

Schwermetallbelastungen in Hausgärten in Freiburgs Altstadt

Kurzfassung

Studie im Auftrag des Amtes für Umwelt des
Kantons Freiburg

14. Januar 2015



BMG ENGINEERING AG

Consulting:
Ifangstrasse 11 • CH-8952 Schlieren/Zürich
Tel. 044 732 92 92 • Fax 044 730 66 22
bmg@bmgeng.ch • www.bmgeng.ch

Labors:
Ifangstrasse 11 • CH-8952 Schlieren/Zürich
Tel. 044 732 92 92 • Fax 044 732 92 21
labors@bmgeng.ch

Inhalt

1	Ausgangslage und Zielsetzung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Auswertung Analyseresultate	2
2.1	Die Bodenbelastung in Hausgärten anderer Regionen der Schweiz	2
2.2	Bodenuntersuchungen in der Stadt Freiburg	4
2.3	Geographische Beschreibung der Belastungen	4
2.4	Belastungsmuster in der Stadt Freiburg	5
2.4.1	Korrelationen von Schadstoffkonzentrationen	6
2.4.2	Hauptkomponentenanalyse	8
2.4.3	Zusammenhänge von Schadstoffbelastungen und Bodeneigenschaften	8
2.4.4	Tiefenprofile	8
2.5	Zusammenhang von Alter der Hausgärten und deren Belastung	8
3	Standortrecherche: Quellenstudium und Befragungen	9
3.1	Quartier d'Alt	9
3.2	Bourg	10
3.3	Neuveville	10
3.4	Quartier d'Auge	12
3.5	Pérolles	13
4	Belastungszenarien	14
4.1	Geogene Schwermetalle	14
4.2	Atmosphärische „Hintergrund-Deposition“	14
4.3	Kehrichtverbrennungsanlage Les Neigles	15
4.4	Verbrennung von Abfällen in Hausfeuerungen und im Freien	15
4.5	Verbrennung von Kohle	16
4.6	Verkehr	16
4.7	Gaswerk (Usine à Gaz)	16
4.8	Schlacke aus Kehrichtverbrennungsanlage	17
4.9	Düngung: Klärschlamm, Kompost und andere Dünger	17
4.10	Spritzmittel	18
4.11	Ablagerung von Abfällen	18
4.12	Metallproduktion und Giessereien	18
4.13	Holzbehandlung und -verarbeitung	18
4.14	Gerbereien	18
4.15	Keramik und Glasuren	18
4.16	Emissionen aus dem Industriegebiet Pérolles	19

5	Vergleich der Belastungsszenarien mit den tatsächlich vorgefundenen Belastungen	19
5.1	Belastung der Wiesen und öffentlichen Grünflächen	20
5.2	Belastung der Gärten und Privatrasen	21
6	Schlussfolgerungen der Untersuchung	22
	Anhang 1: Verwendete Unterlagen	24
	Anhang 2: Historische Karten	27

Tabellen

Tab. 1	Mediane der Schwermetallbelastungen in der Stadt Freiburg, dem ländlichen Kanton Freiburg, der Städte Zürich und Olten sowie des Kantons Uri	3
Tab. 2	Bodenbelastungen in siedlungsarmen Gebieten der Schweiz	4
Tab. 3	Schwermetallbelastungen in Ausgangsgesteinen der Stadt Freiburg	14
Tab. 4	Schwermetall-Gehalte von Steinkohle sowie geschätzte Belastung aufgrund Kohleverbrennung in einer Stadt.	16
Tab. 5	Schwermetall-Konzentrationen im Kompost um 1990 und Organika Anfangs 2000er Jahre sowie der daraus berechnete Eintrag.	17
Tab. 6	Zusammenstellung der Immissionsschätzung und Schätzung für Wiesen und öffentliche Grünflächen. Vergleich mit Messwerten.	20
Tab. 7	Zusammenstellung der Immissionsschätzung und Schätzung für Gärten und Rasen. Vergleich mit Messwerten.	20

Abbildungen

Abb. 1	Korrelation der Chrom- und Nickel- sowie Chrom- und Blei-Feststoffkonzentrationen in der Stadt Freiburg (Daten 2011–2014).	6
Abb. 2	Korrelation der Schwermetallkonzentrationen	7
Abb. 3	Spinnerei und Tuchfabrik ca. 1895	10
Abb. 4	Das Quartier la Planche mit der Kaserne nach 1910	11
Abb. 5	Usine à gaz ca. 1949	11
Abb. 6	Überschwemmung 1939 im Quartier d'Auge	12
Abb. 7	Pérolles-Gebiet: Ausschnitt aus einem Stadtplan von 1906.	13

Abkürzungen

AltIV	Altlastenverordnung
TVA	Technische Verordnung über Abfälle
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
VBBö	Verordnung über Belastungen des Bodens
Hg	Quecksilber
Pb	Blei
Zn	Zink
Cu	Kupfer
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Ni	Nickel
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCDD/F	polychlorierte Dibenzodioxine und -furane

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Schwermetallbelastungen in städtischen Haus- und Familiengärten sind ein bekanntes Problem und in unterschiedlichen Untersuchungen in der Schweiz festgestellt worden [26][27][29]. Im Kanton Freiburg untersucht das Landwirtschaftliche Institut Grangeneuve seit dem Jahr 1987 die landwirtschaftlich genutzten Böden im gesamten Kanton regelmässig. Das Amt für Umwelt des Kantons Freiburg hat ab dem Jahr 2004 Bodenuntersuchungen unter anderem in Schrebergärten, Hausgärten und auf Spielplätzen durchgeführt (Kampagne *FRIBO urbain*). Im Jahr 2011 wurde die Bodenqualität in Hausgärten, auf Weiden, Spielplätzen und Landwirtschaftsflächen der Stadt Freiburg überprüft. Die Analysen zeigten, dass der Schwermetallgehalt in gewissen Hausgärten der Altstadt Freiburg problematisch hoch ist.

In den Jahren 2012 bis 2014 wurden deshalb umfassende Beprobungen in der Stadt Freiburg durchgeführt. Die Resultate bestätigen die vorherigen Untersuchungen: Diverse Böden sind bedeutend mit Schwermetallen v. a. mit Quecksilber und Blei belastet. Offen blieb die Frage, wie es zu diesen Belastungen gekommen ist und welche weiteren Gebiete möglicherweise betroffen sind.

1.2 Zielsetzung

Um mögliche Quellen und Eintragspfade sowie weitere potentiell betroffene Böden zu identifizieren, hat das Amt für Umwelt des Kantons Freiburg die BMG Engineering AG mit einer Studie beauftragt, welche im Oktober 2015 fertiggestellt wurde [1]. Die Resultate der Studie bilden die Grundlage für das weitere Vorgehen in Bezug auf die Bodenbelastungen in der Stadt Freiburg.

Das Amt für Umwelt hat die BMG Engineering AG beauftragt, eine Zusammenfassung zu verfassen, welche sämtliche Resultate und Folgerungen der Studie in gekürzter Form beinhaltet jedoch den Persönlichkeitsschutz gewährt. Diese Zusammenfassung liegt hier vor.

2 Auswertung Analyseresultate

Das Amt für Umwelt hat in der Stadt Freiburg 2011 bis 2014 Privatgärten, Privatrassen, öffentliche Grünflächen und einige Wiesen auf Bodenbelastungen untersucht. Insgesamt wurden 92 Proben auf 49 Parzellen genommen. Analysiert wurden Schwermetalle, PAK, PCB und PCDD/F. Zusätzlich wurden die Korngrößenverteilung und der Humusgehalt der Böden bestimmt. Die Probenahme wurde mittels Protokollen und Photographien detailliert dokumentiert.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen in der Stadt Freiburg (Probenahme 2011 bis 2014) zusammengefasst, ausgewertet und diskutiert; dabei wird die Belastung mit gesetzlichen Grenzwerten und Referenzwerten aus anderen Untersuchungen verglichen. Zudem werden die Belastungsmuster mittels grafischer und statistischer Methoden analysiert, um Hinweise auf mögliche Quellen der Schwermetallbelastungen zu gewinnen.

2.1 Die Bodenbelastung in Hausgärten anderer Regionen der Schweiz

Bodenbelastungen mit Schwermetallen sind schweizweit v. a. in alten städtischen Gärten ein Problem. Die Städte Zürich [29] und Olten [26] sowie der Kanton Uri [27] haben ebenfalls Bodenuntersuchungen in Familiengärten durchgeführt. Die Schwermetallbelastungen in diesen Regionen sind in der Tab. 1 zusammengefasst.

Die Studie aus Zürich [29] stammt aus dem Jahre 1994. Es wurden vier Stadtgartengebiete beprobt: Friesenberg, In der Au, Juchhof, Susenberg. Neben der Überdosierung von Kompost sind gemäss den Autoren weitere wichtige Quellen der Schwermetallbelastungen ein unsachgemässer Einsatz von Kupfer-Fungiziden, die Einbringung von Klärschlamm und Kehrriechtkompost schlechter Qualität, Kehrriechtschlacke und Cheminéeasche.

Die Studie von Olten [26] stammt aus dem Jahr 1998. Hohe Schwermetallbelastungen traten fast ausschliesslich in Gärten älter als ca. 1950 auf. Als Ursache für die hohen Belastungen wird v. a. die Verwendung von Holzasche als Dünger, die Nutzung von Dachwasser als Giesswasser sowie die Verwendung von Kunstdüngern und Kompost gesehen.

Die Studie des Kantons Uri [27] stammt aus dem Jahr 2009. Als Gründe für die Belastung in den Gärten werden angegeben: die intensive Bewirtschaftung, die vielfältige Nutzung als Garten, Aufenthalts-/Spielort und Brandplatz sowie die Zufuhr von belastetem Boden bei Gartengestaltungen sowie durch nahegelegene Schadstoffquellen.

Tab. 1 Mediane¹ der Schwermetallbelastungen in der Stadt Freiburg (2011–2014, nur oberflächliche Proben 0 – 5 und 0 – 20 cm), dem ländlichen Kanton Freiburg, der Städte Zürich und Olten sowie des Kantons Uri.

[mg/kg]	Alter	Hg	Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	PAK	PCDD/F
Fribourg (2011-14)										
Privatgärten		1.12	324	299	81	0.48	24	23	3.1	2.7
Privatrasen		1.71	301	243	71	0.37	23	21	2.3	2.5
öffentliche Grünflächen		0.10	22	42	14	0.18	16	18	0.3	< 0.2
Wiesen		0.10	35	63	21	0.20	27	26	0.3	1.8
FRIBO agricole, alle										
			16	45	15	0.20	22	21		
FRIBO urbain, Spielplätze										
			22	48	18	0.20	18	24		
FRIBO urbain, Grünflächen										
			24	54	18	0.10	16	18		
FRIBO urbain, Wiesen										
			19	38	12	0.05	22	21		
FRIBO urbain, Schrebergärten										
			40	86	33	0.30	24	20		
Zürich (1993) [29]										
Friesenberg	45	0.75	248	330	98	0.94				
In der Au	25	0.13	57	144	29	0.63				
Juchhof	46	0.64	161	284	91	0.87				
Susenberg	78	0.19	114	237	49	0.64				
Alle		0.34	118	221	58	0.72				
Uri (2009) [27]										
Schrebergärten			35	113	28	0.41				
Hausgärten			94	232	71	0.85				
Olten (1998) [26]										
Gemüsebeete			166	319	55	0.79				
Grünflächen			153	285	46	0.73				
Richtwert VBBo (RW)		0.5	50	150	40	0.8	50	50	1	5
Prüfwert VBBo (PW)		-	300	-	-	10	-	-	10	20
Sanierungswert (SW)		2 ²	1000	2000	1000	20	-	1000	100	100

¹ Der Median ist ein Wert für Verteilungen von Zahlen. Wenn Konzentrationen der Grösse nach sortiert werden, ist der Median diejenige Konzentration, die in der Mitte steht, d.h. es gibt gleichviele Messwerte mit höheren Konzentrationen oberhalb des Medians wie tiefere Konzentrationen unterhalb des Medians. Der Median ist robuster gegen einzelne ungewöhnlich hohe Konzentrationen (Ausreisser) als ein arithmetischer Mittelwert.

² Sanierungswert gemäss AltIV. Da für Quecksilber in der Verordnung über Belastungen des Bodens der Sanierungswert fehlt (Art. 5 Abs. 3 VBBo), empfiehlt das BAFU als Sanierungswert den gleichen Wert wie in der AltIV zu verwenden.

Fribourg (2011-2014)									
	Hg	Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	PAK	PCDD/F
# RW-Überschr./Total	42/68	71/91	59/91	67/91	16/91	0/91	0/91	44/69	12/66
RW-Überschreitungen in %	62%	78%	65%	74%	18%	0%	0%	64%	18%

2.2 Bodenuntersuchungen in der Stadt Freiburg

Die Standorte der Untersuchungen von 2011 bis 2014 in der Stadt Freiburg wurden anhand von Probenahmeprotokollen, Photodokumentationen und Luftbildern nach ihrer Nutzung eingeteilt:

- öffentliche Grünflächen (v. a. Pärke und Sportplätze sowie der Rasen des Freibades)
- Wiesen (d. h. landwirtschaftliche Nutzung)
- Privatgärten (d. h. Anbau von Gemüsen, Beeren, Blumen etc.)
- Privatrassen (d. h. geschlossene Rasenfläche auf Privatparzellen)

Die Mediane der Schwermetallkonzentrationen der öffentlichen Grünflächen und Wiesen der Stadt Freiburg sind den Belastungen der ländlichen Gegenden des Kantons Freiburg und den Belastungen in siedlungsarmen Gebieten der Schweiz ähnlich (vgl. Tab. 1). Die Mediane der Belastungen liegen deutlich unter den jeweiligen Richtwerten.

Tab. 2 Bodenbelastungen in siedlungsarmen Gebieten der Schweiz.

[mg/kg]	[5]	[15]	Wald [14] in [15]
Hg	< 0.1	-	< 0.1
Pb	20-40	20 - 80	21
Zn	60-80	20-90	48
Cu	20-30	10-20	12
Cd	0.2-0.3	0.1-0.8	0.21

Die hohen Schwermetallbelastungen in der Stadt Freiburg befinden sich v. a. in Gärten und Privatrassen und kaum in Wiesen oder öffentlichen Grünflächen. Die Schwermetallbelastung der öffentlichen Grünflächen und Wiesen ist ähnlich hoch wie in den wenig besiedelten Gebieten des Kantons Freiburg und der restlichen Schweiz (vgl. Tab. 2).

Im Vergleich zu den Gärten anderer Städte, weisen Freiburgs Gärten besonders hohe Quecksilberbelastungen und in etwas geringerem Masse hohe Bleibelastungen auf (vgl. Tab. 1). Die Zink- und Kupferbelastungen sind im „normalen“ Rahmen, die Cadmiumbelastungen tiefer.

2.3 Geographische Beschreibung der Belastungen

Die Schwermetallbelastung ist v. a. in den sehr alten Stadtteilen hoch; zudem gibt es ein paar Einzelfälle mit besonders hohen Belastungen.

Seit dem 1. März 2015 beträgt der Sanierungswert für Quecksilber für Haus- und Familiengärten gemäss der Bundes-Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (sog. Altlastenverordnung, AltIV) 2 mg/kg³. Dieser Wert wird auf insgesamt 10 Parzellen überschritten (Quartiere Bourg und Neuveville). Die Blei- und Zink-Konzentrationen sind in sämtlichen Stadtteilen erhöht. Der Sanierungswert für Blei für Haus und Familiengärten gemäss der Bundes-Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) von 1000 mg Blei/kg Boden wird auf zwei Parzellen überschritten (Quartiere Bourg und Auge). Eine dritte Parzelle mit einer Überschreitung des Sanierungswertes für Blei wurde 2013 saniert.

Es gibt vier Bereiche in der Stadt Freiburg mit besonders hohen Schwermetallbelastungen (sog. „Belastungsherde“). Diese befinden sich:

- im Quartier Neuveville: 3 Parzellen mit Quecksilberbelastungen 4 – 19 mg/kg (entspricht einer 2 bis 10-fachen Überschreitung des Sanierungswertes für Haus- und Familiengärten gemäss AltIV)
- im Quartier Bourg: 1 Parzelle mit Bleibelastungen bis 2-fach über dem Sanierungswert für Haus und Familiengärten gemäss VBBo von 1000 mg/kg
- im Quartier Auge: 1 Parzelle mit Bleibelastungen über dem Sanierungswert für Haus- und Familiengärten gemäss VBBo
- im Quartier d'Alt: 3 Parzellen mit deutlich erhöhten Zinkbelastungen (entsprechend > 50 % des Sanierungswertes für Haus- und Familiengärten gemäss VBBo)

Während die Quecksilber- und Bleigrenzwerte im Hinblick auf die menschliche Gesundheit hergeleitet wurden, ist der Grenzwert für Zink weniger für den Menschen als vielmehr für gewisse Pflanzen problematisch.

2.4 Belastungsmuster in der Stadt Freiburg

Verdünnungen (z. B. durch Schadstoff-Verfrachtungen) oder Anreicherungen (z. B. bei Kompostierung) von Schadstoffen führen zu sehr unterschiedlich hohen Schadstoffbelastungen in Böden, selbst wenn ursprünglich dieselbe Schadstoffquelle zugrunde liegt. Da Schwermetalle jedoch nicht abgebaut werden und kaum mobil sind, kann davon ausgegangen werden, dass – wenn Schadstoffe von denselben Quellen stammen – die Verhältnisse der Schadstoff-Konzentrationen gleich bleiben, selbst wenn die Konzentrationen an unterschiedlichen Standorten unterschiedlich hoch sind. Die Konzentrationen der unterschiedlichen Schwermetalle korrelieren also, wenn sie von derselben Quelle stammen.

Neben unterschiedlichen Quellen kann jedoch auch ein unterschiedliches Verhalten von Schwermetallen zu einem unterschiedlichen Muster führen. So könnte z. B. die Tatsache, dass Quecksilber in der Atmosphäre dominant gasförmig vorliegt, während die anderen Schwermetalle partikelgebunden sind, zu einem unterschiedlichen Eintrag und dadurch ebenfalls zu einem anderen Belastungsmuster führen.

³ Da für Quecksilber in der Verordnung über Belastungen des Bodens der Sanierungswert fehlt (Art. 5 Abs. 3 VBBo), empfiehlt das BAFU als Sanierungswert den gleichen Wert wie in der AltIV zu verwenden.

Zudem kann auch ein unterschiedlicher Eintragszeitraum eine Rolle spielen. Z. B. kann eine Veränderung der Schwermetall-Zusammensetzung in einer bestimmten Quelle (z. B. Kompost) dazu führen, dass alte Böden ein anderes Muster aufweisen als junge Böden.

2.4.1 Korrelationen von Schadstoffkonzentrationen

Zur Erkennung der Belastungsmuster, werden die Konzentrationen der unterschiedlichen Schwermetalle in derselben Bodenprobe in einer Grafik gegeneinander aufgetragen. Wenn dies für viele Proben gemacht wird und das Verhältnis der jeweiligen Schadstoffkonzentrationen gleich bleibt, liegen folglich sämtliche Punkte auf einer Geraden.

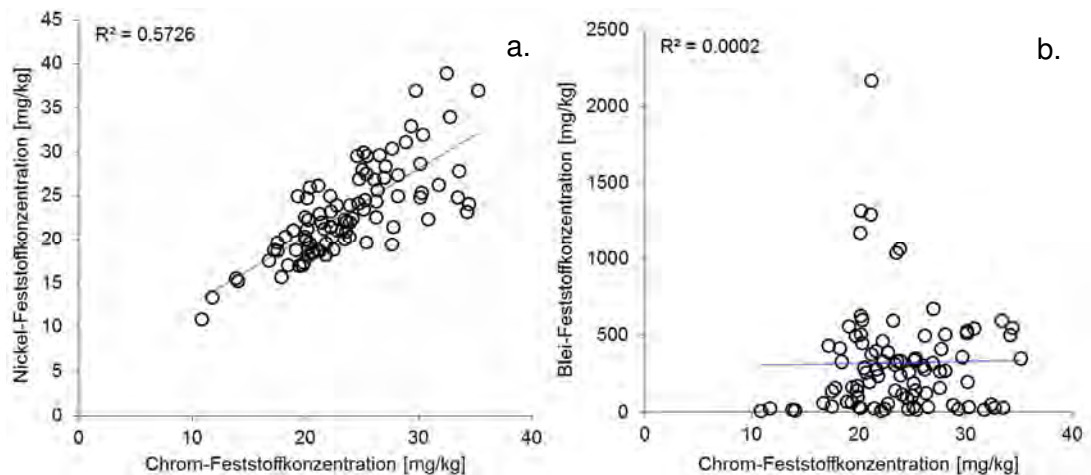


Abb. 1 Korrelation der Chrom- und Nickel- (links) sowie Chrom- und Blei-Feststoffkonzentrationen (rechts) in der Stadt Freiburg (Daten 2011–2014).

Die Chrom- und Nickelkonzentrationen korrelieren stark miteinander, was auf eine gemeinsame Ursache der Belastung von Chrom und Nickel schliessen lässt (vgl. Abb. 1a).

Die Chrom- und Nickel-Konzentrationen korrelieren jedoch nicht mit den übrigen Schwermetallen (z. B. Blei, vgl. Abb. 1b). Dies deutet darauf hin, dass Quellen mit Chrom-Emissionen (z. B. Gerbereien, Wollverarbeitung) oder Nickel-Emissionen eher nicht die Ursache für die erhöhten Belastungen mit den übrigen Schwermetallen sind.

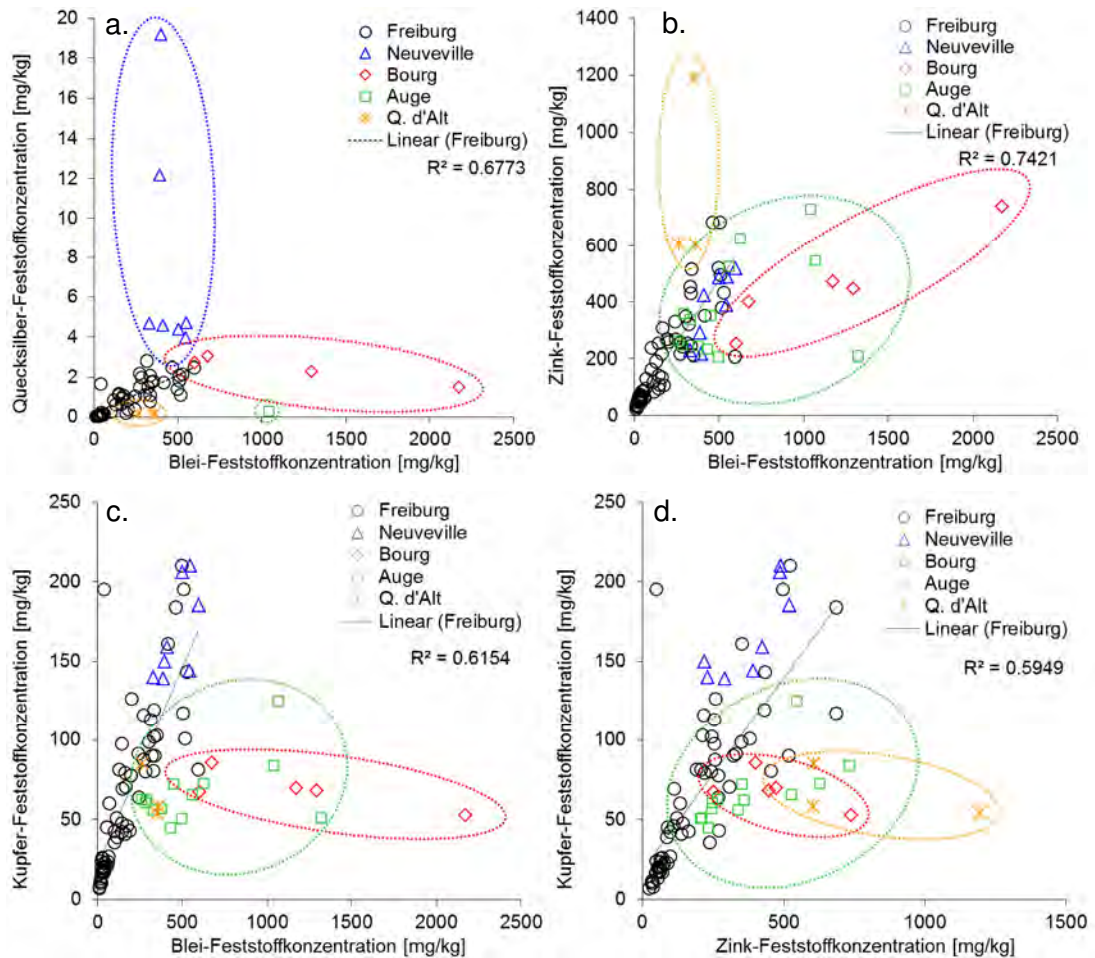


Abb. 2 Korrelation der Blei- und Quecksilber-Feststoffkonzentrationen (a), Blei- und Zink- (b), Blei- und Kupfer- (c) sowie Zink- und Kupfer-Feststoffkonzentrationen (d) in der Stadt Freiburg (Daten 2011–2014). Die Zonen mit besonders hohen Belastungen (Belastungsherde) sind separat dargestellt: blaue Dreiecke = Neuveville, rote Rhomben = Bourg, grüne Quadrate = Auge, gelbe Kreuze = Q. d'Alt.

In Abb. 2 sind die Konzentrationen der wesentlichen Schwermetalle in den Böden der gesamten Stadt jeweils gegeneinander aufgetragen.

Abb. 2a zeigt die Quecksilber- gegen die Blei-Konzentrationen. Mit Ausnahme der Belastungsherde mit hohen Quecksilber- oder Bleigehalten (*Neuveville* sowie *Bourg und Auge*) sowie dem *Quartier d'Alt* (Zink), das weder hohe Blei- noch hohe Quecksilbergehalte aufweist, korrelieren die Belastungen von Quecksilber und Blei deutlich.

Dieses Belastungsmuster kann so interpretiert werden, dass es in der Stadt Freiburg eine gewisse „allgemeine Schwermetallbelastung“ gibt, welche auf denselben Quellen und demselben Pfad beruht.

Dazu gibt es Belastungsherde, bei welchen zusätzlich einzelne Schwermetalle eingetragen wurden.

2.4.2 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse ist ein statistisches Verfahren, welches dazu verwendet wird, einen Parametersatz (im vorliegenden Fall sind dies die Schwermetallkonzentrationen) durch eine möglichst geringe Anzahl von sogenannten Hauptkomponenten zu erklären. Die Hauptkomponenten sind im vorliegenden Fall eine Kombination von Schwermetallkonzentrationen. Diese Hauptkomponenten repräsentieren dabei nicht (unbedingt) einzelne Quellen, sondern können aus einer Mischung von Quellen bestehen, wie z. B. die „Luftverschmutzung“ eine Mischung von Quellen ist.

Die Resultate der Hauptkomponentenanalyse deuten auf dasselbe Ergebnis wie die Schadstoffkorrelationen hin, nämlich:

- Die Schwermetallbelastung (ohne Belastungsherde) geht zumindest für Gärten und Privatrasen in der gesamten Stadt wahrscheinlich grösstenteils auf dieselbe(n) Quelle(n) zurück.
- Die Schwermetallbelastungen der Belastungsherde beruhen auf anderen Quellen als die Schwermetallbelastung der übrigen Gärten und Privatrasen.

2.4.3 Zusammenhänge von Schadstoffbelastungen und Bodeneigenschaften

Die Bodeneigenschaften Humus-, Ton- und Sandgehalt gemäss Analyseresultate wurden in Beziehung zur Schadstoffbelastung gesetzt.

Die Bodeneigenschaften ergeben keine Hinweise auf mögliche Schadstoffquellen.

2.4.4 Tiefenprofile

Im Rahmen der Bodenuntersuchungen wurden an drei Standorten Probenahmen in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt. Mittels Auftragung der Schadstoffkonzentrationen über die Tiefe („Tiefenprofile“) können in gewissen Fällen Aussagen zum Eintragspfad und zu möglichen Quellen gemacht werden: Schadstoffeinträge via Staubdeposition oder Meteorwasser sind charakterisiert durch eine starke Akkumulation der Schadstoffe in der obersten Schicht des Bodenprofils. Aufgrund von Durchmischungsprozessen [30] (z. B. durch Bodenbearbeitung oder Regenwürmer) werden diese Tiefenprofile jedoch mit der Zeit weniger ausgeprägt.

Die vorhandenen Tiefenprofile der Böden in Freiburg sind wenig ausgeprägt. Dies ist wahrscheinlich auf das hohe Alter der Belastungen zurückzuführen.

2.5 Zusammenhang von Alter der Hausgärten und deren Belastung

Die Gärten im Quartier d'Alt, welche anfangs des 20. Jh. angelegt wurden, sind deutlich weniger mit Quecksilber belastet als die Gärten der alten Quartiere Bourg und Neuveville: Die mittlere Quecksilberkonzentration im Quartier d'Alt beträgt 0.15 ± 0.06 mg/kg, in den Quartieren Bourg und Neuveville (ohne Quecksilber-Belastungsherde) 1.63 ± 0.84 bzw. 1.67 ± 0.60 mg/kg. Für die anderen Schwermetalle kann keine Aussage getroffen werden, weil im Quartier d'Alt die meisten Proben zum Zink-Belastungsherd gehören (und hier auch Blei erhöht ist).

Eine Zunahme der Schwermetallbelastungen mit dem Nutzungsalter wurde ebenfalls in den Studien der Städte Zürich [29], Olten [26] und des Kantons Uri [27] festgestellt und wird in der Literatur beschrieben, wie im Folgenden Kapitel gezeigt.

Die Wichtigkeit des Alters wird auch in einer empirischen Methode deutlich [28], mit welcher die Wahrscheinlichkeit einer Richtwertüberschreitung von Blei (50 mg/kg) und PAK anhand von wenigen Merkmalen prognostiziert werden kann. Die Beobachtungen deuten darauf hin, dass sehr alte (z. B. erste Hälfte 20. Jh. oder älter) direkte Einträge wichtiger sind als diffuse Belastungen via Luft oder nahegelegene belastete Standorte.

Dass die übrigen Schwermetalle in Freiburg gut mit der Bleibelastung korrelieren (mit Ausnahme der Belastungsherde), deutet darauf hin, dass das Alter nicht nur für Blei, sondern auch für die anderen Schwermetalle ein wichtiger Parameter ist.

Folgende Folgerungen können gezogen werden:

- Je älter ein Garten ist, umso eher ist er übermässig mit Schwermetallen belastet.
- Hohe Quecksilbereinträge gehen möglicherweise auf sehr alte Nutzungen zurück (19. Jh.), während Blei und Zink bis in die zweite Hälfte des 20. Jh. in bedeutenden Frachten eingetragen wurden.
- Diese Tatsache deutet darauf hin, dass durch die Bewirtschaftung selber bedeutende Mengen an Schwermetallen eingetragen werden, bzw. durch die Bewirtschaftung eine Anreicherung von Schwermetallen stattfindet.

3 Standortrecherche: Quellenstudium und Befragungen

Die erhöhten Schwermetallbelastungen sind direkt (am Ort der Quelle) oder indirekt (z. B. via Eintrag von Schadstoffen via Staub oder Niederschlag) eine Folge der menschlichen Nutzung. Die Nutzungsgeschichte der Parzellen sowie der gesamten Stadt dient somit der Identifikation der Belastungsquellen. Zur Identifikation möglicher Quellen wurden historische Photographien, Karten (vgl. Anhang 2), Luftbilder und Literatur ausgewertet sowie Experten, Bewohner und Eigentümer befragt. In vielen Fällen ist nur eine grobe Einteilung der Nutzung möglich, da die relevanten Einflüsse, welche oft weit zurückliegen, nicht mehr rekonstruiert werden können.

Im Folgenden werden die Resultate für die jeweiligen Stadtteile präsentiert.

3.1 Quartier d'Alt

Das Quartier d'Alt ist um die Jahrhundertwende vom 19. ins 20. Jh. entstanden und ist damit im Vergleich zu den Quartieren Bourg und Neuveville ein junges Quartier.

Im Quartier d'Alt gab es zumindest einen Betrieb für Holzbearbeitung. Zur Imprägnierung von Holz sowie für Farben wurden Schwermetalle verwendet. Die hohe Zinkbelastung im Belastungsherd des Quartier d'Alt steht möglicherweise damit im Zusammenhang.

3.2 Bourg

Das Bourg-Quartier ist bereits seit dem 18. Jahrhundert von Siedlungsgebieten umgeben. Die Gärten sind mehrheitlich sehr alt.

Es gibt keine Hinweise auf gewerbliche oder industrielle Aktivitäten mit Schwermetallemissionen.

Die hohen Bleibelastungen im Belastungsherd Bourg können möglicherweise durch das Verbrennen von Holz-Abfällen erklärt werden.

3.3 Neuveville

Neuveville besteht als Handwerkerquartier seit dem Mittelalter. Es gab eine Spinnerei, Tuchfabriken (vgl. Abb. 3) und eine Wollfärberei. Die Freiburger Tuchherstellung erreichte im 15. Jh. ihren Höhepunkt und erfuhr danach einen allmählichen Niedergang.

Anfangs 19. Jh. gab es eine öffentliche Wäscherei. Um die Jahrhundertwende (1900) befanden sich eine Schuhfabrik in der Nähe der Saane und eine Kartonfabrik im westlichen Bereich von Neuveville.

Mehrere Gerbereien befanden sich bis in die zweite Hälfte des 20. Jh. im Quartier [21]. Beim Bau einer Tiefgarage wurden Holzschnitzel gefunden, welche zu Gerbereizwecken verwendet wurden [22].

Es gab zudem Schrott- und Abfallverarbeitung [21]; wahrscheinlich wurden dabei auch gewisse Stoffe verbrannt.

Möglicherweise gab es eine Düngemittelfabrik.



Abb. 3 Spinnerei und Tuchfabrik ca. 1895 (ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv [24]).



Abb. 4 Das Quartier la Planche mit der Kaserne nach 1910 (Quelle [23]).

Südlich der Saane wurde 1708/09 das Kornhaus La Planche errichtet, welches ab 1821/22 als Kaserne diente (Abb. 4). Es ist jedoch nicht bekannt, dass das Gebiet um die Kaserne La Planche als Waffenplatz verwendet wurde. Von umweltrelevanten Belastungen ist daher nicht auszugehen.

1861 bis 1980 bestand ein Gaswerk (Usine à Gaz, vgl. Abb. 5). Das Gaswerk wurde im Jahr 1861 in Betrieb genommen und hat täglich ca. 1'000 m³ Gas produziert. Bis 1908 wurde die Produktion auf ca. 6'000 m³ erhöht. Ab 1969 wurde das Gaswerk umgebaut zur katalytischen Spaltung von Leichtbenzin (Fluid Catalytic Cracking). 1980 wurde die Produktion gestoppt und der Gasometer abgebaut. Bei Raffinerieprozessen und der Wärmeerzeugung durch Kohleverbrennung, wie sie im Gaswerk praktiziert wurde, können Schwermetalle in die Luft emittiert werden.

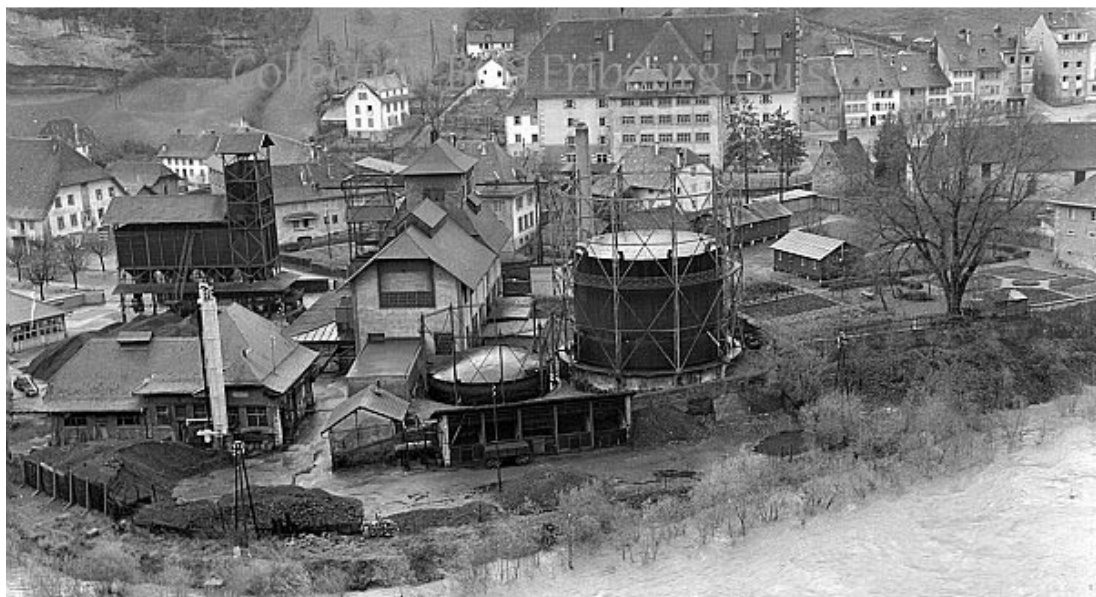


Abb. 5 Usine à gaz ca. 1949 (Quelle [23]).

Das Wasserkraftwerk Oelberg-Maigrange wurde 1870 gebaut [36]. Zur Ergänzung der Leistung bei geringem Wasserabfluss oder bei Spitzenbedarf wurden Diesel-Generatoren verwendet [37]. Durch die insgesamt rund 33'000 t verbrannten Diesels muss jedoch nicht von einem relevanten Beitrag für die Quecksilberbelastung in der Stadt Freiburg ausgegangen werden.

Es hat somit im Quartier Neuveville Aktivitäten gegeben, welche potenziell zu lokalen Schwermetallemissionen führen können. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass diese gewerblichen Aktivitäten zu den vorgefundenen grossräumigen Schwermetallbelastungen (bis ins Quartier Bourg) v. a. mit Quecksilber und Blei geführt haben.

Es gibt jedoch bis heute keine eindeutige Erklärung für die hohen Quecksilberbelastungen im Belastungsherd Neuveville. Die Gärten mit den hohen Quecksilberbelastungen waren nie direkt von handwerklichen Tätigkeiten umgeben, sind jedoch vermutlich sehr alt; sie sind bereits auf Photographien des 19. Jh. zu sehen.

3.4 Quartier d'Auge

Es gab bereits Anfangs 19. Jh. eine Färberei. Zur Farbproduktion wurden früher oft Blei-basierte Farben (z. B. Bleioxide oder Bleiacetat) verwendet.

Das Gebiet ist im 19. Jh. häufig überschwemmt worden (vgl. Abb. 6). Ende des 19. Jh. wurden die Ufer der Saane befestigt und teilweise aufgeschüttet, wie auf historischen Karten sichtbar ist [25].

Die Ursachen für die Bleibelastung am Belastungsherd Auge sind möglicherweise das Verbrennen von Altholz, bzw. Deponierung von Schlacke, oder die Verwendung von belastetem Material (möglicherweise von der Färberei) für die Aufschüttung.



Abb. 6 Überschwemmung 1939 im Quartier d'Auge (Quelle [23]).

3.5 Pérolles

Die ersten Industriezweige wurden am Ufer der gewundenen Saane errichtet [8]. Am Ende des 19. Jahrhunderts mit dem Bau der Bahnstation Pilettes verlagerte sich die Industrie vermehrt in die Oberstadt [7]. Die letzten freien Grundstücke wurden in den 1930er Jahren bebaut.

Es gab im Industriegebiet Pérolles ab Ende des 19. Jh. industrielle Aktivitäten, welche mit Emissionen von bedeutenden Mengen an Schwermetallen in Verbindung gebracht werden können: Düngemittelfabrik, Eisenbahnwagenfabrik, Giessereien, Herstellung von Metallverpackungen, möglicherweise auch die Papierfabrik und Maschinenfabrik. Eine einzelne klare Quelle ist jedoch nicht auszumachen.

Diese Schwermetallemissionen können auch aus der Verwendung von Kohle bei Heizprozessen resultieren, und somit aus Branchen stammen, welche nicht primär mit Schwermetallemissionen in Verbindung gebracht werden. Diese Emissionen können via Luftweg oder z. T. Wasser in die Saane erfolgt sein. Für die Belastung der Gärten ist der Eintrag via Luftweg plausibler (Windrichtung Südwest).

Bis im Jahre 1952 wurde die Pérolles-Schlucht zur Deponierung von Hausmüll verwendet. Es ist unwahrscheinlich, dass Emissionen aus diesen Deponien zu den vorgefundenen Schwermetallbelastungen in der Stadt geführt haben.



Abb. 7 Pérolles-Gebiet: Ausschnitt aus einem Stadtplan von 1906.

4 Belastungsszenarien

Für die möglicherweise relevanten Schadstoffquellen werden in diesem Kapitel die möglichen Beiträge an die Schwermetallbelastungen der Böden geschätzt. Der Vergleich dieser geschätzten Bodenbelastungen mit den tatsächlich vorgefundenen Schwermetallbelastungen dient der Identifikation möglicher relevanter Schadstoff-Quellen.

Für diese Schätzung der Feststoffkonzentrationen aufgrund der Schadstoffeinträge wird mit folgenden Annahmen gerechnet:

- Homogene Verteilung der Schwermetalle in den obersten 40 cm
- Dichte des Boden 1800 kg/m³
- Die Dauer der Einwirkung wird je nach Quelle sinnvoll gewählt

Wo möglich werden quantitative Angaben für Schadstoffgehalte verwendet. Wo nicht möglich, werden Schadstoffe nach deren Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins gemäss verfügbarer Literatur gewichtet.

4.1 Geogene Schwermetalle

Die geogene Schwermetallkonzentration ist das natürliche Vorhandensein von Schwermetallen basierend auf dem Ausgangsgestein. Fribourg liegt im Wesentlichen auf einem Sandstein-Plateau z. T. mit Mergel [11].

Die Schwermetallkonzentrationen in den Böden öffentlicher Grünflächen und Wiesen (vgl. Tab. 1) liegen also im Bereich der natürlichen geogenen Hintergrundbelastung (vgl. Tab. 3). Für die stark belasteten Gärten und Privatrasen ist die geogene Belastung höchstens bezüglich Cadmium relevant.

Tab. 3 Schwermetallbelastungen in Ausgangsgesteinen der Stadt Freiburg [6].

mg/kg	Mergel häufige (80%) Gehalte	Sandstein häufige (80%) Gehalte
Quecksilber	< 0.1 – 0.2	<0.1
Blei	7 - 41	7 - 38
Zink	45 - 150	22- 93
Kupfer	10 – 32	8 - 56
Cadmium	0.12 - 0.3	0.04 - 0.34

4.2 Atmosphärische „Hintergrund-Deposition“

Die Emissionen von Schwermetallen in die Atmosphäre haben mit der Industrialisierung zugenommen. Das Maximum der Emissionen lag für Quecksilber, Blei und Zink in den 1970er und 1980er Jahren [3][4].

Die Schwermetallkonzentrationen durch atmosphärische Hintergrund-Deposition kann aufgrund von Depositionsraten [2] aus siedlungsarmen Gebieten geschätzt werden. Die Schätzungen zeigen, dass die Atmosphärische Hintergrund-Deposition über den Zeitraum von 1900 bis 2014 zu gering war, als dass sie zu einer wesentlichen Belastung beigetragen hat (vgl. Tab. 6).

4.3 Kehrlichtverbrennungsanlage Les Neigles

Die Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) Les Neigles liegt nördlich der Stadt und wurde nach ca. 15 Jahren Betriebszeit Anfangs 1980er Jahre geschlossen.

Ein relevanter Belastungspfad für Kehrlichtverbrennungsanlagen ist die Deposition via Luftweg. Die KVA Les Neigles war nicht mit einer modernen Rauchgasreinigung ausgerüstet. Die Hauptwindrichtung in Freiburg ist SW-SSW [31] mit einer zweiten starken Komponente NO.

Für die Blei- und Zink-Deposition via Staub liegen Messwerte vor [32]. Aus den Depositionen vor der Schliessung der KVA lässt sich eine Zunahme der Schadstoffkonzentrationen im Boden in den rund 15 Jahren Betrieb berechnen (vgl. Tab. 6).

Die Quecksilber-Bodenbelastung wurde mittels eines Szenarios geschätzt, welches auf der durchschnittlich pro Tonne verbranntem Abfall emittierten Mengen Quecksilber basiert⁴. Daraus ergibt sich eine mittlere Zunahme der Quecksilber-Bodenbelastung von 0.1 mg/kg (vgl. Tab. 6).

Zudem wäre mit einer Zunahme der Schwermetallbelastungen in der Nähe der Kehrlichtverbrennungsanlage zu rechnen. Diese Zunahme ist nicht erkennbar.

Gemäss diesem Szenario kann die KVA Neigles höchstens in geringem Umfang zur Quecksilberbelastung in den Böden der Stadt Freiburg beigetragen haben.

4.4 Verbrennung von Abfällen in Hausfeuerungen und im Freien

Es muss davon ausgegangen werden, dass Abfälle in Hausfeuerungen und im Freien verbrannt wurden. Bis in die zweite Hälfte des 20. Jh. war dies eine übliche Praxis [26][27].

Altholz aus Bauabbruch oder Holzabfälle von Schreinereien (Innenausbau) sind oft imprägniert (PAK, Quecksilber) oder bemalt (Blei) und teilweise auch mit Zink belastet [13]. Bei der Verbrennung können diese Schwermetalle freigesetzt werden; zudem können PCDD/F gebildet werden, v. a. wenn chlorhaltige Materialien (z. B. PVC) im Altholz enthalten sind.

Es sind keine Messdaten vorhanden, weshalb die Belastung mittels eines Szenarios geschätzt wird: Geht man von einer Belastung von Blei oder Zink von 10 g/kg Asche aus und von einer Ausbringung von 2 kg Asche aus Altholzverbrennung pro Jahr (entspricht ca. 200 kg Holz) während 100 Jahren, so ergibt dies bei einer Gartenflä-

⁴ Dazu wird der Quecksilber-Ausstoss durch die Kehrlichtverbrennung in der Schweiz (5.5 t im Jahre 1988) durch die Menge an verbrannten Abfällen geteilt (2 Mio t Abfallmenge im Jahre 1979, davon wurden 70% verbrannt) und dann multipliziert mit der Menge Abfall, welche in Les Neigles in 15 Jahren verbrannt wurde (28'000 t im Jahre 1974; als konservativer Ansatz wird hier ein Maximum verwendet, der Durchschnitt liegt bei 17'000 t). Daraus resultiert in 15 Jahren Betriebszeit ein Ausstoss von ca. 800 kg Quecksilber. Wird diese Masse Quecksilber auf eine Fläche verteilt, die 1/8 Kreis mit 2 km Radius Richtung Hauptwindrichtung entspricht und angenommen, dass 50% der Zeit der Wind in diese Richtung weht und dabei 30% des Ausstosses in diesem Radius deponiert werden, so führt dies zu einer Quecksilberbelastung von 0.1 mg/kg.

che von 100 m² und einer Einarbeitungstiefe von 40 cm eine Erhöhung um 30 mg/kg für Blei und Zink im Boden (vgl. Tab. 6).

Für Quecksilber ist keine Schätzung möglich.

Die Ausbringung von Verbrennungsrückständen ist somit gemäss diesem Szenario für die Belastung mit Blei und Zink relevant (vgl. Tab. 6).

4.5 Verbrennung von Kohle

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde in Privathaushalten häufig mit Kohle geheizt. Kohle enthält natürlicherweise Schwermetalle (vgl. Tab. 4). Als Belastungspfade kommen Einträge via Luft und im Garten deponierter Asche in Frage. Die mittels Szenario geschätzte Bodenbelastung ist in Tab. 4 aufgeführt.

Die Bodenbelastung durch die Kohleverbrennung wird aus den pro Haushalt verbrannten Mengen Kohle von 2.7 t/a geschätzt [16][17] und es wird angenommen, dass sämtliche Schwermetalle auf dem eigenen Grundstück verbleiben (Annahme ca. 300 m²). Daraus ergeben sich die in Tab. 4 zusammengestellten Bodenbelastungen.

Tab. 4 Schwermetall-Gehalte von Steinkohle gemäss [20] (plausibilisiert mit [18] und [19]) sowie geschätzte Belastung aufgrund Kohleverbrennung in einer Stadt.

Schadstoff	mittlere Schwermetall-Gehalte Kohle [mg/kg]	Belastung 1900 bis 1965 [mg/kg]
Quecksilber	0.25	0.21
Blei	50	41
Zink	70	58
Kupfer	20	16
Cadmium	0.5	0.41

Kohleverbrennung in Haushalten ist gemäss diesem Szenario eine wichtige Schwermetallquelle, erklärt jedoch nicht die gesamte Belastung (vgl. Tab. 6).

4.6 Verkehr

Die Böden in der Schweiz sind v. a. in Strassennähe mit Blei und Zink aus dem Motorverkehr belastet. Die kumulierten Immissionen durch den Verkehr von 1950 bis 2015 (65 Jahre) betragen in städtischen Gebieten ca. 2 g/m² Blei und 1 g/m² Zink. In Strassennähe sind diese Belastungen höher. Die Gärten in Freiburg befinden sich jedoch mehrheitlich nicht in Strassennähe. Wird dieser Eintrag auf die obersten 40 cm Boden verteilt, ergibt sich eine mittlere Belastungszunahme von ca. 3 mg/kg für Blei und 1.5 mg/kg für Zink. Der Strassenverkehr ist somit kaum relevant für die Belastung der Böden Freiburgs.

4.7 Gaswerk (Usine à Gaz)

Von 1861 bis 1969 wurden im Gaswerk geschätzte 500'000 t Rohöl raffiniert. Bei einem Gehalt von 3.4 mg Hg pro Tonne Rohöl [33][35] und einem Emissionsfaktor von 0.25 in die Luft [33] entspricht dies einer Emission von 0.43 kg Quecksilber über die gesamte Produktionsdauer. Bei der Annahme, dass sämtliches Quecksilber innerhalb eines Radius von 100 m deponiert würde, entspräche dies einer Belas-

tungszunahme von 0.02 mg/kg (Mischungstiefe 40 cm). Eine grossräumige Belastung der Böden durch den Ausstoss von Schwermetallen durch das Gaswerk ist somit wenig wahrscheinlich.

4.8 Schlacke aus Kehrichtverbrennungsanlage

Zum Teil wurde Schlacke als Düngemittel verwendet. Im Vordergrund steht dabei Schlacke aus der Kehrichtverbrennungsanlage Les Neigles. KVA-Schlacke kann unterschiedliche Zusammensetzung haben, enthält aber neben anderen Schwermetallen typischerweise viel Chrom [5]. Da in Les Neigles PCB-haltige Abfälle verbrannt wurden, ist zu erwarten, dass auch PCDD/F in der Schlacke enthalten ist. Das Szenario Schlacke kann für einzelne Parzellen relevant sein, jedoch nicht für eine grossflächige Belastung. Die Schlacke wurde bis 1974 in der Umgebung der KVA Les Neigles deponiert, anschliessend auf der Deponie Châtillon von Posieux [32].

4.9 Düngung: Klärschlamm, Kompost und andere Dünger

2006 wurde die Ausbringung von Klärschlamm auf Landwirtschaftsflächen verboten; zuvor wurden auch im Kantonen Freiburg praktisch sämtliche Schlämme aus den Kläranlagen an die Landwirtschaft abgegeben [28]. Es ist eher unwahrscheinlich, dass Klärschlamm auf Privatgrundstücke verteilt wurde.

Die Autoren der Studien von Zürich [29], Olten [26] und Uri [27] sehen in der Applikation von Kompost und anderen Düngern sowie Pflanzenschutzmitteln die Hauptursache der hohen Schwermetallbelastungen von Hausgärten. Als Düngemittel wurden v. a. Kompost, Mist und Kunstdünger verwendet [29]. Die Schlämme aus der Kläranlage Fribourg wurden bis Anfangs 2000er Jahre fast vollständig in der Landwirtschaft ausgebracht.

Tab. 5 Schwermetall-Konzentrationen im Kompost um 1990 [12][34] und Organika Anfangs 2000er Jahre [9] sowie der daraus berechnete Eintrag.

		Schwermetallgehalte			Quelle	Schwermetallbelastung im Boden			
		Kompost	Mist	Dünger		Kompost	Mist	Dünger	Summe
Quecksilber	mg/kg	0.1	0.1		[12]	0.02	0.06	0	0.08
Blei	mg/kg	134	8		[34]	30	4	0	34
Zink	mg/kg	276	170		[34]	61	94	0	155
Kupfer	mg/kg	50	42		[34]	11	23	0	34
Cadmium	mg/kg	1	0.29	5.7	[34]	0.2	0.16	0.02	0.38
PCDD/F	ng I-TEQ/kg	5.6			[9]	1.2	0	0	1.2
PAK	mg/kg	3.1			[9]	0.7	0	0	0.7

Die Schwermetallgehalte von Kompost [12][34], Mist [29] und mineralischem Dünger [29] um 1990 sind in der Tab. 5 festgehalten. Typische organische Schadstoffe in Kompostabfällen sind gemäss einer Studie des Bundesamtes für Umwelt BAFU PAK, PCDD/F und weitere Organika [9].

Zur Schätzung der Bodenbelastung wird angenommen, dass jährlich 1.6 kg/m² Kompost, 4 kg/m² Mist sowie 27 g/m² Kunstdünger [29] während 100 Jahren ausgebracht wurden.

Gemäss dem obigen Szenario ist die Düngung eine wichtige Quelle für die Blei- und Zinkbelastung in den Gärten Freiburgs. Dagegen kann die angetroffene Quecksilberbelastung mit diesem Szenario nicht erklärt werden.

4.10 Spritzmittel

Die absoluten Einträge via Spritzmittel dürften relativ gering sein. Eine Ausnahme bilden Obstplantagen für Quecksilber und Rebbaue für Kupfer. Das Belastungsmuster wäre stark von der Bearbeitung abhängig, für die Parzelle sehr unterschiedlich und somit für die grossflächige Belastung höchstens ein beteiligter Faktor.

4.11 Ablagerung von Abfällen

Die Ablagerung von Abfällen ist als lokale Belastungsquelle möglich, jedoch nicht relevant für grossflächige Belastungen.

4.12 Metallproduktion und Giessereien

Giessereien befanden sich v. a. in Pérolles. Eine Glocken- und Kanonengiesserei befand sich anfangs 15. Jh. beim Murtentor, ab dem 16. bis Ende 19. Jh. an der Planche Inférieure in der Nähe des heutigen Kraftwerks Ölberg. Eine lokale Bodenbelastung mit Schwermetallen ist wahrscheinlich [10]; v. a. mit Blei-, Zink-, Kupfer-, Cadmium- und Nickelbelastungen, möglicherweise auch mit Quecksilber-, Chrom-, PAK- und PCDD/F-Belastungen zu rechnen.

Eine gewisse Belastung via Luftweg ist ebenfalls möglich, Auswirkungen auf ganze Quartiere oder die gesamte Altstadt, die mehr als 1 km vom Industriegebiet Pérolles entfernt ist, sind unwahrscheinlich.

4.13 Holzbehandlung und -verarbeitung

Bekannt sind eine ehemalige Holzbearbeitung im Quartier d'Alt sowie eine Schreinerei im Gebiet Pérolles. Zudem gibt es südlich der Altstadt ein Holzbearbeitungsbetrieb. Lokale Belastungen mit Quecksilber, Zink, Kupfer, Chrom, Arsen, PAK, PCDD/F und PCB sind möglich. Eine gewisse kleinräumige Belastung via Luftweg kann nicht ausgeschlossen werden. Auswirkungen auf ganze Quartiere oder die gesamte Altstadt sind unwahrscheinlich.

4.14 Gerbereien

Im Quartier Neuveville befanden sich einige Gerbereien zur Lederherstellung. In diesem Zusammenhang wurde v. a. Chrom (als Chromsalz beim Gerben) aber auch Quecksilber, Kupfer, Cadmium, Zink und Nickel eingesetzt. Es werden lokale Chrombelastungen erwartet. Eine gewisse kleinräumige Belastung via Luftweg kann nicht ausgeschlossen werden. Auswirkungen auf ganze Quartiere oder die gesamte Altstadt sind unwahrscheinlich.

4.15 Keramik und Glasuren

In Freiburg wurde Keramik hergestellt. Ofenkacheln wurden seit dem Mittelalter mit Glasuren versehen, die ihre Farbe verschiedenen Metalloxyden verdankten. Grundsätzlich sind Beiträge an die lokale Blei- und ev. Kupferbelastung denkbar (Depo-

nierung von Material). Keramik und Glasuren sind jedoch nicht relevant für Quecksilber und Zink.

4.16 Emissionen aus dem Industriegebiet Pérolles

Im Pérolles-Gebiet befanden sich u. a. Giessereien und metallverarbeitende Betriebe, eine Papier- und Kartonfabrik, eine Düngemittelfabrik. Lokal sind erhebliche Bodenbelastungen bekannt. Es ist davon auszugehen, dass auch relevante Emissionen via Luftweg stattgefunden haben. Der Wind bläst (neben NO) häufig aus SW [31] und somit von Pérolles Richtung Altstadt. Es ist also möglich, dass via Luftweg Schadstoffe in die Stadt verfrachtet wurden.

Für die Metallindustrie/Giessereien sind v. a. lokale Belastungen von Blei, Zink, Kupfer, Nickel, möglicherweise auch Quecksilber und Chrom wahrscheinlich. Für die Papierfabrik kommen v. a. Quecksilberemissionen in Frage. Die Düngemittelfabrik trägt wahrscheinlich wenig zu Schwermetallemissionen bei. Kohleverbrennung ist wahrscheinlich eine wichtige Quelle für Schwermetalle via Luftbelastung.

Das genaue Schadstoffmuster, welches via Luftweg in die Böden gelangt sein könnte, ist nicht abschätzbar. Zur Schätzung einer Grössenordnung wird angenommen, dass durch die Industrie des Pérolles-Gebiets halb so grosse Frachten in die Böden der Altstadt eingetragen werden als durch die direkte Kohlefeuerung der Haushalte (vgl. Tab. 6).

5 Vergleich der Belastungsszenarien mit den tatsächlich vorgefundenen Belastungen

In den folgenden Tab. 6 und Tab. 7 sind die in Kapitel 4 angestellten Immissions-schätzungen für die gesamte Stadt zusammengestellt. Für die Immissionsschätzung der Gärten und Privatrasen (Tab. 7) werden sämtliche Immissionen aufsummiert. Für die Immissionsschätzung der Wiesen und Weiden (Tab. 6) werden Quellen, welche nur in Gärten vorkommen (Verbrennung von Holzabfällen und Kohle, KVA-Schlacke, Kompost, Spritzmittel, Ablagerung von Abfällen) nicht berücksichtigt.

Tab. 6 Zusammenstellung der Immissionsschätzung und Schätzung für Wiesen und öffentliche Grünflächen (GF). Vergleich mit Messwerten. + lokaler Einfluss möglich, - lokaler Einfluss unwahrscheinlich.

Quelle		Hg	Pb	Zn	Cu	Cd	PCDD/F	PAK
Geogene Belastungen + atmosph. Belast.	mg/kg	0.05	16	45	15	0.20	-	-
KVA Les Neigles	mg/kg	0.10	0.8	3			+	-
Verkehr	mg/kg	-	3	1.5	-	+	-	+
Gaswerk	mg/kg	0.02	+	+	-	-	-	+
Einschmelzen Metall und Giessereien		-	+	+	+	+	+	+
Holzimprägnierung		+	-	+	+	-	-	+
Gerbereien		+	-	-	-	-	-	-
Keramik und Glasieren		-	+	-	+	-	-	-
Diffuse Emissionen Pérolles	mg/kg	0.11	21	29	8	0.21	+	+
Summe Schätzung Wiesen & öffentl. GF	mg/kg	0.28	41	79	23	0.41		
Messungen: Median Wiesen & öffentl. GF	mg/kg	0.10	32	61	18	0.19	1.5	0.3
Verhältnis Messung / Schätzung W & GF		0.4	0.8	0.8	0.8	0.5	-	-

Tab. 7 Zusammenstellung der Immissionsschätzung und Schätzung für Gärten und Rasen. Vergleich mit Messwerten. + lokaler Einfluss möglich, - lokaler Einfluss unwahrscheinlich.

Quelle		Hg	Pb	Zn	Cu	Cd	PCDD/F	PAK
Geogene Belastungen + atmosph. Belast.	mg/kg	0.05	16	45	15	0.20	-	-
KVA Les Neigles	mg/kg	0.10	0.8	3			+	-
Verbrennung von Holzabfällen	mg/kg	-	30	30	-	-	+	+
Verbrennung von Kohle	mg/kg	0.21	41	58	16	0.41	+	+
Verkehr	mg/kg	-	3	1.5	-	+	-	+
Gaswerk	mg/kg	0.02	+	+	-	-	-	+
KVA-Schlacke		+	-	-	-	-	+	-
Kompost, Mist und Kunstdünger	mg/kg	0.08	34	155	34	0.38	1.2	0.7
Spritzmittel		+	-	-	+	-	-	-
Ablagerung von Abfällen		+	+	+	+	+	+	+
Einschmelzen Metall und Giessereien		-	+	+	+	+	+	+
Holzimprägnierung		+	-	+	+	-	-	+
Gerbereien		+	-	-	-	-	-	-
Keramik und Glasieren		-	+	-	+	-	-	-
Diffuse Emissionen Pérolles	mg/kg	0.11	21	29	8	0.21	+	+
Summe Schätzung Gärten & Rasen	mg/kg	0.57	146	322	73	1.2	1.2	0.7
Messungen: Median Gärten & Rasen	mg/kg	1.43	329	266	78	0.47	2.6	2.8
Verhältnis Messung / Schätzung G. & R.		2.5	2.3	0.8	1.1	0.4	2.2	4.0

5.1 Belastung der Wiesen und öffentlichen Grünflächen

Die Belastungsschätzungen für Wiesen und öffentliche Grünflächen (Tab. 6) sind für die Schwermetalle Blei, Zink und Kupfer etwa 20 % zu hoch. Die gute Übereinstimmung liegt unter anderem daran, dass die Immissionsschätzung in etwa zur Hälfte durch den Beitrag „geogene Belastung plus atmosphärische Hintergrunddeposition“ beeinflusst wird, welcher auf Messwerten (FRIBO agricole) basiert. Die zweite wichtige Komponente ist die Quelle „Diffuse Emissionen Pérolles“. Dieses Immissionsszenario basiert auf der Annahme einer Kohlenverbrennung im Indust-

riegebiet Pérolles und ist recht unspezifisch bezüglich der Schadstoffe. Es könnte also auch eine andere Quelle für die erhöhte Belastung im Vergleich zur Belastung aufgrund der geogenen Hintergrundbelastung und atmosphärischen Deposition verantwortlich sein.

Die Quecksilberbelastung wird um ca. Faktor 3 überschätzt. Die dominanten Immissionsszenarien dabei sind „KVA Les Neigles“ und die „Diffuse Hintergrundbelastung Pérolles“. Wahrscheinlich wird mit dem gewählten Szenarium somit der Beitrag an die Quecksilberemissionen der KVA Neigles überschätzt. Die Interpretation bezüglich Pérolles ist schwieriger, da das Schadstoffmuster wenig spezifisch ist (vgl. oben).

5.2 Belastung der Gärten und Privatrasen

Die Immissionsschätzung für Gärten und Privatrasen (Tab. 7) liegt für Zink und Kupfer innerhalb $\pm 20\%$, unterschätzt jedoch die Belastung für Quecksilber und Blei um mehr als einen Faktor 2; die Belastung an Cadmium wird um über einen Faktor 2 überschätzt.

Ein ähnliches Resultat haben die Autoren der Studie der Fachstelle für Bodenschutz des Kantons Zürich [29] mit ihren Modellrechnungen für Schadstoffeinträge in Gärten erhalten: Die Schätzungen für Blei waren dabei um einen Faktor 1.5 bis 7 zu gering. Die Schätzungen für Zink und Kupfer waren deutlich besser (Schätzungen für Quecksilber wurden nicht angestellt). Die Interpretation der Autoren deckt sich mit den Folgerungen, die aus der vorliegenden Untersuchung resultieren: Wahrscheinlich sind die hohen Schwermetallgehalte eine Folge von lokaler Ausbringung von mit Schwermetall belastetem Materialien; im Vordergrund stehen dabei die Ausbringung von Düngern inkl. Kompost, Mist, Asche, Schlacke oder ähnlichem.

Bei der Gartenbearbeitung findet eine Akkumulation von Schadstoffen statt: Schwermetalle, die aus Haus- und Rüstabfällen in den Garten eingetragen werden, reichern sich über die Jahre an. Es ist gut möglich, dass so eine Anreicherung von Quecksilber um einen Faktor 3 stattfindet. Da die übrigen Schwermetalle jedoch ebenfalls angereichert werden, bleibt offen, wieso gerade die Quecksilberbelastung in Freiburg besonders hoch ist.


Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass sich das Bewusstsein für die Toxizität von Schwermetallen im Vergleich zum 19. Jh. im 20. Jh. stark verändert hat. Quecksilber ist flüchtig und flüchtig, und gelangt deshalb leichter in die Umwelt. So ist es möglich, dass ein wenig sorgsamer Umgang mit Schwermetallen bzw. schwermetallhaltigen Produkten früher zu einer stärkeren Belastung von Abfällen, organischen Düngern (wie Kompost) geführt hat, obwohl die tatsächlich verbrauchten Mengen an Schwermetallen und die totalen Emissionen (z. B. in die Luft) im 20. Jh. höher waren als im 19. Jh. Die Tatsache, dass erhöhte Belastungen v. a. in städtischen Gebieten auftauchen, hat möglicherweise damit zu tun, dass in städtischen Gebieten Schwermetalle im täglichen Leben deutlich häufiger vorhanden waren (Handwerksbetriebe) und die bearbeiteten Gärten kleiner und die Bevölkerungsdichte höher als in den ländlichen Regionen.

6 Schlussfolgerungen der Untersuchung

Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Die Schwermetallbelastungen in den Gärten (ohne Belastungsherde) können grösstenteils durch eine „allgemeine Schwermetallbelastung“ erklärt werden. Diese „allgemeine Schwermetallbelastung“ hat mehrere mögliche Ursachen: Eine allgemeine hohe Belastung von Düngemitteln mit Schwermetallgehalten (bzw. Verwendung von Abfällen wie Asche oder Schlacke als Düngemittel), eine allgemeine Luftbelastung (u. A. Kohleverbrennung Industrie), die Verwendung von Dachwasser als Giesswasser. Die Schwermetalle aus den unterschiedlichen Quellen wurden im Laufe der Zeit in den Gärten akkumuliert.
- Quecksilber hat möglicherweise eine zusätzliche Komponente, die v. a. in Gärten ausgeprägt ist, die im 19. Jh. oder früher angelegt wurden. Das Belastungsmuster deutet aber auch eher auf eine diffuse Belastung oder allgemein verbreitete Aktivitäten als auf eine Punktquelle für Quecksilber.
- Für die Belastungen der stark belasteten Parzellen (Belastungsherde) gibt es folgende Hinweise:
 - Belastungsherd Quartier Neuveville: die Ursache ist unklar, aber wahrscheinlich lokal
 - Belastungsherd Quartier Bourg: wahrscheinlich ist die Ursache das Verbrennen von Holz-Abfällen
 - Belastungsherd Quartier d’Auge: Belastung des Bodens durch Ausbringung von Asche oder Schlacke oder die Verwendung von belastetem Material für die Aufschüttung, möglicherweise im Zusammenhang mit einer ehemaligen Färberei
 - Quartier d’Alt: Als Erklärung für die hohen Zinkwerte stehen vermutlich Emissionen im Zusammenhang mit Holzbearbeitung im Vordergrund

Der Projektleiter



Dr. Michael Madliger

BMG Engineering AG



Dr. Christian Niederer

Schlieren, 14. Januar 2015

Projekt: Hg-FR, 62'294.03

Die BMG Engineering AG hat diese Untersuchung unter Einsatz ihres besten professionellen Könnens und in Übereinstimmung mit allgemein anerkannten Grundsätzen ausgeführt. Die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen im Untersuchungsbericht stützen sich auf die der BMG Engineering AG zum Zeitpunkt der Berichtverfassung vorliegenden Informationen. Diese Erkenntnisse und Schlussfolgerungen können nicht unüberprüft auf zukünftige Verhältnisse übertragen werden.

Anhang 1: Verwendete Unterlagen

Der Bericht stützt sich neben den relevanten gesetzlichen Bestimmungen und technischen Richtlinien auf die folgenden Grundlagen:

- [1] Schwermetallbelastungen in Hausgärten in Freiburgs Altstadt – Potentielle Schadstoffquellen und Optionen zum weiteren Vorgehen. BMG Engineering AG, Schlieren im Auftrag des Amtes für Umwelt des Kantons Freiburg. 31. August 2015.
- [2] Thöni L., Seitler E., Schnyder E., Ehrenmann J. 2013: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990–2010. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1328: 170 S.
- [3] BUWAL 1995 (Hrsg.). Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 256. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 121 S.
- [4] NABEL Luftbelastung 2011, Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL)
- [5] BUWAL 1997 (Hrsg.). Zur chemischen Belastung von Böden. Eine synoptische Darstellung der Schadstoffgehalte und Bindungsstärken der Böden des NABO. Umwelt-Materialien Nr. 77, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 63 S.
- [6] BUWAL 1996 (Hrsg.). Schadstoffgehalte von Böden in der Schweiz. Schlüssel zur Identifikation gesteinsbedingter Richtwertüberschreitungen. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 26 S.
- [7] Historisches Lexikon der Schweiz, <http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D19415.php>. Zugriff: Juni 2015.
- [8] Université de Lausanne, mémoire online, http://memoireonline.com/06/09/2198/m_Potentiel-des-friches-industrielles-des-secteurs-de-gare-pour-un-developpement-urbain-durable25.html. Zugriff: Juni 2015.
- [9] Kupper T., Fuchs J. 2007: Kompost und Gärgut in der Schweiz. Studie 1: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Studie 2: Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. Umwelt-Wissen Nr. 0743. Bundesamt für Umwelt, Bern. 124 S.
- [10] Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich. Die Bodenbelastung in der Umgebung von Giessereien im Kanton Zürich, Dezember 2003.
- [11] Lithologisch-petrografische Karte der Schweiz – Gesteinsklassierung 1:500000 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, SGK), elektronische Karte, <http://map.geo.admin.ch>. Zugriff am 6. Mai 2015.
- [12] Zürcher Kompostier- und Vergärungsanlagen. Jahresbericht zu den Inspektionen 2009, AWEL.

- [13] Noger, D., 2001. Beurteilung der Holzbrennstoff-Qualität gemäss LRV mittels Schnelltests von Holzaschen. Beurteilung von Holzaschen aus Stückholzfeuerungen für naturbelassenes Holz und Feiern im Freien. EMPA-Bericht Nr. 251.
- [14] Meyer, K. Die stoffliche Belastung der Böden in der Schweiz. Themenbericht des Nationalen Forschungsprogrammes „Boden“. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC), Bern-Liebefeld, 1991.
- [15] BUWAL (Hrsg.), 1992. Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 185. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, November 1992. 144 S.
- [16] Historisches Lexikon der Schweiz. <http://www.hls-dhs-dss.ch>, Zugriff im Juni 2015.
- [17] Energiestatistik der Schweiz 1910-1985, Schweizerischer Energierat, Bern. Bezug. <http://www.energiestatistik.ch>, Zugriff am 30. April 2015.
- [18] USEPA, 1980. Abundance of Trace and Minor Elements in Organic and Mineral Fractions of Coal, EPA-600/7-80-003.
- [19] U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Mercury in U.S. Coal – Abundance, Distribution, and Modes of Occurrence, USGS Fact Sheet FS-095-01, September 2001.
- [20] Rentz, O., Martel, Ch, 1998. Analyse der Schwermetallströme in Steinkohlefeuerungen – Einfluss der Kohlesorte und des Lastzustandes. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Massnahmen zur Luftreinhaltung (PEF). Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Universität Karlsruhe.
- [21] Persönliche Auskunft, anonym. April und Mai 2015.
- [22] Persönliche Auskunft, François Guex, Amt für Kulturgüter KGA, Planche Supérieure 3, 1700 Fribourg. April 2015.
- [23] Fotosammlungen der Kantons- und Universitätsbibliothek und des Amtes für Kulturgüter. <http://www2.fr.ch/bcuf/photos.aspx> Zugriff: Juni 2015.
- [24] E-pics Bildarchiv Online der ETH-Bibliothek Zürich. <http://ba.e-pics.ethz.ch>. Zugriff im Juni 2015.
- [25] Topografische Kartenwerke – Zeitreise. Bundesamt für Landestopografie swisstopo. <http://map.geo.admin.ch>. Zugriff im April 2015.
- [26] Affolter, R., Syss R. & Borer, F. Schadstoffbelastung von Hausgärten in der Stadt Olten. Amt für Umweltschutz, Solothurn, Olten, Februar 1998.
- [27] Küttel, S. & Imhof, A.. Schadstoffuntersuchungen in Gärten, Spielplätzen, Rebbergen und Wiesen des Kantons Uri. Amt für Umweltschutz Uri, Altdorf, Juni 2009.
- [28] Reichard, P. U. & Papritz, A. 2007, Prognosemethode zur qualitativen Abschätzung der Bodenbelastung in Kleingartenanlagen. Bodenschutz, p. 96.
- [29] Wegelin, T. et al. Boden- und Pflanzenuntersuchungen in Familiengärten der Stadt Zürich. Fachstelle Bodenschutz. Juni 1994.

- [30] McLachlan M. S.; Czub G.; Wania, F; 2002. The influence of vertical sorbed phase transport on the fate of organic chemicals in surface soils. Environ. Sci. Technol. pp. 4860-7.
- [31] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Windrosen: <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klimanormwerte/windrosen.html>, Zugriff im Mai 2015.
- [32] Les résidus de l'incinération dans le canton de Fribourg: chronique d'une histoire imparfaite; Marc Chardonens, Service de l'environnement, Route de la Fonderie 2, 1700 Fribourg, Suisse
- [33] UNEP, 2013. Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Sources, Reference Report and Guideline for Inventory Level 2, Version 1.2, April 2013. UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland.
- [34] Candinas, T., Besson, J.-M., & Humbel, A. 1998. Erhebung über die Qualität von Kompost aus getrennt gesammelten Siedlungsabfällen. Bern (FAC Liebefeld)
- [35] Site de l'ancienne usine à gaz, parcelle N°13'063. Investigations historiques et proposition d'investigations techniques selon OSites, site N°2196-1439. ABAGEOL, Juli 2009.
- [36] Persönliche Auskunft, Patrick Donzallaz, Responsable de centrale. Groupe E SA, Centrale de l'Oelberg, Karrweg 12, 1700 Fribourg, 17. Juli, 2015.
- [37] Centrale thermique de la Maigrauge. Ensemble du site de la centrale. Investigation de site pollué N° 2196-1146. Investigations historiques et cahier des charges pour les investigations techniques préliminaires restant à réaliser - secteur 3. Résultats des investigations techniques préliminaires et assainissement des sols effectués dans les secteurs 1 et 2. Rapport d'état de la situation au 28.02.2011.

PLAN DE LA VILLE DE FRIBOURG



Anhang 2.1

Stadtpläne Freiburg

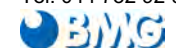
Jahr: 1822

Amt für Umwelt AfU

Schwermetallbelastungen in
Hausgärten in Freiburgs Altstadt

Quelle: Amt für Umwelt AfU

Bearbeitung: BMG Engineering AG
Ilfangstrasse 11
8952 Schlieren
Tel. 044 732 92 92



Stand: 17.09.2015



Quelle: Amt für Umwelt AfU

Bearbeitung: BMG Engineering AG
Ifangstrasse 11
8952 Schlieren
Tel. 044 732 92 92



Stand: 17.09.2015

PLAN DE LA VILLE DE FRIBOURG ET DES ENVIRONS.



Anhang 2.3

Stadtpläne Freiburg

Jahr: 1881

Amt für Umwelt AfU

Schwermetallbelastungen in
Hausgärten in Freiburgs
Altstadt

Quelle: Amt für Umwelt AfU

Bearbeitung: BMG Engineering AG
Ifangstrasse 11
8952 Schlieren
Tel. 044 732 92 92



Stand: 17.09.2015

PLAN DE LA VILLE DE FRIBOURG ET DES ENVIRONS.

1900 - 2^{me} Edition.

Reproduction interdite.



Dessiné et gravé d'après le plan cadastral par Dr. Ardy Dec 1898. - Bonn et 1900.

Edité par la Librairie Josué Labastrou à Fribourg

Institut géographique et artistique de Künzler & Frey, Berne.

Echelle 1:5000

Droits réservés des cartes du Bureau topographique fédéral.

Anhang 2.4

Stadtpläne Freiburg

Jahr: 1904

Amt für Umwelt AfU

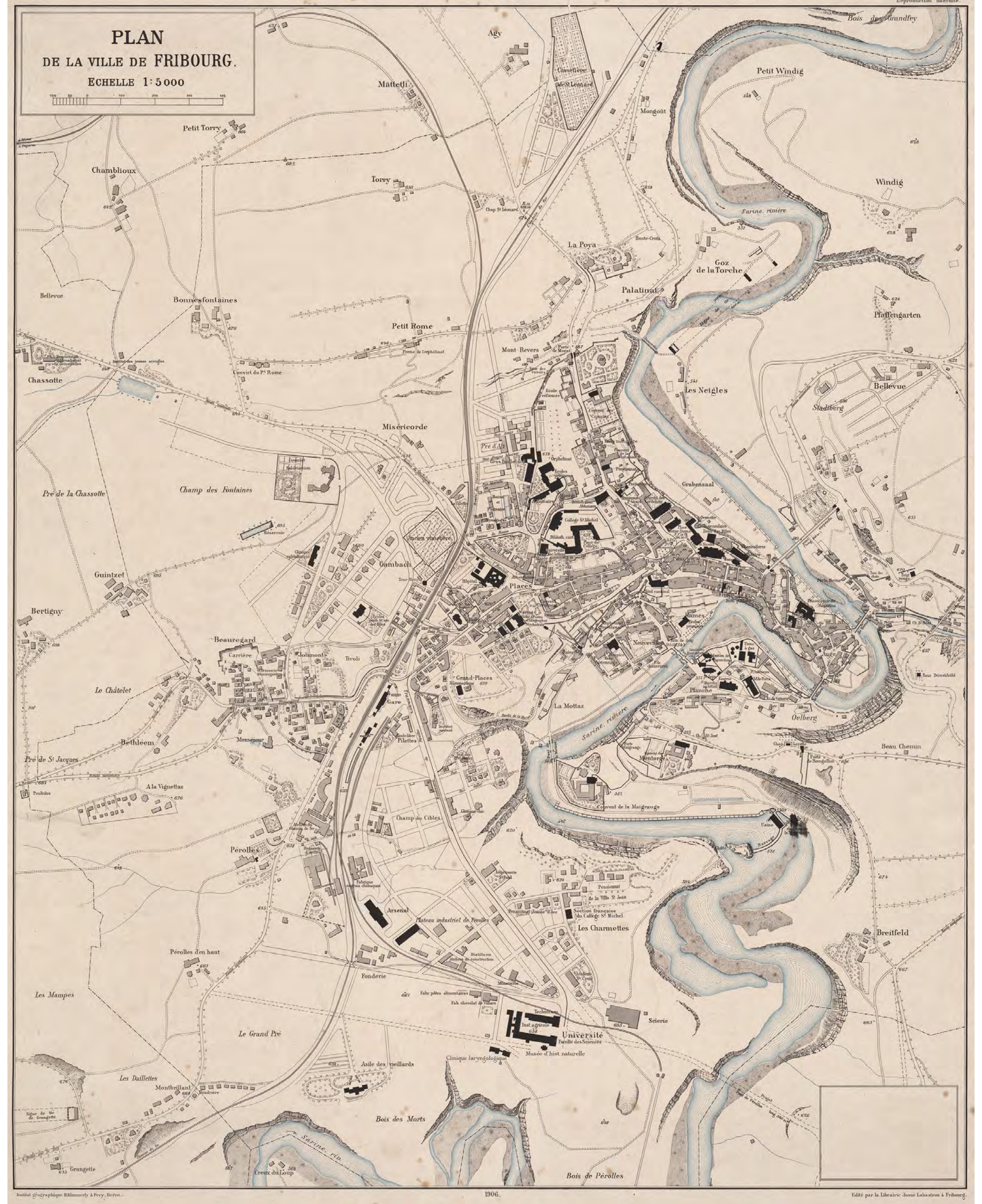
Schwermetallbelastungen in Hausgärten in Freiburgs Altstadt

Original: Plankopie 1:500
8184 Bachenbülach
13.12.2000

Bearbeitung: BMG Engineering AG
Ifangstrasse 11
8952 Schlieren
Tel. 044 732 92 92



Stand: 17.09.2015



Anhang 2.5

Stadtpläne Freiburg

Jahr: 1906

Amt für Umwelt AfU

Schwermetallbelastungen in Hausgärten in Freiburgs Altstadt

Original: Plankopie 1:500
8184 Bachenbülach
13.12.2000

Bearbeitung: BMG Engineering AG
Ifangstrasse 11
8952 Schlieren
Tel. 044 732 92 92



Stand: 17.09.2015