



Auftraggeber

Stadt Wuppertal
Reinhard Gierse

Auftragnehmer

Institut für Umwelt-Analyse
Petra Günther
Monika Machtolf

Inhaltsverzeichnis

1.	Veranlassung und Zielsetzung _____	1
2.	Vorarbeiten _____	2
3.	Material und Methoden _____	4
3.1.	Untersuchungskonzept _____	4
3.2.	Ermittlung der Stichprobe zur Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit _____	5
4.	Ergebnisse _____	6
4.1.	Nutzungskartierung _____	6
4.2.	Schadstoffgehalte (Gesamt) _____	6
4.3.	Phosphorgehalte _____	9
4.4.	Pflanzenverfügbares Blei und Cadmium _____	9
4.5.	Resorptionsverfügbarkeit _____	9
4.6.	Datenqualität _____	14
4.7.	Parzellenscharfe Bewertung _____	15
5.	Diskussion und Ausblick _____	17

1. Veranlassung und Zielsetzung

Als Ergebnis umfassender Bodenuntersuchungen in einer Vielzahl von Kleingartenanlagen konnten in der Vergangenheit parzellenscharfe Einschätzungen zur Gefahrensituation vorgenommen werden. Für einige Parzellen wurde der Bedarf an Maßnahmen zur Gefahrenabwehr (z. B. Anbaubeschränkungen oder pH-Wert-Einstellungen) notwendig. Die Stadt Wuppertal wollte darüber hinaus weitere Möglichkeiten erproben, die im Sinne von Sicherungsmaßnahmen auf eine dauerhafte Verringerung der Schadstoffmobilität abzielen.

Hierzu wurde das Forschungsvorhaben "Maßnahmen zur Gefahrenabwehr bei großflächigen schädlichen Bodenveränderungen (SBV) insbesondere unter gärtnerischer Nutzung" im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV) unter der Projektleitung von Herrn Prof. Dr. Bernd Marschner (unter Beteiligung des Landesamtes für Natur, Umwelt- und Verbraucherschutz NRW) im Zeitraum von 01.10.2003 – 31.12.2008 durchgeführt. Ziel des Forschungsvorhabens (nachfolgend kurz "Feldstudie") war es, Methoden für eine nachhaltige, ökologische und ökonomische Gefahrenabwehr zu entwickeln und zu erproben. Hierzu wurde an den bisherigen Forschungsstand anknüpfend das bereits nach Laborversuchen positiv bewertete Verfahren der Schwermetallimmobilisierung durch Bodenzusatzstoffe weiter untersucht bzw. unter praxisnahen Bedingungen im Freiland auf seine Eignung getestet. Als Versuchsflächen wurden vier verschiedene Kleingartenanlagen mit unterschiedlich hohen Konzentrationen der Schwermetalle Cadmium, Blei und Zink sowie des Halbmetalls Arsen ausgewählt.

Im Ergebnis der Versuche wurde für Blei die Resorptionsverfügbarkeit in Feldversuchen durch Phosphat in Kombination mit Wasserwerksschlamm gesenkt. Dies wurde insbesondere für die mit Blei vergleichsweise hoch belastete Anlage Varresbeck beobachtet. Es konnte abgeleitet werden, dass im Vergleich der geprüften Methoden eine spezielle, auch in kommerziellen Düngern verwendete Phosphatverbindung in Kombination mit einer Kalkung die besten Erfolge in Bezug auf eine Mobilitätsminderung erzielen kann.

Zur praktischen Erprobung wurden daraufhin einige belastete Kleingärten ausgewählt, denen in den Jahren 2008/10 von der Stadt Wuppertal Phosphat in Form von so genanntem Triplesuperphosphat (TSP)¹ sowie Kalk in entsprechenden Mengen zur Verfügung gestellt wurde. Das Material sollte von den jeweiligen Pächtern nach Dosierungsangaben der Stadt Wuppertal in Abhängigkeit von der Nutzung in den Boden eingearbeitet werden.

Nach 7/8 Jahren stellte sich die Frage nach der Wirksamkeit dieser Maßnahme. Mit Unterstützung des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) in NRW und der Bezirksregierung Düsseldorf sollten daher gezielt Untersuchungen durchgeführt werden, um zu überprüfen, wie gut die Schwermetalle auch aktuell noch im Boden gebunden sind.

¹ Tripelphosphat (Ammoniummagnesiumphosphat - $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) findet als hoch dosierter, wasserlöslicher Dünger in granulierter Form Anwendung

2. Vorarbeiten

Ausgangslage

Für die Durchführung der Erfolgskontrolle von Immobilisierungsmaßnahmen wurden die beiden Kleingartenanlagen Varresbeck und Lüntenbeck ausgewählt. Zur Immobilisierung der festgestellten Blei-, Cadmium-, aber auch Arsengehalte im Boden wurden im Jahre 2008 in der Anlage Varresbeck insgesamt 9,5 t Triplesuperphosphat (TSP) und 5,0 t kohlensaurer Kalk verteilt. In den Gärten der Kleingartenanlage Lüntenbeck waren im Jahre 2010 insgesamt 14,4 t TSP und 7,2 t kohlensaurer Kalk auszubringen. Zu Beginn der Untersuchungen lagen keine exakten Informationen zu Art und Umfang des tatsächlich erfolgten Einbringens von TSP und Kalk in die Böden der Gärten vor, so dass hierzu einige Vorarbeiten erforderlich wurden.

Information der Kleingärtner

Um die Kleingärtner am Vorgehen zu beteiligen, wurde eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die sich aus Vertretern der Stadt Wuppertal, der Vorsitzenden der Kleingartenanlagen Varresbeck und Lüntenbeck, Vertretern des Stadtverbandes Wuppertal der Gartenfreunde sowie der IFUA-Projekt-GmbH zusammensetzte. Flankiert wurde diese Arbeitsgruppe durch eine fachliche Projektbegleitung, die sich aus Vertretern der Stadt Wuppertal, des LANUV sowie der Bezirksregierung Düsseldorf und der IFUA-Projekt-GmbH zusammensetzte. Insgesamt fanden mehrere Arbeitstreffen statt, die den Fortschritt der Untersuchungen begleitete. Zur Information aller Kleingärtner wurde darüber hinaus Informationsabende am 29.04.2016 und am 01.06.2017 in der Kleingartenanlage Lüntenbeck veranstaltet. Im Rahmen der Informationsveranstaltungen wurden die Hintergründe und das Vorgehen bei den Untersuchungen erörtert und im zweiten Termin auch die Ergebnisse kommuniziert.

Befragung der Kleingärtner

Aus den aktuellen Pächterdaten der Kleingartenvereine bestätigte sich, dass seit 2008 ein erheblicher Pächterwechsel auf den betroffenen Parzellen stattgefunden hat (62%), so dass heute für diese Parzellen in der Regel Informationen über das damalige Vorgehen schwer zu recherchieren waren. Einen zusammenfassenden Überblick gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Informationen zur TSP-Ausbringung

	Varresbeck	Lüntenbeck	Summe
Anzahl berücksichtigter Parzellen	31	55	86
Ausbringung durch Unterschrift 2008 bestätigt	25	-	25
Pächterwechsel seit 2008	19 (61%)	34 (62%)	53 (62%)
Gespräche mit Pächter erfolgt (2016)	14	24	38
TSP-Ausbringung in Gespräch (2016) bestätigt	6	15	21
Verwendung von Dünger angegeben	4	16	20

Bodenkundliche Aspekte

Blei kommt in der Natur hauptsächlich in Form verschiedener anorganischer Verbindungen in der Oxidationsstufe +II vor und bildet mit Phosphaten im Boden schwerlösliche Bleiphosphate. Einige Vorüberlegungen zur Wirkung von Phosphaten auf die Mobilisierbarkeit von Blei im Boden wurden im Forschungsvorhaben der Universität Bochum zur Immobilisierung von Schadstoffen im Boden

skizziert. In Untersuchungen im künstlichen Magen-Darm-Modell zeigte beispielsweise die Zugabe von TSP ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) eine Verringerung des verfügbaren Anteils von Blei in hochbelasteten Böden.

Grundsätzlich wirkt Phosphat stark versauernd und die Absenkung des pH-Wertes bewirkt die Freisetzung von schwach sorbierten Schwermetallen. D.h. werden diese mobilisierten Metalle nicht unmittelbar durch das Phosphat gebunden, können diese im Boden pflanzenverfügbar oder resorptionsverfügbar sein.

Arsen gehört zu den Halbmetallen und kann in Form dreiwertiger Arsenite oder fünfwertiger Arsenate auftreten, die unter Umweltbedingungen in einem pH-abhängigen Redoxgleichgewicht stehen. Entsprechende Umwandlungen der verschiedenen Oxidationsstufen können auch im Organismus ablaufen. Im Forschungsvorhaben der Universität Bochum wird die Wirksamkeit der Immobilisierung bei Arsenbelastungen in Frage gestellt. Möglicherweise ist die Löslichkeit der anionischen As-Komplexe durch die Konkurrenz mit dem Phosphat um kationische Bindungspartner im Boden erhöht. In Gefäßversuchen wurde nach Zugabe von Phosphat eine Zunahme des Arsens im Gras (*Tripsacum dactyloides*) nachgewiesen. Andererseits gibt es bislang keine Erfahrungen hinsichtlich der Auswirkung von TSP auf die Resorptionsverfügbarkeit von Arsenat (AsO_4^{3-}) im Boden. Zwar ist nicht anzunehmen, dass diese mit TSP schwer lösliche Metallphosphate bilden. Andererseits kann jedoch lösliches Arsenat unter reduzierenden Verhältnissen in der Darmstufe als As^{3+} mit gleichzeitig anwesenden Phosphaten gefällt, und damit dem Prozess der Resorptionsverfügbarkeit wieder entzogen werden.

Aus diesen Vorüberlegungen resultiert die Annahme, dass durch die Immobilisierungsmaßnahmen sowohl die pflanzenverfügbaren als auch die resorptionsverfügbaren Bleigehalte, und ggf. auch die Arsengehalte in den Kleingärten vermindert wurden.

3. Material und Methoden

3.1. Untersuchungskonzept

Im ersten Schritt sollte die aktuelle Nutzung mit der Nutzungskartierung in 2008 verglichen und der Probennahmeplan ggf. angepasst werden. In der Kleingartenanlage Varresbeck/Lüntenbeck konnten für 32/55 Gärten die Aufbringung von TSP angenommen werden. Im Zuge der Geländearbeiten waren somit insgesamt 87 Gärten zu betrachten.

Geländearbeiten und Bodenmischproben

Die Probennahme auf den ausgewählten Parzellen der Kleingartenanlagen Varresbeck und Lüntenbeck erfolgte im Zeitraum von 10.06.-30.06.2016 durch die IFUA-Projekt-GmbH von fachkundigem Personal gemäß dem Untersuchungskonzept vom 15.03.2016². Nachfolgend sind die vorliegenden Daten der beprobten und untersuchten Parzellen im Überblick dargestellt:

Tabelle 2: Übersicht der beprobten Parzellen und Proben

	Varresbeck	Lüntenbeck	Summe
Anzahl beprobter Parzellen	31 ¹	55	86 ¹
Anzahl Proben, Rasen (0-0,05m)	29	55	84
Anzahl Proben, Rasen (0,5-0,1 m)	30	55	85
Anzahl Proben, Rasen(0-0,1 m)	31	57	88
Anzahl Proben, Nutz- Zierbeet (0-0,3 m)	31	56	87
Rückstellproben ²	3	12	15

1) Eine Parzelle in Varresbeck war nicht zugänglich und konnte daher nicht beprobt werden

2) Rückstellproben wurden entnommen, wenn z.B. deutliche Nutzungsänderungen (Hochbeete, etc.) zu erkennen waren.

Es wurden je Parzelle Mischproben aus den Teilflächen Rasen sowie Nutz-/ und Zierbeete entnommen. Für die Rasenbereiche wurden Proben der Tiefe 0-0,05 m sowie 0,05-0,1 m entnommen und jeweils der Phosphorgehalt laboranalytisch bestimmt. Aus den beiden Proben wurde im Feld eine dritte Probe durch Mischung (0-0,1 m) erstellt, in der die Parameter pH-Wert, Arsen, Blei, Cadmium, PAK sowie Blei und Cadmium im Ammoniumnitratextrakt bestimmt wurden.

Letzteres Untersuchungsprogramm fand auch bei den Proben der Nutz-/ Ziergarten-Teilflächen Anwendung. Hier wurde allerdings als Probennahmetiefe 0-0,3 m gewählt. Ergänzend sei allerdings angemerkt, dass im Vergleich dazu die Probennahme im Einzelfall in den Jahren 2003/4 orientierend am angetroffenen Schichtwechsel von der vorgegebenen Probenahmetiefe zum Teil abwich.

Ablauf der Untersuchungen

Die Analytik sollte mehrstufig gemäß dem Untersuchungsablauf nach BBodSchV erfolgen. Der Untersuchungsumfang der ersten Stufe (OU) ist in der Tabelle 3 dargestellt. Demnach waren neben den pH-Werten und den Konzentrationen an Gesamt-Phosphor zunächst die Gesamtgehalte der Schadstoffe Arsen, Blei, Cadmium und PAK sowie die pflanzenverfügbaren Konzentrationen an Blei und Cadmium zu ermitteln. Nach Vorlage dieser Daten sollte nach einer Plausibilitätsprüfung der weitere Untersuchungsumfang zeitnah festgelegt und die Proben für die Bestimmung der resorptionsverfügbaren Gehalte nach DIN 19738:2004 ausgewählt werden (s. 3.2).

² IFUA (2016): Erfolgskontrolle von Immobilisierungsmaßnahmen in den Kleingartenanlagen Lüntenbeck und Varresbeck in Wuppertal Untersuchungskonzept – vom 15.03.2016

Tabelle 3: Übersicht der entnommenen und untersuchten Proben (orientierende Untersuchung)

Anzahl	Varresbeck	Lüntenbeck	Summe
Proben	121	223	344
Analytik pH und Gesamtgehalte As, Pb, Cd, PAK	62	113	175
Analytik Pflanzenverfügbarkeit (AN) Pb, Cd	62	113	175
Analytik Phosphor	91	168	259

3.2. Ermittlung der Stichprobe zur Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit

Auswahl der Parzellen

Insgesamt sollte die Auswahl der Parzellen so erfolgen, dass für alle Kriterien eine ausreichende Bandbreite gegeben ist und eine ausreichende Anzahl von Daten ermittelt wird. Die Auswahl der Stichprobe soll in erster Linie helfen, die Methode zur Immobilisierung der nachgewiesenen Schadstoffe im Boden zu überprüfen. Darüber wurden die sechs Parzellen, für die bereits aus der Feldstudie 2003/2008 Daten vorliegen, ebenfalls berücksichtigt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass auf allen beprobten 86 Parzellen TSP in den Jahren 2008/2010 gemäß den Vorgaben der Stadt Wuppertal ausgebracht wurde.

Probenauswahl

Die Auswahl der Proben erfolgte nach Sichtung der vorhandenen Daten. Die ausgewählten Proben sollen zum einen das Wertespektrum der Schadstoffe, aber auch der erhobenen Phosphorgehalte abbilden. Zum anderen sollten die Proben aus den beiden Nutzungskategorien "Rasen" und "Nutz-/Zierbeete" einigermaßen gleich verteilt sein. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die ausgewählte Probe den ehemals ermittelten Schadstoffgehalt widerspiegelt. Es wurden für die 43 in Betracht gezogenen Parzellen zunächst 43 Proben ausgewählt, davon 25 Proben aus Nutz-/Ziergarten und 18 Proben aus Rasenflächen. Für zwei Parzellen (6/17 und 7/56) wurde neben der Rasenprobe auch die Nutz-/Ziergartenprobe ausgewählt, da auf diesen Parzellen die gemessenen Phosphorgehalte auffallend voneinander abweichen.

Parameterauswahl

Die Auswahl der zu untersuchenden Parameter erfolgte anhand der je Parzelle vorhandenen Daten zur Resorptionsverfügbarkeit (RV), so dass sich folgender Parameterumfang ergab:

Tabelle 4: Übersicht der zu untersuchenden Parameter (RV)

Parameter	Anzahl Proben	Anzahl Proben optional	Bemerkung
Arsen (RV)	30	32	+2 Proben durch Bestimmung der Rasen- und Nutz-/Ziergartenproben
Blei (RV)	43	45	+2 Proben durch Bestimmung der Rasen- und Nutz-/Ziergartenproben
Cd (RV)	-	6	+6 Proben zur Bestimmung von Cd auf ehemaligen Versuchsflächen F+E
BaP (RV)	11	13	+1 Probe durch Bestimmung der Rasen- und Nutz-/Ziergartenproben +1 Probe zur Überprüfung der PAK

Es wurde jeweils die Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 18738 durch Doppelbestimmungen unter Verwendung von Milchpulver in der Fraktion <2 mm bestimmt. Zur Absicherung der Untersuchungsmethode wurden mindestens in fünf Proben Sedimentuntersuchungen zur Bestimmung der Wiederfindungsrate durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1. Nutzungskartierung

Im Zuge der Probennahme wurde auf der Grundlage der bereits vorliegenden Nutzungskartierung (2008) die aktuelle Nutzung der Parzellen vor Ort erfasst und skizziert. Die dokumentierten Nutzungsänderungen wurden anschließend im GIS quantifiziert und für weitere Betrachtungen zur Expositionsabschätzung tabellarisch erfasst. Im Ergebnis zeigte sich, dass seit 2003/4 in nahezu jedem Garten (95%) Änderungen der Nutzung vorgenommen wurden, in 13 Gärten wurden Hochbeete angelegt, insgesamt wurde im Mittel tendenziell mehr Rasen angelegt, zu Lasten der Zierflächen.

4.2. Schadstoffgehalte (Gesamt)

Die Auswertung der vorliegenden Daten für die untersuchten Parzellen hat Überschreitungen der Beurteilungswerte ergeben, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind. Für Blei wurde der Prüfwert für Kinderspielflächen auf allen untersuchten Parzellen überschritten, auf 82 von 86 untersuchten Parzellen auch der Wuppertaler Beurteilungswert für Nutz- und Ziergärten. Die Arsengehalte liegen auf 77 von 86 untersuchten Parzellen über dem Prüfwert für Kinderspielflächen, auf 55 Parzellen auch über dem Wuppertaler Beurteilungswert für Nutz- und Ziergarten. Cadmium und BaP zeigen im Vergleich dazu eine geringere Relevanz.

Tabelle 3: Überschreitungen der Beurteilungswerte

		Arsen	Blei	Cadmium	Benzo(a)pyren
		Wuppertaler Beurteilungswerte für Nutz- und Ziergärten ³ (in mg/kg)			
		50	360	3	3
Proben (n)	175	25	164	26	34
Parzellen (n)	86	18	82	20	27
Parzellen (V-06) (n)	31	3	28	4	4
Parzellen (L-07) (n)	55	15	54	16	23

³ Vgl. BARKOWSKI, B.; GIERSE, R.; MACHTOLF, M., RAECKE, F. (2005): Beurteilung von Bodenbelastungen in Wuppertaler Kleingartenanlagen. Altlasten Spektrum, Heft 1, S. 36-44

Die 2016 erhobenen Metall- und BaP-Gehalte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den ursprünglich ermittelten Daten (vgl. Tabelle 6).

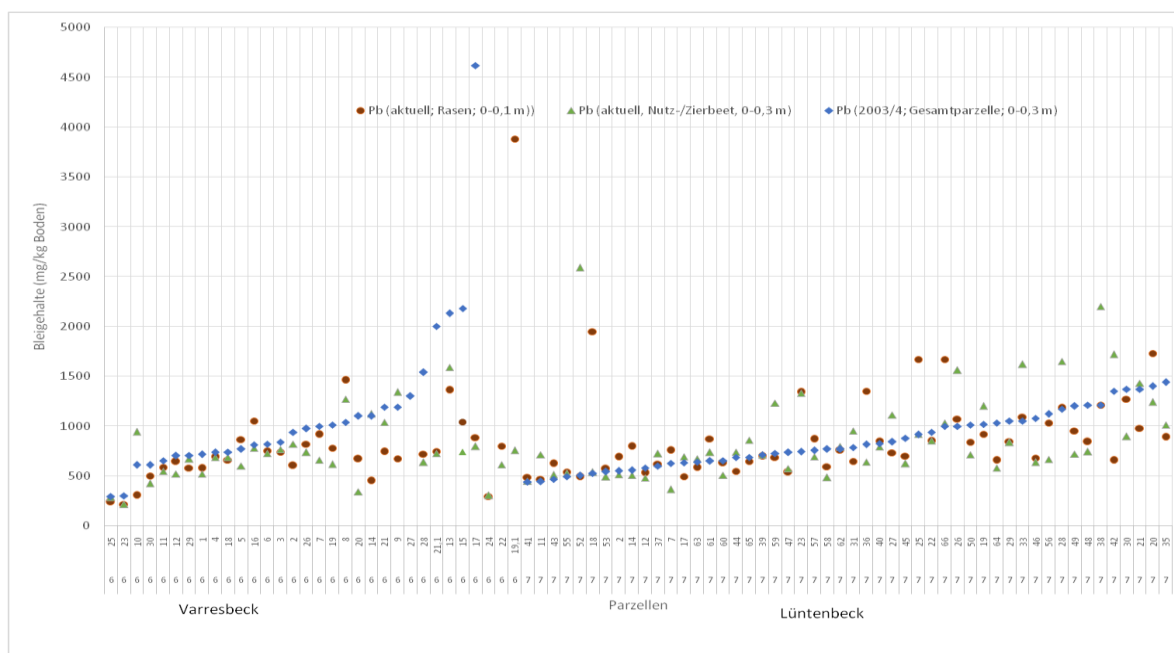
Tabelle 6: Kennzahlen der vorhandenen Daten (aus 2003/4; 2016 aktuell erhoben (Angaben in mg/kg)

	Gesamtparzelle (0,3 m) (Daten aus 2003/4)		Rasen (0-0,1 m) (2016)	Nutz-/ Ziergarten (0-0,3 m) (2016)
	Gesamt	RV	Gesamt	
Arsen				
Anzahl	78	48	86	86
MW	45,7	20,4	37,8	38,3
STABWA	12,1	6,1	11,2	11,1
Blei				
Anzahl	84	76	86	86
MW	1050	402	845	822
STABWA	824	171	491	410
BaP				
Anzahl	78	11	86	86
MW	1,7	0,3	2,3	2,4
STABWA	1,2	0,1	1,1	2,0
Phosphor				
Anzahl	n.b.	-	86	86
MW	n.b.	-	3244	3606
STABWA	n.b.	-	898	1031

Blei

Eine grafische Darstellung für die vorliegenden Bleigehalte (bis 0,3 m Tiefe), getrennt nach den beiden untersuchten Kleingartenanlagen findet sich in der Abbildung 1.

Abbildung 1: Gesamtgehalte Blei, nach Kleingartenanlagen, aufsteigend (bis 0,3 m Tiefe)



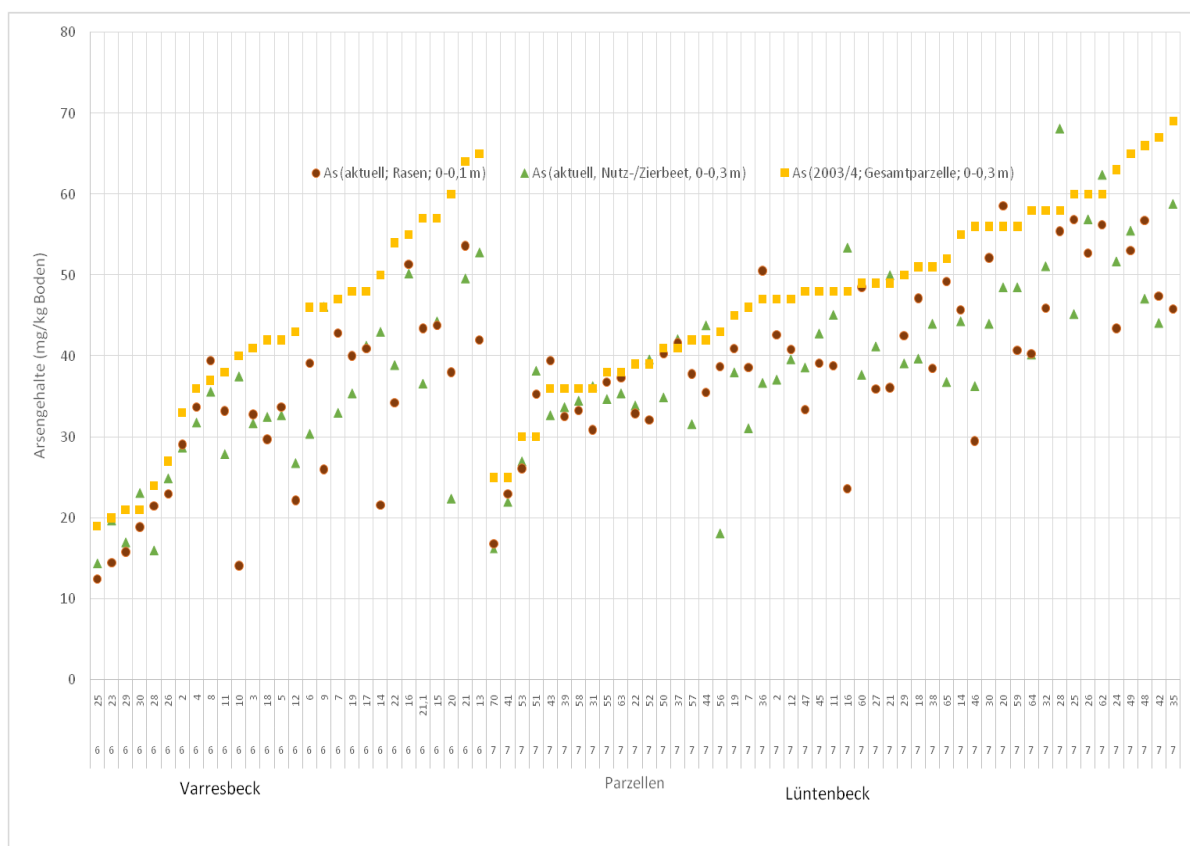
Während sich im statistischen t-Test (bei abhängigen Stichproben) keine signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den 2016 entnommenen Bleigehalten in Rasen- und Nutz-/Ziergartenflächen zei-

gen, ergeben sich zwischen den 2003/4 entnommenen Mischproben für die Gesamtfläche der Parzelle und den in 2016 entnommenen Proben der Rasenflächen sowie Nutz-/Ziergartenflächen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$). Im Detail ist zu erkennen, dass für zehn der 87 untersuchten Parzellen mittlere Abweichungen von mehr als 50% vorliegen. Werden diese Daten als Ausreißer eliminiert, sind jedoch keine signifikanten Unterschiede im Datenpool mehr festzustellen. Gründe für diese Abweichung in den zehn Parzellen können Umgestaltungen der Parzellen seit 2003/4, Pächterwechsel, durchgeführte Maßnahmen zur Bodenverbesserung oder die Probennahme (Mischprobe) aus einem sehr heterogenen Material mit einer hohen Schadstoffvarianz sein.

Arsen

Eine grafische Darstellung für die vorliegenden Arsengehalte (bis 0,3 m Tiefe), getrennt nach den beiden untersuchten Kleingartenanlagen findet sich in Abbildung 2. Für die ermittelten Arsengehalte ergeben sich im t-Test zwischen den Proben aus Rasenflächen und Zier-/Nutzgartenflächen aus dem Jahr 2016 keine signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$), allerdings liegen die Daten aus den Mischproben für die gesamten Parzellen aus 2003/4 – ähnlich wie für Blei – signifikant höher als die 2016 ermittelten Arsengehalten für Rasenflächen und Nutz-/Ziergartenflächen ($p < 0,01$). Die mittlere Abweichung der parzellenbezogenen Arsengesamtgehalte lag bei 17,8%, wobei in 2016 insgesamt nur auf vier Parzellen höhere Arsengehalte (gemittelt für Rasen- und Nutz-/Ziergartenflächen) gemessen wurden, als in den Mischproben aus 2003/4. Signifikante Unterschiede zwischen den Kleingartenanlagen zeigten sich nicht.

Abbildung 2: Gesamtgehalte Arsen, nach Kleingartenanlagen, aufsteigend (bis 0,3 m Tiefe)



4.3. Phosphorgehalte

Der Phosphorgehalt sollte Aufschluss darüber geben, inwieweit sich die Ausbringung von TSP in den Böden aktuell widerspiegelt und ob ggf. Zusammenhänge mit der Verfügbarkeit der Schadstoffe erkennbar werden. Insgesamt wurden mit 1.100 - 7.810 mg/kg Boden vergleichsweise hohe Phosphorgehalte (Gesamtgehalte⁴) nachgewiesen.

Landwirtschaftlich genutzte Böden mit Phosphorgehalten über 15,1 mg P/100 g Boden (bestimmt durch die DL- bzw. CAL-Methode) werden in die Gehaltsklasse E (sehr hoch) eingestuft (vgl. KTBL 2009⁵). Nach der CAL-Methode wurden im Rahmen der Feldstudie für die Testflächen in Varresbeck Phosphorgehalte von 28,8 bis 54,11 mg/kg bestimmt und der Gehaltsklasse E zugeordnet.

4.4. Pflanzenverfügbares Blei und Cadmium

Die Auswertung der pflanzenverfügbaren Gehalte wird durch zwei Aspekte erschwert: zum einen wurde Blei im Ammoniumnitrat-Extrakt nur in 29 Proben über der Bestimmungsgrenze (BG) nachgewiesen, so dass quantifizierte Vergleiche für den Großteil der Proben vor und nach Immobilisierung nicht möglich ist. Zum anderen wurden unterschiedliche Bestimmungsgrenzen verwendet (2003: <0,05 mg/kg; 2016: <0,025 mg/kg). Hieraus können statistische Fehleinschätzungen erfolgen, wenn Daten mit Hilfe der halben Bestimmungsgrenze berechnet werden.

Für Cadmium im Ammoniumnitrat-Extrakt lagen 2016 mit Ausnahme von vier Proben Messergebnisse über der Bestimmungsgrenze (>0,0025 mg/kg). Allerdings wurde in 2003/4 Cadmium im Ammoniumnitrat-Extrakt nur in acht Proben bestimmt, so dass auch hier kaum statistische Vergleiche möglich sind.

Die pflanzenverfügbaren Schadstoffgehalte haben in der Gefahrenbeurteilung der letzten Jahrzehnte eine untergeordnete Rolle gespielt. Mit einigen wenigen Ausnahmen auf versauerten Standorten wurden die Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV immer deutlich unterschritten.

4.5. Resorptionsverfügbarkeit

Nachfolgend werden die vorliegenden Ergebnisse zur Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit (RV) nach DIN 19738 vor und nach Durchführung der Immobilisierungsmaßnahme betrachtet. Für die ausgewählte Stichprobe, die insgesamt 45 Proben umfasst (vgl. Kapitel 3.2) liegen Daten zu den relevanten Parametern Blei, Arsen, Benzo(a)pyren als Leitparameter für PAK sowie Cadmium vor. Die Daten der Stichprobe werden zunächst nicht getrennt für die beiden Kleingartenanlagen ausgewertet, da sich weder in den Gesamtgehalten noch in den resorptionsverfügbaren Anteilen für die relevanten Parameter signifikante Unterschiede ergaben.

Rechnerisch ermittelt wurde jeweils die Differenz zwischen dem in 2003/4 und in 2016 ermittelten resorptionsverfügbaren Anteil (RV-Diff). Die relative Resorptionsverfügbarkeit als Maß für die Veränderung gibt den Anteil der Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf den in 2003/4 bestimmten resorptionsverfügbaren Anteil an.

⁴ Bestimmt im Königswasser; nach DIN EN ISO 17294-2 (AN-LG004), BG: 10 mg/kg

⁵ KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Auflage, Gernsheim

Blei

Die Resorptionsverfügbarkeit von Blei wurde in allen 45 Proben der ausgewählten Stichprobe untersucht. In Tabelle sind einige statistische Kenngrößen für die gesamte Stichprobe sowie für die Proben der Rasenflächen (0-0,1 m) sowie der Nutz-/Ziergartenflächen (0-0,3 m) dargestellt.

Tabelle 7: Statistische Kenngrößen zur Resorptionsverfügbarkeit von Blei

	Daten 2003/4			Daten 2016			Datenvergleich	
	Gesamt	Resorptionsverfüg- barkeit (RV)		Gesamt	RV	RV	RV-Diff	Relative RV
	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	%	%	
Gesamte Stichprobe (n=45)								
Mittelwert	1144	419	43,3	843	174,0	22,0	21,1	62,0
Median	940	393	44,6	767	165,8	22,0	21,6	49,9
StAbw.	867	159	13,3	320	50,1	6,9	13,5	52,9
Zier- und Nutzgarten (n=27)								
Mittelwert	1203	435	42,6	836	172	22,1	20,0	63,5
Median	1000	394	41,1	726	163	22,0	18,3	52,5
StAbw.	849	174	14,3	341	50	7,5	14,6	52,7
Rasen (n=18)								
Mittelwert	1056	396	44,4	852	177	22,7	22,8	59,7
Median	842	381	46,0	820	186	21,5	24,7	46,5
StAbw.	887	130	11,6	286	50	5,7	11,6	53,3

Es zeigte sich zunächst, dass die gemessenen Blei-Gesamtgehalte 2016 in der Stichprobe - im Mittel um 301 mg/kg - signifikant ($p < 0,01$) niedriger lagen, als die 2003/4 gemessenen Gesamtgehalte. Auf Rasenflächen ist dieser Effekt nicht signifikant.

Die resorptionsverfügbaren Bleigehalte liegen – im Mittel um 246 mg/kg - signifikant ($p < 0,01$) niedriger als 2003/4. Gleichzeitig liegen jedoch auch die resorptionsverfügbaren Anteile für Blei (bezogen auf die jeweiligen Gesamtgehalte) – im Mittel um 21,1% (Median 21,6%) - signifikant ($p < 0,01$) niedriger als 2003/4 (43,3%; Median 44,6%). Die relative Resorptionsverfügbarkeit für Blei lag im Vergleich zu 2003/4 bei 62% (Median 49,9%).

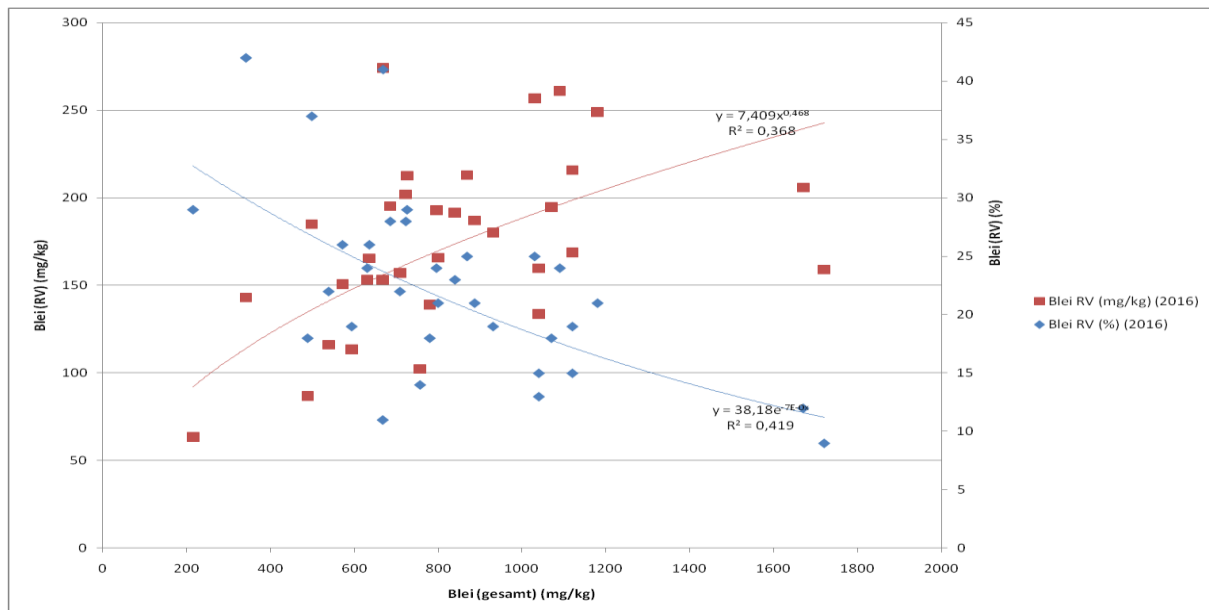
Als Ausreißer wurden die Proben 6/17 und 6/20 identifiziert. In diesen Proben lagen die Gesamtgehalte deutlich auseinander und die Daten zur Resorptionsverfügbarkeit ergaben nicht plausible Ergebnisse, die auf starke Inhomogenitäten auf diesen Parzellen schließen lassen. Auch die Bestimmung der Phosphorgehalte hatte auf diesen Parzellen z.T. stark schwankende Ergebnisse erkennen lassen.

Zusammenhangsanalysen

Sowohl im Hinblick auf die resorptionsverfügbaren Gehalte wie auch Anteile ergaben sich für Blei wie erwartet signifikante Unterschiede zwischen den Daten vor und nach der Immobilisierungsmaßnahme. 2016 lagen die mittleren resorptionsverfügbaren Anteile für Blei signifikant niedriger ($p < 0,01$) als 2003/4. Insgesamt ist ein abnehmender Trend des resorptionsverfügbaren Anteils mit steigendem Gesamtgehalt zu erkennen.

Diese Aussage wird noch verdeutlicht durch Abbildung 3, in der die Zusammenhänge zwischen den Blei-Gesamtgehalten sowie der Blei-Resorptionsverfügbarkeit dargestellt werden.

Abbildung 3: Zusammenhang zwischen den 2016 erhobenen Blei-Gesamtgehalten und resorptionsverfügbarem Blei in der Stichprobe (n=45)



Die Zusammenhänge der Blei-Gesamtgehalten und der resorptionsverfügbaren Gehalte bzw. Anteile im Vergleich der Untersuchungszeiträume verdeutlichen die beiden nachfolgenden Abbildungen. Die resorptionsverfügbaren Gehalte (mg/kg) in 2016 liegen deutlich niedriger als 2003/4, abhängig vom Gesamtgehalt mit steigendem Abstand (s. Abb. 4). Dies lässt annehmen, dass die Immobilisierungsmaßnahmen bei höheren Gesamtgehalten auch mehr Blei zu binden vermögen. Die resorptionsverfügbaren Anteile nach der Immobilisierung sind unabhängig vom Gesamtgehalt im Vergleich zu 2003/4 gleichermaßen gesunken (s. Abb. 5).

Abbildung 4: Vergleiche der Blei-Resorptionsverfügbarkeit vor und nach Immobilisierung (absolut)

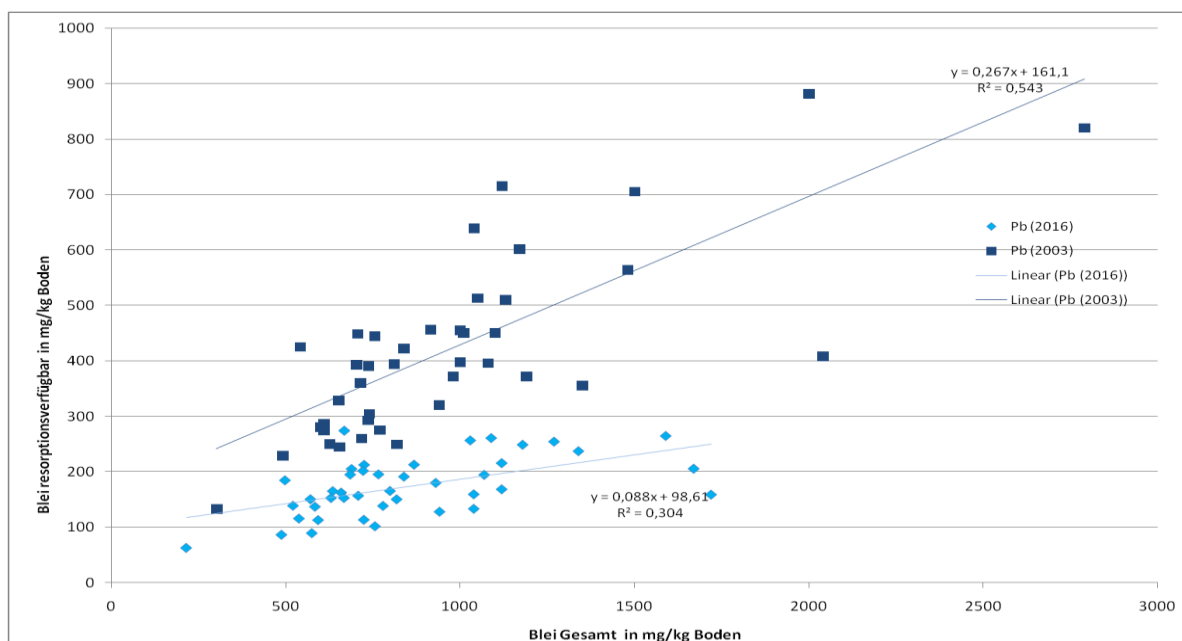
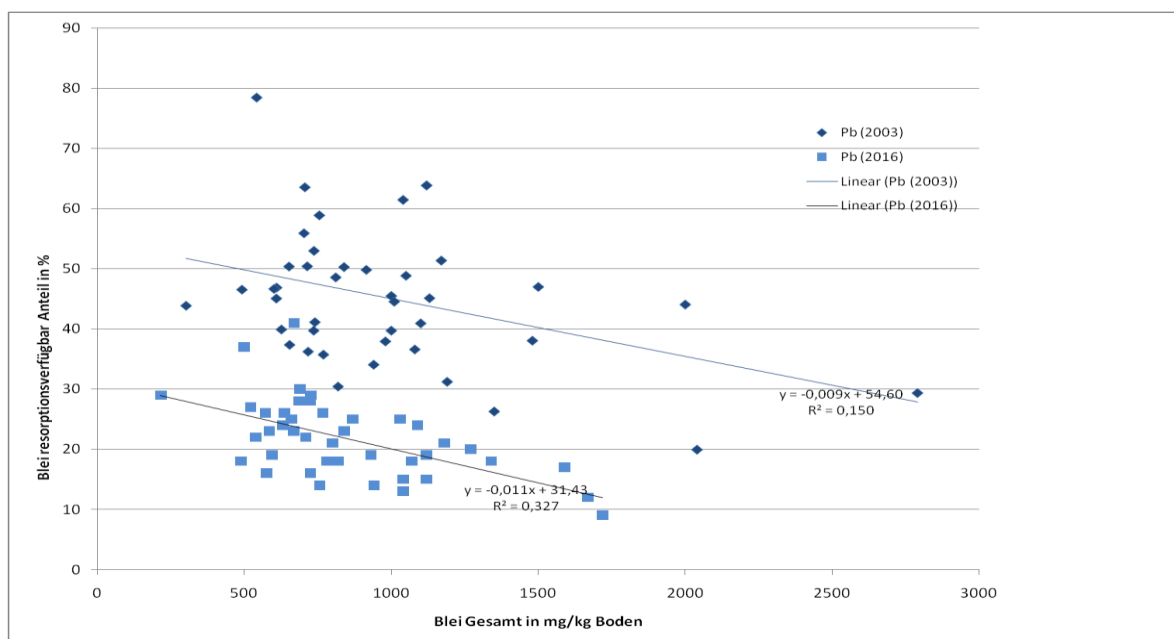


Abbildung 5: Vergleiche der Blei-Resorptionsverfügbarkeit vor und nach Immobilisierung (relativ)



Arsen

Die Resorptionsverfügbarkeit von Arsen wurde in 32 Proben der ausgewählten Stichprobe untersucht. In Tabelle 8 sind einige statistische Kenngrößen für die gesamte Stichprobe sowie für die Proben der Rasenflächen (0-0,1 m) sowie der Nutz-/Ziergartenflächen (0-0,3 m) dargestellt.

Tabelle 8: Statistische Kenngrößen zur Resorptionsverfügbarkeit von Arsen

	Daten 2003/4			Daten 2016			Datenvergleich	
	Gesamt	Resorptionsverfüg- barkeit (RV)		Gesamt	RV	RV	RV-Diff	Relative RV
	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	%	%	
Gesamte Stichprobe (n=32)								
Mittelwert	49,6	19,8	41,1	39,3	9,6	25,9	15,2	65,8
Median	48,0	18,5	37,7	38,1	9,7	24,5	12,8	64,7
StAbw.	9,99	5,6	13,2	9,8	2,2	8,1	14,4	22,6

Die gemessenen Arsen-Gesamtgehalte 2016 liegen im Mittel um 10,3 mg/kg und signifikant ($p < 0,05$) niedriger, als die 2003/4 gemessenen Gesamtgehalte. Auch die resorptionsverfügbaren Arsengehalte liegen signifikant ($p < 0,01$) niedriger als 2003/4.

Benzo(a)pyren

Die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo(a)pyren (BaP) wurde in 12 Proben der ausgewählten Stichprobe untersucht. In Tabelle 9 sind einige statistische Kenngrößen für die gesamte Stichprobe sowie für die Proben der Rasenflächen (0-0,1 m) sowie der Nutz-/Ziergartenflächen (0-0,3 m) dargestellt.

Tabelle 9: Statistische Kenngrößen zur Resorptionsverfügbarkeit von Benzo(a)pyren

	Daten 2003/4			Daten 2016			Datenvergleich
	Gesamt	Resorptionsverfügbarkeit (RV)		Gesamt	RV	RV	RV (Differenz)
	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	%	%
Gesamte Stichprobe (n=12)							
Mittelwert	3,6	0,3	9,4	4,2	1,2	31,6	-22,2
Median	3,6	0,3	7,3	4,2	1,0	26,0	-20,6
StAbw.	1,2	0,1	5,5	1,4	0,6	17,6	21,0

Grundsätzlich ist die Datenmenge zur Auswertung der BaP-Gehalte im Boden vergleichsweise gering, was daran liegt, das BaP kein Hauptbelastungsparameter in den untersuchten Kleingartenanlagen darstellte und damit auch keine Vergleichsdaten vorlagen. Was in dem geringen Probenumfang jedoch auffällt, ist die tendenzielle Zunahme der BaP-Gehalte im Boden. Diese Zunahme ist jedoch nicht signifikant, während die Unterschiede zwischen den resorptionsverfügbaren Gehalten und Anteilen vor und nach Durchführung der Immobilisierungsmaßnahme signifikant ($p < 0,01$) sind. Die Abweichungen der resorptionsverfügbaren Anteile erfolgen jedoch sowohl nach oben als auch nach unten und zeigen keine Gesetzmäßigkeit. Für die Bindung von Organika im Boden sind andere Mechanismen und Substrate erforderlich, wie beispielsweise die Anwesenheit von Huminsäuren oder weiteren Komplexbildnern, die hier nicht untersucht wurden. Bei erhöhten BaP-Gehalten sind diese Effekte zu berücksichtigen.

Cadmium

Die Resorptionsverfügbarkeit von Cadmium wurde in sechs Proben der ausgewählten Stichprobe untersucht (s. Tab. 10). Auswahlkriterium für die untersuchten Parzellen waren die Ergebnisse der Feldstudie, in der auf sechs Testflächen dieser Parzellen Untersuchungen zur Immobilisierung durchgeführt wurden. Die Flächen werden alle aktuell noch mehr oder weniger als Nutzgartenfläche genutzt.

Tabelle 10: Untersuchungsergebnisse für Cadmium auf Parzellen der KGA Varresbeck (Nutzgarten; 0-0,3 m)

	Cd-Gesamt (mg/kg)			Cd AN mg/kg	Cd RV mg/kg	Cd RV %	Phosphor	P ₂ O ₅ CAL 2006*	pH
Parzelle	vor 2003	2003/4	2016		2016				
6	2,2	2,6	2,4	0,01	0,85	35	3810	68	7
10	2	2,1	2,8	0,006	1,08	39	5760	90	6,5
12	2,2	2,1	2,2	0,005	0,99	45	5320	114	6,9
13	2,1	n.b.	2,8	0,005	0,77	28	4920	110	6,8
18	2,2	2,4	2,4	0,007	0,80	33	3340	114	6,5
20	n.b.	2,1	1,4	0,005	0,68	49	2180	66	6,9

*: Daten aus der Feldstudie

Die Gesamtgehalte bewegen sich in einem engen Wertefenster von 2,1 bis 2,6 mg/kg, ebenso die resorptionsverfügbaren Gehalte und Anteile, die zwischen 28 und 49% lagen. In der Feldstudie wurde auf den Testflächen der KGA Varresbeck 2006 Resorptionsverfügbarkeiten von 4,6-32,7% ermittelt. Der Zusatz von TSP konnte 2006 einen Rückgang der Resorptionsverfügbarkeit um 7% relativ zur Kontrolle zeigen. Weitere Auswertungen waren aufgrund der Begrenztheit der Datenlage nicht möglich und auch nicht notwendig. Die Cd-Gehalte haben in der Vergangenheit mit wenigen Ausnahmen nur zu Empfehlung (z.B. Pflanzenauswahl), jedoch nicht zu ordnungsbehördlichen Maßnahmen geführt.

4.6. Datenqualität

Nach den Vorgaben der DIN 19738 sind die resorptionsverfügbaren Gehalte zunächst als Doppelbestimmungen durchzuführen, deren Einzelwerte nicht mehr als 10% vom Mittelwert abweichen sollen. Darüber hinaus sollen zur Überprüfung des Verfahrens auch Sedimentuntersuchungen durchgeführt werden, mit Hilfe derer die Wiederfindungsrate bestimmt werden kann.

Auswertung der Doppelbestimmungen

Wie die Auswertung der Doppelbestimmungen zeigt, wurden für Arsen, Blei und Cadmium im Mittel Abweichungen von deutlich weniger als 10% festgestellt, für Arsen und Blei waren 4 bzw. 5 Fälle mit höheren Abweichungen (bis 38 bzw. 23%) festgestellt worden. Für BaP waren dagegen höhere Abweichungen zu beobachten. Dieses Phänomen ist jedoch für Organika nicht unbekannt. Eine Übersicht gibt Tabelle 11. Die Ergebnisse sind zumindest für die bewertungsrelevanten Parameter als zufriedenstellend einzustufen.

Tabelle 11: Übersicht zur Abweichung der Doppelbestimmungen der Resorptionsverfügbarkeit

	Arsen	Blei	Cadmium	BaP
Anzahl	32	45	6	13
Mittelwert	6,00%	5%	3,32%	21%
Median	4,54%	3,12%	2,95%	19%
Überschreitungen (>10%)	4/32 (12,5%)	5/45 (11%)	0/6 (0%)	10/13 (77%)

Auswertung der Wiederfindungsraten

Insgesamt wurden zur Sedimentuntersuchung fünf Proben für Blei, vier Proben für Arsen, zwei Proben für Cadmium und drei Proben für BaP ausgewählt (s. Tab. 12). Die Wiederfindungsraten für Blei bewegen sich zwischen 76 und 121%, in einer Probe wurden 193% ermittelt. Für Arsen beläuft sich die Spanne auf 155-174%. Für Cadmium fanden sich 80-85% wieder, für BaP lag die mittlere Wiederfindung bei 64-67%. Nach DIN 19738 ist anzustreben, nur eine Differenz von +/- 20% Abweichung zu finden. Insgesamt schwankt die Wiederfindung in den hier untersuchten Proben zum Teil deutlich mehr. Eine belastbare Erklärung gibt es hierfür nicht, möglicherweise steht jedoch der hohe Gehalt an Phosphor im Verdacht, die Analytik, insbesondere im Sediment doch auch erheblich zu beeinflussen. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Tabelle 12: Daten zur Qualitätssicherung für Blei

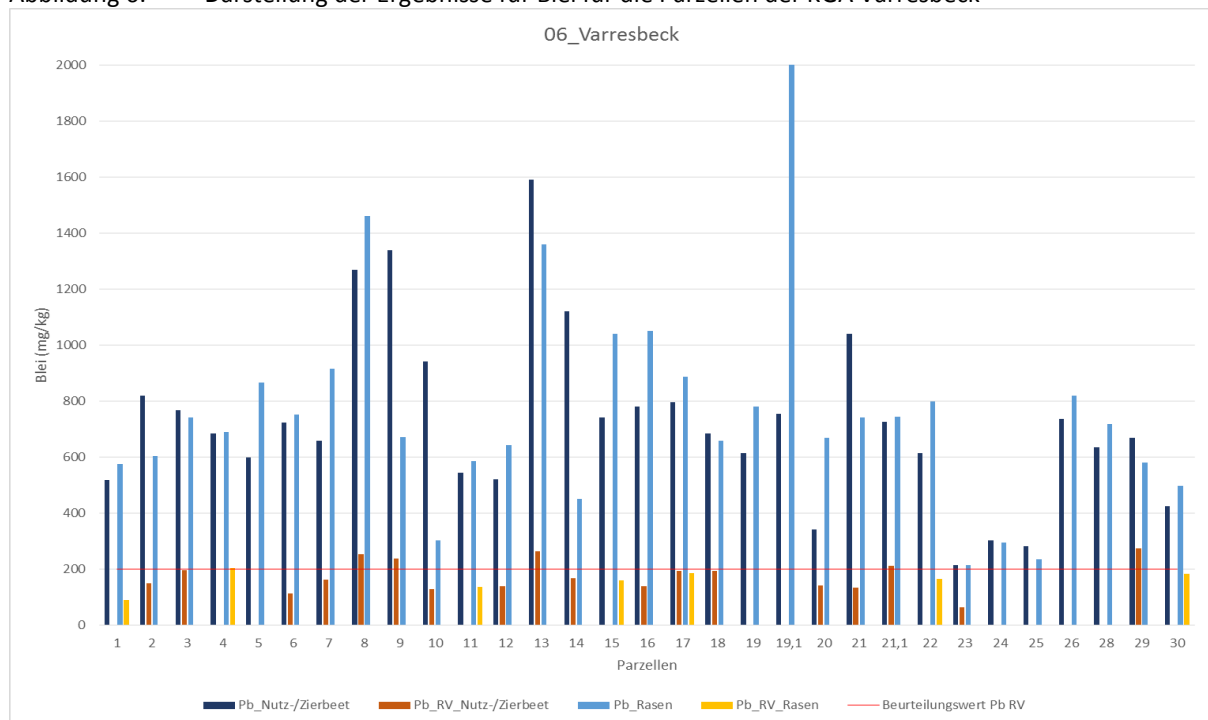
Nummer	Parzelle_Nr	Pb (2003) (mg/kg)	Pb (2003) RV (mg/kg)	Pb (2003) RV %	Pb (2016) (mg/kg)	Pb (2016) RV_1	Pb (2016) RV_2	Pb (2016) RV_x	Abw. Doppelbest. RV	Pb (2016) RV_%	Pb (2016) Sed_1	Pb (2016) Sed_2	Pb (2016) Sed_x	Abw. Doppelbest. Sed	Wiederfindung %
6	7	1000	398	40%	660	157	168	163	3,4%	25%	393	415	404	2,8%	86%
6	13	2790	820	29%	1590	269	261	265	1,5%	17%	1110	1105	1108	0,2%	86%
6	18	740	304	41%	686	190	201	195	2,8%	28%	790	1465	1128	29,9%	193%
7	25	915	456	50%	1670	223	189	206	8,4%	12%	965	1159	1062	9,2%	76%
7	33	1050	513	49%	1090	247	275	261	5,4%	24%	1214	908	1061	14,4%	121%

4.7. Parzellenscharfe Bewertung

Zur Überprüfung der Resorptionsverfügbarkeit nach Durchführung der Immobilisierungsmaßnahme wurden zunächst für alle betroffenen Parzellen die Gesamtgehalte sowie die pflanzenverfügbaren Gehalte für die Teilflächen Nutz-/Zierbeet und Rasen aktuell (2016) bestimmt. Darüber hinaus wurde auf einer Auswahl der Parzellen auch die Resorptionsverfügbarkeit aktuell (2016) bestimmt. Auch die aktuelle Nutzung der Parzellen wurde erhoben, so dass eine aktuelle Beurteilung der Parzellen auf der Grundlage der neu erhobenen Daten in Form von aktualisierten Datenbriefen durchgeführt werden kann.

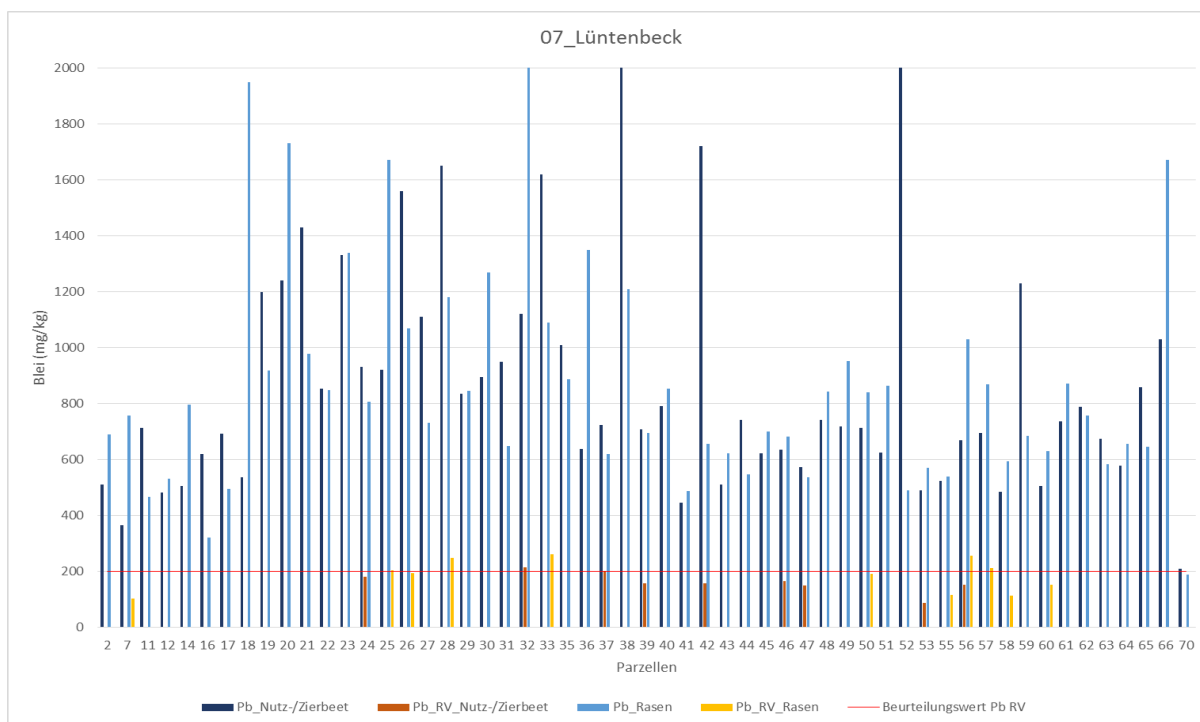
Allerdings bedarf eine abschließende aktualisierte Bewertung aller Parzellen noch eines Konzeptes zur Übertragbarkeit der Kenntnisse auf die Parzellen, für die die Resorptionsverfügbarkeit nicht bestimmt wurde. Solch eine abschließende Beurteilung aller Parzellen war jedoch nicht Gegenstand des hier vorliegenden Vorhabens und muss an gesonderter Stelle auf der hier erhobenen Datenbasis fortgeführt werden. Die nachfolgenden Abbildungen geben einen Überblick über die aktuell vorliegenden Ergebnisse für Blei für die beiden Kleingartenanlagen.

Abbildung 6: Darstellung der Ergebnisse für Blei für die Parzellen der KGA Varresbeck



Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Parzellen mit Überschreitung des Beurteilungswertes für Blei (RV) zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Mensch im Vergleich zu 2003/4 in beiden Anlagen deutlich zurückgegangen ist.

Abbildung 11: Darstellung der Ergebnisse für Blei für die Parzellen der KGA Lüntenbeck



5. Diskussion und Ausblick

Mit der wiederholten Untersuchung von Kleingartenparzellen in den KGA Varresbeck und Lüntenbeck nach Durchführung von Immobilisierungsmaßnahmen konnten verschieden Aspekte beleuchtet werden, aus denen einige allgemeine Schlüsse gezogen werden können.

Phosphor

So haben die Untersuchungen gezeigt, dass in den untersuchten Kleingartenparzellen hohe Gehalte an Phosphor nachweisbar sind, die auf die Ausbringung des von der Stadt Wuppertal zur Verfügung gestellten TSP zurückzuführen sind. Die Pächter sollten dies in Eigenleistung ausbringen, ohne dass diese Maßnahme von Dritten kontrolliert wurde. Dennoch wurden keine signifikanten Unterschiede für die Phosphorgehalte auf Parzellen mit und ohne bestätigte Ausbringung von TSP festgestellt. Die nachgewiesenen Phosphorgehalte in den Böden sind vergleichsweise hoch und schwanken zwischen 1.100 und 7.810 mg/kg. Es lassen sich signifikante Unterschiede zwischen den Phosphorgehalten der Rasen- und der Nutz-/Ziergartenproben erkennen. Die hohen Phosphorgehalte rühren vermutlich aus der vorschriftsmäßigen Ausbringung des TSP.

Nutzung

Kleingartenparzellen unterliegen einer ständigen Veränderung. Lediglich auf vier Parzellen haben seit 2003/4 keine Veränderungen stattgefunden, auf allen anderen Parzellen wurden Flächen umgestaltet. Tendenziell wurden mehr Rasenflächen zu Lasten von Ziergartenflächen angelegt. Die Nutzgartenflächen sind insgesamt mehr oder weniger gleich geblieben. Die Ergebnisse zeigen die Dynamik, die für die Nutzung der Flächen in Kleingartenanlagen anzunehmen ist und die nicht zuletzt auch durch Pächterwechsel bedingt sein kann, die im vorliegenden Fall bei rund 62% lag.

Datenbriefe

In dem Zusammenhang wurde auch die Sicherstellung der Weitergabe der Untersuchungsergebnisse und Nutzungsempfehlungen in Form der Datenbriefe von Seiten des Stadtverbandes der Gartenfreunde als ein wichtiger Aspekt identifiziert, auf den auch zukünftig ein Augenmerk zu richten ist. Festgelegt wurde, dass bei Kündigung eines Pächters der Vereinsvorstand die Kündigung an den Stadtverband weitergibt. Im Zuge der Wertermittlung wird dann auch der Datenbrief berücksichtigt, gelangt als Anlage in den neuen Pachtvertrag und muss mit Unterschrift vom neuen Pächter zur Kenntnis genommen werden. Der Stadtverband fungiert hier als Kontrollinstanz.

Gesamtgehalte

Die erneute Bestimmung der Gesamtgehalte für Arsen, Blei, Cadmium und BaP erfolgte abweichend vom Beprobungskonzept 2003/4 teilflächenbezogen getrennt nach Rasenflächen und Nutz-/Zierbeetflächen. Dennoch hat die Plausibilitätsprüfung insgesamt eine gute Übereinstimmung der Messwerte aus 2003/4 und 2016 ergeben. Für ca. 10 Parzellen wurden deutlichere Auffälligkeiten festgestellt, die vermutlich der Umgestaltung der Parzellen zu schulden sind oder auch ggf. vorliegenden Inhomogenitäten. Es wurden für Blei und Arsen niedrigere Gesamtgehalte festgestellt als 2003/4. Als Gründe können beispielweise Umgestaltungsmaßnahmen, Heterogenität des Bodens oder Maßnahmen zur Bodenverbesserung vermutet werden.

Pflanzenverfügbarkeit

Erwartete Zusammenhänge für die Ausbringung von TSP und der Pflanzenverfügbarkeit von Blei und Cadmium konnten nicht nachgewiesen werden. Zum einen lagen für Blei zu viele Ergebnisse sowohl 2003/4 als auch 2016 unterhalb der (unterschiedlichen) Bestimmungsgrenzen, so dass Vergleiche

unmöglich waren, für Cadmium lagen zu wenige Daten aus 2003/4 vor, so dass auch hier keine Auswertungen möglich waren. Aufgrund der geringen Relevanz für den Verwaltungsvollzug hat dies keine Bedeutung für die Gesamtbewertung.

Resorptionsverfügbarkeit

Die resorptionsverfügbaren Anteile für **Blei und Arsen** sind nach Durchführung der Immobilisierung deutlich niedriger, für Blei im Mittel um 21,1% (43,3% → 22,2%), für Arsen im Mittel um 15,2% (41,4% → 25,9%). Die relative Resorptionsverfügbarkeit (aus Quotient zwischen der Resorptionsverfügbarkeit vor und nach Immobilisierung) lag für Blei im Mittel bei 62%, nach Eliminierung von Ausreißern (n=3) betrug die mittlere relative Resorptionsverfügbarkeit 50% (71%; 95.-Perzentil). Für Arsen waren nach Immobilisierung im Mittel noch 65,8% des ursprünglichen Anteils resorptionsverfügbar. Zusammenhangsanalysen zeigten für die resorptionsverfügbaren Gehalte starke Korrelationen mit den Gesamtgehalten.

Unerwarteter Weise wurden diese Ergebnisse auch für die Resorptionsverfügbarkeit von **Arsen** festgestellt. Die Bodenchemie lässt nicht begründen, dass die Einbringung von TSP Arsen im Boden immobilisiert. Allerdings ist bekannt, dass im Magen-Darmtrakt die Anwesenheit von Phosphor insbesondere bei reduzierenden Verhältnissen im Dünndarm zur Fällung von As^{3+} und damit zur physiologischen Immobilisierung führen kann und somit die beobachteten Effekte erklären könnte.

Für **Cadmium** war die Datenlage zu klein, um statistische Auswertungen durchzuführen. Dieser Schadstoff besitzt aber für den ordnungsbehördlichen Vollzug nur eine geringe Relevanz. Prinzipiell konnten jedoch die Ergebnisse aus der Feldstudie bestätigt werden, die für Cadmium eine Reduzierung der Resorptionsverfügbarkeit ermittelt hatten.

Für **BaP** waren keine systematischen Veränderungen der Resorptionsverfügbarkeit gegenüber 2003/4 zu erkennen. Dies verwundert nicht, da die Maßnahme zur Immobilisierung auf Schwermetalle abzielte und eine Beeinflussung von Organika wie BaP im Boden nicht wahrscheinlich war.

Ausblick

Die Ergebnisse haben Auswirkungen auf die abschließende Gefährdungsabschätzung der untersuchten Parzellen, die mit erreichtem Kenntnisstand zu aktualisieren ist. Hierzu bedarf es allerdings noch eines Konzeptes zur Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus der Stichprobe auf alle einzelnen Parzellen.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Maßnahme zur Immobilisierung von Blei und Arsen erfolgreich war und zu einer deutlichen Verringerung von deren Resorptionsverfügbarkeit aus Bodenpartikeln geführt hat.

Momentan können keine Aussagen über die Nachhaltigkeit der Maßnahme getroffen werden. Die Ausbringung des TSP erfolgte 2008 und 2010, die Kontroll-Messungen jetzt 6-8 Jahre später. Es ist nicht zu sagen, wie der zeitliche Verlauf der Immobilisierung ist. Hieraus resultierend sollten Monitoring-Messungen geplant werden, die den zeitlichen Verlauf der Immobilisierung weiter kontrollieren und dokumentieren.