

Humantoxikologische Bewertung von Schlacken aus der Stahlindustrie

Heidi Foth

1.	Ziele Humantoxikologischer Bewertung	152
2.	Vorgehensweisen bei der Bewertung in der Humantoxikologie	154
2.1.	Identifizierung der Inhaltsstoffe von Schlacken.....	154
2.2.	Charakterisierung von Schadstoffen	155
2.2.1.	Allgemeine humantoxikologische Beurteilung.....	155
2.2.2.	Akute Gefahren durch Schlacken	156
2.3.	Dosis- Effektbeziehung.....	157
2.3.1.	Allgemeines zu Wirkschwellen und humantoxischen Effekten.....	157
2.3.2.	Beurteilung der Schlacken aus der Stahlerzeugung	158
2.4.	Expositionsbeurteilung	159
2.4.1.	Ziele und Verfahren	159
2.4.2.	Expositionsszenarien bei Umgang und Kontakt mit Schlacke	160
3.	Humantoxikologische Bewertung von Schlacken aus der Stahlindustrie	160
4.	Ausblick auf Risikoermittlung in der Humantoxikologie	161
5.	Literatur (Auswahl).....	162

Bei der Gewinnung von Roheisen, Rohstahl und Erzeugung von Qualitätsstählen entstehen wie auch bei der Gewinnung von Nichteisenmetallen Reststoffe und Abfälle in Form von Schlacken. Auch durch verfahrenstechnische Verbesserungen liegt die Menge an Hochofenschlacke in einem Bereich von etwa 220 kg/t Roheisen [1]. Sie bestehen im Wesentlichen aus den mineralischen Komponenten des Gesteins und enthalten oxidierte Begleitelemente der Rohmetalle sowie Zuschlagsstoffe, die zum Beispiel zur Förderung der Schlackenbildung eingesetzt werden. In Abhängigkeit vom Verfahren, den Schmelztemperaturen sowie den Abkühlbedingungen fallen die Schlacken in unterschiedlicher Korngröße, Verteilung der Komponenten und vor allem Aggregatzustand der Gesteinsminerale, z.B. auch als Mineralgläser, an.

Die Schlacke aus der Stahlerzeugung (Hochofenschlacke, Elektroofenschlacke (EOS)) bildet den weitaus größten Anteil am Gesamtaufkommen von Schlacken. Sie wird bereits traditionell weiterverwertet, z.B. als Tragschicht im Straßenbau oder in Deckschichten von Lärm- und Erdschutzwällen. In Untersuchungen an einem Straßendamm, in dem EOS Schlacke eingebaut wurde, wurden in Wasserproben aus Dränwasser und im Einzelfall auch im abstromigen Grundwasser Belastungen mit Schwermetallen gefunden, die aus der Schlacke im Laufe der Zeit freigesetzt und im gefundenen Ausmaß nicht erwartet wurden.

Die Verwendung von Schlacken im Straßenbau muss daher Leitlinien befolgen [2] und aus wasserwirtschaftlicher Sicht technische Sicherungsmaßnahmen zum Trinkwasser- und Grundwasserschutz umfassen [3].

Es stellt sich die Frage, ob der Kontakt und Umgang mit Schlacken auch ein Risiko für die menschliche Gesundheit darstellen kann. Im folgenden Beitrag soll am Beispiel der Schlacken aus der Stahlindustrie die Vorgehensweise bei der humantoxikologischen Bewertung dargestellt werden. Dazu werden die Aufgaben, Ziele und Methoden in der Humantoxikologie zunächst in einem Allgemeinen dargestellt und dann auf den speziellen Kontext fokussiert.

Aufgaben der Toxikologie

Die Toxikologie untersucht die gesundheitsschädlichen Auswirkungen von Arbeitsstoffen und Erzeugnissen (Industriechemikalien, Pestiziden, Arzneimitteln) oder Substanzgemischen auf Lebewesen, insbesondere auf den Menschen. Ihre Aufgabe ist es, die Art und das Ausmaß von Schadwirkungen mit wissenschaftlich basierten Methoden und Strategien zu erfassen, die zugrunde liegenden schädlichen Wirkmechanismen aufzuklären, mögliche Gefährdungen vorherzusagen und das Risiko bei einer gegebenen oder angenommenen Exposition gegenüber dem chemischen Stoff abzuschätzen. Ein sicherer Umgang ist immer dann möglich, wenn alle Anwender die möglichen Schadwirkungen und die dafür kennzeichnenden Begleitumstände kennen und schnell in ihrer Relevanz bei bestimmten Anwendungssituationen einordnen können. Daher hat die Einstufung eines Stoffes als Gefahrstoff weitreichende Auflagen an die Herstellung, Abfüllung, Verpackung, Transport, Abgabe, Umgang oder Abfallbehandlung.

1. Ziele Humantoxikologischer Bewertung

Die klassische Toxikologie baut auf Erfahrungen der Medizin auf und ist daher wie diese eine weitgehend empirische Wissenschaft. Es werden Standard-Testverfahren eingesetzt, um auf der Basis von in vivo Untersuchungen am Tier kennzeichnende, krankmachende Veränderungen zu suchen, die anhand der (äußeren) Krankheits-Ursache (Ätiologie), körperlichen Entwicklung der Schäden (Pathogenese), feingeweblichen Struktur (Morphologie) und statistischer Datensicherheit (Signifikanz) eingeordnet werden und die Grundlage für aufbauende regulatorische Entscheidungen liefert.

Besonderheiten der Klinischen Toxikologie

Bei der Behandlung Vergifteter in der Klinischen Toxikologie besteht hoher Entscheidungsdruck bestimmte Maßnahmen einzuleiten oder bewußt zu unterlassen, denn angesichts der Eigendynamik des Körpers kann ein Eingriff die positive Entwicklung fördern oder hemmen (*Verschlimmbesserung*). Das Behandlungsziel ist gestuft A) Überleben, B) Heilung und C) dauerhafter Erhalt der Gesundheit, Arbeitsfähigkeit und Belastbarkeit. Als Gefahr ist das dauerhafte Ausbleiben der Ziele zu bezeichnen. Das Risiko ist eine erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit für diese Gefahr und zur Verminderung werden Frühindikatoren gesucht, die die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung erhöhen. Klinische Toxikologie ist immer auf das Individuum bezogen und umfaßt die Diagnose der Situation und die Entscheidung zur Behandlungsstrategie und Abwägung von Alternativen. Die Entscheidungsgrundlage wird möglichst anhand von Evidenzen aus klinischen (Beobachtungs-)Studien aus Vergleichsgruppen zusammengetragen. Nachträglich kann hoher Rechtfertigungsdruck entstehen, der unter Umständen weitreichende Folgen haben kann.

Besonderheiten der Humantoxikologie am Arbeitsplatz

In der Arbeitstoxikologie sowie der Chemikaliensicherheit im Allgemeinen ist die Besonderheit ein hoher Komplexitätsgrad aufgrund der Stoffvielfalt und Kombinationswirkungen und weniger aufgrund eines hohen situativen Entscheidungsdrucks. Die Zielkriterien sind die grundlegenden Stoffeigenschaften zu kennen, die zu Schäden führen können. Dabei sind prioritär die physikalisch-chemischen Gefahren (Temperatur, Brennbarkeit, Explosivität, pH, oxidative Eigenschaften, Freisetzen giftiger Gase) sowie toxische Gefahren (ätzend, reizend, sensibilisierend, organotoxisch, kanzerogen-mutagen-reproduktionstoxisch) anzusprechen. Die Arbeitstoxikologie orientiert sich immer am Gruppenbezug, weil dies die Beurteilungsbasis auch für den Einzelfall liefert. Es geht um das Erkennen von Risikofaktoren für Gesundheitsschäden durch Arbeitsstoffe und Arbeitsprozesse und ihre Priorisierung. Daraus werden die Schutzprinzipien für die Gestaltung sicherer Arbeitsplatzbedingungen abgeleitet und Ansätze zur Sekundärprophylaxe für möglicherweise schon geschädigte Arbeitnehmer, um die Krankheitsentwicklung zu stoppen oder zu mildern. Die Entscheidungsgrundlage wird anhand von Standards für zulässige Belastungswerte gestellt, die aus den epidemiologischen Studien mit Unterstützung durch Kenntnisse aus Tierversuchen abgeleitet werden.

Ziele der Grundlagenforschung

In der toxikologischen Forschung werden Ursachen für Gesundheitsschäden ermittelt möglichst einschließlich der Aufklärung von (zellulären) Wirkmechanismen. Daraus können im Idealfall Standardmodelle für die Prüfung von Stoffwirkungen entwickelt werden. Ein anderes Ziel ist auch die frühzeitige Warnung vor unklaren Zusammenhängen, möglichen neuen Schadefekten oder bislang unbekannter, aber verdächtiger Ursachen.

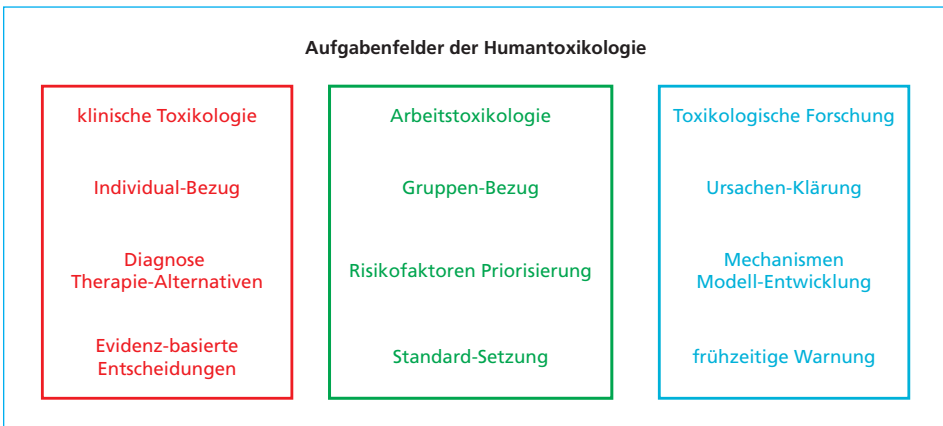


Bild 1: Gegenüberstellung der Aufgabenfelder und primären Ziele zum Schutz des Menschen vor Schäden in der Humantoxikologie

Für die Humantoxikologische Beurteilung von Schlacken aus der Stahlindustrie sind die Kenntnisse aus der Arbeitstoxikologie sowie aus der Toxikologischen Grundlagenforschung von besonderer Bedeutung. Akute Vergiftungsfälle mit klinisch toxikologischer Behandlungsnotwendigkeit aus Kontakt beziehungsweise Umgang mit Schlacken können weitgehend ausgeschlossen werden mit der Einschränkung, dass Unfälle mit Brand- und Abgasen eine eigenständige Gruppe mit spezieller Behandlungsnotwendigkeit darstellen und im Rahmen dieses Beitrags nicht betrachtet werden.

2. Vorgehensweisen bei der Bewertung in der Humantoxikologie

Die Humantoxikologische Beurteilung umfasst verschiedene Stufen:

- Substanzidentifizierung,
- Substanzcharakterisierung hinsichtlich gefährlicher Eigenschaften,
- Analyse der Dosis-Effekt Beziehungen,
- Expositionsbeurteilung.

Daran schließen sich die Arbeitsstufen der Interpretation und Bewertung (Expertenurteil) und der fachlichen Risikobewertung (Risikoermittlung) an.

2.1. Identifizierung der Inhaltsstoffe von Schlacken

Schlacken aus Stahlerzeugung aber auch aus der Gewinnung von Nichteisenmetallen bilden sich unter hohen Temperaturen von mehr als 1.500 °C und haben in Abhängigkeit von den Verarbeitungsverfahren eine variable chemische Zusammensetzung. Sie bestehen hauptsächlich aus Gesteinsschmelzen Silikat, Kalk und Dolomit aus Zuschlagsstoffen, eisenhaltigen Mineralien und oxidierten Begleitelementen. Bei Verfahren zur Qualitätsverbesserung von Stählen kommen Sekundärprodukte hinzu. Durch die Bedingungen bei der Abkühlung werden die physikalischen Eigenschaften Dichte, Druckfestigkeit und (Verwitterungs-)Beständigkeit sowie Korngrößen bestimmt. Diese Parameter stellen eine wichtige Bezugsgröße dar, um beim Umgang und unter Dauernutzung von Schlacken die Wahrscheinlichkeit eines Abtrags von Staub und kleinen Partikeln in lungengängiger Größe abzuschätzen.

Gesteinsschmelzen und viele der mineralischen Komponenten sind primär nicht toxisch und werden nur nach Inhalation als Staub bei dauerhaftem Kontakt gesundheitlich relevant. Kurzfristig bedeutsamer kann ein Kontakt mit Kalk wegen seiner ätzenden Eigenschaften werden. Dies ist aber an extraordinary Begleitumstände gebunden, z.B. dem Verspritzen kalkhaltiger Wässer ins Auge, die aus den Arbeitsabläufen weitgehend für den Kontakt mit Schlacken ausgeschlossen werden können.

Unter den chemischen Bestandteilen von Schlacken sind die Metalle und Metalloxide grundsätzlich toxikologisch relevant, weil viele von ihnen als humantoxische Schwermetalle bekannt sind. Metallhüttenschlacken im weiteren Sinne können Blei-, Zink-, Eisen-, aber auch Wolfram-, Vanadium- oder Chrom-Verbindungen enthalten. Bei der Rohstahlgewinnung können vor allem eisenhaltige Minerale humantoxisch relevant sein. Bei der Stahlveredlung spielen auch Chrom, Cobalt, Mangan, Molybdän, Niob, Vanadium und Wolfram eine Rolle [1, 4].

Die folgenden Ausführungen beschreiben ausgehend von der zunächst rein qualitativen Feststellung, dass toxische Metalle in Schlacken enthalten sind/sein können, die Arbeitsstufen in der humantoxikologischen Beurteilung und stellen am Ende eines jeden Abschnitts dar, ob der Umgang oder Kontakt mit Schlacken tatsächlich ein Gesundheitsrisiko darstellt. Ein Gesundheitsschaden kann wirksam verhindert werden, wenn die potentiell toxischen Komponenten und die empfindlichsten Endpunkte ihrer Schadwirkung identifiziert sind. Ein sicherer Umgang ist auch dann möglich, wenn die Aufnahmemengen quantitativ unbedeutend sind sowie die Begleitumstände, die zur Verschlimmerung beitragen können, bekannt sind und beachtet werden, um empfindliche Untergruppen besonders zu schützen.

2.2. Charakterisierung von Schadstoffen

2.2.1. Allgemeine humantoxikologische Beurteilung

Seit mehr als vierzig Jahren ist für den sicheren Umgang mit Chemikalien das Konzept der Klassifikation hinsichtlich eines Katalogs an Gefahrenmomenten erfolgreich etabliert und in Sicherheitskonzepten integriert. Es sollen standardisierte Informationen bereitgestellt werden, die bei Unfällen oder unvorhergesehenen Ereignissen alle Akteure in die Lage versetzt angemessen zu reagieren. Es geht dabei zunächst nicht um die Ermittlung und Bewertung von Risiken für die menschliche Gesundheit, sondern um die Bereitstellung schnell verfügbarer und eindeutiger Informationen zu Gefahren und um Angaben zu wirksamen Schutzmaßnahmen. Für die Klassifizierung müssen zunächst die grundlegenden Substanzeigenschaften erfasst und die daraus zu folgernden möglichen Schadfolgen beschrieben werden.

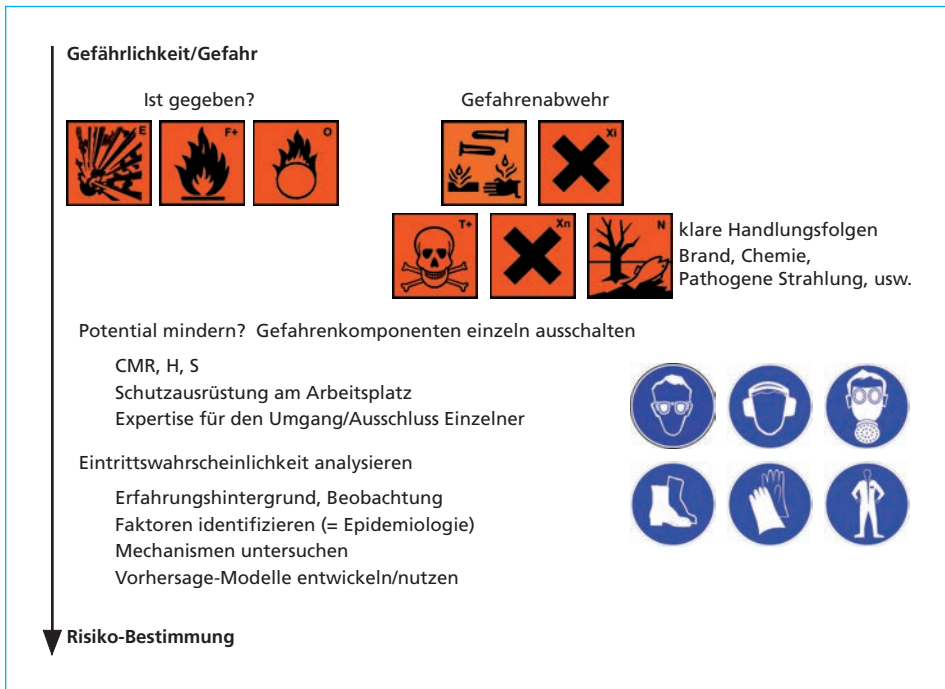


Bild 2: Handlungsfolgen zur Gefahrenabwehr in der Chemikaliensicherheit zum Schutz von Mensch und Umwelt vor Schäden

Im Umgang mit Schlacken ist zumindest zeitweilig die hohe Temperatur ein Gefahrenmerkmal sowie die Möglichkeit, dass bei der Abkühlung schädliche Dämpfe/Aerosole entstehen und frei werden. Die Arbeitsprozesse sind bekannt und können durch geschlossene Prozesse in Kombination mit Arbeitsschutzmaßnahmen und Absaugung sowie Belüftung wirksam beherrscht werden.

Generell betreffen die für die Einstufung zu klärenden Gefahren durch chemische Substanzen Eigenschaften wie Brennbarkeit, Explosivität, chemische Reaktivität, oxidierende Eigenschaften und allgemeine toxische Wirkungen, Effekte an Haut, Schleimhaut, schwere Störung von Organfunktionen durch kurzzeitige Einwirkung sehr hoher Mengen. Besonders gravierende biologische Wirkungen nach längerer, wiederholter Einwirkung betreffen Tumorbildung, Schädigungen der Fortpflanzung und Entwicklung der Nachkommen, Sensibilisierung und Aufnahme nach Kontakt mit der Haut sowie Schädigung von Organismen in der Umwelt. Am Ende steht eine qualitative Klassifizierung bezüglich (sehr) hoher oder minderer Aktivität als kodierter Warnhinweis auf Schadfolgen durch entsprechende Kennzeichnung zur Verfügung. So ist zumindest eine Orientierung möglich, ob die fragliche chemische Substanz oder das Produkt eine sehr hohe oder eine mindere Aktivität bei den Schadfolgen hat und zum Beispiel (T+) sehr giftig, (T) giftig oder (X) gesundheitsschädlich ist.

Biologische Wirkungen, die erst nach längerer, wiederholter Einwirkung erzeugt werden können, aber nicht mehr rückbildungsfähig und dadurch besonders gravierend sind, werden seit mehr als 25 Jahren ebenfalls im Katalog gefährlicher Eigenschaften abgefragt. Dazu gehören die Substanzeigenschaften Tumorbildung auszulösen oder zu fördern, die Fortpflanzung zu schädigen, die Entwicklung der Nachkommen zu beeinträchtigen oder Organismen in der Umwelt zu schädigen. Die Beschreibung der Gefahrenmomente fokussiert auf die Substanzeigenschaften und ist zunächst losgelöst von der eigentlichen Anwendungssituation. Damit ist das Resultat eine qualitative Information, die durch zusätzliche Angaben lediglich eine Einordnung in Klassen und damit eine Untergliederung in ihrer Wirkstärke erfährt.

2.2.2. Akute Gefahren durch Schlacken

Schlacken können in Abhängigkeit vom Abkühlungsverfahren zumindest vorübergehend eine physikalisch-chemische Gefahrenquelle darstellen. Bedingt durch die hohe Temperatur treten bei Kontakt mit der Haut Verbrennungen auf. Grundsätzlich stellt auch die Abstrahlungshitze wie auch die hohe Lufttemperatur eine eigenständige Gesundheitsbelastung dar und schädigt Schleimhäute durch Austrocknung. An der heißen Oberfläche können Substanzen verdampfen, die im Rahmen der Arbeitsprozesse als Kühl- oder unter Umständen Isolier- oder Schmiermittel Kontakt mit noch heißer Schlacke bekommen können.

Hinsichtlich der biologischen Gefahren sind Schlacken untoxisch, nicht ätzend und nur als Staub am Auge und Schleimhäuten des Atemtraktes (mechanisch) reizend. Soweit untersucht sind die LD50 Werte größer als 2 g/kg. Auch aus den technischen Eigenschaften der Schlacken (Korngrößen, Stabilität, Materialgefüge, Festigkeit) kann gefolgert werden, dass eine akute schädliche Wirkung nicht plausibel ist.

Sie enthalten in der Regel toxische Metalle, die im Fall ihrer Freisetzung in Zellen und Geweben toxisch wirken könnten. Das kann nach mechanischem Aufschluss in alveolargängige Partikel durch Mahlen, Brechen oder Verwitterung und durch eine chemische Auslaugung (Säure, Ammoniak) oder Wasserzutritt eintreten. Da auch innerhalb von Zellen Bereiche mit sauren pH Werten (Lysosomen) vorkommen, können in den Körper aufgenommene Schlackepartikel grundsätzlich eine Quelle für toxische Schwermetalle werden. Bei Schmelzen und mineralischen Gläsern ist die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung toxischer Metalle geringer. Ein wirksamer Schutz ist insgesamt vor allem auf Seiten der Expositionsverhinderung zu sehen.

2.3. Dosis-Effektbeziehung

2.3.1. Allgemeines zu Wirkschwellen und humantoxischen Effekten

Die wissenschaftlichen Grundlagen des Schutzes der Gesundheit vor potentiell toxischen Stoffen basieren darauf, dass für die Mehrzahl toxikologischer Effekte Wirkschwellen und folglich auch unschädliche Dosen anzunehmen sind [5]. Es gibt gute biologische Gründe, die diese Annahme sachlich begründen. Die Wirkschwelle für toxische Effekte ist die Bewertungsbasis für die Risikoabschätzung von Chemikalien unter Nutzung von Extrapolationskonzepten und Anwendung von Sicherheitsfaktoren. Für Effekte mit einem Schwellenwert lassen sich *margins of safety* bzw. Grenzwerte ableiten, deren Einhaltung eine Schädigung im Allgemeinen ausschließen sollte. Die Bewertung von Humanrisiken basiert in der Regel auf Versuchstierdaten, wobei zu bedenken ist, dass nicht alle Risiken für den Menschen tierexperimentell nachweisbar sind. Auch der umgekehrte Fall, d.h. tierexperimentelle Befunde, die nicht als Risiko für den Menschen einzuordnen sind, ist zu berücksichtigen. Liegen aussagekräftige Humandaten vor, erhalten diese ein entscheidendes Gewicht. Unsicherheiten bleiben auch bezüglich besonders empfindlicher Individuen. Ausgangspunkt der Bewertung und Grenzwertsetzung muss eine valide toxikologische Datenbasis mit ausreichender Untersuchungstiefe sein. Zu leisten bleibt dann noch die quantitative Extrapolation auf den Menschen.

Ermittlung wissenschaftlich begründeter Grenzwerte

Aus der Arbeitsmedizin und Arbeitssicherheit sind mit arbeitsplatzbezogenen Kenndaten, der Maximalen Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) und dem Biologischen Arbeitsstoff-toleranzwert (BAT) wichtige regulatorische Bezugsgrößen geschaffen, die die zulässige Belastung gegenüber Arbeitsstoffen quantifiziert [5]. Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Festlegung risikobasierter Grenzwerte zum Schutz der Gesundheit vor toxischen Stoffen sind durch die Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der DFG (MAK-Kommission) erarbeitet worden. Stoffe am Arbeitsplatz werden in ihrer krebserzeugenden, keimzellmutagenen, fortpflanzungsgefährdenden, sensibilisierenden oder hautresorptiven Eigenschaften eingestuft, sofern es Anhaltspunkte dafür gibt und die Datenlage für eine Beurteilung ausreicht. Auch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) folgt diesem Konzept in ihrem Grundsatz bei der systematischen Bewertung von *Altstoffen* der Prioritätenliste entsprechend der EU-Altstoff-VO, ebenso wie das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) bei der systematischen Bewertung der Risiken von chemischen Substanzen für den Bereich Gesundheit und Verbraucherschutz. Die Verfahren sind dennoch im Detail unterschiedlich, vor allem weil für die Erfüllung der speziellen Bewertungsaufgabe eigene Prioritäten gesetzt werden müssen und für den unmittelbaren Zusammenhang der Nutzungsprofile die zur Verfügung stehenden Daten oft nicht vollständig oder nicht repräsentativ genug sind. Diese Defizite müssen durch BAuA und BfR mit Abschätzungen und Modellierungen oder Expertenvoten überbrückt werden und daher können die Resultate der Bewertung am Ende durchaus unterschiedlich ausfallen.

Prüfung und Bewertung der toxischen Wirkung von Stoffen

Das toxische Potential von Stoffen wird oftmals anhand experimenteller Testsysteme untersucht. Ergebnisse, die mithilfe solcher Modelle (u.a. Zellsysteme und Tiermodelle) ermittelt wurden, werden in einem zweiten Schritt unter Berücksichtigung von eventuell vorhandenen Daten zu strukturellen ähnlichen Verbindungen und von Erfahrungen beim Menschen beurteilt [5]. Die Wirkschwellen werden als Punktschätzer angegeben, die

naturgemäß eine Variabilität aufweisen, welcher in einem methodisch korrekten Bewertungsverfahren Rechnung getragen werden muß. Den Abstand zwischen der Wirkschwelle, die meist aus Daten des Tierversuchs ermittelt wird, und der geschätzten oder gemessenen Exposition beim Menschen bezeichnet man als *margin of safety* (MOS). MOS-Werte werden stoffindividuell bewertet. Wird bei der kritischen Würdigung die MOS als zu niedrig eingestuft, müssen expositionsmindernde Maßnahmen im Sinne eines Risikomanagements vorgeschlagen und eingeleitet werden.

Mutagene und kanzerogene Wirkungen, soweit diese auf gentoxischen Mechanismen beruhen, werden als stochastische Effekte angesehen, für die allenfalls die Wahrscheinlichkeit ihres Eintrittes ermittelt werden kann. Diese Effekte werden derzeit ohne Wirkschwelle betrachtet. Für mutagene und kanzerogene Wirkungen wird der Verlauf der Dosis-Wirkungsbeziehung im unteren Dosisbereich als linear angenommen, weil Daten, die eine andere Annahme stützen könnten, fehlen und eine Wirkschwelle wissenschaftlich unzureichend begründet werden kann. Damit wäre zumindest theoretisch jede noch so kleine Dosis mit einem statistischen Risiko verbunden. Richtwerte für mutagene und kanzerogene Stoffe mit mutagener Wirkung (z.B. TRK-Werte) sind nicht toxikologisch begründet, sondern werden aus technischen Parametern, z.B. den technischen Möglichkeiten zur Freisetzungsminderung und Nachweisverfahren, abgeleitet und bieten hier nur einen relativen Schutz.

Daneben sind zumindest für Arzneimittel bestimmte Wirkungen auf den menschlichen Organismus bekannt, die in einem besonderen Maße an individuelle Dispositionen gebunden sind. Hierzu gehören z.B. pseudoallergische Reaktionen. Diese Phänomene können aus dem Tierexperiment grundsätzlich oder auch aus Probandenstudien wegen der geringen Zahl der Probanden und der damit geringen Chance seltene Reaktionen zu sehen nicht mit ausreichender Sicherheit vorhergesagt werden und sind dadurch zur Zeit der wissenschaftlich begründbaren Grenzwertableitung nicht zugänglich.

Einen weiteren Spezialfall stellt die Sensibilisierung dar: Für die Induktion einer Sensibilisierung darf man wohl von der Existenz einer Wirkschwelle ausgehen, während die Auslösung einer Überempfindlichkeitsreaktion nach Ablauf der Induktionsphase, also bei schon bestehender Sensibilisierung durch sehr niedrige Expositionen möglich ist, so dass für diesen Endpunkt eine Wirkschwelle kaum definiert werden kann. Folglich wird auch die Bewertung einer potentiell sensibilisierenden Wirkung im Folgenden ausgeklammert.

2.3.2. Beurteilung der Schlacken aus der Stahlerzeugung

Schlacken aus der Stahlherstellung sind aufgrund ihrer Zusammensetzung aber auch ihrer physikalischen Daten für den Menschen akut untoxisch. Es sind keine Wirkungen bekannt, die zur langfristigen Organschädigung oder Gentoxizität, Mutagenität und Reproduktionstoxizität durch Schlacken führen. Auch sensibilisierende Wirkungen sind nicht bekannt. Es ist zumindest hypothetisch plausibel, dass nach wiederholter Einatmung feiner Stäube langfristig Schäden an der Lunge entstehen können. Sofern toxische Metalle (Blei, Zink, Nickel, Wolfram, Vanadium) und ihre Oxide aus dem Gefüge freigesetzt werden, können diese zur Gesamtbelastung beitragen und die Gesundheit des Menschen schädigen. Dafür ist allerdings erforderlich, dass die Schlacken vermahlen und offen hantiert wurden oder aus offenen Deponien verwittern und mit dem Wind abdriften.

Schlacken an sich sind auch für die Umwelt untoxisch; allerdings enthalten sie toxische Schwermetalle. Daher kann sich langfristig abhängig von den Konzentrationen der Metalle

und von Gefüge der Schlacken ein Risiko für die Umwelt durch belastete Dränwässer ergeben, weil einige Komponenten durch saure oder auch alkalische (Ammoniak) Bedingungen allmählich aus dem Gefüge ausgelaugt und mit Regenwasser ausgewaschen werden können. Die Belastung des Oberflächenwassers und unter besonderen Rahmenbedingungen auch des Grundwassers kann regional problematisch für die Trinkwassergewinnung werden. Dieser Prozess kann für Mineralgläser und Schmelzen weitgehend ausgeschlossen werden. Ein Schutz vor eindringendem Regenwasser sowie vor Zutritt von Ammoniak oder Säuren durch technische Sicherungsmaßnahmen und eine Abdichtung oder Verzicht auf offene Ausbringung ist daher in bestimmten Bereichen angezeigt.

2.4. Expositionsbeurteilung

2.4.1. Ziele und Verfahren

Die Stoffrisikobewertung muss zusätzlich zur Gefahrenbeschreibung als zweiten essenziellen Arbeitsschritt diese Informationen mit den verschiedenen Anwendungssituationen, ihren geplanten und ungeplanten Folgen einschließlich der erfahrungsgemäß möglichen Fehlanwendungen zusammenführen, um die Wahrscheinlichkeit einer Aufnahme in den Körper zu quantifizieren [5]. Dazu sind in den Sicherheitskonzepten verschiedene Methoden der Expositionsanalyse oder Expositionsmodellierung und die Analyse der Dosis oder Konzentrations-Wirkungsbeziehung sowie die Kenntnisse zum Wirkungsmechanismus implementiert, sofern dieser bekannt ist. Erfahrungen aus der bisherigen Anwendung der untersuchten Substanzen, die in der Regel aus der Arbeitswelt und aus Abklärungen von Unfallszenarien kommen, bieten Informationen zur Wirkung am Menschen oder Tier und ergänzen die Suche nach relevanten Wirkschwellen und Begleitumständen, die die Interpretation absichern und differenzieren.

Arbeitnehmer sind insbesondere über die Atemwege und die Haut gegen Chemikalien exponiert. Die inhalativen, dermalen und kombinierten Stoffbelastungen für alle relevanten Arbeitsplatzszenarien werden im Rahmen der Expositionsbeschreibung beschrieben und bewertet. Als Informationsquelle zur Luftbelastung dienen Messwerte der Stoffkonzentration mit dazugehörigen spezifischen Informationen. Diese Daten werden in Bezug auf die Höhe der Exposition, die Dauer der Exposition innerhalb einer Arbeitsschicht, die Häufigkeit über einen längeren Zeitraum sowie die Repräsentativität beurteilt. Auf der Grundlage der zugänglichen (Teil-)Informationen und allgemeiner sowie spezifischer Arbeitsplatzkenntnisse wird die Expositionssituation beurteilt (expert judgement). Es werden quantitative Expositionshöhen für die Szenarien abgeleitet, die dem so genannten *reasonable worst case (RWC)* entsprechen. Der RWC für ein Expositionsszenario liegt am oberen Ende der Verteilung der Expositionshöhen; in der Regel wird das 90. oder 95. Perzentil der Messwertverteilung herangezogen. Zunehmend werden auch *typical values* in die Bewertung einbezogen.

Für die Beurteilung der dermalen Exposition liegen selten Messungen vor und daher werden vorwiegend Modellableitungen zur Expositionsschätzung eingesetzt. Besondere Probleme der dermalen Expositionsbeschreibung ergeben sich beispielsweise in der Beurteilung der tatsächlichen Verweildauer des Stoffes auf der Haut, da die Verdampfung einer flüchtigen Substanz oder das persönliche Verhalten, z.B. Hautreinigung, wesentliche Einflüsse haben können. Die Eignung von persönlicher Schutzausrüstung (z.B. Handschuhe, Hautschutz) ist meist schwierig zu beurteilen, da die stoffspezifische Eignung und das Trageverhalten oft unklar sind.

2.4.2. Expositionsszenarien bei Umgang und Kontakt mit Schlacke

Für den Umgang mit (kalten) Schlacken kann eine innere Aufnahme über die Haut und den Atemtrakt weitgehend ausgeschlossen werden. Die Barrierefunktion der Haut und der Schleimhäute steht einem Eindringen in den Körper entgegen sofern dabei nicht Feinstaub mit kleinen Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern deutlich unter 0,1 mm entstanden ist. Für kleine Partikel unter 0,02 mm ist zu erwarten, dass der Anteil unter 0,01 mm die Epithelschranke der Lunge durchdringen kann und im Zellzwischenraum (interstitieller Raum) der Lungenbläschen (Alveolen) abgelagert wird. Aus der Arbeitsmedizin ist für Untertagestäube bekannt, dass granuläre, untoxische, biopersistente Stäube (GBS) bei chronischer Aufnahme relevanter Mengen zu nicht mehr rückbildungsfähigen Entzündungen der Lunge mit bindegewebigem Gewebeumbau führen und dies die Grundlage für Tumorerkrankungen ist. Aus Analogieschlüssen ist auch für Schlacke zu erwarten, dass sie diesen prinzipiellen Wirkungsmechanismus anstossen können. Es ist andererseits für den Umgang und im Kontakt mit Schlacken unwahrscheinlich oder nahezu ausgeschlossen, dass dabei Feinstäube mit dem relevanten aerodynamischen Verhalten entstehen.

3. Humantoxikologische Bewertung von Schlacken aus der Stahlindustrie

Die bei der Erzeugung von Rohstahl und von Qualitätsstählen anfallenden Schlacken sind an sich für den Menschen untoxisch, weil sie überwiegend aus Mineralen und Mineraloxiden aus dem Wirtsgestein bestehen und im Gefüge weitgehend fest verbunden sind. Bei der Prüfung auf akute Gefahrenmomente ist die verfahrensbedingte Hitze in manchen Arbeitsphasen gesundheitlich noch das größte Problem. Um die physische Belastung zu mindern, sind entsprechende technische Schutzmaßnahmen etabliert und in Verbindung mit arbeitsmedizinischen Zusatzmaßnahmen (Begleituntersuchungen, Einsatzzeiten) kann ein wirksamer Schutz gewährleistet werden.

Schlacken können allerdings aus zwei Gründen potentiell zu toxischen Gesundheitsschäden führen. Zum Einen sind granuläre, biopersistente untoxische Stäube (GBS) in der Arbeitsmedizin als Ausgangspunkt für dauerhafte Lungenschäden (Fibrosen, Tumore) bekannt, weil bei kritisch hoher Belastung des Lungengewebes mit den nicht abbaubaren mineralischen Staubpartikeln dauerhafte Entzündungsreaktionen ausgelöst werden, die ihrerseits die Kaskade der fatalen Umbaureaktionen im Lungengewebe auslösen. Für Schlacken muss aus Analogiegründen vermutet werden, dass sie ähnliche Effekte auslösen würden, sofern Schlacken zu Feinstaub mit aerodynamisch relevanten Partikeln vermahlen würden oder verwittern. Es sind also eher technische Maßnahmen und die Bedingungen der Weiterverwertung, die diese potentielle Wirkung weitgehend ausschließen.

Zum Zweiten enthalten Schlacken Metalle und Metalloxide, die je nach Herstellungsverfahren eine unterschiedliche qualitative wie quantitative Zusammensetzung haben. Für Schlacken aus der Stahlerzeugung sind toxikologisch Blei und Zink und bei Weiterverarbeitungsprozessen auch Wolfram, Vanadium und Nickel bedeutsam. Metalle sind generell ein gesundheitlicher Risikofaktor, weil sie bei kritisch hoher Aufnahme im Organismus oft in Geweben gebunden bleiben, in vielen Fällen ein problematisches Schädigungspotential für Funktionen des Gehirns und Rückenmarks (Neurotoxizität) sowie auch für die Funktion der Niere aufweisen. Für den arbeitsmedizinischen wie umweltmedizinischen Schutz müssen daher die Gesamtaufnahmen sorgfältig betrachtet und aufsummiert werden. Die Aufnahmepfade durch belastete Staubfrachten stellen neben der Ernährung die wichtigste Säule einer unerwünschten Belastung dar. Einmal in den Körper aufgenommene

Staubfrachten sind Quellen für die Abgabe von toxisch wirkenden Schwermetallen, weil die biochemischen Vorgänge im Zellinneren die Freisetzung der Schwermetalle aus den mineralischen Partikeln fördern. Es gilt also auch hier, dass vor allem technische Maßnahmen und Verwendungspfade vorbestimmend sind, ob Art und Umstände eines langfristigen Kontakts die Generierung von kritischen Stäuben (alveolargängige Partikelgrößen) fördern und eine Kontaktmöglichkeit (offene Anwendung) gegeben ist. Im Falle einer Belastung von Dränwasser mit Schwermetallen ist die menschliche Gesundheit *nur* sekundär, z.B. über Trinkwasser betroffen. Eine primär humantoxikologische Bewertungslage entsteht nur mittelbar. Diese Prozesse sind allerdings vor allem wasserwirtschaftlich relevant und können im Falle einer eingetretenen regionalen Kontamination von Grundwasser oder Trinkwasserreservoirien natürlich sehr problematisch werden und teurere Sanierungsmaßnahmen nach sich ziehen. Es gilt daher auch hier, dass bestimmte Regionen bei der Verwendung von Schlacken in der Umwelt besondere technische Sicherungsmaßnahmen erfordern und unter Umständen bestimmte Materialien aufgrund ihrer Qualitätsmerkmale (qualitative und quantitative Belastung mit Metallen, Kristallgefüge, Korngrößen, Porositäten, Bruchfestigkeit) dort nicht ausgebracht werden sollten.

4. Ausblick auf Risikoermittlung in der Humantoxikologie

Die fachliche Ermittlung von Risiken im Umgang mit chemischen Substanzen und der Bewertung, ob aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse der Umgang vermindert werden sollte, folgt ausgereiften Methoden [6]. Die Methoden bauen auf der Kenntnis der kritischen Wirkqualität und der dafür kritischen Aufnahmemengen und -dauer sowie der Exposition auf. Für die Bewertung des Risikos werden standardisierte bzw. objektivierte Verfahren herangezogen, Unsicherheiten im Wissensstand werden durch Sicherheitsfaktoren aufgefangen. Damit soll auch eine transparente Bewertung des Risikos gewährleistet werden.

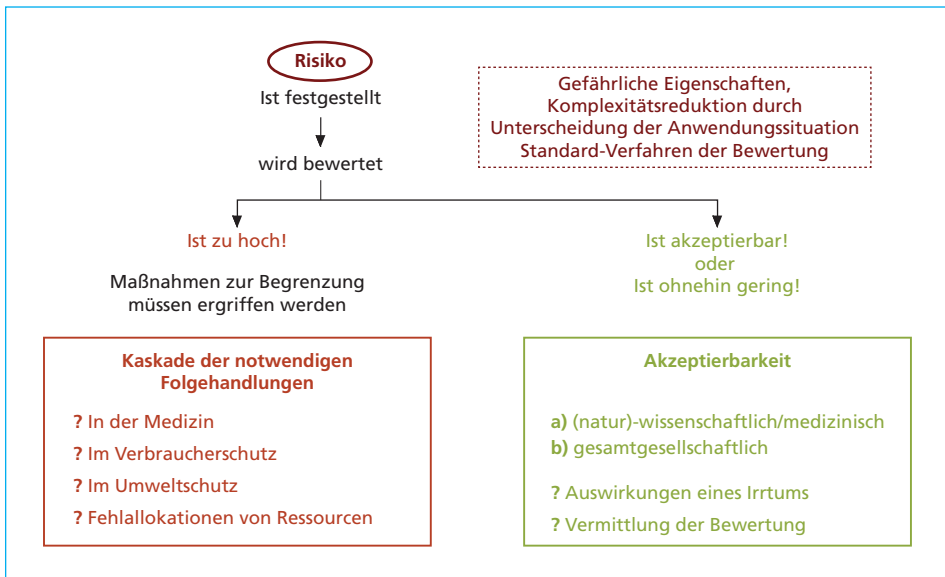


Bild 3: Schematische Darstellung Entscheidungsalternativen bei der Risikoabwägung nach fachlicher Feststellung eines Risikos in der Humantoxikologie

Mögliche Risiken im Umgang mit chemischen Substanzen und Produkten werden daher für Arbeitssituationen unter den kennzeichnenden Bedingungen in der Herstellung, dem Transport und der Weiterverarbeitung beurteilt. Es muss auch die Frage einbezogen werden, ob Umweltmedien eine Quelle für die unbemerkte Aufnahme von Substanzen sein können, die langfristig die Gesundheit des Menschen schädigen. Letztendlich können chemische Substanzen von der Herstellung und dem Transport bis zum Ende der Weiterverarbeiter-, Nutzer- und Abfallkette in die Umwelt freigesetzt werden, sodass die Frage nach stoffbezogenen Risiken auch diejenige nach Umweltfolgenwirkungen für Ökosysteme miteinbeziehen muss. Eine für diesen Zweck methodisch angemessene Stoffrisikobewertung benötigt daher Grunddaten zum Verhalten und Verbleib in Umweltmedien und zu den vorrangig von Schädigungen betroffenen Organismen oder Populationen.

Sobald fachlich ein Risiko festgestellt wurde, folgt einer daran anschließenden Arbeitsstufe die Bewertung, ob das festgestellte Risiko im Gesamtkontext akzeptierbar ist, weil die Vorteile im Vergleich zu den Nachteilen überwiegen. Traditionell ist diese Alternativen abwägende Arbeitsstufe kein Bestandteil der toxikologischen Risikobewertung. Die Verfahren und Gesichtspunkte müssen allerdings in der toxikologischen Wissenschaft bekannt sein, um den Prozess mit den relevanten Daten und integrierenden Informationen zu unterstützen.

5. Literatur (Auswahl)

- [1] Winter, B.; Szednyi, I.; Reisinger, H.; Böhmer, S.; Janhsen, T.: Abfallvermeidung und Verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich. Umweltbundesamt, 2005, Wien, Österreich
- [2] ECHA: Leitlinien zu Abfall und zurückgewonnenen Stoffen. ECHA-10-9-07-DE, Quelle: Europäische Chemikalienagentur, 2010, <http://echa.europa.de>
- [3] Bayrisches Landesamt für Umwelt: Umweltfachliche Kriterien zur Verwendung von Elektrofenschlacke (EOS). 2008
- [4] Ökoinstitut e.V.: Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle. FKZ 204 33 325, Publikation des Umweltbundesamtes, 2007
- [5] Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe (BUA) der GDCh (Hrsg.): 244 BUA-Stoffbericht: Sicherheitsfaktoren bei der toxikologischen Bewertung von Chemikalien Bewertungsbasis. Extrapolationskonzepte und praktische Vorgehensweise 2004, S. Hirzel Verlag
- [6] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Kapitel 8 Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. 2008, www.umweltrat.de

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Schlacken aus der Metallurgie – Rohstoffpotential und Recycling –

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Andrea Versteyl.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011

ISBN 978-3-935317-71-9

ISBN 978-3-935317-71-9 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Nicole Bäker, Janin Burbott, Petra Dittmann, Sandra Peters

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.