatlichen bzw. jährlichen Niederschlagsereignisse und Niederschlagsmengen werden dabei nicht gesondert berücksichtigt. Die Auswirkungen einer möglichen Beschattung der Fläche durch Bäume oder Hecken sind in ihrer quantitativen Beeinflussung ebenfalls nicht berücksichtigt, da sie als vernachlässigbar gelten können.

3.4 Retention von Staubteilchen in der Lunge

Von Bedeutung für die Schadstoffaufnahme ist auch die Retention der Staubeinsteiger in der Lunge, d.h. die Berücksichtigung des Anteils wieder ausgeatmeten Feinstaubes. Als Retentionsfaktor (RetF) wird in der Literatur überwiegend 0,75 angegeben (z.B. HAWLEY, 1985; VAN DEN BERG und ROELS, 1991).

3.5 Festlegung von Atemrate und Expositionshäufigkeit für unterschiedliche Aktivitäten und in Abhängigkeit der relevanten Nutzergruppen

Grundlage für die Festlegung der Atemfrequenzen bei sportlichen Aktivitäten sind hier die differenzierten Angaben der EPA (1989). Dabei wurden Atemraten für schwere bis mittlere körperliche Belastungen, die nach EPA (1989) in etwa zwischen den Aktivitäten von „Fahrradfahrern“ und „Handballspielern“ liegen, zugrundegelegt. Hierbei wird davon ausgegangen, daß hohe Atemfrequenzen sich mit mittleren Atemfrequenzen abwechseln und der Durchschnitt in etwa den gewählten Werten entspricht. Die Atemrate während körperlicher Arbeiten auf gewerblich genutzten Flächen wird mit 1,2 m³/h veranschlagt. Dies entspricht einer leichten bis mittleren körperlichen Aktivität.

Für Bolz- und Sportplätze wird nach eigenen Abschätzungen als Expositionshäufigkeit für die relevanten Nutzergruppen K2 und J vier mal zwei Stunden pro Woche, für E zwei mal zwei Stunden pro Woche vorgeschlagen; das entspricht einem Durchschnittswert von 1,14 h/d für K2 und J bzw. 0,57 h/d für E. Die durchschnittliche tägliche Staubaufnahme (DIR) läßt sich nach diesen Angaben wie in Box 2 beschrieben berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Box 2:

Expositionsabschätzung für die inhalative Staubaufnahme

$$DIR = (C_{OA} \cdot EFR \cdot IR \cdot RetF \cdot FeuF) : BW$$

Berechnungsbeispiel für Jugendliche auf Sport- und Bolzplätzen:

$$DIR = (10 \text{ mg/m}^3 \cdot 1,14 \text{ h/d} \cdot 2,4 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 0,75 \cdot 0,66) : 40 \text{ kg} \\ = 0,34 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$$

IR = Aufnahme­rate EFR = Expositionshäufigkeit
C_{OA} = Konz. Staub/Außenluft DIR = tägl. Aufnahme­rate
RetF = Retention i. d. Lunge FeuF = Feuchtefaktor
BW = Körpergewicht

Für die Betrachtung der inhalativen Staubaufnahme bei Arbeiten auf „abgeschlossenen, unbefestigten Industrie- und Gewerbeflächen“ gelten ähnliche Ausgangsbedingungen wie bei dem Expositionsszenario „Bolz- und Sportplätze“. Hier ist jedoch nur von einer Exposition von Erwachsenen auszugehen, die dort Arbeiten verrichten, welche mit Staubemissionen verbunden sind (Erd- und Sanierungsarbeiten, Fahrzeugverkehr, etc). Die Expositionsfrequenz wird mit durchschnittlich 2,5 h/d angenommen, was in etwa 50 % Arbeit mit Staubexposition im Jahresdurchschnitt (→ Tabelle 3) entspricht.

4 Fallbeispiel: Schrebergartengelände mit Bolzplatz

4.1 Situationsbeschreibung

Auf einem ehemaligen Industriegelände, auf dem u.a. die Herstellung von Beiz- und Holzschutzmitteln betrieben wurde, befindet sich eine Schrebergartenkolonie. Voruntersuchungen ergaben maßgebliche Belastungen mit anorganischem Quecksilber. Neben den eigentlichen Schrebergärten existieren auch ein Vereinshaus sowie ein Bolzplatz auf dem

Gelände. Im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung wurde die Exposition für die Expositionsszenarien „Garten“ sowie „Bolz- und Sportplätze“ ermittelt. Relevante Expositionspfade waren somit „Boden-oral“, „Pflanze-oral“ und „Staubinhalativ“. Eine gas- oder staubförmige Belastung durch anorganisches Quecksilber im Vereinshaus konnte als unbedeutsam betrachtet werden.

Tabelle 3: Expositionsdaten für die inhalative Aufnahme von schadstoffbelasteten Stäuben aus der Außenluft

Expositionsszenarien	Nutzergruppe	Kurzbeschreibung	DIR ^a [m ³ /kg Körpergewicht und Tag]
Bolz- und Sportplätze	S	nicht relevant	/
	K1	nicht relevant	/
	K2	Exposition 1,14 h/d, Atemrate 1,8 m ³ /h = 2,1 m ³ /d; 10 mg/m ³ Staub, 75 % Retention in der Lunge, 33 % des Jahres staubfrei = 10,2 mg/d	0,5 (0,508)
	J	Exposition 1,14 h/d, Atemrate 2,4 m ³ /h = 2,7 m ³ /d; 10 mg/m ³ Staub, 75 % Retention in der Lunge, 33 % des Jahres staubfrei = 13,5 mg/d	0,3 (0,338)
	E	Exposition 0,57 h/d, Atemrate 3 m ³ /h = 1,7 m ³ /d; 10 mg/m ³ Staub, 75 % Retention in der Lunge, 33 % des Jahres staubfrei = 8,5 mg/d	0,1 (0,121)
Industrie- und Gewerbeflächen	S	nicht relevant	/
	K1	nicht relevant	/
	K2	nicht relevant	/
	J	nicht relevant	/
	E	Exposition 2,5 h/d, Atemrate 1,2 m ³ /h = 3 m ³ /d; 5 mg/m ³ Staub, 75 % Retention in der Lunge, 33 % des Jahres staubfrei = 7,4 mg/d	0,1 (0,106)

^a Die tägliche Aufnahme­rate (DIR) ist ein gerundeter Wert, die Zahlen in Klammern geben den nicht gerundeten Wert wieder

4.2 Expositionsabschätzung

Im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung für die exponierten Nutzer erfolgte eine detaillierte Kontaktmedienbe­probung und -analyse, deren Ergebnisse in Tabelle 4 wiedergegeben sind. Dabei wurden neben Boden- und Pflanzenmischproben auch Staubkonzentrationen in der Luft am Bolzplatz während eines Fußballspieles von Kindern analysiert.

Die Berechnung der Gesamtkörperbelastung wurde für die Nutzergruppen K1, K2 und E durchgeführt, wobei sich die Gruppe der Kinder (K2) für die beschriebene Nutzung als die sensibelste erwies (bezüglich der Ableitung der oralen Aufnahme­raten (siehe STUBENRAUCH et al., 1994 b). Hierzu erfolgte zunächst, mit Hilfe der täglichen Aufnahme­rate (DIR), die Ermittlung der täglichen resorbierten Schadstoff-

dosis (PDI). Um diese innere Exposition (PDI) zu berechnen, muß für anorganisches Quecksilber von einer 7 %igen oralen und einer 80 %igen inhalativen Resorptionsrate (R) (HASSAUER et al., 1993) ausgegangen werden. Nach der Ermittlung der expositionspfadspezifischen PDI_{EP} erfolgte deren aufnahmepfadspezifische Addition zur PDI_{AP} . Die Ergebnisse wurden anschließend mit aufnahmepfadspezifischen, tolerierbaren, resorbierten täglichen Dosisraten (TRD) ins Verhältnis gesetzt ($PDI_{AP} : TRD$) und anschließend zu einer Gesamtkörperbelastung (GRI) addiert. Die beschriebene Vorgehensweise ist in Tabelle 4 zusammenfassend dargestellt. Anzumerken ist, daß zur Ermittlung einer exakten Gesamtkörperdosis die ubiquitäre Grundbelastung des Menschen über Nahrungsmittel, Trinkwasser und Luft (UBI) zum PDI hinzuzurechnen wäre, um so die gesamte Schadstoffexposition (TPDI bzw. TGRI) zu erhalten (\rightarrow Abb. 2). Nach HASSAUER et al. (1993) beträgt die oral und inhalativ aufgenommene UBI (resorbiert) für Quecksilber 0,05 – 0,25 $\mu\text{g}/\text{kg d}$. Für die vorliegende Betrachtung wurde der untere Schwellenwert gewählt, da die zu beurteilende Fläche innerhalb eines Reinluftgebietes liegt.

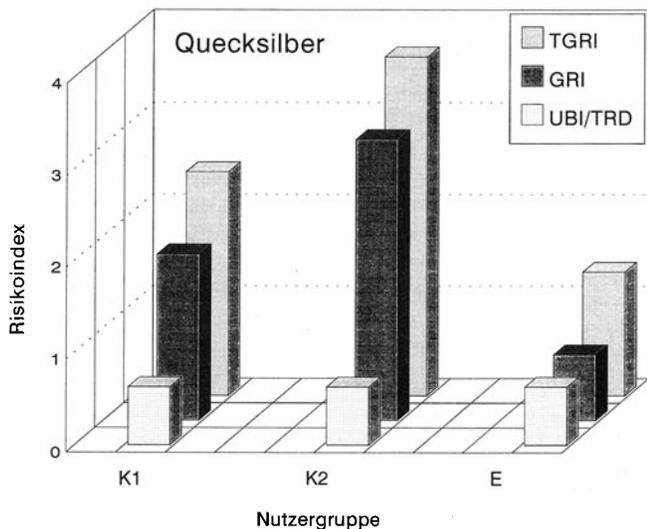


Abb. 2: Ermittelte Risikowerte im Vergleich zur UBI

4.3 Gefahrenbeurteilung

Zur Beurteilung der in Tabelle 4 errechneten Körperdosen (PDI) wurden aufnahmepfadspezifische tolerierbare resorbierte tägliche Dosisraten (TRD) als langfristige Orientierungswerte von HASSAUER et al. (1993) ($TRD = 0,08 \mu\text{g}/\text{kg d}$ oral und $0,07 \mu\text{g}/\text{kg d}$ inhalativ) oder Referenzdosen der EPA (1993) (berechneter RFD = $0,021 \mu\text{g}/\text{kg d}$ oral und $0,067 \mu\text{g}/\text{kg d}$ inhalativ) herangezogen. Legt man die Werte von HASSAUER et al. (1993) für eine Gefahrenbeurteilung zugrunde, wird deutlich, daß es aufnahmepfadspezifisch bei Kleinkindern und Kindern zu leichten Überschreitungen der TRD-Werte kommt.

Da es sich bei dem vorliegenden Fallbeispiel jedoch um eine komplexe Nutzung mit mehreren relevanten Aufnahmepfaden handelte, war es erforderlich die gesamte auf den Organismus wirkende Schadstoffbelastung zu beurteilen. Eine

Möglichkeit, die Gesamtkörperbelastung zu ermitteln, besteht in der Addition der berechneten TRD-Wert-Überschreitungen (RI). Addiert man die einzelnen aufnahmepfadspezifischen Verhältnisse zu Gesamtrisikoindizes (GRI) auf (\rightarrow Formel 2), so wird die jetzt auf den gesamten Organismus bezogene Überschreitung der tolerierbaren täglichen Dosis bereits deutlicher.

Berechnung der Risikoindizes (2)

$$GRI = \frac{PDI_{oral}}{TRD_{oral}} + \frac{PDI_{inhalativ}}{TRD_{inhalativ}}$$

$$TGRI = \frac{PDI_{oral} + UBI_{oral}}{TRD_{oral}} + \frac{PDI_{inhalativ} + UBI_{inhalativ}}{TRD_{inhalativ}}$$

Die errechneten Gesamtrisiken waren jedoch aufgrund ihrer relativ geringen TRD-Wert-Überschreitung noch in einem Bereich, der keine akuten Gefahren erwarten ließ. Eine sofortige Schließung des Geländes konnte somit unterbleiben. Mittelfristig mußten im konkreten Fall jedoch Nutzungseinschränkungen oder Sanierungsmaßnahmen angemahnt werden. Da ein wesentlicher Beitrag zur Gesamtexposition von dem Bolzplatz herrührte, wurde dessen Schließung oder die Aufschüttung eines gesundheitsungefährlichen Belages angedenkt.

5 Schlußfolgerungen

Die in den drei Teilen dieser Studie vorgeschlagenen nutzergruppen- und expositionsszenariospezifischen Aufnahmeraten bilden eine wichtige Grundlage für die Abschätzung der Wirkungen von schadstoffbelasteten Kontaktmedien auf die Gesundheit des Menschen. Die Addition der errechneten Körperdosen über den Aufnahmepfad, die Verhältnissbildung mit toxikologisch abgeleiteten, tolerierbaren Schadstoffdosen und die Addition dieser so berechneten Risikoindizes zu einem Gesamtgesundheitsrisiko führen zu einer nachvollziehbaren Beurteilung der Schadstoffbelastungen, denen exponierte Bevölkerungsgruppen ausgesetzt sein können. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine realistische und flexible Beurteilung von Gesundheitsgefahren auch bei differenzierten Nutzungsverhältnissen und ist damit einer Gefährdungsabschätzung auf der Basis eines starren Vergleichs mit Grenz- und Richtwerten überlegen. Eine Anwendung ist im Rahmen der Altlastensanierung und -überwachung, der Problematik schadstoffbelasteter Innenräume oder bei verschiedenen anderen Umweltkontaminationen denkbar. So könnte beispielsweise auch nach Industrieunfällen eine realistische Abschätzung der Exposition bei der Planung von Maßnahmen hilfreich sein. Weitere Anwendungen ergäben sich bei einer städtebaulichen Überplanung von schadstoffbelasteten Flächen. Hier wäre es möglich, sich bei der Planung von Folgenutzungen auf ein Expositionsabschätzungsmodell als hilfreiches Planungsinstrument zu stützen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Expositionsabschätzung für die Nutzung eines Schrebergartengeländes mit Bolzplatz und einer Belastung durch organisches Quecksilber (Konzentration = 30 mg/kg im Boden¹)

Nutzergruppe	Expositions-pfad	Schadstoffkonz. Kontaktmedium	DIR	R [%]	PDI _{EP} [µg/kg d]	PDI _{AP} [µg/kg d]	TRD [µg/kg d]	RI	GRI	TGRI ³
K1	Boden-oral	0,03 µg/mg ¹	55 mg/kg d	7	0,116	0,142	0,08	1,8	1,80	2,43
	Pflanze-oral ²	0,001 µg/mg TG	3 700 mg/kg d	7	0,027					
	Staub-inhalativ	0,4 µg/mg	nicht relevant	80	–	–	0,07	–		
K2	Boden-oral	0,03 µg/mg ¹	15 mg/kg d	7	0,032	0,06	0,08	0,75	3,05	3,68
	Pflanze-oral ²	0,001 µg/mg TG	3 700 mg/kg d	7	0,026					
	Staub-inhalativ	0,4 µg/mg	0,5 mg/kg d	80	0,16	0,16	0,07	2,3		
E	Boden-oral	0,03 µg/mg ¹	nicht relevant	7	–	0,02		0,08	0,71	1,34
	Pflanze-oral ²	0,001 µg/mg TG	2 900 mg/kg d	7	0,02					
	Staub-inhalativ	0,4 µg/mg	0,1 mg/kg d	80	0,032		0,032	0,46		

1 C-Wert der Holland-Liste = 10 mg/kg

2 Schadstoffkonzentration Pflanze in Trockengewicht (TG = 10 % vom Frischgewicht), Aufnahmerate in Frischgewicht

3 für UBI = 0,05 µg/kg d

R Resorption

PDI Potentielle tägliche resorbierte Dosisrate (EP = Expositionspfad, AP = Aufnahmepfad)

TRD Tolerierbare resorbierte tägliche Dosisrate (aufnahmepfadspezifisch)

RI Risikoindex als Verhältnis PDI/TRD

GRI Gesamtrisikoindex als Summe der aufnahmepfadspezifischen RIs

TGRI Gesamtrisikoindex unter Berücksichtigung der ubiquitären Grundbelastung über Nahrungsmittel, Wasser und Luft (UBI)

Danksagung

Wir danken dem Umweltbundesamt für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der UBA F & E Vorhaben 103 02 122 – TA5 sowie 103 40 107. Desweiteren danken wir der BMU/UBA – GefA und der ihr angehörenden Experten für die Unterstützung bei der Erarbeitung der Expositionsparameter.

6 Literatur

- DANNECKER, W.; K. NAUMANN; J. BERGMANN (1982): Untersuchung der Korngrößenverteilung von Schwebstäuben sowie des Elutionsverhaltens darin enthaltener umweltrelevanter Elemente. Staub – Reinhalt. Luft 42, Nr. 4, 176 – 182
- DRESCH, W.; H. J. EINBRODT; A. SCHRÖDER (1976): Beurteilung einer möglichen Gesundheitsgefährdung durch bleihaltige Sportplatzbeläge. Sportarzt und Sportmedizin 9, 216 – 220
- EIKMANN, T.; S. MICHELS (1991): Bewertung von flüchtigen Schadstoffen im Boden im Hinblick auf ihre humantoxikologische Wirkung. IWS-Schriftenreihe Bd. 13, 231 – 249
- EIKMANN, T.; A. KLOKE (1992): Ableitungskriterien für nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden. Müll und Abfall 11, 789 – 805
- EIKMANN, T.; A. BRAMMERTZ; S. EIKMANN (1993): Kriterien zur Beurteilung der inhalativen Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden – Beispiel: Kontamination von Sport- und Bolzplätzen. In: ROSENKRANK/EINSELE/HARRESS, Bodenschutz – Ergänzbares Handbuch, 1990 – 1993
- EINBRODT, H. J.; F. RIEDEL; T. EIKMANN; L. WALLISER; N. JAKOBI (1985): Altlasten und Umweltgefährdung – am Beispiel des ehemaligen Erzbergbaus im Raum Mechnich (Eifel). Wissenschaft und Umwelt H. 2, 149 – 157
- EPA (1989): Exposure Factors Handbook, Washington, EPA 600 – 8-89-043
- EPA (1993): Risk-Based Concentration Table. Third Quarter 1993, EPA-Mitteilung an die RBC mailing list.
- LEPOW, M. L.; L. BRUCKMAN; M. GILLETTE; S. MARKOWITZ; R. ROBINO; J. KAPISH (1975): Investigations into sources of lead in the environment of urban children. Environmental Research 10: 415 – 426
- HASSAUER, M.; F. KALBERLAH; J. OLTMANN; K. SCHNEIDER (1993): Basisdaten Toxikologie für umweltrelevante Stoffe zur Gefahrenbeurteilung bei Altlasten; Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe; Abschlußbericht des Vorhabens, Forschungsbericht FKZ 102 03 443/01, Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berichte 4/93, Erich Schmidt Verlag Berlin
- HAWLEY, J. K. (1985): Assessment of Health Risk from Exposure to Contaminated Soil. Risk Analysis Vol. 5, No. 4, 289 – 302
- KEIDING, L.; D. BORG (1990): Abschätzung der Humanexposition bei Plänen zur Wiedernutzbarmachung von Altlasten. In: ARNDT, F. et al. (Hrsg.): Altlastensanierung '90. Kongreß über Altlastensanierung 1990, Karlsruhe. Band I und II
- LAHMANN, D.; K. JANDER (1987): Schwermetalle in der Umwelt – Umwelthygienische und gesundheitliche Aspekte. Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York 1987
- REICH, T.; L. FRELS (1992): Bericht über Staubmessungen bei Gartenarbeit, zur Abschätzung einer maximalen Belastung durch Schadstoffe im Boden, unveröffentlicht
- SRU (Der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen) (1990): Sondergutachten „Altlasten“, Stuttgart: Metzler-Pöschel, 1990.
- STUBENRAUCH, S.; R. HEMPFING; N. SIMMLEIT; T. MATHEWS; P. DOETSCH (1994 a): Abschätzung der Schadstoffexposition in Abhängigkeit von Expositionsszenarien und Nutzergruppen, Teil 1: Grundlagen und Vorschläge zur Ableitung von Aufnahmeraten am Beispiel von Trinkwasser, Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung (UWSF) 6 (1) 41 – 49 (1994)
- STUBENRAUCH, S.; R. HEMPFING; N. SIMMLEIT; T. MATHEWS; P. DOETSCH (1994 b): Abschätzung der Schadstoffexposition in Abhängigkeit von Expositionsszenarien und Nutzergruppen, Teil 2: Vorschläge für orale Aufnahmeraten von Boden, Badeseewasser und Nahrungsmitteln des Eigenanbaus, Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung (UWSF) 6 (3) 165 – 174 (1994)
- VAN DEN BERG, R.; J. M. ROELS (1991): Beurteilung der Gefährdung des Menschen und der Umwelt durch Exposition gegenüber Bodenverunreinigungen. – Integration der Teilaspekte. – RIVM, Bericht Nr. 725201007, Bilthoven
- WEISCHET, W. (1983): Einführung in die Allgemeine Klimatologie, Teubner Studienbücher Geographie, Stuttgart