

Qualitative Abschätzung der Bodenbelastung in Kleingärten

Fachbericht zum TUSEC-IP-Projekt (Koordination Schweiz)

Petra U. Reichard und Andreas Papritz

Institut für terrestrische Ökosysteme

ETH Zürich

Universitätstrasse 16

8092 Zürich

März 2007

Vorwort

Dieser Bericht dokumentiert die Validierung und Optimierung einer Prognosemethode, welche einige Studierende in einer Fallstudie der ETH Zürich zur qualitativen Abschätzung von Bodenbelastungen in Familiengärten entwickelt haben. Durchgeführt wurde die aktuelle Studie im Auftrag des Vereins „Projekt TUSEC-IP Koordination Schweiz“ als Teil der Aktivitäten im EU Interreg-Projekt „TUSEC-IP Technique of urban soil evaluation in city regions – Implementation in planning procedures“.

Im Verlauf des Projekts wurde bei vielen öffentlichen und privaten Stellen angefragt, ob für das Projekt Daten verfügbar sind. All denen, die zum Gelingen des Projekts beigetragen haben sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Spezieller Dank geht (in alphabetischer Reihenfolge der Kantone) an das Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau, das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt, das Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, das Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, den Service cantonale de géologie des Kantons Genf, das Amt für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden, den Service de la protection de l'environnement des Kantons Neuenburg, das Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, das Amt für Lebensmittelkontrolle und Umweltschutz des Kantons Schaffhausen, das Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, das Amt für Umwelt des Kantons Thurgau, den Service des eaux, sols et assainissement des Kantons Waadt, das Amt für Umweltschutz des Kantons Zug und an das Amt für Landschaft und Natur des Kantons Zürich. Weiter geht ein herzliches Dankeschön (ebenfalls in alphabetischer Reihenfolge) an die Firma Arbonia-Forster AG, die Stadtgärtnerei Bern, die Hobby-Gärtner Vereinigung Bischofszell, den Gartenverein Buchs, die Liegenschaftenverwaltung der Stadt Chur, die Familiengartenvereine der Städte und Gemeinden Frauenfeld, Lausanne, Rüti, St.Gallen, Zuchwil und Zug, die Association des jardins familiaux de Lausanne, die Gemeindegärtnerei Neuhausen, Grün Stadt Zürich, den Schweizer Familiengärtnerverband Region Suisse Romande, die Bauverwaltung Romanshorn, den Moosgartenverein Rüschlikon, die Stadtgärtnerei Schaffhausen, den Zentralverband der Familiengartenvereine St.Gallen, den Püntenpachtverein Winterthur und an das Amt für Umwelt und Energie der Stadt Zug.

Alle erwähnten Amtstellen und Institutionen haben Daten und Informationen zur Verfügung gestellt, ohne die diese Studie nicht möglich gewesen wäre. Wir hoffen, dass wir mit den erarbeiteten Resultaten den erwähnten Amtstellen und Institutionen und interessierten Dritten ein nützliches Werkzeug in die Hand geben, mit welchem sie die Schadstoffbelastung von Böden von Familiengartenarealen ohne aufwendige Bodenuntersuchungen qualitativ beurteilen können.

Zusammenfassung

Böden von Familiengärten weisen recht häufig erhöhte Gehalte an Schwermetallen und organischen Schadstoffen auf. Nicht selten überschreiten die gemessenen Konzentrationen die Prüfwerte der Schweizerischen Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, 1998). In einer Fallstudie der ETH Zürich über Bodenbelastungen in Familiengärten in der Stadt Zürich entwickelten einige Studierende eine Methode, um das Ausmass der Bodenbelastung in den Familiengartenarealen der Stadt qualitativ vorherzusagen. Die Vorhersagen wurden aus einfach zu erhebenden Merkmalen, wie Angaben zum Alter der Areale, zur Vornutzung und ob Quellen für die Schadstoffe (z.B. viel befahrene Strassen) in der Nähe des Areals vorhanden sind, abgeleitet. Da in der Fallstudie zu wenig Daten zur Verfügung standen, konnte die Güte der Vorhersagen damals nicht überprüft werden.

Im Auftrag des Vereins „Projekt TUSEC-IP Koordination Schweiz“ wurde die Prognosemethode der Fallstudie in dieser Studie nun validiert und optimiert. Ziel der Arbeit war, die Häufigkeit des Auftretens von Prüfwertüberschreitungen in einzelnen Familiengartenarealen möglichst genau zu prognostizieren. Als Erstes wurden Daten über die Belastung von Familiengartenböden aus der ganzen Schweiz zusammengetragen. Für die Validierung standen chemische Analysen von 265 Bodenproben aus 42 Familiengartenarealen zur Verfügung. Zusätzlich zu den Schadstoffdaten wurden die benötigten Merkmale der Familiengartenareale bei Begehungen und durch anderweitige Recherchen erhoben.

Die Güte der Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen wurde für zwei Leitschadstoffe überprüft. Die Wahl fiel auf Blei (Vertreter der Schwermetalle) und auf PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe). Es zeigte sich, dass die ursprüngliche Prognosemethode der Fallstudie für Familiengartenareale, in denen die Prüfwerte häufiger überschritten wurden, tendenziell eine grössere Belastung der Böden vorhersagt. Die Methode klassierte aber eine Reihe von Arealen ohne gemessene Prüfwertüberschreitungen als belastet.

Die Prognose der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen durch Blei und PAK wurde dann mittels logistischer Regressionsanalysen optimiert. Über eine Kreuzvalidierungsanalyse wurde die Güte der Vorhersagen der ursprünglichen und der optimierten Prognosemethode verglichen. Dieser Vergleich ergab, dass die optimierte Methode den Grad der Belastungen v.a. für die Areale, in denen keine Prüfwertüberschreitungen gemessen wurden, besser vorhersagt. Gemessen an diversen Statistiken der Kreuzvalidierungsvorhersagefehler ergab die optimierte Methode die genaueren Vorhersagen. Mit der optimierten Prognosemethode kann somit relativ genau vorhergesagt werden, ob in einem bestimmten Familiengartenareal damit zu rechnen ist, dass die Blei- und die PAK-Konzentration die Prüfwerte der VBBo überschreiten. Somit lassen sich aufwendige Bodenuntersuchungen auf diejenigen Familiengartenareale beschränken, für die mit der optimierten Methode Prüfwertüberschreitungen mit recht grosser Sicherheit prognostiziert werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	2
Tabellenverzeichnis	3
1. Einleitung.....	4
2. Die Prognosemethode der Fallstudie	6
2.1 Beurteilung der Bodenbelastung.....	6
2.2 Merkmale für die Abschätzung der Bodenbelastung.....	6
2.3 Prognose der Bodenbelastung.....	8
3. Methodik und Resultate der Optimierung.....	8
3.1 Auswahl der Datensätze über Bodenbelastung in Familiengärten	8
3.2 Wahl von Leitschadstoffen für die Beurteilung der Bodenbelastung.....	9
3.3 Erhebung der Merkmale der Familiengartenareale zur Vorhersage der Schadstoffbelastung	15
3.4 Validierung der Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen durch Pb und PAK.....	16
3.5 Optimierung der Prognosemethode mittels logistischer Regression	16
3.5.1 Schrittweise Wahl signifikanter Merkmale und Schätzung der Gewichtungsfaktoren	19
3.5.2 Kreuzvalidierung.....	22
4. Ausblick	31
5. Literatur.....	34
6. Anhang.....	35
Anhang 1	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Häufigkeit der Messung verschiedener Schadstoffe in 42 Familiengartenarealen.....	10
Abbildung 2. Häufigkeit der drei Belastungsklassen „ $x \leq RW$ “, „ $RW < x \leq PW$ “ und „ $x > PW$ “.....	12
Abbildung 3. Streudiagramme der Häufigkeit der gemessenen Prüfwertüberschreitungen von Blei und PAK aufgetragen gegen die „Indikatorpunktzahl“.....	17
Abbildung 4. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für Blei aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage des „Belastungsindex“ berechnet nach der Fallstudien- und der optimierten Methode.....	25
Abbildung 5. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für PAK aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage des „Belastungsindex“ berechnet mit der Fallstudien- und der optimierten Methode.....	26
Abbildung 6. Anteil richtig klassierter Familiengartenareale in Abhängigkeit von der Wahl des Schwellenwerts für den „Belastungsindex“.....	27
Abbildung 7. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für Blei aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage dieser Häufigkeit berechnet nach der Fallstudien- und der optimierten Methode.....	29
Abbildung 8. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für PAK aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage dieser Häufigkeit berechnet nach der Fallstudien- und der optimierten Methode.....	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Merkmale, die in der Fallstudie zur Beurteilung der Böden in Familiengärten verwendet wurden.....	7
Tabelle 2. Verwendete Richt- und Prüfwerte gemäss VBBo oder nach <i>Wegleitung Bodenaushub</i> bzw. <i>Handbuch Gefährdungsabschätzung</i>	11
Tabelle 3. Relative Häufigkeit von gleichzeitigen Prüfwertüberschreitungen für die Schadstoffpaare Pb und Cu bzw. Pb und Zn, sowie relative Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen nur durch ein Schwermetall.....	14
Tabelle 4. Gewichtungsfaktoren der Werte der Merkmale mittels logistischer Regressionsanalyse berechnet.....	20
Tabelle 5. Gewichtungsfaktoren der „Indikatorpunktzahl“ der Fallstudie mittels logistischer Regressionsanalyse aus der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen von Blei und PAK bestimmt.....	24
Tabelle 6. Robuste Statistiken der Kreuzvalidierungsvorhersagefehler der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitung bei Blei und PAK berechnet mit der optimierten und der Fallstudienmethode.....	28

1. Einleitung

Anfang der Neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurde bei Bodenuntersuchungen in der Umgebung einer Kehrrichtverbrennungsanlage in der Stadt Zürich (Jenka *et al.*, 1992) festgestellt, dass Böden von Kleingärten (im Folgenden als Familiengärten bezeichnet) stärker mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen belastet waren als Böden, die anders genutzt wurden. Weitere Studien (z.B. Jenka *et al.*, 1994; Schönbacher, 1996; Papritz, 2003) bestätigten in der Folge den Befund, dass Böden von Familiengärten häufig erhöhte Schadstoffgehalte aufweisen. Vergleicht man die Schadstoffgehalte, die in diesen Studien gemessen worden waren, mit den Prüfwerten der *Verordnung über Belastungen des Bodens* (VBBo, 1998), wird deutlich, dass in Familiengärten nicht selten mit Prüfwertüberschreitungen zu rechnen ist. Die VBBo verpflichtet die Kantone in einem solchen Fall zu prüfen, ob von der Bodenbelastung für die Schutzgüter Menschen, Tiere oder Pflanzen eine konkrete Gefährdung ausgeht (das *Handbuch Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden* [BUWAL, 2005] beschreibt, wie in solch einem Fall vorzugehen ist). Nach der *Wegleitung Bodenaushub* (BUWAL, 2001) werden Böden von Familiengärten heute generell als „potentiell belastet“ beurteilt. So werden Böden aus Familiengärten, die mindestens seit 1990 als solche genutzt werden, im Kanton Zürich im Fall eines Bauvorhabens gemäss dem „Prüfperimeter Bodenverschiebung“ als „untersuchungswürdig“ eingestuft.

Es ist aber nicht so, dass die Böden in jedem Familiengartenareal übermässig mit Schadstoffen belastet sind. Die erwähnten Studien zeigten ebenso, dass es durchaus Familiengartenareale gibt, in welchen die Böden nur wenig oder nicht belastet sind. Das Ausmass der Schadstoffbelastungen hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. von der Vornutzung des Gebiets, von der Dauer der Nutzung als Familiengarten, vom Vorhandensein von Schadstoffquellen in der Nähe des Familiengartenareals, etc. Für den Vollzug der gesetzlichen Bodenschutzbestimmungen wäre es hilfreich, wenn man aus diesen Informationen das Ausmass der Bodenbelastung grob abschätzen könnte. Insbesondere nützlich wäre, wenn man vorhersagen könnte, in welchen Familiengartenrealen mit Prüfwertüberschreitungen zu rechnen ist. Diese Familiengartenareale könnten so im Hinblick

auf die dann notwendig werdende Gefährdungsabschätzung gezielt mittels Bodenprobenahme und Schadstoffanalyse genauer untersucht werden. Ein derartiges Prognosewerkzeug würde also den zielgerichteten Einsatz von Ressourcen erleichtern und dazu beitragen, den Aufwand für Bodenanalysen zu optimieren.

Ein solches Prognosewerkzeug wurde in der Fallstudie „Umgang mit Bodenbelastungen in Familiengärten der Stadt Zürich“ der ETH Zürich (Christl *et al.*, 2004) erarbeitet. Eine Gruppe von Studierenden entwickelte damals eine Methode, mit der sie die Schwermetallbelastung der Böden von Familiengärten in der Stadt Zürich mit kostengünstig zu erhebenden Merkmalen grob abschätzen konnten. Bisher wurde die Genauigkeit dieser Prognosen aber nicht mit unabhängigen Daten überprüft. Zudem war die Arbeit der Studierenden in der Fallstudie nicht gezielt auf die Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen ausgerichtet. Dieses Projekt hat deshalb zum Ziel:

1. Validierung: die Genauigkeit der Prognosen der Fallstudienmethode mit unabhängigen Datensätzen zu überprüfen, dies speziell im Hinblick auf die Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen durch Schwermetalle,
2. Erweiterung: die Methode für die Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen durch organische Schadstoffe zu erweitern,
3. Optimierung: sie durch statistische Analysen zu verbessern und
4. Umsetzung: für den Vollzug tauglich zu machen.

Die optimierte Methode soll einfach anzuwenden und gut dokumentiert sein, so dass sie ohne grosse Vorkenntnisse bei Planungs- und Vollzugsaufgaben in der Bodenschutzpraxis eingesetzt werden kann.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Arbeiten, die zum Erreichen der Ziele (1)-(4) ausgeführt wurden. Er gliedert sich wie folgt: Im Abschnitt 2 wird die Prognosemethode der Fallstudie erläutert, da sie die Grundlage für das aktuelle Projekt bildet. Abschnitt 3 beschreibt das methodische Vorgehen, die Auswahl geeigneter Daten, diskutiert die Wahl von zwei Leitschadstoffen, beschreibt die statistischen Analysen, stellt die Resultate der Überprüfung der Fallstudienmethode dar und zeigt, welche Verbesserung durch die statistische Optimierung erreicht werden konnte. Im abschliessenden Abschnitt 4 werden die Anwendungsmöglichkeiten der optimierten Prognosemethode im Bodenschutzvollzug diskutiert. Diese Angaben werden durch die Anhänge zum Bericht ergänzt:

Anhang 1 enthält eine Liste der Areale, deren Daten in der Studie verwendet wurden. Anhang 2 enthält eine Dokumentation, die die zur Prognose der Bodenbelastung benötigten Merkmale, deren Erhebung und deren Eingabe in die Excel-Tabellen, mit deren Hilfe die Häufigkeiten von Prüfwertüberschreitungen prognostiziert werden, beschreibt.

2. Die Prognosemethode der Fallstudie

2.1 Beurteilung der Bodenbelastung

Für ihre Arbeit wählten die Studierenden 9 Familiengartenreale aus der Stadt Zürich aus, für die eine ausreichende Anzahl Schadstoffmessungen vorhanden war. Die Studierenden definierten ausgehend von den Richt-, Prüf- und Sanierungswerten der VBBo (bzw. der *Wegleitung Bodenaushub*) mehrere Belastungsklassen und bestimmten dann für die Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg) und Zink (Zn), mit welcher Häufigkeit sie auf den 9 Gartenrealen auftreten. Anschliessend wurden diese relativen Häufigkeiten für jedes Areal über die fünf Metalle gemittelt. Anhand der mittleren Häufigkeiten der Belastungsklassen wurden die 9 Familiengartenareale dann als „gering“, „mässig“ oder „stark belastet“ klassiert (für Einzelheiten siehe Christl *et al.*, 2004).

2.2 Merkmale für die Abschätzung der Bodenbelastung

Die Studierenden definierten verschiedene Merkmale, mit denen sie versuchten, die Klassierung der 9 Familiengartenareale bezüglich ihrer Schadstoffbelastung nachzuvollziehen. Abgesehen von der Nutzungsdauer als Familiengarten und der Vornutzung des Familiengartenareals charakterisierten die gewählten Merkmale „äussere“ Faktoren, die auf einen möglichen Eintrag von Schadstoffen in die Böden hinweisen. Dazu gehören Informationen über potentielle Schadstoffquellen in der Nachbarschaft der Familiengärten, wie Strassen, Eisenbahn, emittierende Industrie und Kläranlagen. Zudem wurde der Gehalt an Fremdstoffen in den Böden und eine biologische Bewirtschaftung der Familiengärten berücksichtigt. Die verwendeten Merkmale wurden zu 5 Gruppen zusammengefasst (Tabelle 1).

Tabelle 1. Merkmale, die in der Fallstudie zur Beurteilung der Böden in Familiengärten verwendet wurden.

Merkmalsgruppe	Merkmal	Gewichtungsfaktor	Ursache Stoffeintrag/ Stoffeintragsminderung
Alter des Familiengartens	vor 1930 errichtet	2.94	Akkumulation von Schadstoffen aus Düngern, Pestiziden, Bodenverbesserern, etc. über die Zeit
	zwischen 1930 und 1955 errichtet	2.31	
	zwischen 1956 und 1980 errichtet	1.19	
	nach 1980 errichtet	0.56	
Vornutzung	Rebberg	0.50	Cu-haltige Fungizide
	landwirtschaftlich genutzt	0.00	Schadstoffe aus Düngern, etc.
	Weide	0.00	extensive Nutzung
	Garten	0.17	Schadstoffe aus Düngern, etc.
	Aufschüttung	0.33	belastetes Verfüllmaterial
Umgebung	Strassen	0.28	Eintrag von Pb aus verbleitem Benzin und Rückstände aus unvollständiger Verbrennung
	Eisenbahn	0.22	Abrieb von Metallen, Pestizide
	emittierende Industrie	0.50	Eintrag von Schadstoffen aus der Luft, vereinfachter Zugang zu belasteten Fremdstoffen, wie Schlacke, Giessereisande für Auffüllungen
	Altlastenverdachtsfall	0.14	direkte Ablagerung oder ungewollte Freisetzung von Schadstoffen
	Nähe zu Kläranlage	0.50	erleichterte Verwendung von belastetem Klärschlamm (dank kleiner Transportdistanz)
	Nähe zu Kompostieranlage	0.36	erleichterte Verwendung von belastetem Kompost
Begehung	Gehalt an Schlacke	0.99	Hinweis auf Ablagerung von Abfällen und belastetem Fremdmaterial
	Gehalt an Fremdmaterial	2.01	
Bewirtschaftung	biologische Bewirtschaftung	-1.00	Verringerter Einsatz von Hilfsstoffen (Pestizide, mineralische Dünger)

2.3 Prognose der Bodenbelastung

Die von den Studierenden erarbeitete Prognosemethode basiert auf der Berechnung einer „Indikatorpunktzahl“. Um die Bodenbelastung in einem Familiengartenareal vorherzusagen, wurde beurteilt, ob und wie stark ein Merkmal (vgl. Tabelle 1) einen Einfluss auf die Schadstoffbelastung hat. Die Beurteilung erfolgte nach dem Schlüssel „0 = kein Einfluss/trifft nicht zu“, „1 = mässiger Einfluss/trifft teilweise zu“ und „2 = starker Einfluss/trifft vollständig zu“. Anschliessend wurden die zugeordneten Werte gewichtet und zu einer „Indikatorpunktzahl“ aufaddiert. Die Studierenden konnten die Gewichtung nicht durch statistische Analysen bestimmen, weil die Gewichtungsfaktoren von 18 Merkmalen mit 9 Datensätzen nicht eindeutig bestimmt werden können. Daher wurden die Gewichtungsfaktoren durch Ausprobieren so gewählt, dass die „Indikatorpunktzahl“ die Belastung des Bodens in den 9 Familiengartenarealen möglichst gut reflektierte. Die derart „optimierten“ Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Merkmale wurden dann für 64 Familiengartenareale der Stadt Zürich erhoben und für jedes Familiengartenareal wurde die „Indikatorpunktzahl“ berechnet. Areale mit einer „Indikatorpunktzahl“ < 6 wurden der Belastungsstufe „gering belastet“ (60 % aller Familiengartenareale), Areale mit einer „Indikatorpunktzahl“ zwischen 6 und 8 der Stufe „mässig belastet“ (30 %) und solche mit einer „Indikatorpunktzahl“ > 8 der Belastungsstufe „stark belastet“ zugeordnet (10 %).

3. Methodik und Resultate der Optimierung

3.1 Auswahl der Datensätze über Bodenbelastung in Familiengärten

Zur Validierung der Prognosemethode der Fallstudie wurden Schadstoffmessungen von Familiengartenböden aus verschiedenen Teilen der Schweiz zusammengetragen. Insgesamt konnten Messdaten von 163 Familiengartenarealen aus 45 Städten (verteilt auf 14 Kantone) eingesehen werden. Mit Familiengartenareal wird eine meist zusammenhängende Fläche bezeichnet, auf welcher mehrere Gartenparzellen liegen, die durch eine Körperschaft (Verein, öffentliche Hand) oder durch einen privaten Eigentümer parzellenweise an Dritte zur Nutzung als Familiengarten abgegeben wird. Die Gesamtheit von Messdaten aus einem Familiengartenareal wird im Folgenden als „Datensatz“ bezeichnet.

net. Die Anzahl untersuchter Bodenproben pro Familiengartenareal variierte beträchtlich und es war auch nicht für jedes Areal die gleiche Palette von Schadstoffen untersucht worden. In unserer Arbeit beschränkten wir uns auf die Auswertung von Messungen von Oberbodenproben (Beprobungstiefe 0 – 20 cm). In der Regel waren dies Mischproben, die von einzelnen Parzellen innerhalb eines Familiengartenareals gezogen worden waren. Mehrfachmessungen (= Messungen mit identischen geographischen Koordinaten) wurden arithmetisch gemittelt¹.

Für die weitere Arbeit wurden nur Datensätze berücksichtigt, die für Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) Messwerte von mindestens drei Bodenproben aufwiesen. Für Quecksilber (Hg), Chrom (Cr) und Nickel (Ni) und für die organischen Schadstoffe PAK (Summe der 16 wichtigsten Vertreter der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe) und Benz(a)pyren (B(a)P) mussten die Messwerte von mindestens zwei Proben enthalten sein. Andere Schwermetalle und organische Schadstoffe (PCB [polychlorierte Biphenyle] und Chlorpestizide) waren nur vereinzelt gemessen worden und blieben deshalb in unserer Arbeit unberücksichtigt. Auf diese Art wurden Schadstoffdaten von 42 Familiengartenarealen (256 Oberbodenproben) ausgewählt. Die Liste im Anhang 1 führt auf, wo diese Familiengartenareale liegen, wie viele Bodenproben pro Areal analysiert und welche Schadstoffe gemessen worden waren.

3.2 Wahl von Leitschadstoffen für die Beurteilung der Bodenbelastung

Gemäss Auftrag mussten zwei Leitschadstoffe (ein Schwermetall, eine organische Verbindung) ausgewählt werden, für welche dann die Prognose von Prüfwertüberschreitungen überprüft und optimiert werden sollte. Für die Wahl der Leitschadstoffe war einerseits ausschlaggebend, wie häufig der betreffende Schadstoff gemessen worden war und andererseits wie häufig dabei der Prüfwert überschritten wurde.

¹Die Mittelung lässt sich wie folgt rechtfertigen: Falls sich die gemittelten Messungen in Wirklichkeit nicht auf die gleiche Parzelle beziehen, führt man rechnerisch eine Mittelung über eine grössere Fläche durch. Dies ist unproblematisch, da in den verschiedenen Studien die Einstiche der Mischproben ohnehin über eine unterschiedlich grosse Fläche verteilt worden waren. Falls die gemittelten Messungen aber echte Mehrfachmessungen des gleichen Probenahmeperimeters sind, dann vermeidet man durch die Mittelung, dass bei der Schätzung der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen eine Parzelle mit Mehrfachmessungen im Vergleich zu einer Parzelle mit nur einer Messung stärker gewichtet wird.

Als Erstes prüften wir deshalb, wie oft die oben genannten Schadstoffe in den 42 Arealen gemessen worden waren. Abbildung 1 zeigt, dass für rund 90 % dieser Familiengartenareale Pb, Cd, Cu und Zn gemessen worden waren. Hg wurde für ca. 75 % und Ni und Cr dagegen nur für gut 40 % aller Areale bestimmt. Die Gehalte an PAK und B(a)P wurden nur bei knapp 50 % bzw. 40 % der Datensätze gemessen.

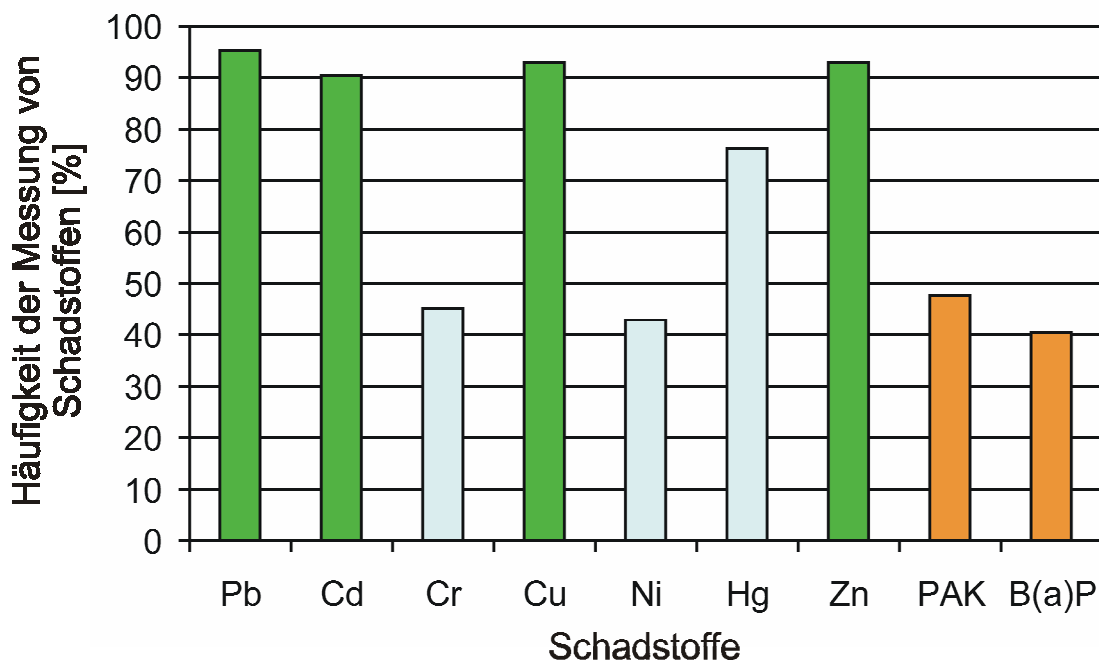


Abbildung 1. Häufigkeit der Messung verschiedener Schadstoffe (Totalgehalte) in 42 Familiengartenarealen.

Als Nächstes wurde für Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, B(a)P und PAK die Häufigkeit von Messwerten ermittelt, die kleiner oder gleich gross wie der jeweilige Richtwert („ $x \leq RW$ “) sind, die zwischen dem Richt- und Prüfwert („ $RW < x \leq PW$ “) liegen oder den Prüfwert überschreiten („ $x > PW$ “). Die hierfür verwendeten Richt- und Prüfwerte sind in der Tabelle 2 aufgeführt. Bei der Wahl der Prüfwerte wurde jeweils diejenige Nutzung berücksichtigt, für welche die VBBo den kleinsten Prüfwert angibt. Falls die VBBo keine

Prüfwerte definiert, wurden die Prüfwerte aus der *Wegleitung Bodenaushub* (BUWAL, 2001) oder aus dem *Handbuch Gefährdungsabschätzung* (Buwal, 2005) verwendet.

Tabelle 2. Verwendete Richt- und Prüfwerte gemäss VBBo (1998) oder, sofern dort definiert, nach *Wegleitung Bodenaushub* (BUWAL, 2001) und *Handbuch Gefährdungsabschätzung* (BUWAL, 2005).

Stoff, Element	Messeinheit	Richtwert	Prüfwert
Cd	[mg/kg]	0.8	2 ^a
Cr	[mg/kg]	50	100 ^c
Cu	[mg/kg]	40	80 ^c
Hg	[mg/kg]	0.5	1 ^b
Ni	[mg/kg]	50	80 ^c
Pb	[mg/kg]	50	200 ^a
Zn	[mg/kg]	150	300 ^{b,c}
B(a)P	[mg/kg]	0.2	1 ^d
PAK	[mg/kg]	1	10 ^d

^a Nahrungspflanzenanbau

^b *Wegleitung Bodenaushub* (BUWAL, 2001)

^c *Handbuch Gefährdungsabschätzung* (BUWAL, 2005)

^d direkte Bodenaufnahme

In Abbildung 2 ist die Häufigkeit der Messungen in den drei Belastungsklassen aufgeführt. Die grünen Balken stellen die Häufigkeit der Belastungsklasse „ $x \leq RW$ “, die gelben diejenige der Klasse „ $RW < x \leq PW$ “ und rote Balken die Häufigkeit der Klasse „ $x > PW$ “ dar. Abbildung 2 zeigt, dass bei den Schadstoffen Pb, Cu, Zn, PAK und B(a)P die Mehrzahl der Messwerte zwischen Richt- und Prüfwert lag. Es gab aber auch eine

grössere Anzahl Prüfwertüberschreitungen. Bei Cd, Cr, Ni und Hg lag die überwiegende Mehrheit der Messwerte unter dem jeweiligen Richtwert.

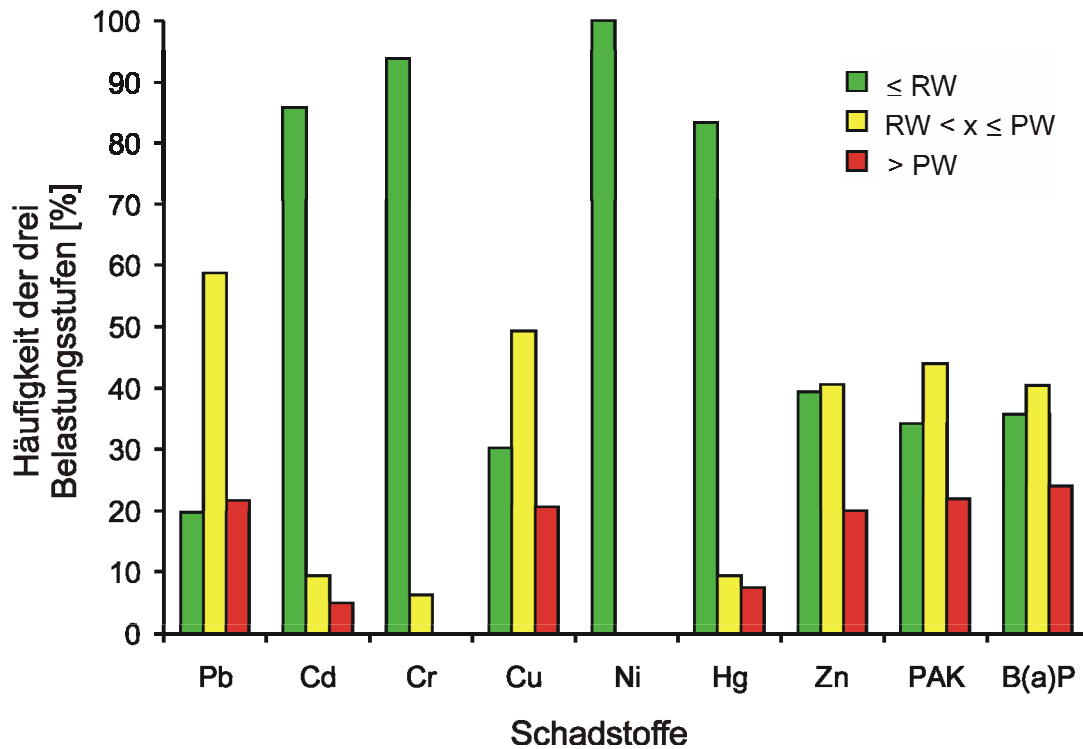


Abbildung 2. Häufigkeit der drei Belastungsklassen „ $x \leq RW$ “, „ $RW < x \leq PW$ “ und „ $x > PW$ “ bei Schadstoffmessungen (Totalgehalte) von 256 Bodenproben aus 42 Familiengartenarealen.

Mit der Vorgabe, dass ein Leitschadstoff möglichst häufig gemessen wird und das Prüfwertüberschreitungen möglichst häufig auftreten, fiel die Wahl auf Blei als Leitschadstoff für die Gruppe der Schwermetalle und auf PAK für die der organischen Schadstoffe. Diese Wahl lässt sich wie folgt rechtfertigen: Die VBBo definiert nur für Pb

und Cd einen Prüfwert für den Nahrungspflanzenanbau². Für Cu definiert sie nur einen Prüfwert für Futterpflanzenanbau, der aber in Familiengärten nicht häufig betrieben wird. Für Cr, Ni, Hg und Zn nennt die VBBo gar keine Prüfwerte. Das *Handbuch Gefährdungsabschätzung* (BUWAL, 2005) gibt in Anhang 8 für Cu einen Prüfwert für Haus- und Kleingärten und für Zn einen Prüfwert für landwirtschaftliche Nutzflächen an, welcher mit dem Prüfwert übereinstimmt, den die *Wegleitung Bodenaushub* nennt. Der angegebene Wert von 80 mg/kg (= 2 mal Richtwert) für Cu erscheint uns aber vollständig unrealistisch und ungeeignet, um zu beurteilen, ob Menschen durch direkte Bodenaufnahme oder durch Verzehr von Nahrungspflanzen gefährdet werden. Für bestimmte Tierrassen, insbesondere für Wiederkäuer, wie z.B. Schafe, wirkt Cu stark toxisch. Für den Menschen hingegen ist Cu, sowie auch Zn, ein essentielles Spurenelement und daher humantoxikologisch wenig bedenklich (Christl *et al.*, 2004, Kapitel 4). Das *Handbuch Gefährdungsabschätzung* hält auf Seite 65 fest „Cu-Gehalte von Böden sind nur in Ausnahmefällen so hoch, dass sie eine Gefährdung des Menschen verursachen können“ und auf Seite 66 liest man: „Beim Cu wurde der Sanierungswert nach VBBo für Gärten mit Blick auf eine Schädigung von Pflanzen (Ertragsminderung) und nicht des Menschen festgelegt“. Gleichlautende Aussagen finden sich auf Seite 66 auch für Zink. Im Bodenbelastungsgebiet Dornach wurde deshalb für die Gefährdungsabschätzung, welche nach einem Entwurf des Handbuchs durchgeführt wurde, die Kupferbelastung nur für den Futterpflanzenanbau berücksichtigt, obwohl der Cu-Gehalt des Bodens über grosse Gebiete den Wert von 80 mg/kg überstieg (Kayser *et al.*, 2006).

Obwohl wir der Meinung sind, dass der Prüfwert von 80 mg/kg für Cu wissenschaftlich nicht haltbar ist, haben wir gleichwohl für die in Tabelle 2 angegebenen Prüfwerte ermittelt, wie häufig gleichzeitig Überschreitungen durch Pb und Cu auftreten und wie häufig die Prüfwerte jeweils nur durch ein Schwermetall überschritten werden. Die gleichen Häufigkeiten wurden auch für das Schadstoffpaar Pb und Zn bestimmt (Tabelle 3).

² Für Pb und Cd definiert die VBBo auch Prüfwerte für die direkte Bodenaufnahme. Diese wurden im Sinne einer möglichst vorsichtigen Beurteilung von Bodenbelastungen hier nicht berücksichtigt, da sie höher als die Prüfwerte für Nahrungsmittelanbau sind.

Tabelle 3. Relative Häufigkeit von gleichzeitigen Prüfwertüberschreitungen für die Schadstoffpaare Pb und Cu bzw. Pb und Zn, sowie relative Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen nur durch ein Schwermetall (Datengrundlage: Messungen von 256 Bodenproben aus 42 Familiengartenarealen).

		Cu		Zn	
		≤ PW [%]	> PW [%]	≤ PW [%]	> PW [%]
Pb	≤ PW [%]	70.4	10.4	72.7	5.7
	> PW [%]	12.3	6.9	4.8	16.8

Sowohl für das Paar Pb und Cu, als auch für Pb und Zn traten etwa gleich oft alleinige Prüfwertüberschreitungen auf. Für beide Paare wurden meist gleichzeitig Prüfwertunter- und Prüfwertüberschreitungen gemessen. Angesichts des wenig aussagekräftigen Prüfwerts für Cu und vergleichbarer Häufigkeiten von alleinigen Prüfwertüberschreitungen durch Cu und Zn, sowie durch Pb, wurde Blei als Leitschadstoff für Schwermetalle gewählt. Cadmium wurde nicht berücksichtigt, weil bei diesem Schwermetall Prüfwertüberschreitungen deutlich seltener gemessen wurden als bei Blei.

Für PAK und B(a)P definiert die VBBo Prüfwerte für die direkte Bodenaufnahme und den Nahrungspflanzenanbau. Erstere sind kleiner als Letztere, sie beziehen sich aber auf eine Probenahmetiefe von 0-5 cm. Obwohl die Beprobungstiefe der in dieser Studie berücksichtigten Daten 0-20 cm war, haben wir für PAK und B(a)P die Prüfwerte für die direkte Bodenaufnahme verwendet, weil wir davon ausgingen, dass die Beprobungstiefe in den in der Regel intensiv bearbeiteten Familiengartenböden keinen grossen Einfluss auf die gemessene Konzentration hat und weil wir die Bodenbelastung möglichst vorsichtig beurteilen wollten. Für PAK und B(a)P unterschieden sich die Anzahl verfügbarer Messungen und die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen kaum. Da PAK aber die Gesamtheit dieser Substanzgruppe repräsentiert, während B(a)P nur eine Einzelsubstanz ist, wurde PAK als organischer Leitschadstoff ausgewählt.

Für die Validierung der Prognosemethode standen für Blei 205 Messwerte aus 38 Familiengartenarealen³ zur Verfügung (vgl. Anhang 1). Für die Optimierung der Gewichte der Merkmale wurden zusätzlich 302 Bleimesswerte aus den 9 Familiengartenarealen in der Stadt Zürich benutzt, die in der Fallstudie verwendet worden waren (in Anhang 1 nicht aufgeführt). Für PAK waren deutlich weniger Daten vorhanden. Obwohl die Mindestanzahl Messungen pro Familiengartenareal auf zwei herabgesetzt wurde, standen total nur 205 PAK-Messwerte aus über 20 Familiengartenarealen zur Verfügung (davon stammen 85 Messwerte aus 4 Familiengartenarealen, welche in der Fallstudie berücksichtigt worden waren).

3.3 Erhebung der Merkmale der Familiengartenareale zur Vorhersage der Schadstoffbelastung

Für die Validierung und Optimierung der Prognosemethode der Fallstudie mussten nun für jedes Familiengartenareal, von welchem Schadstoffmesswerte verwendet wurden, die Merkmale beurteilt werden. Die Beschaffung dieser Information war relativ aufwendig. Angaben zum Alter und zur Vornutzung der Familiengartenareale konnten z.T. aus alten Karten (Siegfried-, Wildkarten), aus Luftbildern, Büchern und durch Archivrecherchen (z.B. in Stadtarchiven, etc.) gewonnen werden. In vielen Fällen konnte die benötigte Information aber nur durch Nachfrage bei den zuständigen Familiengartenvereinen oder kommunalen und kantonalen Amtsstellen beschafft werden. Um Angaben über die Nähe zu Strassen, zur Eisenbahn und zu Industriebetrieben zu erhalten und um den Fremdstoffanteil der Böden zu beurteilen, war eine Begehung der Areale erforderlich. Das Merkmal „biologische Bewirtschaftung“ wurde nicht berücksichtigt, weil es uns schwierig erschien, dazu überprüfbare Angaben zu beschaffen. Da die Grundlagen für die Beurteilung der Merkmale in der Fallstudie z.T. ungenau beschrieben worden waren, wurde versucht, sie für die Validierung anzupassen bzw. eindeutiger zu formulieren. Eine detaillierte Be-

³ Von den 42 in Abschnitt 3.1 erwähnten und in Anhang 1 aufgelisteten Familiengartenarealen war nur bei 40 der Pb-Gehalt der Bodenproben gemessen worden und in einem Areal lagen mehr PAK- als Pb-Messungen vor. Für zwei weitere Areale konnten die Merkmale der Familiengartenareale (vgl. Abschnitt 3.3) nicht erhoben werden. So reduzierte sich die Anzahl verwendbarer Pb-Messwerte von ursprünglich 212 (in 44 der 256 Messungen wurde nur PAK gemessen) auf 205 (aus 38 Familiengartenarealen).

schreibung der Merkmale und ihre Beurteilung ist dem Leitfaden in Anhang 2 zu entnehmen.

3.4 Validierung der Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen durch Pb und PAK

Mit den Gewichtungsfaktoren, die die Studierenden in der Fallstudie vorgeschlagen hatten (vgl. Tabelle 1), wurde aus den Werten, welche den Merkmale zugeordnet wurden, für jedes Familiengartenareal die „Indikatorpunktzahl“ berechnet. Zur Überprüfung der Güte der Vorhersagen wurde die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen pro Familiengartenareal gegen die „Indikatorpunktzahl“ aufgetragen (Abbildung 3). Diese Abbildung zeigt, dass mit zunehmender „Indikatorpunktzahl“ auch die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen zunimmt. Es besteht aber kein einfacher, linearer Zusammenhang: Prüfwertüberschreitungen scheinen erst ab einer „Indikatorpunktzahl“ von 6 aufzutreten und tendieren dazu, für „Indikatorpunktzahlen“ > 6 häufiger zu werden. Dieser Anstieg ab einem Wert von 6 stimmt gut mit der in der Fallstudie definierten Grenze zwischen den Belastungsstufen „gering“ und „mässig belastet“ überein (vgl. Abschnitt 2.3). Mit der Fallstudienmethode werden aber sowohl für Pb als auch für PAK für eine beträchtliche Anzahl Areale, in denen keine Prüfwertüberschreitungen gemessen worden waren, zu hohe „Indikatorpunktzahlen“ berechnet. Somit gibt die Fallstudienmethode zwar den generellen Trend wieder, die Vorhersagen erscheinen aber für Areale ohne Prüfwertüberschreitungen verbesserungswürdig.

3.5 Optimierung der Prognosemethode mittels logistischer Regression

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, wurden in der Fallstudie die Gewichtungsfaktoren der Merkmale durch Ausprobieren gewählt. Eine statistische Optimierung der Gewichtungsfaktoren war damals nicht möglich, weil nur die Daten von 9 Familiengartenarealen zur Verfügung standen. Dank der zusätzlichen Daten konnten die Gewichtungsfaktoren nun aber durch eine statistische Analyse bestimmt werden. Mit der statistischen Analyse sollte eine Auswahl von relevanten (statistisch signifikanten) Merkmalen gefunden und deren Gewichtungsfaktoren so gewählt werden, dass die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen möglichst genau vorhergesagt werden konnte. Mit der Optimierung sollte

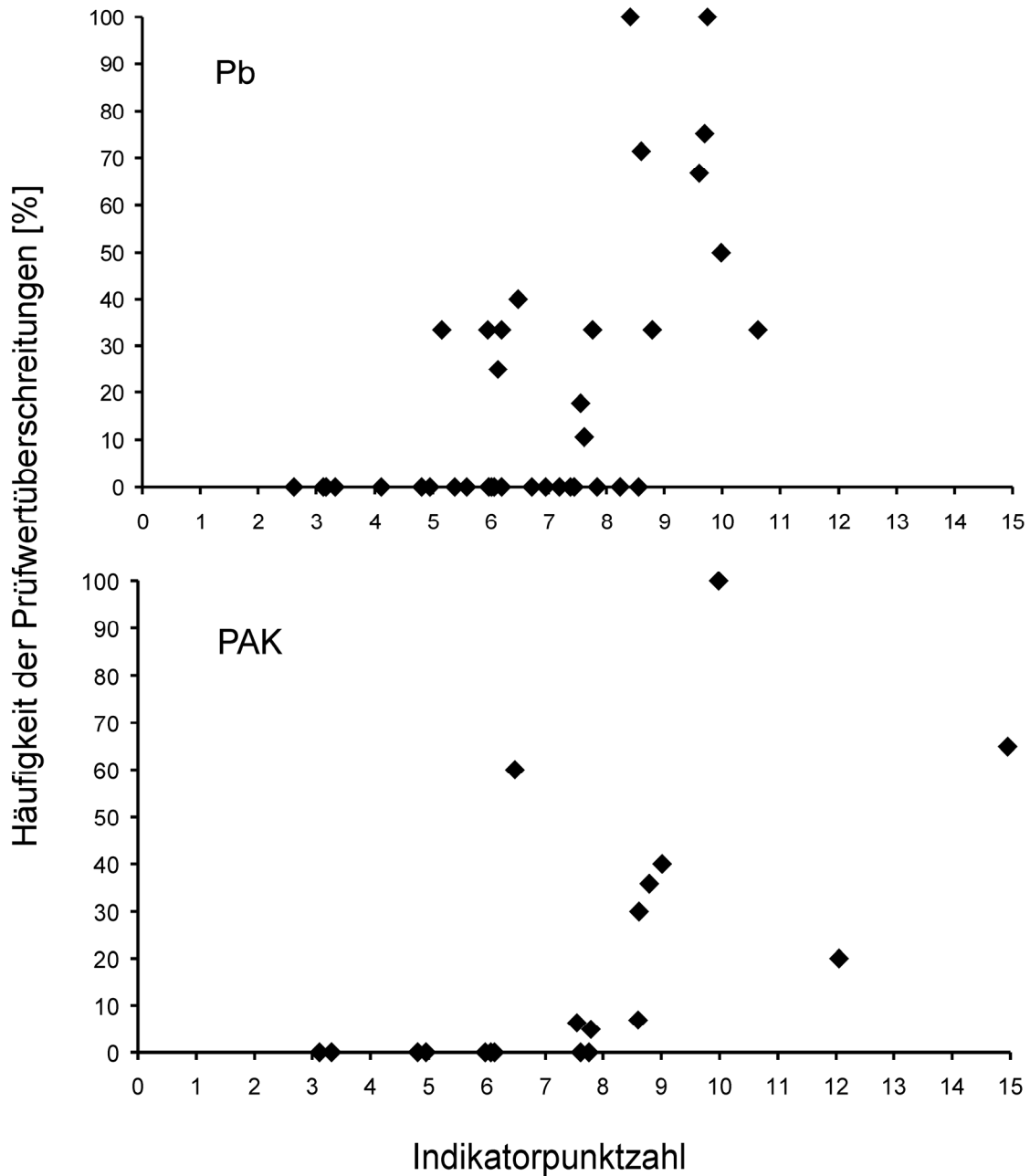


Abbildung 3. Streudiagramme der Häufigkeit der gemessenen Prüfwertüberschreitungen von Blei (oben) und PAK (unten), aufgetragen gegen die mit der Fallstudienmethode errechnete „Indikatorpunktzahl“.

das Prognoseverfahren der Fallstudie also vereinfacht (kleinerer Aufwand, wenn nur die relevanten Merkmale erhoben werden müssen) und genauer gemacht werden.

Zur Optimierung der Fallstudienmethode wurde eine logistische Regressionsanalyse durchgeführt (Dobson, 2002, Kapitel 7), bei welcher die logit-transformierte Häufigkeit der Prüfwertüberschreitung als eine gewichtete Summe der Werte der Merkmale modelliert wurde⁴. Diese Summe wird im Weiteren als „Belastungsindex“ bezeichnet. Der Wert des „Belastungsindex“ charakterisiert die Bodenbelastung eines Areals und entspricht der in der Fallstudie verwendeten „Indikatorpunktzahl“ (vgl. Abschnitt 2.3).

Für die logistische Regressionsanalyse wurden folgende Angaben benötigt: die relative Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen durch die Leitschadstoffe pro Familiengartenareal, die gesamte Anzahl untersuchter Bodenproben pro Areal und die für diese Areale erhobenen Werte der Merkmale (vgl. Anhang 1). Die Bewertung der Merkmale, welche die frühere Nutzung, den Einfluss von potentiellen Schadstoffquellen in der Umgebung eines Familiengartenareals und das Vorhandensein von Fremdmaterialien im Boden kodieren, wurde für die statistische Analyse vereinfacht: statt drei Stufen (Werte 0, 1 oder 2) wurden nur zwei Stufen verwendet (0, ≥ 1). Das optimierte logistische Regressionsmodell wird im Folgenden auch als optimierte Methode bezeichnet.

⁴ Die Logit-Transformation, $g(\pi)$, der relativen Häufigkeit, π , eines Ereignisses ist definiert als $g(\pi) = \log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right)$. Durch diese Transformation wird der mögliche Wertebereich der relativen Häufigkeit (Intervall $[0, 1]$) auf das Intervall von $-\infty$ bis $+\infty$ abgebildet. Die logit-transformierte Häufigkeit wird in der logistischen Regressionsanalyse als gewichtete Summe von p bekannten, erklärenden Variablen, x_1, x_2, \dots, x_p , plus einer Konstanten β_0 modelliert, $\log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right)$ wird dann durch den so genannten linearen Prädiktor, $\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p$, approximiert. Der Koeffizient β_k , der *a priori* nicht bekannt ist und mit einem statistischen Verfahren aus den Daten geschätzt werden muss, beschreibt also das Gewicht, mit welchem die erklärende Variable x_k zu η beiträgt. In unserem Kontext sind die erklärenden Variablen gleich den Werten der Merkmale für die Bodenbelastung, die β_k s sind die zu bestimmenden Gewichtungsfaktoren der Merkmale und der lineare Prädiktor η ist der „Belastungsindex“ (entspricht der „Indikatorpunktzahl“ der Fallstudienmethode), mit dem die Bodenbelastung charakterisiert werden soll.

3.5.1 Schrittweise Wahl signifikanter Merkmale und Schätzung der Gewichtungsfaktoren

Ausgehend von einem logistischen Regressionsmodell, welches nur das Alter als erklärende Variable enthielt, wurden schrittweise weitere Merkmale ins Regressionsmodell aufgenommen bzw. daraus wieder entfernt, bis ein minimaler Set von Merkmalen gefunden worden war, mit welcher die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen möglichst gut modelliert werden konnte⁵. Zur Variablenwahl wurden v.a. diagnostische Abbildungen eingesetzt (Boxplots der Prädiktor-Residuen gegen die im Regressionsmodell [nicht] enthaltenen Werte der Merkmale). Neben einem Set von signifikanten Merkmalen konnten durch die logistische Regressionsanalyse optimierte Gewichtungsfaktoren (= Regressionskoeffizienten der Merkmale, welche ins Modell aufgenommen worden waren) gewonnen werden. Diese optimierten Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 4 aufgeführt. Für die Interpretation dieser Zahlen muss man sich in Erinnerung rufen, dass für alle Merkmale nur zwei Stufen (0 und ≥ 1) verwendet wurden. Wenn nun für ein bestimmtes Familiengartenareal die zweite Stufe eines Kriteriums gilt, dann wird der „Belastungsindex“ um den in der Tabelle aufgeführten Betrag erhöht bzw. reduziert. Hat das Merkmal für das fragliche Areal dagegen den Wert Null, dann trägt es nichts zum „Belastungsindex“ bei. Merkmale, die nicht in Tabelle 4 aufgeführt sind oder für die kein Gewichtungsfaktor angegeben wird, wurden bei der schrittweisen Wahl der erklärenden Variablen für den jeweiligen Schadstoff nicht ausgewählt. Dies bedeutet, dass die entsprechenden Gewichtungsfaktoren sich nicht signifikant von Null unterschieden und dass die entsprechenden Merkmale somit keine Information zur Vorhersage der Prüfwertüberschreitungen beisteuerten.

Bei beiden Schadstoffen ist offensichtlich das Alter eines Familiengartenareals wichtig. Im Vergleich zu Familiengartenarealen, die mindestens seit 1930 als solche genutzt werden, reduzierte sich der „Belastungsindex“ für Areale, die aus der Zeit zwischen 1930-1955 stammen geringfügig und sehr stark für solche, die nach 1980 eingerichtet

⁵ Als Mass für die Güte der Modellanpassung wurde das gängige Akaike Informationskriterium (AIC) verwendet. Das AIC ist eine operative Methode bei der die Komplexität eines geschätzten Modells bei der Beurteilung der Güte der Modellanpassung berücksichtigt wird. Mit dem AIC wird versucht, ein Modell zu finden, das die empirischen Daten mit möglichst wenig Parametern möglichst gut beschreibt.

worden sind. Bei PAK ist der „Belastungsindex“ auch für Areale aus den 56-80er Jahre stark reduziert.

Tabelle 4. Gewichtungsfaktoren der Werte der Merkmale, die zur Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen durch Blei bzw. PAK verwendet werden. Die Gewichtungsfaktoren entsprechen den Regressionskoeffizienten, die mit der logistischen Regressionsanalyse aus der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen geschätzt wurden. Merkmale, die keine Information zur Vorhersage beisteuern, haben Gewichtungsfaktoren, die sich kaum von Null unterscheiden. Sie sind in der Tabelle mit (-) gekennzeichnet.

<i>Merkmal</i>	<i>Gewichtungsfaktor für Vorhersage von Pb</i>	<i>Gewichtungsfaktor für Vorhersage von PAK</i>
Konstante	-0.26	-3.99
zwischen 1930-55 errichtet	-0.76	-1.72
zwischen 1956-80 errichtet	-1.70	-22.68
nach 1980 errichtet	-18.00	-22.26
Vornutzung Weide	-1.39	-1.78
Vornutzung Landwirtschaft	-1.05	(-)
Vornutzung Garten	-1.66	19.81
Vornutzung Rebberg	2.61	(-)
Vornutzung Aufschüttung	1.09	(-)
Umgebung Strasse	0.80	(-)
Umgebung Altlast	0.42	2.15
Fremdmaterial	(-)	4.52

Von den Merkmalen, welche die frühere Nutzung charakterisieren, verringern die Kategorien „Weide“ und „Landwirtschaft“ (letztere nur für Pb) den „Belastungsindex“. Die Vornutzung als Garten verringert den Index nur bei Blei, bei PAK wird der „Belas-

tungsindex“ dagegen durch diese Vornutzung stark erhöht. Das Merkmal „Garten“ bezeichnet eine Nutzung als nicht vertraglich geregelter Familiengarten oder als Schul-, Haus- oder Bauerngarten. Familiengartenareale auf ehemaligen Rebbergböden oder auf Aufschüttungen weisen bei Blei einen erhöhten „Belastungsindex“ auf. Bei beiden Schadstoffen wird der „Belastungsindex“ auch durch die Präsenz einer Altlast in der Umgebung des Familiengartenareals erhöht. Der Nachweis von Fremdmaterial im Boden eines Familiengartenareals erhöht den Index nur für PAK deutlich. Noch eine Bemerkung zum „Merkmal“ „Konstante“: dieses charakterisiert den „Belastungsindex“ für ein Familiengartenareal aus der Zeitspanne „vor 1930“, für das keines der übrigen in der Tabelle aufgeführten Merkmale zutrifft.

Im Allgemeinen stimmen die Gewichtungsfaktoren qualitativ mit den Wirkungen überein, die man von den verschiedenen Merkmalen erwarten würde. Insbesondere rechtfertigt die statistische Analyse der Daten die grossen Gewichtungsfaktoren, welche die Studierenden in der ursprünglichen Prognosemethode den Erschliessungsperioden „vor 1930“ und „1930-55“ zugemessen haben. Die Merkmale „Altlast“, „Strasse“, „Fremdmaterial“ und „Aufschüttung“ erhöhen den „Belastungsindex“, landwirtschaftliche Vornutzung (inkl. Weide) verringern ihn.

Nicht sehr plausibel erscheint, dass die frühere Nutzung eines Areals als Rebberg den „Belastungsindex“ von Blei erhöhen, dass die Vornutzung als Garten einen gegensätzlichen Effekt auf Pb und PAK, und dass die Nähe zu Strassen keinen Effekt auf die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen durch PAK ausüben soll. Das geschätzte Gewicht des Merkmals „Rebberg“ wurde nur durch drei Familiengartenareale bestimmt: in einem Areal überschritten 5 %, in den beiden anderen dagegen 25 % bzw. 100 % der Messungen den Prüfwert für Blei. Wenn wir den Gewichtungsfaktor für „Rebberg“ ohne das am höchsten belastete Areal schätzten, war der geschätzte Koeffizient (1.57) nicht mehr signifikant von Null verschieden. Um Gewissheit über den Einfluss der Vornutzung „Rebberg“ auf den „Belastungsindex“ von Blei zu erhalten, müsste man weitere Daten von Familiengärten auf ehemaligen Rebbergböden analysieren.

Der vermindernde Effekt der Vornutzung „Garten“ auf den „Belastungsindex“ von Blei hing hingegen nicht von den Daten eines einzigen Areals ab. Es ist auch gesichert, dass der Einbezug der Vornutzung „Garten“ bei PAK ein signifikant besseres Regres-

sionsmodell ergab, allerdings sind die geschätzten Effekte des Erschliessungsalters „1956-80“ und der Vornutzung als Garten gekoppelt, weil in Familiengartenarealen, die in der Zeitspanne von 1956-80 eingerichtet und die vorher nicht als „Garten“ genutzt worden waren, keine Prüfwertüberschreitungen verzeichnet wurden⁶.

A priori würde man erwarten, dass Böden von Familiengartenarealen, die an vielbefahrene Strassen grenzen, höhere PAK-Gehalte aufweisen und deshalb das Merkmal „Strasse“ signifikant sein sollte. Tatsächlich traten Prüfwertüberschreitungen in strassen-nahen Familiengartenarealen häufiger auf als in Arealen, die weiter von Strassen entfernt waren. In der schrittweisen Regressionsanalyse wurde aber das Merkmal „Strasse“ nicht ausgewählt. Dies bedeutet, dass die ins Regressionsmodell aufgenommenen Merkmale die Abhängigkeit der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen vom Merkmal „Strasse“ gut abzubilden vermögen. Die verschiedenen Merkmale enthalten also die gleiche Information. Das zeigt, dass eine kausale Information, weshalb einzelne Merkmale signifikant waren und andere nicht, nur sehr beschränkt möglich ist.

3.5.2 Kreuzvalidierung

Mit einer Kreuzvalidierungsanalyse wurde die Genauigkeit der Vorhersagen der optimierten und der ursprünglichen Prognosemethode verglichen. Dieser Vergleich umfasste die folgenden Schritte:

1. Die Daten über ein bestimmtes Familiengartenareal — z.B. über das i -te Areal — wurden (vorübergehend) von der Analyse ausgeschlossen.
2. Das logistische Regressionsmodell wurde mit den derart reduzierten Daten geschätzt. Mit den angepassten Regressionskoeffizienten und den Merkmalen wurde für das ausgeschlossene i -te Familiengartenareal die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen vorhergesagt.

⁶ Die effektive Grösse des Regressionskoeffizienten einer binären erklärenden Variable kann nicht genau geschätzt werden, wenn für eine Stufe der erklärenden Variablen alle Beobachtungen eine Häufigkeit des Ereignisses von 0 % (oder 100 %) aufweisen. Es ist dann nur klar, dass der Regressionskoeffizient sehr klein (sehr gross) sein muss. Ein genauer Wert des Koeffizienten kann nicht bestimmt werden und der Standardfehler der Schätzung wird deshalb sehr gross. Dies war in unserer Analyse bei der Schätzung des Effekts des Nutzungsalters „nach 1980“ (beide Schadstoffe) und für PAK bei der Schätzung des kombinierten Effekts von Nutzungsalter „1956-80“ und Vornutzung „Garten“ der Fall.

3. Diese Vorhersage wurde anschliessend mit der beobachteten Häufigkeit verglichen und daraus ein Vorhersagefehler (= beobachtete minus vorhergesagte Häufigkeit) berechnet.
4. Die Schritte 1-3 wurden für alle $i = 1, 2, \dots, 20$ (PAK) bzw. 47 (Pb) Familiengartenareale wiederholt.

Diese Kreuzvalidierungsanalyse wurde für Blei und PAK nicht nur für das optimierte logistische Regressionsmodell durchgeführt, sondern auch für ein logistisches Regressionsmodell, welches als einzige erklärende Variable die „Indikatorpunktzahl“ enthielt, die mit den in der Fallstudie verwendeten Gewichtungsfaktoren (vgl. Tabelle 1) berechnet worden war⁷. Die geschätzten Gewichtungsfaktoren sind für dieses Modell in Tabelle 5 aufgeführt. Mit ihnen kann der „Belastungsindex“ aus der „Indikatorpunktzahl“ der Fallstudie berechnet werden. Für Blei ergibt sich beispielsweise die Beziehung: „Belastungsindex“ = $0.39 \cdot \text{Indikatorpunktzahl} - 4.12$. Die Koeffizienten der „Indikatorpunktzahl“ sind für beide Schadstoffe positiv. Dies bestätigt, dass die „Indikatorpunktzahl“ positiv mit der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen korreliert ist. Die Achsenabschnitte (Konstante) sind etwa gleich -4.5 bis -4.1. In einem Familiengartenareal mit einer „Indikatorpunktzahl“ von Null erwartet man also, dass 2-3 % der Messungen⁸ den jeweiligen Prüfwert überschreiten. Eine kleinere Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen kann man nach dem Vorschlag der Studierenden nur durch eine biologische Bewirtschaftung der Familiengärten erreichen (einziges Merkmal mit negativem Gewichtungsfaktor, vgl. Tabelle 1).

⁷ Mit diesem logistischen Regressionsmodell wird nur eine Konstante und ein Gewichtungsfaktor für die „Indikatorpunktzahl“ bestimmt. Statt der „Indikatorpunktzahl“ selber wird also eine lineare Funktion dieser Grösse für die Vorhersage der logit-transformierten Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen verwendet. Dies entspricht einer Skalierung der Abszisse in einem Streudiagramm, in der die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen gegen die „Indikatorpunktzahl“ aufgetragen wird (vgl. Abbildungen 3, 4 und 5).

⁸ Aus dem linearen Prädiktor, η (= „Belastungsindex“) kann man die Häufigkeit, π , des Ereignisses (= Prüfwertüberschreitung) mit der Formel $\pi = \frac{\exp(\eta)}{1 + \exp(\eta)}$ berechnen (Umkehrfunktion der logit-Transformation). Einem Belastungsindex gleich Null entspricht also eine Häufigkeit von 50 % Prüfwertüberschreitungen (vgl. Abbildung 4 und 5).

Tabelle 5. Gewichtungsfaktoren der „Indikatorpunktzahl“ der Fallstudie, die mit einer logistischen Regressionsanalyse aus der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen von Blei und PAK bestimmt wurden.

<i>erklärende Variable („Merkmal“)</i>	<i>Gewichtungsfaktor für Vorhersage von Pb</i>	<i>Gewichtungsfaktor für Vorhersage von PAK</i>
Konstante	-4.12	-4.48
Indikatorpunktzahl aus Fallstudie	0.39	0.32

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung sind in Abbildung 4 (Blei) und 5 (PAK) dargestellt. Die beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen ist jeweils gegen den „Belastungsindex“ aufgetragen, der entweder mit der Fallstudienmethode (vgl. Tabelle 5) oder mit der optimierten Methode (vgl. Tabelle 4) berechnet wurde. Für Familiengartenareale, die nach 1980 eingerichtet und in welchen keine Überschreitungen des Prüfwerts durch Blei registriert worden waren, wurde durch die optimierte Methode ein „Belastungsindex“ zwischen -22 und -17 vorhergesagt (Abbildung 4). Die Fallstudienmethode prognostizierte für diese Areale dagegen Indexe zwischen -3.1 und -1.2, was modellierten Häufigkeiten zwischen 5-20 % entspricht. Der Median des „Belastungsindex“ aller Areale ohne Prüfwertüberschreitungen war bei der optimierten Methode deutlich kleiner (-3.5) als bei der Fallstudienmethode (-1.7). Für Areale mit nachgewiesenen Prüfwertüberschreitungen prognostizierte die optimierte Methode im Durchschnitt grössere Werte des Index als die Fallstudienmethode. Die optimierte Methode ergab also eine wesentlich stärkere Spreizung des „Belastungsindex“ als die Fallstudienmethode.

Für den PAK-Totalgehalt ergab die Kreuzvalidierung ähnliche Resultate (Abbildung 5). Areale mit Häufigkeiten von 0 % bzw. 100 % Prüfwertüberschreitungen konnten wesentlich besser modelliert werden.

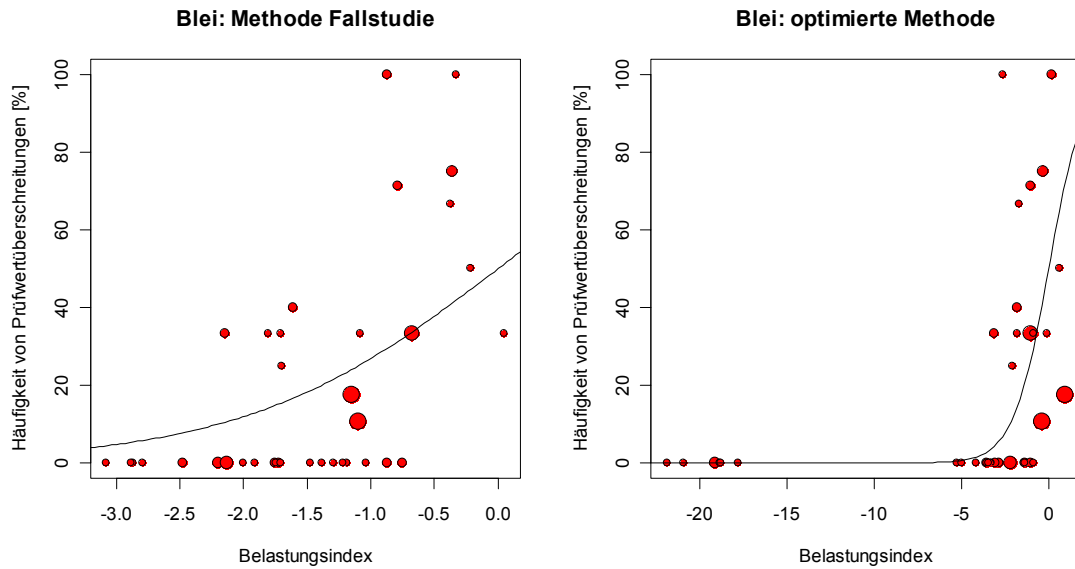


Abbildung 4. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für Blei pro Familiengartenareal, aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage des „Belastungsindex“, berechnet nach der Fallstudien- (links) und der optimierten Methode (rechts). Die 9 Familiengartenareale, die in der Fallstudie zur Kalibrierung der „Indikatorpunktzahl“ verwendet worden waren, wurden nicht dargestellt. Die Fläche der Kreissymbole ist proportional zur Anzahl Messungen pro Familiengartenareal, die Kurve beschreibt die Umkehrfunktion der logit-Transformation (vgl. Fussnote 8).

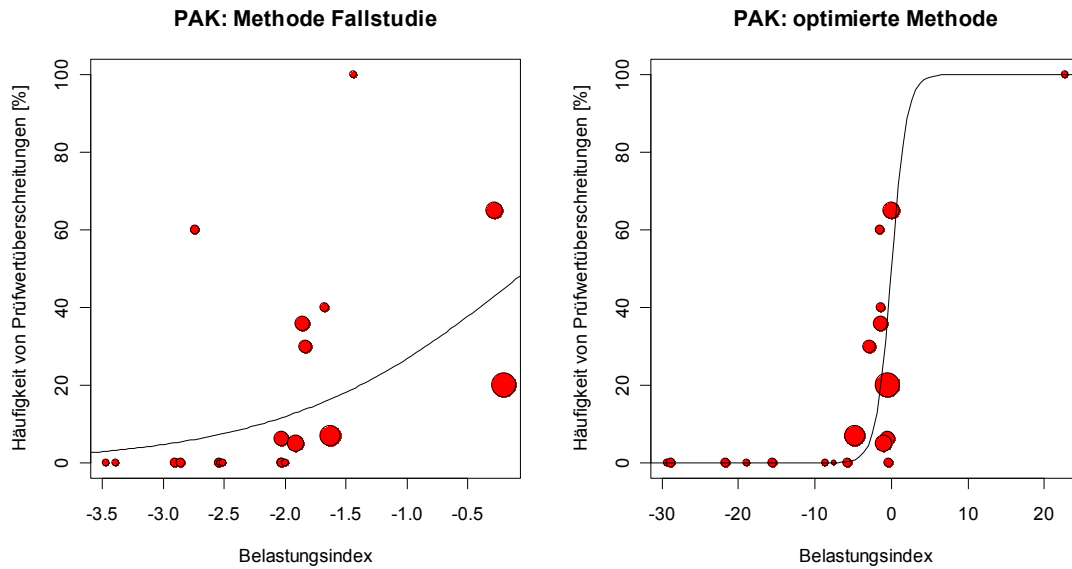


Abbildung 5. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für PAK pro Familiengartenareal, aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage des „Belastungsindex“, berechnet nach der Fallstudien- (links) und der optimierten Methode (rechts). Die Fläche der Kreissymbole ist proportional zur Anzahl Messungen pro Familiengartenareal. Die Kurve beschreibt die Umkehrfunktion der logit-Transformation (vgl. Fussnote 8).

In der praktischen Anwendung der optimierten Prognosemethode muss ein Schwellenwert für den „Belastungsindex“ festgelegt werden, bei dessen Überschreitung man damit rechnen muss, dass auf dem fraglichen Areal die jeweiligen Prüfwerte überschritten werden. Die Grösse der Schwellenwerte kann grob aus den Abbildungen 4 und 5 geschätzt werden. Um die Schwellenwerte besser einzugrenzen, wurde mit den Resultaten der Kreuzvalidierung geprüft, wie viele Areale in Abhängigkeit von der Wahl des Schwellenwerts richtig klassiert werden. Ein Familiengartenareal galt als richtig klassiert, wenn (1) der „Belastungsindex“ für das Areal kleiner als der Schwellenwert war und der Prüfwert von keinem Messwert überschritten wurde oder (2) der „Belastungsindex“ den Schwellenwert überschritt und auf dem Areal mindestens eine Prüfwertüberschreitung registriert worden war.

In Abbildung 6 ist der Anteil richtig klassierter Familiengartenareale in Abhängigkeit des Schwellenwerts dargestellt (nur für die optimierte Prognosemethode). Die gestrichelte Kurve beschreibt den Anteil richtig klassierter Areale ohne Prüfwertüberschreitungen, die gepunktete Linie den Anteil Areale mit nachgewiesenen Prüfwertüberschreitungen und die durchgezogene Linie deren Summe. Wenn ein sehr kleiner Schwellenwert gewählt wird, dann werden alle Areale mit nachgewiesenen Prüfwertüberschreitungen richtig klassiert und fast alle Areale ohne solche falsch eingereiht. Die Wahl eines sehr grossen Schwellenwerts hat den Effekt, dass nun Familiengartenareale ohne Prüfwertüberschreitungen richtig und solche ohne falsch klassiert werden. Um die Summe der richtig klassierten Areale zu maximieren, muss man einen Schwellenwert wählen, der etwas kleiner als Null ist.

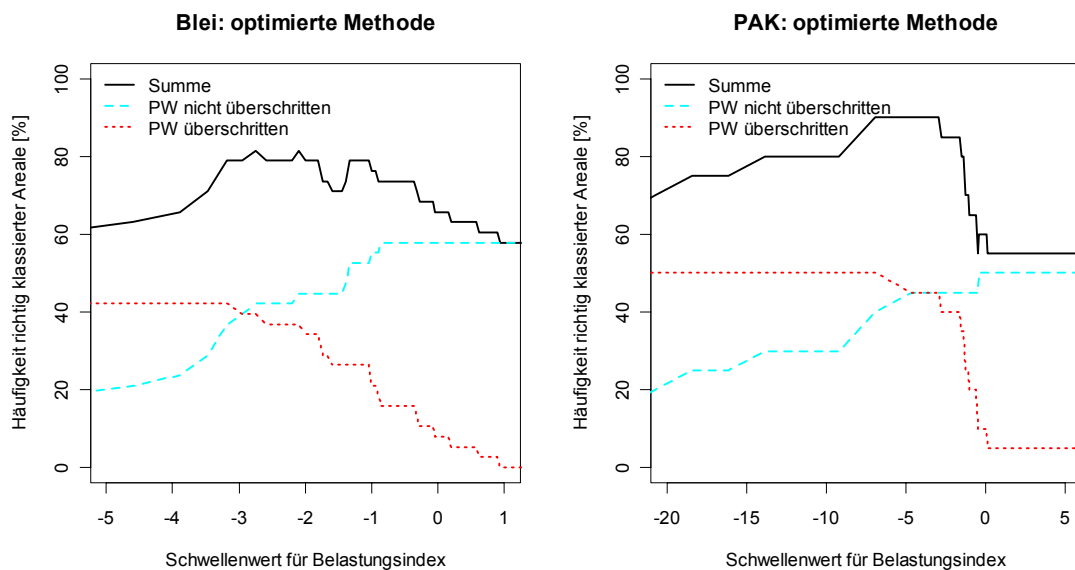


Abbildung 6. Anteil richtig klassierter Familiengartenareale in Abhängigkeit von der Wahl des Schwellenwerts für den „Belastungsindex“. Für weitere Erläuterungen, siehe Text.

Die Abbildung zeigt, dass bei Blei mit einem Schwellenwert im Bereich von -3 bis -2 (entspricht einer modellierten Häufigkeit von 5 % bis 12 % Prüfwertüberschreitungen) rund 80 % aller Areale und bei PAK mit einem Schwellenwert von -7 bis -3 (modellierte Häufigkeit: < 0.1 % bis 5 %) fast 90 % aller Areale richtig klassiert werden.

Um die Genauigkeit der Vorhersagen der optimierten und der Fallstudienmethode weiter zu vergleichen, wurden die beobachteten gegen die in der Kreuzvalidierungsanalyse vorhergesagten Häufigkeiten aufgetragen (Abbildungen 7 und 8) und (robuste) Schätzungen des Mittelwerts und der Streuung der Vorhersagefehler (= beobachtete - vorhergesagte Häufigkeit) berechnet (Tabelle 6).

Die optimierte Methode erlaubt für beide Schadstoffe genauere Vorhersagen für Areale, in welchen keine Überschreitung der Prüfwerte gemessen worden waren. Für Areale mit beobachteter Häufigkeit > 0 % wurde vor allem bei Blei (Abbildung 7), etwas weniger stark auch bei PAK (Abbildung 8), durch die Fallstudienmethode systematisch zu kleine Häufigkeiten vorhergesagt. Bei Blei war diese konditionale Verzerrung (Bias) tendenziell auch bei der optimierten Methode zu erkennen, dort aber deutlich schwächer ausgeprägt.

Tabelle 6. Robuste Statistiken der Kreuzvalidierungsvorhersagefehler der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitung bei Blei und PAK, berechnet mit der optimierten und der Fallstudienmethode (MAD: 1.48 * Median der absoluten Vorhersagefehler).

Schadstoff	Methode	Median	MAD
Blei	Fallstudie	-0.088	0.226
	optimiert	-0.006	0.123
PAK	Fallstudie	-0.054	0.157
	optimiert	0.000	0.048

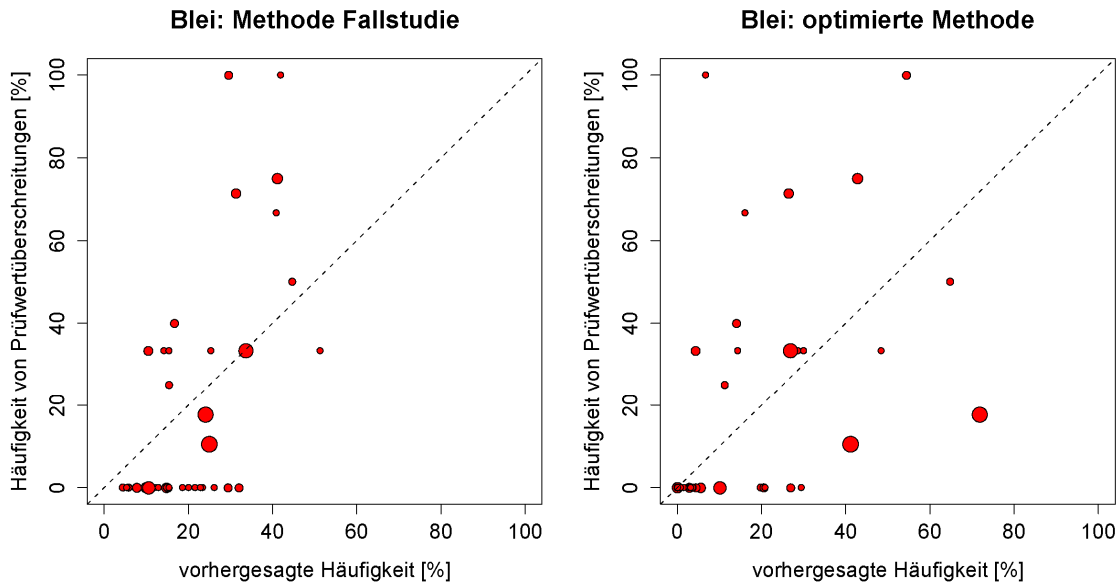


Abbildung 7. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für Blei pro Familiengartenareal, aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage dieser Häufigkeit, berechnet nach der Fallstudien- (links) und der optimierten Methode (rechts). Die 9 Familiengartenareale, die in der Fallstudie zur Kalibrierung der „Indikatorpunktzahl“ verwendet worden waren, wurden nicht dargestellt. Die Fläche der Kreissymbole ist proportional zur Anzahl Messungen pro Familiengartenareal.

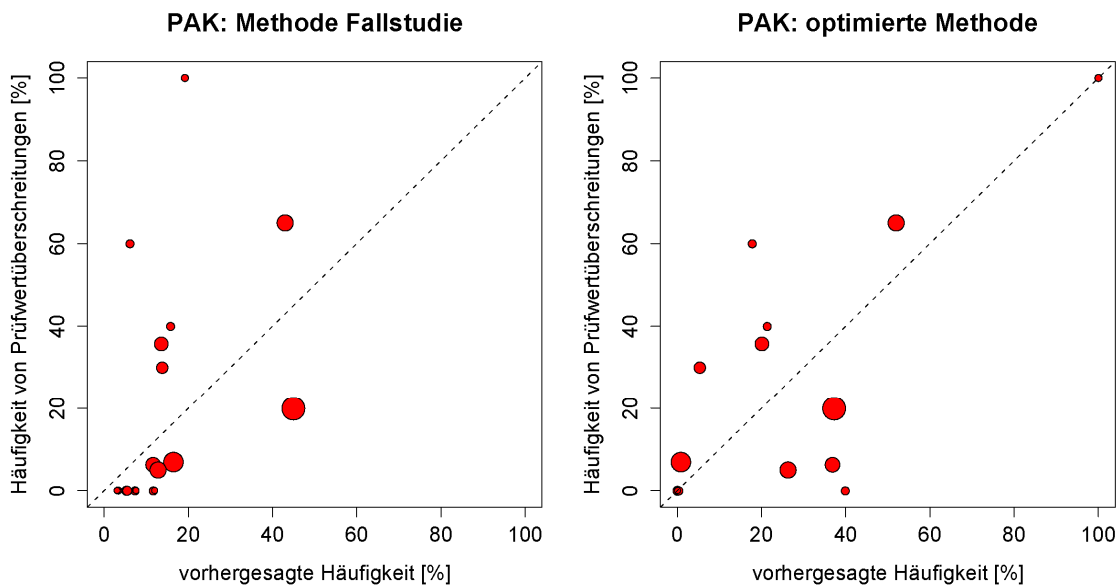


Abbildung 8. Beobachtete Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen für PAK pro Familiengartenareal, aufgetragen gegen die Kreuzvalidierungsvorhersage dieser Häufigkeit, berechnet nach der Fallstudien- (links) und der optimierten Methode (rechts). Die Fläche der Kreissymbole ist proportional zur Anzahl Messungen pro Familiengartenareal.

Obwohl v.a. für Pb die Vorhersagefehler der optimierten Methode für einzelne Familiengartenareale grösser waren, ergab diese Methode im Mittel die genaueren Vorhersagen als die Fallstudienmethode. Sowohl der Median der Fehler (robuste Lageschätzung) wie auch der MAD (robuste Schätzung der zufälligen Streuung der Vorhersagefehler) waren bei der optimierten Methode betragsmässig kleiner als bei der Fallstudienmethode. Die Resultate der Kreuzvalidierungsanalyse zeigen somit in konsistenter Weise, dass durch die Optimierung der Gewichtungsfaktoren der Merkmale via logistische Regression genauere Prognosen der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen berechnet werden können.

4. Ausblick

Mit dieser Studie haben wir die Prognosemethode der Fallstudie, die in ihrer ursprünglichen Form die grobe Vorhersage einer unspezifischen Belastung der Böden in Familiengartenarealen erlaubte, zu einem einfach anzuwendenden, praxistauglichen Werkzeug weiterentwickelt. Mit der optimierten Prognosemethode kann gezielt vorhergesagt werden, ob in einem bestimmten Familiengartenareal damit zu rechnen ist, dass die Blei- und die PAK-Konzentration die Prüfwerte der VBBo überschreiten. Die Merkmale, die zur Prognose der Bodenbelastung benötigt werden, sollten im Allgemeinen ohne spezialisiertes Fachwissen zu erheben sein. Wir haben eine Anleitung verfasst, die beschreibt, wie die Merkmale zu beurteilen sind und wie die Excel-Tabellen, mit welchen der „Belastungsindex“ und die Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen berechnet werden, benutzt werden müssen. Die Recherchen, welche zur Erhebung der Merkmale notwendig sind, verursachen zwar einigen Aufwand, die damit verbundenen Kosten sind aber wesentlich kleiner als die Kosten für die Entnahme von Bodenproben und für deren chemische Analyse. Die relativ aufwendigen Bodenuntersuchungen können damit auf diejenigen Familiengartenareale beschränkt werden, für die Prüfwertüberschreitungen mit einiger Sicherheit prognostiziert werden.

Streng genommen kann mit der optimierten Prognosemethode nur vorhergesagt werden, wie häufig in einem Familiengartenareal damit zu rechnen ist, dass die Pb-Totalgehalte im Oberboden den Prüfwert für den Nahrungspflanzenanbau bzw. die PAK-Totalgehalte den Prüfwert für die direkte Bodenaufnahme überschreiten. Bei der Sichtung der Datensätze, die über chemische Belastung von Böden in Familiengärten aus der Schweiz vorliegen, hat sich aber gezeigt, dass bei einer kritischen Würdigung der Prüfwerte, welche das *Handbuch Gefährdungsabschätzung* nennt, Blei als Leitelement für die unspezifische, anthropogen verursachte Verschmutzung von Familiengartenböden durch Schwermetalle gelten kann. Als Leitsubstanz für die organischen Schadstoffe haben wir den PAK-Totalgehalt gewählt. Es ist schwieriger abzuschätzen, wie repräsentativ diese Leitsubstanz für die Gruppe der organischen Schadstoffe ist. Diese wurden generell viel weniger häufig gemessen als die Schwermetalle, doch wenn etwas gemessen wurde, dann

zumeist PAK-Verbindungen. Die Gehalte an Chlorpestiziden, PCB, Dioxinen und Furanen wurden nur in Ausnahmefällen bestimmt. Die Untersuchungen von Papritz (2003) in zwei relativ stark belasteten Familiengartenarealen in der Stadt Zürich haben gezeigt, dass die PAK- im Vergleich zu den Chlorpestizidgehalten, relativ zu den jeweiligen Prüfwerten, gross sind. Somit gibt es vorderhand keinen Anlass, die Wahl von PAK als Leitschadstoff für die organischen Verbindungen in Frage zu stellen.

Eine Erweiterung der optimierten Methode zur Vorhersage von Prüfwertüberschreitungen durch andere Schadstoffe ist problemlos möglich, vorausgesetzt, dass genügend Daten über den gewünschten Schadstoff verfügbar sind. Aktuell ist das für den Cu-, Cd- und Zn-Totalgehalt der Fall, wobei die Frage im Raum stehen bleibt, ob für Cu und Zn überhaupt aussagekräftige Prüfwerte für die in Familiengärten vorherrschenden Nutzungen definiert sind.

Die durchgeführte Kreuzvalidierungsanalyse hat aufgezeigt, dass das Auftreten von Prüfwertüberschreitungen durch Pb und PAK mit recht guter Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Rund 80-90 % der Familiengartenareale wurden richtig klassiert, wenn Areale mit „Belastungsindex“ ≤ -3 der Gruppe ohne und Areale mit „Belastungsindex“ > -3 der Gruppe mit nachgewiesenen Prüfwertüberschreitungen zugeordnet wurden. Dem verwendeten Schwellenwert von -3 entspricht eine vorhergesagte Häufigkeit von 5 % Prüfwertüberschreitungen pro Familiengartenareal. Untersucht man weiter die Güte der quantitativen Vorhersage der Häufigkeit von Prüfwertüberschreitungen (und nicht nur, ob solche überhaupt auftreten), dann wird deutlich, dass die optimierte Methode die Häufigkeit ohne systematische Unter- oder Überschätzung vorhersagt. In Einzelfällen sind aber grosse Fehler bei der Vorhersage möglich (vgl. Abbildungen 7 und 8).

Mit der Kreuzvalidierungsanalyse konnten also gewisse Einblicke in die Genauigkeit der Prognosemethode gewonnen werden. Wir konnten zeigen, dass sich durch die statistische Optimierung der Gewichtungsfaktoren der Merkmale die Genauigkeit der Vorhersage im Vergleich zur Fallstudienmethode verbessern liess. Eine Kreuzvalidierungsanalyse hat aber eine geringere Aussagekraft als die Überprüfung mit unabhängigen Daten. Deshalb schlagen wir vor, dass Messdaten über Schadstoffgehalte, die in Zukunft bei Bodenuntersuchungen in Familiengartenarealen erhoben werden, zwecks Überprüfung und allfälliger Verbesserung der entwickelten Prognosemethode bei der Fach-

stelle Bodenschutz, Kanton Zürich gesammelt werden. Für zukünftige statistische Analysen werden minimal Angaben über die Anzahl beprobter Parzellen pro Familiengartenareal, die Anzahl Bodenproben, deren Gehalte, die die diversen Prüfwerte überschreiten und die für die Areale bestimmten Werte der Merkmale benötigt. Mit diesen Daten könnte zu gegebener Zeit sowohl die Genauigkeit der vorgeschlagenen Methode wie auch die Struktur der logistischen Regressionsmodelle, die ja unter Verwendung aller aktuell verfügbarer Daten bestimmt worden sind, überprüft werden.

5. Literatur

- BUWAL (2001). Wegleitung Verwertung von ausgehobenem Boden. Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL (2005). Handbuch. Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden. Gefährdungsabschätzung Boden. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Christl, I., Gulz, P., Kretzschmar, R. und Schulin, R. (2004). Umgang mit Bodenbelastungen in Familiengärten der Stadt Zürich. Abschlussbericht der Fallstudie des Departements Umweltnaturwissenschaften, Wintersemester 2003/04, Institut für terrestrische Ökologie, ETH Zürich, Schlieren.
- Dobson, A. J. (2002). An Introduction to Generalized Linear Models. 2. Auflage. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton.
- Jenka, B., Pozzi, A., Holzer, B., Kolb, R. und Savary, C. (1992). Bodenuntersuchungen Zürich-Nord. Gesundheits- und Wirtschaftsamt der Stadt Zürich, Abteilung Abfuhrwesen, Zürich.
- Jenka, B., Pozzi, A., Veronesi, K. und Obrist, J. (1994). Boden- und Pflanzenuntersuchungen in Familiengärten der Stadt Zürich. Bericht, Fachstelle Bodenschutz, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Kanton Zürich.
- Kayser, A., Presler, J. Meuli, R. und Kägi, J. (2006). Bodenbelastungsgebiet Dornach (Gemeinden Dornach, Aesch, Arlesheim, Reinach) Zusatzuntersuchungen (Projekt P3), Synthesebericht. Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Solothurn.
- Papritz, A. (2003). Schadstoffbelastung der Böden auf den Familiengartenarealen Pfingstweid und Vulkan in der Stadt Zürich. Bericht, Institut für terrestrische Ökologie, ETH Zürich, Schlieren.
- Schönbächler, D. (1996). Schwermetallbelastungen von Garten- und Landwirtschaftsböden in der Stadt St.Gallen. Bericht, Fachstelle Bodenschutz, Amt für Umweltschutz, Kanton St.Gallen.
- VBBö (1998). Verordnung vom 1. Juli über Belastungen des Bodens. SR 814.12.

6. Anhang

Anhang 1

Liste der 42 ausgewählten Familiengartenareale und der darin gewonnenen 256 Bodenproben (bei 44 Proben PAK, aber kein Pb bestimmt).

Anhang 1 - Teil 1

Angaben zu den Arealen				gemessene Schadstoffe								
Gemeindegrund der Areale	Kanton	Areal	Anzahl Bodenproben	Schwermetalle							organisch	
				Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	PAK	B(a)P
Bern	Bern (BE)	1	5	x	x		x		x	x		
		2	4	x	x	z.T.	x	z.T.	x	x	z.T.	z.T.
		3	5	x	x		x		x	x		
Genf	Genf (GE)	1	4	x			x			x		
Chur	Chur (GR)	1	10		x	x					x	x
St.Gallen	St.Gallen (SG)	1	3	x	x		x		x	x		
		2	3	x	x		x		x	x		
		3	3	x	x		x		x	x		
		4	3	x	x		x		x	x		
		5	3	x	x		x		x	x		
		6	3	x	x		x		x	x		
Neuhausen	Schaffhausen (SH)	1	3	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	4	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Schaffhausen	Schaffhausen (SH)	1	3	x	x	x	x	x	x	x		
		2	4	x	x	x	x	x	x	x		
Zuchwil	Solothurn (SO)	1	3	x	x		x		x	x	x	
Arbon	Thurgau (TG)	1	3	x	x	z.T.	x	z.T.	z.T.	x	z.T.	z.T.
Bischofszell	Thurgau (TG)	1	3	x	x	x	x	x	x	x	z.T.	z.T.
Frauenfeld	Thurgau (TG)	1	3	x	x	x	x	x	x	x	z.T.	z.T.
		2	8	x	x	z.T.	x	z.T.	x	x	z.T.	z.T.
Romanshorn	Thurgau (TG)	1	4	x	x	x	x	x	x	x	z.T.	z.T.
Lausanne	Waadt (VD)	1	3	x	x		x			x		
	Waadt (VD)	2	4	x	x		x			x		
	Waadt (VD)	3	3	x	x	x	x	x		x		
Zug	Zug (ZG)	1	19	x	z.T.		x		z.T.	x	z.T.	z.T.
Winterthur	Zürich (ZH)	1	5	x	x	x	x	x	x	x		
	Zürich (ZH)	2	3	x	x	x	x	x	x	x		
Rüti	Zürich (ZH)	1	6	x	x	x	x	x	z.T.	x		
Rüschlikon	Zürich (ZH)	1	3	x	x	x	x	x	x	x		
Otelfingen	Zürich (ZH)	1	3	x	x	x	x	x	x	x		
Opfikon	Zürich (ZH)	1	6	x	z.T.		z.T.		z.T.	z.T.	z.T.	
Buchs	Zürich (ZH)	1	7	x	x	x	x	x	x	x	z.T.	z.T.
	Zürich (ZH)	2	8	x	x	x	x	x	x	x	z.T.	z.T.
Zürich	Zürich (ZH)	1	36	x	x		x		x	x	x	x
	Zürich (ZH)	2	15	x	x		x		x	x	x	
	Zürich (ZH)	3	5	x								
	Zürich (ZH)	4	12	x	x		x		z.T.	x	z.T.	
	Zürich (ZH)	5	4	x	x		x			x	x	x
	Zürich (ZH)	6	5	x	x		x			x	x	x
	Zürich (ZH)	7	5								x	x
	Zürich (ZH)	8	3	x	x		x			x	x	
	Zürich (ZH)	9	17	x	z.T.		z.T.		z.T.	z.T.	z.T.	z.T.

Qualitative Abschätzung der Bodenbelastung in Kleingärten

Anhang 1 - Teil 2

Angaben zu den Arealen				Beurteilung der Merkmale								Datenquelle					
Gemeindegrund der Areale	Kanton	Areal	Anzahl Bodenproben	Alter				Vornutzung			FM		Umgebung				
				vor 1930	1930 - 1955	1956 - 1980	1981 - heute	Garten	Rebberg	Weide	Landwirtschaft	Aufschüttung	Fremdmaterial	Altlast	Strasse		
Bern	Bern (BE)	1	5	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Abteilung Stoffe und Bodenschutz (BE)	
		2	4	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1		
		3	5	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1		
Genf	Genf (GE)	1	4	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	Service cantonale de géologie (GE)	
Chur	Chur (GR)	1	10	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	Amt für Natur und Umwelt Graubünden, Abteilung Ökologie (Bodenschutz) (GR)	
St.Gallen	St.Gallen (SG)	1	3	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, Abteilung Umweltressourcen, Fachbereich Boden (SG)	
		2	3	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0		
		3	3	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0		1
		4	3	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		1
		5	3	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0		0
Neuhausen	Schaffhausen (SH)	1	3	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	Amt für Lebensmittelkontrolle und Umweltschutz, Fachbereiche Stoffe, Boden, Abfälle (SH)	
		2	4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
Schaffhausen	Schaffhausen (SH)	1	3	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Fachstelle Bodenschutz (SO)	
2	4	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0			
Zuchwil	Solothurn (SO)	1	3	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1		
Arbon	Thurgau (TG)	1	3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	Amt für Umwelt des Kantons Thurgau, Abteilung Abfall und Boden, Bodenschutzfachstelle (TG)	
Bischofszell	Thurgau (TG)	1	3	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1		
Frauenfeld	Thurgau (TG)	1	3	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1		
Romanshorn	Thurgau (TG)	1	4														
		2	8	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1		
Lausanne	Vaud (VD)	1	3	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	Service des eaux, sols et assainissement, Section sols (VD)	
		2	4	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1		
		3	3	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0		
Zug	Zug (ZG)	1	19	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	Amt für Umwelt und Energie, Stadtökologie (ZG)	
Winterthur	Zürich (ZH)	1	5	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	Amt für Landschaft und Natur, Fachstelle Bodenschutz (ZH)	
	Zürich (ZH)	2	3	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1		
Rüti	Zürich (ZH)	1	6	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1		
Rüschlikon	Zürich (ZH)	1	3	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1		
Otelfingen	Zürich (ZH)	1	3														
Opfikon	Zürich (ZH)	1	6	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1		
Buchs	Zürich (ZH)	1	7	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0		
	Zürich (ZH)	2	8	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0		
Zürich	Zürich (ZH)	1	36	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1		
	Zürich (ZH)	2	15	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0		
	Zürich (ZH)	3	5	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1		
	Zürich (ZH)	4	12	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1		
	Zürich (ZH)	5	4	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1		
	Zürich (ZH)	6	5	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1		
	Zürich (ZH)	7	5	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1		
Zürich (ZH)	8	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1			
Zürich (ZH)	9	17	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1			