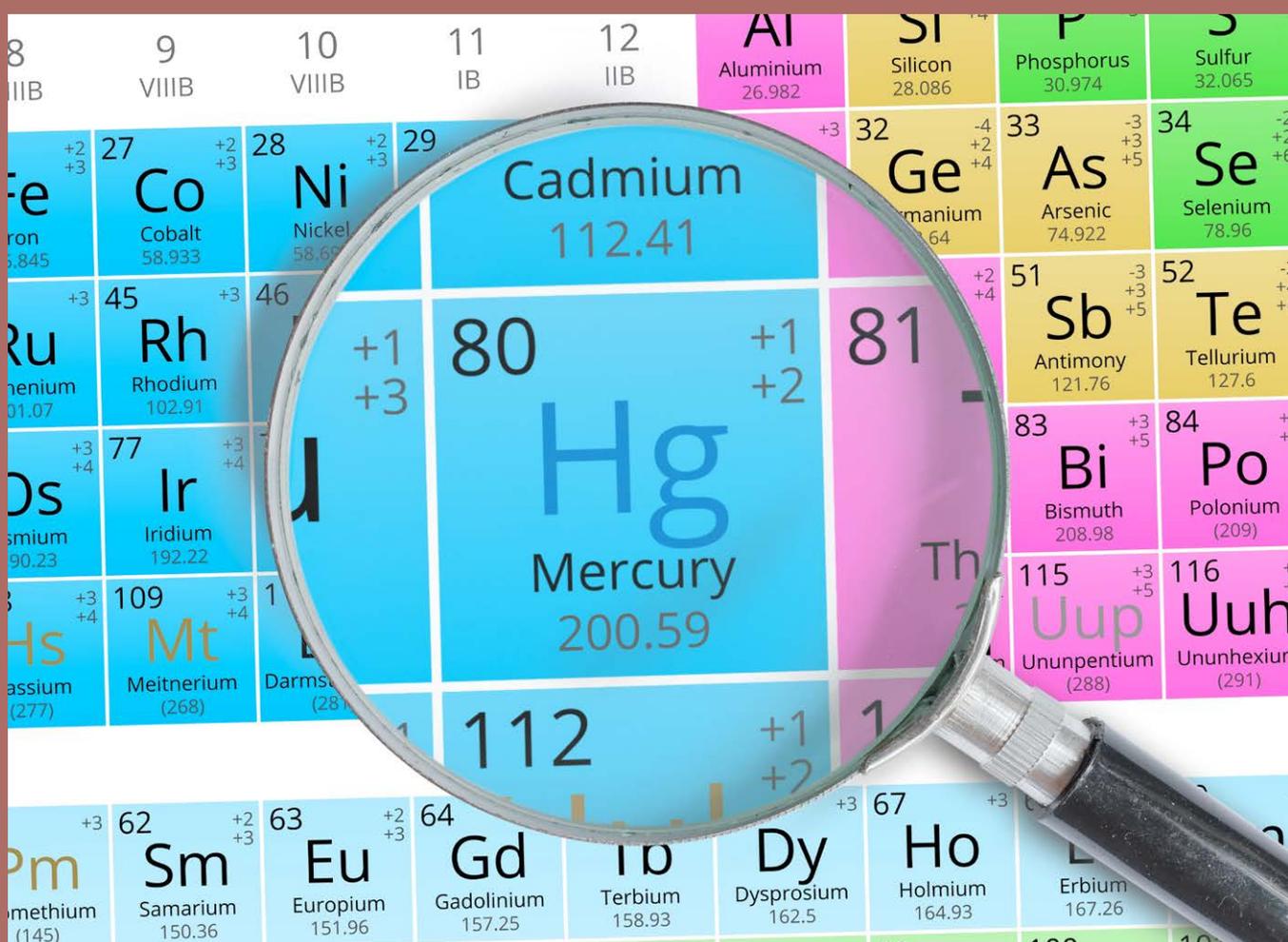


Verwendung, Entsorgung und Umwelteinträge von Quecksilber

Übersicht über die Situation in der Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Verwendung, Entsorgung und Umwelteinträge von Quecksilber

Übersicht über die Situation in der Schweiz

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Amélie Ritscher, Urs von Arx, Harold Bouchex-Bellomie,
Andreas Buser

Begleitgruppe

Ressourcen Management Agentur Wien

Zitierung

Ritscher A., 2018: Verwendung, Entsorgung und Umwelteinträge von Quecksilber. Übersicht über die Situation in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1832: 51 S.

Danksagung

Besonderen Dank gebührt Herrn Dr. Beat Brüscheiler vom Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) für die Durchsicht des Kapitels zur menschlichen Belastung mit Quecksilber sowie für die Anregungen und Diskussionen, die das Kapitel in dieser Form ermöglicht haben.

Layout

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Titelbild

© vchal, shutterstock

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uz-1832-d

(eine gedruckte Fassung liegt nicht vor)

Diese Publikation ist auch in französischer und englischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2018

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5
------------------	----------

Vorwort	6
----------------	----------

1 Einleitung	7
---------------------	----------

2 Regulierung	9
2.1 Nationale Rechtsvorschriften	9
2.2 Völkerrechtliche Vorschriften	9

3 Verwendung und Entsorgung	11
3.1 Angebot und Nachfrage	11
3.2 Verwendungen	12
3.3 Aufkommen in Abfällen und Entsorgung	15

4 Umwelteinträge und Vorkommen in der Umwelt	20
4.1 Luft	20
4.2 Gewässer	23
4.3 Boden	28
4.4 Biota	29

5 Beurteilung der Umweltbelastung	36
5.1 Beurteilungswerte	36
5.2 Beurteilung der Umweltbelastung	38

6 Belastung des Menschen	40
6.1 Aufnahme über Nahrungsmittel	40
6.2 Aufnahme über die Luft	42
6.3 Aufnahme über Dentalamalgam	42
6.4 Biomonitoring	42
6.5 Zusammenfassung der menschlichen Belastung	44

7 Literaturverzeichnis	45
-------------------------------	-----------

Abstracts

Because of its problematic properties for the environment and human health, the use of mercury should be avoided where possible and mercury releases into the environment should be kept to a minimum. The first part of this report presents an overview of the use, waste volume and disposal of mercury in Switzerland. The second part summarises current knowledge on environmental releases and mercury pollution in individual environmental compartments, assesses the pollution and exposure levels and highlights existing knowledge gaps. Finally, the report describes the main sources of mercury exposure in the Swiss population.

Aufgrund der problematischen Eigenschaften für die Umwelt und die Gesundheit des Menschen ist auf die Verwendung von Quecksilber möglichst zu verzichten und sind seine Umwelteinträge so gering wie möglich zu halten. Der vorliegende Bericht bietet im ersten Teil einen Überblick über den Verbrauch, das Abfallaufkommen und die Entsorgung von Quecksilber in der Schweiz. In einem zweiten Teil werden der Stand des Wissens zu Umwelteinträgen und der Quecksilberbelastung einzelner Umweltkompartimente zusammengefasst, diese Belastungen beurteilt und vorhandene Wissenslücken aufgezeigt. Zum Schluss werden die Hauptquellen für die Quecksilberbelastung der Bevölkerung in der Schweiz beschrieben.

Les propriétés du mercure sont problématiques tant pour l'environnement que pour la santé humaine. Il convient donc de renoncer au maximum à l'utilisation de cette substance et de maintenir les apports dans l'environnement au niveau le plus faible possible. Le présent rapport donne tout d'abord un aperçu des activités liées au mercure (utilisation, production de déchets et élimination) en Suisse. Il résume ensuite les connaissances en matière d'apports dans l'environnement ainsi que l'état de la situation relative à la charge de mercure dans les différents milieux environnementaux. Il évalue par ailleurs cette charge et présente les lacunes de connaissances en la matière. Finalement, il fait état des principales sources de pollution au mercure auxquelles la population est exposée.

Date le caratteristiche problematiche per l'ambiente e per la salute dell'uomo che caratterizzano il mercurio, occorre rinunciare, se possibile, al suo utilizzo e mantenere al minimo le sue immissioni nell'ambiente. La prima parte del presente rapporto offre una visione d'insieme del consumo di mercurio, della produzione di rifiuti contenenti mercurio e dello smaltimento dello stesso in Svizzera. La seconda parte riassume lo stato attuale delle conoscenze sulle immissioni di mercurio nell'ambiente e sulle ripercussioni che esercita su singoli comparti ambientali. Inoltre valuta il suo impatto e rileva le lacune conoscitive. Infine descrive le fonti principali dell'impatto che il mercurio esercita sulla popolazione in Svizzera.

Keywords:

mercury, disposal, environmental releases, environmental occurrence

Stichwörter:

Quecksilber, Entsorgung, Umwelteinträge, Umweltvorkommen

Mots-clés :

mercure, élimination, apports environnementaux, présence dans l'environnement.

Parole chiave:

mercurio, smaltimento, immissioni nell'ambiente, presenza nell'ambiente

Vorwort

Aufgrund des weiträumigen Transports in der Atmosphäre, seiner Persistenz in der Umwelt, seiner Fähigkeit zur Bioakkumulation in Ökosystemen und wegen seiner toxischen Eigenschaften ist Quecksilber eine besonders besorgniserregende, in der Schweiz streng reglementierte Chemikalie. Gestützt auf das Gewässer- und Umwelt- sowie Chemikaliengesetz existieren zahlreiche Vorschriften, die den Umgang mit Quecksilber regeln.

Schon früh setzte sich die Erkenntnis durch, dass der Quecksilberproblematik allein mit nationalen Massnahmen nicht wirksam begegnet werden kann. Messungen seit den 1990er Jahren zeigen, dass Quecksilber nach seiner Freisetzung weiträumig und grenzüberschreitend verfrachtet wird. Aus diesem Grund wurde bereits 1998 das Schwermetallprotokoll von Aarhus, ein Zusatzprotokoll zur Genfer Luftreinhaltekonvention von 1979, verabschiedet. Es bezweckt die Verminderung der Emissionen der Schwermetalle Blei, Cadmium und Quecksilber und enthält für letzteres auch Produktvorschriften. Mit der Änderung des Protokolls im Dezember 2012 wurden die Anforderungen an emissionsmindernde Massnahmen an den Stand der Technik angepasst. Das Protokoll gilt für den UNECE-Raum, der die EU-Mitgliedsstaaten, die Schweiz, die Nachfolgestaaten der ehemaligen Sowjetunion sowie die Länder Kanada und USA umfasst. Darüber hinaus wurden im Januar 2013 die Verhandlungen über ein globales Abkommen zum Schutz von Mensch und Umwelt vor den negativen Auswirkungen von Quecksilber erfolgreich abgeschlossen. Das sogenannte Minamata-Übereinkommen wurde seither von über 90 Staaten, darunter auch von der Schweiz, ratifiziert und trat im August 2017 in Kraft.

Durch Freisetzungen in den vergangenen Jahrzehnten hat das Vorkommen von Quecksilber in den Umweltkompartimenten zugenommen. Eine erste Schweizer Standortbestimmung zur Situation der Quecksilberbelastung veröffentlichte das damalige Bundesamt für Umweltschutz vor 30 Jahren. Dabei wurden die verwendeten Mengen Quecksilber abgeschätzt sowie der damalige Kenntnisstand zu Quecksilber in der Schweizer Umwelt zusammengefasst. In Anbetracht der jüngsten Entwicklung der nationalen und internationalen Regulierung von Quecksilber soll der vorliegende Bericht die bestehenden Kenntnisse zu Quecksilber in der Schweiz nun aktualisieren. Dazu fasst der Bericht den Stand des Wissens über den Verbrauch und den Verbleib von Quecksilber zusammen und bietet eine Übersicht über die Quecksilberbelastungen der Umweltkompartimente der Schweiz.

Ich bedanke mich bei allen Beteiligten, die mit Rat und Tat zum Gelingen dieses Berichts beigetragen haben.

Martin Schiess
Leiter Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

1 Einleitung

Quecksilber gelangt aus natürlichen und anthropogenen Quellen in die Umwelt und durchläuft dort komplexe biogeochemische Kreisläufe. Alle Formen von Quecksilber sind giftig, wobei durch mikrobielle Prozesse gebildetes und sich in Nahrungsnetzen anreicherndes Methylquecksilber eine besonders hohe Toxizität aufweist. Zum Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit müssen Verbrauch und Umwelteinträge von Quecksilber so gering wie möglich gehalten werden.

Nach Schätzungen der UNO tragen heute natürliche Quellen mit bis zu 10% und anthropogene Quellen, hier vor allem die Verbrennung von Kohle und der Goldklein-

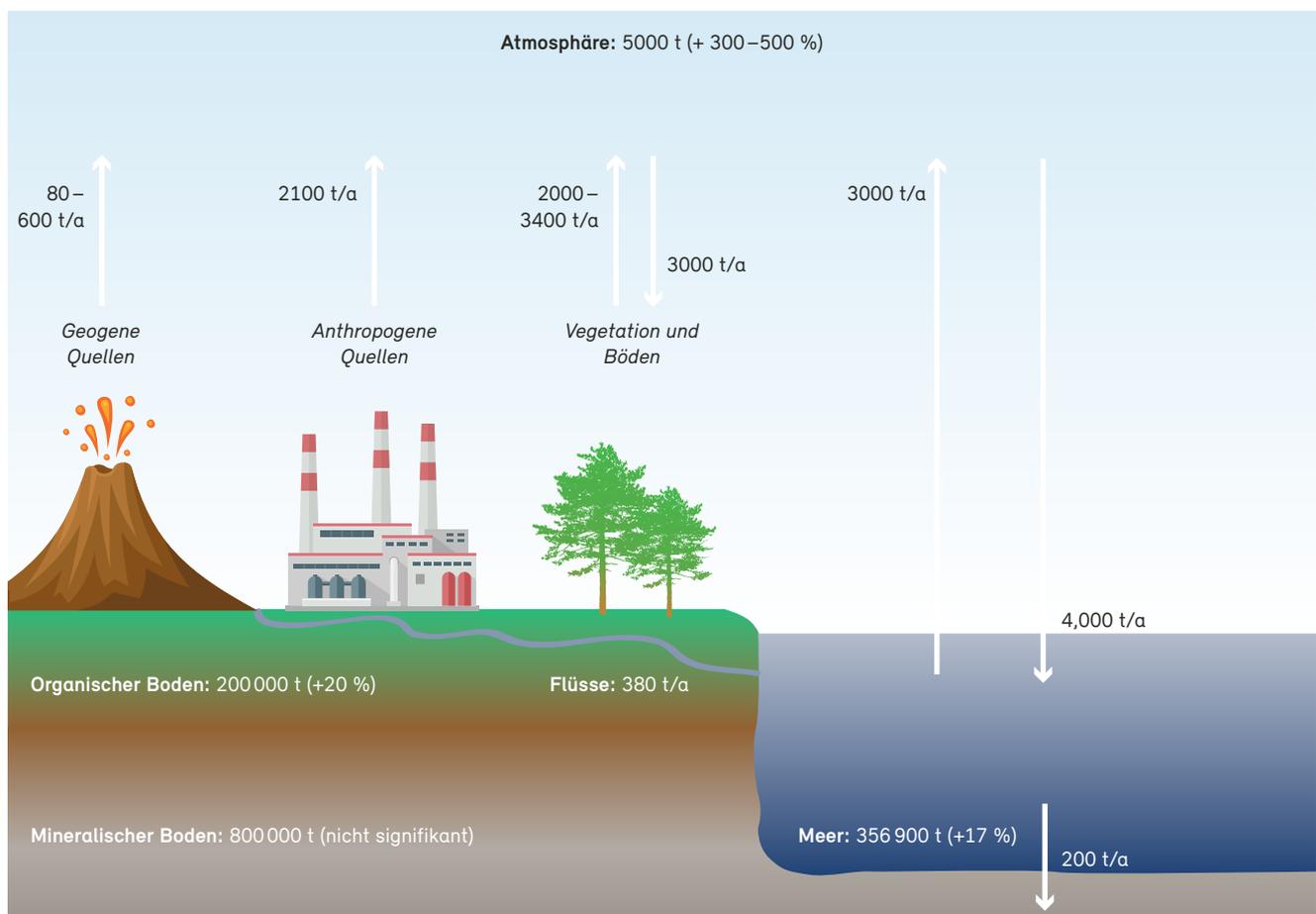
bergbau, mit bis zu 30% zu den globalen Lufteinträgen von Quecksilber bei. Der Rest (60%) entfällt auf Re-Emissionen von früher in die Umwelt eingetragenen Quecksilber. In der Luft liegt Quecksilber (chemisches Symbol: Hg) hauptsächlich in seiner elementaren Form (Hg^0) vor. Elementares Quecksilber hat eine lange atmosphärische Verweilzeit und wird deshalb in der Atmosphäre über grosse Distanzen transportiert. In der Luft kann das elementare Quecksilber auch zu seiner zweiwertigen Form (Hg^{2+}) oxidiert werden. Fernab der Emissionsquelle gelangt Quecksilber durch trockene und nasse Deposition in Böden, die Vegetation und Gewässer, wobei oxidierte Hg-Spezies besonders leicht aus dem Luftkompartiment

Abbildung 1

Globale Bilanz der Quecksilberflüsse in der Umwelt

Die Prozentangaben entsprechen den Zunahmen in den entsprechenden Kompartimenten im Verlauf der letzten 150 Jahre.

Modifiziert nach Driscoll et al. [1].



entfernt werden. Aus Böden, Vegetation und Gewässern kann Quecksilber wieder zurück in die Atmosphäre gelangen, wobei die Reduktion von Hg^{2+} zu flüchtigem Hg^0 in Ozeanen und Böden hauptverantwortlich für Re-Emissionen in die Atmosphäre ist (Abbildung 1).

In der Umwelt kann Quecksilber durch mikrobielle Prozesse in organisches Methylquecksilber (Methyl-Hg) umgewandelt werden. Methyl-Hg ist für aquatische und terrestrische Organismen ausgesprochen toxisch, problematisch ist seine Anreicherung besonders im aquatischen Nahrungsnetz. Infolge dieser Anreicherung (auch Bioakkumulation genannt) treten in Biota Methyl-Hg-Gehalte auf, die schädlich für Raubtiere an der Spitze der Nahrungskette sein können. Eine Folge chronischer Exposition mit dem das Nervensystem schädigenden Quecksilber können Verhaltensveränderungen der betroffenen Tiere sein. Zudem wurden verminderte Fortpflanzungsraten beobachtet. Aufgrund seiner Entwicklungsneurotoxizität gelten beim Menschen die Schwangerschaft und das Kleinkindalter als empfindlichster Zeitraum für eine Methyl-Hg-Exposition [2, 3].

Wegen des weiträumigen Transports in der Atmosphäre, seiner Persistenz in der Umwelt und seiner Fähigkeit zur Bioakkumulation in Ökosystemen sowie aufgrund seiner toxischen Eigenschaften ist Quecksilber eine besonders besorgniserregende Chemikalie. Ein multilateraler Erfolg war der Abschluss der Verhandlungen über ein rechtlich verbindliches, globales Abkommen über Quecksilber im Jahr 2013. Ziel des im August 2017 in Kraft getretenen Übereinkommens von Minamata ist es, die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor anthropogenen Emissionen von Quecksilber zu schützen.

Die beschriebene internationale Entwicklung wird zum Anlass für die Veröffentlichung eines Sachstandberichts über Quecksilber in der Schweiz genommen. Der vorliegende Bericht bietet im ersten Teil nach einer kurzen Einführung in nationale und internationale Rechtsvorschriften zu Quecksilber einen Überblick über den Verbrauch, das Abfallaufkommen und die Entsorgung von Quecksilber in der Schweiz. Der zweite Teil des Berichts fasst den Stand des Wissens zu Umwelteinträgen und der Quecksilberbelastung einzelner Umweltkompartimente zusammen, beurteilt diese Belastungen und zeigt vorhandene Wissenslücken auf. Im letzten Teil werden die Hauptquellen für die Quecksilberbelastung der Bevölkerung in der Schweiz aufgezeigt. Der vorliegende Bericht wird zudem durch einen ausführlichen Begleitbericht ergänzt, welcher die Daten und Abschätzungsmethoden zum hier präsentierten Überblick ausführlich darlegt und beschreibt.

2 Regulierung

Aufgrund der problematischen Eigenschaften für die Umwelt und die Gesundheit des Menschen ist Quecksilber in der Schweiz streng reglementiert. Mit nationalen Massnahmen allein kann jedoch der Quecksilberproblematik nicht genügend begegnet werden. Das Schwermetall Protokoll von 1998 unter der Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE sowie das unter dem Dach des UNO-Umweltprogramms erarbeitete und im August 2017 in Kraft getretene globale Minamata-Übereinkommen enthalten Vorschriften für den gesamten Lebenszyklus von Quecksilber.

2.1 Nationale Rechtsvorschriften

Einschränkungen und Verbote für den Einsatz von Quecksilber in Produkten und Prozessen gibt es in der Schweiz seit über 30 Jahren. Sie finden sich heute in der im Jahr 2005 in Kraft getretenen Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, SR 814.81). Änderungen der Vorschriften über Quecksilber wurden zuletzt in den Jahren 2015 und 2017 vorgenommen, wobei der Fokus der jüngsten Änderung hauptsächlich auf Vorschriften zur Kontrolle der Ein- und Ausfuhren von Quecksilber und seinen Verbindungen lag. Diese Anpassungen waren nötig, damit die Schweiz den im Übereinkommen von Minamata (SR 0.814.82) festgelegten Anforderungen nachkommen kann, wozu sie sich als Vertragspartei verpflichtet hat.

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) und die Luftreinhalte-Verordnung (LRV, SR 814.318.142.1) sind u.a. Gefässe für emissionsbegrenzende Vorschriften. Auch sie werden laufend an den Stand der Technik angepasst. Vorschriften im Abfallrecht, namentlich in der Abfallverordnung (VVEA, SR 814.600), der Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVa, SR 814.610) und der Verordnung des UVEK über Listen zum Verkehr mit Abfällen (LVA, SR 814.610.1) stellen einen umweltverträglichen Umgang mit Quecksilberabfällen sicher. In der Gewässerschutzverordnung, der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12) und der Altlasten-Verordnung (AltIV, SR 814.680) sind weiter auch «maximal zulässige Gehalte» für die Belastung von ober-

irdischen Gewässern und Böden mit Quecksilber festgelegt. Tabelle 1 gibt einen summarischen Überblick über ausgewählte Verordnungen und die Art ihrer Vorschriften zu Quecksilber. Eine weitergehende Beschreibung der spezifischen Bestimmungen über Quecksilber in diesen und weiteren Erlassen ist in Tabelle 1 des ausführlichen Begleitberichts festgehalten.

2.2 Völkerrechtliche Vorschriften

Verschiedene internationale Übereinkommen, welche auch die Schweiz ratifiziert hat, befassen sich mit Quecksilber. Zu nennen sind Beschlüsse und Empfehlungen der Vertragsparteien des Übereinkommens zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR-Übereinkommen, SR 0.814.293) und das Zusatzprotokoll vom 24. Juni 1998 über Schwermetalle (Schwermetallprotokoll von Aarhus, SR 0.814.326) zum Übereinkommen von 1979 über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Genfer Luftreinhaltekonvention) der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE). Das Schwermetallprotokoll von Aarhus ist seit dem Jahr 2003 in Kraft und wurde von 33 Staaten aus Europa und Nordamerika ratifiziert, darunter im Jahr 2000 von der Schweiz. Es bezweckt die Verminderung der Emissionen der Schwermetalle Blei, Cadmium und Quecksilber. Mit der Änderung des Protokolls im Dezember 2012 wurden die Anforderungen an emissionsmindernde Massnahmen an den Stand der Technik angepasst.

Mit dem Ziel, die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor anthropogenen Emissionen und Freisetzungen von Quecksilber zu schützen, wurde an der 25. Sitzung des Verwaltungsrates des UNO-Umweltprogramms (UNEP) im Jahr 2009 von den Umweltministern ein Mandat zur Verhandlung eines rechtlich verbindlichen, globalen Übereinkommens über Quecksilber verabschiedet. Basierend auf diesem Mandat wurde das Minamata-Übereinkommen ausgehandelt und im Herbst 2013 zur Unterzeichnung aufgelegt. Neben emissionsmindernden Massnahmen sieht das Übereinkommen eine Einstellung des Quecksilberbergbaus sowie Verbote für alle Verwendungen vor, in denen Quecksilber substituiert werden kann. Die Schweiz

hat Ende Mai 2016 die Ratifikationsurkunde hinterlegt,
im August 2017 ist das Übereinkommen in Kraft getreten.

Tabelle 1

Nationale Rechtsvorschriften über Quecksilber. Ausgewählte Erlasse (Stand Juli 2018)

Erlass	Art der Vorschriften zu Quecksilber
Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, SR 814.81)	<ul style="list-style-type: none"> • Verbote von Ein- und Ausfuhren des Metalls und von Einfuhren der Verbindungen, soweit sie nicht bewilligt wurden. • Ausfuhrverbot des Metalls ab dem Jahr 2028 für andere Zwecke als die Analyse und Forschung. Bis Ende 2020 können Ausfuhren für die Herstellung von Entladungslampen und für den Unterhalt von Rollnahtschweissmaschinen sowie bis Ende 2027 für die Herstellung von Dentalamalgamkapseln bewilligt werden. • Verbot als Hilfsstoff in Prozessen. • Weitgehende Verbote als Bestandteil von Produkten. • Vorsorgliches Verbot für vor dem 1. Januar 2018 nicht bekannte Verwendungen.
Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201)	<ul style="list-style-type: none"> • Grenzwerte für den Gehalt im Abwasser für die Einleitung in Oberflächengewässer oder Kanalisationen für bestimmte Branchen. • Pflicht zur Installation von Amalgamabscheidern in Zahnarztpraxen. • Numerische Anforderung an die Wasserqualität oberirdischer Gewässer. • Massnahmen zum Schutz von Mensch und Biota bei Belastungen über der numerischen Anforderung.
Luftreinhalteverordnung (LRV, SR 814.318.142.1)	<ul style="list-style-type: none"> • Vorsorgliche Emissionsbegrenzung in der Abluft stationärer Anlagen. • Spezifische Emissionsbegrenzungen in der Abluft bestimmter Anlagen, so für Anlagen zum Verbrennen von Siedlungs- und Sonderabfällen und für Zementöfen.
Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12)	<ul style="list-style-type: none"> • Richtwert für die Belastung des Bodens. • Massnahmen zum Schutz von Mensch und Biota bei Belastungen über dem Richtwert.
Abfallverordnung (VVEA, SR 814.600)	<ul style="list-style-type: none"> • Hilfsstoffe aus Prozessen gelten als Quecksilberabfall, der umweltverträglich behandelt und abgelagert werden muss. • Aus der Behandlung von Quecksilberabfällen stammendes Metall oder stammende Verbindungen bleiben Quecksilberabfall, der umweltverträglich behandelt und abgelagert werden muss, soweit das Metall oder die Verbindungen nicht für eine zulässige Verwendung abgegeben werden dürfen oder das Metall mit einer Bewilligung nach den Vorschriften der ChemRRV ausgeführt werden darf. • Voraussetzungen zur Verwendung von Abfällen bei der Zementherstellung.
Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVa, SR 814.620)	<ul style="list-style-type: none"> • Technische und organisatorische Massnahmen im Umgang mit quecksilberhaltigen Sonderabfällen (Identifikation der Abfälle, nachvollziehbare Übergabe, Entsorgungsbewilligung und Meldepflichten für Entsorgungsunternehmen sowie Anforderungen an die umweltverträgliche Behandlung). • Massnahmen bei der Ein- und Ausfuhr quecksilberhaltiger Sonderabfälle nach den Vorgaben des Basler Übereinkommens (SR 0.814.05).
Altlasten-Verordnung (AltIV, SR 814.680)	<ul style="list-style-type: none"> • Vorschriften zur Untersuchung, Überwachung und Sanierung von belasteten Standorten. Grundwasser, oberirdische Gewässer, Luft und Boden sind vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen, so auch durch Quecksilber, zu schützen. • Konzentrationswert für die Sanierungsbedürftigkeit von Böden von Haus- und Familiengärten, Kinderspielplätzen und Anlagen, auf denen Kinder regelmässig spielen.

3 Verwendung und Entsorgung

In der Schweiz betrug im Jahr 2012 der Quecksilberverbrauch als Bestandteil von Produkten und als Hilfsstoff in Prozessen ca. 1900 kg. Die in inländischen Abfällen enthaltene Quecksilbermenge wird für das selbe Jahr auf ca. 3700 kg geschätzt. Davon wurden rund 2500 kg in Anlagen im In- und Ausland zurückgewonnen. Nahezu alles Quecksilber, das aus der Schweiz ausgeführt wird, ist metallisches Quecksilber in Reinform und stammt aus der Verwertung importierter Quecksilberabfälle.

3.1 Angebot und Nachfrage

Die Nachfrage an metallischem Quecksilber in der Schweiz im Zeitraum 2006 – 2016 wurde einerseits durch Einfuhren gedeckt. Andererseits ist im Inland zurzeit ein Betrieb tätig, der aus in- und ausländischen Abfällen metallisches Quecksilber zurückgewinnt. So gewonnenes Metall, das die Inlandnachfrage überstieg, gelangte zur Ausfuhr.

Abbildung 2 zeigt die in die Schweiz eingeführten Mengen an metallischem Quecksilber für den Zeitraum von 2006 – 2016 gemäss Daten aus der Zollstatistik [4].

Nach 2008 sanken die eingeführten Mengen stark von über 3000 kg auf rund 600 kg pro Jahr im Zeitraum 2009 – 2013 und weiter auf noch 70 kg im Jahr 2016. Diese Abnahme kann auf den Rückgang der Hg-Nachfrage durch Produzenten von Dentalprodukten zurückgeführt werden, die den Standort Schweiz verlassen oder die Produktion von Dentalamalgamkapseln aufgegeben haben. Bis jüngst bestand inländische Hg-Nachfrage in der Höhe von rund 1000 kg jährlich in einem Chemiewerk, in welchem eine Chlor-Alkali-Anlage nach dem Amalgamverfahren betrieben wurde. Lieferant des Quecksilbers war der einzige Schweizer Quecksilber-Recycler. Dieser bediente weiter inländische Hersteller von Rollnahtschweissmaschinen, Forschungsinstitute und Anbieter von Chemikalien für Analyse und Forschungszwecke mit Quecksilber in Kleinmengen.

Abbildung 2

Schweizer Einfuhren von Quecksilber im Zeitraum 2006 – 2016

In die Schweiz eingeführte Menge an metallischem Quecksilber in Kilogramm nach Daten der Zollstatistik [4].

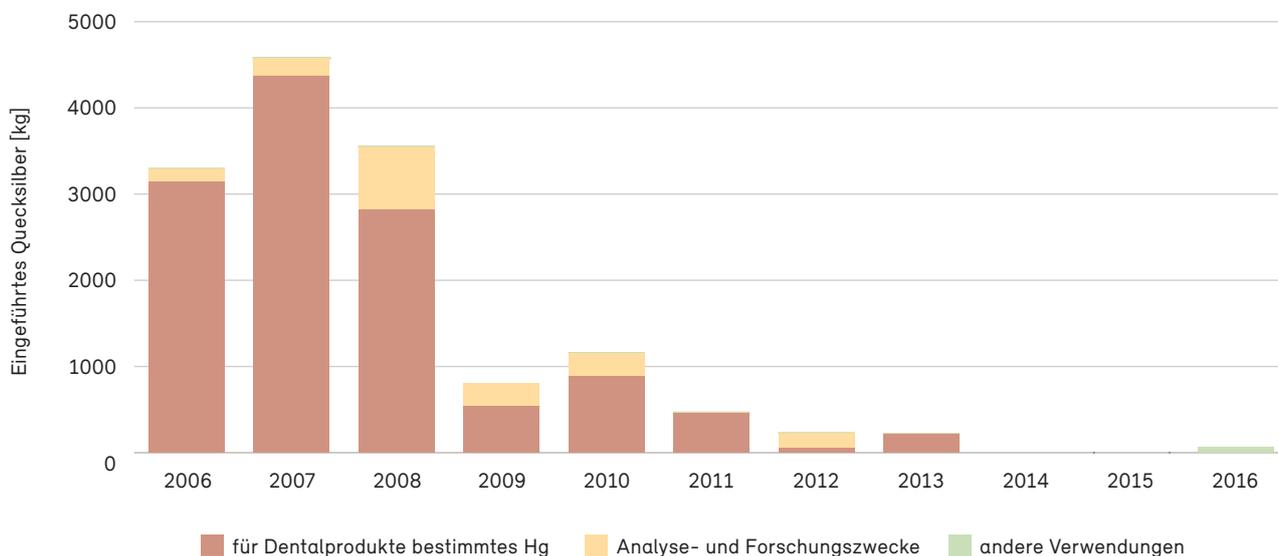
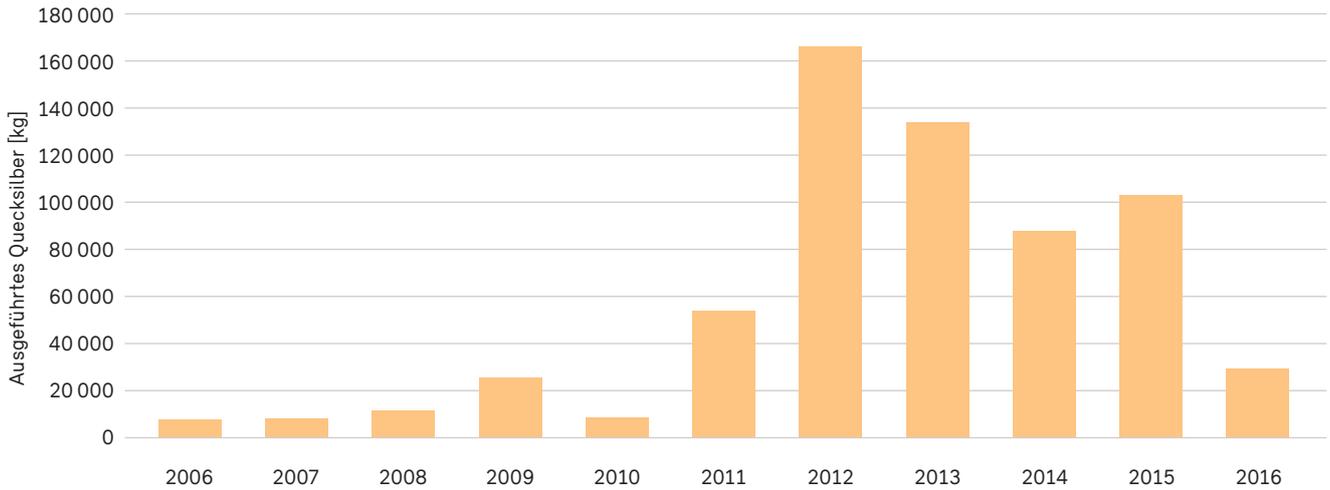


Abbildung 3

Schweizer Ausfuhren von Quecksilber im Zeitraum 2006 – 2016

Aus der Schweiz ausgeführte Menge an metallischem Quecksilber in Kilogramm nach Daten der Zollstatistik [4]. Für die Jahre 2006 und 2007 ist die Produktion des Recyclers angegeben.



Quelle: EZV [4]

Gegenüber den Einfuhren zeigen die Ausfuhren ein gegenläufiges Bild: Die Menge des ausgeführten Quecksilbers nahm in den Jahren 2011 – 2015 im Vergleich zu den Vorjahren sprunghaft auf jährlich rund 100 000 kg zu, ging jedoch auf das Jahr 2016 hin wieder auf ca. 30 000 kg zurück (Abbildung 3).

Das ausgeführte Quecksilber wurde in den Anlagen des Schweizer Quecksilber-Recyclers gewonnen; seine «Rohstoffe» waren Quecksilberabfälle, die er sich grösstenteils über Einfuhren beschaffte. Die Abnahme der Ausfuhren 2016 ist auf eine Anpassung der Geschäftspraxis des Recyclers zurückzuführen: Ab 2015 wurde die Abgabe des gewonnenen Quecksilbers an Händler gestoppt. Kunden mit opportunen Verwendungen – das sind Analyse- und Forschungszwecke und die Herstellung von Dentalamalgamkapseln – werden seither nur noch direkt beliefert.

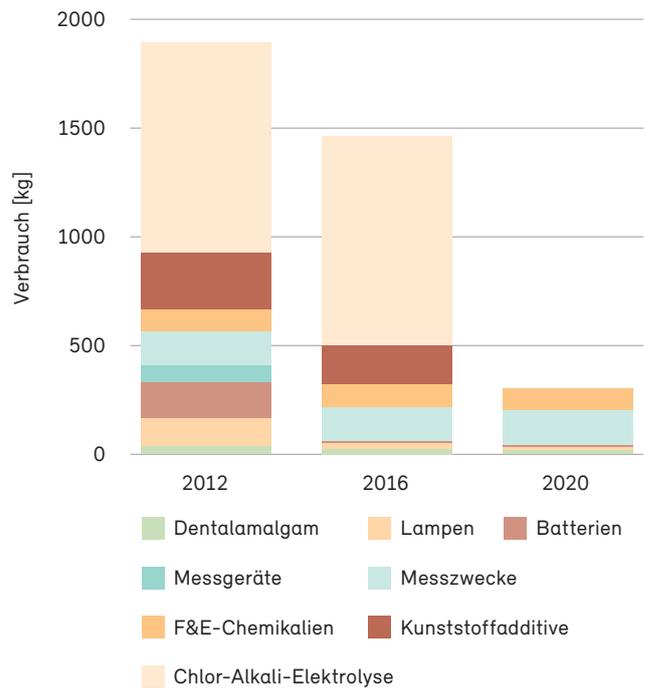
3.2 Verwendungen

Quecksilber wird in der Schweiz in einer überschaubaren Anzahl Verwendungen eingesetzt. Abbildung 4 zeigt die im Jahr 2012 stattgefundenen Verwendungen und Schätzungen

Abbildung 4

Verbrauch von Quecksilber in der Schweiz

Verwendungen von Quecksilber in der Schweiz sowie Schätzungen und Prognose der damit einhergehenden Quecksilbermengen für den Zeitraum 2012 – 2020 in Kilogramm Hg.



Quelle: Eigene Schätzungen

zungen der damit einhergehenden Quecksilbermengen sowie entsprechende Schätzungen für die Jahre 2016 und 2020. Im Folgenden werden diese Verwendungen näher beschrieben.

3.2.1 Hilfsstoffe in Prozessen

Bis ins Jahr 2016 wurde in einem Schweizer Betrieb Quecksilber als Kathode in der Chlor-Alkali-Elektrolyse genutzt. Der durchschnittliche Jahresverbrauch zum Ausgleich von Hg-Verlusten betrug dabei rund 960 kg. Das verlorene Quecksilber gelangte in die verschiedenen Abfallprodukte des Verfahrens. Diese wurden in der Schweiz behandelt und das Quecksilber dabei zurückgewonnen. Ein kleiner Teil des Quecksilbers gelangte zudem über die Luft und das Abwasser in die Umwelt. Ende 2016 wurde die Chlor-Alkali-Elektrolyse auf das Hg-freie Membran-Verfahren umgestellt. Bis im Jahr 2013 wurde Quecksilber zudem in einem Chemiewerk als Katalysator in einer chemischen Synthese verwendet. Das Quecksilber wurde dabei vom Verwender vor Ort vollständig regeneriert, sodass im Zeitraum 2008–2013 kein Quecksilber zugekauft wurde. Seit 2018 ist die Verwendung von Quecksilber als Hilfsstoff in industriellen Herstellungsprozessen verboten.

3.2.2 Kunststoffadditive

Bis jüngst dienten Phenylquecksilber-Verbindungen als Additiv in der Herstellung von Formteilen aus Polyurethan (PUR)-Elastomeren, die unterschiedlichste Einsatzgebiete haben [5]. Ausgehend von Zahlen der EU [7] lässt sich schätzen, dass in der Schweiz im Jahr 2012 rund 180 kg Quecksilber in PUR-Elastomeren auf den Markt kamen. In der EU trat ein Verbot der Vermarktung von quecksilberhaltigen Kunststoffen im Herbst 2017 in Kraft. Auch die Schweiz führte zeitgleich ein analoges Verbot ein.

Aufgrund der teilweise langen Lebensdauer ist davon auszugehen, dass quecksilberhaltige PUR-Formteile noch einige Zeit lang zur Entsorgung anfallen werden. Es wird angenommen, dass sie am Ende ihrer Lebensdauer grösstenteils mit Siedlungsabfällen aus Haushalten und Gewerbe in die Kehrichtverbrennung gelangen. Neben Formteilen wurden bis in die 1980er-Jahre auch Sportplatzbeläge (sog. Tartanbeläge) mit Hilfe von Phenylquecksilber-Verbindungen gefertigt [6]. Angaben zum Quecksilberanfall mit Altbelägen können nicht

gemacht werden; es wird von einer Beseitigung in Sonderabfallverbrennungsanlagen ausgegangen.

3.2.3 Chemikalien für Analyse und Forschungszwecke

Quecksilber wird als Metall und in Form von Verbindungen in Laboratorien verwendet. Quecksilberverbindungen für die Verwendung im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung wurden im Jahr 2012 in der Schweiz an einem Standort synthetisiert. Weiter wurden solche Verbindungen auch zum Zwecke der Konfektionierung importiert. Ein Teil dieser hergestellten und konfektionierten Verbindungen gelangte zur Ausfuhr, der andere wurde im Inland für Analyse- und Forschungszwecke verwendet. Im Jahr 2012 lag der inländische Verbrauch schätzungsweise bei einer Menge von 100 kg Hg. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Menge für die Jahre 2016 und 2020 nicht signifikant änderte bzw. ändern wird. Das so verwendete Quecksilber gelangt zu einem Teil separat gesammelt zur Entsorgung, der andere Teil dürfte via Kanalisation in Abwasserreinigungsanlagen abgeleitet werden.

3.2.4 Messgeräte und Messzwecke

In Messgeräten dient Quecksilber vor allem als Manometer- und Thermometerflüssigkeit. Quecksilber wird ferner auch zur Bestimmung der Porengrössenverteilung und des Porenvolumens von Materialien (Porosimetrie) eingesetzt. Zudem wird es in elektrochemischen Analysemethoden wie der Voltammetrie als Elektrode verwendet. Im Jahr 2012 wurden in der Schweiz keine Quecksilber enthaltenden Messgeräte hergestellt. Basierend auf Erhebungen der EU [8] kann die 2012 in der Schweiz abgegebene Menge an Quecksilber in Messgeräten auf 80 kg geschätzt werden. Weiter kann der Verbrauch von Quecksilber durch Messungen von Porenvolumina und in der Voltammetrie im Jahr 2012 auf rund 160 kg geschätzt werden, wobei der grösste Teil für porosimetrische Messungen verbraucht wurde. Nachdem für die meisten Messgeräte praxiserprobte Alternativen ohne Quecksilber existieren, wurde ihr Inverkehrbringen im Jahr 2015 in der Schweiz verboten. Dieses Verbot gilt jedoch nicht für die Quecksilberporosimetrie und Voltammetrie.

Daten zur Art und zur Menge quecksilberhaltiger Messgeräte, die in der Schweiz zur Entsorgung anfallen, liegen nicht vor. Es wird von einer Rückgewinnung des in den

Geräten enthaltenen Quecksilbers ausgegangen. Quecksilber aus Messungen der Porosität und der Voltammetrie wird in der Regel destillativ gereinigt und wiederverwendet.

3.2.5 Dentalamalgam

Dentalamalgam wird durch das Vermischen von gleichen Teilen Quecksilber und einer Dentallegierung erhalten. Der Vertrieb von solchem Dentalamalgam geschieht heute in Kapseln, die diese beiden Komponenten enthalten. Die Produktion von Dentalamalgamkapseln in der Schweiz wurde vor kurzem eingestellt, fand aber im Jahr 2012 noch statt, wobei die produzierten Kapseln hauptsächlich zur Ausfuhr gelangten. In der Schweiz selbst wurden im Jahr 2012 noch rund 35 kg Quecksilber in neuen Amalgamfüllungen verbraucht.

Die Stoffflüsse von Quecksilber durch die Verwendung von Dentalamalgam sind verhältnismässig komplex. In Zahnarztpraxen fällt heute das meiste Quecksilber durch das Ausbohren alter Amalgamfüllungen und Ziehen amalgamhaltiger Zähne an. Ausgebohrte Amalgamfüllungen finden sich grösstenteils in den in allen Praxen installierten Amalgamabscheidern wieder. Ihre Rückstände werden zur weiteren Behandlung Entsorgern in der Schweiz und im Ausland übergeben. Ein kleiner Teil der ausgebohrten Füllungen wird nicht von den Amalgamabscheidern zurückgehalten und gelangt über das Siedlungsabwasser in die Abwasserreinigung. Nicht entfernte Amalgamfüllungen bleiben bis zum Versterben im Gebiss ihrer Träger. Aus Amalgamfüllungen von Verstorbenen gelangt Quecksilber so zum einen in Krematorien, wo es zu einem grossen Teil in der Abluftreinigung der Kremation zurückgehalten wird. Zum anderen gelangt Quecksilber über Erdbestattung auch in den Boden.

3.2.6 Batterien

Bis vor kurzem enthielten Knopfzellenbatterien noch 0,25–1,2% Quecksilber in Form von amalgamiertem Zink zur Vermeidung von Gasbildung und Leckagen. Solches Zink wurde 2012 vom einzigen Schweizer Knopfzellen-Hersteller noch eingesetzt, inzwischen stellt er Hg-freie Zellen her. Die Menge an Quecksilber in Knopfzellenbatterien, die im Jahr 2012 in der Schweiz auf den Markt kamen, kann auf rund 160 kg geschätzt werden. Diese Schätzung berücksichtigt die unterschiedlichen

Quecksilbergehalte der verschiedenen Zellentypen und ihren Marktanteil an der gesamthaft verkauften Menge von Knopfzellenbatterien in der Schweiz im Jahr 2012 [9, 10]. Seit dem Jahr 2016 dürfen Batterien in der Schweiz kein Quecksilber mehr enthalten.

Ausgediente Batterien müssen vom Verbraucher zur Entsorgung an eine entsprechende Sammelstelle übergeben werden. Diese Altbatterien werden anschliessend der Entsorgung zugeführt, bei der Quecksilber zurückgewonnen wird. Die Rücklaufquote von Batterien betrug in den Jahren 2011–2013 im Durchschnitt rund 70%. Für die restlichen 30% der Altbatterien besteht Grund zur Annahme, dass sie über den Siedlungsabfall in die Kehrichtverbrennung gelangten.

3.2.7 Entladungslampen

Bei Lampentechnologien kann zwischen Entladungslampen, Leuchtdioden (LED) und Temperaturstrahlern (Glühlampen, Halogenleuchtstofflampen) unterschieden werden. Entladungslampen umfassen Leuchtstofflampen, Kompaktleuchtstofflampen und Hochdruckentladungslampen (Natriumdampf-, Quecksilberdampf- und Metallhalogenleuchtstofflampen), welche alle für die Lichterzeugung Quecksilber benötigen. Leuchtdioden und Temperaturstrahler enthalten hingegen kein Quecksilber. Entladungslampen werden in Haushalten, Zweckbauten und in der Strassenbeleuchtung verwendet. Daneben wurden im Jahr 2012 auch noch quecksilberhaltige Kaltkathoden-Fluoreszenzlampen für die Hintergrundbeleuchtung in IT-Geräten verwendet. In der Schweiz werden keine Entladungslampen hergestellt und entsprechend wird die Nachfrage über Importe gedeckt.

Anhand Daten zum Verbrauch der verschiedenen Typen von Entladungslampen sowie mit Annahmen zur durchschnittlich enthaltenen Menge von Quecksilber in den Lampentypen kann die Hg-Menge, die durch Entladungslampen im Jahr 2012 in Verkehr gebracht wurde, auf rund 35 kg für die Raumbeleuchtung und 35 kg für die Strassenbeleuchtung und andere Beleuchtungszwecke geschätzt werden [11], [107]. Zudem lässt sich aus Modellrechnungen von Zumbühl & Benedetti [12] sowie Böni & Widmer [13] abschätzen, dass im Jahr 2012 zusätzlich rund 40 kg Quecksilber in Form von Hintergrundbeleuchtungen von IT-Geräten in Verkehr gebracht wurden.

Entladungslampen sowie IT-Geräte werden in der Schweiz separat gesammelt und der Entsorgung zugeführt. Ein Teil der quecksilberhaltigen Entladungslampen, insbesondere Kompaktleuchtstofflampen, gelangt jedoch auch über die fälschliche Entsorgung via Siedlungsabfälle in die Kehrichtverbrennung.

3.2.8 Schalter, Relais und andere Bauteile

In der Vergangenheit war der Einsatz von quecksilberhaltigen Schaltern und Relais in Elektro- und Elektronikgeräten weit verbreitet. Inzwischen ist aufgrund der Bestimmungen des Chemikalienrechts die Verwendung Hg-haltiger Bauteile jeglicher Art in diesen Geräten nur ausnahmsweise möglich. Dies trifft auch für Motorfahrzeuge (Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge) zu. Ferner wurde Quecksilber früher zur Stromübertragung in Rollenköpfen von Rollnahtschweissmaschinen zur Fertigung von Dosenverpackungen oder Industrie- und Armierungsgittern verwendet. Heute existieren hierfür Alternativen ohne Quecksilber.

Basierend auf Abklärungen zum Einsatz von Quecksilber in medizinischen Geräten sowie Überwachungs- und Kontrollinstrumenten in der EU kann gefolgert werden, dass im Jahr 2012 in der Schweiz mit solchen Geräten keine nennenswerten Quecksilbermengen in Verkehr gebracht wurden. Identifizierte Hg-haltige Bauteile waren Infrarotdetektoren, Detektoren für ionisierende Strahlung, Referenzelektroden (Kalomelektroden) und Spezialschalter [14]. Für den Fall der Schweissmaschinen wird geschätzt, dass Schweizer Hersteller (ausländische) Anlagebetreiber im Jahr 2012 mit rund 40 kg Quecksilber zur Füllung von Rollenköpfen belieferten.

In auf die Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten spezialisierten Betrieben wird nach Angaben von Kägi & Franov [15] auch heute noch eine erhebliche Anzahl quecksilberhaltiger Schalter hauptsächlich aus Kühl-, Gefrier- und Klimageräten aussortiert. Nicht separierte Hg-Schalter und andere Hg-haltige Bauteile aus solchen und anderen Grossgeräten wie auch aus Werkzeugen, Maschinen und Anlagen sowie Fahrzeugen gelangen in die Schrottverwertung. Dabei kontaminieren sie den Schrott und bei dessen Zerkleinerung über den Schredder auch die dabei anfallenden Reststoffe.

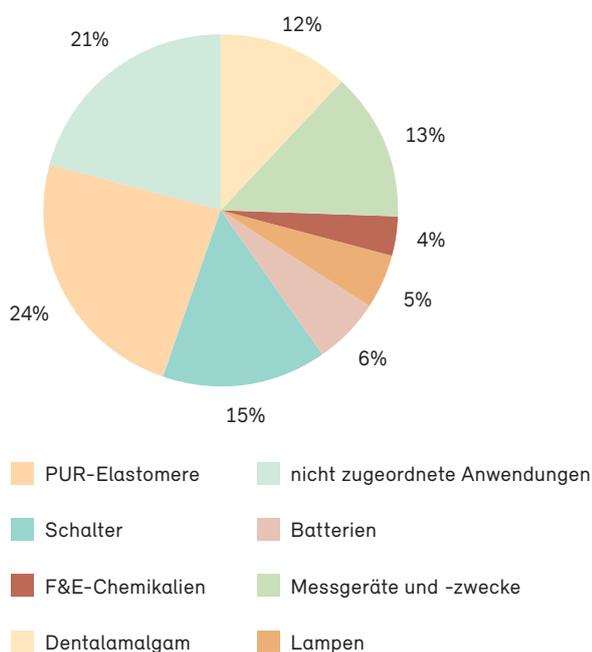
3.3 Aufkommen in Abfällen und Entsorgung

Das Quecksilberaufkommen mit Abfällen im Jahr 2012 wird auf rund 3700 kg geschätzt. Abbildung 5 zeigt die Beiträge der verschiedenen Verwendungen. Nicht aufgeführt sind die heute nicht mehr anfallenden Prozessabfälle der chemischen Industrie, die 2012 noch 1000 kg betragen¹. Rund 25 % des Aufkommens von Quecksilber entfallen auf PUR-Elastomere. Je 10–15 % lassen sich auf quecksilberhaltige Schalter, Dentalamalgam sowie Messgeräte einschliesslich für Messzwecke benötigtes Quecksilber zurückführen. Auf jeweils 5 % belaufen sich die Beiträge der Verwendung von Batterien, Lampen und Chemikalien für Forschungszwecke. Rund 20 % des Abfallaufkommens von Quecksilber lassen sich keiner Verwendung zuordnen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Quecksilber, das in Reststoffen aus dem Schredder (RESH) und in Metallschrott enthalten ist, und um Teilmengen des Quecksilbers, die sich im Klärschlamm finden und in Abfällen enthalten sind, die Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) zugeführt werden.

¹ Das bei der Umstellung der Prozesse in zwei Werken in einer chemischen Synthese und bei der Chlor-Alkali-Herstellung in einer Menge von rund 40 000 kg obsoleet gewordene Quecksilber wurde inzwischen im Inland in das inerte Quecksilbersulfid (Zinnober) überführt und im Ausland in einer Untertagedeponie abgelagert.

Abbildung 5
Beiträge einzelner Verwendungen zum Abfallaufkommen von Quecksilber

Beiträge einzelner Verwendungen zum Abfallaufkommen von Quecksilber in der Schweiz im Jahr 2012, ohne die Prozessabfälle aus der Chlor-Alkali-Industrie.



Quelle: Eigene Schätzungen

Bei der Behandlung der quecksilberhaltigen Abfälle wurde Quecksilber in metallischer Form zurückgewonnen oder in abgelagerte Produkte transferiert. Dabei liessen sich Umwelteinträge, besonders in die Luft, nicht vermeiden. In den folgenden Abschnitten finden sich Angaben zum Verbleib von Quecksilber bei der Entsorgung der Abfälle.

3.3.1 Quecksilber-Rückgewinnung

Bei der thermischen Behandlung von Quecksilberabfällen verdampfen oder sublimieren darin enthaltenes metallisches Quecksilber oder enthaltene Quecksilberverbindungen, wobei sich letztere bei Temperaturen zwischen 400 und 700 °C unter Reduktion zu metallischem Quecksilber zersetzen. Das Metall wird dann durch Kondensation aus dem Abgasstrom abgeschieden, destillativ gereinigt und kann einer erneuten Verwendung zugeführt werden. Im Inland betreibt zurzeit ein Unternehmen entsprechend eingerichtete Anlagen.

Es wird geschätzt, dass im Jahr 2012 vom in Schweizer Abfällen enthaltenen Quecksilber über die Hälfte zurückgewonnen wurde. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Abfälle, für welche angenommen wird, dass sie in in- und ausländischen Anlagen thermisch behandelt wurden, sowie über die geschätzten Mengen des zurückgewonnenen Quecksilbers². Verwertet wurden zum einen Prozessabfälle aus der chemischen Industrie sowie quecksilberhaltige Produktabfälle wie Messgeräte, Altbatterien und Abfälle aus der Verwendung von Dentalamalgam. Zum anderen gelangten auch quecksilberhaltige Fraktionen aus anderen Abfallbehandlungen, wie beispielsweise mit Quecksilber beladene Aktivkohlen aus der Altlampenaufbereitung, in die Verwertung.

Tabelle 2
Überblick über im Inland angefallene Abfälle, die im Jahr 2012 in der Schweiz oder im Ausland thermisch behandelt wurden, sowie die geschätzten Mengen des daraus zurückgewonnenen Quecksilbers

Ausgangsprodukt	Menge zurückgewonnenes Quecksilber [kg]
Prozessabfälle der Chlor-Alkali – Elektrolyse	1000
Ausgediente und entsorgte Messgeräte	210
Verunreinigtes Quecksilber aus Messzwecken (v. a. Quecksilberporosimetrie)	155
Altbatterien (v. a. Knopfzellen)	115
Dentalamalgam (Überschussamalgam, entfernte Amalgamfüllungen, Rückstände aus Amalgamabscheidern von Zahnarztpraxen)	240
Aussortierte quecksilberhaltige Schalter aus Grossgeräten	≈ 400
Aktivkohlefilter aus der Aufbereitung von Altlampen	≈ 70
Aktivkohlefilter und Ionenaustauscher-Harze aus der Rauchgasreinigung in KVA	≈ 300

² Dabei wurde für Abfälle, für die keine gesicherten Daten für eine Rückgewinnung vorlagen, eine solche jedoch technisch möglich und in der grauen Literatur beschrieben ist, eine Rückgewinnung angenommen.

3.3.2 Entsorgung von Schrott und RESH

Vom Altschrottanfall in der Schweiz werden rund 70 % mit Scheren und 30 % über den Schredder zerkleinert [16]. Beim Schreddern fallen stofflich nicht verwertbare Reststoffe (RESH) an. Nicht aussortierte quecksilberhaltige Bauteile aus Geräten, Werkzeugen, Maschinen oder Anlagen sowie Motorfahrzeugen finden sich somit zum einen Teil in Metallschrott, v.a. Stahlschrott, und zum anderen Teil in RESH.

Stahlschrott wird in zwei Schweizer Elektrostahlwerken eingeschmolzen, wobei das darin enthaltene Quecksilber bei Temperaturen von bis zu 1800 °C in das Rohgas transferiert wird. Bei der anschliessenden Entstaubung des Rohgases gelangt ein Teil des Quecksilbers in den gefilterten Staub, der Rest verbleibt im entstaubten Reingas und gelangt so in die Umwelt. Zur Höhe der Quecksilbermenge im Filterstaub, der im Ausland verwertet wird, sind keine verlässlichen Zahlen verfügbar. Basierend auf Produktionszahlen der zwei Schweizer Stahlwerke und deren Emissionsfaktoren von Quecksilber in die Abluft kann jedoch abgeschätzt werden, dass der im Jahr 2012 in den Werken eingeschmolzene Schrott mindestens 50 kg Quecksilber enthielt [17].

RESH wird aufgrund seines hohen Heizwerts in in- und ausländischen Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) thermisch verwertet. Gemäss Wochele et al. [18] betrug der mittlere Quecksilbergehalt von RESH im Jahr 2008 rund 3 g pro Tonne. Ausgehend von diesem Quecksilbergehalt und der zwischen 2011 und 2013 pro Jahr durchschnittlich angefallenen Menge RESH von 75 000 Tonnen [19] kann geschätzt werden, dass dieser RESH 225 kg Quecksilber enthielt.

3.3.3 Entsorgung von Altlampen

Bei den Entladungslampen haben die Mengen des zugesetzten Quecksilbers und ihr Marktanteil in den letzten Jahren deutlich abgenommen. Trotzdem wird von einem anhaltenden Entladungslampenverbrauch und damit Abfallaufkommen ausgegangen, das einer umweltverträglichen Entsorgung zuzuführen ist. Für die Verwertung von Entladungslampen existieren etablierte Entsorgungsverfahren. In der Anlage des führenden Schweizer Entsorgers werden alte Leuchtstoffröhren, Sparlampen, Hochdruck-Entladungslampen (wie Natriumdampflam-

pen) und Flachbildschirme verarbeitet [20, 21]. Dabei wird das Material mittels einer Mischtrommel oder einem Schredder aufgeschlossen und die verschiedenen Fraktionen (Glas, Metall, Gemische von Kunststoffen und Metallen sowie von Leuchtstoff und Glasstaub) durch Siebe und Metallabscheider voneinander getrennt. Das in den Lampen enthaltene Quecksilber findet sich zum einen im abgeschiedenen Leuchtstoffpulver wieder, weiteres Quecksilber wird im Verwertungsprozess aus der Abluft an imprägnierter Aktivkohle chemisorptiv gebunden. Schätzungsweise fielen im Jahr 2012 zwischen 120 und 150 kg Quecksilber in Altlampen und in der Hintergrundbeleuchtung von IT-Geräten an [12, 13, 22]. Verlässliche Daten zum Verbleib dieser Menge fehlen: Grundsätzlich lässt sich Quecksilber sowohl aus dem Leuchtstoffpulver wie der Aktivkohle entfernen und einer Wiederverwendung zuführen. In einer ersten Näherung wird angenommen, dass 50 % des Quecksilbers mit Leuchtstoffpulver oder mit Aktivkohle untertage abgelagert wurden, und die verbleibenden 50 % des Quecksilbers zur Rückgewinnung gelangten.

3.3.4 Klärschlamm Entsorgung

In Abwässern von Industrie, Gewerbe und Haushalten enthaltenes Quecksilber wird bei der Abwasserreinigung in Kläranlagen grösstenteils im Klärschlamm zurückgehalten. In der Schweiz fallen jährlich rund 200 000 Tonnen Klärschlamm an, welcher seit 2008 nach Inkrafttreten des Verbots der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ausnahmslos verbrannt wird.

Ausgehend von einem mittleren Quecksilbergehalt des Klärschlammes im Jahr 2012 von 0,6 g Hg pro Tonne kann die Menge an Quecksilber im Klärschlamm auf 120 kg geschätzt werden. Rund 50 % des Klärschlammes wurden 2012 in Schlammverbrennungsanlagen (Monoverbrennungsanlagen) sowie je ca. 25 % in KVA und Zementwerken verbrannt [23].

3.3.5 Abfallverwertung in Zementwerken

Mit dem Einsatz von alternativen Rohstoffen und dem Ersatz klassischer Brennstoffe wie Steinkohle und Schweröl durch alternative Brennstoffe steigern die Schweizer Zementwerke ihre Energieeffizienz und reduzieren den CO₂-Ausstoss. Klärschlamm ist aufgrund seines Heizwerts und mineralischen Anteils sowohl

Ersatzbrennstoff wie auch alternativer Rohstoff. Ein Viertel der aus der Abwasserreinigung stammenden Klärschlämme wurde 2012 in Zementwerken verbrannt, womit rund 30 kg Quecksilber in die Drehrohröfen der Werke gelangten.

Die Zementherstellung ist ein Hochtemperaturprozess, bei dem Quecksilber einen wesentlichen Teil der Schwermetallemissionen ausmacht, wobei das Element nicht nur über Abfälle, sondern auch die konventionellen Brennstoffe und Rohmaterialien in das System gelangt. Das in den Roh- und Brennstoffen enthaltene Quecksilber gelangt bei der Klinkerherstellung aufgrund der hohen Temperaturen in das Rohgas und den darin enthaltenen Staub. Über einen Entstaubungsprozess wird dieser Staub dann aus dem Rohgas abgeschieden und anschliessend in der Zementmühle dem Klinker beige-mischt. So gelangt das anfänglich zugeführte Quecksilber in Roh- und Brennstoffen zu einem grösseren Teil in den Zement. Der Rest gelangt über die Abluft der Werke in die Umwelt. Es lässt sich schätzen, dass im Jahr 2012 den Schweizer Zementöfen ca. 255 kg Quecksilber zugeführt wurden. Dabei wurden 75 % (185 kg) des Quecksilbers über Rohstoffe und 25 % (70 kg) über Brennstoffe wie Klärschlamm und Kohle zugeführt. Die mit der Abluft der Schweizer Zementwerke emittierte Quecksilbermenge betrug im Jahr 2012 im Durchschnitt 0.03 g pro Tonne produziertem Zement [17]. Damit kann errechnet werden, dass 2012 von den zugeführten 255 kg Quecksilber rund 155 kg im Zement endeten und 100 kg in die Umwelt emittiert wurden.

3.3.6 Abfallverbrennung in KVA

Im Jahr 2012 wurden in Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) 3,8 Mio. Tonnen Abfälle verbrannt. Diese Abfälle setzten sich im Durchschnitt aus 80 % Siedlungsabfällen, 12 % Bauabfällen, 5 % Klärschlamm sowie 4 % anderen Abfällen zusammen [24]. Basierend auf Untersuchungen von Taverna & Morf [25] und Taverna & Meister [26] über die Massenflüsse der «Outputgüter» der KVA (Schlacke, Filterasche, Produkte der Rauchgasreinigung, Abluft) und der Hg-Gehalte dieser Güter kann angenommen werden, dass im Jahr 2012 in KVA entsorgte Abfälle im Durchschnitt rund 0,3 g Quecksilber pro Tonne enthielten und in diesem Jahr den Schweizer KVA somit rund 1150 kg Quecksilber zugeführt wurden. Etwa 20 %

dieser Menge sind auf RESH, Klärschlamm und Fehlwürfe von Batterien und Sparlampen zurückzuführen. Weitere Schätzungen zur Herkunft des den Anlagen zugeführten Quecksilbers sind unsicher, es wird angenommen, dass Hg-haltige Formteile aus Polyurethan wichtige Hg-Träger waren.

Die Mehrheit der 2012 in Betrieb stehenden Schweizer KVA war mit einem Elektrofilter zur Abscheidung der Flugasche sowie einer nachgeschalteten nassen Rauchgasreinigung ausgerüstet. Der grösste Teil des mit Abfällen in KVA eingebrachten Quecksilbers wird bei der Rauchgaswäsche aus dem Rohgas abgeschieden und über Ausfällung aus dem sauren Wäscherwasser entfernt [24, 25]. Derart fielen im Jahr 2012 Hydroxidschlämme bei rund zwei Dritteln aller KVA an. In einem weiteren Drittel der Anlagen wurde das saure Wäscherwasser – um es zur Wäsche der Filterasche zu nutzen – durch Ionenaustausch von Quecksilber befreit.

Es wird geschätzt, dass von den 1150 kg den KVA zugeführtem Quecksilber rund 500 kg in Hydroxidschlämmen deponiert wurden. Mit Quecksilber im Umfang von 300 kg beladene Ionenaustauscher sind nicht regenerierbar und es wird davon ausgegangen, dass diese unter Rückgewinnung des Quecksilbers thermisch zersetzt wurden. Die Quecksilbermenge in den abgelagerten Schlacken und Filteraschen kann auf je ca. 50 kg geschätzt werden. Geschätzte weitere 240 kg Quecksilber passierten die Rauchgasreinigung und emittierten mit dem Reingas in die Luft.

3.3.7 Übersicht über den Verbleib

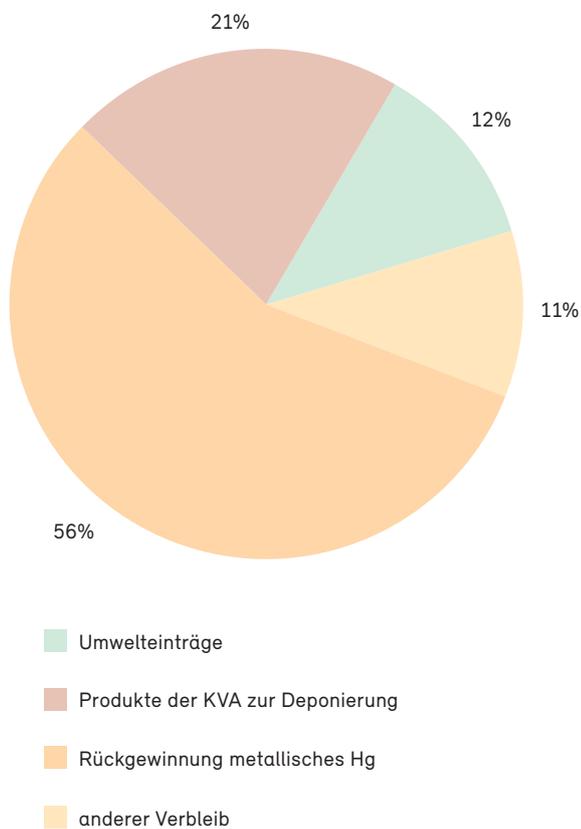
Abbildung 6 fasst die Schätzungen zum Verbleib von Quecksilber in Abfällen für das Jahr 2012 zusammen. Dabei werden die rund 1000 kg Quecksilberabfälle aus der Chlor-Alkali-Industrie, die heute nach der Umstellung vom Amalgam- auf das Membranverfahren nicht mehr entstehen, nicht berücksichtigt. Etwas über die Hälfte (ca. 1500 kg) des in inländischen Abfällen enthaltenen Quecksilbers wurde als Metall zurückgewonnen. Rund ein Fünftel (ca. 570 kg) des Quecksilbers endete in Produkten der Kehrichtverbrennung (Schlacken, Filteraschen und v.a. Hydroxidschlämmen) und wurde deponiert. Knapp über 10 % des entsorgten Quecksilbers (ca. 320 kg) gelangten in die Umwelt. Weitere 10 % (ca. 280 kg) wurden

entweder in Form von Klärschlammaschen oder Behandlungsprodukten der Altlampenaufbereitung deponiert, als Altchemikalien separat gesammelt und entsorgt, in Zement transferiert oder gelangten in RESH zur thermischen Verwertung ins Ausland.

Abbildung 6

Verbleib von Quecksilber in den Entsorgungswegen in der Schweiz

Schätzungen für das Jahr 2012 ohne Berücksichtigung der Prozessabfälle aus der Chlor-Alkali-Industrie.



Quelle: Eigene Schätzungen

4 Umwelteinträge und Vorkommen in der Umwelt

Quecksilber wird in die Luft, in Gewässer und in Böden eingetragen und kann in diesen Umweltkompartimenten entsprechend gemessen werden. In Gewässersedimenten und Böden wird Quecksilber durch Bakterien in Methylquecksilber umgewandelt. Quecksilber reichert sich auch in Biota an, wobei Methylquecksilber besonders stark akkumuliert. Hohe Methylquecksilber-Gehalte finden sich in Organismen des limnischen Kompartiments.

4.1 Luft

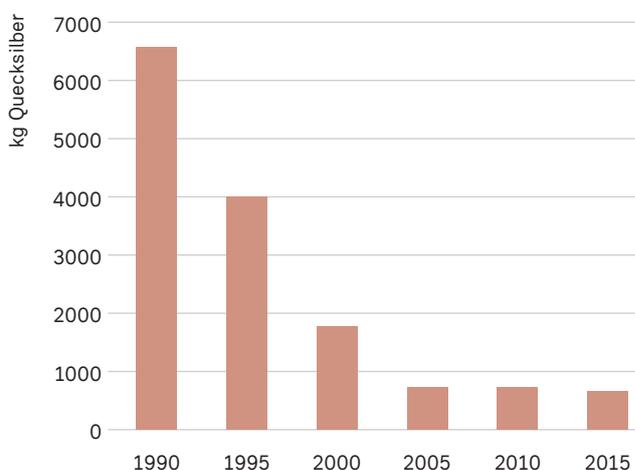
4.1.1 Einträge in die Luft

Die Quecksilbereinträge in die Luft konnten in der Schweiz von ca. 6600 kg im Jahr 1990 bis zum Jahr 2005 um 90 % auf ca. 720 kg gesenkt werden. Der abnehmende Trend hielt seither an, wenn auch in geringerem Ausmass (Abbildung 7): gegenüber dem Jahr 2005 verzeichnete man 2015 um 9 % tiefere Emissionen [17]. Gemäss Erhebungen des Bundesamts für Umwelt [17] wurden in der Schweiz im Jahr 2015 rund 660 kg Quecksilber in die Luft emittiert. Die wichtigsten Emissionsquellen waren dabei die Feuerungen für die Energieerzeugung einschliesslich der Emissionen der KVA, welche die Abwärme zur Energieerzeugung nutzen, mit einem Anteil von 44 % an den Gesamtemissionen. Der Anteil der Feuerungen der Industrie belief sich auf 27 %, Hauptemittenten waren die Zementwerke. Industrielle Prozesse hatten einen Anteil von rund 12 % an den Gesamtemissionen. Die wichtigsten Emittenten dabei waren Stahlwerke und eine Chlor-Alkali-Anlage, die noch nach dem Amalgamverfahren arbeitete. Weitere Quellen waren die Abfallverbrennung, deren Abwärme nicht zur Energieerzeugung genutzt wird, sowie andere Quellen, bei denen es sich hauptsächlich um Gebäudebrände handelte (Abbildung 8).

Abbildung 7

Entwicklung der Luftemissionen von Quecksilber

Entwicklung der Schweizer Luftemissionen von Quecksilber in den Jahren 1990 – 2015 in Kilogramm pro Jahr [17, 27].



Quelle: FOEN [17], MSC-E [27]

4.1.2 Vorkommen in der Luft

Die meisten natürlichen und anthropogenen Emissionsquellen setzen Quecksilber in gasförmiger elementarer Form (GEM, Gaseous Elemental Mercury) frei. In der Luft kommt Quecksilber deshalb hauptsächlich in Form von GEM vor [3]. Neben GEM treten in der Luft auch gasförmig oxidiertes Quecksilber (GOM, Gaseous Oxidized Mercury) und an Partikel gebundenes Quecksilber (PBM, Particle Bound Mercury) in deutlich geringeren Konzentrationen auf. Aufgrund der langen atmosphärischen Lebensdauer von GEM von mehreren Monaten bis zu einem Jahr ist eine Verteilung der Quecksilber-Luftemissionen über die gesamte Erdatmosphäre möglich [3].

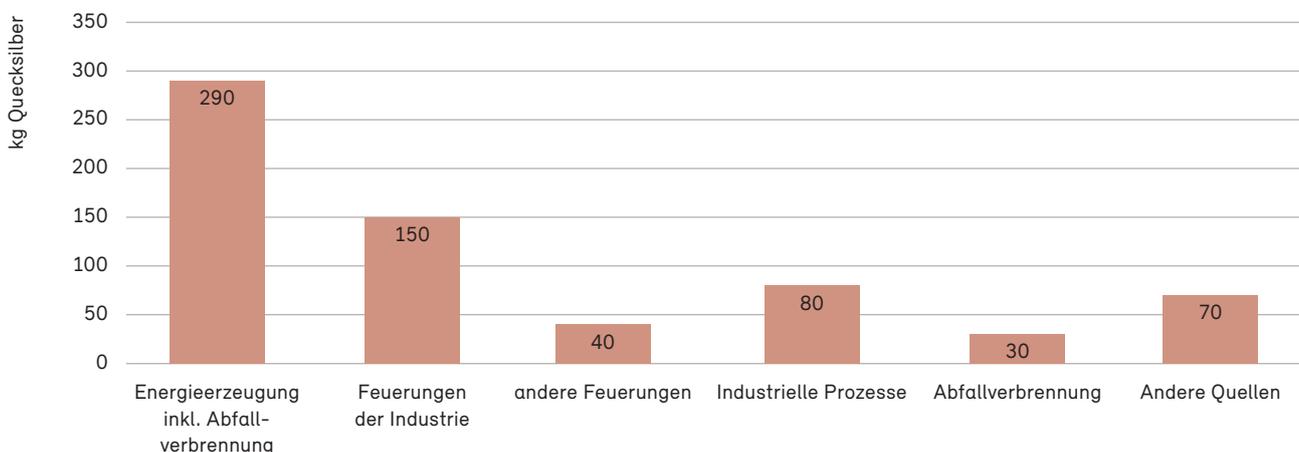
An 13 ruralen Standorten in der nördlichen Hemisphäre des globalen GMOS-Messnetzes (Global Mercury Observation System Network) betragen im Jahr 2014 die Median-Konzentrationen von GEM zwischen 1,2 und 1,8 ng/m³. In der Regel wurden an den Stationen im Winter und Frühling höhere GEM-Gehalte als im Sommer und Herbst registriert. Der GEM-Gehalt an Stationen in der

nördlichen Hemisphäre lag höher als an Stationen in den Tropen und der Südhalbkugel: an je fünf Standorten in tropischen Zonen und der südlichen Hemisphäre betragen im Jahr 2014 die mittleren Jahreskonzentrationen $1,2 \text{ ng/m}^3$ bzw. $1,0 \text{ ng/m}^3$ [28].

Abbildung 8

Quellen von Quecksilberemissionen in die Luft

Art und Grösse der Schweizer Emissionen von Quecksilber in die Luft im Jahr 2015 in Kilogramm pro Jahr [17].

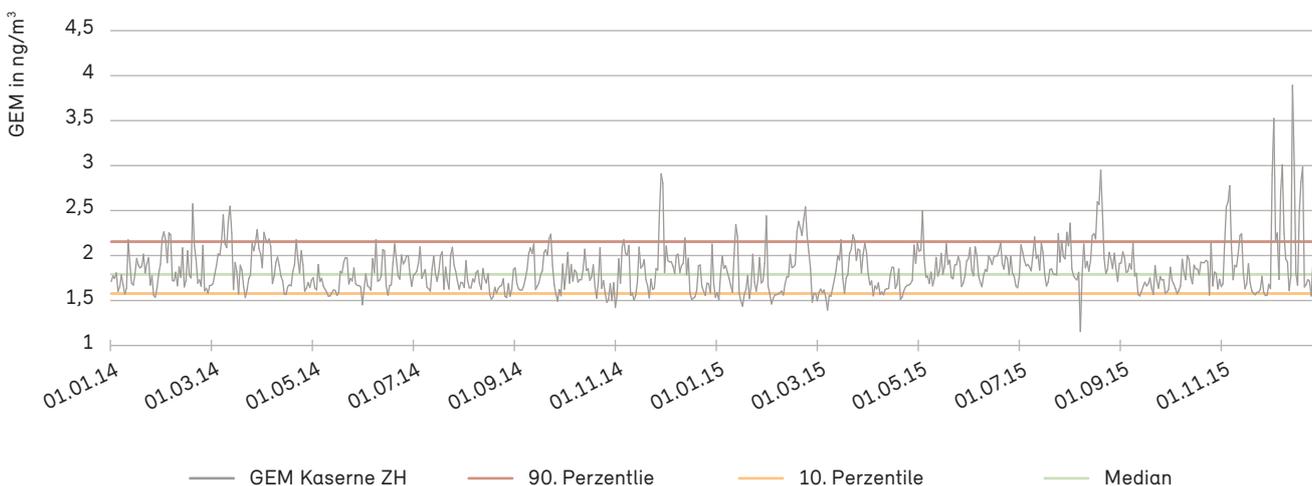


Quelle: FOEN [17]

Abbildung 9

Quecksilbergehalte in der Luft in Zürich

Tägliche Mediane der Konzentrationen von GEM in ng/m^3 von Januar 2014 bis Dezember 2015 in Zürich Kaserne, mit dem Median, sowie dem 10. und 90. Perzentil über den gesamten Messzeitraum. Die Messstation steht mitten in der Stadt Zürich in einem parkähnlichen Hof [30, 31].



Quelle: Denzler [30], EMPA [31]

Vertikale Profile der GEM-Gehalte in Höhen zwischen 500m und 3000m wurden im Jahr 2013 in Messflügen über vier Standorten in Slowenien (Iskraba, Idrija) und Deutschland (Leipzig, Waldhof) bestimmt. Dabei wurden keine vertikalen Gradienten gefunden, GEM-Gehalte an den Standorten variierten zwischen 1,4 und 1,6 ng/m³. Beim Eintritt in die freie Troposphäre sank GEM an allen Standorten auf 1,3 ng/m³ und blieb auch in grösseren Höhen konstant [29]. Umfangreiche Daten zum Vorkommen von GEM in der Schweiz liegen für den urbanen Standort Zürich für den Zeitraum Januar 2014 bis Dezember 2015 vor [30]. In Abbildung 9 sind die täglichen Median-Gehalte in Zürich über die Messperiode dargestellt. Die 10%- und 90%-Perzentile der Tageswerte betragen 1,6 ng/m³ und 2,1 ng/m³ sowie der Jahresmedian 1,8 ng/m³.

Im Rahmen des Europäischen Mess- und Bewertungsprogramms für Luftschadstoffe (European Monitoring and Evaluation Programme, EMEP), ein Programm unter der Genfer Luftreinhaltekonvention, modelliert das «Meteorological Synthesizing Centre-East» (MSC-E) anhand der weltweiten Hg-Emissionen aus natürlichen und anthropogenen Quellen die resultierende Hg-Belastung der Luft in einer Auflösung von 50×50 km². Die für die Schweiz errechneten Hg-Gehalte reichen im Jahr 2014 von 1,2 bis 1,6 ng/m³ und im Jahr 2015 von 1,1 bis 1,4 ng/m³.

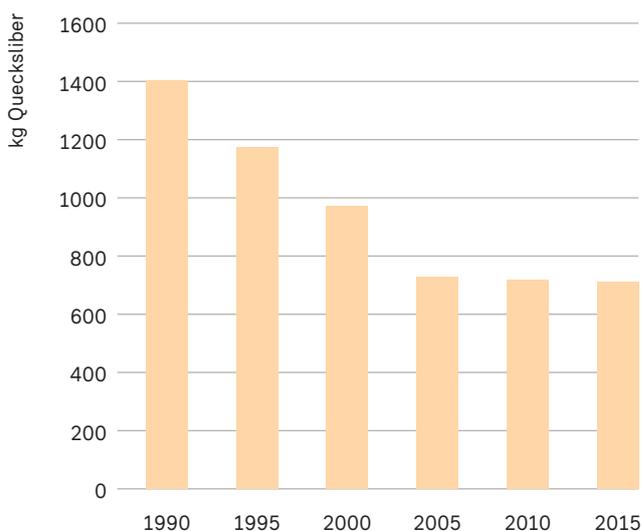
4.1.3 Deposition aus der Luft

Berechnungen der atmosphärischen Einträge mit dem EMEP-Modell ergaben, dass sich die Hg-Deposition aus der Luft auf dem Gebiet der Schweiz von 1400 kg im Jahr 1990 auf heute rund 710 kg verringert haben. Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Quecksilberdeposition im Zeitraum 1990–2015. Von der Deposition im Jahr 2014 stammten 170 kg (25%) aus anthropogenen Quellen in Europa und Zentralasien (EMEP-Staaten); Quellen in Italien und der Schweiz selbst trugen mit je ca. 35% dazu bei. Rund 75% des in der Schweiz abgelagerten Quecksilbers entstammten globalen, natürlichen und historischen Quellen [32].

Abbildung 10

Zeitliche Entwicklung der Deposition von Quecksilber in der Schweiz

Zeitliche Entwicklung der Deposition von Quecksilber aus der Luft im Zeitraum 1990–2015 in Kilogramm pro Jahr [27].



Quelle: MSC-E [27]

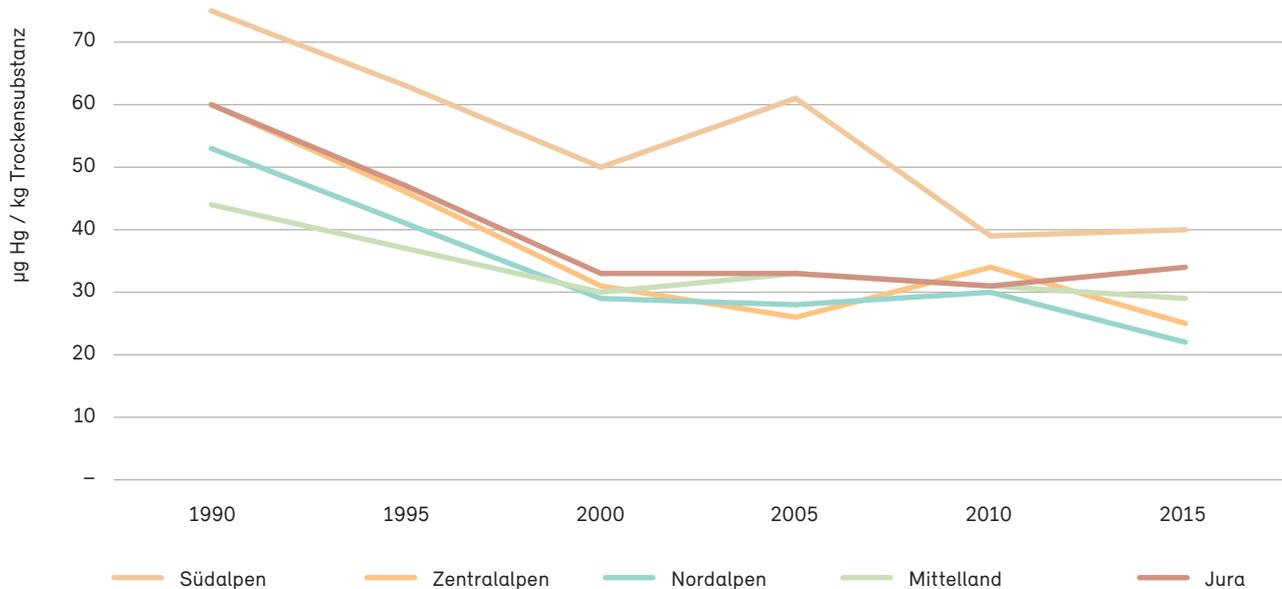
In der Schweiz und weiteren europäischen Ländern werden Quecksilberimmissionen aus der Luft im Rahmen eines Arbeitsprogrammes unter der Genfer Luftreinhaltekonvention zudem über Messungen in Moosen überwacht. Moose werden dabei als Indikator genutzt, da sie keine Wurzeln haben und somit Wasser, Nähr- und Schadstoffe wie Quecksilber ausschliesslich aus der Luft aufnehmen. Abbildung 11 zeigt die Mediane der gemessenen Quecksilberkonzentrationen in Moosen von 1990 bis 2015 für die fünf naturräumlichen Regionen der Schweiz. Die gemessenen Gehalte haben in diesem Zeitraum um bis zu 50% abgenommen und bestätigen das Bild der abnehmenden Deposition von Quecksilber aus der Luft.

Abbildung 11

Quecksilbergehalte von Moosen in der Schweiz:

Mediane der gemessenen Quecksilbergehalte in Moosen in der Schweiz von 1990 bis 2015 zur Überwachung der Immissionen aus der Luft.

Untersucht wurden Moose aus den fünf naturräumlichen Regionen der Schweiz [33, 34].



Quelle: Thöni [33], BAFU [34]

4.2 Gewässer

Quecksilber kommt in Wasser unter vorwiegend oxidierenden Bedingungen hauptsächlich in der zweiwertigen Form (Hg^{2+}) vor. Unter bestimmten Bedingungen kann Hg^{2+} auf biotischem oder abiotischem Weg auch zu volatilem, elementarem Quecksilber (Hg^0) reduziert werden [35]. Weiter wird die Bioverfügbarkeit von Hg^{2+} durch Komplexbildung mit organischen und anorganischen Liganden sowie durch Adsorption an Schwebstoffe kontrolliert. An Partikel adsorbiertes oder in Biomasse inkorporiertes Quecksilber sedimentiert auf dem Gewässergrund. Das so abgelagerte Quecksilber ist ein Reservoir für die Bildung von Methylquecksilber durch sulfatreduzierende Mikroorganismen unter anoxischen Bedingungen [35, 36].

4.2.1 Einträge in Gewässer

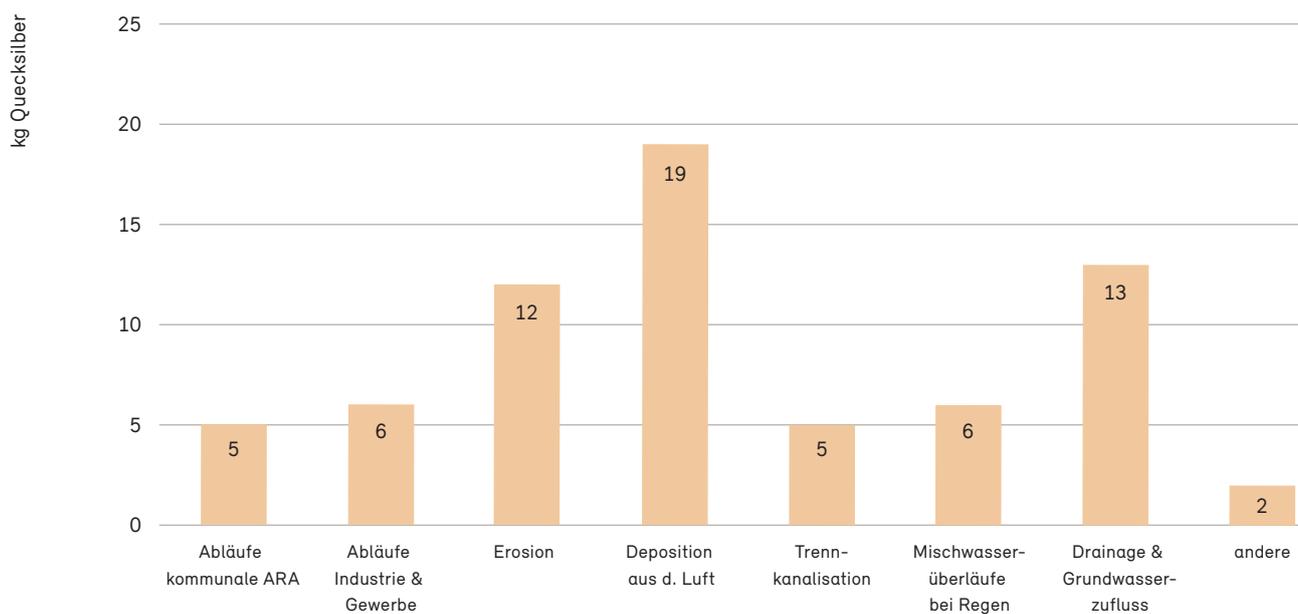
Im Jahr 2015 wurden in der Schweiz schätzungsweise 70 kg Quecksilber in Oberflächengewässer emittiert. Nach einem methodischen Ansatz der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) zur Abschätzung von Stoffeinträgen über unterschiedliche Eintragspfade

in Gewässer kann dabei zwischen Punktquellen und diffusen Quellen unterschieden werden [37, 38]. Abbildung 12 zeigt die jeweiligen Quellen und die abgeschätzten Quecksilbereinträge in Schweizer Oberflächengewässer im Jahr 2015. Rund 15 % der Emissionen entfielen auf Punktquellen und 85 % auf diffuse Quellen. Punktquellen umfassen Quecksilbereinträge aus kommunalen ARA und Direkteinträge der Industrie und des Gewerbes. Diffuse Hg-Quellen waren hauptsächlich die Deposition aus der Luft (für stehende Gewässer), Quellwasserzuflüsse sowie die Erosion von Böden. Weitere diffuse Quellen waren Einleitungen aus Regenwasserkanalisationen des Trennsystems sowie von ungeklärtem Mischwasser bei starken Regenereignissen zur Entlastung von Kläranlagen. Andere diffuse Einträge wie die Abschwemmung von Düngern aus der Landwirtschaft sowie Einträge aus nicht an die kommunale Kanalisation angeschlossenen Haushalten waren von untergeordneter Bedeutung.

Abbildung 12

Geschätzte Quecksilbereinträge in Schweizer Gewässer

Geschätzte Quecksilbereinträge aus verschiedenen Quellen in Schweizer Gewässer im Jahr 2015 in Kilogramm pro Jahr. «Andere» diffuse Quellen umfassen die Abschwemmung von Düngern aus der Landwirtschaft sowie Einträge aus Haushalten, die nicht an die kommunale Kanalisation angeschlossen sind.



Quelle: Eigene Schätzungen

4.2.2 Vorkommen im Grundwasser

Im Rahmen der «Nationalen Grundwasserbeobachtung» (NAQUA) wird an rund 600 Messstellen der Zustand und die Entwicklung der Schweizer Grundwasserressourcen erfasst. Quecksilber war im Jahr 2006 an 50 Messstellen im Messprogramm. Dabei liess sich in keiner Probe Quecksilber quantifizieren. Die Bestimmungsgrenze lag bei diesen Messungen bei 500 ng/L [39]. Desgleichen war Quecksilber im Kanton Aargau in 25 Trinkwasserfassungen in der Nähe von Deponien und Altlasten mit einer Bestimmungsgrenze von 100 ng/L nie messbar [40]. Bei der Untersuchung von Quell- und Grundwässern, die von der Stadt Zürich als Trinkwasserquellen genutzt werden, wurde in keiner Probe eine Quecksilberkonzentration über der Bestimmungsgrenze von 9 ng/L gemessen [41, 42]. Auch bei Analysen von Grundwasser unter quecksilberbelasteten Böden im Südwesten der Schweiz lag Quecksilber immer unterhalb der Bestimmungsgrenze von 10 ng/L [43, 44].

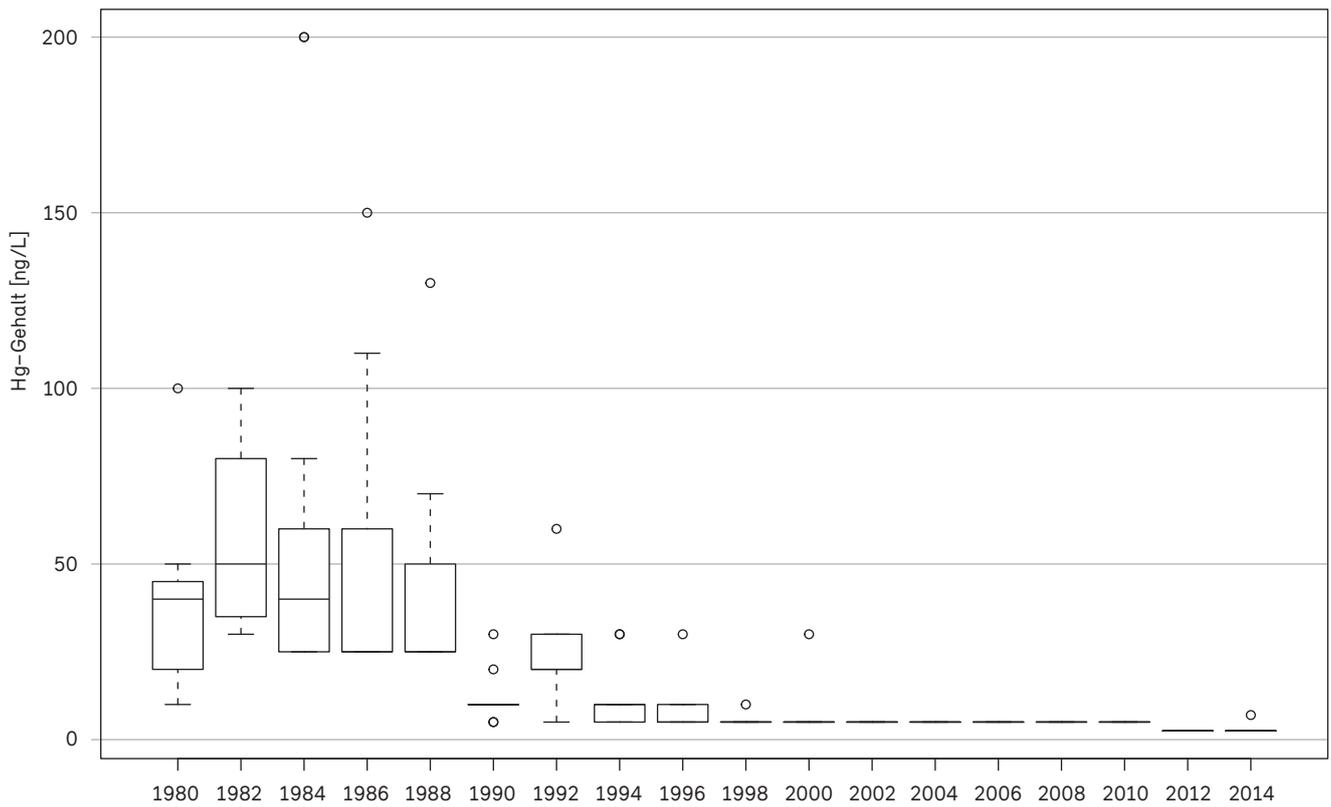
4.2.3 Vorkommen in Oberflächengewässern

Über die Konzentration von Quecksilber im Wasser des Rheins bei Basel berichtet die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR) schon seit längerer Zeit. Abbildung 13 zeigt die gemessenen Konzentrationen von Quecksilber für den Zeitraum von 1980 bis 2014. Abbildung 14 zeigt zudem den Anteil der Proben des jeweiligen Jahres, deren Quecksilberkonzentration über der Bestimmungsgrenze lag. Zwischen 1980 und 1990 lagen die Gesamtgehalte an Quecksilber (gelöst und partikulär gebunden) in den gemessenen Wasserproben zwischen 20 und 100 ng/L, wobei vereinzelt auch höhere Konzentrationen gemessen wurden. Ab 1990 hat die Konzentration von Quecksilber im Wasser des Rheins bei Basel stark abgenommen und seit dem Jahr 2000 werden nur noch vereinzelt Quecksilberkonzentrationen über der Bestimmungsgrenze von 5 ng/L (ab 2012), bzw. 10 ng/L (1996 – 2011) gemessen.

Abbildung 13

Quecksilbergehalte im Wasser des Rheins bei Basel

Konzentrationen in ng Hg/L im Wasser des Rheins bei Basel für den Zeitraum von 1980 bis 2014 [38].

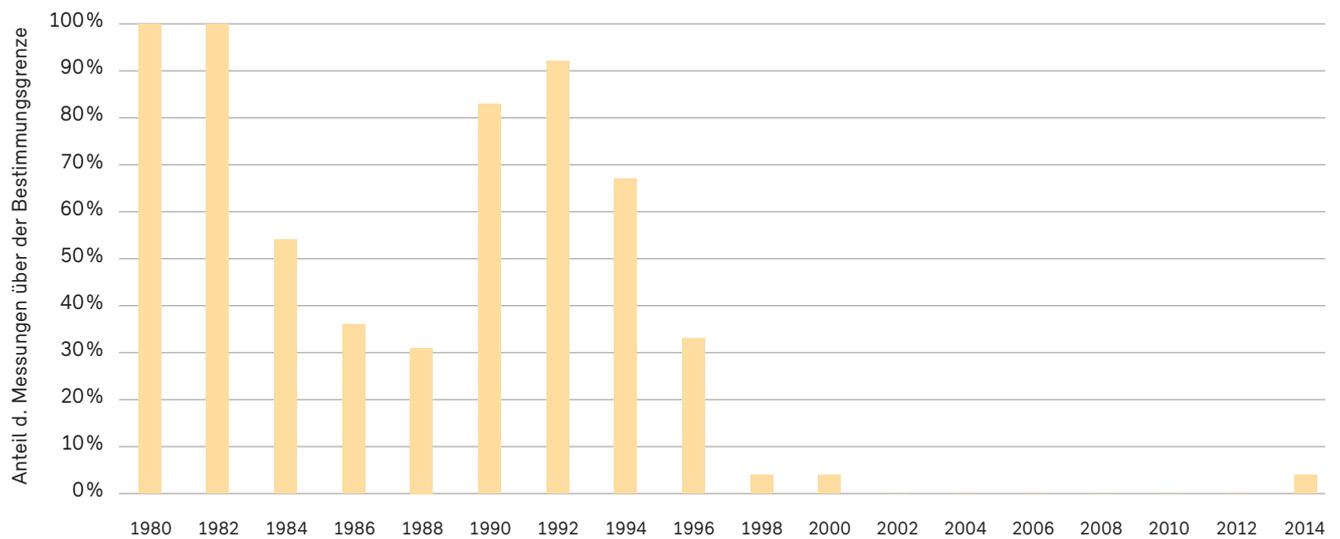


Quelle: IKSR [38]

Abbildung 14

Anteil der Quecksilbermessungen im Rhein über der Bestimmungsgrenze

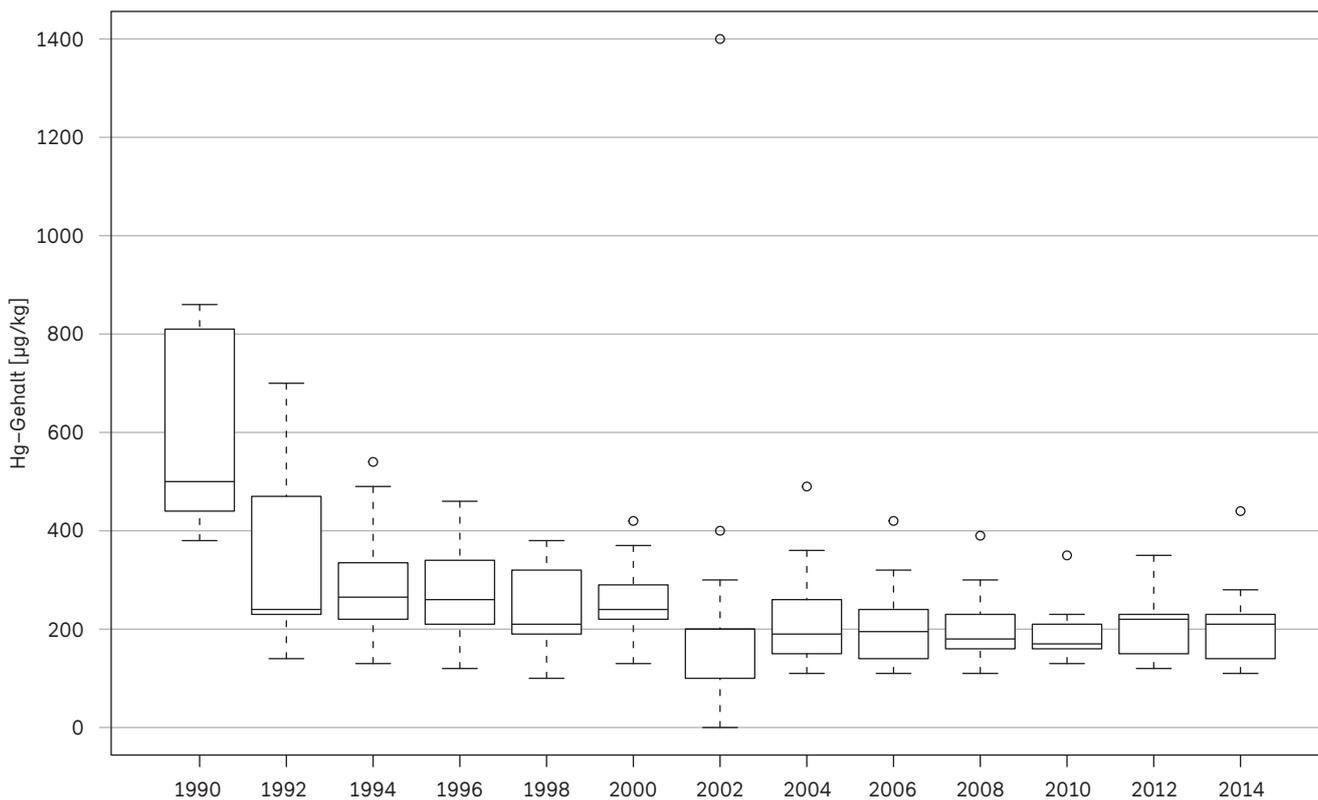
Anteil der Messungen der Quecksilberkonzentrationen im Wasser des Rheins bei Basel, welche über der Bestimmungsgrenze lagen [38].



Quelle: IKRS [38]

Abbildung 15
Quecksilbergehalte der Schwebstoffe im Rhein bei Basel

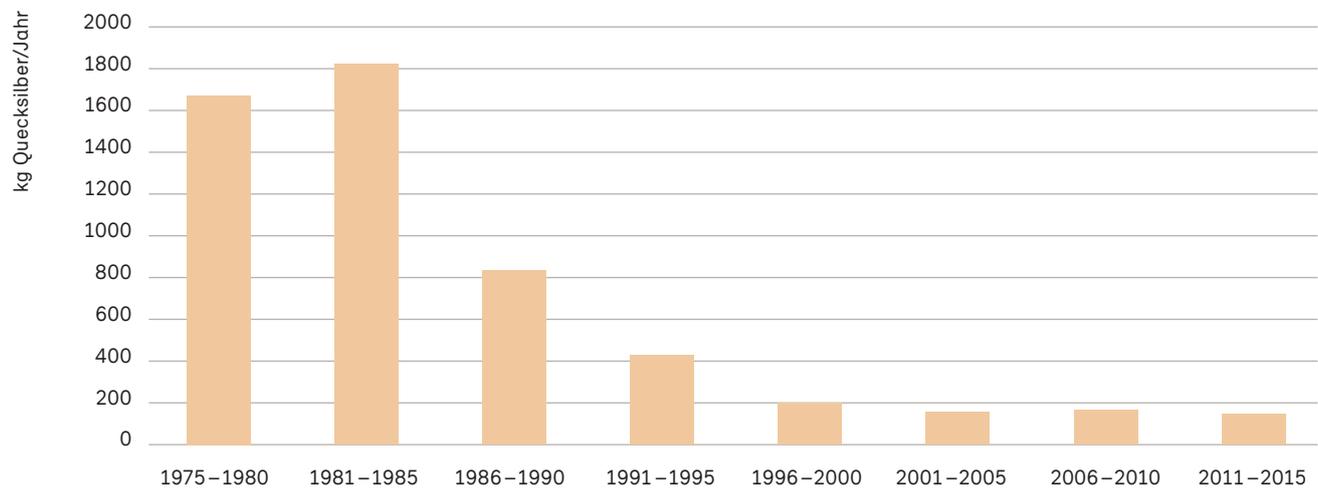
Konzentrationen in $\mu\text{g Hg/kg}$ in Schwebstoffen im Rhein bei Basel für den Zeitraum von 1990 bis 2014 [38].



Quelle: IKSR [38]

Abbildung 16
Quecksilberfrachten im Rhein bei Basel

Jährliche Quecksilberfrachten im Rhein bei Basel in den Jahren 1975–2015 in Kilogramm pro Jahr geschätzt mit Daten der IKSR [38].



Quelle: IKSR [38]

Neben der Quecksilberkonzentration im Wasser wird im Rheinwasser bei Basel auch der Quecksilbergehalt der Schwebstoffe bestimmt. Abbildung 15 zeigt die gemessenen Konzentrationen für den Zeitraum 1990 bis 2014. Analog zu den Wasserproben kann auch in den Schwebstoffen im Rhein bei Basel eine Abnahme verzeichnet werden.

Bis nach Basel entwässert der Rhein eine Fläche von rund 36 500 km² [45], wovon das Einzugsgebiet unterhalb der Seen eine Fläche von 9500 km² mit über 3 Mio. Einwohnern umfasst [46]. Basierend auf den mittleren Jahresabflüssen und den Jahresmittelwerten für die Gesamtkonzentration von Quecksilber an den Standorten Village-Neuf (1975–1994) und Weil am Rhein (1995–2015) kann die jährliche Quecksilberfracht im Rhein bei Basel berechnet werden³. Die Resultate dieser Rechnung sind in Abbildung 16 dargestellt und es zeigt sich, dass die Quecksilberfrachten zwischen 1975 und 1995 stark abgenommen haben. Hari & Zobrist [47] konnten eine solche signifikante Abnahme der Quecksilberflüsse ebenfalls für die Rhone bei Porte-du-Scex für den Zeitraum 1976–1998 nachweisen.

Die Quecksilberkonzentrationen in Schweizer Oberflächengewässern werden ferner von verschiedenen Zweckverbänden und kantonalen Gewässerschutzfachstellen gemessen: So wurden im Bodensee im Jahr 2005 Gesamtkonzentrationen von Quecksilber zwischen 1,1 und 1,6 ng/L bestimmt. In vier Bodenseezuflüssen (Alpenrhein, Alter Rhein, Goldach, Steinach) betragen die Gesamtkonzentrationen von Quecksilber zwischen 1,5 und 9,5 ng/L [48]. In weiteren Stichproben von Fließgewässern im Kanton Bern und der Grossregion Basel betragen die gelösten Quecksilbergehalte immer weniger als 10 ng/L [49, 50].

4.2.4 Vorkommen in Gewässersedimenten

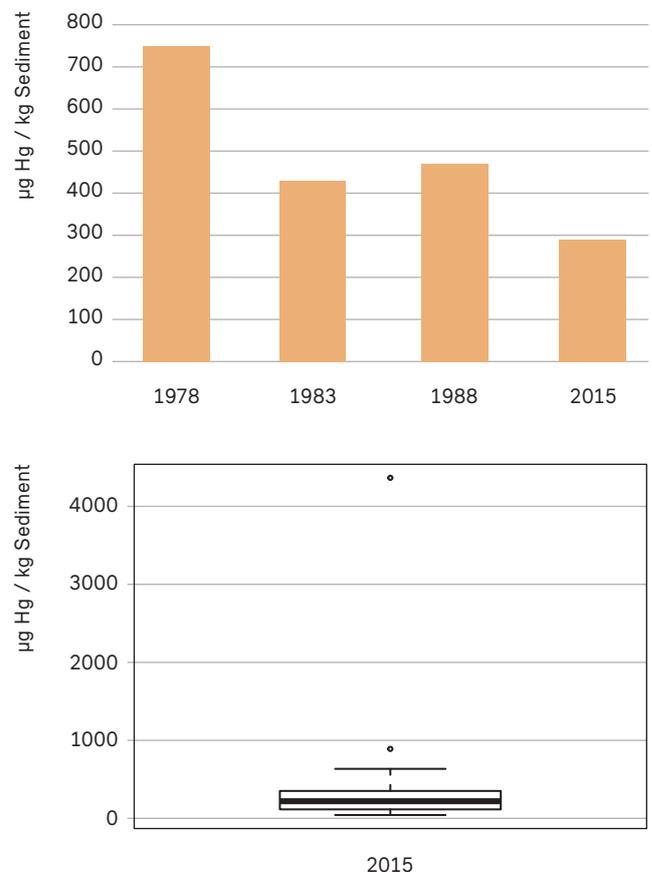
Über die letzten Jahrzehnte wurden die Quecksilbergehalte von Schweizer Gewässersedimenten von verschiedenen Organisationen und kantonalen Gewässerschutzfachstellen erhoben. Abbildung 17 zeigt die

mittleren Quecksilbergehalte in Sedimentproben des Genfersees aus mehreren Erhebungen [51, 52]. Im Vergleich zu 1978 haben die Quecksilbergehalte der Sedimente in jüngsten Erhebungen deutlich abgenommen, wobei vereinzelt Ausreisser nach oben festgestellt wurden. Auch Untersuchungen im Bieler-, Zürich- und Langensee zeigen, dass die Quecksilbergehalte in rezenten Seesedimenten deutlich abgenommen haben [53–55].

Abbildung 17

Quecksilbergehalt in Sedimentproben des Genfersees

Mittlerer Quecksilbergehalt in Sedimentproben des Genfersees aus mehreren Messkampagnen in µg/kg. In den Kampagnen wurden Sedimente an 80–200 Standorten im Genfersee beprobt. Die Abbildung unten zeigt die Spannweite der gemessenen Hg-Gehalte im Jahr 2015 [51, 52].



Quelle: Loizeau et al. [51], Arbouille et al. [52]

³ Für die Jahre, bei welchen die Konzentrationen von Quecksilber jeweils unter der Bestimmungsgrenze lagen, wurde die Konzentration von Quecksilber im Wasser approximativ aus den mittleren Schwebstoffgehalten, deren Hg-Gehalten und einem Schwebstoff-Wasser-Verteilungskoeffizienten von 100 000 L/kg nach EC [104] abgeschätzt.

Im Kanton Zürich werden seit dem Jahr 1999 Sedimente der bedeutendsten Fließgewässer auf Schwermetalle untersucht. Im Falle von Quecksilber liegen für 52 Standorte Daten sowohl für die Jahre 1999 – 2002 als auch für die Jahre 2004 – 2011 vor. Danach hat die Quecksilberbelastung an rund 80 % der Standorte durchschnittlich um 15 % abgenommen [56]. Berücksichtigt man die Daten seit dem Jahr 2008 und jeweils den jüngst an einem Standort gemessenen Gehalt variieren die Quecksilbergehalte von Sedimenten an 130 Standorten in Zürcher Fließgewässern zwischen 40 und 1360 µg/kg mit häufigen Gehalten zwischen 70 und 200 µg/kg (10 % – 90 %-Perzentile). Häufige Gehalte an 62 Standorten in von Abwässern unbeeinflussten Gewässern betragen 60 – 200 µg/kg; an 36 Standorten mit einem Abwasseranteil von 30 % und mehr lagen sie mit 80 – 220 µg/kg ähnlich tief [57].

Gascon Diez et al. [58] untersuchten Sedimentproben und sedimentierende Partikel im Genfersee sowohl auf ihre Gehalte an Gesamtquecksilber wie an Methylquecksilber. Dabei wurden in Sedimentproben Gehalte an Gesamtquecksilber zwischen 174 und 270 µg/kg gemessen. In den Proben von sedimentierenden Partikeln betragen die Konzentrationen von Gesamtquecksilber zwischen 73 und 257 µg/kg. Die Konzentrationen an Methylquecksilber in den Sedimenten betragen 0,3 – 1,7 µg/kg und 0,6 – 11,4 µg/kg in den Proben von sedimentierenden Partikeln.

4.3 Boden

Quecksilber kommt in Böden hauptsächlich in oxidierter Form vor. Zweiwertiges Hg (Hg^{2+}) bildet mit im Boden in fester, gelöster oder in suspendierter Form vorliegender organischer Substanz (wie Humin- und Fulvinsäuren) starke Komplexe [59 – 61]. Eine Reduktion von Hg^{2+} zu volatil, elementarem Hg (Hg^0) kann biotisch oder abiotisch erfolgen [59]. Es werden Verflüchtigungsraten zwischen 0,03 % und 1,6 % bezogen auf den Gesamt-Hg-Gehalt des Bodens angegeben [62]. Weiter kann Quecksilber in Böden durch Bakterien in Methylquecksilber umgewandelt werden. Um 0,01 – 3 % des Gesamt-Hg in Böden liegen in Form von Methylquecksilber vor [59, 63]. Sauerstoffarme (anaerobe) Bedingungen verursacht durch eine hohe Bodenfeuchtigkeit und leichte

Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff begünstigen die Bildung von Methylquecksilber, eine Demethylierung geschieht unter aeroben Bedingungen [63].

Die «Nationale Bodenbeobachtung» (NABO) betreibt seit Mitte der 1980er-Jahre ein Messnetz mit rund 100 Dauerbeobachtungsstandorten, die in Abständen von fünf Jahren beprobt und auf verschiedenste Parameter untersucht werden. Unter anderem werden dabei routinemässig auch Quecksilbergehalte gemessen. Auf 50 % der Beobachtungsstandorte erfolgt eine intensive landwirtschaftliche Nutzung, 20 % werden extensiv genutzt. Ungefähr 30 % der Standorte befinden sich auf Waldgebiet. Weiter ergänzen Daten aus kantonalen Messnetzen die nationale Erhebung. Die Kantone sorgen zudem in jenen Gebieten für eine Überwachung der Böden, wo feststeht oder zu erwarten ist, dass die Belastung des Bodens die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt.

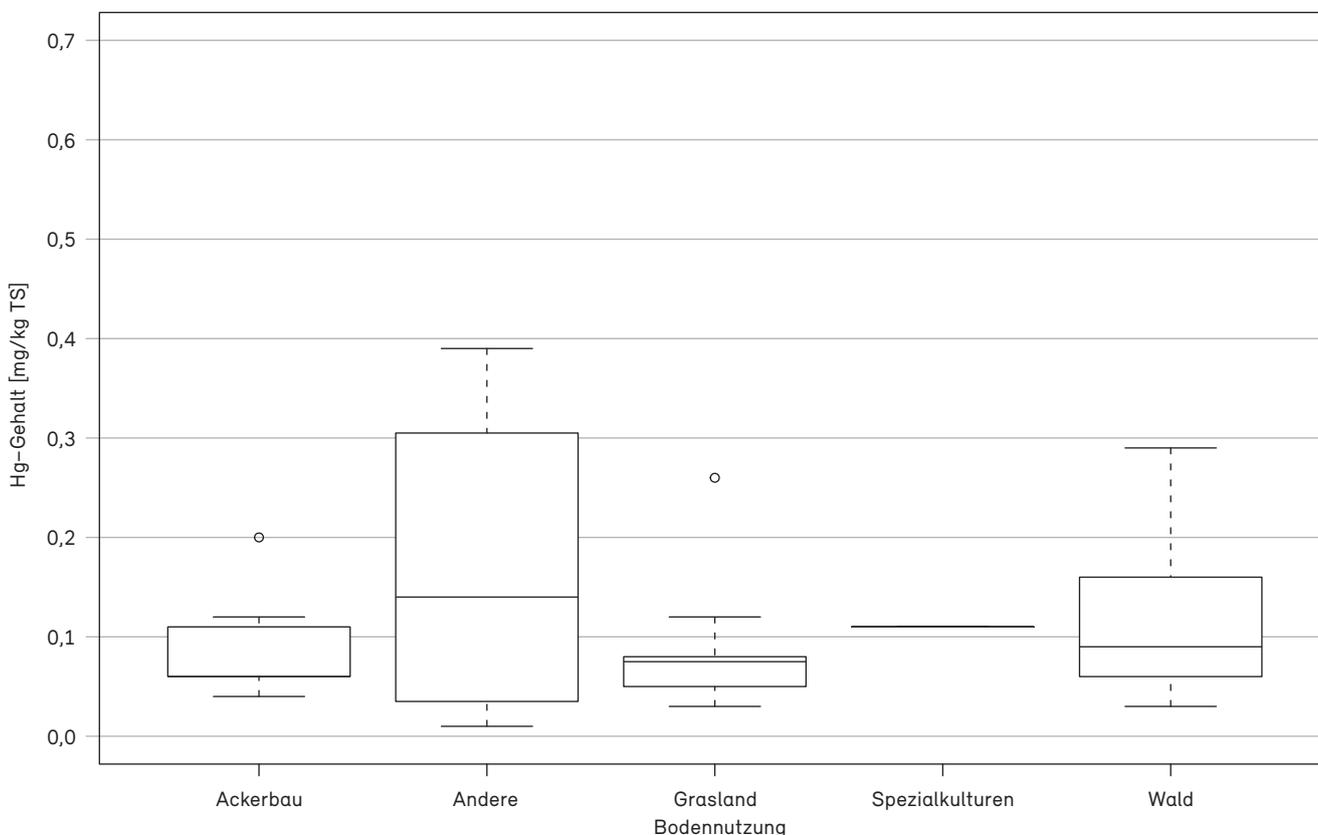
Abbildung 18 zeigt die in der fünften NABO-Erhebung zwischen 2005 und 2009 in einer Bodentiefe von 0 – 20 cm gemessenen Quecksilbergehalte aufgeschlüsselt nach der jeweiligen Nutzungsart der Böden. Es wurden häufige Hg-Gehalte (10 %- und 90 %-Perzentile) von 50 – 180 µg/kg ermittelt. Der Median belief sich auf 80 µg Hg/kg, die Extremwerte betragen 10 und 390 µg Hg/kg [64]. Daten aus Messnetzen der Kantone zeigen ein ähnliches Bild: Im Kanton Zürich beispielsweise wurden im selben Zeitraum in Böden an 105 Standorten oft Quecksilbergehalte von 40 – 105 µg/kg gemessen, wobei die Extremwerte 20 und 360 µg/kg betragen [65]. Bei zusätzlichen Messungen von Bodenproben aus einer Tiefe von 40 – 60 cm wurden an 14 Standorten häufig Hg-Gehalte von 15 – 90 µg/kg festgestellt. Sie lagen damit in einer ähnlicher Höhe wie jene von 20 – 70 µg/kg, die im Zeitraum 2000 – 2004 an 320 Standorten bestimmt wurden.

Eine Auswertung der umfangreich vorliegenden Resultate von Bodenanalysen, die nationale und kantonale Stellen zwischen 1990 und 1996 durchführten, wurde von Keller & Desaulles [105] vorgenommen. Nach Untersuchungstypen entfielen rund 45 % auf Bodenbeobachtungs- und Rasternetze, je 15 % auf Verdachtsflächen- und Emissionenuntersuchungen und 10 % auf Untersuchungen von strassennahen Böden. Median und 90 %-Perzentilwert der über 7000 Messwerte betragen 90 µg Hg/kg bzw.

Abbildung 18

Quecksilbergehalte in Böden

Quecksilberkonzentrationen in Böden verschiedener Nutzungsarten, die in der fünften NABO-Erhebung gemessen wurden, in mg Hg pro kg Boden bezogen auf das Trockengewicht. «Andere» Nutzungsarten umfassen Schutzstandorte sowie Beobachtungsstandorte in Parkanlagen. In Böden von Spezialkulturen lagen die Quecksilberkonzentrationen mit der Ausnahme von einer einzelnen Messung unter der Nachweisgrenze [64].



Quelle: Gubler et al. [64]

260 µg Hg/kg. Rund 3 % aller Werte lagen über 500 µg/kg. Neben Böden in Krematoriumsnähe wurden in Gärten und Parkanlagen sowie an Siedlungsstandorten relativ hohe Hg-Werte in den Böden gemessen. Auch neuere Daten zeigen, dass Gartenböden in urbanen Gebieten auffällig viel Quecksilber enthalten: In 100 Proben an 80 Standorten in einer Stadt im Schweizer Mittelland wurden oft Hg-Gehalte von 90–3600 µg/kg gefunden [106].

Rieder et al. [66] untersuchten rund 30 unbelastete Schweizer Waldböden auf das Vorkommen von Methylquecksilber und fanden, dass 0,2–2,4% des Gesamt-Quecksilbers als Methylquecksilber vorlagen; sie massen Methylquecksilbergehalte von <1–3 µg/kg.

In mit Quecksilber belasteten Böden in Siedlungsgebieten und auf Agrarflächen lagen die Methylquecksilbergehalte zwischen 1 und 8 µg/kg und betrug 0,01–0,8% des gesamten Quecksilbers [44].

4.4 Biota

Quecksilber reichert sich in Biota an, wobei organisches Quecksilber in der Form von Methylquecksilber besonders stark akkumuliert wird. Quecksilber und Methylquecksilber werden in höheren Konzentrationen hauptsächlich in Organismen des limnischen Kompartimentes gefunden, kommen aber auch in Biota des terrestrischen Kom-

partimentes vor. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über den aktuellen Wissensstand zu Quecksilberkonzentrationen in Biota in der Schweiz.

4.4.1 Biota des terrestrischen Kompartiments

Terrestrische Pflanzen können Quecksilber über die Blätter aus der Luft oder über die Wurzeln aus dem Boden aufnehmen [67 – 69]. Die Quecksilbergehalte in Wurzeln korrelieren häufig statistisch signifikant mit den Quecksilbergehalten in Böden. Für andere Pflanzenteile konnte jedoch keine Korrelation des Quecksilbergehalts mit demjenigen des Bodens nachgewiesen werden. Dies deutet darauf hin, dass die Wurzeln als Barriere für die Aufnahme von Quecksilber in andere Pflanzenteile wirken [70, 59, 68]. Die in oberirdischen Pflanzenteilen gefundenen Quecksilbergehalte sind somit in hohem Masse von der Luftbelastung beeinflusst [59, 69]. Basierend auf Versuchen von De Temmerman et al. [67] zum Einfluss der Quecksilbergehalte in der Luft auf Quecksilbergehalte in exponierten Graskulturen (*Lolium perenne*) kann von einem Hintergrundgehalt im Gras von ca. 15 µg/kg Trockengewicht ausgegangen werden, der sich bei einer Luftbelastung von 1 – 2 ng Hg/m³ einstellt. Bei einem Was-

seranteil von 80 – 90 % entspricht dies 1,5 – 3 µg Hg/kg Feuchtgewicht. In einer Folgestudie mit Blattgemüse leiteten De Temmerman und Mitarbeiter Hintergrundgehalte von 0,6 – 2,2 µg Hg/kg (bezogen auf das Frischgewicht) ab [71]. Die Resultate einer Erhebung zu Hintergrundbelastungen von Gemüse- und Getreidepflanzen aus der Schweiz sind in Abbildung 19 dargestellt [72]. Bei dieser Erhebung wurden in keinen der untersuchten Proben von Lauch, Weisskohl, Randen, Kartoffeln und Weizen Quecksilberkonzentrationen über der Bestimmungsgrenze von 0,5, beziehungsweise 1 µg/kg gefunden. Bei den Proben von Endivien, Karotten und Kopfsalat konnte Quecksilber in einer von fünf Proben, und bei Knollensellerie in zwei von fünf Proben quantifiziert werden. In drei Proben von Steinpilzen wurden Quecksilbergehalte zwischen 190 und 380 µg/kg und Methylquecksilbergehalte von 3 – 8 µg/kg bestimmt.

In einjährigen Fichtennadeln aus einem urbanen Gebiet in der Nordostschweiz fanden Wyttenbach et al. [73] im Jahr 1985 Hg-Gehalte von 18 – 64 µg/kg (Mittelwert: 31 µg/kg). Aktuellere Daten zur Quecksilberbelastung von Laub- und Nadelbäumen in der Schweiz sind nicht

Abbildung 19

Hintergrundbelastung von Gemüse- und Getreidepflanzen in der Schweiz

Gemessene Hintergrundkonzentrationen von Quecksilber von Gemüse- und Getreidepflanzen aus dem Jahr 2016 in der Schweiz in µg/kg Frischgewicht. Für Lauch, Weizen, Weisskohl, Randen und Kartoffeln wurde in keiner Probe eine Quecksilberkonzentration über der Bestimmungsgrenze gefunden [72].

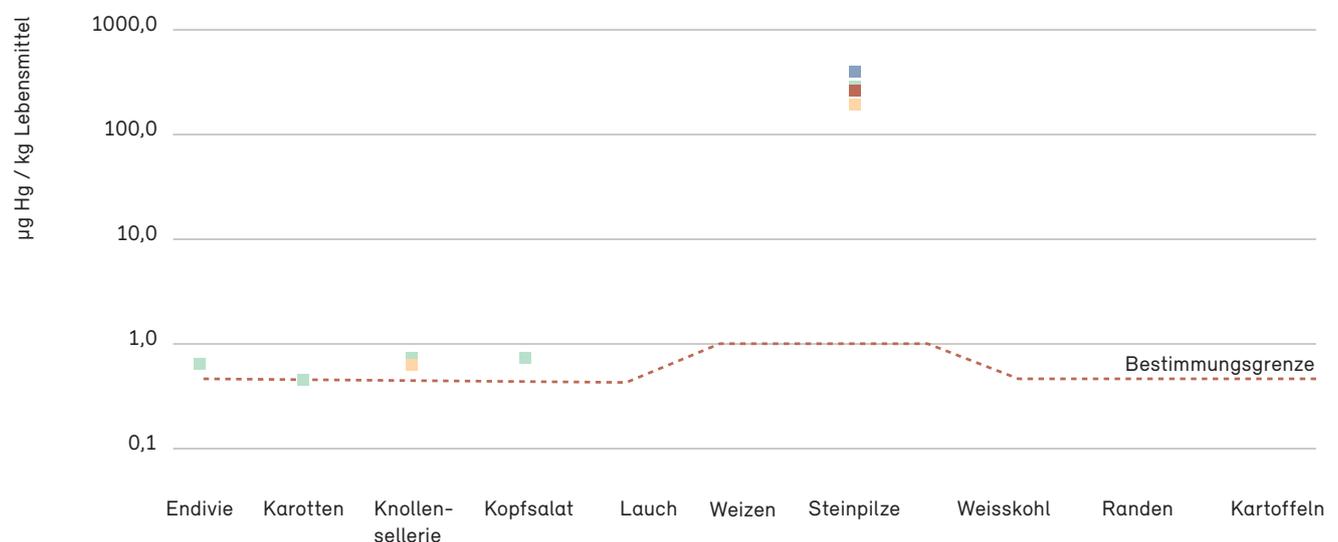
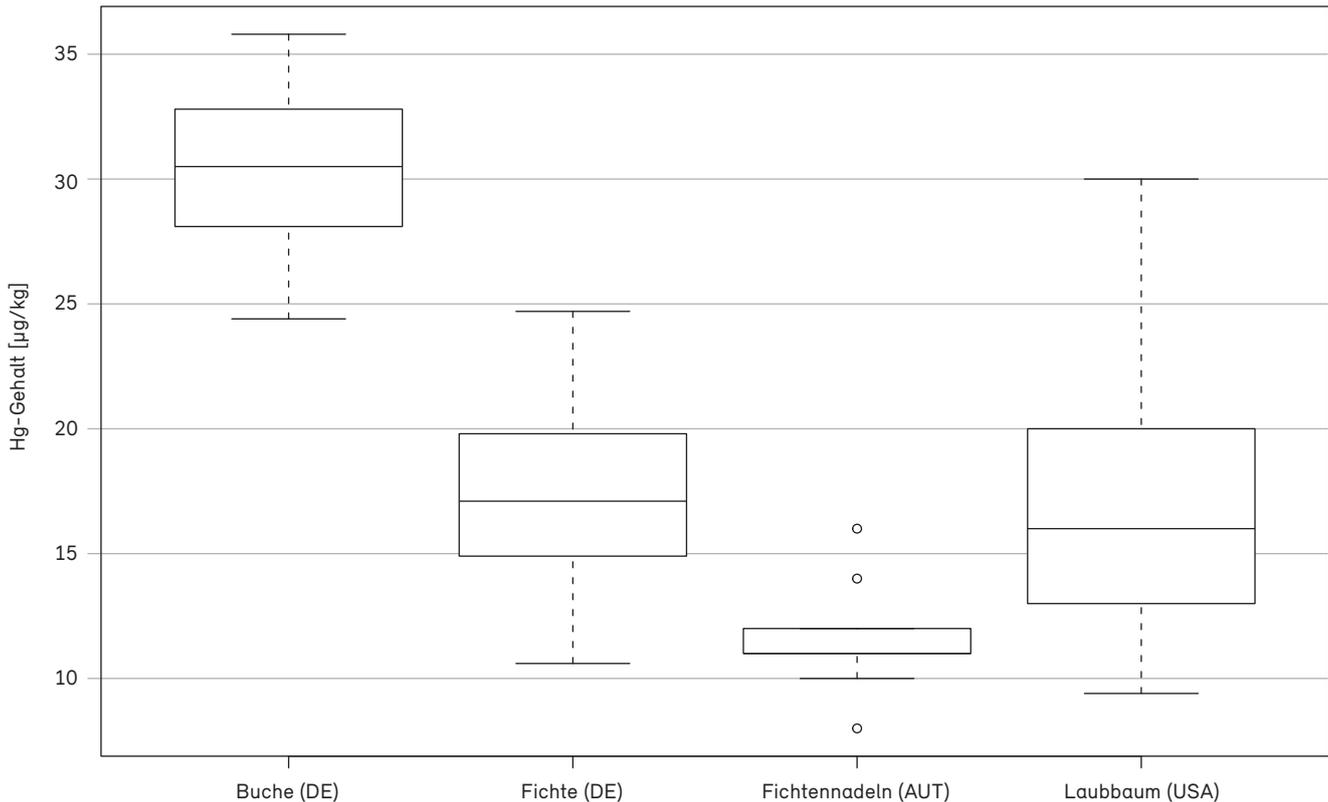


Abbildung 20

Quecksilbergehalte in Laub und Nadeln

Zusammenstellung von repräsentativen Messungen von Quecksilbergehalten in Laub, Zweigen und Nadeln verschiedener Bäume aus Deutschland (2001 – 2010), Österreich (2007) und den Vereinigten Staaten (2012) in $\mu\text{g}/\text{kg}$ bezogen auf das Trockengewicht [69, 74, 75].



Quelle: Schulz et al. [69], Fürst [74], Tabatchnick et al. [75]

verfügbar. Abbildung 20 zeigt eine Zusammenstellung von mittleren Quecksilberkonzentrationen in Fichtennadeln und Buchenlaub aus Deutschland (Zeitraum 2001 – 2010), Fichtennadeln aus Österreich (2007), sowie Blättern verschiedener Laubbäume aus den USA (2012) [69, 74, 75]. Diese Werte können auch für die Schweiz als repräsentativ eingestuft werden.

Bei Tieren des terrestrischen Kompartiments untersuchten Rieder et al. [66] die Anreicherung von Gesamt- und Methylquecksilber durch Regenwürmer in rund 30 unkontaminierten Schweizer Waldböden. Dabei wurden mehrere Gattungen streubewohnender Würmer, im Oberboden lebender Würmer sowie tief-grabender Würmer untersucht. Abbildung 21 fasst die gefundenen mittleren Gehalte an Quecksilber und Methylquecksilber in den verschiedenen Spezies zusammen.

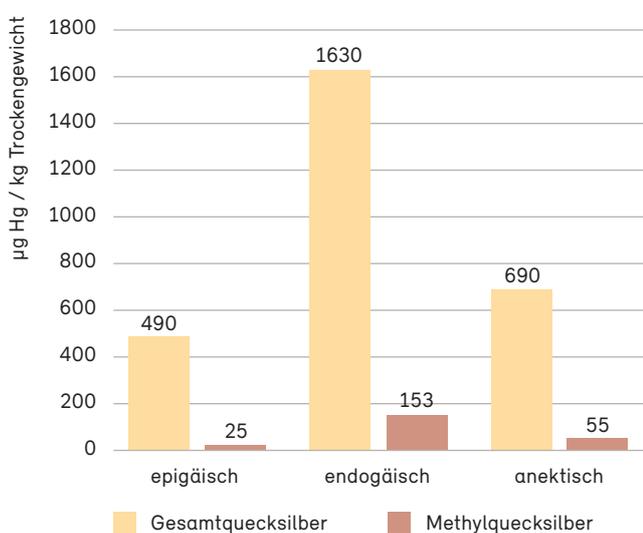
Weitere inländische Daten zur Quecksilberbelastung von Organismen des terrestrischen Kompartiments sind alle älteren Datums und in Tabelle 3 zusammengefasst. Mason & Weber [76] massen im Zeitraum 1983 – 1985 in Nierenproben von Europäischen Iltissen, die sich bevorzugt von Amphibien ernähren, einen hohen mittleren Quecksilbergehalt von $1000\mu\text{g}/\text{kg}$ Frischgewicht. Veluz et al. [77] beprobten im Jahr 1972 die Muskulatur tot aufgefundener Vögel in der Westschweiz aus der Ordnung der Sperlingsvögel und Eulen sowie der Familien der Tauben und Habichtartigen. Der Vergleich mit neueren, hier nicht präsentierten⁴, ausländischen Daten zeigt eine relativ hohe Belastung. Jüngste inländische Daten zur Belastung von Greifvögeln mit Quecksilber liegen für den Zeitraum 2001 – 2002 vor. In Proben aus Lebern und Nieren von sieben, in den Alpen aufgefundenen Steinadlern

4 siehe Tabelle 20 des Begleitberichts.

Abbildung 21

Quecksilbergehalte in Regenwürmern in der Schweiz

Gesamtquecksilber und Methylquecksilber in streubewohnenden (epigäischen), im Oberboden lebenden (endogäischen) und tief grabenden (anektischen) Regenwürmern aus 34 unkontaminierten Waldböden (Gehalte bezogen auf das Trockengewicht. Zur Umrechnung in das Frischgewicht kann näherungsweise ein Faktor von 0,2 verwendet werden) [66].



Quelle: Rieder et al. [66]

Tabelle 3

Gesamtquecksilbergehalte (Mittelwert ± Standardabweichung) in µg/kg Frischgewicht (ww) in verschiedener Matrizen terrestrischer Biota der Schweiz

Spezies	Matrix	Wert	ww	n	Zeitraum	Standort	Ref
8 Spezies aus der Unterordnung der Singvögel	Muskulatur	500 ± 350 100 – 1200	ww	11	1972	Westschweiz	[77]
2 Spezies aus der Familie der Tauben	Muskulatur	360 ± 140 200 – 600	ww	8	1972	vorwiegend Westschweiz	[77]
Fasan (<i>Phasianus colchicus</i>)	Muskulatur	300 ± 100	ww	3	1972	Westschweiz	[77]
	Leber	600 – 800	ww	2	1972	Westschweiz	[77]
Wespenbussard (<i>Pernis apivorus</i>)	Muskulatur	500 ± 100 400 – 600	ww	3	1972	West- und Zentralschweiz	[77]
Sperber (<i>Accipiter nisus</i>)	Muskulatur	2800 ± 3000 200 – 6700	ww	4	1972	Westschweiz	[77]
Mäusebussard (<i>Buteo buteo</i>)	Muskulatur	1130 ± 650 300 – 3000	ww	15	1972	vorwiegend Westschweiz	[77]
Waldkauz (<i>Strix aluco</i>)	Muskulatur	700 ± 100	ww	3	1972	Westschweiz	[77]
Schleiereule (<i>Tyto alba</i>)	Muskulatur	640 ± 220	ww	7	1972	Westschweiz	[77]
	Leber	900	ww	1	1972	Westschweiz	

wurden mittlere Quecksilbergehalte von 24 bzw. 16 µg/kg gemessen [79]. In Anbetracht des Alters der vorliegenden Daten und der Tatsache, dass auch die vorliegenden Daten nur ein lückenhaftes Bild der Quecksilberbelastung von Biota des terrestrischen Kompartimentes bieten, besteht hier ein deutlicher Bedarf nach einer Aktualisierung und Erweiterung des Wissensstandes.

4.4.2 Biota des aquatischen Kompartiments

Die Akkumulation von Quecksilber in der aquatischen Nahrungskette beginnt mit der Anreicherung von ionischem Quecksilber und Methylquecksilber in Primärproduzenten wie Algen. Dabei ist der Transfer von Quecksilber aus Wasser in Algen deutlich effizienter als für die folgenden trophischen Stufen und die Bioakkumulationsfaktoren sind entsprechend höher. Aufgrund der trophischen Anreicherung nehmen jedoch die Quecksilbergehalte und der Anteil von Methylquecksilber am Gesamtquecksilber entlang der aquatischen Nahrungskette, von Plankton über Fische hin zu Wasservögeln, zu.

Für die Beobachtung von Schadstoffkonzentrationen in der Umwelt wird oft die Zebramuschel (*Dreissena polymorpha*) als Primärkonsument eingesetzt [80]. Sie ernährt

Spezies	Matrix	Wert		n	Zeitraum	Standort	Ref
	Eier	600	ww	2	1972	Westschweiz	[77]
Steinadler (<i>Aquila chrysaetos</i>)	Leber	24 ± 17 < 10 – 57	ww	6	2000 – 2001	Alpen (Österreich, Deutschland und Schweiz)	[79]
	Niere	16 ± 15 < 9 – 39	ww	5	2000 – 2001	Alpen (Österreich, Deutschland und Schweiz)	
Waldiltis (<i>Mustela putorius</i>)	Niere	1040 70 – 5450	ww	80	1983 – 1985	Nördliche Schweiz	[76]
Steinmarder (<i>Martes foina</i>)	Muskulatur	1000	ww	1	1972	Westschweiz	[77]

sich hauptsächlich von Plankton und Detrituspartikeln und ist selbst eine Nahrungsquelle für Fische. In der Schweiz werden Zebromuscheln periodisch im Rahmen der Überwachung der Gewässerqualität im Genfersee sowie im Luganer- und Langensee beprobt. Im Genfersee fand eine solche Beprobung zuletzt an fünf Standorten am Schweizer Ufer im Jahr 2014 statt [81]. Für den Luganersee liegen Daten für Proben von drei Standorten für die Jahre 2010 und 2011 [82] und für den Langensee von einem Standort für den Zeitraum 2011 – 2013 vor [83]. Im Rhein bei Basel (Weil am Rhein) waren Zebromuscheln zuletzt in den Jahren 2004 und 2006 im Untersuchungsprogramm der deutschen Umweltprobenbank [84] (Abbildung 22).

Die umfangreichsten Daten zum Vorkommen von Quecksilber in Biota des aquatischen Kompartiments liegen für Fische vor. In verschiedenen Messungen im Muskelfleisch von Egli und Trüschchen aus dem Genfersee kann seit den Siebzigerjahren eine Tendenz zur Abnahme des Quecksilbergehalts festgestellt werden [85 – 88] (Abbildung 23). Seit den frühen Neunzigerjahren blieb der gemessene Quecksilbergehalt dabei auf relativ konstantem Niveau. Auch für Messungen in verschiedenen Fischen aus dem Langensee kann seit dem Jahr 2000 eine relativ konstante Quecksilberbelastung festgestellt werden [89, 90] (Abbildung 24).

Eine ähnliche Konstanz der Quecksilberbelastung konnte ebenfalls für Brassen im Rhein bei Basel festgestellt werden (Abbildung 25) [84]. Auch in Fischen aus Gewässern, welche nicht von urbanen Räumen beeinflusst werden, lag Quecksilber angereichert vor: In Regenbogenforellen mit einem mittleren Alter von 3 Jahren (n = 15) aus dem abgelegenen Tessiner Gebirgssee Lago Superiore (See-

fläche 8,3 ha, 2100 m. ü. M.) wurden im Jahr 2010 Quecksilbergehalte von 30 – 80 µg/kg Frischgewicht gemessen. Der Mittelwert von 50 µg/kg lag im Bereich der zwischen 2001 und 2009 bestimmten Mittelwerte, ein Trend im Beobachtungszeitraum ist nicht ersichtlich (Abbildung 26) [91].

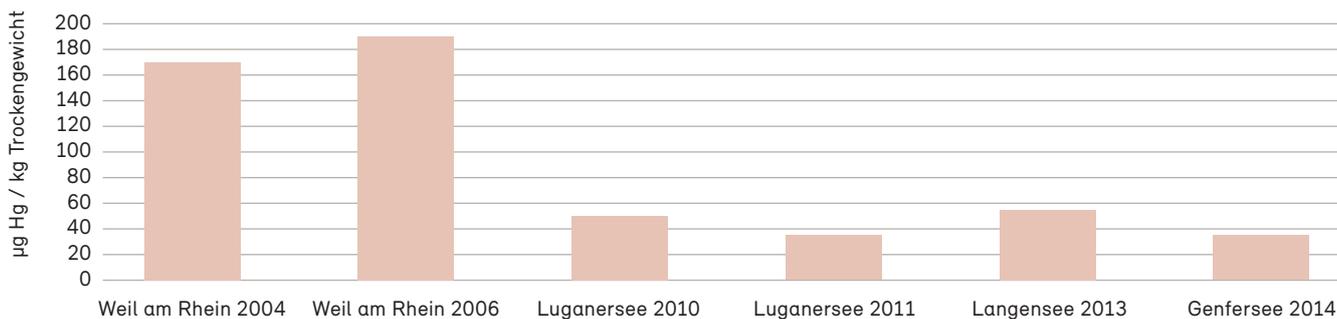
Inländische Daten zur Quecksilberbelastung von Tieren in höheren trophischen Stufen liegen aus den 1970er-Jahren für Wasservögel aus der Westschweiz und dem Mittelland vor und sind in Abbildung 27 dargestellt [77, 92]. Haubentaucher aus Mittellandseen wiesen eine geringere Belastung als jene in der Westschweiz auf, wenn von einem Verhältnis der Quecksilbergehalte von 7:3:1 zwischen Leber, Federn und Muskulatur bezogen auf das Frischgewicht ausgegangen wird [78].

Aktuellere Daten zur Quecksilberbelastung von Wasservögeln liegen nicht vor und sollten erhoben werden. Im Vergleich mit neueren Daten aus dem Ausland war die Quecksilberbelastung einzelner Wasservogelarten aus der Westschweiz vor 45 Jahren relativ hoch: Die Auswertung umfangreicher Daten zur Quecksilberbelastung von Wasservögeln aus dem Nordosten der USA im Zeitraum 1995 – 2003 von Evers et al. [78] ergab eine Quecksilberbelastung von rund 900 µg/kg in der Muskulatur fischfressender Vögel (z. B. Gänsesäger). In Muskulatur insektivorer (Schellenten) und omnivorer Vögel (Stockenten) wurden rund 300 µg Hg/kg bzw. 100 µg Hg/kg gemessen. Am wenigsten belastet war die Muskulatur herbivorer Vögel (Ringelgänse) mit ungefähr 50 µg Hg/kg.

Abbildung 22

Quecksilbergehalte in Zebramuscheln

Quecksilbergehalte in Zebramuscheln aus Schweizer Seen bzw. im Rhein an verschiedenen Standorten. Die Gehalte beziehen sich auf das Trockengewicht der Proben [81 – 84].

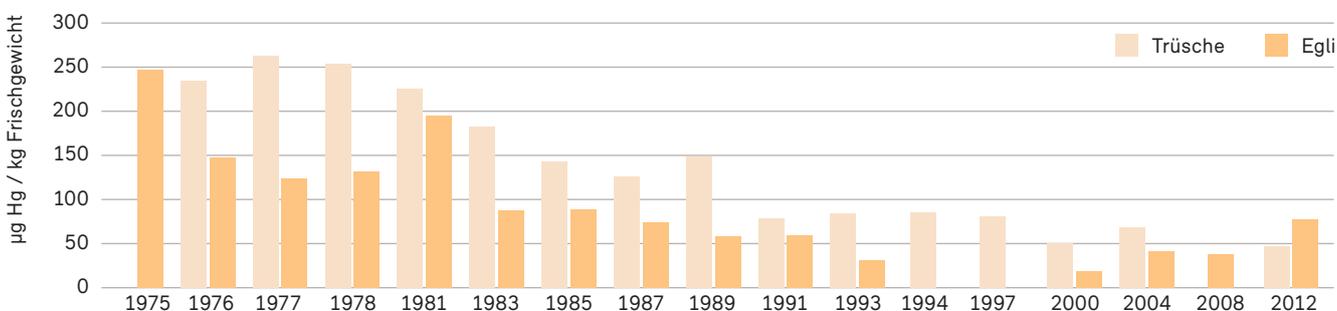


Quelle: Lods-Crozet et al. [81], Pessina [82], Marchetto [83], UPB [84]

Abbildung 23

Quecksilbergehalte in Fischen aus dem Genfersee

Quecksilbergehalte in Fischen aus dem Genfersee zwischen 1975 und 2012. Alle Konzentrationen sind in µg/kg Frischgewicht angegeben [85 – 88].

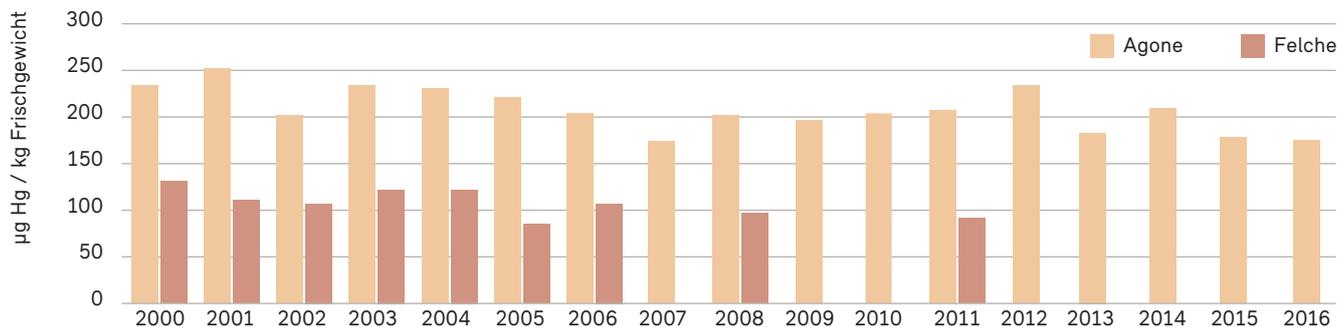


Quelle: Corvi & Buttiker [85], Corvi et al. [86], Edder et al. [87 & 88]

Abbildung 24

Quecksilbergehalte in Fischen aus dem Langensee

Quecksilbergehalte in Fischen aus dem Langensee zwischen 2000 und 2016. Alle Konzentrationen sind in µg/kg Frischgewicht angegeben [89, 90].

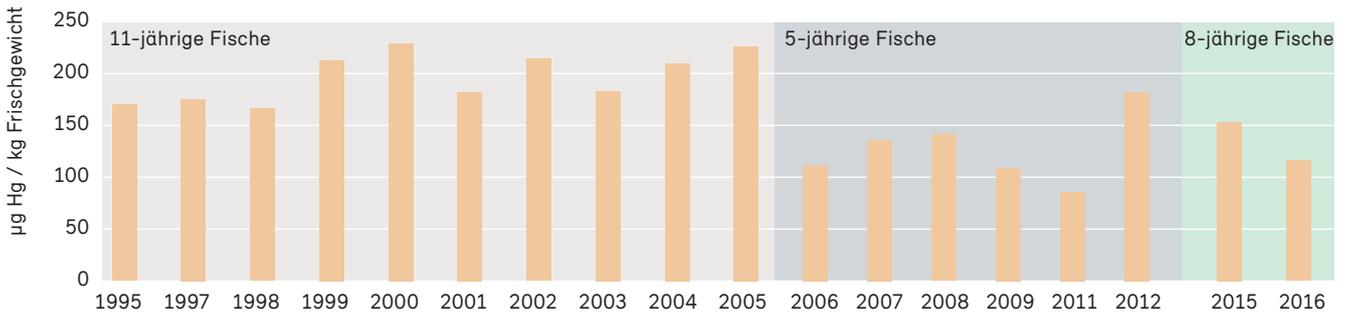


Quelle: Kantonales Laboratorium Tessin (LCI-TI) [89], Guilizzoni [90]

Abbildung 25

Quecksilbergehalte in Fischen aus dem Rhein

Quecksilbergehalte in Brassen aus dem Rhein bei Basel in µg/kg Frischgewicht. Das mittlere Alter der beprobten Brassen betrug 11 Jahre im Zeitraum 1995–2005, 5 Jahre im Zeitraum 2006–2012, sowie 8 Jahre im Zeitraum 2015–2016 [84].

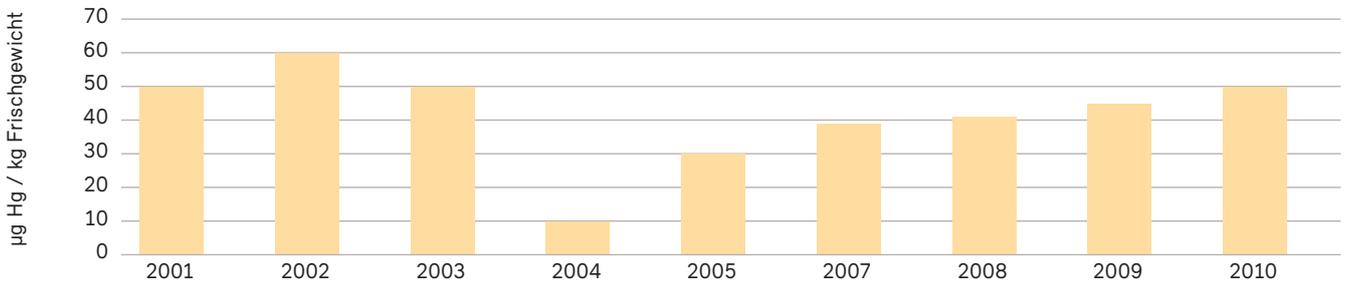


Quelle: UBP [84]

Abbildung 26

Quecksilbergehalte in Fischen aus Gewässer mit rurealem Einzugsgebiet im Tessin

Quecksilbergehalte in nicht-piscivoren Forellen aus dem Tessiner Gebirgssee Lago Superiore in µg/kg Frischgewicht [91].

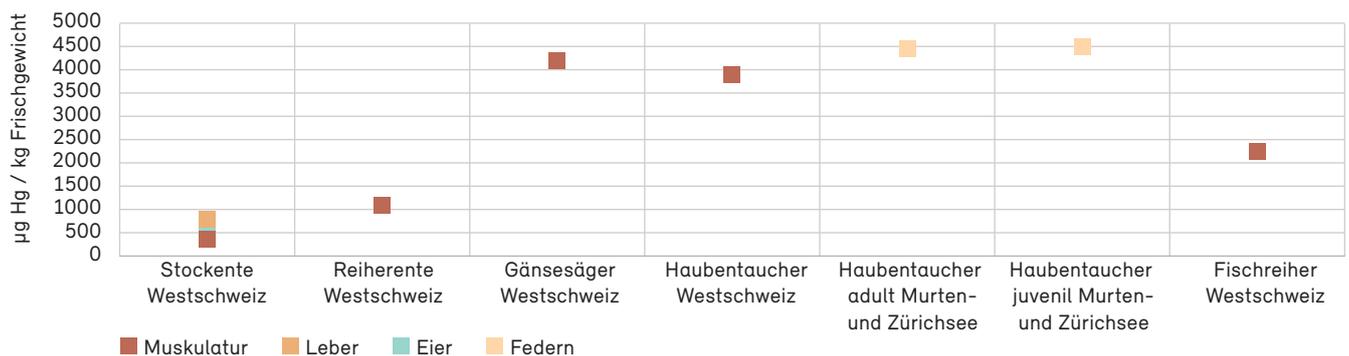


Quelle: Steingruber & Colombo [91]

Abbildung 27

Quecksilbergehalte in Wasservögeln in der Schweiz

Quecksilbergehalte in Proben von Muskulatur, Leber, Eiern und Federn verschiedener Wasservögel in der Schweiz. Die Proben aus der Westschweiz stammen aus dem Jahr 1972, diejenige aus dem Murten- und Zürichsee aus dem Jahr 1970. Alle Konzentrationen sind in µg/kg Frischgewicht angegeben [77, 92].



Quelle: Veluz et al. [77], Schifferli [92]

5 Beurteilung der Umweltbelastung

Die im Schweizer Umweltrecht festgelegten Limite zum Vorkommen von Quecksilber in Böden und Oberflächengewässern werden heute eingehalten. Dies schützt Bodenprozesse sowie terrestrische und aquatische Organismen vor direkten Wirkungen von anorganischem Quecksilber und Methylquecksilber. Demgegenüber kann ein Risiko für Spitzenprädatoren in der aquatischen Nahrungskette, die sich ausschliesslich von Fischen ernähren, nicht ausgeschlossen werden.

5.1 Beurteilungswerte

Zum Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit wurden von Behörden und Institutionen im In- und Ausland Schwellenwerte für das Vorkommen von Quecksilber in Umweltkompartimenten sowie Biota abgeleitet. Diese Werte basieren in der Regel auf experimentellen Befunden an Testorganismen und epidemiologischen Untersuchungen am Menschen. Die geltenden Beurteilungswerte für die Schweiz und ausgewählte internationale Beurteilungswerte sind in Tabellen 4 und 5 zusammengefasst. Die Herleitungen dieser und weiterer Beurteilungswerte ist in Tabelle 25 des ausführlichen Begleitberichts näher beschrieben.

Tabelle 4
Ausgewählte Beurteilungswerte für Quecksilber in der Schweiz

Kompartiment	Art des Beurteilungswerts	Wert	Bemerkung
Boden	Richtwert	500 µg/kg Trocken- substanz	Für multifunktionelle Bodennutzung. Festgelegt in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12)
	Konzentrationswert	2000 µg/kg Trocken- substanz	Für Böden von Haus- und Familiengärten. Festgelegt in der Altlastenverordnung (AltV, SR 814.680)
Wasser	Qualitätsanforderung für Oberflächengewässer	10 ng/L (total gelöstes Hg)	Bezieht sich auf den Schutz vor direkter Wirkung auf Wasserorganismen. Festgelegt in der Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201)
Biota	Höchstgehalt	500 – 1000 µg/kg	Fisch für den Verzehr durch Menschen. Festgelegt in der Kontaminantenverordnung (VHK, SR 817.022.15)

Tabelle 5
Ausgewählte internationale Beurteilungswerte für Quecksilber

Kompartiment	Art des Beurteilungswerts	Wert	Bemerkung
Luft	Prüfwert für die Luftbelas- tung bei chronischer Exposition	200 ng/m ³	Festgelegt in den USA von der Agentur zur Registrierung Toxischer Substanzen und Krankheiten (ATSDR)
Wasser	Zulässige Höchstkonzentration in Oberflächengewässern (ZHK-UQN)	70 ng/L	Bezogen auf die direkte Wirkung auf Wasserorganismen bei kurzfristiger Belastung. Festgelegt durch die EU in der Richtlinie 2008/105/EG.
Sediment	Zielvorgabe für Gesamt- quecksilber	500 µg/kg	Festgelegt durch die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)
Biota	Umweltqualitätsnorm zum Schutz von Top-Prädatoren in der aquatischen Nahrungskette	20 µg/kg (Fisch, Nassgewicht)	Bezieht sich auf die sekundäre Toxizität durch eine mögliche Anreicherung in der Nahrungskette. Festgelegt durch die EU in der Richtlinie 2008/105/EG.

Die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung (LRV, SR 814.318.142.1) enthält keinen Immissionsgrenzwert für Quecksilber in der Aussenluft. Auch im EU-Recht wurde bisher kein Grenzwert festgelegt. Ausländische Orientierungswerte für die zulässige Luftbelastung (einschliesslich für Innenräume) mit Quecksilber zum Schutz der menschlichen Gesundheit liegen zwischen 35 und 1000 ng/m³.

In der Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBo, SR 814.12) ist für Quecksilber im Boden ein Richtwert für die multifunktionale Bodennutzung von 0,5 mg/kg festgelegt. Haus- und Familiengärten, Kinderspielplätze und Anlagen, auf denen Kinder regelmässig spielen, sind gemäss Altlastenverordnung (AltIV, SR 814.680) sanierungsbedürftig, wenn die Böden mehr als 2 mg Hg/kg enthalten.

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) legt für das Vorkommen von Quecksilber in Oberflächengewässern eine Qualitätsanforderung von 10 ng/L bezogen auf gelöstes Gesamtquecksilber fest. Für das Vorkommen von Quecksilber in Gewässersedimenten enthält die Gewässerschutzverordnung kein numerisches Qualitätsziel. Die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) hat für Sedimente im Rhein eine Zielvorgabe von 500 µg/kg festgelegt.

Für Fische, die für den Verzehr durch Menschen bestimmt sind, gelten in der Schweiz, wie auch in der EU, Höchstgehalte von 500 – 1000 µg/kg Frischgewicht. In der EU existiert zudem eine Umweltqualitätsnorm von 20 µg/kg zum Schutz von Top-Prädatoren der aquatischen Nahrungskette vor toxischen Effekten durch eine Anreicherung in der Nahrungskette (sekundäre Toxizität). Verbruggen et al. [93] vom niederländischen Institut für die öffentliche Gesundheit und Umwelt (RIVM) leiteten darauffolgend ab, dass für die Erfüllung einer solchen Umweltqualitätsnorm Wasserkörper höchstens 0,07 ng/L Quecksilber enthalten dürften.

5.2 Beurteilung der Umweltbelastung

Nach EMEP-Modellrechnungen betragen im Jahr 2015 die Hg-Gehalte in der Luft der Schweiz 1,1 – 1,4 ng/m³; dominierende Spezies ist elementares, gasförmiges Hg. In einer jüngst durchgeführten Messkampagne über 24 Monate an einem urbanen Standort in der Schweiz betrug das 90%-Perzentil der Tagesmittelwerte rund 2 ng/m³. Dieser Gehalt liegt deutlich unter dem in den USA von der ATSDR hergeleiteten Wert von 200 ng/m³, welcher für den Menschen auch bei chronischer Exposition wahrscheinlich nicht mehr mit einem nennenswerten Risiko für schädliche Wirkungen verbunden ist [94].

Die mittlere Quecksilberdeposition aus der Atmosphäre in der Schweiz im Jahr 2015 betrug laut Modellierungen der EMEP rund 15 g km⁻² a⁻¹. Damit ist die heutige Deposition 10- bis 15-mal höher als in der präanthropogenen Periode (um 1300), für welche Roos-Barracough & Shotyk [95] anhand Messungen an zwei Schweizer Torfkernen Depositionen von 1 und 1,5 g km⁻² a⁻¹ errechneten. Zum Schutz der Böden und Gewässer sollten die Hg-Gehalte in der Luft, bzw. die Einträge aus der Luft so gering wie möglich gehalten werden, wozu grenzüberschreitende Anstrengungen notwendig sind.

Für die Beurteilung der Hg-Gehalte in Schweizer Böden wird der in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12) festgelegte Richtwert für die multifunktionale Bodennutzung von 500 µg/kg beigezogen. Bei der jüngsten Erhebung wurden in Böden des nationalen Bodenbeobachtungsmessnetzes (NABO-Messnetz) üblicherweise Hg-Gehalte von 50 – 180 µg/kg ermittelt (10%- und 90%-Perzentile); die Extremwerte betragen 10 und 390 µg Hg/kg. Daten aus Messnetzen der Kantone bestätigen das aus dem NABO-Messnetz gewonnene Bild, wonach landwirtschaftlich genutzte Böden und Waldböden unauffällige Hg-Gehalte aufweisen. Somit wird der VBBo-Richtwert in Schweizer Böden grösstenteils unterschritten. Hg-Gehalte über dem VBBo-Richtwert werden teilweise in Gärten in urbanen Gebieten gemessen; in einigen Böden findet man bedingt durch Einträge aus der Vergangenheit über 2000 µg Hg/kg. Nach den Vorschriften der Altlasten-Verordnung (AltIV, SR 814.680) sind Haus- und Familiengärten, Kinderspielplätze und Anlagen, auf denen Kinder regelmässig spielen, zu sanieren,

wenn die Böden diesen Wert überschreiten. Bodensanierungen erfolgen zurzeit in Siedlungsgebieten im Südwesten der Schweiz. Dort fand eine Kontamination von Böden mit Quecksilber durch die Ablagerung von belastetem Aushubmaterial aus einem Industriegebiet und/oder Schlämmen und Sedimenten statt, die bei Unterhaltarbeiten im Zeitraum von 1930 – 1990 aus einem mit industriellem Abwasser belasteten Kanal ausgehoben wurden [96]. Wie in aquatischen Systemen finden in terrestrischen Systemen Methylierungs- und Demethylierungsprozesse statt. Um 0,01 – 3 % des Gesamt-Hg in Böden entfallen auf Methyl-Hg [59, 63]. Eine hohe Bodenfeuchtigkeit, anaerobe Bedingungen und leichte Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff begünstigen die Bildung von Methyl-Hg, eine Demethylierung geschieht unter aeroben Bedingungen [63]. Verfügbare Daten von Schweizer Böden zeigen, dass Methyl-Hg-Gehalte bis 8 µg/kg betragen; auch Untersuchungen im Ausland zeigen ähnliche Belastungen. Basierend auf Resultaten von Toxizitätstests von Rieder & Frey [97] bewegen sie sich in einem akzeptablen Bereich.

Die Daten zum Vorkommen von Quecksilber in Oberflächengewässern zeigen, dass die in der Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) festgelegte Qualitätsanforderung für das Vorkommen von Quecksilber in Oberflächengewässern von 10 ng/l eingehalten wird. Im Kanton Zürich werden seit dem Jahr 1999 Sedimente der bedeutendsten Fließgewässer auf Schwermetalle, u. a. Quecksilber, untersucht. Berücksichtigt man die Daten ab dem Jahr 2008, variieren die jeweils jüngst an einem der 130 Standorte gemessenen Hg-Gehalte zwischen 40 und 1360 µg/kg, bei 98 % der Standorte werden Hg-Gehalte von 285 mg/kg und weniger gemessen [57]. Danach liegen die Sedimentgehalte in Zürcher Fließgewässern in der Regel unter der von der IKSR festgelegten Zielvorgabe von 500 µg/kg. Die weiteren verfügbaren Daten zeigen, dass dies auch für andere Schweizer Fließgewässer zutrifft.

In Biota kann sich Quecksilber über die Nahrungskette anreichern, wobei Methylquecksilber besonders stark akkumuliert. In der aquatischen Nahrungskette beginnt der trophische Transfer von Quecksilber mit der Akkumulation von ionischem Quecksilber und Methylquecksilber durch Primärproduzenten. Hg-Gehalte und der Anteil von

Methyl-Hg am Gesamtquecksilber nehmen in der Regel von Phyto- über Zooplakton, plankton- und fischfressende Fische, bis hin zu Wasservögeln zu. Inländische Daten zum Vorkommen von Quecksilber in Wasservögeln sind älteren Datums und sollten aktualisiert werden. Ferner sind auch Daten zur Quecksilberbelastung von Organismen mit semiaquatischem und terrestrischem Habitat rar oder veraltet und bedürfen einer Ergänzung und Aktualisierung sowie Bewertung.

Im Schweizer Gewässerschutzrecht ist für Quecksilber keine Begrenzung für die zulässige Belastung von Weich- und Krebstieren, Fischen und anderen Biota zum Schutz höherer Lebewesen vor Quecksilbervergiftungen über die Nahrungskette festgelegt. In der EU liegt das Umweltqualitätsziel zum Schutz vor solchen Sekundärvergiftungen höherer Organismen der aquatischen Nahrungskette bei 20 µg Hg/kg Frischgewicht. Die Daten zur Quecksilberbelastung von Fischen in Schweizer Gewässern zeigen, dass dieses Qualitätsziel flächendeckend überschritten wird. Bei Brassen, die im Jahr 2016 im Rhein bei Basel gefischt wurden, fanden sich beispielsweise mittlere Quecksilbergehalte von 116 µg/kg. Selbst in Forellen aus Tessiner Gebirgsseen wurden im Jahr 2010 Quecksilbergehalte von 30 – 85 µg/kg gemessen. Insofern ist heute ein Hg-Gehalt von 20 µg/kg als ubiquitäre Grundbelastung anzusehen. Die Übertragung des Qualitätsziels von 20 µg Hg/kg für Biota durch Verbruggen et al. [93] in ein Qualitätsziel für die Wasserphase von weniger als 0,1 ng/L verdeutlicht, dass zu dessen Einhaltung zum einen eine Einstellung der anthropogenen Hg-Freisetzungen nötig wäre. Aber auch dann würden historisch bedingte Sedimentbelastungen weiterhin eine Quelle der Biota-Belastung darstellen.

6 Belastung des Menschen

Die Schweizer Bevölkerung nimmt Methylquecksilber hauptsächlich über Nahrungsmittel und anorganisches Quecksilber über Nahrungsmittel und vorhandene Amalgamfüllungen auf. Jüngere inländische Daten zum Vorkommen von Quecksilber in Humanproben liegen für zwei Kollektive vor. Verglichen mit Werten aus dem Ausland sind die Hg-Gehalte im Haar und Urin der Studienpopulationen unauffällig.

Die systemische Aufnahme von Quecksilber in den menschlichen Körper unterscheidet sich stark für verschiedene Expositionswege und Quecksilberspezies. Während oral aufgenommenes Methylquecksilber zu ca. 90 % in den Körper resorbiert, werden oral aufgenommene anorganische Quecksilberverbindungen bloss zu 10 % und elementares Quecksilber praktisch nicht in den Körper resorbiert. Über die Atemwege wird elementares Quecksilber jedoch zu ca. 80 % in den Körper resorbiert. Elementares Quecksilber wird im Körper zu zweiwertigem Hg (Hg^{2+}) oxidiert, welches die Körperschranken nur in sehr geringfügigen Massen passiert und hauptsächlich über den Urin und Fäzes eliminiert wird. Resorbiertes Methylquecksilber hingegen verteilt sich gleichmässig im Organismus und kann die Blut-Hirn-, sowie die Plazentaschranke leicht passieren und sich in fötalem Blut anreichern.

Mögliche Quellen für die Quecksilberbelastung der breiten Öffentlichkeit in der Schweiz sind die Aufnahme über Nahrungsmittel und über die Luft sowie die Aufnahme von Quecksilber über Dentalamalgam und der missgeschickliche Umgang mit quecksilberhaltigen Produkten. Da in der Schweiz in heute vermarkteten Produkten kaum noch Quecksilber eingesetzt wird und die Verwendung von Quecksilber in industriellen Prozessen eingestellt wurde, sind arbeitsplatzbedingte Belastungen selten. Im Folgenden werden deshalb nur die möglichen Quellen für die Quecksilberbelastung der breiten Öffentlichkeit erläutert.

6.1 Aufnahme über Nahrungsmittel

In der EU hat die Europäische Behörde für Nahrungsmittelsicherheit (EFSA) im Jahr 2012 die Aufnahme von

Quecksilber in 17 EU-Staaten ermittelt und beurteilt. Die Exposition der Bevölkerung wurde basierend auf Quecksilbergehalten von Lebensmitteln und Daten zu deren Verzehr in den verschiedenen Ländern abgeschätzt. Dabei wurde zwischen der Aufnahme von anorganischem Quecksilber und Methylquecksilber unterschieden. Ausgehend von den in Lebensmitteln als Gesamtquecksilber gemessenen Gehalten wurden für Fische und Fischprodukte Konversionsfaktoren von 1,0 (Methylquecksilber) und von 0,2 (anorganisches Quecksilber) verwendet. Für Krebs- und Weichtiere betragen die Konversionsfaktoren 0,8 (Methylquecksilber) und 0,5 (anorganisches Quecksilber). Für alle anderen Nahrungsmittelgruppen wurde angenommen, dass Quecksilber in anorganischer Form vorliegt. In der Schweiz wurden bislang keine entsprechenden Expositionsabschätzungen durchgeführt. Es kann jedoch angenommen werden, dass die Daten der umliegenden Länder (Deutschland, Frankreich und Italien) die Situation in der Schweiz relativ gut repräsentieren.

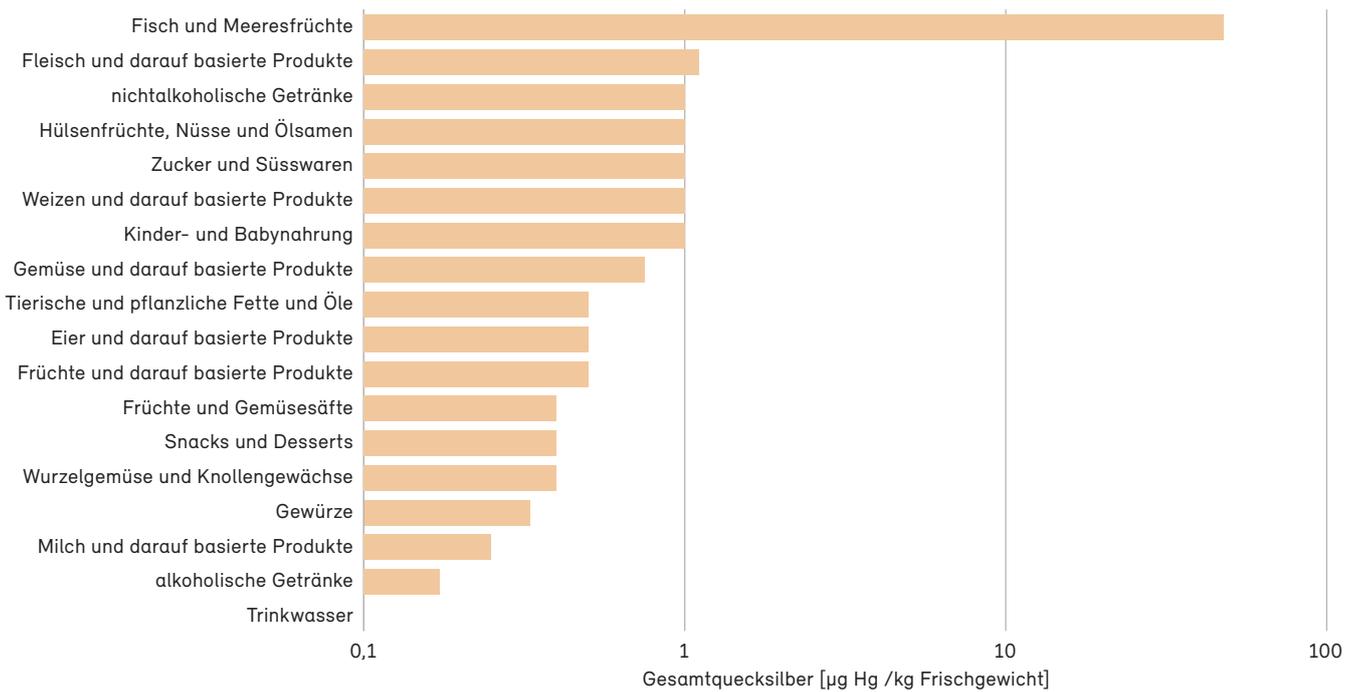
Abbildung 28 zeigt die Gesamtquecksilbergehalte in individuellen Nahrungsmitteln, welche für die Expositionsabschätzung durch die EFSA verwendet wurden. Aus diesen Daten ist ersichtlich, dass die höchsten Quecksilbergehalte in Fischen und Meeresfrüchten vorhanden waren. In den anderen Nahrungsmitteln lag Quecksilber oft unterhalb der Bestimmungsgrenze vor.

Abbildung 29 zeigt die von der EFSA geschätzte Methylquecksilberbelastung von Kleinkindern (1–3 Jahre), Kindern (3–10 Jahre) und Erwachsenen (18–65 Jahre) in Deutschland, Frankreich und Italien für einen durchschnittlichen sowie für einen hohen Konsum von Fisch und Meeresfrüchten. Dabei sind die Belastungswerte für Kinder und Erwachsene mit einem durchschnittlichen Konsum von Fisch und Meeresfrüchten in Deutschland und Frankreich relativ gering. Im Vergleich ist die geschätzte Belastung von Kindern und Kleinkindern mit einem hohen Fisch- und Meeresfrüchtekonsum in allen drei Ländern deutlich höher. Auch für italienische Erwachsene mit einem hohen Konsum von Fischen und Meeresfrüchten ist die geschätzte Belastung mit Methylquecksilber deutlich höher.

Abbildung 28

Quecksilbergehalte in Nahrungsmitteln

Mediane für das Vorkommen von Quecksilber in Nahrungsmittelgruppen in µg/kg Frischsubstanz (logarithmische Darstellung). Für Proben, bei denen die Quecksilberkonzentration unter der Bestimmungsgrenze lag, wurde für die Berechnung des Medians der halbe Wert der Bestimmungsgrenze verwendet (Middle-bound-Werte) [2].

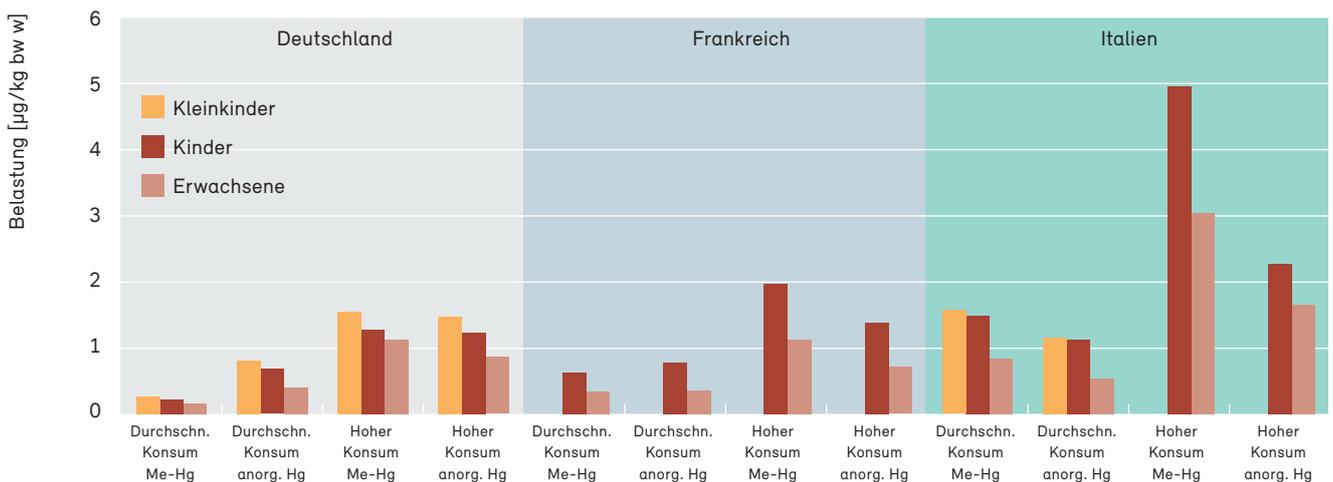


Quelle: EFSA [2]

Abbildung 29

Belastung des Menschen mit Quecksilber

Errechnete Belastung verschiedener Bevölkerungsgruppen mit Methylquecksilber (MeHg) und anorganischem Quecksilber (anorg. Hg) in Deutschland, Frankreich und Italien. Die Werte sind in µg/kg Körpergewicht (bw) pro Woche (w) angegeben. Die Belastung wurde für einen durchschnittlichen und einen hohen Fisch- und Meeresfrüchtekonsum (MeHg) und einen durchschnittlichen und einen hohen Nahrungsmittelkonsum (anorg. Hg) berechnet [2].



Quelle: EFSA [2]

Der signifikante Anteil Proben von Nahrungsmitteln, in denen keine messbaren Konzentrationen von Quecksilber gefunden wurden, führt zu erheblichen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Aufnahme von anorganischem Quecksilber mit der Nahrung. Abbildung 29 zeigt die Abschätzung der Belastung von Kleinkindern, Kindern und Erwachsenen in unseren Nachbarländern, wenn für das Vorkommen in Lebensmitteln der halbe Wert der Bestimmungsgrenze zugrunde gelegt wird (Middle-bound-Werte).

6.2 Aufnahme über die Luft

In der Schweizer Aussenluft misst man Hg-Gehalte von 1–2 ng/m³; dominierende Spezies ist elementares, gasförmiges Quecksilber. Inländische Messungen zur Hg-Belastung der Innenraumluft ausserhalb von Arbeitsplätzen sind nicht bekannt, Messergebnisse sind auch im Ausland rar [98, 99]. In Deutschland wurden im Jahr 2012 in elf Büro- und Laborräumen über einen Messzeitraum von jeweils 24 Stunden Hg-Gehalte von 5–50 ng/m³ bestimmt, der Mittelwert lag bei 15 ng/m³ [99]. Ausgehend von einer derartigen Belastung der Innenräume lassen sich bei einer langen Aufenthaltszeit in den Räumen für Erwachsene (Atemrate 20 m³ d⁻¹, Körpergewicht 70 kg) und Kleinkinder (Atemrate 6 m³ d⁻¹, Körpergewicht 10 kg) Aufnahmen von anorganischem Hg von 0,03 µg und 0,06 µg pro kg Körpergewicht und Woche abschätzen. Eine kurzzeitig höhere Quecksilberbelastung über die Luft kann im Fall eines missgeschicklichen Umgangs mit quecksilberhaltigen Produkten erfolgen. Das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit führte 2012 Untersuchungen zum Einfluss zerbrochener Energiesparlampen auf die Quecksilberkonzentration in der Innenraumluft durch. Bei diesen Untersuchungen wurden nach dem Zerschlagen von verschiedenen Typen von Sparlampen maximale Quecksilberkonzentrationen zwischen 135 ng/m³ und 10 277 ng/m³ gemessen. Dabei waren die Quecksilberemissionen von neueren Lampentypen deutlich geringer als diejenigen von älteren Lampentypen. Nach Entfernen der zerbrochenen Energiesparlampen und Lüften des Raumes sank in den Versuchen die gemessene Quecksilberkonzentration in der Luft sehr schnell.

6.3 Aufnahme über Dentalamalgam

Für die menschliche Belastung mit Quecksilber durch Dentalamalgam liegen verschiedene Schätzungen vor. Älteren Daten der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zufolge beträgt die Abgabe von elementarem Quecksilber aus Amalgamfüllungen 4–21 µg pro Tag [100]. Gemäss verschiedenen Studien aus den 1990er-Jahren kann die Quecksilberaufnahme beim Vorliegen von rund acht Amalgamfüllungen mit 3–12 µg pro Tag veranschlagt werden. Im Falle einer erwachsenen Person entspräche dies 0,3–1,2 µg Hg pro kg Körpergewicht und Woche. In neuesten Abschätzungen veranschlagt Richardson [101] die Hg-Aufnahme kanadischer Amalgamträger auf zwischen 0,2 µg (Jugendliche 12–18-jährig) und 0,45 µg (Kinder 6–11-jährig) pro kg Körpergewicht und Woche. Bei Erwachsenen mit mehreren Amalgamfüllungen stellen diese somit eine gewichtige Aufnahmequelle für anorganisches Quecksilber dar. Kinder in der Schweiz hingegen tragen in der Regel keine Zahnfüllungen auf Basis von Amalgam [43], da solches Füllungsmaterial in inländischen Zahnarztpraxen seit Jahren nur noch marginale Bedeutung hat.

6.4 Biomonitoring

Biomonitoring ist die Erfassung der effektiven Belastung eines Organismus mit einem Schadstoff durch die Messung verschiedener Arten von biologischen Proben, wie Blut, Urin oder Haaren. Zur Erfassung der menschlichen Belastung mit Quecksilber können verschiedene Probematerialien genutzt werden. So kann die innere Belastung eines Menschen mit anorganischem und organischem Quecksilber beispielsweise in Blutproben gemessen werden. Die innere Belastung mit anorganischem Quecksilber kann ferner auch über die Messung von Hg-Konzentrationen im Urin erfasst werden. Eine zurückliegende Belastung mit Methylquecksilber lässt sich in Haarproben nachweisen. Die Schweiz hat sich unter Federführung des Bundesamts für Gesundheit (BAG) im Zeitraum zwischen 2010 und 2012 an einer von der EU koordinierten Human-Biomonitoring-Pilotstudie (DEMOCOPHES) beteiligt, in welcher in 17 Ländern u. a. die Hg-Konzentrationen im Haar von Mutter-Kind-Paaren bestimmt wurden. Die in der Schweiz erhobenen Haar-

proben stammten von je 120 Müttern (≤ 45 Jahre alt) und Kindern (6–11 Jahre alt) aus der Stadt Bern und sieben ländlichen Gemeinden im Oberaargau. Im zur Studie dazugehörigen Interview gaben 50 % der Mütter an, mindestens einmal wöchentlich Fisch oder Meeresfrüchte zu verzehren [102]. Die Resultate dieser Erhebung sind in Abbildung 30 dargestellt. Der Median der Quecksilberkonzentration im Haar von Müttern aus der Schweiz betrug $0,153 \mu\text{g/g}$, derjenige der Kinder $0,076 \mu\text{g/g}$. Beide Werte waren im Vergleich zu den gefundenen Konzentrationen in Probanden anderer europäischer Länder eher tief. Mütter mit den höchsten Quecksilberkonzentrationen im Haar assen häufiger Meerfische und Meeresfrüchte. Keinen Einfluss auf die Hg-Gehalte im Haar hatten die

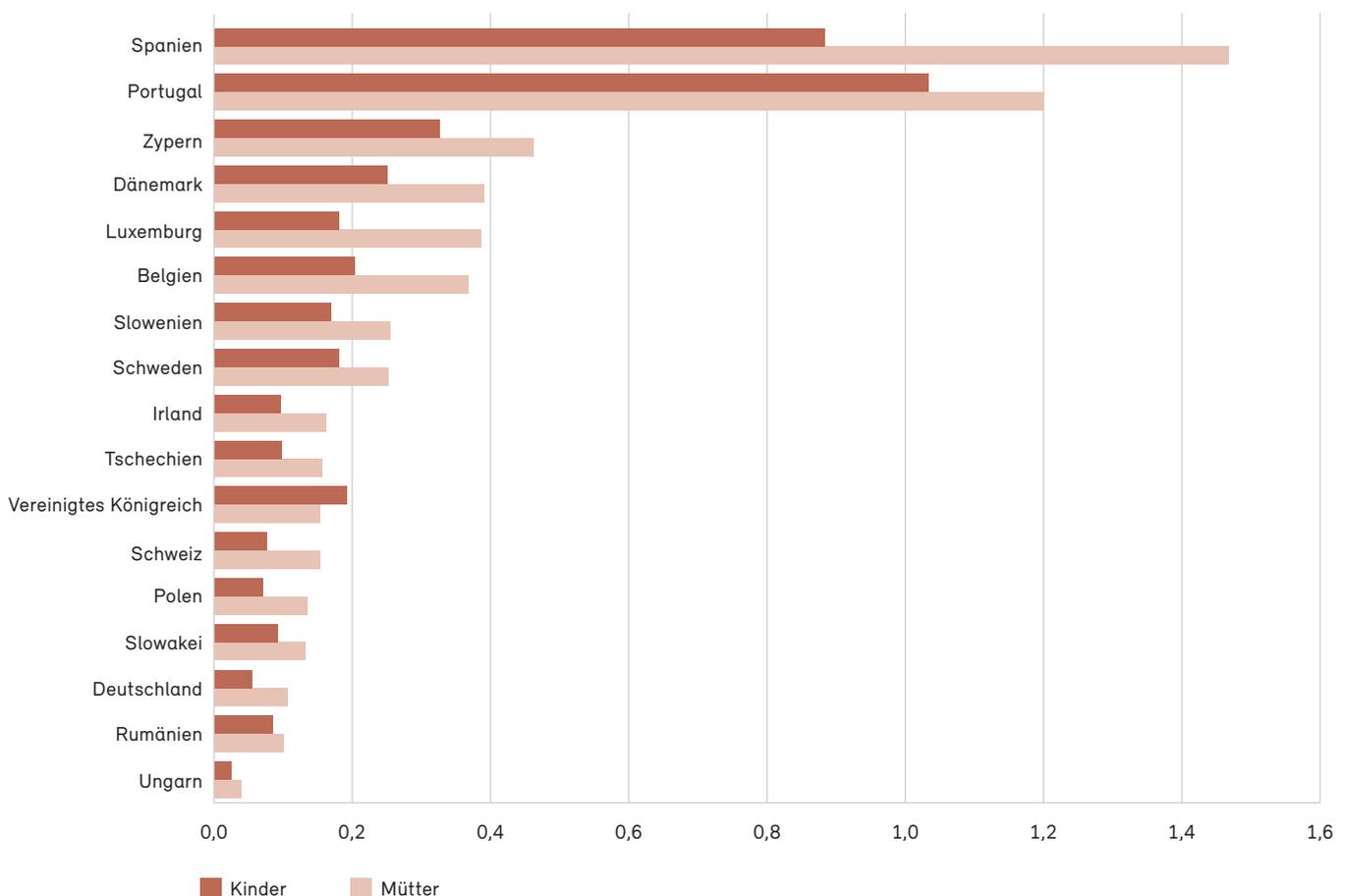
Anzahl Amalgamfüllungen sowie jemals zerbrochene Quecksilberthermometer oder Sparlampen.

Neben der Beteiligung an der DEMOCOPHES-Studie wurde in der Schweiz eine weitere Biomonitoring-Studie zu Quecksilber durch die Abteilung für Arbeits- und Umweltmedizin der Universität Zürich durchgeführt [43]. Dabei wurden Quecksilbergehalte in Haaren und Urin von 64 Müttern (25–55 Jahre alt) und 107 Kindern (3–12 Jahre alt) aus dem Oberwallis untersucht. Diese Studienpopulation lebt in einem Gebiet mit teilweise hohen Quecksilberbelastungen der Böden. In einer parallel durchgeführten Befragung wurde zudem die Anzahl der Amalgamfüllungen sowie Daten zum Konsum von

Abbildung 30

Hg-Gehalte im Haar europäischer Frauen und ihrer Kinder

Mediane der Hg-Gehalte im Haar (in $\mu\text{g/g}$) von Frauen in gebärfähigem Alter und ihren Kindern aus dem DEMOCOPHES-Projekt. Die Proben stammen von 1875 Frauen aus 17 Ländern aus urbanen und ruralen Gebieten in den Jahren 2011–2012 [103].

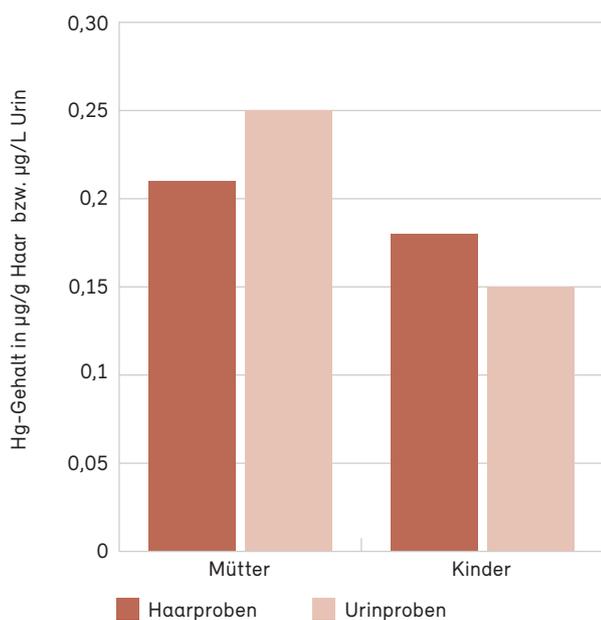


Meerfisch und von Gemüse aus belasteten Gärten erhoben. Die gemessenen Medianwerte der Quecksilbergehalte im Haar und im Urin sind in Abbildung 31 dargestellt. Verglichen mit den Resultaten der DEMOCOPHES-Studie bewegen sich die gemessenen Konzentrationen in den Haarproben ebenfalls im unauffälligen Bereich. Es fanden sich starke Hinweise auf einen Zusammenhang von Hg-Konzentrationen im Haar und dem Konsum von Meerfisch. Weiter bestanden auch starke Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen den Hg-Konzentrationen in den Urinproben und der Anzahl der Amalgamfüllungen sowie dem Alter und dem Zeitpunkt des letzten Meerfischkonsums von Probanden. Keinen Zusammenhang wurde für die Hg-Konzentrationen in den Haar- und Urinproben mit dem Gemüsekonsum aus belasteten Gärten oder dem Vorkommen von Quecksilber in Böden gefunden.

Abbildung 31

Hg-Gehalte in Haar- und Urinproben von Kindern und Müttern im Kanton Wallis

Gemessene Medianwerte der Hg-Gehalte in Haar- und Urinproben von Kindern und Müttern aus einem Belastungsgebiet im Kanton Wallis. Die Werte für die Haarproben sind in $\mu\text{g/g}$ Haar, diejenige für die Urinproben in $\mu\text{g/L}$ Urin angegeben [43].



Quelle: Dressel & Imo [43]

6.5 Zusammenfassung der menschlichen Belastung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Hauptquelle für die menschliche Belastung mit Methylquecksilber in der Schweiz die Aufnahme über die Nahrung, insbesondere der Konsum von Fisch, ist. Für die Belastung mit anorganischem Quecksilber kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptquellen sowohl die Aufnahme über die Nahrung, wie auch die Aufnahme über Dentalamalgam sind. Die Belastung mit Quecksilber über die Luft oder den Boden spielen mit grosser Wahrscheinlichkeit nur eine untergeordnete Rolle.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H. M., Jacob D.J., Pirrone N., 2013. Mercury as a global pollutant: sources pathways, and effects. *Environmental Science and Technology* 47(19): 4967 – 4983.
- [2] EFSA (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), 2012. Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. *EFSA Journal*; 10 (12): 2985, 241 pp. doi:10.2903/j.efsa.2012.2985.
- [3] AMAP/UNEP, 2013. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway / UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland. vi + 263 pp.
- [4] EZV (Eidgenössische Zollverwaltung), 2018. www.gate.ezv.admin.ch/swissimpex (Stand: 04.04.2018)
- [5] Lassen, C., Holt Andersen, B., Maag, J., Maxson, P., 2008. Options for reducing mercury use in products and applications and the fate of mercury already circulating in society. COWI Report.
- [6] Spiess, C., 1998. Vorsicht bei der Entsorgung von Tartanbelägen. *Umwelt Aargau* Nr. 1.
- [7] ECHA (European Chemicals Agency), 2011. Background document to RAC and SEAC opinions on five Phenylmercury compounds.
- [8] ECHA (European Chemical Agency), 2011a. Background document to the opinions on the Annex XV dossier proposing restrictions on Mercury in measuring devices.
- [9] Recknagel, S., Radant, H., 2013. Überprüfung der Schwermetallgehalte von Batterien – Analyse von Proben handelsüblicher Batterien und in Geräten verkaufter Batterien – Erstellung eines Probenahmeplans, Probenbeschaffung und Analytik. UBA Texte 09/2013. Umweltbundesamt, Desslau-Rosslau.
- [10] INOBAT (Interessenorganisation Batterienentsorgung), 2013. Tätigkeitsberichte 2011 / 2012 / 2013 (www.inobat.ch > Infomaterial > Dokumente und Downloads).
- [11] Gasser, S., Tschudy, D., 2011. Licht im Haus – Energieeffiziente Beleuchtung. Hrsg. Fachhochschule Nordwestschweiz (Institut Energie am Bau). Faktor Verlag, Zürich.
- [12] Zumbühl, T., Benedetti, K., 2010. Verkauf und Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz – Eine dynamische Modellierung. Bachelorarbeit ETH Zürich.
- [13] Böni, H., Widmer, R., 2011. Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz. EMPA und swico Recycling.
- [14] Goodman, P., Robertson, C., 2006. Review of Directive 2002/95/EC (RoHS) Categories 8 and 9 – ERA Report 2006-0383. July 2006 amd. 19 Sep 2006.
- [15] Kägi, T., Franov, E., 2016. Ökobilanz Stiftung SENS. Ökologischer Nutzen des Elektrogeräte-Recyclings durch die SENS über 25 Jahre. CustomLCA im Auftrag der Stiftung SENS. Carbotech AG, Basel.
- [16] Moser, K., Bertschinger, H., Hugener, M., Kramer, H., Richner, P., Richter, K., 2004. Baustoffmanagement 21 (Stand des Wissens und Forschungsbedarf). EMPA, Departement Materialien für das Bau- und Ingenieurwesen. Dübendorf.
- [17] FOEN, 2017. Switzerland's Informative Inventory Report 2017. Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Submission of March 2017 to the United Nations ECE Secretariat. Federal Office for the Environment FOEN. Air Pollution Control and Chemicals Division. Bern.

-
- [18] Wochele, J., Ludwig, C., Stucki, S., 2009. RESH-Behandlung mit KVAplus. Studie im Auftrag der Stiftung Auto Recycling Schweiz. Paul Scherrer Institut. Villigen.
- [19] BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2017. Abfallstatistiken 2011–2013 www.bafu.admin.ch > *Thema Abfall* > *Daten, Indikatoren und Karten* (Stand: 16.03.2017).
- [20] SLRS (Stiftung Licht Recycling Schweiz), 2011. Jahresbericht.
- [21] Sovag, 2017. Lampenrecycling www.sovag.veolia.ch/de/angebot/lampenrecycling. (Stand: 04.04.2018)
- [22] Kasser, U., Savi, D., 2013. Risiken bei der Entsorgung von Energiesparlampen (im Auftrag der Stiftung Licht Recycling Schweiz). Büro für Umweltchemie, Zürich.
- [23] Tezcan, M., 2013. Klärschlamm Entsorgung in der Schweiz. Klärschlammhebung 2012. Bundesamt für Umwelt (Abt. Abfall und Rohstoffe), Bern.
- [24] Hügi, M. (Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe), 2014. Persönliche Mitteilung.
- [25] Taverna, R., Morf, L., 2009. Stoffflüsse und Kehrrechtzusammensetzung in der KVA Thurgau im Jahr 2008. GEO Partner AG. Zürich.
- [26] Taverna, R., Meister, R., 2011. Stoffbuchhaltung auf der KVA Hinwil (Schlussbericht 2008–2010). GEO Partner AG. Zürich.
- [27] MSC-E (Meteorological Synthesizing Centre – East), 2017. www.msceast.org > *Pollution Assessment* > *EMEP Countries* > *Switzerland* (2017)
- [28] Sprovieri, F., Pirrone, N., Bencardino, M., D'Amore, F., Carbone, F., Cinnirella, S., ... Norstrom, C., 2016. Atmospheric mercury concentrations observed at ground-based monitoring sites globally distributed in the framework of the GMOS network. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(18), pp.11915–11935. doi:10.5194/acp-2016-466.
- [29] Weigelt, A., Ebinghaus, R., Pirrone, N., Bieser, J., Bödewadt, J., Esposito, G., Slemr, F., van Velthoven, P. F. J., Zahn, A., Ziereis, H., 2016. Tropospheric mercury vertical profiles between 500 and 10000 m in central Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 4135–4146, doi:10.5194/acp-16-4135-2016.
- [30] Denzler, B., 2015 (Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften, ETH Zürich). Quecksilbermessreihen von Zürich und dem Jungfrauoch. Persönliche Mitteilung vom 29. Juni 2015.
- [31] EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Luftfremdstoffe/ Umwelttechnik), 2015. Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL).
- [32] Ilyin, I., Gusev, A., Rozovskaya, O., Strijkina, I., 2016. Transboundary Pollution of Switzerland by Heavy Metals in 2014 EMEP/MS-CHEM Report 5/2016.
- [33] Thöni, L., Seitler, E., Schnyder, E., Ehrenmann, J., 2013. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990–2010. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1328: 170 S.
- [34] BAFU (Hrsg.) 2018: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990–2015. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1818: 133 S.
- [35] Fitzgerald, W.F., Lamborg, C.H., 2007. Geochemistry of mercury in the environment. In: Lollar, B.S. (Ed.). *Environmental Geochemistry, Treatise on Geochemistry*, pp. 1–47. Vol. 9.04, Elsevier.
- [36] Kummert, R., Stumm, W., 1989. Gewässer als Ökosysteme – Grundlagen des Gewässerschutzes (2., überarb. Aufl.). Verlag der Fachvereine, Zürich.

-
- [37] Braun, M., Besozzi, D., Herata, H., Falcke, H., van Dokkum, R., Langenfeld, F., Mohaupt, V., van den Roovaart, J., Sieber, U., Sollberger, B., 2003. Rhein. Bestandesaufnahme der Emissionen prioritärer Stoffe. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz (D).
- [38] IKSR (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, 2016. Gewässergütedaten. <http://iksr.bafg.de/iksr/> (Stand: 2. April 2018)
- [39] BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2009. Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006. Umwelt-Zustand Nr. 0903. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [40] Schudel, H., 2002. Trinkwasserfassungen auch an belasteten Standorten einwandfrei. Umwelt Aargau Nr. 19 November 2002.
- [41] Wasserversorgung der Stadt Zürich, 2016. Jahresbericht 2016 Quellwasser Sihlbrugg.
- [42] Wasserversorgung der Stadt Zürich, 2016. Jahresbericht 2016 Grundwasser Hardhof.
- [43] Dressel, H., Imo, D., 2016. Gutachten über eine mögliche Gesundheitsgefährdung der Bevölkerung durch quecksilberbelastete Böden im Gebiet Turtig und Visp. Abteilung für Arbeits- und Umweltmedizin, Universität Zürich
- [44] DUW VS (Dienststelle für Umweltschutz Kanton Wallis), 2016. Protokoll Informationsaustausch Plattform Quecksilber. 25. Januar 2016.
- [45] Binderheim-Bankay, E., Jakob, A., Liechti, P., 2000. NADUF – Messresultate 1977–1998. Schriftenreihe Umwelt Nr. 319. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.). Bern.
- [46] Langenfeld, F., Mohaupt, V., van den Roovaart, J., Sieber, U., Verstappen, G., Braun, M., 1999. Bestandesaufnahme der Einträge prioritärer Stoffe 1996. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR). Koblenz (D).
- [47] Hari, R., Zobrist, J., 2003. NADUF – Trendanalyse der NADUF-Messresultate 1974 bis 1998. Schriftenreihe der EAWAG Nr. 17. Dübendorf-Zürich.
- [48] Petri, M., 2007. Unproblematisch: Quecksilber im Bodensee und seinen Zuflüssen. Bodensee-Wasserversorgung. Wissensdurst – August 2007, pp. 16–21.
- [49] AUE BS (Amt für Umwelt und Energie, Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt Basel-Stadt), 2009. Qualität der Oberflächengewässer im Kanton Basel-Stadt. Untersuchungsjahre 1993 bis 2008.
- [50] AWA (Amt für Wasser und Abfall, Kanton Bern), 2017. Geoportalkarte Gewässerqualität www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/gewaesserqualitaet.html > Geoportalkarte Gewässerqualität (Stand: 04.04.2018)
- [51] Loizeau, J.-L., Makri, S., Arpagaus, P., Ferrari, B., Cascado-Martinez, C., Benejam, T., Marchand, P., 2017. Micropolluants métalliques et organiques dans les sédiments superficiels du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2016: 143–198.
- [52] Arbouille, D., Howa, H., Soan, D., Vernet, J.-P., 1989. Etude générale de la pollution par les métaux et répartition des nutriments dans les sédiments du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1988: 139–172.
- [53] Berset, J.-D., Guthruf, K., Maurer, V., Ochsenbein, U., Ryser, R., Zeh, M., Jordi, B., 2012. Zustand der Fliessgewässer und Seen im Kanton Bern – Auswertung der Gewässerdaten von 2002 bis 2010. AWA Fakten. Amt für Wasser und Abfall (AWA) des Kantons Bern.
- [54] Von Gunten, H.R., Sturm, M., Moser, R.N., 1997. 200-Year Record of Metals in Lake Sediments and Natural Background Concentrations. Environ. Sci. Technol. 31, pp. 2193–2197.

-
- [55] Pessina, A., 2010 / 2011 / 2012 / 2013. Lago Ceresio: indagine su DDT e sostanze pericolose. Commissione internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere. Programma quinquennale 2008 – 2012 – Rapporto annuale 2009, dito 2010, 2011 e 2012. Bellinzona.
- [56] Känel, B., Steinmann, P., Sinniger, J., Niederhauer, P., Labhart, W., Nyffenegger, K., Jenny, A., Balsiger, C., 2012. Zürcher Gewässer 2012 (Entwicklung – Zustand – Ausblick). Hrsg. AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft). Zürich, 2012.
- [57] AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft), 2016. Fliessgewässerqualität. https://awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/wasser/messdaten/fg_qualitaet.html#nordwesten (Stand: 04.04.2018)
- [58] Gascón Díez, E., Loizeau, J.-L., Cosio, C., Bouchet, S., Adatte, T., Amouroux, D., Bravo A.G., 2016. Role of Settling Particles on Mercury Methylation in the Oxic Water Column of Freshwater Systems. *Environmental Science & Technology* 50 (21), pp. 11672 – 11679, doi:10.1021/acs.est.6b03260.
- [59] EFSA (European Food Safety Authority), 2008. Mercury as undesirable substance in animal feed. Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *The EFSA Journal* (2008) 654, pp. 1 – 76.
- [60] Merkel, B., Sperling, B., 1998. Hydrogeochemische Stoffsysteme: Teil II. DVWK-Schriften; H. 117. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser GmbH. Bonn.
- [61] Rieder, S.R., Tipping, E., Zimmermann, S., Graf-Pannatier, E., Waldner, P., Meili, M., Frey, B., 2014. Dynamic modelling of the long term behaviour of cadmium, lead and mercury in Swiss forest soils using CHUM-AM. *Science of the Total Environment*, Volume 468 – 469, pp. 864 – 876.
- [62] Tipping, E., Wadsworth, R.A., Norris, D.A., Hall, J.R. Ilyin, I., 2011. Long-term mercury dynamics in UK soils. *Environmental Pollution* 159, pp. 3474 – 3483.
- [63] Portmann, D., Reiser, R., Meuli, R., 2013. Quecksilber in Böden: Organische Quecksilberverbindungen (Landwirtschaftliche Bodennutzung). Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (Umweltressourcen und Landwirtschaft). Zürich.
- [64] Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R. G., Keller A. 2015. Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1507: 81 S.
- [65] FaBo ZH (Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich), 2016 (www.aln.zh.ch > Bodenzustand > Messwerte von Überwachungsstandorten). © 2016 Kanton Zürich).
- [66] Rieder, S.R., Brunner, I., Horvat, M., Jacobs, A., Frey, B., 2011. Accumulation of mercury and methylmercury by mushrooms and earthworms from forest soils. *Environmental Pollution* 159, pp. 2861 – 2869.
- [67] De Temmerman, L., Claeys, N., Roekens, E., Guns, M., 2007. Biomonitoring of airborne mercury with perennial ryegrass cultures. *Environmental Pollution* 146, pp. 458 – 462.
- [68] Portmann, D., Reiser, R., Meuli, R., 2013. Quecksilber in Böden: Herleitung eines Sanierungswertes nach AltIV und von Prüfwerten nach VBBo. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (Umweltressourcen und Landwirtschaft). Zürich.
- [69] Schulz, F., Hahn, S., Rüdell, H., Uhlig, S., Hettwer, K., Kaltenbach, H.-M., 2015. Integrierte Bewertung von Quecksilber anhand der Erhebungen der Umweltprobenbank des Bundes (UPB). Fraunhofer ITEM Hannover; Fraunhofer IME Schmallenberg; QuoData GmbH Dresden; Projektnummer (32 842).
- [70] Alloway, B.J., Reimer, T., 1999. Schwermetalle in Böden: Analytik, Konzentrationen, Wechselwirkungen. Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-62086-9.

-
- [71] De Temmerman, L., Waegeneers, N., Claeys, N., Roekens, E., 2009. Comparison of concentrations of mercury in ambient air to its accumulation by leafy vegetables, an important step in terrestrial food chain analysis. *Environmental Pollution* 157, pp. 1337 – 1341.
- [72] Reber, S., Pacciarelli, B., 2016. Quecksilber-Spezies in landwirtschaftlichen Produkten in der Schweiz (Version 2.0). Kantonales Labor Zürich, Zürich.
- [73] Wyttenbach, A., Tobler, L., Bajo, S., 1991. Elementgehalte in Fichtennadeln im Raum Winterthur und deren örtliche und zeitliche Variation. Sonderdruck aus «Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz». Programmleitung NFP 14. Verlag der Fachvereine, Zürich.
- [74] Fürst, A., 2007. Quecksilber in Fichtennadeln als Immissionsmarker. *Forstschutz Aktuell* 41, S. 18 – 20.
- [75] Tabatchnick, M.D., Nogaro, G., Hammerschmidt, C.R., 2012. Potential sources of methylmercury in tree foliage. *Environmental Pollution* 160, pp. 82 – 87.
- [76] Mason, C.F., Weber, D., 1990. Organochlorine Residues and Heavy Metals in Kidneys of Polecats (*Mustela putorius*) from Switzerland. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 45: pp. 689 – 696.
- [77] Veluz, S., Goeldlin, P., Praz, J.C., 1976. La pollution mercurielle de la faune sauvage en Suisse romande. *Revue suisse Agric.* 8 (5): pp. 122 – 129.
- [78] Evers, D.C., Burgess, N.M., Champoux, L., Hoskins, B., Major, A., Goodale, W.M., Taylor, R.J., Poppenga, R., Gaigle, T., 2005. Patterns and Interpretation of Mercury Exposure in Freshwater Avian Communities in Northeastern North America. *Ecotoxicology* 14: pp. 193 – 221.
- [79] Kenntner N., Crettenand, Y., Fünfstück, Y., Janovsky, M., Tataruch, F., 2007. Lead poisoning and heavy metal exposure of golden eagles (*Aquila chrysaetos*) from the European Alps, 2007. *J Ornithol* 148, pp. 173 – 177.
- [80] Wagner, G., Bartel, M., Klein, R., Neitzke, M., Nentwich, K., Paulus, M., Quack, M., 2003. Dreikantmuschel (*Dreissena polymorpha*). Richtlinie zur Probenahme und Probenaufbereitung. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau (D).
- [81] Lods-Crozet, B., Edder, P., Klein, A., 2015. Métaux et micropolluants organiques dans les moules du Léman. *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014*, pp. 84 – 97.
- [82] Pessina, A., 2010 / 2011 / 2012 / 2013. Lago Ceresio: indagine su DDT e sostanze pericolose. Commissione internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere. Programma quinquennale 2008 – 2012 – Rapporto annuale 2009, dito 2010, 2011 e 2012. Bellinzona.
- [83] Marchetto, A., 2014. Indagine su DDT e sostanze pericolose nell'ecosistema del Lago Maggiore. Commissione internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere. Programma 2013 – 2015 – Rapporto annuale 2013. Verbania Pallanza.
- [84] UPB (Umweltprobenbank des deutschen Umweltbundesamts), 2017. (www.umweltprobenbank.de).
- [85] Corvi, C., Buttiker, B., 1982. Recherche du mercure et autres substances toxiques dans la faune piscicole. *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1981*, pp. 91 – 100.
- [86] Corvi, C., Zimmerli, P., Ortelli, D., Khim-Heang, S., Becker van Slooten, K., 2005. Métaux et micropolluants organiques dans les eaux, les moules et les poissons du Léman. *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2004*, pp. 55 – 78.
- [87] Edder, P., Ortelli, D., Klein, A., 2013. Micropolluants dans plusieurs espèces de poissons du Léman.

-
- Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2012, pp. 70 – 81.
- [88] Edder, P., Ortelli, D., Rapin, F., 2009. Micro-polluants dans les poissons et écrevisses du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, pp. 73 – 89.
- [89] LC-TI (Laboratorio cantonale del Cantone Ticino), 2000 / 2001 / 2002 / 2003 / 2004 / 2005 / 2009 / 2012 / 2013 / 2014 / 2016. Rapporto d'esercizio del Laboratorio cantonale (<https://www4.ti.ch/dss/dsp/lc/laboratorio/> > Pubblicazioni > Rapporto annui).
- [90] Guilizzoni, P., 2012. Indagine su DDT e sostanze pericolose nell'ecosistema del Lago Maggiore. Commissione internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere. Programma 2008 – 2012 – Rapporto annuale 2011. Verbania Pallanza.
- [91] Steingruber, S., Colombo, L., 2011. Results from the participation of Switzerland to the International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring Effects of Air Pollution on Rivers and Lakes (ICP Waters). Annual Report 2011. Ufficio dell'Aria, del Clima e delle Energie Rinnovabili, Repubblica e Cantone Ticino, Bellinzona.
- [92] Schifferli, A., 1978. Rückstände von Pestiziden und PCB bei schweizerischen Haubentauchern *Podiceps cristatus*. Der Ornithologische Beobachter 75: S. 11 – 18.
- [93] Verbruggen, E.M.J., van Herwijnen, R., Smit, C.E., 2015. Derivation of a water-based quality standard for secondary poisoning of mercury. RIVM Letter report 2015-0058, 50 pp. Bilthoven (NL).
- [94] ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 1999. Toxicological profile for Mercury. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- [95] Roos-Barracough, F., Shotyk, W., 2003. Millennial-Scale Records of Atmospheric Mercury Deposition Obtained from Ombrotrophic and Minerotrophic Peatlands in the Swiss Jura Mountains. Environmental Science & Technology 37 (2), pp. 235 – 244.
- [96] IVS VS (Präsidium des Staatsrates Kanton Wallis. Kanzlei – IVS), 2017. Quecksilberschmutzung – Einigung über Kosten-übernahme bei Sanierungen der Böden. Medienmitteilung vom 11. Dezember 2017.
- [97] Rieder, S.R., Frey, B., 2013. Methyl-mercury affects microbial activity and biomass, bacterial community structure but rarely the fungal community structure. Soil Biology and Biochemistry 64, pp. 164 – 173.
- [98] Link, B., 1999. Richtwerte für die Innenraumluft – Quecksilber. Bundesgesundheitsblatt 42, S. 168 – 174.
- [99] LGL (Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit), 2012. Arbeit, Umwelt und Gesundheit aktuell 2/12: Quecksilber aus Energiesparlampen. Erlangen (DE).
- [100] WHO (International Programme on Chemical Safety). 1991. Environmental Health Criteria 118, Inorganic Mercury.
- [101] Richardson, G.M., 2014. Mercury Exposure and Risks from Dental Amalgam in Canada: The Canadian Health Measures Survey 2007 – 2009. Human and Ecological Risk Assessment, 20, pp. 433 – 447.
- [102] BAG (Bundesamt für Gesundheit – Abteilung Chemikalien), 2012. EU Pilotstudie DEMOCOPHES zur Schadstoffbelastung. Informationen zum Studiendesign und zu den Resultaten der Schweizer Erhebung.

-
- [103] Castaño, A., Cutanda, F., Esteban, M., Pärt, P., Navarro, C., Gómez, S., ... Posada, M. 2015. Fish consumption patterns and hair mercury levels in children and their mothers in 17 EU countries. *Environmental Research*, 141, pp. 58 – 68.
- [104] EC (European Commission), 2005. Substance Data Sheet Mercury and its compounds). Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive. Environmental Quality Standards (EQS).
- [105] Keller, T., Desales, A., 2001. Böden in der Schweiz – Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990 – 1996). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. Umwelt-Materialien Nr. 139: 115 S.
- [106] AfU FR (Amt für Umwelt Kanton Freiburg), 2016. Bodenanalysen in der Stadt Freiburg. Messkampagnen 2011 bis 2015.
- [107] SLG (Schweizer Licht Gesellschaft), 2015. Licht für die Schweiz (Lichtmarkt Schweiz – Analyse 2014). Im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE); Hrsg. SLG, 1.10.2015. Bern.

