

Herleitung eines Prüfwertes für Quecksilber für Nutzungen mit möglicher direkter Bodenaufnahme

Stellungnahme zum Bericht der Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART): „Quecksilber in Böden: Herleitung eines Prüfwertes gemäss VBBo für Nutzungen mit möglicher direkter Bodenaufnahme“ vom Dezember 2013.

August 2014

Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Boden und Biotechnologie, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Auftragnehmer

Swiss Centre for Applied Human Toxicology (scaht)

Autor

Lothar Aicher

Begleitung BAFU

Christiane Wermeille, Christoph Reusser

Dieser Bericht wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
2. Ausgangslage und Aufgabenstellung	5
3. Vorgehen	5
4. Einleitung	5
5. Überprüfung der Herleitung des ART-Prüfwertes	6
5.1. Welche Quecksilberverbindungen müssen berücksichtigt werden?	8
5.2. Gesonderter Prüfwert für organische Quecksilberverbindungen	9
5.3. Messvorgaben zur Bestimmung des Quecksilbergehaltes	10
5.4. Welche Expositionspfade müssen berücksichtigt werden?	12
5.5. Welche zusätzlichen Belastungen sind zulässig?	12
5.6. Wie ist die Bioverfügbarkeit zu bewerten?	12
6. Empfehlung SCAHT	14
7. Literatur	16

1. Zusammenfassung

Im Kanton Wallis sind grossflächige Belastungen mit Quecksilber (Hg) in bewohnten Gebieten mit Haus- und Familiengärten sowie Kinderspielflächen festgestellt worden. In der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö) fehlt aber ein Prüfwert für Hg für Standorte bei Haus- und Familiengärten, Kinderspielflächen und Anlagen, auf denen Kinder regelmässig spielen. Dieser wurde von Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) Ende 2013 im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) unter Berücksichtigung der Richtlinien des ehemaligen Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) [BUWAL, 1997] hergeleitet. Der vorgeschlagene Prüfwert beträgt 2mg Hg/kg Boden [ART, 2013b].

Im Juni 2014 wurde das Schweizerische Zentrum für Angewandte Humantoxikologie (SCAHT) vom BAFU beauftragt, die Aktualität des BUWAL-Konzepts zu überprüfen, das bei der Herleitung des Prüfwerts durch die ART verwendet wurde, und den von der ART vorgeschlagenen Prüfwert von 2mg/kg Boden unter humantoxikologischen Aspekten zu verifizieren. Der vom SCAHT hergeleitete Prüfwert, dient dem Schutz von Kindern gegenüber einer chronischen Quecksilberexposition durch die Aufnahme kleinerer Bodenmengen, wie sie bei herkömmlichem Spiel- und Essverhalten zu beobachten ist. Es wird aber davon ausgegangen, dass eine akute Quecksilberintoxikation sogenannter Pica-Kinder, die unter einer „qualitativen“ Essstörung leiden und an einzelnen Tagen möglicherweise untypisch grosse Mengen kontaminierten Bodens aufnehmen, ausgeschlossen werden kann.

Die Herleitung des Prüfwertes durch die ART entspricht qualitativ den Richtlinien anderer Länder. Quantitativ zeigen sich oft grosse Unterschiede in den Prüfwerten. Ursachen hierfür sind unter anderem unterschiedliche Definitionen der Prüfwerte, unterschiedliche Schutzziele in den einzelnen Regelwerken und ein unterschiedliches Risikomanagement. Ein konkreter Abgleich der Ableitung der schweizerischen und US-amerikanischen Schutzwerte für anorganisches Quecksilber hat gezeigt, dass sich die Werte für die verwendeten Parameter in der gleichen Grössenordnung bewegen.

Der von der ART vorgeschlagene Prüfwert von 2mg Hg/kg Boden basiert auf dem von der FAO/WHO und der EFSA für anorganisches Quecksilber hergeleiteten vorläufigen tolerierbaren wöchentlichen Einnahmewert ("Provisional tolerable weekly intake") $PTWI_{Hg\text{ anorg.}}$ von 4 $\mu\text{g/kg/wk}$ für Schadstoffbelastungen in Nahrungsmitteln und wurde aufgrund von Nierenbefunden in tierexperimentellen Studien hergeleitet. Bei der Ableitung des Prüfwertes unter Zuhilfenahme des $PTWI$ wird also korrekterweise vorausgesetzt, dass die orale Exposition für anorganische Quecksilberverbindungen den kritischsten Aufnahmepfad darstellt. Allerdings werden die toxikologisch besonders kritischen organischen Quecksilberverbindungen bei der Ableitung des Prüfwertes durch die ART nicht explizit erwähnt. Bei organischen Quecksilberverbindungen stellt die orale Aufnahme besonders von Methylquecksilber (MMHg) den kritischsten Expositionspfad dar. Das kritischste Zielorgan ist das Zentralnervensystem.

Methylquecksilber ist die am weitesten verbreitete organische Quecksilberverbindung. MMHg wird kaum als solches in die Umwelt ausgestossen, sondern dort nach Einträgen von anorganischem Quecksilber durch biotische und abiotische Transformationsprozesse gebildet. Wir nehmen Methylquecksilber vor allen über die Nahrung auf, insbesondere durch den Verzehr von Fisch. Die EFSA hat aufgrund der höheren Toxizität im Vergleich zu organischen Quecksilberverbindungen einen $PTWI_{MMHg}$ von 1.3 $\mu\text{g/kg/wk}$ für MMHg festgelegt. Dieser Wert wurde auf der Basis epidemiologischer Daten zu Störungen der Nervenentwicklung nach pränataler Exposition gegenüber Methylquecksilber hergeleitet.

Um die toxikologisch besonders kritischen organischen Quecksilberverbindungen zu berücksichtigen, muss entweder ein separater Prüfwert festgelegt werden oder aber der Prüfwert für den Gesamtquecksilbergehalt muss sich an den deutlich niedrigeren Schutzwerten für organische Quecksilberverbindungen orientieren. In ihrem Bericht zu organischen Quecksilberverbindungen kommt die ART zu dem Schluss, dass die Festlegung von Grenzwerten für organische Quecksilberverbindungen in Böden auf der Basis von Boden- und Pflanzenkonzentrationen gemäss BUWAL-Richtlinien [BUWAL, 1998] momentan nicht möglich ist. Diese Schlussfolgerung bezieht sich auf die Fragestellung einer möglichen landwirtschaftlichen Nutzungseinschränkung von belasteten Ackerböden. Bei der in diesem Bericht durchgeführten Herleitung eines Prüfwertes für Hg durch das SCAHT für Standorte bei Haus- und Familiengärten, Kinderspielflächen und Anlagen, auf denen Kinder regelmässig spielen, war eine landwirtschaftliche Nutzung nicht Gegenstand der Betrachtung.

Unter diesen Voraussetzungen ist nur der direkte Wirkungspfad Boden-Mensch relevant, nicht aber die mit dem Wirkungspfad Boden-Pflanze verbundene Problematik der Biomagnifikation. Deshalb kann für das hier vorgegebene Schutzziel analog zur Herleitung eines Prüfwerts für anorganisches Quecksilber gemäss VBBo für Nutzungen mit direkter Bodenaufnahme verfahren werden. Im Rahmen der Risikobewertung wird für die organischen Quecksilberverbindungen eine Bioverfügbarkeit von 100% angenommen.

Zur Ableitung eines Prüfwertes für den Gesamtquecksilbergehalt erscheint die Annahme eines 20%-Gehalts an MMHg konservativ und sollte damit ausreichend Schutz geben. MMHg wird nämlich kaum als solches in die Umwelt ausgestossen, sondern dort nach Einträgen von anorganischem Quecksilber durch biotische und abiotische Transformationsprozesse gebildet. Art und Ausmass der Methylierung werden durch zahlreiche Umweltfaktoren bestimmt und können zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterliegen. Gemessene Konzentrationen von organischem Quecksilber im Oberboden liegen zwischen 1 und 3% der totalen Quecksilberkonzentration, wobei der Anteil selten grösser als 1% ist, aber in Hot-Spots von Feuchtgebieten auch schon MMHg-Anteile von >10% gefunden wurden [ART, 2013d].

Das relevanteste Zielorgan für MMHg ist das Zentralnervensystem (ZNS). Das Gleiche gilt für die inhalative Aufnahme von Dämpfen des metallischen Quecksilbers. Es gibt keine Abschätzungen zum Ausmass der inhalativen Exposition durch Ausgasen von metallischem Quecksilber aus dem Boden. Man kann aber davon ausgehen, dass der konservative Ansatz eines MMHg-Gehaltes von 20% die eher unwahrscheinlichen zusätzlichen Belastungen des ZNS durch Quecksilberdämpfe mit berücksichtigt.

Auf der Basis des PTWI für die orale Aufnahme von MMHg und anorganischem Quecksilber in Höhe von 1.3 µg/kg/wk, bzw. 4 µg/kg/wk, der Annahme einer 100% Bioverfügbarkeit beider Quecksilberverbindungen, einem prozentualen Anteil von 20% für MMHg und 80% für anorganisches Quecksilber und einer zulässigen zusätzlichen Belastung des Menschen von 10% durch Quecksilber aus dem Boden kann ein Prüfwert von 2.0 mg Gesamtquecksilber/kg Boden hergeleitet werden. Wenn dieser Wert nicht überschritten wird, sind keine Gesundheitsbeeinträchtigungen zu erwarten.

2. Ausgangslage und Aufgabenstellung

Im Kanton Wallis sind grossflächige Belastungen mit Quecksilber (Hg) in landwirtschaftlich genutzten Böden aber auch in bewohnten Gebieten mit Haus- und Familiengärten sowie Kinderspielflächen festgestellt worden. Die Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) [AltIV, 1998a; AltIV, 1998b] sieht bei einer Überschreitung der Sanierungswerte von 5 mg/kg Boden für Hg einen Sanierungsbedarf sowohl der landwirtschaftlich genutzten Böden als auch der Böden in Wohngebieten. Die Kosten dafür müssen vom Verursacher getragen werden. Ausserdem schreibt die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) [ART, 2013a] ab einem Prüfwert von 2 mg/kg Boden für Hg eine Gefährdungsabschätzung vor. Im Rahmen des Risikomanagements können dann gegebenenfalls Nutzungseinschränkungen für landwirtschaftlich genutzte Böden verfügt werden, wie z.B. ein Verbot des Anbaus solcher Kulturpflanzen, bei denen aufgrund der spezifischen Transferkoeffizienten Boden-Pflanze mit einer erhöhten Quecksilberbelastung zu rechnen ist.

In der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) fehlt aber ein Prüfwert für Hg für Standorte bei Haus- und Familiengärten, Kinderspielflächen und Anlagen, auf denen Kinder regelmässig spielen. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) hat Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) Ende 2013 unter Berücksichtigung der Richtlinien des ehemaligen Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) [BUWAL, 1997] einen Vorschlag für diesen Prüfwert von 2mgHg/kg Boden hergeleitet [ART, 2013b].

Im Juni 2014 wurde das Schweizerische Zentrum für Angewandte Humantoxikologie (SCAHT) vom BAFU beauftragt, die Aktualität des BUWAL-Konzepts zu überprüfen, das bei der Herleitung des Prüfwertes durch die ART verwendet wurde und den von der ART vorgeschlagenen Prüfwert von 2mg/kg Boden zu verifizieren. Der vom SCAHT hergeleitete Prüfwert, dient dem Schutz von Kindern gegenüber einer chronischen Quecksilberexposition durch die Aufnahme kleinerer Bodenmengen, wie sie bei herkömmlichem Spiel- und Essverhalten zu beobachten ist. Es wird aber davon ausgegangen, dass eine akute Quecksilberintoxikation sogenannter Pica-Kinder, die unter einer „qualitativen“ Essstörung leiden und an einzelnen Tagen möglicherweise untypisch grosse Mengen kontaminierten Bodens aufnehmen, ausgeschlossen werden kann.

3. Vorgehen

Der vorliegende Bericht des SCAHT basiert auf dem ART-Bericht zur Herleitung eines Prüfwertes für Nutzungen mit möglicher direkter Bodenaufnahme [ART, 2013b], der sich wiederum an den Richtlinien des ehemaligen BUWAL orientiert [BUWAL, 1997].

Um die Aktualität des Konzeptes zur Herleitung von Prüfwerten zu überprüfen wurden die BUWAL-Richtlinien einer allgemeinen Plausibilitätsprüfung unterzogen und im Rahmen einer begrenzten Literaturrecherche mit Richtlinien anderer Länder verglichen. Dabei hat sich das SCAHT auf den für die Fragestellung relevanten Teilbereich des Wirkungspfades Boden-Mensch fokussiert. Ausserdem wurde das Konzept im Rahmen informeller Telefonate und eines Email-Austausches mit Mitarbeitern der amerikanischen Umweltschutzbehörde (US EPA) diskutiert [US EPA, 2014a]. Die Annahmen, die ART im Rahmen der Herleitung eines Prüfwertes macht, wurden ebenfalls im Rahmen von Literaturrecherchen und Diskussionen mit der US EPA auf Aktualität und Plausibilität überprüft.

4. Einleitung

Quecksilber kommt natürlicherweise in der Natur vor, wird aber auch zusätzlich vom Menschen in die Umwelt eingebracht. Es existiert in drei verschiedenen Formen, und zwar 1) als elementares Quecksilber, das metallisches Quecksilber genannt wird, 2) als anorganische Quecksilbersalze Hg_2^{2+} -Salz und Hg^{2+} -Salz und 3) als organisches Quecksilber. Diese drei verschiedenen Formen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Toxizität und können durch chemische Prozesse in der Umwelt und im menschlichen Körper ineinander umgewandelt werden. Quecksilbersulfid (HgS = Zinnober) ist z.B. schlecht wasserlöslich und toxikologisch weniger relevant. Organische Quecksilberverbindungen wie Methylquecksilber sind leicht flüchtig und lipophil, d.h. sie haben eine grosse Mobilität und akkumulieren leicht in Geweben und reichern sich in der Nahrungskette an.

Eine Person kann Quecksilber auf verschiedene Art und Weise aufnehmen, entweder 1) durch das

Einatmen von verschmutzter Luft, 2) durch das Essen verunreinigter Lebensmittel oder 3) über die Haut. Wie viel Quecksilber der Körper aufnehmen kann und welche Gesundheitsschäden dadurch verursacht werden können, hängt von der Art des Quecksilbers und der Aufnahmepfade (Luft, Nahrung oder Haut) ab.

Der relevanteste toxikologische Endpunkt für metallisches Quecksilber und Methylquecksilber ist das Zentralnervensystem, das bei Föten, Kleinkindern und Kindern am anfälligsten ist. Für anorganische Quecksilberverbindungen ist die Nierentoxizität am relevantesten. Quecksilber ist nicht als Humankarzinogen eingestuft. Vereinzelt treten allergische Reaktionen beim Hautkontakt mit metallischem Quecksilber auf. Als Aufnahmepfade sind die orale Aufnahme von organischen und anorganischen Quecksilberverbindungen und das Einatmen von metallischen Quecksilberdämpfen von besonderer Bedeutung.

Damit eine Chemikalie im Boden eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen kann, muss sie zuerst von der Bodenmatrix gelöst werden und dann in den menschlichen systemischen Kreislauf aufgenommen werden, d.h. sie muss bioverfügbar sein. Bei der Bewertung des Gesundheitsrisikos durch belastete Böden geht man traditionell von dem konservativen Ansatz aus, dass die Bioverfügbarkeit der bodengebundenen Schadstoffe 100% ist.

Unter den organischen Quecksilberverbindungen wird Methylquecksilber (MMHg) als toxikologisch besonders kritisch eingestuft und muss bei der Herleitung eines Prüfwertes besonders berücksichtigt werden. Als Basis kann der von der EFSA festgelegte vorläufige tolerierbare wöchentliche Einnahmewert ("Provisional tolerable weekly intake", PTWI) dienen. MMHg wird nach Einträgen von anorganischem Quecksilber durch natürliche Prozesse gebildet. Das Ausmass dieser Methylierung ist schwer abzuschätzen.

5. Überprüfung der Herleitung des ART-Prüfwertes

Das SCAHT geht davon aus, dass es sich bei dem von der ART hergeleiteten Prüfwert von 2mg Hg/kg Boden um einen Prüfwert für anorganisches Quecksilber handelt, weil in der Berechnung die von der FOA/WHO festgelegte vorläufige tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (PTWI¹) von 4 µg/kg/wk für die orale Aufnahme von anorganischem Quecksilber verwendet wurde [ART, 2013b]. Dieser Wert wurde letztmals 2012 von der EFSA bestätigt [EFSA, 2012].

Das SCAHT geht weiterhin davon aus, dass ein zusätzlicher Prüfwert für organische Quecksilberverbindungen hergeleitet werden kann. Als Basis kann der von der EFSA definierte PTWI von 1.3 µg/kg/wk für die orale Aufnahme von organischem MMHg verwendet werden [EFSA, 2012].

Die Definition des Prüfwertes gemäss BUWAL ist plausibel und steht inhaltlich in weiten Teilen im Einklang mit Definitionen vergleichbarer Schutzwerte anderer Länder. Im vorliegenden Fall wurden in persönlichen Diskussionen mit Mitarbeitern der US EPA 1) ein Abgleich zur Herleitung des „Soil Screening Level“ (SSL) der US EPA für anorganische Quecksilberverbindungen gemacht und 2) die Annahmen zu den einzelnen Parametern verglichen. Die zunächst komplexer erscheinende Formel zur Berechnung des SSL vereinfacht sich beim Einsetzen der US-EPA-Werte für die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter 6-9 (Tabelle 1).

Die Annahmen zu den einzelnen Parametern im schweizerischen und US-amerikanischen Modell bewegen sich in den gleichen Grössenordnungen (Tabellen 1 und 2). Wie von ART richtig vermutet, liegt der wesentliche Unterschied letztendlich in der Berücksichtigung des Ausschöpfungsgrads von 10% zur Ableitung des schweizerischen Prüfwertes. Diese Tatsache schlägt sich in einem zum schweizerischen Prüfwert 10-fach höheren US EPA SSL nieder. Die US EPA hat bestätigt, dass die vorliegende Formel zur Herleitung von SSLs der erste Schritt in einem Mehrstufenprozess zur Risikobeurteilung sog. Superfund Sites ist, der andere Eintragspfade im Rahmen einer integrativen Risikobeurteilung noch nicht berücksichtigt.

¹ Der PTWI ist definiert als durchschnittliche wöchentlich zugeführte Menge eines (in der Regel durch langzeitige Akkumulation) gesundheitlich wirksamen Stoffes aus der Umwelt, von der angenommen wird, dass sie bei lebenslanger Einhaltung des Wertes keine gesundheitlichen Schäden verursacht. Überschreitung(en) des (umgerechneten) Tageswertes werden bei Einhaltung des Wochenmittelwertes als unerheblich betrachtet.

- Generell lässt sich daraus ableiten, dass ein einfacher Vergleich mit ausländischen Prüfwerten auf der Basis numerischer Schutzwerte nicht sinnvoll ist. Zur Variabilität können sowohl unterschiedliche Definitionen der Prüfwerte als auch unterschiedliche Schutzziele in den einzelnen Regelwerken verschiedener Länder sowie ein unterschiedliches Risikomanagement beitragen.

Tabelle 1: Formeln zur Berechnung des schweizerischen Prüfwertes für Quecksilber und des US-amerikanischen „Soil Screening Level“. Die rot durchgestrichenen Parameter in der SSL-Formel heben sich beim Einsetzen der in Tabelle 2 aufgeführten Werte annähernd auf.

Schweiz: $C_{tot,max} = \frac{K \cdot S \cdot a}{B}$	USA: $SSL = \frac{THQ \cdot BW \cdot AT \cdot 365 \text{ d/y}}{1/RfD_0 \cdot EF \cdot ED \cdot IR}$
Schweiz: $C_{tot,max} = \frac{K \cdot S \cdot a}{B}$	USA: $SSL = \frac{\del{THQ} \cdot BW \cdot \del{AT} \cdot 365 \text{ d/y}}{1/RfD_0 \cdot \del{EF} \cdot \del{ED} \cdot IR}$

Tabelle 2: Abgleich der Werte der Parameter zur Berechnung des schweizerischen Prüfwertes für anorganische Quecksilberverbindungen und des US-amerikanischen „Soil Screening Level“.

	Parameter	CH Wert	US Wert
1a*	C _{tot,max} : Maximal zulässiger Totalgehalt im Boden [mg/kg Boden]	2.3	
1b*	SSL: Soil Screening Level [mg/kg] (analog Prüfwert)		23
2a*	K: Körpergewicht des Kindes [kg]	10	
2b*	BW: Körpergewicht [kg]		15
3a*	S: Schutzwert für die äussere Exposition [mg/kg Körpergewicht/d]	0.57***	
3b*	RfD ₀ : Orale Referenzdosis für Quecksilber [µg/kg/d] (analog „S“ in CH)		0.3
4a*	B: aufgenommene Bodenmenge [kg/d]	0.000254	
4b*	IR: aufgenommenen Bodenmenge [kg/d]		0.0002
5	a: Ausschöpfungsgrad des Schutzwertes [-]	0.1	n.a.**
6	THQ: Gefährdungsquotient [-]	n.a.**	1
7	AT: gemittelte Zeitdauer [y]	n.a.**	6
8	EF: Expositionshäufigkeit [d/y]	n.a.**	350
9	ED: Expositionsdauer [y]	n.a.	6

Mit „a“ und „b“ sind jeweils korrespondierende Parameter für die CH und USA angegeben.

** n.a. zeigt an, dass es für den jeweiligen Parameter kein Pendant im anderen Land gibt.

*** Basierend auf dem PTWI Hg_{inorg}: 4 µg/kg/wk [EFSA, 2012].

5.1. Welche Quecksilberverbindungen müssen berücksichtigt werden?

Metallisches Quecksilber

Metallisches Quecksilber gelangt über die Blut-Hirn-Schranke ins Gehirn, wo es in anorganisches Quecksilber umgewandelt wird, das sich an Eiweissstoffe im Gehirn anlagert und so über Jahre im Gehirn akkumuliert. Metallisches Quecksilber gelangt auch über die Blut-Plazenta-Schranke in den Kreislauf des ungeborenen Kindes und kann die Entwicklung des ungeborenen Kindes stören.

- **Oral:**
Wenn kleine Mengen von metallischem Quecksilber, beispielsweise aus einem kontaminierten Boden, verschluckt werden, wird weniger als 0,01% Quecksilber durch den Magen-Darm-Trakt an den Körper abgegeben [[ATSDR, 1999 \(Seite 11\)](#)].
 - **Inhalation:**
Metallisches Quecksilber verdampft schon bei Raumtemperatur und mit steigenden Temperaturen verdampft eine grössere Menge. Werden Quecksilberdämpfe eingeatmet, gelangen ca. 80% des Quecksilbers über die Lunge in die Blutbahn [[ATSDR, 1999 \(Seite 11\)](#)] und von dort in andere Teile des Körpers, wo es sich ansammelt. Das Zentralnervensystem ist das kritischste Zielorgan.
 - **Dermal:**
Flüssiges Quecksilber wird schlecht von der Haut absorbiert [[ATSDR, 1999](#)], kann aber Irritationen auslösen. Vereinzelt treten allergische Reaktionen beim Hautkontakt mit metallischem Quecksilber auf.
- **Für metallisches Quecksilber stellt die Inhalation der Dämpfe den kritischsten Expositionspfad dar. Das kritischste Zielorgan ist das Zentralnervensystem. Föten, Neugeborene und Kinder sind besonders gefährdet.**

Anorganische Quecksilberverbindungen

Anorganisches Quecksilber reichert sich vor allem in den Nieren an und wird erst nach mehreren Wochen oder Monaten wieder ausgeschieden. Im Gegensatz zum metallischen Quecksilber passiert es weder die Blut-Hirn-Schranke noch die Blut-Plazenta-Schranke, d.h. es kann weder ins Gehirn gelangen noch aus dem Blut einer schwangeren Frau über die Plazenta zum ungeborenen Kind gelangen. Allerdings wird ein kleiner Teil des anorganischen Quecksilbers im Körper in metallisches Quecksilber umgewandelt und bei stillenden Müttern kann ein Teil des anorganischen Quecksilbers in die Muttermilch übergehen.

- **Oral:**
Wenn anorganische Quecksilberverbindungen verschluckt werden, wird im Allgemeinen weniger als 10% durch den Darmtrakt absorbiert. In einigen Fällen sind aber Aufnahmearten von bis zu 40% beobachtet worden [[ATSDR, 1999 \(Seite 11\)](#)].
 - **Inhalation:**
Anorganische Quecksilberverbindungen wie Quecksilberchlorid sind weisse Pulver und verdampfen bei Zimmertemperatur nicht. Sie zeigen keine Inhalationstoxizität [[ATSDR, 1999 \(Seite 11\)](#)]. Eine Verdampfung bei hohen Temperaturen wird für die Risikobeurteilung durch Exposition mit kontaminierten Böden als nicht relevant betrachtet.
 - **Dermal:**
Anorganische Quecksilberverbindungen können vom Körper auch durch die Haut aufgenommen werden. Im Vergleich zur Aufnahme beim Verschlucken ist diese Menge aber gering.
- **Für anorganische Quecksilberverbindungen stellt die orale Aufnahme den kritischsten Expositionspfad dar. Das kritischste Zielorgan ist die Niere.**

Organische Quecksilberverbindungen

MMHg ist die am weitesten verbreitete organische Quecksilberverbindung. Wir nehmen Methylquecksilber vor allem über die Nahrung auf, insbesondere durch den Verzehr von Fisch und Meerestieren. Sobald organisches Quecksilber in die Blutbahn gelangt, verteilt es sich leicht in alle Gewebe. Genauso wie metallisches Quecksilber passiert MMHg leicht die Blut-Hirn-Schranke. Im Gehirn wird es in anorganisches Quecksilber umgewandelt, an Eiweissstoffe gebunden und akkumuliert so über Jahre im Gehirn. MMHg passiert auch leicht die Blut-Plazenta-Schranke und gelangt so in den Kreislauf des ungeborenen Kindes. Ein Teil der organischen Quecksilberverbindungen geht auch in die Muttermilch über.

- **Oral:**
Methylquecksilber ist die Form von Quecksilber, die am leichtesten durch den Gastrointestinaltrakt absorbiert wird (etwa 95%) [WHO, 2004; [ATSDR, 1999 \(Seite 12\)](#)].
 - **Inhalation:**
Informationen zur Inhalation von organischen Quecksilberverbindungen im Menschen sind rar und basieren auf qualitativen Daten einzelner Fallstudien, aufgrund derer man keine konkrete Ursache-Wirkungsbeziehung ableiten kann [[ATSDR, 1999 \(Seite 12\)](#)].
 - **Dermal:**
MMHg wird nur in geringen Mengen über die Haut aufgenommen [[ATSDR, 1999 \(Seite 12\)](#)].
- **Für organisches MMHg stellt die orale Aufnahme den kritischsten Expositionspfad dar. Das kritischste Zielorgan ist das Zentralnervensystem. Föten, Neugeborene und Kinder sind besonders gefährdet.**

5.2. Gesonderter Prüfwert für organische Quecksilberverbindungen

Der Bericht der ART [[ART, 2013c](#)] weist bereits darauf hin, dass für die toxikologisch besonders kritischen organischen Quecksilberverbindungen (u.a. Methylquecksilberverbindungen) separate Grenzwerte festgelegt werden sollten. Im gleichen Bericht kommt die ART zu dem Schluss, dass die Festlegung von Grenzwerten für organische Quecksilberverbindungen in Böden auf der Basis von Boden- und Pflanzenkonzentrationen gemäss BUWAL-Richtlinien [[BUWAL, 1998](#)] momentan nicht möglich ist. Diese Schlussfolgerung bezieht sich auf die Fragestellung einer möglichen landwirtschaftlichen Nutzungseinschränkung von belasteten Ackerböden.

- **Für die Herleitung eines Prüfwertes für Hg für Standorte bei Haus- und Familiengärten, Kinderspielplätzen und Anlagen, auf denen Kinder regelmässig spielen, ist der direkte Wirkungspfad Boden-Mensch relevant, wenn man davon ausgehen kann, dass eine private landwirtschaftliche Nutzung der Böden unterbleibt. Weitere Berechnungen im Rahmen einer privaten landwirtschaftlichen Nutzung sind deshalb nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes. Unter diesen Voraussetzungen ist die mit dem Wirkungspfad Boden-Pflanze verbundene Problematik der Biomagnifikation irrelevant und für das hier vorgegebene Schutzziel kann analog zur Herleitung eines Prüfwertes für anorganisches Quecksilber gemäss VBBo für Nutzungen mit direkter Bodenaufnahme verfahren werden.**

Die EFSA [[EFSA, 2012](#)] hat sowohl für anorganisches Quecksilber als auch für Methylquecksilber vorläufige tolerierbare wöchentliche Aufnahmemengen (PTWI) hergeleitet, die in beiden Fällen als Basis für die Herleitung eines Prüfwertes herangezogen werden können, weil die orale Aufnahme von Quecksilber aus dem Boden als am relevantesten betrachtet wird. Auf Grundlage einer Kombination qualitativer und quantitativer Daten wird MMHg als kritischster Vertreter der organischen Quecksilberverbindungen eingestuft. Die Ableitung eines Schutzwertes für MMHg stellvertretend für alle organischen Quecksilberverbindungen erscheint plausibel.

- **Oral:**
Die von der EFSA hergeleitete tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (PTWI) für anorganisches Quecksilber basiert auf den Ergebnissen tierexperimenteller Studien. Als zentraler toxikologischer Endpunkt wurde hier die Gewichtsveränderung der Nieren männlicher Ratten herangezogen [EFSA, 2012]. Der PTWI für anorganisches Quecksilber beträgt 4 µg/kg/wk EFSA [EFSA, 2012]. Im Gegensatz dazu wurde der PTWI für Methylquecksilber in Nahrungsmitteln auf der Basis epidemiologischer Daten zu Störungen der Nervenentwicklung nach pränataler Exposition gegenüber Methylquecksilber hergeleitet [EFSA, 2012]. Der PTWI für Methylquecksilber beträgt 1.3 µg/kg/wk [EFSA, 2012].

5.3. Messvorgaben zur Bestimmung des Quecksilbergehaltes

Quecksilberverbindungen können durch unterschiedliche chemische und biologische Transformationsprozesse, die z.T. reversibel sind, ineinander umgewandelt werden [Abbildung 1, ASTDR 1999]. Von besonderer Relevanz sind dabei biotische und abiotische Methylierungsprozesse, die zur Bildung der toxikologisch besonders relevanten Monomethylquecksilber- und Dimethylquecksilberverbindungen führen. Art und Ausmass der Methylierung werden durch zahlreiche Umweltfaktoren bestimmt und können zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterliegen. Es gibt Studien, die den Gehalt mit MMHg von Oberböden im niedrigen einstelligen Prozentbereich oder tiefer angeben [BMG, 2014; ART, 2013d].

Der ART-Bericht [ART, 2013c] erwähnt, dass MMHg kaum als solches in die Umwelt ausgestossen wird, sondern dort nach Einträgen von anorganischem Quecksilber durch natürliche Prozesse gebildet wird. Das Ausmass dieser Methylierung ist aufgrund zahlreicher komplexer Einflussfaktoren schwer abzuschätzen und die Herleitung von Umrechnungsfaktoren für MMHg, das aus anorganischem Quecksilber gebildet wird, ist schwierig. Gemessene Konzentrationen von organischem Quecksilber im Oberboden liegen zwischen 1 und 3% der totalen Quecksilberkonzentration [NABO, 2014], wobei der Anteil selten grösser als 1% ist. In Hot-Spots von Feuchtgebieten wurden auch schon MMHg-Anteile von >10% gefunden [ETH Zürich, 2014].

- **Die verschiedenen Quecksilberverbindungen unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer Toxizität. Bei den organischen Quecksilberverbindungen ist aus toxikologischer Sicht Methylquecksilber besonders relevant. Der PTWI für MMHg liegt tiefer als der für anorganisches Quecksilber. Der aktuelle Werte wurde 2012 von der EFSA veröffentlicht [EFSA, 2012]. Für die Herleitung von schweizerischen Prüfwerten bedeutet dies, dass auch der PTWI zur Herleitung eines Prüfwertes berücksichtigt werden muss.**
- **Zur Risikobewertung organischer Quecksilberverbindungen wird eine Bioverfügbarkeit von 100% angenommen [ATSDR, 1997; Rodrigues, 2014].**

Abbildung 1: Transformationsprozesse von Quecksilberverbindungen, [ATSDR, 1999].

5.4. Welche Expositionspfade müssen berücksichtigt werden?

Da bei der Herleitung des Prüfwerts durch die ART der PTWI verwendet wurde, basiert der Prüfwert auf der Annahme, dass die orale Exposition von Quecksilberverbindungen zur Risikoabschätzung am relevantesten ist. Das SCAHT stimmt damit überein, dass aus toxikologischer Sicht die orale Aufnahme anorganischer und organischer Quecksilberverbindungen (besonders Methylquecksilber) am kritischsten ist. Für metallisches Quecksilber steht die Inhalation der Dämpfe im Vordergrund.

Für die Exposition gegenüber Schadstoffen aus dem Boden im häuslichen Bereich geht die US EPA standardmässig davon aus, dass die Schadstoffe oral über Boden- und Staubpartikel aufgenommen werden [US EPA, 2014b]. Die Inhalation von flüchtigen Stoffen wird nur dann als relevant betrachtet, wenn die Henry Konstante $1 \times 10^{-5} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ ($=1,01325 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$) [Umrechnung] oder grösser ist und das Molekulargewicht kleiner als 200 g/mol ist [US EPA, 2014b]. Aufgrund der Henry Konstante des Quecksilbers von $729 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ sollte die inhalative Exposition berücksichtigt werden, die Atommasse des Quecksilbers von $200.59 \pm 0.02 \text{ u}$ würde dagegen sprechen.

Der Austausch von Umweltschadstoffen zwischen verschiedenen Umweltkompartimenten ist ein komplexer Prozess, der auf zahlreichen chemischen und physikalischen Vorgängen beruht, die sowohl zeit- als auch ortsabhängig sind. Die Henry Konstante und Umgebungsbedingungen haben entscheidenden Einfluss darauf, wie sich volatile Stoffe zwischen Atmosphäre, Boden und Wasser verteilen. Obwohl diese Verteilung als kritischer Mechanismus im biogeochemischen Kreislauf betrachtet wird, ist das Verständnis des Ausmasses dieser Prozesse unzureichend [EU, 2001].

- **Für die Risikoabschätzung der Quecksilberbelastung durch kontaminierte Böden steht die orale Exposition im Vordergrund. Die inhalative Exposition wird aufgrund mangelnder Daten nicht explizit berücksichtigt. Die Annahme dass im Freien keine relevanten zusätzlichen gesundheitsgefährdenden Quecksilberdampfkonzentrationen durch das Ausgasen des Bodens entstehen, die nicht schon indirekt durch konservative Annahmen bei der Herleitung des Prüfwertes berücksichtigt sind, erscheint plausibel.**

5.5. Welche zusätzlichen Belastungen sind zulässig?

Die von der ART verwendete Formel zur Herleitung eines Prüfwertes basiert auf einem integrativen Ansatz, der im Rahmen des sogenannten Ausschöpfungsgrades neben der Belastung durch Quecksilber im Boden zusätzliche Expositionspfade berücksichtigt. Dieser integrative Ansatz ist zwingend notwendig für eine realitätsnahe Risikobeurteilung.

Im vorliegenden Fall wurde ein Ausschöpfungsgrad des PTWI von 10% angenommen, d.h. man erlaubt eine zusätzliche Belastung des Menschen durch Quecksilber im Boden in Höhe von 10% des PTWI. Diese Annahme kann damit begründet werden, dass laut WHO unter „Normalbedingungen“ die Quecksilberbelastung der Nahrung und der Luft den Grossteil der menschlichen Exposition ausmacht [siehe ART 2013b Tabelle 1].

5.6. Wie ist die Bioverfügbarkeit zu bewerten? [Paustenbach, 1997]

Für eine möglichst realitätsnahe Risikobewertung ist die Menge an Schadstoff relevant, die tatsächlich in den Körper gelangt, die sog. innere Exposition. Die gemessene Schadstoffmenge im Boden gibt dagegen die äussere Exposition an. Ein Schadstoff kann physikalisch an der Oberfläche von Bodenpartikeln adsorbiert sein oder chemisch an Partikel gebunden sein. Damit eine Chemikalie im Boden eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen kann, muss sie zuerst von der Bodenmatrix gelöst werden und dann in den menschlichen systemischen Kreislauf aufgenommen werden, d.h. sie muss bioverfügbar sein.

Bei der Bewertung des Gesundheitsrisikos durch belastete Böden geht man traditionell von dem konservativen Ansatz aus, dass die Bioverfügbarkeit der bodengebundenen Schadstoffe 100% ist, d.h. man nimmt an, dass die äussere Exposition gleich der inneren Exposition ist. Ausserdem werden die Schutzwerte zum grossen Teil aus Tierstudien mit gut löslichem Quecksilberchlorid als Testsubstanz abgeleitet, von dem man annimmt, dass es eine grössere Bioverfügbarkeit besitzt als andere anorganische Quecksilberverbindungen. Auch die ART geht bei der Berechnung des Prüfwertes von 100% Bioverfügbarkeit aus und stützt ihren Prüfwert für anorganisches Quecksilber auf den PTWI, der im Rahmen tierexperimenteller Studien mit Methylchlorid erhoben wurde.

- **Es stellt sich die Frage, ob aufgrund dieser Bedingungen das Risiko kontaminierter Böden nicht überschätzt wird [ATSDR, 1997]?**

Durch die Verwendung eines Umrechnungsfaktors, der die orale Bioverfügbarkeit von Quecksilber im Boden mit der vom Quecksilberchlorid im Wasser oder Futter von Tierversuchen vergleicht, könnte man die Unsicherheiten bei der Risikobeurteilung verringern. Allerdings gibt es bislang keine Vergleichsstudien, die die Ableitung eines solchen Umrechnungsfaktors erlauben würden.

Es gibt Studien, die zeigen, dass das Ausmass der Absorption von Chemikalien aus dem Boden in den Verdauungstrakt der Tiere stark schwanken kann und von einer Reihe standortspezifischer Faktoren abhängig ist. So beeinflussen Schadstoffart und Schadstoffkonzentration, Bodentyp und die Anwesenheit anderer Schadstoffe die Bioverfügbarkeit.

Darüber hinaus gibt es Studien zur Beurteilung des Auswaschungsverhaltens (Leaching) von Quecksilber aus dem Boden, die gezeigt haben, dass Quecksilber weitestgehend nicht mobilisierbar ist. Diese Ergebnisse wurden dahingehend interpretiert, dass auch die Bioverfügbarkeit des Quecksilbers gering ist. Es wurden aber auch Unterschiede im Leachingverhalten der einzelnen Quecksilberverbindungen festgestellt. So ist Quecksilberchlorid wesentlich löslicher als Quecksilbersulfid.

- **In der Praxis ist die Schadstoffbelastung oft als Gesamtquecksilbergehalt angegeben und die genaue Zusammensetzung der Schadstoffbelastung oft unbekannt. Die lokalen Gegebenheiten, die die Bioverfügbarkeit beeinflussen, sind nicht erfasst. Ausserdem gibt es keine Vergleichsstudien, die die orale Bioverfügbarkeit von Quecksilber im Boden mit der vom Quecksilberchlorid im Wasser oder Futter von Tierversuchen vergleichen, und die Ableitung eines Umrechnungsfaktors für die Risikobewertung erlauben würden. Deshalb scheint momentan der konservative Risikobewertungsansatz angebracht.**
- **Zur Risikobewertung organischer Quecksilberverbindungen wird eine Bioverfügbarkeit von 100% angenommen [ATSDR, 1997; Rodrigues, 2014].**

6. Empfehlung SCAHT

- Bei der Herleitung eines Prüfwertes für den Gesamtquecksilbergehalt für Standorte bei Haus- und Familiengärten, Kinderspielflächen und Anlagen auf denen Kinder regelmässig spielen, müssen die relevantesten Quecksilberverbindungen und die relevantesten Expositionspfade gleichermaßen berücksichtigt werden. Ein niedriger Ausschöpfungsgrad des PTWI von 10% (d.h. eine zusätzlich zulässige Quecksilberbelastung durch direkten Bodenkontakt) ist aufgrund der Tatsache, dass der Grossteil der Quecksilberbelastung des Menschen bereits durch Nahrungsmittel und die Luft erfolgt, plausibel.
- Für die direkte Aufnahme über den Boden ist die orale Aufnahme von anorganischen und organischen Quecksilberverbindungen am relevantesten, wobei MMHg am leichtesten vom Gastrointestinaltrakt absorbiert wird. Die inhalative Exposition durch das Ausgasen von Quecksilberverbindungen aus dem Boden ist im Vergleich zur oralen Exposition vernachlässigbar. Auch die dermale Exposition spielt eine untergeordnete Rolle. Sowohl metallisches als auch anorganisches Quecksilber und MMHg wird schlecht von der Haut absorbiert. Das SCAHT empfiehlt deshalb, die international anerkannten PTWIs für anorganisches Quecksilber ($4 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{wk}$) und MMHg ($1.3 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{wk}$) als zentrale Elemente zur Ableitung eines Prüfwertes heranzuziehen.
- Aufgrund der Komplexität der Transformationsprozesse unterschiedlicher Quecksilberverbindungen und der wenigen Daten zur Zusammensetzung des Gesamtquecksilbergehaltes im Boden empfiehlt das SCAHT ein Verhältnis von 80% anorganischer und 20% organischer Quecksilberverbindungen anzunehmen.
- Obwohl für eine möglichst realitätsnahe Risikobewertung die innere Exposition des Organismus entscheidend ist, empfiehlt das SCAHT aufgrund der unzureichenden Datenlage bis auf weiteres den traditionellen und konservativen Ansatz einer 100% Bioverfügbarkeit bodengebundener Schadstoffe beizubehalten.

Die wesentlichen Annahmen zur Herleitung eines Prüfwertes für den Gesamtquecksilbergehalt im Boden sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Annahmen zur Herleitung eines Prüfwertes für den Gesamtquecksilbergehalt im Boden

Parameter	Wert
K = Körpergewicht	10 kg
$S_{\text{Hg anorganisch}}$ = Schutzwert 1	$\text{PTWI}_{\text{Hg anorganisch}}: 4 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{Woche} = 0.57 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{Tag}$
S_{MMHg} = Schutzwert 2	$\text{PTWI}_{\text{MMHg}}: 1.3 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{Woche} = 0.19 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{Tag}$
$a_{\text{Hg anorganisch}}$ = Ausschöpfungsgrad 1	0.1 = 10%
a_{MMHg} = Ausschöpfungsgrad 2	0.1 = 10%
B = aufgenommene Bodenmenge	254 mg/Tag
Bioverfügbarkeit Hg anorganisch	1 = 100%
Bioverfügbarkeit MMHg	1 = 100%
Verhältnis $\text{Hg anorganisch}: \text{MMHg}$	20% : 80%

Der Prüfwert kann wie folgt hergeleitet werden:

Schritt 1:

Unter Zuhilfenahme der Formel $C_{\text{tot, max}} = K \cdot S \cdot a / B$

können für anorganisches Quecksilber und MMHg separate Schutzwerte abgeleitet werden:

$$C_{\text{tot, max Hg anorganisch}} = 10 \text{ kg} \cdot (4 \text{ } \mu\text{g/kg/wk} : 7) \cdot 0.1 / 254 \text{ mg} = 2.3 \text{ mg Hg anorganisch / kg Boden}$$

$$C_{\text{tot, max Hg anorganisch}} = 10 \text{ kg} \cdot (1.3 \text{ } \mu\text{g/kg/wk} : 7) \cdot 0.1 / 254 \text{ mg} = 0,7 \text{ mg MMHg / kg Boden}$$

Schritt 2:

Der Prüfwert für den Gesamtquecksilbergehalt kann wie folgt hergeleitet werden:

$$C_{\text{tot, max Hg gesamt}} = 0.8 \cdot C_{\text{tot, max Hg anorganisch}} + 0.2 \cdot C_{\text{tot, max MMHg}}$$

$$C_{\text{tot, max Hg gesamt}} = 0.8 \cdot 2.3 + 0.2 \cdot 0.7 = 1.98 \text{ mg Hg gesamt / kg Boden}$$

Unter der Annahme der in Tabelle 3 aufgelisteten Bedingungen empfiehlt das SCAHT einen Prüfwert für die direkte Aufnahme von Quecksilber aus dem Boden eine Gesamtkonzentration von 2 mg Quecksilber pro kg Boden. Wenn dieser Wert nicht überschritten wird, sind keine Gesundheitsbeeinträchtigungen zu erwarten.

7. Literatur

- AltIV, 1998a:** Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) (1998). 814.12 Letzter
Zugriff:05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.12.de.pdf>.
- AltIV, 1998b:** Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) (1998). Schweizerische Bundesrat, Letzter
Zugriff:05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.680.de.pdf> .
- ART 2013a:** Portmann, D., Reiser, R. und Meuli, R., Quecksilber in Böden: Herleitung eines Sanierungswertes nach AltIV und von Prüfwerten nach VBBo, 2013, Agroscope Reckenholz- Tänikon ART: Zürich.
- ART 2013b:** Quecksilber in Böden: Herleitung eines Prüfwertes gemäss VBBo für Nutzungen mit möglicher direkter Bodenaufnahme. Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) 2013.
- ART, 2013c:** Agroscope Reckenholz-Tänikon, Quecksilber in Böden: Organische Quecksilberverbindungen, Landwirtschaftliche Bodennutzung, Juni 2013
- ART, 2014:** Agroscope Reckenholz-Tänikon, GGK: Belastungen mit Organoquecksilber, Stellungnahme zum Bericht der BMG Engineering AG vom 5. Nov. 2013.
- ATSDR, 1997:** Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR science panel on the bioavailability of mercury in soils: lessons learned; Canady RA, Hanley JE, Susten AS.
- ATSDR, 1999:** Agency for Toxic Substances and Disease Registry, TOXICOLOGICAL PROFILE FOR MERCURY, U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Public Health Service.
- BMG, 2013:** BMG Engineering AG, Ifangstrasse 11, CH 8952 Schlieren/Zürich, GGK: Belastungen mit Organoquecksilber
- BUWAL, 1997:** Hämman, M. und Gupta, S.K., Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten für anorganische Schadstoffe im Boden (1997) Umwelt-Materialien Nr.83. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- EFSA, 2012:** EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food, EFSA Journal 2012;10(12):2985 [241 pp.].
- ETH Zürich, 2014:** Mitteilung von Jan Wiederhold
- EU, 2001:** Position paper on mercury,
http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/pp_mercury.pdf
- NABO, 2014:** Gubler, A., Schwab, P., Wächter, D., Meuli, R.G. und Keller, A., Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985 - 2009. (in Vorbereitung).
- Paustenbach, 1997:** Dennis J. Paustenbach, Gretchen M. Bruce, and Paul Chrostowski; Current Views on the Oral Bioavailability of Inorganic Mercury in Soil: Implications for Health Risk Assessments; Risk Analysis, Vol. 17, No. 5, 1997
- Rodrigues, 2014:** Rodrigues SM, et al, Oral bioaccessibility and human exposure to anthropogenic and geogenic mercury in urban, industrial and mining areas, Sci Total Environ (2014),
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.115>
- SUVA 2013,** Dr. med. Dr. sc. nat. Michael Koller, Dr. med. Claudia Pletscher, Dr. med. Marcel Jost, Factsheet Schweizer Grenzwerte am Arbeitsplatz
- US EPA, 1991:** Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I, Human Health Evaluation Manual, PartB, Development of Risk-based Preliminary Remediation Goals, Interim; EPA/540/R-92/003, Publication 9285.7-01B, December 1991.
- US EPA, 2014a:** Persönliche Mitteilungen Peter Zachary
- US EPA, 2014b:** Mid-Atlantic Risk Assessment, [US EPA, 2014](#)
- Umrechnung:** [Umrechnung](#) (Zugang 06.07.2014)
- WHO, 2004:** WHO FOOD ADDITIVES SERIES: 52, METHYLMERCURY (addendum), [WHO, 2004](#)