



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF

**Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART**  
Umweltressourcen und Landwirtschaft

---

# Quecksilber in Böden: Herleitung eines Sanierungswertes nach AltIV und von Prüfwerten nach VBBo

---

Mai 2013

Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Forschungsanstalt ART  
Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich  
Tel. +41 44 377 71 11, Fax +41 44 377 72 01  
[www.agroscope.ch](http://www.agroscope.ch)

## **Impressum**

### **Auftraggeber**

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

### **Auftragnehmer**

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholz

### **Autoren**

Denise Portmann, René Reiser, Reto Meuli (alle ART Reckenholz)

### **Begleitung BAFU**

Christiane Wermeille, Roland von Arx, Christoph Reusser

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

## Inhalt

Quecksilber in Böden: Herleitung eines Sanierungswertes nach AltIV und von Prüfwerten nach VBBo 1

1.	Einleitung.....	9
1.1	Situation und Auftrag.....	9
1.2	Quecksilber.....	10
1.3	Schweizer Gesetzgebung.....	10
2.	Prüf- und Sanierungswerte im Ausland.....	13
2.1	Richtwerte.....	13
2.2	Prüfwerte.....	14
2.3	Sanierungswerte.....	15
2.4	Fazit.....	16
3.	Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten nach der BUWAL Richtlinie [2].....	18
3.1	Bestimmungsmethoden.....	18
3.1.1	Prinzip.....	18
3.1.2	Methoden zum Wirkungspfad Nahrungspflanzen.....	19
3.1.3	Methoden zum Wirkungspfad Futterpflanze.....	21
3.1.4	Wirkungspfad Pflanzenwachstum.....	23
3.1.5	Zusammenführung der Wirkungspfade für die Bestimmung des Sanierungswertes.....	23
3.2	Material und Methoden.....	23
3.2.1	Daten.....	23
3.2.2	Annahmen und Praktisches Vorgehen.....	27
3.3	Resultate.....	29
3.3.1	Prüfwerte.....	29
3.3.2	Sanierungswert.....	33
3.4	Kritische Beurteilung und Empfehlungen.....	37
3.5	Diskussion.....	43
4.	Ausblick.....	44
5.	Referenzen.....	45
6.	Anhang.....	49

## Abbildungen

Abbildung 1: Drei Kategorien, nach welchen die ausländischen Grenzwerte geordnet wurden: Quelle, Nutzungskategorie und Grenzwert-Typ. Die Daten der Schnittmenge mit den Attributen Landwirtschaft, Gesetz/Verordnung und Prüf- bzw. Sanierungswert wurde weiter in Betracht gezogen. ....	13
Abbildung 2: Abbildung der ausländischen Grenzwerte im System der Schweizer Prüf- und Sanierungswerte mit der Mischzone zwischen Prüf- und Sanierungswert (BEL: Flandern (Belgien), CAN: Kanada, ESP: Katalonien (Spanien), FIN: Finnland, GER: Deutschland, LTU: Litauen, MAS: Malaysia, SUI: Schweiz, SWE: Schweden). Keine ausländische Gesetzgebung ist so strikt bei der Verordnung von Sanierungsmassnahmen, wie die Schweizer AltIV. ....	17
Abbildung 3: Beispiel aus der BUWAL Richtlinie [2]: Punktediagramm der Bleikonzentrationen in Boden- und Pflanzenproben für Spinat mit den eingezeichneten Best- (min. Transfer) und Worst-Case (max. Transfer) Szenarien. Zur Bestimmung des Prüfwerts wird der FIV Toleranzwert für Spinat eingezeichnet und beim Schnittpunkt mit der maximalen Transfergeraden den Prüfwert bestimmt [2]. ....	20
Abbildung 4: Beispiel aus der BUWAL Richtlinie [2]: Punktediagramm der Bleikonzentrationen in Boden- und Pflanzenproben für Spinat mit den eingezeichneten Best- (min. Transfer) und Worst-Case (max. Transfer) Szenarien. Zur Bestimmung des Sanierungswerts wird der FIV Grenzwert für Spinat eingezeichnet und beim Schnittpunkt mit der minimalen Transfergeraden den Sanierungswert festgelegt [2]. Der Sanierungswert für Blei kam hier auf ca. 1500 mg/kg zu liegen. Massgebend wurde schliesslich des Resultat aus dem Futterpflanzenanbau und der Sanierungswert bei 2000 mg/kg festgelegt. ....	21
Abbildung 5: Beispiel aus der BUWAL Richtlinie [2] für Cadmium: Punktediagramm der Boden- und Pflanzenkonzentrationen für Gras mit den eingezeichneten Best- (min. Transfer) und Worst-Case (max. Transfer) Szenarien [2]. ....	22
Abbildung 6: Herleitung des Prüfwertes für den Wirkungspfad Nahrungspflanzenanbau. Ermittlung des maximalen Boden-Pflanzentransfers nach dem realistischen Worst-Case Scenario. a) Darstellung aller Datenpunkte. b) Darstellung eines Ausschnittes für Bodenkonzentrationen zwischen 0 und 5 mg/kg und Pflanzenkonzentrationen zwischen 0 und 2 mg/kg. ....	30
Abbildung 7: Herleitung des Prüfwertes für den Wirkungspfad Futterpflanzenanbau. a) Überblick (Bodenkonzentration: 0-60 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-3 mg/kg). b) Detailansicht (Bodenkonzentration: 0-8 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-2 mg/kg). Berechnung der Prüfwerte nach Formel 1 mit Parameter in Tabelle 7. ....	32
Abbildung 8: Herleitung des Sanierungswerts für den Wirkungspfad Nahrungspflanze. Ermittlung des minimalen Boden-Pflanzentransfers nach dem Best-Case Scenario. ....	33
Abbildung 9: Herleitung des Sanierungswertes für den Wirkungspfad Futterpflanze. a) Überblick (Bodenkonzentration: 0-60 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-3 mg/kg). b) Detailansicht (Bodenkonzentration: 0-25 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-0.5 mg/kg). Berechnung des Sanierungswertes mit Formel 1 und Parameter in Tabelle 9. ....	35
Abbildung 10: Beziehung zwischen dem aus Formel 1 errechneten Prüfwert für Futterpflanzenanbau und der Steigung der Boden-Pflanzen Transfergerade (Steigung a) für das Schaf und das Rind. ....	38
Abbildung 11: Kumulative Häufigkeit der aus Transferfaktoren errechneten Sanierungswerte. A: Quecksilberkonzentrationen im Boden 0.1 – 20 mg/kg. B: Quecksilberkonzentrationen im Boden eingeschränkt auf 2 – 20 mg/kg. ....	41
Abbildung 12: Löslichkeit von $Hg^{2+}$ in Abhängigkeit des pH in Gegenwart verschiedener Sorbenzien (aus [51]). ....	42

## Tabellen

Tabelle 1: Zusammenfassung der ausländischen Prüfwerte (Anhang 2, Tabelle 2): Bereich, Mittelwert und Median in mg/kg nach Landnutzungskategorie .....	14
Tabelle 2: Ausländische Prüfwerte im Vergleich zum heute anwendbaren Schweizer Prüfwert für die landwirtschaftliche Landnutzung mit Angaben zur Quelle und dem Land.....	15
Tabelle 3: Sanierungswerte für die landwirtschaftliche Landnutzung mit Angaben zur Quelle und dem Land.....	16
Tabelle 4: Vergleich der Studien, deren Daten für die Herleitung des Quecksilber Prüf- und Sanierungswertes (landwirtschaftliche Bodennutzung) verwendet wurden. ....	24
Tabelle 5: Werte für die direkte Bodenaufnahme (d) der Nutztiere beim Weiden [2]. ....	28
Tabelle 6: Zur Abschätzung der Prüfwerte für Nahrungspflanzenanbau verwendete Parameter nach dem Prinzip RWC-Szenario (maximale Pflanzenaufnahme) und die resultierenden Prüfwerte....	29
Tabelle 7: Zur Abschätzung der Prüfwerte für Futterpflanzenanbau verwendete Parameter in Formel 1 nach dem Prinzip RWC-Szenario (maximaler Boden-Pflanzen-Transfer, Weidetier Schaf) und die resultierenden Prüfwerte.....	31
Tabelle 8: Zur Abschätzung der Sanierungswerte für Nahrungspflanzenanbau verwendete Parameter nach dem BC-Szenario (minimaler Boden-Pflanzentransfer) und der daraus resultierende Sanierungswert. ....	33
Tabelle 9: Zur Abschätzung der Sanierungswerte für Futterpflanzenanbau verwendete Parameter in Formel 1 nach dem BC-Szenario (minimaler Boden-Pflanzen-Transfer, Weidetier Rind) und der resultierende Sanierungswert. ....	34
Tabelle 10: Empfehlungen für den Quecksilber Prüfwert Nahrungspflanzenanbau und den Prüfwert Futterpflanzenanbau nach VBBo und den Sanierungswert Landwirtschaft und Gartenbau nach AltIV. ....	37
Tabelle 11: Internationaler Vergleich der Prüfwerte für Quecksilber, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink festgelegt für die landwirtschaftliche Landnutzung. ....	39
Tabelle 12: Internationaler Vergleich der Sanierungswerte für Quecksilber, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink festgelegt für die landwirtschaftliche Landnutzung.....	40

## Beratendes Konsortium

Roland Von Arx	BAFU
Christiane Wermeille	BAFU
Christoph Reusser	BAFU
Nicolas Broccard	Dienststelle für Umweltschutz, Kanton Wallis
Stéphanie Jüstrich	Dienststelle für Umweltschutz, Kanton Wallis

## Abkürzungen

AltIV	Altlastenverordnung
ART	Agroscope Reckenholz Tänikon
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BC	Best-Case
BEL	Belgien
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
CAN	Kanada
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment
Cd	Cadmium
EnvFin	Ministry of the Environment, Finland
EPA	Environmental Protection Agency
ESP	Spanien
FAO	Food and agricultural organisation of the United Nations
FIN	Finnland
FIV	Fremd- und Inhaltsstoffverordnung
FMBV	Futtermittelbuchverordnung
FP	Futterpflanzenanbau
GENCAT	Generalitat de Catalunya, Government of Catalonia
GER	Deutschland
Hg	Quecksilber
HgSO <sub>4</sub>	Quecksilbersulfat
NEPM	National Environmental Protection Measure
NP	Nahrungspflanzenanbau
OVAM	De Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij/Public Waste Agency of Flanders
Pb	Blei
PTWI	Provisional Tolerable Weekly Intake
PW	Pflanzenwachstum
RWC	Realistischer Worst Case
SFT	Statens Forurensningstilsyn (Norwegian Pollution Control Authority)
SUI	Schweiz
SWE	Schweden
USG	Umweltschutzgesetz
VBBo	Verordnung über die Belastungen des Bodens
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting , Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment)
WHO	World Health Organisation
ZEBS	Zentrale Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien

## Zusammenfassung

In der Altlastenverordnung (AltIV) und in der Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBo) fehlen die Sanierungs- bzw. Prüfwerte für Quecksilber. Aus aktuellem Anlass wurde Agroscope ART als Fachstelle mit Kompetenzen im Bodenschutz mit der Aufgabe betraut, diese Grenzwerte für die landwirtschaftliche Bodennutzung herzuleiten und Empfehlungen abzugeben.

Die Umschau nach ausländischen Grenzwerten, welche möglicherweise für die Schweiz hätten übernommen werden können, ergab Prüfwerte zwischen 0.362 (Malaysia) und 5 mg/kg (Deutschland), bzw. Sanierungswerte zwischen 2 (Deutschland, Finnland) und 6.6 mg/kg (Kanada). Es zeigte sich aber, dass diese Werte nicht direkt übernommen werden können, weil ihre Definitionen und Anwendungsbereiche nicht mit dem Schweizer Vollzugssystem übereinstimmen. Deshalb wurde beschlossen, die Grenzwerte nach der BUWAL-Richtlinie "Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten für anorganische Schadstoffe im Boden", Umweltmaterialien Nr. 83, Boden, (BUWAL 1997) herzuleiten, wodurch sie mit den schon bestehenden Grenzwerten für Blei, Cadmium, Kupfer und Zink methodisch direkt vergleichbar wurden. Diese methodische Vergleichbarkeit wurde dabei höher gewichtet als die Tatsache, dass heute evtl. modernere Herleitungsmethoden herangezogen werden könnten, wie z. B. mathematische Modellierungen.

Nach der erwähnten BUWAL-Richtlinie werden in landwirtschaftlich genutzten Böden die Wirkungspfade i) Nahrungspflanze, ii) Futterpflanze und iii) Pflanzenwachstum unterschieden. Die Prüfwerte für den Nahrungspflanzenanbau bzw. den Futterpflanzenanbau werden den beiden Wirkungspfaden i) bzw. ii) entsprechend hergeleitet. Der Sanierungswert „Landwirtschaft und Gartenbau“ wird durch Zusammenführen aller drei Wirkungspfade bestimmt.

Die Prüfwerte werden anhand des Realistischen Worst-Case Szenarios (RWC) bestimmt. Nach dem RWC wird der maximal mögliche Boden-Pflanzentransfer des Schadstoffs angenommen und jener Schadstoffgehalt im Boden bestimmt, bei dem der resultierende Schadstoffgehalt in der Pflanze den Nahrungsmittelgrenzwert bzw. den Futtermittelgrenzwert übersteigt, wobei beim Futtermittel auch die maximale, direkte Bodenaufnahme des empfindlichsten Nutztieres berücksichtigt wird.

Die Sanierungswerte werden in ähnlicher Weise bestimmt, wobei jedoch das Best-Case-Szenario verwendet wird; d.h. nur der minimal mögliche Boden-Pflanzentransfer wird angenommen und beim unempfindlichsten Nutztier die minimal mögliche direkte Bodenaufnahme.

Der minimale bzw. maximale Boden-Pflanzentransfer von Quecksilber in Nahrungs- bzw. Futtermittelpflanzen wurde mit experimentellen Daten aus der Literatur abgeschätzt. Der Nahrungspflanzen- bzw. Futterpflanzengrenzwert für Quecksilber (0.5 mg/kg bzw. 0.114 mg/kg) wurde abgeschätzt bzw. der Futtermittelbuchverordnung (FMBV) entnommen.

Der Prüfwert für Futterpflanzenanbau kam mit diesem Verfahren zwischen 0.05 und 0.15 mg/kg zu liegen und wurde hauptsächlich durch die direkte Bodenaufnahme bestimmt. Aufgrund dieser Resultate wird empfohlen den Prüfwert für Futterpflanzenanbau dem VBBo-Richtwert von 0.5 mg/kg gleichzusetzen.

Für Gemüsepflanzen ergab dieses Vorgehen einen Prüfwert von 0.85 mg/kg. Für weitere Nahrungspflanzen wie Getreide, Ölpflanzen, Obst und Beeren wurden keine verwertbaren Boden-Pflanzen-Transfer-Daten gefunden. Um unerkannte Risiken durch diese Unbekannten auszuschliessen, wird empfohlen die 0.85 mg/kg nicht direkt als Prüfwert für Nahrungspflanzen anzuwenden, sondern auf den VBBo-Richtwert von 0.5 mg/kg abzurunden. Ausserdem sieht die BUWAL-Richtlinie vor, verschiedene Prüfwerte nur dann festzulegen, wenn deren Abstand, gemessen an der Messunsicherheit, gross genug ist. Diese Einschränkung stützt die Abrundung auf 0.5 mg/kg.

Für den Sanierungswert „Landwirtschaft und Gartenbau“ ergab der Wirkungspfad Nahrungspflanzen 20 mg/kg. Der Wirkungspfad Futterpflanzen ergab einen Sanierungswert von 10 mg/kg. Der Sanierungswert für das Pflanzenwachstum wurde aufgrund von Angaben in der Literatur bei Konzentration > 50 mg/kg angesetzt. Die Zusammenführung aller drei Wirkungspfade führte zu einem empfohlenen Sanierungswert von 20 mg/kg.

Zusammenfassung der empfohlenen Grenzwerte:

	<b>Nahrungspflanzenanbau</b>	<b>Futterpflanzenanbau</b>
Prüfwert	0.5 mg/kg	0.5 mg/kg
Sanierungswert	20 mg/kg	

Diese Resultate sind mit Unsicherheiten behaftet. Einerseits streuten die zur Verfügung stehenden experimentellen Daten enorm, was die weite Spanne zwischen Prüf- und Sanierungswert zur Folge hatte. Andererseits war die Datenmenge für den Wirkungspfad Nahrungspflanzenanbau eher gering (61 Datenpaare gegenüber 126 Datenpaaren für den Futterpflanzenanbau). Deshalb mussten diese Daten in einem Datenpool zusammengefügt werden und konnten nicht, wie vorgesehen, für einzelne Spezies ausgewertet werden. Ausserdem musste ein Nahrungspflanzengrenzwert für diesen Pool abgeschätzt werden und konnte nicht, wie vorgesehen, der Fremd- und Inhaltstoffverordnung (FIV) entnommen werden.

Der durch den Nahrungspflanzenanbau bestimmte Sanierungswert ist ebenso mit diesen Unsicherheiten behaftet. Eine Plausibilisierung mit publizierten Transferfaktoren (Boden-Pflanzen-Transfer) bestätigte die enorme Streuung der zur Herleitung verwendeten experimentellen Daten. Der vorgeschlagene Sanierungswert lag im 30%-Perzentil der mit Transferfaktoren berechneten Sanierungswerte (75 Werte im Streubereich 1 bis 200 mg/kg). Da die Nahrungsmittelsicherheit durch die vorgeschriebene Gefährdungsprüfung von Böden mit Gehalten über dem Prüfwert gewährleistet ist, kann der im Vergleich mit ausländischen Werten eher hohe Sanierungswert mit geringem Sicherheitsrisiko empfohlen werden.

Im Weiteren sollte die Rolle von Methylquecksilber abgeklärt werden und geprüft werden, ob dafür separate Grenzwerte eingeführt werden müssten, wie dies z.B. in den Niederlanden der Fall ist. Bessere Korrelationen zwischen Boden- und Pflanzengehalten könnten u.U. durch die Verwendung von löslichen Gehalten im Boden anstelle der hier verwendeten Totalgehalte erzielt werden. Dadurch liessen sich solider abgestützte Grenzwerte festlegen.

# 1. Einleitung

## 1.1 Situation und Auftrag

Im Kanton Wallis wurden in der Region zwischen Visp und Niedergesteln im Rahmen von Untersuchungen der Umweltbaubegleitung der Baustelle A9 an verschiedenen Orten Quecksilberbelastungen in Böden festgestellt. Die Dienststelle für Umweltschutz des Kantons Wallis veranlasste deshalb eine historische Untersuchung nach Altlastenverordnung AltIV. Diese zeigte, dass der Grossgrundkanal zwischen den 1930 und 1970er Jahren von industriellen Abwässern der Lonza AG belastet wurde. Das in den Abwässern enthaltene Quecksilber hat sich in den Sedimenten des Kanals akkumuliert. Bei Unterhaltsarbeiten im Zeitraum zwischen 1930 und den frühen 1990er Jahren wurden die kontaminierten Sedimente und Schlämme aus dem Grossgrundkanal ausgehoben und auf angrenzendes Kulturland verteilt [1]. Es ist deshalb davon auszugehen, dass landwirtschaftliche Nutzflächen mit Quecksilber belastet sind. Die AltIV sieht vor, dass bei Schwermetallbelastungen sanierungsbedürftige Flächen bestimmt werden müssen, jedoch fehlt für Quecksilber der hierfür benötigte Konzentrationsgrenzwert (Sanierungswert).

In diesem Projekt sollte einerseits der Quecksilber-Konzentrationsgrenzwert für die Beurteilung der Sanierungsbedürftigkeit von Böden nach AltIV (Anhang 3, 1 Standorte bei landwirtschaftlicher oder gartenbaulicher Nutzung) hergeleitet werden. Zur Erfassung von potentiellen Gefährdungen durch die landwirtschaftliche Produktion sollten andererseits gleichzeitig auch Prüfwerte nach der Verordnung über die Belastungen des Bodens VBBo Anhang 1 festgelegt werden. Das Ziel war, allgemeingültige Prüf- und Sanierungswerte für Quecksilber zu erarbeiten, weshalb in diesem Projekt nicht spezifisch auf die Situation im Kanton Wallis eingegangen wurde. Die Forschungsanstalt Agroscope ART wurde als Fachstelle mit Kompetenzen im Bodenschutz mit der Aufgabe betraut.

Basierend auf der Anfrage der Dienststelle für Umweltschutz des Kantons Wallis vom 15. Februar 2012 und der Offerte von der Forschungsanstalt Agroscope ART vom 12. Juli 2012 wurde der Vertrag für die Durchführung des Projektes zwischen dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der Forschungsanstalt Agroscope ART abgeschlossen. Die Projektkosten wurden vom BAFU und vom Kanton Wallis gemeinsam getragen.

Der Auftrag enthält folgende Teile:

- **Recherche:** In einer Literaturstudie soll eine Umschau nach bereits bestehenden Sanierungswerten für Quecksilber in Ländern mit hohen Umweltstandards gehalten werden. Recherchiert werden soll sowohl in der wissenschaftlichen Literatur als auch mit offenen Internet-Suchmaschinen. Ferner sollen Experten im In- und Ausland befragt werden.
- **Kritische Beurteilung der gefundenen Sanierungswerte:** Die Herleitungen der gefundenen Sanierungswerte sollen kritisch beurteilt werden. Die verwendeten experimentellen Daten und Studien sollen beschafft, nachvollzogen und aus heutiger Sicht gewürdigt werden.
- **Qualitätssicherung:** Die gefundenen Sanierungswerte sollen durch eigene Abschätzungen untermauert werden. Das Vorgehen erfolgt nach der BUWAL Richtlinie „Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten für anorganische Schadstoffe im Boden“, Umweltmaterialien Nr. 83, Boden, BUWAL 1997 [2]. Damit ist die methodische Vergleichbarkeit mit den übrigen in der AltIV aufgeführten Grenzwerte gewährleistet. Die hierzu benötigten Daten zum Boden-Pflanzen-Transfer von Quecksilber sollen - soweit vorhanden - aus der Literatur beschafft werden. Eigene Experimente sollen aus Aufwandsgründen keine durchgeführt werden. Weil sich die Prüfwerte nach VBBo aus denselben Daten ableiten lassen, sollen diese mitgeschätzt werden. Allerdings hängen die Abschätzungen der Prüf- und Sanierungswerte vom Vorhandensein und von der Qualität der verfügbaren experimentellen Daten ab.

Organische Quecksilberverbindungen wie z.B. Methylquecksilber sollen nur im Quecksilber-Totalgehalt berücksichtigt werden. Die Grenzwertfestlegung in Bezug auf die toxikologische Sonderstellung von organischen Quecksilberverbindungen war nicht Gegenstand dieses Auftrages.

## 1.2 Quecksilber

Quecksilber ist in der Umwelt in drei Formen vorhanden: (i) Als elementares Quecksilber ( $\text{Hg}^0$ ) in Dampfform in der Atmosphäre oder flüssig als metallisches Quecksilber, (ii) als anorganische Quecksilberverbindungen mit nichtmetallischen Elementen wie Schwefel und Chlor und (iii) als organische Quecksilberverbindungen. Quecksilber und seine Verbindungen weist eine hohe Reaktivität gegenüber Amino- und Sulfhydrylgruppen auf. Dadurch werden Enzyme und Strukturproteine in ihrer Funktion im Körper beeinträchtigt. Als empfindlichstes Zielorgan von Quecksilber steht das zentrale Nervensystem im Vordergrund [3].

Elementares Quecksilber wird vor allem durch das Einatmen von Quecksilberdämpfen aufgenommen. Im akuten Fall kann es bereits in der Lunge zu Entzündungen der Bronchien kommen, meist mit Atemnot und Zyanose verbunden. Bei chronischen Belastungen zeigen sich die Effekte durch Zittern, Wesensveränderungen und Verminderung des Kurzzeitgedächtnisses. Zudem ist die Niere ein Zielorgan und kann geschädigt werden. Anorganische Quecksilberverbindungen sind sehr ätzend und führen bei der oralen Aufnahme zu Verätzungen des Rachens und der Speiseröhre, Erbrechen, Kreislaufkollaps und im schlimmsten Fall zu tödlichen Schocks. Bei organischen Quecksilberverbindungen steht vor allem die hohe Toxizität kurzkettiger Alkylquecksilberverbindungen, wie Methylquecksilber im Vordergrund. Methylquecksilber entsteht in der Umwelt durch Biomethylierung von anorganischem Quecksilber durch Mikroorganismen, welche sich in Sedimenten und Schwebstoffen von wässrigen Systemen befinden. Es wird in der Nahrungskette, insbesondere in Fischen angereichert. Die toxische und chronisch-toxische Wirkung von Methylquecksilber betrifft ebenfalls hauptsächlich das zentrale Nervensystem und wirkt sich während der Entwicklung besonders schädlich aus. Bei akuter Belastung können Krämpfe und spastische Lähmungen auftreten, während chronische Belastungen durch Methylquecksilber zu Erblindung, Taubheit und einer Verzögerung der mentalen Entwicklung führen können [3].

Quecksilber ist ein natürlicher Bestandteil in vielen Mineralien, vor allem in magmatischem Gestein und in von Vulkanismus geprägten Gebieten. Quecksilber hat eine grosse Affinität zu Kohlenstoff und ist daher auch in Öl, Schiefergestein und Kohle enthalten. Quecksilber wurde bereits von den Griechen für medizinische und religiöse Zwecke genutzt. Heute sind die wichtigsten anthropogenen Quellen von Quecksilber das Verbrennen von Kohle, der Abbau von Metallen, und verschiedene industrielle Aktivitäten wie die Zementproduktion [4].

Die grösste Quecksilberbelastung der allgemeinen Bevölkerung resultiert aus dem Verzehr von Fisch in Form von Methylquecksilber und aus Dentallegierungen (Amalgam) in Form von dampfförmigem Quecksilber. Abschätzungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) ergaben, dass eine Person pro Woche maximal 100  $\mu\text{g}$  Methylquecksilber und total maximal 300  $\mu\text{g}$  Quecksilber aufnehmen darf, ohne dass mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu rechnen ist [3]. Anlässlich einer Revision im Jahr 2010 hat die WHO die provisorische tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (PTWI) von 0.005 auf 0.004 mg/kg Körpergewicht korrigiert [5]. Aufgrund der hohen Toxizität unterliegt Quecksilber und seine Verbindungen einem weitreichenden Verbot. Es wird heute nur noch in wenigen Bereichen verwendet [3]. Quecksilber wurde von der Lonza AG in grossen Mengen als Katalysator in der Produktion von Acetaldehyd, Vinylchlorid und Chlorgas eingesetzt [1].

## 1.3 Schweizer Gesetzgebung

Die Schweizer Grenzwerte zum chemischen Bodenschutz sind in der Verordnung über Belastungen des Bodens VBBo bzw. in der Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung) AltIV festgehalten. Ziel der VBBo ist die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Sie enthält Richt-, Prüf- und Sanierungswerte und beauftragt Bund und Kantone mit der Beurteilung und

Behandlung von belasteten Böden anhand dieser definierten Grenzwerte [6]. Die AltIV soll die Sanierung belasteter Standorte sicherstellen, falls schädliche oder lästige Einwirkungen vorhanden sind oder die Gefahr dazu besteht. Ausserdem legt sie die Verfahrensschritte für die Bearbeitung belasteter Standorte fest. Artikel 2 definiert belastete Standorte als Orte, deren Belastung von Abfällen stammt und die eine beschränkte Ausdehnung aufweisen. Dies beinhaltet Ablagerungsstandorte, Betriebsstandorte und Unfallstandorte. Die Altlastenverordnung legt Sanierungswerte fest und definiert die Sanierungsmassnahmen. Demnach beseitigen Sanierungsmassnahmen umweltgefährdende Stoffe (Dekontamination) oder verhindern langfristig die Ausbreitung der umweltgefährdenden Stoffe (Sicherung) [7].

Im Wortlaut sind in der VBBo bzw. in der AltIV die Grenzwerte nach folgenden Kriterien festgehalten:

- Richtwert [6]

Art. 8: *Massnahmen der Kantone bei Überschreiten der Richtwerte*

<sup>1</sup> *Sind in einem Gebiet die Richtwerte überschritten oder steigt die Bodenbelastung deutlich an, so ermitteln die Kantone die Ursachen der Belastung.*

<sup>2</sup> *Sie klären ab, ob die Massnahmen nach den Vorschriften des Bundes in den Bereichen Gewässerschutz, Katastrophenschutz, Luftreinhaltung, umweltgefährdende Stoffe und Organismen sowie Abfälle und physikalische Belastungen genügen, um im betroffenen Gebiet den weiteren Anstieg der Belastung zu verhindern.*

<sup>3</sup> *Genügen diese Massnahmen nicht, so treffen die Kantone weitergehende Massnahmen nach Artikel 34 Absatz 1 USG. Sie teilen diese vorher am BAFU mit.*

<sup>4</sup> *Die Kantone führen die Massnahmen innert fünf Jahren durch, nachdem die Bodenbelastung festgestellt worden ist. Sie legen die Fristen nach der Dringlichkeit des Einzelfalls fest.*

- Prüfwert [6]

Art. 9: *Massnahmen der Kantone bei Überschreitung der Prüfwerte:*

<sup>1</sup> *Sind in einem Gebiet die Prüfwerte überschritten, so prüfen die Kantone, ob die Belastung des Bodens Menschen, Tiere oder Pflanzen konkret gefährdet.*

<sup>2</sup> *Bei konkreter Gefährdung schränken sie die Nutzung des Bodens so weit ein, dass die Gefährdung nicht mehr besteht.*

- Sanierungswert [6, 7]

VBBo:

Art 10: *Massnahmen der Kantone bei Überschreitung der Sanierungswerte:*

<sup>1</sup> *Sind in einem Gebiet die Sanierungswerte überschritten, so verbieten die Kantone die davon betroffenen Nutzungen.*

<sup>2</sup> *In Gebieten mit raumplanerisch festgelegter gartenbaulicher, land- oder forstwirtschaftlicher Nutzung ordnen sie Massnahmen an, mit denen die Bodenbelastung soweit unter die Sanierungswerte gesenkt wird, dass die beabsichtigte standortübliche Bewirtschaftungsart ohne Gefährdung von Menschen, Tieren und Pflanzen möglich ist.*

AltIV:

Art. 12: *Schutz vor Belastungen des Bodens:*

<sup>1</sup> *Ein Boden, der ein belasteter Standort oder ein Teil davon ist, ist sanierungsbedürftig, wenn ein in ihm enthaltener Stoff einen Konzentrationswert nach Anhang 3 (Konzentrationswerte für die Beurteilung der Sanierungsbedürftigkeit von Böden) überschreitet. Dies gilt auch für Böden, für die bereits eine Nutzungseinschränkung verfügt wurde.*

<sup>2</sup> Böden, die nach Absatz 1 nicht sanierungsbedürftig sind, obwohl sie belastete Standorte oder Teile davon sind, und Einwirkungen von belasteten Standorten auf Böden werden gemäss der Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens beurteilt.

## 2. Prüf- und Sanierungswerte im Ausland

Mit der Recherche nach Prüf- und Sanierungswerten in ausländischen Regelwerken sollte geprüft werden, ob schon bestehende Prüf- und Sanierungswerte in die Schweizer Verordnungen übernommen werden können. Es wurde vorausgesetzt, dass die Herleitungen nachvollziehbar und aus heutiger Sicht toxikologisch plausibel sind. Im Weiteren sollten die Werte mit dem in den Schweizer Verordnungen festgelegten Vollzugssystemen (Konsequenzen bei Überschreitung) übereinstimmen.

Neben der Literaturstudie wurde auch eine Expertenbefragung im In- und Ausland durch ART und durch das BAFU durchgeführt (Liste der Kontaktpersonen im Anhang 1). Für die Beurteilung wurden den erhaltenen und gefundenen 126 Grenzwerten Attribute aus den Kategorien „Quelle“, „Nutzungskategorie“ und „Grenzwert-Typ“ zugeteilt (Abbildung 1). Der Grenzwert-Typ „Richtwerte und Hintergrundwerte“ wurde definiert als Werte unter denen keine Gefahr für Mensch, Tier oder Umwelt besteht. „Prüfwerte“ entsprechen Werten, bei deren Überschreitung eine Prüfung der möglichen Gefährdungen notwendig wird und als „Sanierungswerte“ gelten Werte bei deren Überschreitung Massnahmen zu ergreifen sind. Die Schnittmenge der Daten mit den Attributen „Gesetz und Verordnung“, „Landwirtschaft“ und „Prüfwert“ bzw. „Sanierungswert“ wurden für weitere Betrachtungen herangezogen, d.h. es wurden nur noch Werte betrachtet, die sich auf landwirtschaftliche Landnutzung beziehen, in einem Gesetz verankert sind und der Schweizer Definition eines Prüf- respektive Sanierungswertes entsprechen. Andere Werte wurden aufgenommen falls zufällig gefunden, wurden aber nicht spezifisch gesucht. Alle 126 Werte sind in Anhang 2 in einzelnen Tabellen nach Grenzwert-Typ und Landnutzungskategorie aufgezeigt.



Abbildung 1: Drei Kategorien, nach welchen die ausländischen Grenzwerte geordnet wurden: Quelle, Nutzungskategorie und Grenzwert-Typ. Die Daten der Schnittmenge mit den Attributen Landwirtschaft, Gesetz/Verordnung und Prüf- bzw. Sanierungswert wurde weiter in Betracht gezogen.

### 2.1 Richtwerte

Die ausländischen Richtwerte und Hintergrundwerte liegen in einem Bereich zwischen 0.05 mg/kg (Belgien und Norwegen) und 3.5 mg/kg (Frankreich). Der Durchschnitt der gefundenen Richtwerte ist 0.6 mg/kg. Der Schweizer Richtwert für Quecksilber ist bei 0.5 mg/kg festgesetzt [6].

## 2.2 Prüfwerte

Für die ausländischen Prüfwerte wurden die Bereiche und Mittelwert für die einzelnen Landnutzungskategorien berechnet (Tabelle 1). Die Werte variieren in allen Landnutzungskategorien stark. Gewisse Länder wie zum Beispiel das Vereinigte Königreich und Australien haben keinen Grenzwert festgelegt für die landwirtschaftliche Landnutzung. Andere wie zum Beispiel die Niederlande haben für ihre Grenzwerte keine Landnutzungskategorie definiert.

Tabelle 1: Zusammenfassung der ausländischen Prüfwerte (Anhang 2, Tabelle 2): Bereich, Mittelwert und Median in mg/kg nach Landnutzungskategorie .

	<b>Bereich</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Median</b>	<b>Anzahl Werte</b>
Landwirtschaft	0.362 - 10	2.8	1	7
Industrie und Gewerbe	2 - 4000	580	65	18
Kleingärten, Spielplätze, Sport und Erholung	1 - 400	51	10	19
Wohngebiete	0.83- 600	74	16	14
Keine Kategorie	0.1 - 36	6.3	2.2	24

Die Prüfwerte, welche sich auf die Landwirtschaft beziehen, sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Prüfwerte von Malaysia und Kanada sind Grenzwertempfehlungen und haben keinen Gesetzescharakter.

Nach VBBo wird bei Überschreitung des Prüfwerts eine Prüfung eingeleitet, um festzustellen, ob Menschen, Tiere oder Pflanzen konkret gefährdet sind. Bei konkreter Gefährdung wird die Bodennutzung eingeschränkt, so dass keine Gefahr mehr besteht. Im Handbuch „Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden“ [8] wird auf die von Eikmann und Kloke [9] hergeleiteten Grenzwerte verwiesen, falls in der VBBo kein Grenzwert angegeben ist. Nach Eickmann und Kloke liegt der Prüfwert für landwirtschaftliche Nutzflächen bei 10 mg/kg. Unter diesem Wert besteht keine Gefahr für Mensch und Umwelt. In Deutschland muss nach Definition der Bundesbodenschutzverordnung bei Überschreitung des Prüfwerts von 5 mg/kg im Ackerbau anhand einer Prüfung festgestellt werden, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt [10]. Der Prüfwert aus Katalonien gilt als tolerierbare Schadstoffgrenze für die menschliche Gesundheit und Ökosysteme. Wird der Prüfwert von 2 mg/kg überschritten, müssen die Risiken für Mensch und Umwelt überprüft werden [11]. Schweden hat seinen Prüfwert im Jahr 2012 überarbeitet und den Wert neu bei 0.25 mg/kg festgesetzt. Wenn dieser Wert überschritten wird, besteht nach Definition die Gefahr für unerwünschte Effekte. Es muss eine Prüfung durchgeführt werden, um festzustellen ob eine Sanierung notwendig ist [12].

Die Definitionen unterscheiden sich allerdings leicht: Deutschland, Schweden und Eikmann und Kloke geben an, dass unterhalb des Prüfwerts keine Gefahr bestehe für Mensch, Tier oder Umwelt. Dies ist in der Schweizer Gesetzgebung beim Richtwert der Fall. Zwischen Richtwert und Prüfwert ist nach VBBo die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht mehr gewährleistet. Die Gemeinsamkeit all dieser Prüfwerte ist, dass bei Überschreitung dieser Werte eine Prüfung oder Risikoabschätzung durchgeführt werden muss. Die hier erläuterten Definitionen der Prüfwerte sind in Anhang 3 Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 2: Ausländische Prüfwerte im Vergleich zum heute anwendbaren Schweizer Prüfwert für die landwirtschaftliche Landnutzung mit Angaben zur Quelle und dem Land.

	Prüfwert [mg/kg]	Kommentar	Quelle
Eikmann und Kloke	10		Mailänder und Hämmann [8]
Deutschland	5	Ackerbau	BBodSchV [10]
Kanada <sup>1)</sup>	0.5		Eisler [13]
Litauen	0.5		Email von Kestutis Kadunas
Malaysia <sup>2)</sup>	0.362		Eisler [13]
Schweden	0.25		EPA [14]
Katalonien	2		GENCAT [11]

<sup>1)</sup> Proposed mercury criteria for the protection of selected natural resources

<sup>2)</sup> Proposed mercury criteria for the protection of human health

## 2.3 Sanierungswerte

Die gefundenen ausländischen Sanierungswerte sind im Anhang 2 Tabelle 3 zusammengefasst. Die Werte, welche sich auf die Landnutzungskategorie Landwirtschaft beziehen, sind auszugsweise in Tabelle 3 zusammengefasst.

Es wurden nicht viele Sanierungswerte gefunden, die sich auf andere Bereiche als die Landwirtschaft beziehen. Für die Schweiz gilt ein Sanierungswert von 5 mg/kg auf Spielplätzen und für Finnland ist ein Sanierungswert von 5 mg/kg auf Industriestandorten festgelegt. Die restlichen Werte beziehen sich auf die Landnutzungskategorie Landwirtschaft.

Klar als Ausreisser zeigt sich der Wert von Eikmann und Kloke [9] mit 50 mg/kg. Die anderen Werte variieren zwischen 2 und 6.6 mg/kg. Kabata-Pendias und Sadurski [15] geben zudem einen allgemeinen Bereich für die „maximal erlaubte“ Quecksilberbelastung in landwirtschaftlichen Böden von 0.5 bis 5 mg/kg an. Diese Definition ist schwierig einzuordnen, es könnte sich hier auch um einen Prüfwert handeln.

In der AltIV ist festgelegt, dass bei Überschreitung des Sanierungswerts die davon betroffene Nutzung verboten wird und der Standort durch Sicherung oder Dekontamination saniert werden muss [7]. Nach Eikmann und Kloke [9] sind bei einer Überschreitung des Bodenwert III Schäden an Schutzgütern nicht mehr auszuschliessen. Es sind Überlegungen einzuleiten, wie die gefahrlose Nutzung des Standortes möglich gemacht werden kann und gegebenenfalls müssen Sanierungen gefordert werden. Der Massnahmenwert in Deutschland liegt bei 2 mg/kg für Grünlandflächen. Er ist definiert als Wert bei dessen Überschreitung von einer schädlichen Bodenveränderung auszugehen ist und Massnahmen erforderlich sind. Als Massnahmen gelten Dekontamination (Beseitigung oder Verminderung des Schadstoffs), Sicherung (langfristige Verhinderung oder Verminderung der Schadstoffausbreitung) und Schutz- und Beschränkungsmassnahmen (z.B. Nutzungseinschränkungen) [10]. In Kanada ist der Sanierungswert bei 6.6 mg/kg festgelegt. Es handelt sich hierbei um die Empfehlung der Environmental Agency Kanadas. Die Gesetze zum Bodenschutz werden in den einzelnen Provinzen festgelegt. Zum Beispiel Alberta hat die vorgeschlagenen Werte der Umweltbehörde direkt übernommen [16]. Die kanadischen „guidelines“ sollen als Massstab genutzt werden, um über weitere Untersuchungen oder Sanierungsmassnahmen zu entscheiden. Sie werden aber hauptsächlich als Sanierungsziel eingesetzt. Bei Überschreitung der „guidelines“ soll saniert werden, falls dies aber aus technischen oder anderen Gründen nicht möglich ist, können auch Landnutzungsrestriktionen für den Schutz von Mensch und Umwelt eingesetzt werden [17]. In Flandern gilt ein Sanierungswert von 2.9 mg/kg. Der Wert zeigt die Bodenbelastung an, welche ein erhebliches Risiko für Mensch und Umwelt darstellt. Bei einer Überschreitung muss eine Sanierung durchgeführt werden. Als Sanierungsmassnahmen gelten die Entfernung, Neutralisierung, Immobilisierung oder Abschirmung des Schadstoffs im Boden. Falls eine Sanierung mit den bestmöglichen Techniken und ohne überhöhte Kosten zu verursachen nicht

möglich ist, können auch Landnutzungsrestriktionen angewendet werden [18]. Finnland definiert ihren Sanierungswert von 2 mg/kg als Werkzeug, um die Bodenbelastung und die Notwendigkeit einer Sanierung zu beurteilen. Wird dieser Wert überschritten, muss der Boden wieder so in Stand gebracht werden, dass keine Schäden entstehen und dass keine Gefahr besteht für Mensch und Umwelt. Es werden keine genauen Angaben zu den Massnahmen gemacht [19].

Vergleicht man diese Sanierungswerte mit der Schweizer Definition nach AltIV, stellt man fest, dass die Schweizer Gesetzgebung hier bedeutend schärfer ist. Nach Überschreitung des Sanierungswerts muss in der Schweiz saniert werden. Landnutzungsänderungen sind als Massnahme nicht zugelassen. Bei den ausländischen Sanierungswerten ist dies in Kanada, Flandern und Deutschland noch möglich. Eikmann und Kloke [9] und Finnland definieren die Massnahmen nicht klar. Die Gemeinsamkeit aller Sanierungswerte ist, dass in allen Fällen bei der Überschreitung Massnahmen ergriffen werden müssen. Die hier erläuterten Definitionen der ausländischen Sanierungswerte sind in Anhang 3, Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 3: Sanierungswerte für die landwirtschaftliche Landnutzung mit Angaben zur Quelle und dem Land.

Land	Sanierungswert [mg/kg]	Kommentar	Quelle
Eikmann und Kloke	50		Mailänder und Hämman [8]
Flandern	2.9		OVAM [18]
Deutschland	2	Grünland	BBodSchV [10]
Finnland	2	Nicht industrielle Landnutzung	EnvFin [19]
Kanada	6.6		CCME [17]

## 2.4 Fazit

Die Umschau nach ausländischen Grenzwerten für Quecksilber hat gezeigt, dass die Prüf- und Sanierungswerte zwischen den Ländern stark variieren. Abgebildet im Schweizer-System der Grenzwerte (Abbildung 2) findet man die Prüfwerte vernünftig integrierbar. In allen Systemen wird bei Überschreitung des Prüfwertes eine Gefährdungsabschätzung vorgenommen. Falls eine Gefährdung vorliegt, werden Massnahmen eingeleitet, so dass die Gefährdung aufgehoben wird. Im Ausland schliessen die Massnahmen vielfach Sanierungen ein, während in der Schweiz unterhalb des Sanierungswertes nur Nutzungseinschränkungen verfügt werden können. Andererseits liegen ausländische Massnahme- bzw. Sanierungswerte im Schweizer System in einer Übergangszone zwischen Prüf- und Sanierungswerten (Abbildung 2), weil als Massnahme auch Nutzungseinschränkungen zugelassen sind, die in der Schweiz nur im Konzentrationsbereich zwischen Prüf- und Sanierungswert verfügt werden. Überschreitungen des Sanierungswertes in der Schweiz haben zwingend Sanierungen zur Folge, weil Nutzungseinschränkungen aufgrund der Definition des Sanierungswertes nicht mehr möglich sind. So gesehen, rechtfertigt sich ein höherer Sanierungswert in der Schweizer Gesetzgebung, während der Prüfwert (Auslöser einer Gefährdungsprüfung) im Bereich der ausländischen Werte plausibel ist. Die fehlende Kompatibilität der ausländischen Grenzwerte mit dem Schweizer System legt nahe, dass zumindest der Sanierungswert nicht direkt übernommen werden kann und nach dem Schweizer System hergeleitet werden muss. Weitere Recherchen über die Herleitungen der ausländischen Grenzwerte wurden deshalb nicht vorgenommen.

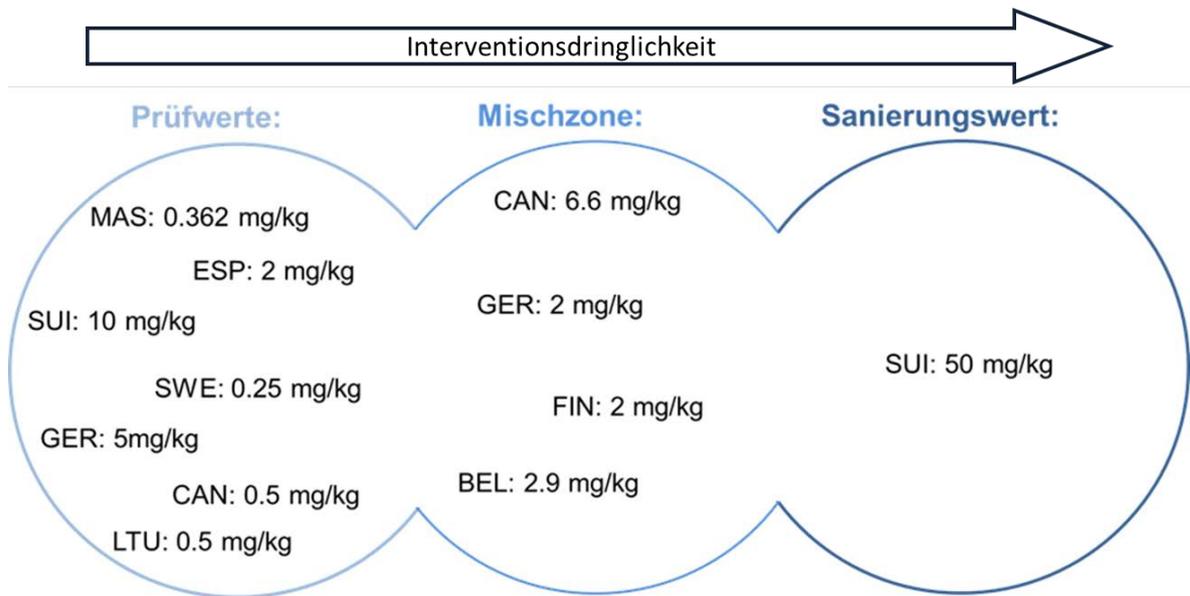


Abbildung 2: Abbildung der ausländischen Grenzwerte im System der Schweizer Prüf- und Sanierungswerte mit der Mischzone zwischen Prüf- und Sanierungswert (BEL: Flandern (Belgien), CAN: Kanada, ESP: Katalonien (Spanien), FIN: Finnland, GER: Deutschland, LTU: Litauen, MAS: Malaysia, SUI: Schweiz, SWE: Schweden). Keine ausländische Gesetzgebung ist so strikt bei der Verordnung von Sanierungsmassnahmen, wie die Schweizer AltIV.

### 3. Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten nach der BUWAL Richtlinie [2]

Es scheint nicht sinnvoll, den Sanierungswert für Quecksilber nach AltIV bzw. nach VBBo aus ausländischen Regelwerken zu übernehmen, weil die Vollzugssysteme zu wenig deckungsgleich sind (siehe Kapitel 2). Bei den Prüfwerten scheint die Deckungsgleichheit grösser und eine Übernahme in die VBBo könnte in Betracht gezogen werden. Allerdings gibt es auch hier Unschärfen, jedoch bezüglich des Schweizer Richtwertes. Einerseits werden ausländische Prüfwerte als sichere Grenzwerte bezeichnet, die vor schädlichen Einflüssen auf Mensch, Tier- und Umwelt schützen, während in der Schweiz Konzentrationen zwischen Prüf- und Richtwert die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht mehr gewährleisten. Andererseits unterscheiden ausländische Prüfwerte nicht zwischen Nahrungspflanzenanbau und Futterpflanzenanbau.

Die Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten nach der BUWAL Richtlinie „Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten für anorganische Schadstoffe im Boden“, Umweltmaterialien Nr. 83, Boden, BUWAL 1997 [2] hat den Vorteil, dass die so erzeugten Grenzwerte mit den bereits bestehenden für Blei, Cadmium, Kupfer und Zink methodisch direkt vergleichbar sind.

#### 3.1 Bestimmungsmethoden

##### 3.1.1 Prinzip

Nach der VBBo werden separate Prüfwerte für die Nutzungen (i) Nahrungspflanzenanbau, (ii) Futterpflanzenanbau und (iii) für Nutzungen mit möglicher direkter Bodenaufnahme durch den Menschen (spielende Kinder) festgelegt [6]. Der Sanierungswert wird für die Nutzungskategorien (i) Landwirtschaft und Gartenbau, (ii) Haus- und Familiengärten und (iii) für Kinderspielplätze festgesetzt [7].

Anhand dieser vordefinierten Nutzungsarten werden in der BUWAL Richtlinie [2] Wirkungspfade definiert. Diese Wirkungspfade sind:

Nahrungspflanze: Boden → Nahrungspflanze → Mensch

Futterpflanze: Boden → Futterpflanze → Tier → Mensch / Boden → Tier → Mensch

Pflanzenwachstum: Boden → Pflanze

Direkte Bodenaufnahme: Boden → Mensch (spielende Kinder)

Für jeden dieser Wirkungspfade kann ein Prüf- und Sanierungswert bestimmt werden. Die Herleitung erfolgt anhand einer Gefährdungsabschätzung. Dabei wird der Schadstofftransfer vom Boden zum Schutzgut untersucht (Gefährdungsanalyse) und die Exposition ab welcher eine Gefährdung besteht, anhand eines Bewertungskriteriums, ermittelt und bewertet (Gefährdungsbewertung).

In diesem Projekt wurden nur die landwirtschaftlichen Bodennutzungen betrachtet. Demzufolge wurden Prüfwerte für die Wirkungspfade Futterpflanzenanbau und Nahrungspflanzenanbau sowie ein Sanierungswert für Landwirtschaft und Gartenbau hergeleitet. Der Sanierungswert für Landwirtschaft und Gartenbau setzt sich zusammen aus den Wirkungspfaden Nahrungspflanze, Futterpflanze und Pflanzenwachstum.

Ein Prüfwert soll den Schadstoffgehalt im Boden angeben, ab dem eine konkrete Gefährdung von Menschen, Tieren oder Pflanzen möglich ist. Zur Herleitung des Prüfwerts müssen also Szenarien gewählt werden, welche sicherstellen, dass keine Gefährdungssituation übergangen wird; d.h. auch im empfindlichsten denkbaren Szenario (Worst-Case) muss eine mögliche Gefährdung durch das Über-

schreiten des Prüfwerts angezeigt werden. Der Gesetzgeber verlangt aber, dass eine Gefährdung konkret sein muss, um eine rechtliche Handlung auszulösen. Das heisst es muss eine Beeinträchtigung vorhanden sein oder nach dem gewöhnlichen Lauf der Dinge muss mit einer Beeinträchtigung gerechnet werden. Deshalb wird zur Herleitung des Prüfwerts das Realistische „Worst-Case-Szenario“ (RWC) definiert. Diesem RWC entsprechend wird angenommen, dass der Schadstofftransfer vom Boden in die Pflanze maximal ist [2].

Bei der Herleitung des Sanierungswerts wird vom „Best-Case-Szenario“ (BC) ausgegangen, d.h. auch im besten Fall, nachdem die möglichen Nutzungsänderungen getroffen wurden, besteht eine Gefährdung von Menschen, Tieren oder Pflanzen. Bei Überschreitung des Sanierungswerts ist die Nutzung ohne Gefährdung nicht mehr möglich. Nach dem BC Szenario geht man davon aus, dass der Schadstofftransfer zwischen Boden und Pflanzen minimal ist [2].

### **3.1.2 Methoden zum Wirkungspfad Nahrungspflanzen**

Für den Wirkungspfad Nahrungspflanze wird die Gefährdungsanalyse durch die Quantifizierung des Schadstofftransfers vom Boden in die Pflanze anhand einer qualitativen Datenanalyse ermittelt. Zur Herleitung der Prüf- und Sanierungswerte werden Boden- und Pflanzenkonzentrationen aus Studien zum Boden-Pflanzen Transfer von Nahrungspflanzen auf chemisch belasteten Böden zusammengetragen und in einem Punktediagramm dargestellt. Anhand der Datenpunktwolke im Diagramm wird empirisch der minimale und der maximale Boden-Pflanzen Transfer festgelegt und im Diagramm eingezeichnet (Beispiel zu Blei in Abbildung 3 und Abbildung 4). Damit wird eine qualitative Aussage über den Zusammenhang zwischen Boden- und Pflanzengehalt des Schadstoffs gemacht [2].

#### Bestimmung des Prüfwertes für Nahrungspflanzenanbau

Der Prüfwert Nahrungspflanzenanbau soll einen Schadstoffgehalt im Boden anzeigen, bei dessen Überschreitung eine nicht tolerierbare Erhöhung des Schadstoffgehalts in essbaren Teilen der Nahrungspflanze möglich ist. Deshalb werden bei der Herleitung Höchstkonzentrationen in Lebensmitteln als Bewertungskriterium für die Gefährdungsabschätzung angewendet. Die Höchstkonzentrationen werden der Liste der Toleranzwerte in der Verordnung über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (Fremd- und Inhaltsstoffverordnung, FIV [20]) entnommen.

Das anzuwendende RWC Szenario umfasst folgende Punkte:

- Es werden Nahrungspflanzen mit grossem Akkumulationspotential zur Herleitung herangezogen.
- Der Schadstofftransfer vom Boden in die Pflanze wird als maximal angenommen.
- Der Eigenkonsum aus selbst angebauten Nahrungspflanzen auf einer Fläche wird als hoch angenommen.

Das Vorgehen zur Herleitung des Prüfwertes ist in Abbildung 3 am Beispiel für Blei in Spinat dargestellt. Anhand der Punktwolke wird die maximale Boden-Pflanzen-Transfergerade ermittelt und eingezeichnet. Der Schnittpunkt, wo die maximale Transfergerade den FIV-Toleranzwert (Bewertungskriterium) der unter Prüfung stehenden Nahrungspflanze übersteigt, bezeichnet den Prüfwert.

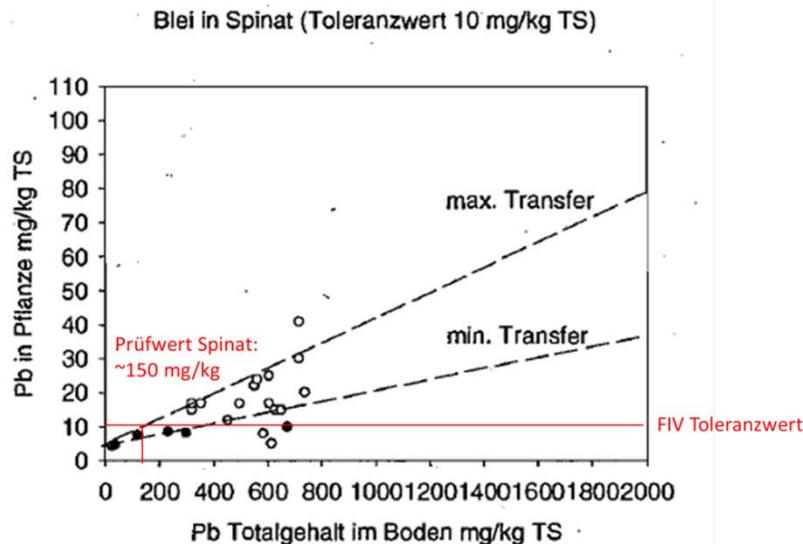


Abbildung 3: Beispiel aus der BUWAL Richtlinie [2]: Punktediagramm der Bleikonzentrationen in Boden- und Pflanzenproben für Spinat mit den eingezeichneten Best- (min. Transfer) und Worst-Case (max. Transfer) Szenarien. Zur Bestimmung des Prüfwerts wird der FIV Toleranzwert für Spinat eingezeichnet und beim Schnittpunkt mit der maximalen Transfergeraden den Prüfwert bestimmt [2].

Der Prüfwert Nahrungspflanzenanbau für Blei kam auf ca. 150 mg/kg zu liegen (Abbildung 3), wurde aber aufgrund der kritischen Würdigung bei 200 mg/kg festgelegt.

#### Bestimmung des Sanierungswertes Nahrungspflanze:

Für die Herleitung des Sanierungswertes Nahrungspflanze werden anstelle der Toleranzwerte die FIV-Grenzkonzentrationen [20] in Lebensmitteln als Bewertungskriterium für die Gefährdungsabschätzung angewendet. Bei Überschreitung der Grenzkonzentration werden gehandelte Lebensmittel aus dem Verkehr gezogen. Der Sanierungswert zeigt also einen Schadstoffgehalt im Boden, bei dessen Überschreitung eine konkrete Gefahr für den Menschen wahrscheinlich ist. Fehlen die Grenzwerte, wird nach der BUWAL Richtlinie [2] der dreifache Toleranzwert verwendet.

Das anzuwendende BC Szenario lautet wie folgt:

- Der Schadstofftransfer vom Boden in die Pflanze wird als minimal angenommen (nicht akkumulierende oder ausschliessende Nahrungspflanze).

Das grafische Vorgehen ist im Prinzip gleich wie für den Prüfwert, ausser dass anstelle des maximalen der minimale Boden-Pflanzen-Transfer der unter Prüfung stehenden Nahrungspflanze verwendet wird (Abbildung 4). Der Sanierungswert wird durch den Schnittpunkt mit dem FIV-Grenzwert bzw. dreifachen Toleranzwert der betrachteten Nahrungspflanze bestimmt. Der endgültige Sanierungswert wird jedoch erst nach der Zusammenführung (Kapitel 3.1.5.) festgelegt.

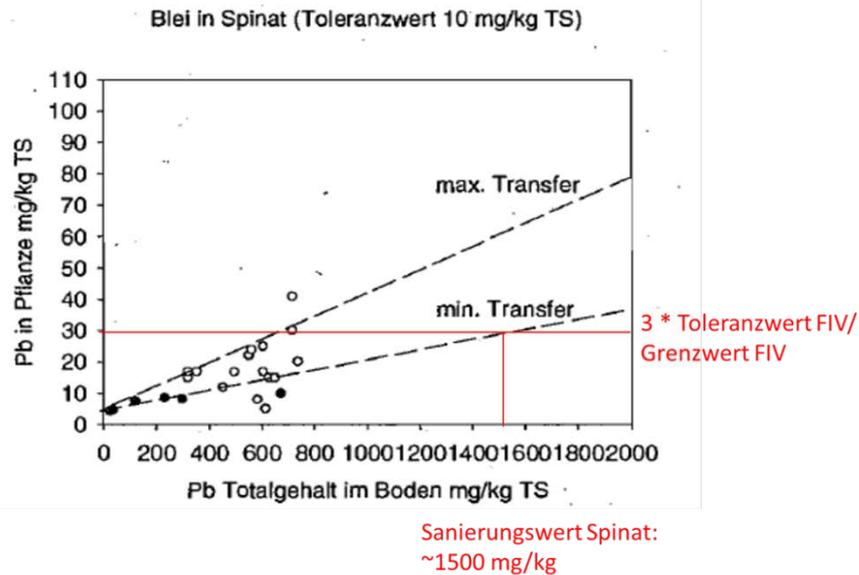


Abbildung 4: Beispiel aus der BUWAL Richtlinie [2]: Punktediagramm der Bleikonzentrationen in Boden- und Pflanzenproben für Spinat mit den eingezeichneten Best- (min. Transfer) und Worst-Case (max. Transfer) Szenarien. Zur Bestimmung des Sanierungswerts wird der FIV Grenzwert für Spinat eingezeichnet und beim Schnittpunkt mit der minimalen Transfergeraden den Sanierungswert festgelegt [2]. Der Sanierungswert für Blei kam hier auf ca. 1500 mg/kg zu liegen. Massgebend wurde schliesslich des Resultat aus dem Futterpflanzenanbau und der Sanierungswert bei 2000 mg/kg festgelegt.

### 3.1.3 Methoden zum Wirkungspfad Futterpflanze

Der Wirkungspfad Futterpflanze besteht aus drei einzelnen Wirkungspfaden, die Schadstoffaufnahme des Tiers über die Futterpflanze, die erdige Verunreinigung der Futterpflanze und die direkte orale Bodenaufnahme beim Weiden. Mithilfe mathematischer Beziehungen zwischen den einzelnen Pfaden kann ein Konzentrationsgrenzwert Futterpflanze ermittelt werden. Als Bewertungskriterium dienen die Höchstgehalte für Futtermittel der Verordnung über die Produktion und das Inverkehrbringen von Futtermitteln, Futtermittelzusatzstoffen und Diätfuttermitteln (Futtermittelbuch-Verordnung, FMBV [21]).

#### Bestimmung des Prüfwerts für Futterpflanzenanbau

Der Prüfwert Futterpflanzenanbau zeigt einen Schadstoffgehalt im Boden an, bei dessen Überschreitung eine Gefährdung des Nutztiers möglich ist oder das daraus entstehende Produkt aus lebensmittelhygienischen Gründen eine Gefährdung des Menschen darstellen kann.

Das anzuwendende RWC Szenario umfasst folgende Punkte:

- Pro Schadstoff wird das empfindlichste Nutztier gewählt.
- Es wird eine Fütterungsart gewählt, bei der die Exposition hoch ist, das heisst deren Anteil an der Gesamtration möglichst hoch ist. Dies bedeutet i.d.R. die Beweidung einer Grasfläche.
- Der Anteil der oralen Bodenaufnahme wird für das betreffende Nutztier als maximal angenommen.
- Der Schadstofftransfer vom Boden in die Pflanze wird maximal angenommen.

Der Prüfwert ( $C_{\max}$ ) für den Wirkungspfad Futterpflanzenanbau wird anhand der Formel 1 bestimmt.

$$C_{\max} = \frac{\left(\frac{C_{\text{futter};\text{max}}}{g}\right) - b + bd}{a + d - ad} \quad (\text{Formel 1})$$

$C_{\max}$	maximal zulässiger Bodengehalt (Prüfwert, Sanierungswert)
$C_{\text{Futter};\text{max}}$	Höchstgehalt für unerwünschte Stoffe in Futtermitteln nach FMBV
$g$	Anteil an der Gesamtration: häufigste Nutzung in der Schweiz ist Beweidung, der Anteil ist somit 100%, $g=1$
$d$	Anteil direkte orale Bodenaufnahme
$a$	Steigung aus Punktediagramm
$b$	Achsenabschnitt aus Punktediagramm

Für die Herleitung des Prüfwerts entsprechen die Variablen  $a$  und  $b$  der Steigung und des Achsenabschnitts der maximalen Transfergerade aus dem Punktediagramm. Als Beispiel wird in Abbildung 5 das Punktediagramm für Cadmium in Gras mit den entsprechenden eingezeichneten Transfergeraden aus der BUWAL Richtlinie [2] gezeigt.

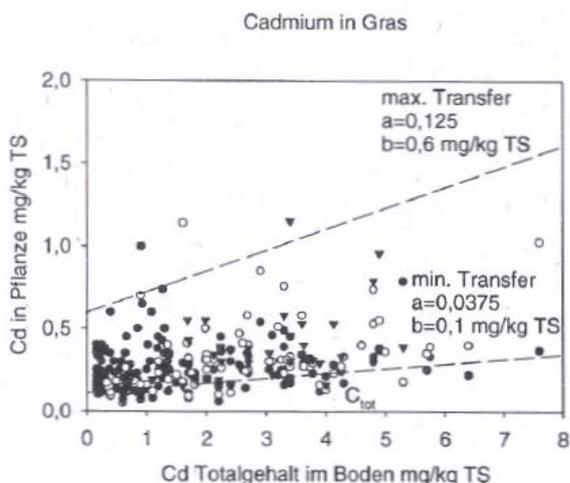


Abbildung 5: Beispiel aus der BUWAL Richtlinie [2] für Cadmium: Punktediagramm der Boden- und Pflanzenkonzentrationen für Gras mit den eingezeichneten Best- (min. Transfer) und Worst-Case (max. Transfer) Szenarien [2].

#### Bestimmung des Sanierungswertes Futterpflanze:

Der Sanierungswert Futterpflanze zeigt einen Schadstoffgehalt im Boden an, bei dessen Überschreitung die bisherige Nutzung nicht mehr möglich ist.

Das anzuwendende BC Szenario umfasst folgende Punkte:

- Es wird generell die häufigste Nutzung angenommen, d.h. die Beweidung.
- Es wird ein unempfindliches Nutztier gewählt.
- Der Anteil an direkter Bodenaufnahme wird als minimal angenommen.
- Der Schadstofftransfer vom Boden in die Pflanze wird minimal angenommen.

Das Vorgehen ist im Prinzip gleich wie für den Prüfwert, ausser dass anstelle des maximalen, der minimale Boden-Pflanzen-Transfer der unter Prüfung stehenden Futterpflanze verwendet wird (Abbildung 5). Der Sanierungswert wird mit Hilfe der Formel 1 berechnet. Die Variablen a und b entsprechen nun der Steigung und des Achsenabschnitts der minimalen Boden-Pflanzen-Transfergeraden. Der endgültige Sanierungswert wird jedoch erst nach der Zusammenführung (Kapitel 3.1.5.) festgelegt.

### 3.1.4 Wirkungspfad Pflanzenwachstum

Die Gefährdung einer Pflanze kann unterschiedlich interpretiert werden. Als Merkmale kommen zum Beispiel Ertragsminderung, Beschreibungen von Wachstumsstörungen und phytotoxische Grenzkonzentrationen in Frage.

Als einfachste Methode gilt die Beurteilung der Ertragsminderung. Es wird ein Normalertrag festgelegt. Falls keine Referenzfläche vorhanden ist wird das 90% Perzentil des Maximalertrags der Untersuchung als Normalertrag festgesetzt. Die Analyse erfolgt mittels qualitativer Datenanalyse oder Regressionsanalyse. Für die Herleitung des Sanierungswerts wird eine Ertragsminderung von 25% als Bewertungskriterium angewendet [2].

Es ist aber auch möglich den Sanierungswert für das Pflanzenwachstum anhand des phytotoxischen Grenzwerts festzulegen. Hier wird der Boden-Pflanzen Schadstofftransfer ermittelt und der der Sanierungswert dann direkt von der phytotoxischen Grenzkonzentration abgeleitet. Die qualitative Gefährdungsabschätzung ist ebenfalls eine Option. Sind in Studien Bodenkonzentrationen und Wachstumsstörungen dokumentiert, kann dies in die Gefährdungsabschätzung miteinbezogen werden.

### 3.1.5 Zusammenführung der Wirkungspfade für die Bestimmung des Sanierungswertes

Der Sanierungswert Landwirtschaft und Gartenbau wird aus den einzelnen Wirkungspfaden Nahrungspflanze, Futterpflanze und Pflanzenwachstum zusammengeführt. Der Sanierungswert soll erst dann erreicht sein, wenn keine Nutzungsänderung mehr möglich ist (z.B. von Futterpflanzenanbau zu Nahrungspflanzenanbau), wobei die einzelnen Nutzungsarten entweder durch das Qualitäts- oder das Wachstumskriterium begrenzt werden; d.h. der höhere Wert der beiden minimalen Werten zwischen Pflanzenwachstum (PW) und Nahrungspflanzenanbau (NP) sowie Pflanzenwachstum und Futterpflanzenanbau (FP) ergibt den Sanierungswert (Formel 2).

$$\text{Sanierungswert} = \max [\min(\text{NP};\text{PW});\min(\text{FP};\text{PW})] \quad (\text{Formel 2})$$

## 3.2 Material und Methoden

### 3.2.1 Daten

Die Daten zur Herleitung der Prüf- und Sanierungswerte wurden durch eine Literaturstudie zusammengetragen. Recherchiert wurde durch Expertenbefragungen, durch die Suche in Datenbanken (web of knowledge) und im Internet (google scholar). Bei den meisten Studien, die zur Verwendung gefunden wurden, war eine persönliche Anfrage beim Autor notwendig um die Originaldaten zu erhalten, denn in den Studien wurden oft nur die Bereiche der Quecksilberkonzentrationen oder Durchschnittswerte angegeben. Die verwendeten Studien (Tabelle 4) sind im folgenden Abschnitt kommentiert.

Tabelle 4: Vergleich der Studien, deren Daten für die Herleitung des Quecksilber Prüf- und Sanierungswertes (landwirtschaftliche Bodennutzung) verwendet wurden.

Studie	Versuchsart	Pflanzenarten	Boden und Nutzung	Boden pH	Klima	Probenvorbereitung	Analyse
Caille et al. [22]	Topfversuch	Festuca rubra (Gewöhnlicher Rotschwingel), Raps, Weisskohl		7.1		Aufschluss mit starken Säuren	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Chunilall et al. [23]	Topfversuch	Spinat	Landwirt. Boden	5.56-6.75		Mikrowellenaufschluss	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Chunilall et al. [24]	Topfversuch	Amarant	Landwirt. Boden	5.56-6.75		Mikrowellenaufschluss	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Egler et al. [25]	Feldversuch	Yamswurzel, Maniok, Schnittlauch, Süsskartoffel, Weisskohl, Weidepflanzen	Gemüseärten		feucht- tropisch (Amazonas)	Aufschluss mit starken Säuren	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Kloke [26]		Salat, Blattsellerie			(Deutschland)		
Krüger und Gröngroft [27]	Feldversuch	Weidepflanzen	überflutete Auenböden	4.0-7.5	gemässigt (Deutschland)		
Lenka et al. [28]	Feldversuch	Amarant, Aubergine, Bittermelone, Bohnen, Chili, Okra, Tomaten, Weisskohl, Zwiebel	Gemüseärten	~5.2	tropische Savanne (Indien)	Aufschluss mit starken Säuren	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Li et al. [29]	Feldversuch	Mais	„Yellow brown soil“	4.4-6.7	Subtropisch-feucht (China)	Boden: Mikrowellenaufschluss Pflanzen: Wasserbad Säureaufschluss	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Loredo et al. [30]	Feldversuch	krautige Pflanzen		4.55-7.79	feucht-warm (Spanien)	Aufschluss mit starken Säuren	flammenlose Atomabsorptionsspektrometrie
Liu et al. [31]	Feldversuch	Amarant, Aubergine, Broccoli, Chinakohl, Gemüsebohne, Gurke, Jingjie, Karotten, Knoblauch-Schnittlauch, Lauch, Pak Choi, Peperoni, Raps, Rettich, Spargelbohne, Stangensellerie, Tomaten, Wasserspinat, Weisskohl			Kontinentalklima (China)	Mikrowellenaufschluss	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Rodrigues et al. [32]	Feldversuch	Weidepflanzen		3.0-7.0	(Portugal)	keine, Boden direkt analysiert	Thermolyse Atomabsorptionsspektrometrie mit Gold Amalgamation
Senila et al. [33]	Feldversuch	mehnjährige Pflanzen		4.5-8.1	(Rumänien)	keine, Boden direkt analysiert	Thermolyse Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik
Sipter et al. [34]	Feldversuch	Tomaten, Kürbis, Bohnen, Zwiebel, Karotten und Sauerampfer	Gemüseärten	~6-6.5	Kontinentalklima (Ungarn)	Mikrowellenaufschluss	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
Wang et al. [35]	Feldversuch	Weidepflanzen		8.26-9.19	feucht-warm (China)	Aufschluss mit starken Säuren	Atomabsorptionsspektrometrie mit Kaltdampftechnik



## Verwendete Daten:

### *Topfversuche*

Da nicht ausreichend Daten vorhanden waren, um nur mit Feldstudien zu arbeiten, wurden die Daten aus Topfversuchen genauso in die Herleitung miteinbezogen. Die Datenpunkte sind in den Punktediagrammen grün eingefärbt (Abbildung 6 bis Abbildung 9). Caille et al. [22] und Chunilall et al. [23, 24] untersuchten die Quecksilberaufnahme von Gräsern, Gemüse und Reis bzw. Spinat und Amarant. Caille et al. verwendeten aus einem kontaminierten Kanal ausgegrabene Sedimente für den Versuch. Der Boden pH wurde vor dem Versuch bei 7.11 gemessen und die Quecksilberkonzentration im Boden betrug 17.1 mg/kg. Chunilall et al. [23], [24] untersuchten die Quecksilberaufnahme von Spinat und Amarant, ein Fuchsschwanzgewächs dessen Samen als Getreide und die Blätter als Gemüse genutzt werden. Sie versetzten typischen Landwirtschaftsboden mit 0, 10, 25 und 50 ppm Quecksilber ( $\text{HgSO}_4$ ). Der Boden pH variierte zwischen 6.75 für die Kontrollbehandlung und 5.56 nach der Zugabe von 50 ppm Quecksilber. Die Konzentrationen im Boden und in den Pflanzen wurden nach 5 Wochen und 10 Wochen Wachstum gemessen.

### *Felddaten aus Minengebieten*

Für die Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten wurden zudem Daten aus Studien zur Quecksilberverschmutzung durch Minen verwendet. Loredó et al. [30] untersuchten Boden- und Pflanzenproben aus der Quecksilber Minen Region in Nordspanien (Asturias). Das Klima im Untersuchungsgebiet ist feuchtwarm. Der pH des Bodens variierte zwischen 4.55 und 7.79, wobei die Böden welche von Gras bedeckt waren, einen höheren pH hatten als diejenigen ohne Vegetationsdecke. In einem Feldversuch in der Nähe einer Blei- und Zinkmine in Ungarn untersuchten Sipter et al. [34] die Schwermetallkontamination in Gemüsegärten und die möglichen Gesundheitsrisiken für die lokale Bevölkerung. Die klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet sind kontinental geprägt. Der Boden pH lag zwischen 6 und 6.5. Senila et al. [33] haben Quecksilberkonzentrationen in Boden- und Pflanzenproben in einem minengeprägten urbanen Gebiet Rumäniens gemessen. Der Boden pH variierte zwischen 5.8 und 7.5 je nach Untersuchungsfläche. Die Daten wurden von Marin Senila zur Verfügung gestellt.

### *Felddaten anderer Kontaminationsgebiete*

Die weiteren Daten stammen von Studien, welche die allgemeine Belastung durch Quecksilber in landwirtschaftlich oder gartenbaulich genutzten Böden untersuchten. Kloke [26] publizierte Quecksilberkonzentrationen in Böden und den dazugehörigen Salatpflanzen sowie Blattsellerie aus Versuchen in Deutschland. Die Originalquellen konnten nicht ausfindig gemacht werden. Somit können hier keine genaueren Angaben zu Klima und Bodenbedingungen gemacht werden. Es wurde angenommen, dass zumindest die klimatischen Verhältnisse vergleichbar sind mit der Schweiz und die Datenpunkte berücksichtigt werden können. Krüger und Gröngroft [27] testeten überflutete Auenböden entlang der Elbe auf Schwermetallgehalte. Der Bericht macht keine Angaben zu Klima, Boden pH oder Bodentyp. Die Daten mit den Bezeichnungen „LAU 2001“ (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt), „Köster und Merkel 1985“ und „Krüger 2001“ in Kap. 3.3. entsprechen den von Frank Krüger zur Verfügung gestellten Daten.

Liu et al. [31] untersuchten landwirtschaftliche Böden und das darauf produzierte Gemüse in vier Untersuchungsgebieten in der Vorstadt Zhenghou in China. Ziel der Untersuchung war die Absorption und Bioakkumulation von Schwermetallen in unterschiedlichen Gemüsen zu untersuchen. Das Klima in der Region ist kontinental mit warmen Frühlingswetter.

In einer Studie von Rodrigues et al. [32] wurden 136 Bodenproben und 129 Pflanzenproben aus Portugal auf ihre Quecksilberkonzentration überprüft. Die Probenahmen fanden auf Weideflächen statt. Auf Anfrage stellte Silvia Rodrigues die Messresultate aller Proben zur Verfügung.

Wiersma et al. [36] untersuchten verschiedene Gemüsesorten und Futterpflanzen sowie die entsprechenden Böden auf ihre Schwermetallgehalte. Die Untersuchungen fanden auf den jeweiligen Hauptanbaustandorten statt. Das Paper macht keine Aussage über die klimatischen Verhältnisse vor Ort,

Boden pH oder Bodentyp. Die Bedingungen in den Niederlanden können aber mit Schweizer Verhältnissen verglichen werden und somit wurden die Datenpunkte in der Untersuchung berücksichtigt.

#### Ausgeschlossene Daten

Generell wurden Datenpunkte von der Herleitung ausgeschlossen und in den Abbildungen grau markiert, wenn die Bodenkonzentration kleiner als 0.5 mg/kg (Schweizer Richtwert VBBo) betrug.

Ebenso wurden Daten aus Untersuchungen deren klimatische Verhältnisse nicht mit Schweizer Bedingungen vergleichbar sind, von der Herleitung der Grenzwerte ausgeschlossen. Die entsprechenden Datenpunkte sind in den Punktediagrammen blau markiert (Abbildung 6 bis Abbildung 9). Dies betraf die Studie von Egler et al. [25], sowie Studien von Lenka et al [28], Li et al [29] und Wang et al [35].

Egler et al. untersuchte die Quecksilber Verschmutzung in Böden und Pflanzen in zwei kleinen Goldminendörfern des Amazonasgebiets in Brasilien. Es wurden Böden und essbare Gemüseteile aus den Gärten sowie Weidepflanzen untersucht. Klimatisch liegt das Untersuchungsgebiet in den feuchten Tropen. In der Umgebung einer Chloralkali Fabrik untersuchten Lenka et al. [28] Pflanzen und Bodenproben aus Gemüsegärten. Der Boden pH im Landwirtschaftsboden, welcher den Gemüsegarten umgab, lag bei 5.2. Bei dieser Studie handelt es sich um eine Untersuchung in der tropischen Savanne Indiens.

Li et al. [29] untersuchten die Verschmutzung durch kleingewerbliche Zinkmetallurgie im Südwesten Chinas (Weining). Es wurden die Quecksilberkonzentrationen in Wasser-, Boden und Pflanzenproben (Mais) gemessen. Der Boden pH lag je nach Probenahme zwischen 4.4 und 6.7. Klimatisch entspricht das Gebiet den feuchten Subtropen. Des Weiteren liegen die gemessenen Bodenkonzentrationen unter dem Schweizer Richtwert, sodass die Untersuchung aus diesem Grund nicht weiter berücksichtigt wurde. Die Datenpunkte wurden in Abbildung 6 und Abbildung 8 grau eingefärbt.

Wang et al. [35] untersuchten Quecksilberkonzentrationen in Böden und Pflanzen in einem Quecksilberminen Gebiet in China. Das Klima im Untersuchungsgebiet wird als feucht-warm beschrieben. Einige der untersuchten Pflanzenarten werden den Nutztieren als Futter verabreicht. Der pH variierte von 7.09 bis 8.74 je nach Probenahme. Die Messresultate wurden durch Jianxu Wang zur Verfügung gestellt. Die Resultate dieser Untersuchung können für die Herleitung der Prüf- und Sanierungswerte nicht verwendet werden. Der Boden pH im Untersuchungsgebiet ist zu hoch für Schweizer Verhältnisse und die klimatischen Verhältnisse sind ebenfalls nicht vergleichbar mit der Schweiz. Zudem sind die Bodenkonzentrationen in dieser Studie so hoch, dass sie nicht relevant sind, für die Definition eines Konzentrationsgrenzwerts für die Landwirtschaft (Bodenkonzentrationen bis zu 1200 mg/kg).

### **3.2.2 Annahmen und Praktisches Vorgehen**

#### Wirkungspfad Nahrungspflanze

Die Verfügbarkeit von Daten über die Aufnahme von Quecksilber durch Nahrungspflanzen ist schwach (61 Datenpaare). Es wurden ausschliesslich Daten zum Gemüseanbau gefunden (Tabelle 4). Daten zu Getreide, Kartoffeln, Hülsenfrüchten, Beeren und Obst konnten deshalb nicht in die Auswertung einbezogen werden. Der geringe Datenumfang verunmöglichte auch für einzelne Gemüsearten Punktediagramme zu erstellen, wie das die BUWAL Richtlinie [2] vorsieht. Als Näherung wurden die verfügbaren Gemüsedaten in einem Diagramm zusammengefasst. Zudem wurden auch Topfversuche in die Herleitung miteinbezogen. Diese Einschränkungen sollten bei der kritischen Beurteilung der Grenzwerte bedacht werden.

Weitere Einschränkungen ergeben sich durch fehlende Lebensmittelgrenzwerte für Quecksilber. Nach der BUWAL Richtlinie [2] sollen für einzelne Nahrungspflanzenarten Punktediagramme erstellt werden (Abbildung 3) und den entsprechenden Lebensmittelgrenzwert als Bewertungskriterium angewendet werden (Kapitel 3.1.2). In der Liste der zugelassenen Höchstkonzentrationen (Toleranz- und Grenz-

werte) für Metalle und Metalloide (Liste 2 im Anhang der FIV) findet man für Quecksilber jedoch nur Werte für Fische, Krebstiere, Zuchtpilze, Gelatine, Kollagen, Nahrungsergänzungsmittel, Speisesalz und Getränke. Der Toleranzwert für Zuchtpilze (0.5 mg/kg) ist der einzige festgelegte Grenzwert einer Nahrungspflanze. Auch in der ersatzweise angegebenen EU Verordnung sind keine Quecksilber Toleranz- resp. Grenzwerte für Nahrungspflanzen festgelegt [37]. Im Anhang 2 der BUWAL Richtlinie [2] sind Toleranzwerte für Quecksilber in Nahrungspflanzen angegeben. Die Werte wurden seinerzeit aus ZEBS-Richtwerten (Zentrale Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien des deutschen Bundesgesundheitsamtes) errechnet. Diese Werte liegen für Gemüse und Obst zwischen 0.13 mg/kg (Erbsen, grün) und 1.56 mg/kg (Gurke) und korrelieren weitgehend mit dem Gehalt an Trockensubstanz. Für Getreide und Hülsenfrüchte ist ein Toleranzwert von 0.03 mg/kg angegeben und für die Kartoffel 0.09 mg/kg. Für Gemüse liegt der Mittelwert der angegebenen Toleranzwerte bei 0.57 mg/kg. Für Obst und Beeren liegt der Durchschnittswert etwas tiefer bei 0.19 mg/kg. Die relevanten Datenpunkte im Punktediagramm für Nahrungspflanzen sind Spinat und Amarant, Gemüse mit einem Trockensubstanzanteil von ca. 10%, was einen ZEBS-Richtwert von 0.5 mg/kg ergibt. Kabata-Pendias und Pendias [38] schlagen einen allgemein gültigen Höchstgehalt in Nahrungspflanzen von 50 ppb (Frischgewicht) vor. Dies stützt den ZEBS-Richtwert von 0.5 mg/kg, wenn ein Trockensubstanzgehalt von 10% angenommen wird. Eine Abschätzung auf der Basis des WHO-PTWI Wertes aus dem Jahr 2010 (Provisional Tolerable Weekly Intake) von 0.004 mg Quecksilber pro kg Körpergewicht [5] ergibt, dass ein Mensch von 60 kg Körpergewicht und einem Tageskonsum von 200 g Frischgemüse mit einem Trockensubstanzgehalt von 10% ca. 30% des PTWI aufnimmt. Diese Überlegungen führten zur Festlegung eines Toleranzwertes von 0.5 mg/kg für Gemüse, der dem „Datenpool für Gemüse“ entspricht, welcher hier für die Herleitung der Bodengrenzwerte verwendet wurde. Einschränkend ist anzumerken, dass diese Abschätzungen nicht für andere Nahrungspflanzen gelten.

Für den Sanierungswert wird anstelle des Toleranzwertes der Grenzwert aus der FIV als Bewertungskriterium verwendet. Dies entspricht laut der BUWAL Richtlinie [2] dem dreifachen Toleranzwert und wurde für den „Datenpool für Gemüse“ bei 1.5 mg/kg angenommen.

#### Wirkungspfad Futterpflanze

Für den Wirkungspfad Futterpflanze wurden Daten zu Weidepflanzen gesammelt. Die Datenverfügbarkeit war erheblich grösser als bei den Nahrungspflanzen (126 Datenpaare). Bei der Herleitung des Prüf- und Sanierungswertes geht man von einer 100-prozentigen Weidenutzung aus. Als Bewertungskriterium wird der Höchstwert in Futtermitteln nach FMBV verwendet. Die Schweizer FMBV verweist im Anhang 10 für die Höchstgehalte für unerwünschte Stoffe in Futtermitteln auf den Anhang 1 der EU Verordnung (EU) Nr. 574/2011. Dort wird der Höchstgehalt für Quecksilber, bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12% in Futtermittel-Ausgangserzeugnissen, bei 0.1 mg/kg festgelegt. Bezogen auf Trockensubstanz liegt der Höchstgehalt für Futtermittel bei 0.114 mg/kg. Für die Berechnung des Prüf- und Sanierungswertes anhand der Formel 1 musste der Anteil an der Gesamtration und der Anteil der direkten Bodenaufnahme definiert werden. Der Anteil an der Gesamtration liegt bei einer Beweidung bei 100%, die Variable g in Formel 1 ist somit gleich 1. Der Anteil der direkten Bodenaufnahme (Variable d in Formel 1) variiert zwischen den verschiedenen Nutztieren. Je nach Szenario wird das Schaf oder das Rind verwendet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Werte für die direkte Bodenaufnahme (d) der Nutztiere beim Weiden [2].

Kultur	Nutztier	Direkte Bodenaufnahme beim Weiden [% des Gesamtverzehr (TS)]
Wiesenfutter, Direktverzehr	Rind	1-10
	Schaf	10-30

Für den Prüfwert wurde dem RWC-Szenario entsprechend das Nutztier Schaf verwendet ( $d = 0.3$ ) bzw. für die Herleitung des Sanierungswerts - dem BC Szenario entsprechend - das Nutztier Rind ( $d=0.01$ ).

Für beide Wirkungspfade (NP und FP) wurde bei der Herleitung des Prüfwerts für die Boden-Pflanzen Transfergeraden einen Achsenabschnitt von  $0.05 \text{ mg/kg}$  festgelegt (RWC-Szenario). Dieser Wert entspricht der durchschnittlichen Quecksilberbelastung von Pflanzen, welche auf nicht kontaminierten Böden gewachsen sind [38] und schien auch in den hier verwendeten Datensätzen plausibel. Für die Herleitung der Sanierungswerte wurde, entsprechend dem Best-Case Szenario, der Achsenabschnitt der Boden-Pflanzen Transfergeraden auf 0 gesetzt.

### 3.3 Resultate

#### 3.3.1 Prüfwerte

##### Wirkungspfad Nahrungspflanzen

Die Ergebnisse zur Herleitung des Prüfwerts Nahrungspflanzenanbau sind in den Punktediagrammen in Abbildung 6 dargestellt. Die als realistisch eingeschätzte maximale Transfergerade ist als schwarze Gerade eingezeichnet. Der Schnittpunkt mit dem abgeschätzten Lebensmittel-Toleranzwert von  $0.5 \text{ mg/kg}$  für Gemüse (siehe Kapitel 3.2.2) ergibt einen Prüfwert von  $0.85 \text{ mg/kg}$  (Tabelle 6). Abbildung 6a zeigt das gesamte Datenspektrum, das die Transfergerade bestimmt, während Abbildung 6b die Lage des resultierenden Prüfwertes zeigt.

Tabelle 6: Zur Abschätzung der Prüfwerte für Nahrungspflanzenanbau verwendete Parameter nach dem Prinzip RWC-Szenario (maximale Pflanzenaufnahme) und die resultierenden Prüfwerte.

Abgeschätzter Hg-Toleranzwert für Gemüsepflanzen	$0.5 \text{ mg/kg TS}$
Max. Transfergerade (Abbildung 6)	
Geradensteigung (a)	0.53
Achsenabschnitt (b)	0.05
<b>Resultierender Prüfwert</b>	<b><math>0.85 \text{ mg/kg}</math></b>

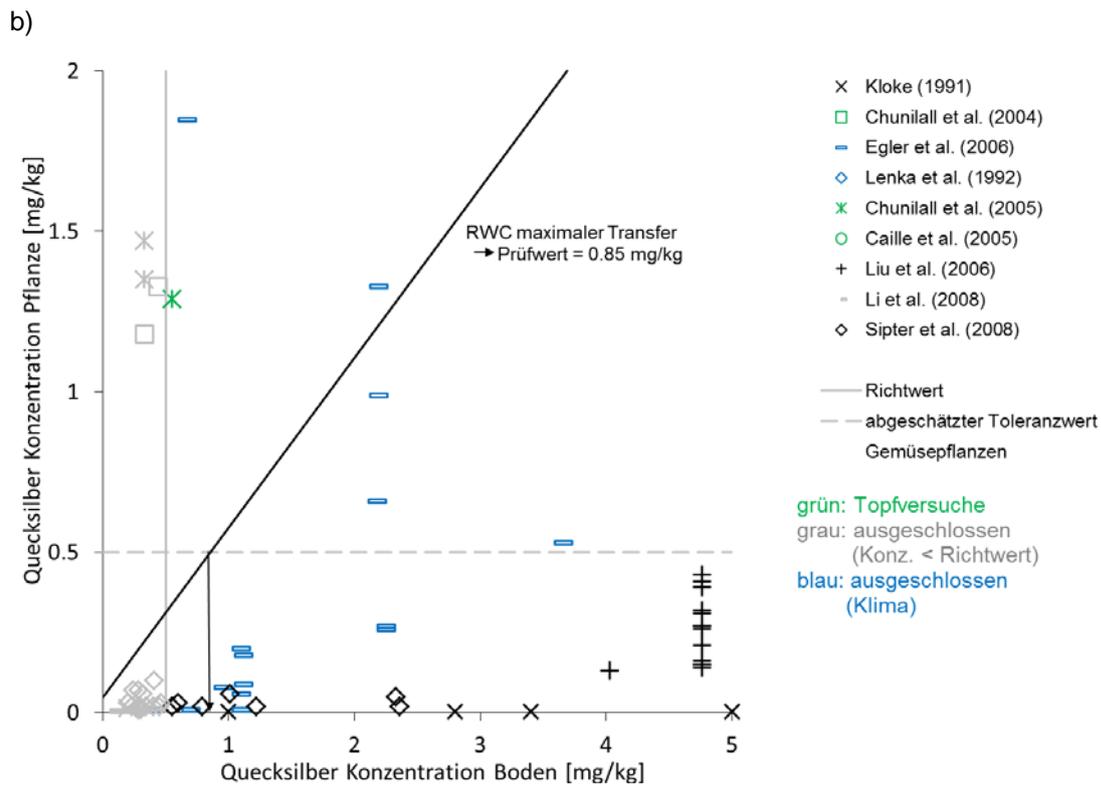
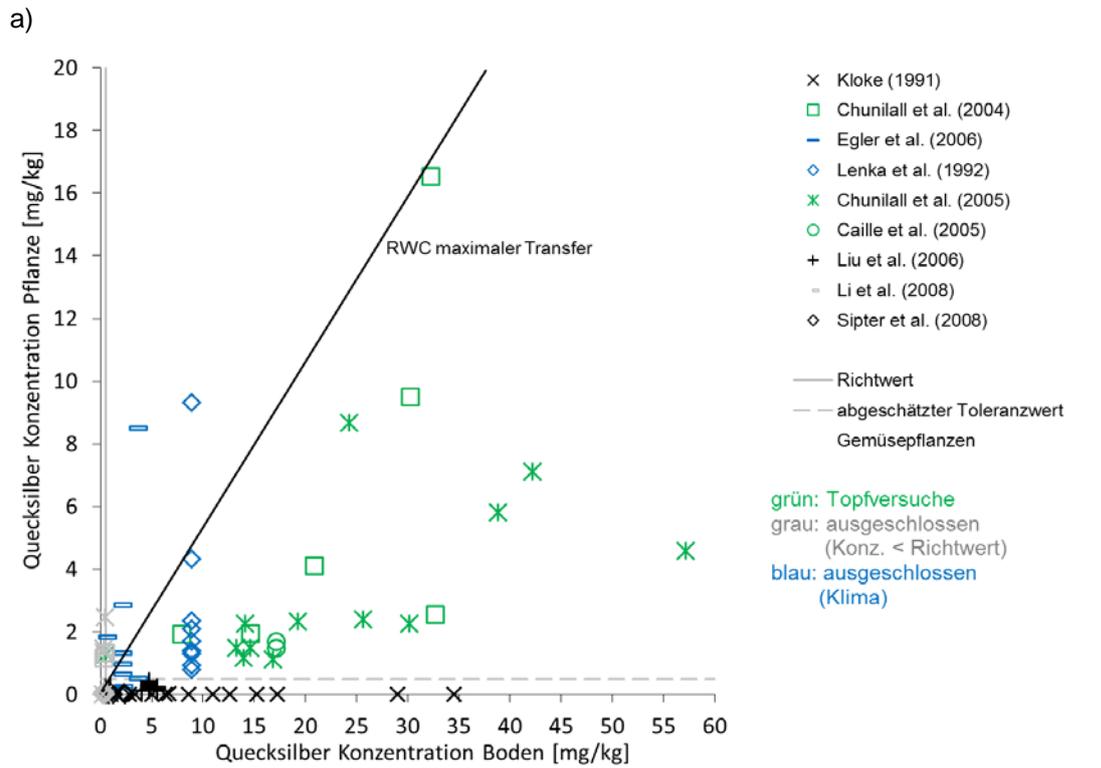


Abbildung 6: Herleitung des Prüfwertes für den Wirkungspfad Nahrungspflanzenanbau. Ermittlung des maximalen Boden-Pflanzentransfers nach dem realistischen Worst-Case Szenario.

a) Darstellung aller Datenpunkte. b) Darstellung eines Ausschnittes für Bodenkonzentrationen zwischen 0 und 5 mg/kg und Pflanzenkonzentrationen zwischen 0 und 2 mg/kg.

### Wirkungspfad Futterpflanzen

Mit den gesammelten Daten zu Quecksilbergehalten in Futterpflanzen (Abbildung 7) wurden zwei Varianten für den Prüfwert ( $C_{\max}$ ) Futterpflanzenanbau berechnet (Formel 1). Die Anwendung des FMBV-Grenzwertes von 0.114 mg/kg zusammen mit der Geradensteigung a und dem Achsenabschnitt b der maximalen Transferfunktion (Abbildung 7) ergab in der Variante 1 (Tabelle 7) einen Prüfwert, welcher ein Vielfaches unter dem VBBo Richtwert von 0.5 mg/kg liegt. Aber auch die noch vertretbare Variante 2 mit einer kleineren Geradensteigung ergab einen Prüfwert, der noch immer deutlich unter dem Richtwert zu liegen kam.

Tabelle 7: Zur Abschätzung der Prüfwerte für Futterpflanzenanbau verwendete Parameter in Formel 1 nach dem Prinzip RWC-Szenario (maximaler Boden-Pflanzen-Transfer, Weidetier Schaf) und die resultierenden Prüfwerte.

	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>
Höchstgehalt Hg im Futtermittel nach FMBV ( $C_{\text{futter, max}}$ )	0.114 mg/kg TS	0.114 mg/kg TS
Anteil Gesamtration (g)	1	1
Anteil direkter Bodenaufnahme (d)	0.3	0.3
Transfergerade (Abbildung 7)		
Steigung (a)	0.95	0.32
Achsenabschnitt (b)	0.05	0.05
<b>Resultierender Prüfwert</b>	<b>0.05 mg/kg TS</b>	<b>0.15 mg/kg TS</b>

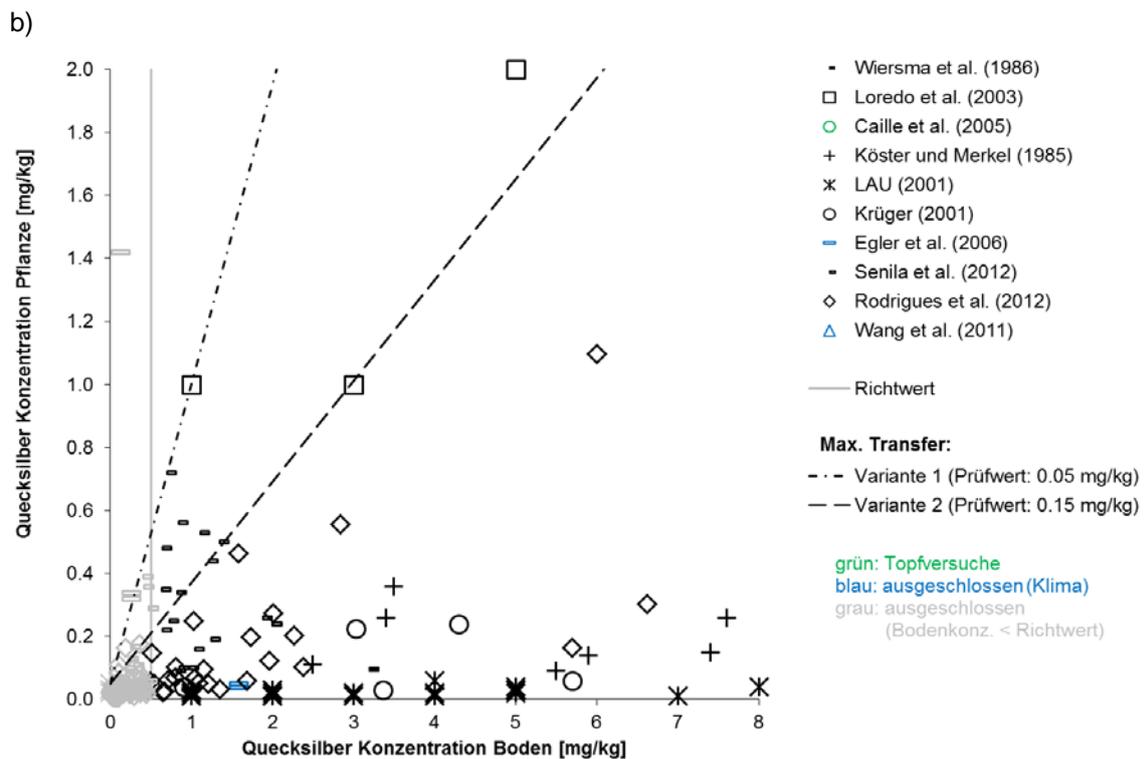
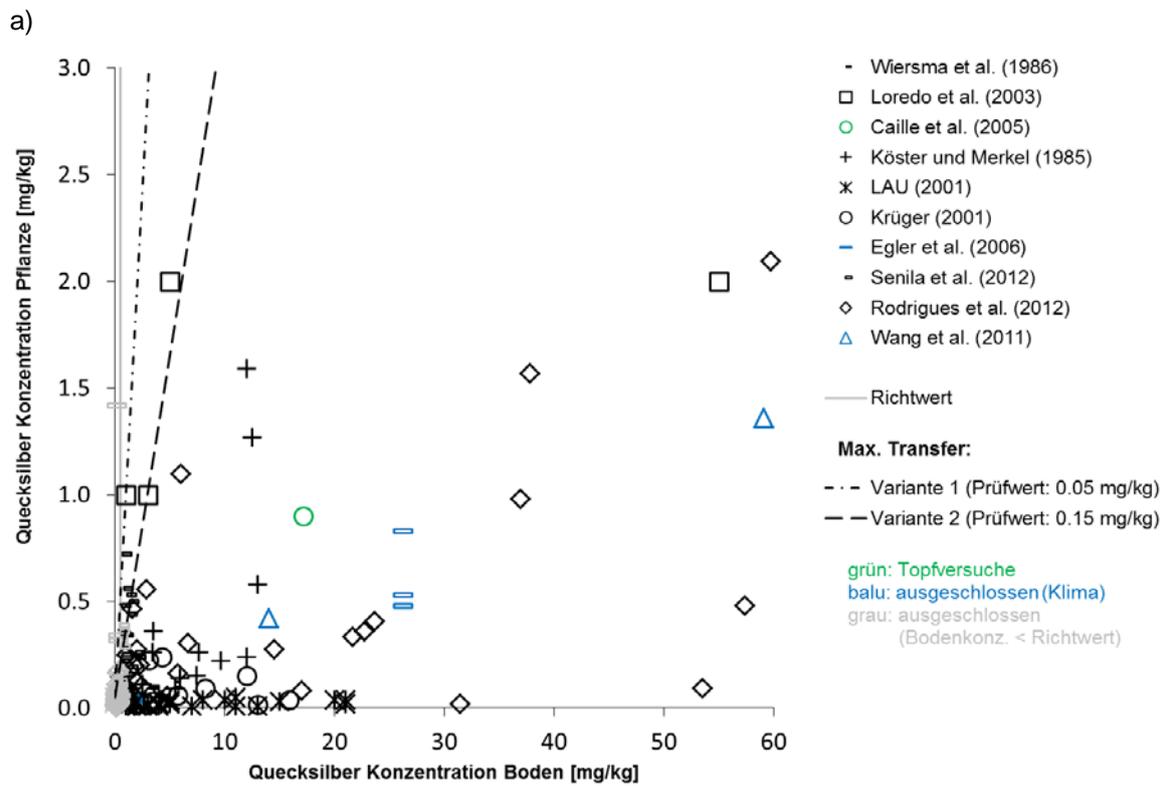


Abbildung 7: Herleitung des Prüfwertes für den Wirkungspfad Futterpflanzenanbau. a) Überblick (Bodenkonzentration: 0-60 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-3 mg/kg). b) Detailansicht (Bodenkonzentration: 0-8 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-2 mg/kg). Berechnung der Prüfwerte nach Formel 1 mit Parameter in Tabelle 7.

### 3.3.2 Sanierungswert

#### Wirkungspfad Nahrungspflanze

Der Sanierungswert für den Wirkungspfad Nahrungspflanze wurde auf ähnliche Art und Weise bestimmt wie der Prüfwert. Nur gilt beim Sanierungswert das BC-Szenario, welches vom minimalen Boden-Pflanzen-Transfer und einem Achsenabschnitt von 0 ausgeht. Zudem wurde als Bewertungskriterium der dreifache Toleranzwert (1.5 mg/kg) eingesetzt (Tabelle 8). Die Transfergerade nach dem Prinzip des Best-Case (BC) Szenario wurden ins Punktediagramm eingezeichnet (Abbildung 8). Die Parameter der Transfergeraden ergaben einen Sanierungswert von 20 mg/kg (Tabelle 8).

Tabelle 8: Zur Abschätzung der Sanierungswerte für Nahrungspflanzenanbau verwendete Parameter nach dem BC-Szenario (minimaler Boden-Pflanzen-Transfer) und der daraus resultierende Sanierungswert.

Abgeschätzter Hg-Grenzwert für Gemüsepflanzen	1.5 mg/kg TS
Minimale Transfergerade (Abbildung 8)	
Geradensteigung (a)	0.075
Achsenabschnitt (b)	0
<b>Resultierender Sanierungswert</b>	<b>20 mg/kg</b>

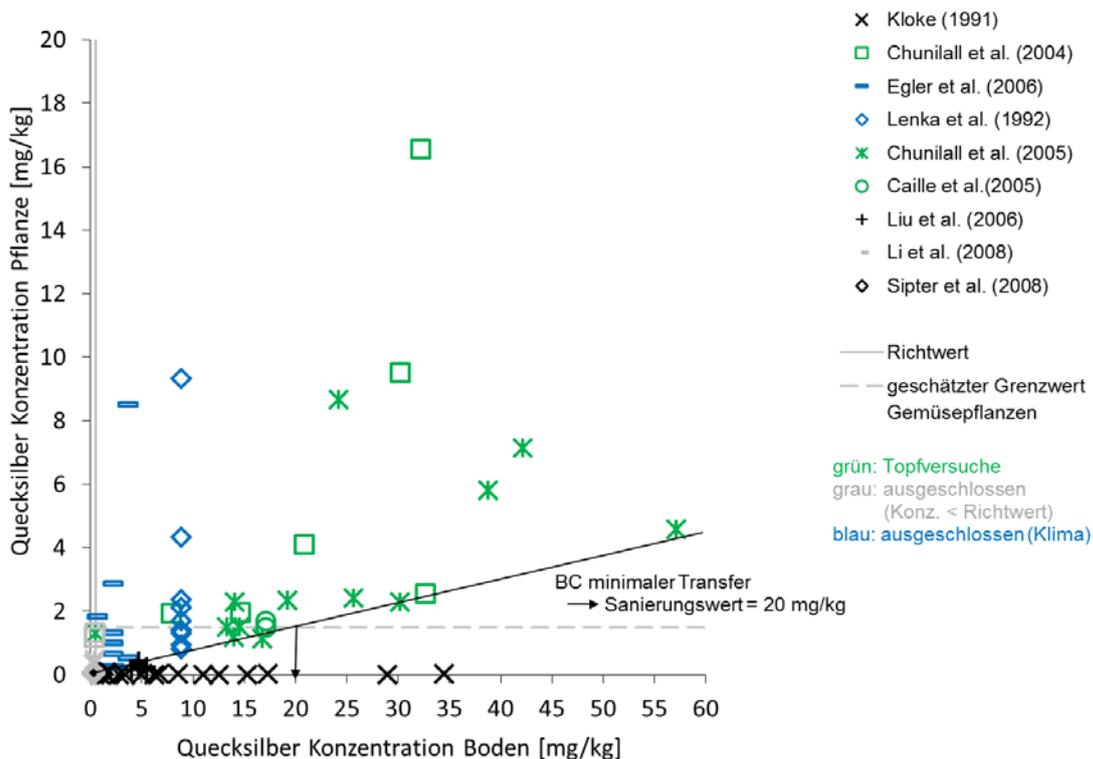


Abbildung 8: Herleitung des Sanierungswerts für den Wirkungspfad Nahrungspflanze. Ermittlung des minimalen Boden-Pflanzen-Transfers nach dem Best-Case Szenario.

### Wirkungspfad Futterpflanze

Der Sanierungswert für den Wirkungspfad Futterpflanze wurde auf ähnliche Art und Weise wie der Prüfwert Futterpflanzenanbau bestimmt. Nur gilt beim Sanierungswert das BC-Szenario, welches vom minimalen Boden-Pflanzen-Transfer und einem Achsenabschnitt von 0 ausgeht.

Die als realistisch angenommene minimale Transfergerade im Diagramm für Futterpflanzen (Abbildung 9) ergab, in Formel 1 eingesetzt, einen Sanierungswert von 10 mg/kg (Tabelle 9).

Tabelle 9: Zur Abschätzung der Sanierungswerte für Futterpflanzenanbau verwendete Parameter in Formel 1 nach dem BC-Szenario (minimaler Boden-Pflanzen-Transfer, Weidetier Rind) und der resultierende Sanierungswert.

Höchstgehalt Hg im Futtermittel nach FMBV ( $C_{\text{futter, max}}$ )	0.114 mg/kg TS
Anteil Gesamtration (g)	1
Anteil direkter Bodenaufnahme (d)	0.01
Transfergerade (Abbildung 9)	
Steigung (a)	0.0013
Achsenabschnitt (b)	0
<b>Resultierender Sanierungswert</b>	<b>10 mg/kg</b>

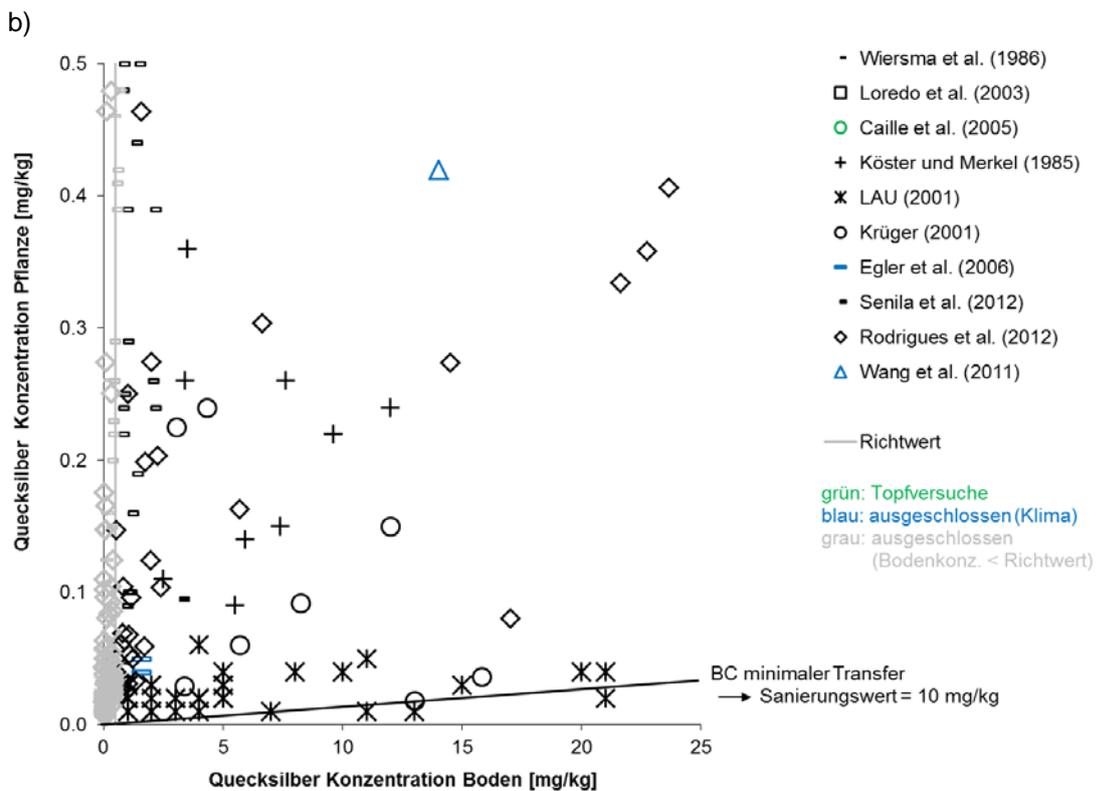
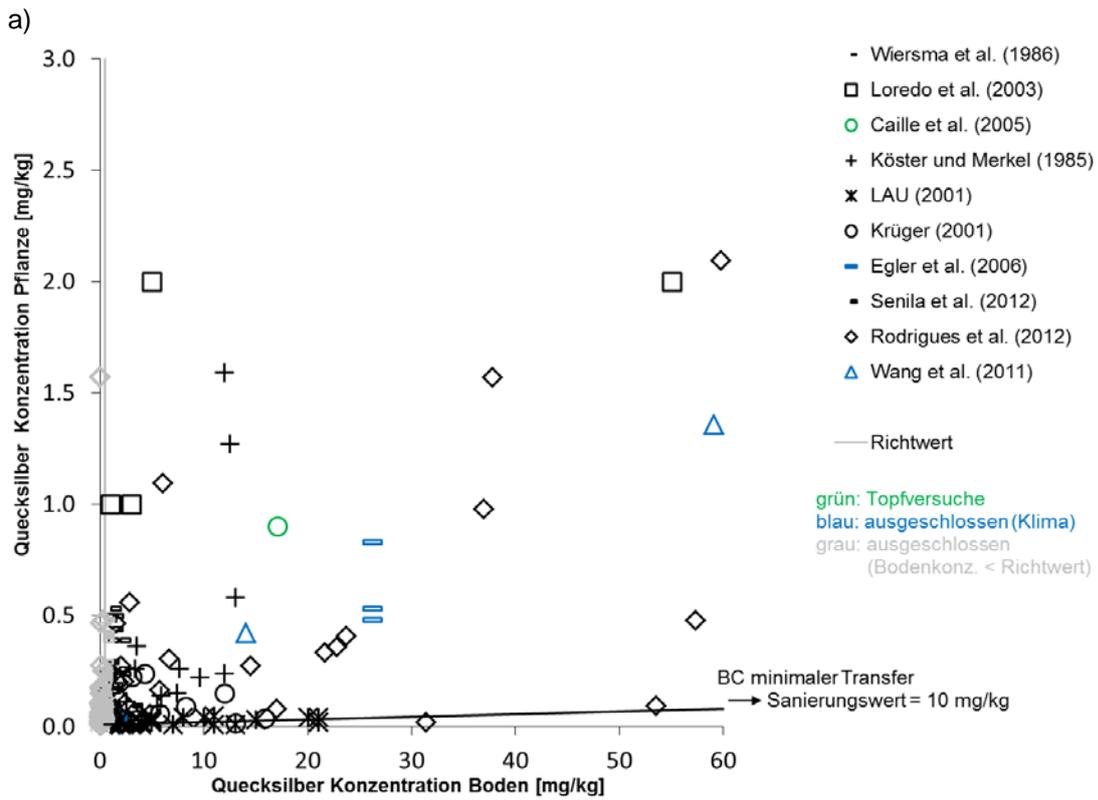


Abbildung 9: Herleitung des Sanierungswertes für den Wirkungspfad Futterpflanze. a) Überblick (Bodenkonzentration: 0-60 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-3 mg/kg). b) Detailansicht (Bodenkonzentration: 0-25 mg/kg, Pflanzenkonzentration: 0-0.5 mg/kg). Berechnung des Sanierungswertes mit Formel 1 und Parameter in Tabelle 9.

### Wirkungspfad Pflanzenwachstum

Für den Wirkungspfad Pflanzenwachstum wurden nur wenig geeignete Daten gefunden. Die „Messlatte“, welche von Eikmann und Kloke [9] zur Herleitung der Bodenwerte I bis III genutzt wurden, enthalten eine „Messlatte“ Phytotoxizität. Sie legen den Beginn der allgemeinen phytotoxischen Wirkung von Quecksilber bei Bodenkonzentrationen zwischen 50 und 100 mg/kg fest. Andere Werte auf derselben Messlatte zeigen aber toxische Wirkungen bei tieferen Werten. Pflücksalat zum Beispiel zeigt eine Ertragsminderung von 50% bei einer Bodenkonzentration von 40 mg/kg und Weizen zeigt Wachstumsanomalien bis Kümmerwuchs bei Bodenkonzentrationen von 5-50 mg/kg [39]. In einer weiteren Studie von 1973 wird 50-100 mg/kg Quecksilber im Boden als phytotoxischer Grenzwert vorgeschlagen, da ab 50 mg/kg das Wachstum beeinträchtigt war [40]. Eine Studie mit Angaben zu phytotoxischen Quecksilberkonzentrationen im Pflanzengewebe zeigt im Weisskohl bei einer Konzentration 6 mg/kg eine Ertragsminderung von 25% (entspricht dem kritischen Wert nach BUWAL Richtlinie [2]) [41]. Wird dieser Wert auf unsere Boden-Pflanzen Transfer Szenarien angewendet, ergibt dies eine Bodenkonzentration von 13-44 mg/kg bei maximaler Aufnahme (Prüfwert) und 68-95 mg/kg bei minimaler Aufnahme (Sanierungswert). Da es sich bei der Phytotoxizität um ein Kriterium für den Sanierungswert handelt und wie bereits erwähnt auch andere Studien einen Grenzwert in einem ähnlichen Bereich (50-100 mg/kg) vorgeschlagen haben, kann davon ausgegangen werden, dass der Sanierungswert bezüglich Pflanzenwachstum höher als 50 mg/kg liegt.

### Zusammenführung der Wirkungspfade

Um den Sanierungswert Landwirtschaft und Gartenbau zu bestimmen, wurden die einzelnen Wirkungspfade für Nahrungspflanze (NP), Futterpflanze (FP) und Pflanzenwachstum (PW) zusammengeführt. Dabei wird nach Formel 2 vorgegangen:

$$\text{Sanierungswert} = \max [\min(20 \text{ mg/kg}, > 50 \text{ mg/kg}), \min(10 \text{ mg/kg}, > 50 \text{ mg/kg})]$$

Dies ergibt einen Sanierungswert von 20 mg/kg.

### 3.4 Kritische Beurteilung und Empfehlungen

Die Herleitung der Prüf- und Sanierungswerte nach der BUWAL Richtlinie [2] war mit Unsicherheiten verbunden. Es zeigte sich, dass nur ein schwacher Zusammenhang zwischen totaler Quecksilberkonzentration im Boden und in der Pflanze besteht. Als Folge streuen die Datenpunkte in den Diagrammen beträchtlich und die Spannweiten zwischen minimalem und maximalem Boden-Pflanzen-Transfer waren entsprechend gross, wodurch auch die Spannweite zwischen Prüf- und Sanierungswert relativ gross ausgefallen ist, was möglicherweise eine Vielzahl von Prüffällen zur Folge haben wird.

Für den Wirkungspfad Nahrungspflanze war die Datenmenge limitiert. Die meisten Daten wurden für Gemüsepflanzen, wie Spinat, Amarant, Kohl und Salate gefunden. Für Wurzelgemüse standen nur vereinzelt Datenpaare zur Verfügung. Zu Getreide, Ölpflanzen oder Obst und Beeren wurden jedoch gar keine Daten gefunden. Dadurch konnte nur näherungsweise nach der BUWAL Richtlinie [2] vorgegangen werden; d.h. die wenigen Datenpaare pro Spezies liessen es als nicht sinnvoll erscheinen, den Boden-Pflanzen-Transfer einzeln abzuschätzen und mit den jeweiligen Nahrungspflanzen-Toleranzwerten zu vergleichen. Stattdessen wurde ein Datenpool aller verfügbaren Gemüsepflanzen-daten gebildet und den gesuchten Prüf- bzw. Sanierungswert anhand eines abgeschätzten mittleren Toleranzwertes hergeleitet. Dieses vereinfachte Vorgehen führte zu Unsicherheiten bei der Herleitung des Prüf- und Sanierungswerts für den Nahrungspflanzenanbau.

Die empfohlenen Prüf- und Sanierungswerte sind in Tabelle 10 zusammengefasst und im Folgenden erläutert.

Tabelle 10: Empfehlungen für den Quecksilber Prüfwert Nahrungspflanzenanbau und den Prüfwert Futterpflanzenanbau nach VBBo und den Sanierungswert Landwirtschaft und Gartenbau nach AltIV.

	Nahrungspflanzenanbau	Futterpflanzenanbau
Prüfwert	0.5 mg/kg <sup>1)</sup>	0.5 mg/kg <sup>1)</sup>
Sanierungswert		20 mg/kg

<sup>1)</sup> identisch mit dem VBBo Richtwert

#### Prüfwerte

Wie bereits erwähnt, war es für den Wirkungspfad Nahrungspflanzenanbau nicht möglich genau nach der BUWAL Richtlinie [2] vorzugehen, da nicht ausreichend Daten zur Verfügung standen. Für die Herleitung der Prüfwerte ist ein „Realistisches Worst-Case Szenario“ vorgesehen; das heisst der Prüfwert wird durch jene Nahrungspflanze bestimmt, deren Punktediagramm den tiefsten Grenzwert im Boden ergibt. Da für Quecksilber nur ein Punktediagramm für einen Datenpool von Gemüsepflanzen zur Verfügung stand, konnte das Worst-Case Szenario nur über die Summe der Gemüsepflanzen angewendet werden. Damit wurden die empfindlichsten Fälle der gesammelten Daten wohl berücksichtigt, jedoch konnte wegen den fehlenden Daten zu Getreide, Obst und Beeren nicht beurteilt werden, ob der „Worst-Case“ auch wirklich erfasst wurde. Vorsicht ist angezeigt, weil die ZEBS-Toleranzwerte für diese Nahrungspflanzen wesentlich tiefer sind (0.03 mg/kg bis 0.2 mg/kg) als der in Kap. 3.3.1 verwendete Toleranzwert von 0.5 mg/kg für Gemüsepflanzen. Deshalb wird nicht empfohlen den in Kap. 3.3.1 ermittelten Prüfwert von 0.85 mg/kg für den Nahrungspflanzenanbau direkt anzuwenden, sondern diesen auf 0.5 mg/kg abzurunden und damit dem Prüfwert für Futterpflanzenanbau bzw. dem VBBo-Richtwert gleichzusetzen. Hierfür spricht auch Kap. 6.3 der BUWAL-Richtlinie [2], wonach sich der Mindestabstand zwischen verschiedenen Prüfwerten nach der Messunsicherheit des Schadstoffes richten soll. Es wird davon ausgegangen, dass der für Cadmium gesetzte Mindestab-

stand von 50% auch hier angewendet werden kann. Demnach sollte der Mindestabstand der Prüferte für Nahrungspflanzen- bzw. Futterpflanzenanbau mindestens 0.4 mg/kg betragen.

Für den Wirkungspfad Futterpflanzenanbau war die vorhandene Datenmenge ausreichend und da alle Weidepflanzen auch im Vorgehen der BUWAL Richtlinie [2] in einem einzigen Punktediagramm erfasst werden dürfen, war die Datensituation zufriedenstellend. Die Berechnung mit Formel 1 ergab für beide gewählten Varianten Prüferte, die weit unter dem Richtwert nach VBBo liegen. Der Höchstwert für Futtermittel ist so tief festgesetzt, dass die Steigung (a) der Boden-Pflanzen Transfergerade zwischen 0 und 1 beliebig gewählt werden kann, ohne dass für das Schaf einen Prüferte höher 0.5 mg/kg erreicht wird (Abbildung 10). Folglich kommt der Prüferte ( $C_{max}$ ) allein schon durch die direkte Bodenaufnahme unterhalb des Richtwertes zu liegen. Für das Rind würde  $C_{max}$  den Richtwert erst unterhalb einer Geradensteigung von 0.1 überschreiten. Die Transfergeraden der in den Resultaten präsentierten Varianten haben Steigungen von 0.95 resp. 0.32. Eine Steigung tiefer als 0.1 und die Wahl des Rindes als Weidetier entspricht nicht dem Worst-Case Szenario. Aus diesen Gründen wird empfohlen, den Prüferte auf der Höhe des Richtwertes festzulegen.

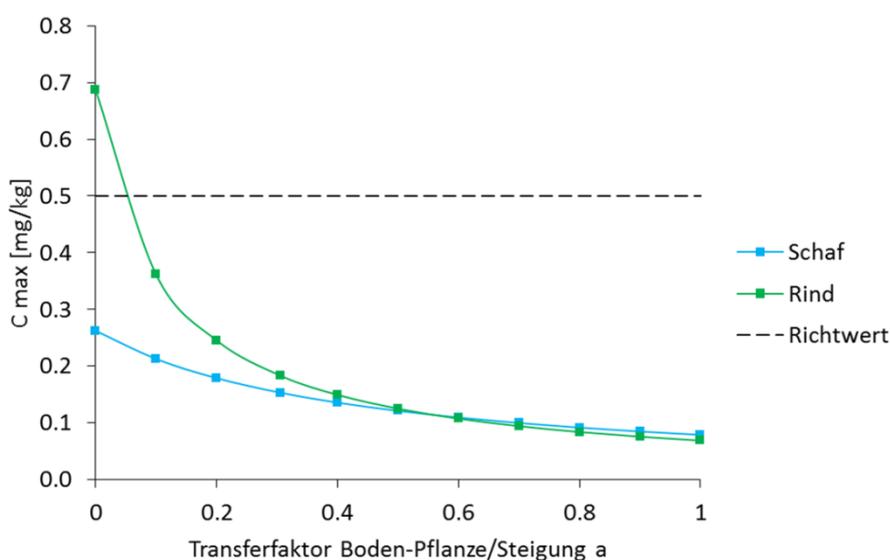


Abbildung 10: Beziehung zwischen dem aus Formel 1 errechneten Prüferte für Futterpflanzenanbau und der Steigung der Boden-Pflanzen Transfergerade (Steigung a) für das Schaf und das Rind.

Die internationale Umschau nach Prüferten zeigt, dass ein Prüferte von 0.5 mg/kg in einem vernünftigen Bereich liegt (Tabelle 11). Die Definitionen der ausländischen Prüferten decken sich ungefähr mit der Schweizer Definition in der VBBo, allerdings unterscheiden sich die Wirkungspfade oder sind nicht deklariert, was den Vergleich erschwert.

Internationale Vergleiche von Prüferten anderer Schwermetalle zeigen keine systematischen Abweichungen, die auf unterschiedliche Definitionen und Anwendungen zurückzuführen wären. Das heisst, nicht immer das gleiche Land hat den tiefsten oder höchsten Wert (Tabelle 11). Die Unterschiede scheinen vielmehr in unterschiedlichen Herleitungsmethoden zu liegen.

Tabelle 11: Internationaler Vergleich der Prüfwerte für Quecksilber, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink festgelegt für die landwirtschaftliche Landnutzung.

	Quecksilber [mg/kg]	Blei [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Kupfer [mg/kg]	Zink [mg/kg]
Resultate (Kap. 3.3)	0.5				
Schweiz [6]	-	200	2	150	-
Mailänder und Hämman [8]	10	500	2	50	300
Deutschland [10]	5				
Kanada <sup>1)</sup> [13]	0.5				
Litauen (Kestutis Kadunas)	0.5				
Malaysia <sup>2)</sup> [13]	0.362				
Katalonien [11]	2	60	2.5	90	170
Schweden [14]	0.25	80	0.4	100	350

<sup>1)</sup> Proposed mercury criteria for the protection of selected natural resources

<sup>2)</sup> Proposed mercury criteria for the protection of human health

### Sanierungswert

Der empfohlene Sanierungswert von 20 mg/kg entspricht dem Best-Case Szenario mit den vorliegenden Daten. Massgebend bei der Zusammenführung waren die Werte des Wirkungspfades der Nahrungspflanzen. Die Sanierungswerte für Futterpflanzen und für das Pflanzenwachstum fielen dabei ausser Betracht. Bei der Herleitung wurde, dem VBBo-Konzept entsprechend, davon ausgegangen, dass der Boden nach überschreiten des Sanierungswertes auf keinen Fall mehr gefahrlos genutzt werden kann und Nutzungseinschränkungen die Gefährdung nicht abwenden können. Unterhalb des Sanierungswertes sind Gefährdungen immer noch möglich, müssten aber durch die Prüfung nach der Prüfwertüberschreitung erkannt werden und könnten im Idealfall durch Nutzungseinschränkungen abgewendet werden.

Die empfohlenen Werte sind durchwegs höher als die ausländischen (Kapitel 2). Im internationalen Vergleich zeigt sich jedoch, dass die Schweizer Sanierungswerte generell höher liegen als die ausländischen (Tabelle 12). Dies liegt vermutlich daran, dass die Schweizer Gesetzgebung den Sanierungswert interventionsstärker definiert; d.h. die Sanierung ist zwingend und Nutzungseinschränkungen reichen nicht aus als Massnahme, welche in ausländischen Regelwerken häufig noch möglich ist. Als Sanierungsmassnahmen gelten Dekontamination und Sicherung (langfristigen Verhinderung der Ausbreitung) (Art. 16, AltIV).

Tabelle 12: Internationaler Vergleich der Sanierungswerte für Quecksilber, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink festgelegt für die landwirtschaftliche Landnutzung.

	Quecksilber [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Kupfer [mg/kg]	Blei [mg/kg]	Zink [mg/kg]
Resultate (Kap. 3.3.)	20				
Schweiz [7]		30	1000	2000	2000
Eikmann und Kloke [9]	50	5	200	1000	600
Belgien [18]	2.9	2	120	200	333
Deutschland [10]	2	20	300	1200	
Finnland [19]	2	10	150	200	250
Kanada [17]	6.6	1.4	63	70	200

Die Situation ist jedoch insofern unbefriedigend, als dass für Nahrungspflanzen nur relativ wenig Daten von wenigen Pflanzenarten zur Verfügung standen, so dass das Abschätzungsverfahren nach BUWAL-Richtlinie Nr. 83 vereinfacht werden musste und der Sanierungswert damit auf einer eher schwachen Datenbasis steht. Besser zugänglich sind abgeschätzte Transferfaktoren, die im Gegensatz zu den Datenpaaren, häufig publiziert sind. Transferfaktoren werden jeweils aus einem Satz von Datenpaaren einer bestimmten Pflanzenart - in der Regel durch lineare Regression- gewonnen und geben die Beziehung zwischen der Konzentration im Boden bzw. in der darauf wachsenden Pflanze wieder. Zur Stützung und Plausibilisierung des hier vorgeschlagenen Sanierungswertes von 20 mg/kg wurden 75 Transferfaktoren von 22 verschiedenen Nahrungspflanzen aus der Literatur ausgewertet [42-45]. Damit wurde für jeden Transferfaktor ein „Sanierungswert“ einer einzelnen Pflanzenart berechnet nach:

$$SW = \frac{C_{Pflanze\ DW}^{max}}{TF_{DW/DW}}$$

SW: Sanierungswert [mg/kg]  
 $C_{Pflanze\ DW}^{max}$ : Grenzwert in der Pflanze (bzgl. Trockengewicht)  
 $TF_{DW/DW}$ : Transferfaktor Boden-Pflanze (bzgl. Trockengewicht)

Werden die nach der BUWAL-Richtlinie Nr. 83 anzuwendenden dreifachen Toleranzwerte als Grenzwerte  $C_{Pflanze\ DW}^{max}$  in der Pflanze an diesen Transferfaktoren gemessen (siehe Formel oben), ergeben sich Sanierungswerte in einem Streubereich zwischen 1 und 200 mg/kg (Abbildung 11). Die hier vorgeschlagenen 20 mg/kg für den Sanierungswert auf der Basis des „Best-Case-Scenarios“ für Nahrungspflanzen liegen im untersten Drittel der Häufigkeitsverteilung. Dabei sind Werte von Samenpflanzen wie Getreide, Raps oder Sonnenblume noch nicht einmal enthalten, weil in den Samen die Quecksilberkonzentration in der Regel unter der analytischen Nachweisgrenze lag oder nicht mit dem Gehalt im Boden korrelierten [46-50]. Szabo und Fodor [49] fanden in einem Feldversuch bis zu 111 mg/kg Quecksilber im Weizenstroh, aber kein nachweisbares Quecksilber im Korn. Kritisch bei diesen Abschätzungen mit Transferfaktoren ist allerdings die extrem weite Extrapolation; die Bodenkonzentrationen lagen bei maximal 20 mg/kg (häufig aber unter 1 mg/kg).

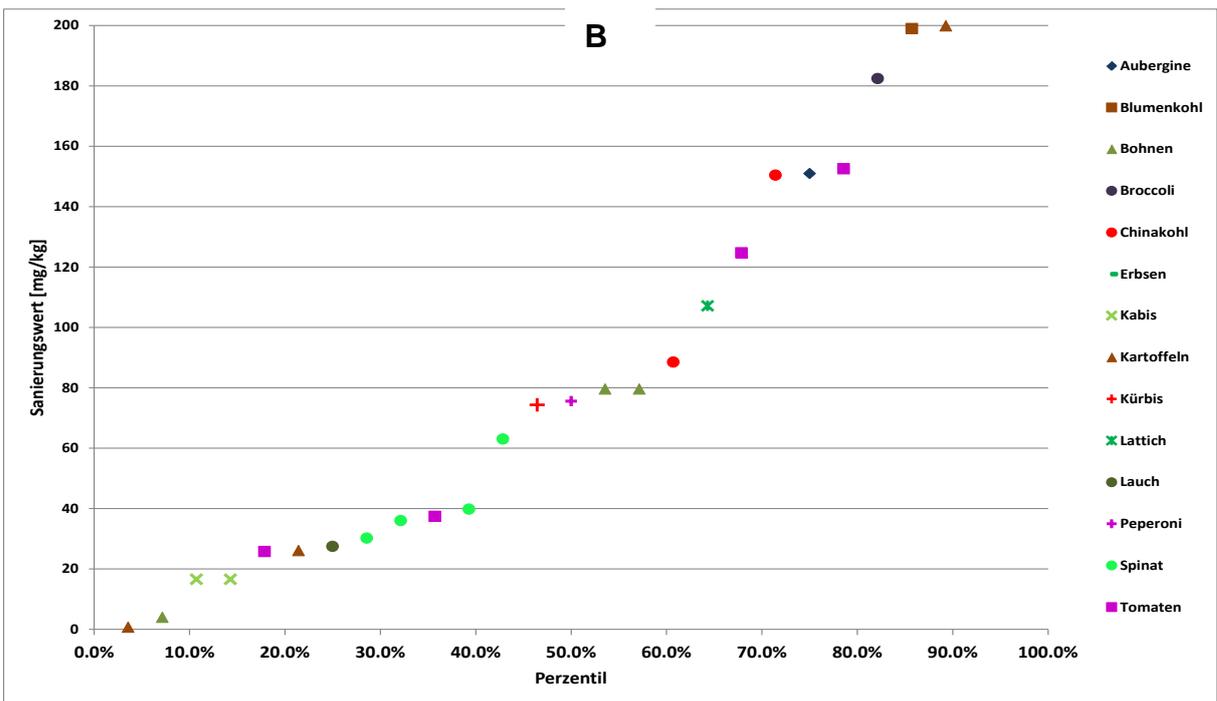
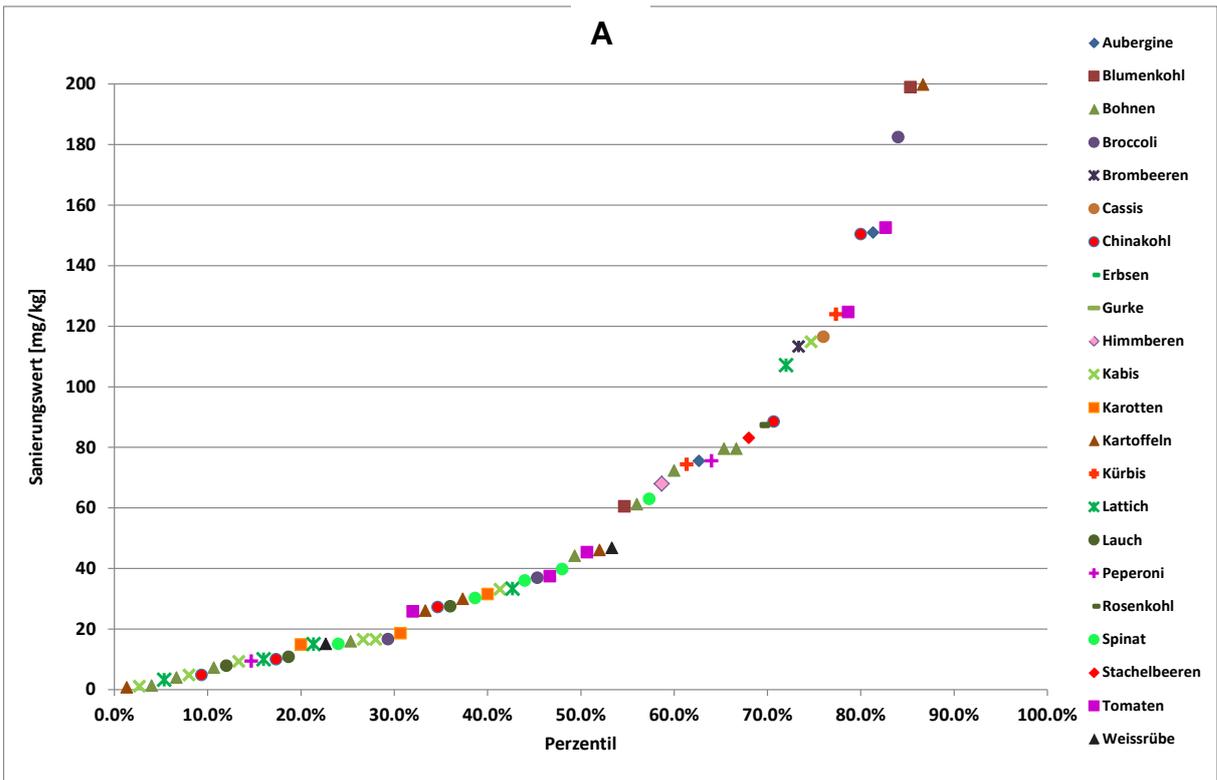


Abbildung 11: Kumulative Häufigkeit der aus Transferfaktoren errechneten Sanierungswerte.

A: Quecksilberkonzentrationen im Boden 0.1 – 20 mg/kg.

B: Quecksilberkonzentrationen im Boden eingeschränkt auf 2 – 20 mg/kg.

Die extreme Streuung der Transferfaktoren bzw. der daraus errechneten Sanierungswerte widerspiegelt möglicherweise die schlechte Korrelation zwischen den Hg-Totalgehalten in Böden und den Gehalten in den Pflanzen. Die möglichen Gründe dafür sind vielfältig:

a) Hg-Spezies

Quecksilber kommt in der Umwelt als ionisches  $\text{Hg}^{2+}$ , als metallisches  $\text{Hg}(0)$  und als organische Verbindungen vor. Diese haben unterschiedliche Kontaminationspfade und Verfügbarkeiten.

b) Bodeneigenschaften

Die Löslichkeit bzw. Pflanzenverfügbarkeit von  $\text{Hg}^{2+}$  in Böden ist pH-abhängig (Abbildung 12). Ab pH 5.5 sinkt die Löslichkeit drastisch [51]. Sie ist auch abhängig vom Tongehalt und vom Gehalt an organischer Bodensubstanz, wobei die Sorption an organischer Bodensubstanz pH-unabhängig ist.

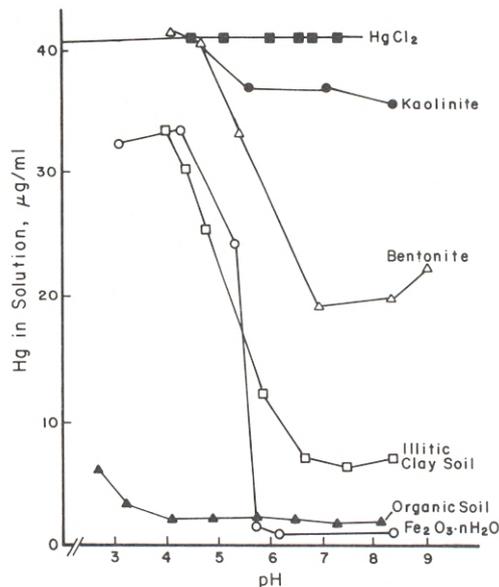


Abbildung 12: Löslichkeit von  $\text{Hg}^{2+}$  in Abhängigkeit des pH in Gegenwart verschiedener Sorbenzien (aus [51]).

c) Pflanzenart

Die Hg Aufnahme ist pflanzenspezifisch aber generell gering. Die Korrelation zwischen Bodengehalten und Wurzelgehalten ist häufig noch signifikant [47, 51], im Stamm, in Blättern und Samen ist der Gehalt jedoch in der Regel noch wesentlich geringer ( $<0.5\%$  der Konzentration in der Wurzel) [52] und die Korrelation nicht mehr signifikant [46, 47]. Pflanzenarten scheinen bezüglich Quecksilber oft eine effiziente Wurzel-Spross-Barriere zu haben [51, 53].

d) Atmosphärische Deposition

Hg-Belastungen in der Luft schlagen sich im Gehalt des Pflanzensprosses nieder. Luftgetragenes Quecksilber wird von den Blättern aufgenommen und von dort im Rest der Pflanze verteilt. Die Translokation von den Blättern ist sogar grösser als von den Wurzeln [51, 54]. Die Belastung der Luft kann durch Ausgasung von  $\text{Hg}(0)$  und organischem Hg aus dem Boden stammen, oder aber durch Immissionen bzw. atmosphärische Depositionen aus z. B. umliegenden Industrieanlagen [46, 47, 50, 53]. Letztere können auch zu fehlerhaften Transferfaktoren beitragen, wenn die Untersuchung an Standorten im Immissionsbereich von Industrieanlagen angestellt wurde.

Die hier versuchte Plausibilisierung scheint den vorgeschlagenen Sanierungswertes von 20 mg/kg grundsätzlich zu stützen. Der vorgeschlagene Sanierungswert liegt im untersten Quartil der angenäherten Sanierungswerte aus Bodenkonzentrationen >2 mg/kg (Abbildung 11B). Am ehesten scheint sich deshalb eine Korrektur zu höheren Werten anzubieten. Die Plausibilisierung mit Transferfaktoren zeigt aber bestenfalls, dass der vorgeschlagene Sanierungswert nicht zu hoch liegt, denn die hier verwendeten Transferfaktoren extrapolieren Sanierungswerte weit ausserhalb der Konzentrationsbereiche in denen die Transferfaktoren bestimmt wurden. Dadurch entstehen erhebliche Unsicherheiten. Der ohnehin schon schwache Zusammenhang zwischen der Konzentration im Boden und in der Pflanze rechtfertigt eine solche Extrapolation keineswegs. In dieser Hinsicht war die Wahl der Daten in Abbildung 8 sehr viel plausibler, konnten doch dort die Sanierungswerte interpoliert werden.

### 3.5 Diskussion

#### Prüfwerte

Die aus der Herleitung resultierenden Prüfwerte von 0.5 mg/kg für Nahrungs- und Futterpflanzenanbau sind identisch mit dem heute gültigen Richtwert in der VBBo. Bei der Herleitung von Prüfwerten für Cadmium war dieser Fall bereits einmal aufgetreten. Der Toleranzwert wurde bei allen Nahrungspflanzen bereits bei Bodenkonzentrationen kleiner als 1 mg/kg überschritten. Die Festsetzung des Prüfwerts auf dem Niveau des Richtwerts (0.8 mg/kg) hätte, laut damaliger Argumentation, viele Einzelfalluntersuchungen zur Folge gehabt. Da dies aus „praktischen und ökonomischen Gründen“ nicht sinnvoll erschien und überdies erst ab einer Bodenkonzentration von 3 mg/kg ein starker Anstieg der Pflanzenkonzentrationen beobachtet wurde, legte man den Prüfwert für Cadmium bei 2 mg/kg fest, wodurch er im Bereich von ausländischen Grenzwerten zu liegen kam. Da mit der Wahl der Toleranzwerte für Nahrungspflanzen als Bewertungskriterium eine genügende Sicherheit eingebaut sei, so die Argumentation, wurde der Prüfwert von 2 mg/kg als vertretbar bezeichnet. Ein Entscheid dieser Art für Quecksilbergrenzwerte würde ökonomische und gesellschaftliche Aspekte mit einschliessen und läge ausserhalb der rein naturwissenschaftlichen Betrachtungen, die in dieser Herleitung herangezogen wurden.

#### Sanierungswerte

Bei der Zusammenführung der Wirkungspfade zur Herleitung des Sanierungswertes, wird der höhere der beiden Werte vom Nahrungspflanzenanbau bzw. Futterpflanzenanbau massgebend. Diesem Vorgehen liegt das Konzept zu Grunde, dass der Sanierungswert so hoch gelegt werden muss, dass nach dessen Überschreitung Landnutzungsrestriktionen nicht mehr möglich sein dürfen; d.h. ab dem Sanierungswert ist weder Nahrungspflanzen- noch Futterpflanzenanbau zugelassen. Im vorliegenden Fall wurde deshalb der Sanierungswert Nahrungspflanze massgebend. Die Konsequenz ist, dass bei Konzentrationen zwischen Prüf- und Sanierungswert die Gefährdungsprüfung ergeben könnte, dass Nahrungspflanzen angebaut werden dürften, während die Nutzung für Futterpflanzenanbau und Beweidung nicht mehr zugelassen wäre.

Die Höhe des Sanierungswertes ist grundsätzlich nicht sicherheitsrelevant im Sinne der Nahrungsmittelsicherheit, vorausgesetzt, die Gefährdungsprüfung der Böden mit Quecksilberkonzentrationen im Prüfbereich (zwischen Prüfwert und Sanierungswert) deckt Sicherheitsrisiken zuverlässig auf. Die Zuverlässigkeit der Gefährdungsprüfung beeinflusst die Höhe der verbleibenden „Restrisiken“. Insofern beeinflusst der Sanierungswert die Nahrungsmittelsicherheit nur mittelbar. Die Höhe des Sanierungswertes entscheidet hingegen wesentlich über Kosten, die durch mehr Sanierungsfälle bzw. mehr Prüffälle entstehen.

## 4. Ausblick

Die in diesem Bericht empfohlenen Prüf- und Sanierungswerte gelten für Totalgehalte an Quecksilber, weil in den verwendeten Studien nur die Quecksilber-Totalgehalte in Pflanzen und Bodenproben gemessen wurden. Die organischen Quecksilberverbindungen sind jedoch beträchtlich toxischer als die anorganischen. Auf die Problematik der organischen Quecksilberverbindungen wird im Bericht „Quecksilber in Böden: Organische Quecksilberverbindungen – Landwirtschaftliche Bodennutzung“ (Forschungsanstalt ART Reckenholz, Mai 2013) eingegangen.

Die Korrelation zwischen Quecksilber-Totalgehalt im Boden und der Pflanze scheint anhand der vorhandenen Daten statistisch nicht signifikant zu sein. Dies könnte daran liegen, dass für die Nahrungspflanzen Datenpools verwendet wurden, aber auch, dass der Totalgehalt von Quecksilber den pflanzenverfügbaren Anteil des Quecksilbers im Boden nicht repräsentiert. Der lösliche Quecksilbergehalt im Boden würde eventuell zu einer besseren Korrelation führen und könnte eine sicherere Abstützung der Grenzwerte ermöglichen. Damit könnten auch die Prüfwerte für die löslichen Anteile hergeleitet werden, wie sie in der VBBo vorgesehen sind. Die Boden- und Pflanzendaten dazu müssten aus eigenen Experimenten erarbeitet werden, da die Extraktionsmittel in der Regel länderspezifisch verschieden zusammengesetzt sind.

## 5. Referenzen

1. Medienmitteilung des Kanton Wallis: Quecksilber-Belastungen entlang des Grossgrundkanals (2011). Letzter Zugriff:17.10.2012;  
[http://www.vs.ch/Public/doc\\_detail.asp?ServiceID=3&DocumentID=27923](http://www.vs.ch/Public/doc_detail.asp?ServiceID=3&DocumentID=27923).
2. Hämman, M. und Gupta, S.K., Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten für anorganische Schadstoffe im Boden (1997) Umwelt-Materialien Nr.83. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
3. BAG-Factsheet: Quecksilber (2012). Bundesamt für Gesundheit (BAG), Letzter Zugriff:17.10.2012;  
<http://www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/03912/index.html?lang=de>.
4. Fitzgerald, W.F. und Lamborg, C.H., Geochemistry of Mercury in the Environment (2003) Treaties on Geochemistry. 9: p.107-148.
5. FAO/WHO, Evaluation of certain contaminants in food (Seventy-second JEFCA Report) (2011). Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JEFCA), WHO Technical Report Series; 959:[http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO\\_TRS\\_959\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_959_eng.pdf).
6. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) (1998). 814.12 Letzter Zugriff:05.10.2012;  
<http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.12.de.pdf>.
7. Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) (1998). Schweizerische Bundesrat, Letzter Zugriff:05.10.2012;  
<http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.680.de.pdf>.
8. Mailänder, R.A. und Hämman, M., Handbuch: Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden (2005) Handbuch. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
9. Eikmann, T. und Kloke, A., Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schadstoffe in Böden *In* Bodenschutz, ergänzbares Handbuch, G. Einsele, Editor. 1993, Erich Schmidt Verlag: Berlin.
10. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) (1999). Bundesregierung, Letzter Zugriff:18.10.2012; <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt.pdf>.
11. Real Decreto 9/2005 (2005). Generalitat de Catalunya Letzter Zugriff:18.10.2012;  
<http://www.boe.es/boe/dias/2005/01/18/pdfs/A01833-01843.pdf>.
12. Development of Generic Guideline Values (1996). Swedish Environmental Protection Agency (EPA), Letzter Zugriff:18.10.2012;  
<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-4639-X.pdf>.
13. Eisler, R., Proposed Mercury Criteria for Protection of Natural Resources and Human Health. *In* Mercury: Hazards to living organisms, R. Eisler, Editor. 2006, CRC Press: Boca Raton, FL.
14. Table of generic guideline values (2012). Swedish Environmental Protection Agency (EPA), Letzter Zugriff:05.11.2012; <http://www.naturvardsverket.se/en/In-English/Start/Operations-with-impact-on-the-environment/Remediation-of-contaminated-areas/Classification-and-risk-assessment/Generic-guideline-values-for-contaminated-soils/Table-of-generic-guideline-values/>.
15. Kabata-Pendias, A. und Sadurski, W., Trace elements and compounds in soil. *In* Elements and their compounds in the environment, E. Merian, M. Anke, M. Ihnat und M. Stoepler, Editoren. 2004, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA: Weinheim.
16. Alberta Tier 1 soil and groundwater remediation guidelines (2010). Letzter Zugriff:31.10.2012;  
<http://environment.gov.ab.ca/info/library/7751.pdf>.
17. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health: Mercury (1999). Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), Letzter Zugriff:18.10.2012; <http://cegg-rcqe.ccme.ca/>.
18. Order of the Flemish government establishing the Flemish regulation on soil remediation and soil protection (1996). Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (Flemish Office of Waste Management, OVAM), Letzter Zugriff:18.10.2012; <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/plainWettekstServlet?wettekstId=23754&lang=en>.
19. Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs (2007). Ministry of the Environment, Letzter Zugriff:18.10.2012;  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/kaannokset/2007/en20070214.pdf>.

20. Verordnung des EDI über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (Fremd- und Inhaltsstoffverordnung, FIV) (1995). Eidgenössisches Departement des Innern (EDI), Letzter Zugriff:05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/817.021.23.de.pdf>.
21. Verordnung über die Produktion und das Inverkehrbringen von Futtermitteln, Futtermittelzusatzstoffen und Diätfuttermitteln (Futtermittelbuch-Verordnung, FMBV) (2011). Das Eidgenössische Volkswirtschaftsdepartement, Letzter Zugriff:05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/d/sr/9/916.307.1.de.pdf>.
22. Caille, N., Vauleon, C., Leyval, C. und Morel, J.-L., Metal transfer to plants grown on a dredged sediment: use of radioactive isotope <sup>203</sup>Hg and titanium (2005) *Science of the Total Environment*. 341: p.227-239.
23. Chunilall, V., Kindness, A. und Jonnalagadda, B., Heavy metal uptake by spinach leaves grown on contaminated soils with lead, mercury, cadmium, and nickel (2004) *Journal of Environmental Science and Health*. B39(3): p.473-481.
24. Chunilall, V., Kindness, A. und Jonnalagadda, B., Heavy metal uptake by two edible Amaranthus herbs grown on soils contaminated with lead, mercury, cadmium and nickel (2005) *Journal of Environmental Science and Health*. 40: p.375-384.
25. Egler, S.G., Rodrigues-Filho, S., Villas-Bôas, R.C. und Beinhoff, C., Evaluation of mercury pollution in cultivated and wild plants from two small communities of the Tapajós gold mining reserve, Pará State, Brazil (2006) *Science of the Total Environment*, (368): p.424-433.
26. Kloke, A., Nutzungsmöglichkeiten und Sanierung belasteter Böden. VDLUFA-Schriftenreihe, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA). Vol. 34/1991. 1991, VDLUFA-Verlag: Darmstadt.
27. Krüger, F. und Gröngroft, A., The difficult assessment of heavy metal contamination of soils and plants in Elbe river floodplains (2003) *Acta Hydrochimica et hydrobiologica*. 31(4-5): p.436-443.
28. Lenka, M., Panda, K.K. und Panda, B.B., Monitoring and Assessment of mercury pollution in the vicinity of a Chloralkali plant. IV. Bioconcentration of mercury in In Situ aquatic and terrestrial plants at Ganjam, India. (1992) *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 22: p.195-202.
29. Li, G., Feng, X., Qiu, G., Bi, X., Li, Z., Zhang, C., Wang, D., Shang, L. und Guo, Y., Environmental mercury contamination of an artisanal zinc smelting area in Weining County, Guizhou, China (2008) *Environmental Pollution*. 154: p.21-31.
30. Loredo, J., Pereira, A. und Ordóñez, A., Untreated abandoned mercury mining works in a scenic area of Asturias (Spain) (2003) *Environment International*. 29: p.481-491.
31. Liu, W.-X., Li, H.-H., Li, S.-R. und Wang, Y.-W., Heavy metal accumulation of edible vegetables cultivated in agricultural soil in the suburb of Zhengzhou City, People's Republic of China (2006) *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 76: p.163-170.
32. Rodrigues, S.M., Henriques, B., Reis, A.T., Duarte, A.C., Pereira, E. und Römkens, P.F.A.M., Hg transfer from contaminated soils to plants and animals (2012) *Environmental Chemistry Letters*. 10: p.61-67.
33. Senila, M., Levei, E.A., Senila, L.R., Oprea, G.M. und Roman, C.M., Mercury in soil and perennial plants in a mining-affected urban area from Northwestern Romania (2012) *Journal of Environmental Science and Health*. 47: p.614-621.
34. Sipter, E., Rózsa, E., Gruiz, K., Tátrai, E. und Morvai, V., Site-specific risk assessment in contaminated vegetable gardens (2008) *Chemosphere*. 71: p.1301-1307.
35. Wang, J., Feng, X., Anderson, C.W.N., Zhu, W., Yin, R. und Wang, H., Mercury distribution in the soil-plant-air system at the Wanshan mercury mining district in Guizhou, Southwest China (2011) *Environmental Toxicology and Chemistry*. 30(12): p.2725-2731.
36. Wiersma, D., van Goor, B.J. und van der Veen, N.G., Cadmium, Lead, Mercury, and Arsenic concentrations in crops and corresponding soils in the Netherlands (1986) *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 34: p.1067-1074.
37. Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln (2006). Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Letzter Zugriff:30.10.2012; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:DE:PDF>.
38. Kabata-Pendias, A. und Pendias, H., Trace Elements in Soils and Plants. 2001, CRC Press: Boca Raton, Florida.

39. Eikmann, T., Kloke, A. und Lühr, T.H., Grundlagen und Wege zur Ermittlung von Bodenwerten für das Drei-Bereiche-System. *In* IWS Schriftenreihe. 1991, Erich Schmidt Verlag: Berlin. p. 279-351.
40. Koronowski, P., Nebenwirkungen von Quecksilberverbindungen auf Mensch und Tier. *In* Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem. 1973: Berlin.
41. Macnicol, R.D. und Beckett, P.H.T., Critical tissue concentrations of potentially toxic elements (1985) *Pant and Soil*. 85: p.107-129.
42. Ian, M. und Claire, C., Supplementary information for the derivation of SGV for mercury (2009). Environment Agency, UK, Letzter Zugriff:23. 1. 2013; <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQA-e-e.pdf>.
43. Qian, J.P., Zhang, L., Chen, H.Z., Hou, M., Niu, Y.F., Xu, Z.P. und Liu, H.L., Distribution of Mercury Pollution and Its Source in the Soils and Vegetables in Guilin Area, China (2009) *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 83(6): p.920-925.
44. Zheng, N., Wang, Q.C. und Zheng, D.M., Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in china via consumption of vegetables (2007) *Science of the Total Environment*. 383(1-3): p.81-89.
45. Wang, X., Wang, F.H., Chen, B., Sun, F.F., He, W., Wen, D., Liu, X.X. und Wang, Q.F., Comparing the health risk of toxic metals through vegetable consumption between industrial polluted and non-polluted fields in Shaoguan, south China (2012) *Journal of Food Agriculture & Environment*. 10(2): p.943-948.
46. Feng, X.B., Li, G.H. und Qiu, G.L., A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang County, Guizhou, China: Part 2. Mercury contaminations to soil and crop (2006) *Science of the Total Environment*. 368(1): p.47-55.
47. Niu, Z.C., Zhang, X.S., Wang, Z.W. und Ci, Z.J., Field controlled experiments of mercury accumulation in crops from air and soil (2011) *Environmental Pollution*. 159(10): p.2684-2689.
48. Granato, T.C., Pietz, R.I., Gschwind, J. und Luehing, C., MERCURY IN SOILS AND CROPS FROM FIELDS RECEIVING HIGH CUMULATIVE SEWAGE-SLUDGE APPLICATIONS - VALIDATION OF US EPAS RISK ASSESSMENT FOR HUMAN INGESTION (1995) *Water Air and Soil Pollution*. 80(1-4): p.1119-1127.
49. Szabo, L. und Fodor, L., Uptake of microelements by crops grown on heavy metal-amended soil (2006) *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 37(15-20): p.2679-2689.
50. de Vries, W., Romkens, P. und Schutze, G., Critical soil concentrations of cadmium, lead, and mercury in view of health effects on humans and animals. *In* *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol 191, G. W. Ware, Editor. 2007, Springer: New York. p. 91-130.
51. Adriano, D.C., *Trace Elements in the Terrestrial Environment*. 1986, Springer: New York.
52. Greger, M., Wang, Y.D. und Neuschütz, C., Absence of Hg transpiration by shoot after Hg uptake by roots of six terrestrial plant species (2005) *Environmental Pollution*. 134(2): p.201-208.
53. Patra, M. und Sharma, A., Mercury toxicity in plants (2000) *Botanical Review*. 66(3): p.379-422.
54. Kaiser, G. und Tölg, G., Mercury. *In* *The handbook of environmental chemistry*, Otto Hutzinger, Editor. 1980, Springer-Verlag Berlin. p. 1-58.
55. (EG) Nr. 149/2008: Änderung der Verordnung (EG) Nr. 396/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung der Anhänge II, III und IV mit Rückstandshöchstgehalten für die unter Anhang I der genannten Verordnung fallenden Erzeugnisse (2008). Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Letzter Zugriff:05.12.2012; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2008R0149:20080901:DE:PDF>.
56. FAO/WHO, Evaluation of certain food additives and contaminants (Sixty-seventh JEFCA Report) (2007). Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JEFCA), WHO Technical Report Series; 940:[[http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO\\_TRS\\_940\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_940_eng.pdf)].
57. Carlon, C., D'Alessandro, M. und Swartjes, F., Derivation methods of soil screening values in Europe (2007). European Communities Letzter Zugriff:18.10.2012; [http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb\\_archive/eusoils\\_docs/other/EUR22805.pdf](http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/EUR22805.pdf).

58. Wilke, B.-M., Fucks, M., See, R., Skoluda, R., Hund-Rinke, K., Görtz, T., Nöker, R., Peters, R., Pieper, S., Kratz, W., Römbke, J., Kalsch, W., Moser, T., Sittinger, P. und Steiger, H., Entwicklung ökotoxikologischer Orientierungswerte für Böden. *In* Übergreifende Angelegenheiten Bodenökologie, Bodenqualität, Umweltbundesamt, Editor. 2001.
59. Circular on target and intervention values (2000). Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Letzter Zugriff: 18.10.2012; [http://esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS\\_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf](http://esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf).
60. Regeling bodemkwaliteit (2007). Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer Letzter Zugriff: 18.10.2012; [http://wetten.overheid.nl/BWBR0023085/geldigheidsdatum\\_18-10-2012](http://wetten.overheid.nl/BWBR0023085/geldigheidsdatum_18-10-2012).
61. Guideline values for the risk assessment of contaminated sites (1999). Statens Forurensningstilsyn (Norwegian Pollution Control Authority, SFT), Letzter Zugriff: 18.10.2012; <http://www.klif.no/publikasjoner/andre/1691/ta1691.pdf>.
62. Guideline on Investigation levels for soil and groundwater (2011). National Environmental Protection Council, National Environmental Protection Measure 2011 (NEPM) Letzter Zugriff: 18.10.2012; [http://www.scew.gov.au/archive/site-contamination/pubs/asc-nepm/schedule\\_b1\\_guideline\\_on\\_investigation\\_levels\\_for\\_soil\\_and\\_groundwater\\_sep10.pdf](http://www.scew.gov.au/archive/site-contamination/pubs/asc-nepm/schedule_b1_guideline_on_investigation_levels_for_soil_and_groundwater_sep10.pdf).
63. Investigación de la contaminación del suelo IHOBÉ, SA, Letzter Zugriff: 18.10.2012; <http://www.ihobe.net/Paginas/Ficha.aspx?IdMenu=8eefd843-1f7a-43dc-bc9a-ca08859ccaf6>.
64. Morgan, H., De Búrca, R., Martin, I. und Jeffries, J., Soil Guideline Values for mercury in soil (2009). Environment Agency, UK, Letzter Zugriff: 18.10.2012; <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQG-e-e.pdf>.
65. Supplemental Guidance for developing soil screening levels for superfund sites (2002). United States Environmental Protection Agency (EPA), Letzter Zugriff: 18.10.2012; [http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/ssg\\_main.pdf](http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/ssg_main.pdf).
66. Soil Contamination Countermeasure Act (Act. No. 53) (2002). Government of Japan, Letzter Zugriff: 18.10.2012; <http://www.env.go.jp/en/laws/water/sccact.pdf>.
67. Soil remediation circular (2009). Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, Letzter Zugriff: 18.10.2012; <http://de.scribd.com/doc/40493438/Soil-Remediation-Circular-2009>.
68. Alloway, B.J., Schwermetalle in Böden, Analytik, Konzentrationen und Wechselwirkungen. 1999, Springer: Berlin.
69. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz, BBodSchG) (1998). Bundesregierung, Letzter Zugriff: 16.10.2012; <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschg/gesamt.pdf>.
70. Environmental Protection Act (2000). Ministry of the Environment, Letzter Zugriff: 13.10.2012; <http://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2000/en20000086.pdf>.

## 6. Anhang

### Anhang 1: Kontaktpersonen und Experten

Name	Institut	Strasse	Ort	Land
Dr. Chris Anderson	Massey University			Neuseeland
Prof. Paul Bardos	r3 Environmental Technology Ltd	Russell Building Whiteknights	PO Box 233 Reading RG6 6DW	UK
Dr. Beat Brüscheiler	Bundesamt für Gesundheit BAG, Abteilung Lebensmittelsicherheit	Stauffacherstrasse 101	8004 Zürich	Schweiz
Dr. Hector Conesa	Universidad Politécnica de Cartagena	Paseo Alfonso XIII, 48	30203-Cartagena	Spanien
Dominique Darmendrail	BRGM, Direction Générale	Tour Mirabeau, 39-43 Quai André Citroën	75739 Paris cedex 15	Frankreich
Esther Goidts	Direction Générale opérationelle de l'Agriculture, des Ressource Naturelles et de l'Environnement	Avenue Prince de Liège 15	B-5100 Namur	Belgien
Kestutis Kadunas	Lithuanian geological survey, Ministry of the environment	S. Konarskio str. 35	LT- 03123 Vilnius	Litauen
Frank Krüger	ELENA Boden Wasser Monitoring	Zehrener Dorfstrasse 22	39619 Arendsee	Deutschland
Tina Leger	Ministère de l'ecologie, du développement durable, et de l'énergie ( DGPR-B3S)	Grande Arche Paroi Nord	92 055 La Défense Cedex	Frankreich
Huifang Ma	ETH Zürich Institute for Terrestrial Ecosystems	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Schweiz
Dr. Peter Nadebaum	GHD	Level 8, 180 Lonsdale Street	Melbourne, Victoria, 3000	Australien
Prof. Dr. Thorsten Reemtsma	Helmholtz Centre for Environmental Re- search, Department of Analytical Chemistry	Permoserstrasse 15	04318 Leipzig	Deutschland
Prof. Dr. Jörg Rinklebe	Bergische Universität Wuppertal, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen	Pauluskirchstrasse 7	42285 Wuppertal	Deutschland
Dr. Brett Robinson				Neuseeland
Dr. Sónia Rodrigues	Universidade de Aveiro CESAM Centro de Estudos do ambiente et do mar	Campus Universitário de Santiago	3810-193 Aveiro	Portugal
Dr. Sarah Rothenberg	Department of Environmental Health Scienc- es, PHRC, 401	921 Assembly Street	SC 29208 Columbia	USA
Prof. Dr. Rainer Schulin	ETH Zürich Institute for Terrestrial Ecosystems	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Schweiz
Marin Senila	INCDO-INOE 2000, Research Institute for Analytical Instrumentation ICIA	Donath Street 67, CP 717,OP 5	400293 Cluj-Napoca	Rumänien
Emese Sipter	Department of Labor and Environmental Health, Semmelweis University	Nagyvárad tér 4	1089 Budapest	Ungarn
Dr. Susan Tandy	ETH Zürich Institute for Terrestrial Ecosystems	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Schweiz
Dr. Jan Wiederhold	ETH Zürich Institute of Biogeochemistry and Pollutant Dynamics	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Schweiz
Dr. Ming Hung Wong	Hong Kong Baptist University Department of Biology	Kowloon Tong		China

## Anhang 2: Quecksilber Grenzwerte aus dem Ausland

- Tabelle 1: Richtwerte

(Konzentrationen unter diesem Wert stellen keine Gefahr dar für Mensch, Tier und Umwelt)

	<b>Richtwert [mg/kg]</b>	<b>Kommentar</b>	<b>Quelle</b>
Belgien (Flandern)	0.05		Carlon et al. [57]
China	0.15	Naturschutzgebiete	Email von Huifang Ma
China	0.3-1	Landwirtschaft	Email von Huifang Ma
China	1.5	Forstwirtschaft	Email von Huifang Ma
Deutschland	1	Ton	BBodSchV [10]
Deutschland	0.5	Lehm	BBodSchV [10]
Deutschland	0.1	Schluff	BBodSchV [10]
Finnland	0.2		Eisler [13]
Frankreich	3.5		Email von D. Darmendrail
Niederlande	0.3	Zielwert	Eisler [13]
Niederlande	0.5	Hintergrundwert	Eisler [13]
Niederlande	0.3		Wilke et al. [58]
Niederlande	0.3	Zielwert	VROM [59]
Niederlande	0.3	Hintergrundwert	VROM [59]
Niederlande	0.15	Hintergrundwert	VROM [60]
Norwegen	0.05-0.2	allgemein	SFT [61]
Schweden	0.25	Wohngebiete, Kleingärten	EPA [12]
Schweden	2.5	Industrie, Gewerbe	EPA [12]
Slowakei	0.3		Carlon et al. [57]
Tschechien	0.4		Carlon et al. [57]

- Tabelle 2: Prüfwerte:

(Konzentrationen über diesem Wert: Einzelfallprüfung notwendig, meist durch eine Risikoanalyse)

- Tabelle 2.1. Industrie- und Gewerbe

	<b>Prüfwert [mg/kg]</b>	<b>Kommentar</b>	<b>Quelle</b>
Allgemein	2		Eisler [13]
Australien	200	Methyl Hg	NEPM [62]
Australien	800	Anorganisches Hg	NEPM [62]
Australien	200	Methyl Hg	Email von P. Nadebaum
Australien	4000	Anorganisches Hg	Email von P. Nadebaum
Belgien	11	Flandern	OVAM [18]
Deutschland	80		BBodSchV [10]
Frankreich	600		Email von D. Darmendrail
Kanada	24	Gewerbeflächen	CCME [17]
Kanada	50	Industrie	CCME [17]
Niederlande	4.8		VROM [60]
Schweden	5	Mit Grundwasserextraktion	EPA [12]
Schweden	7	Ohne Grundwasserextraktion	EPA [12]
Spanien	40	Baskenland	IHOBE [63]
UK	26	Elementares Hg	Morgan et al. [64]
UK	3600	Anorganisches Hg	Morgan et al. [64]
UK	410	Methyl Hg	Morgan et al. [64]
USA	340		EPA [65]

– Tabelle 2.2. Wohngebiete

	<b>Prüfwert [mg/kg]</b>	<b>Kommentar</b>	<b>Quelle</b>
Australien	1		Eisler [13]
Australien	30	Methyl Hg	Email von P. Nadebaum
Australien	130	Anorganisches Hg	Email von P. Nadebaum
Australien	30	Methyl Hg	NEPM [62]
Australien	600	Anorganisches Hg	NEPM [62]
Belgien	4.8	Flandern	OVAM [18]
Deutschland	20		BBodSchV [10]
Frankreich	7		Email von D. Darmendrail
Niederlande	0.83		VROM [60]
Spanien	4	Baskenland	IHOBE [63]
UK	1	Elementares Hg	Morgan et al. [64]
UK	170	Anorganisches Hg	Morgan et al. [64]
UK	11	Methyl Hg	Morgan et al. [64]
USA	23		EPA [65]

– Tabelle 2.3. Kleingärten, Parks und Spielplätze

	<b>Prüfwert [mg/kg]</b>	<b>Kommentar</b>	<b>Quelle</b>
Allgemein	1		Eisler [13]
Australien	10	Methyl Hg, Kleingarten	Email von P.Nadebaum
Australien	40	Anorganisches Hg, Kleingarten	Email von P.Nadebaum
Australien	10	Methyl Hg, Spielplatz	Email von P.Nadebaum
Australien	80	Anorganisches Hg, Spielplatz	Email von P.Nadebaum
Australien	10	Methyl Hg, Kleingarten	NEPM [62]
Australien	200	Anorganisches Hg, Kleingarten	NEPM [62]
Australien	14	Methyl Hg, Spielplatz	NEPM [62]
Australien	400	Anorganisches Hg, Spielplatz	NEPM [62]
Belgien	4.8		OVAM [18]

Deutschland	10	Kinderspielplätze	BBodSchV [10]
Deutschland	50	Park- und Freizeitanlagen	BBodSchV [10]
Allgemein	2		Mailänder und Hämman [8]
Kanada	6.6	Flandern	CCME [17]
Spanien	4	Spielplatz (Baskenland)	IHOBE [63]
Spanien	15	Park- und Freizeitanlagen (Baskenland)	IHOBE [63]
UK	26	Elementares Hg	Morgan et al. [64]
UK	80	Anorganisches Hg	Morgan et al. [64]
UK	8	Methyl Hg	Morgan et al. [64]

– Tabelle 2.4. Landwirtschaft

	<b>Prüfwert [mg/kg]</b>	<b>Kommentar</b>	<b>Quelle</b>
Allgemein	10		Mailänder und Hämman [8]
Deutschland	5		BBodSchV [10]
Kanada	0.5		Eisler [13]
Litauen	0.5		Email von Kestutis Kadunas
Malaysia	0.362		Eisler [13]
Schweden	1		EPA [12]
Spanien (Katalonien)	2		GENCAT [11]

– Tabelle 2.5. Landnutzung nicht definiert

	<b>Prüfwert [mg/kg]</b>	<b>Kommentar</b>	<b>Quelle</b>
Allgemein	0.4	Errechnet mit DIABEX	Wilke et al. [58]
Allgemein	0.2	Errechnet mit Fame	Wilke et al. [58]
Belgien (Wallonien)	9		Carlton et al. [57]
Dänemark	1		Carlton et al. [57]
Dänemark	0.1		Wilke et al. [58]
Deutschland	2		Eisler [13]
Deutschland	20		Carlton et al. [57]
Finnland	0.5		Carlton et al. [57]
Indonesien/China	20		Email v. Chris Anderson
Japan	15		Japan Act No 53/2002 [66]
Japan	3		Eisler [13]
Niederlande	2		Eisler [13]
Niederlande	10		Eisler [13]
Niederlande	36	Anorganisches Hg	VROM [67]

Niederlande	4	Organisches Hg	VROM [67]
Niederlande	2.2		Wilke et al. [58]
Niederlande	10		VROM [59]
Norwegen	1		SFT [61]
Österreich	2		Carlon et al. [57]
Schweden	5		Carlon et al. [57]
Slowakei	2		Carlon et al. [57]
Tschechien	2.5		Carlon et al. [57]
Ex. UdSSR	2.1		Eisler [13]
USA (New Jersey)	1		Eisler [13]

- Tabelle 3: Sanierungswerte:

(Konzentrationen über diesem Wert: Massnahmen müssen ergriffen werden.)

	<b>Sanierungswert</b>		
	<b>[mg/kg]</b>	<b>Landnutzung</b>	<b>Quelle</b>
Allgemein	10	Kinderspielplätze	Mailänder und Hämmann [8]
Allgemein	20	Haus-und Kleingärten	Mailänder und Hämmann [8]
Allgemein	50	Landwirtschaftliche Nutzflächen, Obst- und Gemüsebau	Mailänder und Hämmann [8]
Allgemein	0.5 - 5	Landwirtschaft	Kabata-Pendias und Sadurski [15]
Belgien	2.9	Landwirtschaft	OVAM [18]
Deutschland	2	Grünland	BBodSchV [10]
Finnland	5	Industriell	EnvFin [19]
Finnland	2	nicht industriell	EnvFin [19]
Kanada	6.6	Landwirtschaft	CCME [17]
Schweiz	5	Haus-und Kleingärten, Kinder- spielplätze und Anlagen auf denen Kinder regelmässig spielen	AltIV [7]

- Tabelle 4: Zulässiger Höchstwert in mit Klärschlamm behandelten Böden

	<b>Grenz-Konzentration [mg/kg]</b>	<b>Quelle</b>
Allgemein	0.1 - 1	Kabata-Pendias und Sadurski [15]
Belgien (Wallonien)	1	Email von Esther Goidts
Dänemark	0.5	Alloway [68]

Deutschland	1	Alloway [68]
EU	1 bis 1.5	Alloway [68]
Finnland	0.2	Alloway [68]
Frankreich	1	Alloway [68]
Norwegen	1	Alloway [68]
Schweden	0.5	Alloway [68]
UK	1	Alloway [68]
USA	8	Alloway [68]

---

## Anhang 3: Definitionen: Quecksilber Prüf- und Sanierungswerte aus dem Ausland

Tabelle 1: Prüfwerte

	Schweiz [6] Prüfwert	Eikmann und Kloke [9] BWII	Deutschland [10, 69] Prüfwert	Schweden [12, 14] Generic guideline value	Spanien (Katalonien) [11] General Reference value
	-	10 mg/kg	5 mg/kg	0.25 mg/kg (2012)/1 mg/kg (1996)	2 mg/kg
<b>Definition</b>	„Prüfwerte geben für bestimmte Nutzungsarten Belastungen des Bodens an, bei deren Überschreitung nach dem Stand der Wissenschaft und der Erfahrung Menschen, Tiere oder Pflanzen konkret gefährdet werden können.“ (Art. 2 Abs. 5 VBBo)	„Schutzgut- und nutzungsbezogener Gehalt in Böden, der trotz dauernder Einwirkung auf die jeweiligen Schutzgüter deren „normale“ Lebens- und Leistungsqualität auch langfristig nicht negativ beeinträchtigt.“ (Seite 7 Eikmann und Kloke)	„Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung eine einzel-fallbezogene Prüfung durchzuführen und festzu-stellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt.“ (§8 Abs.1. 1. BBodSchG)		Konzentration eines Schadstoffs über der maximal tolerierbaren Grenze bezüglich menschlicher Gesundheit und Ökosysteme. (Art. 2 9/2005 GENCAT)
<b>Konz. &lt;</b>			„Liegen der Gehalt oder die Konzentration eines Schadstoffes unterhalb des jeweiligen Prüfwertes in Anhang 2 (Massnahmen-, Prüf- und Vorsorge-werte), ist insoweit der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast ausgeräumt.“ (§4 Abs. 2 Satz 1 BBodSchV)	Unter diesem Wert besteht kein kurz- oder langfristiges Risiko für negative Effekte auf Mensch und Umwelt. (Seite 23, EPA 1996)	
<b>Konz. &gt; Wert</b>	„Sind in einem Gebiet die Prüfwerte überschritten, so prüfen die Kantone, ob die Belastung des Bodens Menschen, Tiere oder Pflanzen konkret gefährdet.“ (Art. 9 Abs. 1 VBBo)	Funktion des Wertes: Überlegungen einzuleiten, wie Gefahren für betroffene Schutzgüter, die am Standort verbleiben müssen, ausgeschlossen werden können; Fehlnutzungen sollen verhindert werden, die Nutzungsmöglichkeiten eines Bo-dens/Standortes sollen ausgelotet werden. (Seite 3 Eikmann und Kloke)	„Werden die in einer Rechtsverordnung nach §8 Abs.1 Satz 2 Nr. 1 festgesetzten Prüfwerte über-schritten, soll die zuständige Behörde die notwen-digen Maßnahmen treffen, um festzustellen, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt. Im Rahmen der Untersuchung und Bewer-tung sind insbesondere Art und Konzentration der Schadstoffe, die Möglichkeit ihrer Ausbreitung in die Umwelt und ihrer Aufnahme durch Menschen, Tier und Pflanzen sowie die Nutzung des Grund-stücks nach §4 Abs.4 zu berücksichtigen.“ (§9 Abs. 1 Satz 2 BBodSchV)	Über diesem Wert besteht das Risiko unerwünschter Effekte. Eine Konzentration über diesem Wert wird nicht in jedem Fall solche Effekte herbeifüh-ren. (aus EPA 2012)  Die Werte werden mit den Konzentrationen am Standort verglichen um zu entscheiden wie schwer ein Stand-ort belastet ist und ob eine Sanierung notwendig ist. (aus EPA 2012)	Prüfung der Risiken auf die menschliche Gesundheit und Ökosysteme. Nach der Risikoab-schätzung muss der Besitzer der Anlage oder falls angemessen der Landbesitzer die Behörden informieren ob der Boden be-lastet ist oder nicht. (Art. 4 Abs. 3 9/2005 GENCAT)
<b>Massnahmen</b>	„Sie dienen der Beurteilung, ob Ein-schränkungen der Nutzung des Bodens nach Artikel 34 Absatz 2 USG nötig sind.“ Art. 2 Abs. 5 VBBo) „Bei konkreter Gefährdung schränken sie die Nutzung des Bodens so weit ein, dass die Gefährdung nicht mehr be-steht.“ (Art. 9 Abs. 2 VBBo)				

Tabelle 2: Sanierungswerte

	Schweiz [7] Sanierungswert	Eikmann und Kloke [9] BWIII	Belgien (Flandern) [18] Soil remediation standard	Deutschland [10, 69] Massnahmenwert	Finnland [19] Guideline value	Kanada [17] Soil quality guideline
	-	<b>50 mg/kg</b>	<b>2.9 mg/kg</b>	<b>2 mg/kg</b>	<b>2 mg/kg</b>	<b>6.6 mg/kg</b>
<b>Definition</b>		„Gehalt im Boden, bei dem Schäden an Schutzgütern wie Pflanze, Tier und Mensch sowie an Nutzungen und Ökosystemen erkennbar werden können. Der BWIII ist ein phyto-, zoo-, human- und ökotoxikologisch abgeleiteter Wert.“ (Eikmann und Kloke, Seite 8).	Die soil remediation standards sollen dem Niveau an Bodenbelastungen entsprechen, welche ein erhebliches Risiko für schädliche Effekte an Mensch und Umwelt mit sich bringt. Dabei werden die Eigenschaften und Funktionen des Bodens mit in Betracht gezogen. (Art.9 §1, OVAM)	„Werte für Einwirkungen oder Belastungen, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung in der Regel von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind.“ (§8 Abs. 1 BBodSchG)		Numerisches Limit oder narrative Aussage, welche empfohlen sind um den Schutz und die spezifischen Nutzungsmöglichkeiten von Wasser, Boden und Sedimenten zu gewährleisten. (CCME, Seite 4)
<b>Konz. &lt; Wert</b>	„Böden, die nach Abs. 1 nicht sanierungsbedürftig sind, obwohl sie belastete Standorte oder Teile davon sind, und Einwirkungen von belasteten Standorten auf Böden werden gemäss der Verordnung vom 1.Juli 1998 über Belastungen des Bodens beurteilt.“ (Art. 12 Abs. 2 AltIV)	„Eingeschränkte, aber standort- und schutzgutbezogene Nutzungsmöglichkeit des Bodens.“ (Eikmann und Kloke, Seite 2)		„Die Ergebnisse der Detailuntersuchung sind nach dieser Verordnung unter Beachtung der Gegebenheiten des Einzelfalls, insbesondere auch anhand von Massnahmenwerten, daraufhin zu bewerten, inwieweit Massnahmen nach §2 Abs. 7 oder 8 des Bundes-Bodenschutzgesetzes erforderlich sind.“ (§4 Abs. 4 BBodSchV)		
<b>Konz. &gt; Wert</b>	„Ein Boden, der ein belasteter Standort oder Teil davon ist, ist sanierungsbedürftig, wenn ein in ihm enthaltener Stoff einen Konzentrationswert nach Anhang 3 (Konzentrationswerte für die Beurteilung der Sanierungsbedürftigkeit von Böden) überschreitet. Dies gilt auch für Böden, für die bereits eine Nutzungsbeschränkung verfügt wurde.“ (Art. 12 Abs. 1 AltIV)  „Ist ein belasteter Standort sanierungsbedürftig (Altlast), so verlangt die Behörde, dass: a) Innert angemessener Frist eine Detailuntersuchung durchgeführt wird; b) Der Standort bis zum Abschluss der Sanierung überwacht wird.“ (Art. 13 Abs. 2 AltIV)	„Toxizitätsbereich ohne produktive Nutzungsmöglichkeit des Bodens für den Anbau von Pflanzen.“ (Eikmann und Kloke, Seite 2)  „...die Grenze, über der Schäden an Schutzgütern möglich sind...:... Bei Tieren und Menschen: gesundheitliche Schäden und/oder Leistungsminderungen können nicht ausgeschlossen werden.“ (Eikmann und Kloke, Seiten 6-7)	Falls es klare Hinweise dafür gibt, dass ein belasteter Standort die soil remediation standards überschreitet oder bald überschreiten wird, soll eine descriptive soil investigation durchgeführt werden. (Art. 9 §2; Art. 19 §1 OVAM)  Falls damit gezeigt wird, dass die soil remediation standards überschritten wurden, soll im Falle einer neuen Belastung die Sanierung sofort eingeleitet werden. (Art.9,§3 OVAM) Im Falle einer historischen Belastung soll die Sanierung durchgeführt werden falls es sich um eine schwerwiegende Belastung handelt. (Art. 19 §2 OVAM)		Die guideline values sollen als Werkzeug genutzt werden, um die Bodenbelastung und die Notwendigkeit einer Sanierung zu beurteilen. Der Boden ist belastet falls: 1) Die Konzentration einer oder mehrerer Substanzen im Boden das obere guideline value überschreitet wenn es sich um einen Industrie-, Lager- oder Transportstandort handelt. 2) Die Konzentration einer oder mehrerer Substanzen im Boden das untere guideline value überschreitet wenn es sich um eine andere Nutzung handelt als in 1) beschrieben. (§4, EnvFIN)	Die guidelines können als Massstab genutzt werden um, je nach Landnutzung über weitere Untersuchungen oder mögliche Sanierungsmassnahmen zu entscheiden. Je nachdem wie stark die guidelines überschritten werden desto dringender muss etwas unternommen werden. Wo es nicht möglich ist zu sanieren aus technischen oder anderen Gründen, können die guidelines auch dazu dienen über Landnutzungsrestriktionen oder andere Risikomanagement Massnahmen für den Schutz von Mensch und Umwelt zu entscheiden. Aber die guidelines werden hauptsächlich als Basis für die Definition von standortspezifischen Sanierungszielen eingesetzt. (CCME, Seiten 9-10)

	Schweiz [7] Sanierungswert	Eikmann und Kloke [9] BWIII	Belgien (Flandern) [18] Soil remediation standard	Deutschland [10, 69] Massnahmenwert	Finnland [19, 70] Guideline value	Kanada [17] Soil quality guideline
	-	50 mg/kg	2.9 mg/kg	2 mg/kg	2 mg/kg	6.6 mg/kg
Massnahmen	<p>„Das Ziel der Sanierung muss durch Massnahmen erreicht werden mit denen:</p> <p>a) Umweltgefährdende Stoffe beseitigt werden (Dekontamination); oder</p> <p>b) Die Ausbreitung der umweltgefährdenden Stoffe langfristig verhindert und überwacht wird (Sicherung).“</p> <p>(Art. 16 Abs. 1 AltIV)</p>	<p>„Seine Funktion ist:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Durch den Abstand zum BWII des gegebenen Standortes den gefahrenabwehrenden Charakter des BWII deutlich zu machen;</li> <li>- Überlegungen einzuleiten, wie die gefahrlose Nutzung des Standortes/Bodens möglich gemacht werden kann;</li> <li>- Gegebenenfalls Sanierungen fordern.“</li> </ul> <p>(Eikmann und Kloke, Seite 7)</p>	<p>Behandlung einer Bodenbelastung: die Entfernung, Neutralisierung, Immobilisierung, Isolation oder Abschirmung des Schadstoffs im Boden.</p> <p>(Art. 2 Abs. 2 20 OVAM)</p> <p>Bei einer neuen Bodenbelastung soll die Sanierung das target value als Ziel haben. Falls dies aufgrund der Art der Belastung oder des Standorts nicht möglich ist bei Verwendung der bestmöglichen Techniken und ohne überhöhte Kosten zu verursachen, soll die Sanierung wenigstens eine bessere Bodenqualität aufweisen als der remediation standard.</p> <p>Falls dies nicht möglich ist, mit den bestmöglichen Techniken und ohne überhöhte Kosten zu verursachen, können auch Landnutzungsrestriktionen umgesetzt werden.</p> <p>(Art. 10 §1- 4 OVAM)</p> <p>Bei einer historischen Bodenbelastung soll die Sanierung eine Bodenqualität zum Ziel haben, welche keine potentiell oder effektiv negative Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt hat und dabei die bestmöglichen Techniken anwenden ohne überhöhte Kosten zu verursachen.</p> <p>Falls dies nicht möglich ist können Landnutzungs- oder stadtplanerische Restriktionen angewendet werden, falls notwendig.</p> <p>(Art. 21 § 1- 2 OVAM)</p>	<p>„Sanierung im Sinne dieses Gesetzes sind Massnahmen</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Zur Beseitigung oder Verminderung der Schadstoffe (Dekontaminationsmassnahmen)</li> <li>2) Die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern oder vermindern, ohne die Schadstoffe zu beseitigen (Sicherungsmassnahmen)</li> <li>3) Zur Beseitigung oder Verminderung schädlicher Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheiten des Bodens.</li> </ol> <p>Schutz- und Beschränkungsmassnahmen im Sinne dieses Gesetzes sind sonstige Massnahmen, die Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit verhindern oder vermeiden, insbesondere Nutzungsbeschränkungen.“</p> <p>(§2 Abs. 7-8 BBodSchG)</p>	<p>Jeder Beteiligte, dessen Tätigkeiten eine Belastung des Bodens oder des Grundwassers verursacht haben, müssen den besagten Boden resp. Grundwasser wieder so in Stand setzen, dass keine Schäden entstehen an Mensch und Umwelt und dass keine Gefahr besteht für Mensch und Umwelt.</p> <p>(Chapter 12, Section 75, Environmental Protection Act)</p>	<p>Sanierung ist das Verhindern, Minimieren oder Vermindern von Schäden an der menschlichen Gesundheit und der Umwelt. Sanierungsmöglichkeiten können direkte physikalische Aktionen wie Behandlung, Entfernung oder Zerstörung der Schadstoffe oder andere on-site Risikomanagement Lösungen wie Abdeckung oder Eingrenzung des Schadstoffes sein.</p> <p>(CCME 1996, Seite 5)</p> <p>Wo es nicht möglich ist zu sanieren aus technischen oder anderen Gründen, können die guidelines auch dazu dienen über Landnutzungsrestriktionen oder andere Risikomanagement Massnahmen für den Schutz von Mensch und Umwelt zu entscheiden.</p> <p>(CCME 1996, Seite 10)</p>

