

Eigenschaften urbaner Böden Berlins

Statistische Auswertung von Gutachtendaten und Fallbeispiele

vorgelegt von
Diplom-Geologin
Beate Mekiffer

Von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Naturwissenschaften
- Dr. rer. nat –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Bernd-Michael Wilke
Berichter: Prof. Dr. Gerd Wessolek
Berichter: Prof. Dr. Wolfgang Burghardt
Berichter: Prof. Dr. Manfred Renger

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 05. September 2008

Berlin 2008

D 83

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

Inhaltsverzeichnis II

Zusammenfassung X

Abstract XII

1 Einleitung 1

2 Material und Methoden 3

2.1 Laboruntersuchungen an urbanen Substraten 3

2.2 Aufbau der Datenbank zu urbanen Substraten 3

2.2.1 Die Datensätze 3

2.2.2 Beprobungs- und Analysenverfahren der Bodengutachten 4

2.2.3 Hierarchie der Datenbank 5

2.3 Statistische Analyse 6

2.3.1 Verteilungsanalyse 6

2.3.2 Behandlung von Werten unterhalb der Nachweisgrenze 8

3	Ergebnisse	12
I	urbane Böden in Berlin – Fallbeispiele	12
	3.1 Trümmerschutt	12
	3.1.1 Bodeneigenschaften von innerstädtischen Trümmerschuttböden	13
	3.1.2 Schadstoffgehalte von innerstädtischen Trümmerschuttböden	16
	3.1.3 Anionengehalte von Trümmerschuttböden.....	19
	3.1.4 pedogene Aktivität in Trümmerschuttböden	21
	3.1.5 Skelettzusammensetzung von Trümmerschuttböden.....	23
	3.1.6 Zusammenfassung	24
	3.2 Industriaufschüttungen aus Schlacke und Asche.....	24
	3.2.1 Bodeneigenschaften der Industriaufschüttungen	25
	3.2.2 Schadstoffgehalte der Industriaufschüttungen	26
	3.2.3 Schwermetallverfügbarkeit	28
	3.2.4 Zusammenfassung	30
	3.3 Aufschüttungen heterogener Substrate über Talsand.....	31
	3.3.1 Untersuchungsgebiet	31
	3.3.2 Material und Methoden.....	31
	3.3.3 Bodeneigenschaften und Belastungssituation.....	31
	3.3.4 Zusammenfassung	35
II	Statistische Auswertung von Gutachtendaten	36
	3.4 Verteilung von Schadstoffen in der Grundgesamtheit.....	36
	3.5 Eigenschaften einzelner Substrate	42
	3.5.1 Bauschutt	43
	3.5.2 Bauschuttmischungen	47
	3.5.3 Sand.....	50
	3.5.4 Sandmischsubstrate	53
	3.5.5 Trümmerschutt	57

3.5.6	Asche	61
3.5.7	Schlacke.....	61
3.5.8	Humoser Oberboden.....	62
3.5.9	Mergel	65
3.5.10	Lehm	66
3.5.11	Torf.....	67
3.6	Vergleich der Substrateigenschaften	68
3.6.1	pH-Wert.....	69
3.6.2	Blei	70
3.6.3	Cadmium	72
3.6.4	Kupfer.....	74
3.6.5	Zink	76
3.6.6	16 PAK/EPA.....	78
3.6.7	Benzo(a)pyren.....	81
3.7	Beziehungen zwischen einzelnen Analysenparametern.....	84
3.7.1	PAK-Muster in Substraten	84
3.7.2	Beziehungen zwischen Schwermetallen	87
4	Diskussion, Fazit und Ausblick	91
4.1	Diskussion	91
4.2	Fazit und Ausblick.....	95
5	Literatur	96
	Danksagung	102
	Lebenslauf.....	103
6	Anhang	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchungsmethodik für Standardparameter und Schwermetalle.....	3
Tabelle 2: Charakteristika verschiedener Verteilungstypen	7
Tabelle 3: Korrelations- und Kontingenzkoeffizienten (Röhr et al. 2007).....	9
Tabelle 4: Schwermetall –, PAK- und Benzo(a)pyren-Gehalte von 5 innerstädtischen Trümmerschuttprofilen Berlins	16
Tabelle 5: Verhältnis Fluoranthen/ Pyren in den Horizonten dreier Trümmerschuttprofile	18
Tabelle 6: Anionengehalte von Proben der Trümmeraufschüttung am Teufelsberg Berlin	20
Tabelle 7: pedogene Aktivität* in 6 Trümmerschuttprofilen.....	22
Tabelle 8: pH-Werte in Industriefaufschüttungen von Schlacken und Aschen	25
Tabelle 9: potenzielle Kationenaustauschkapazität* von Proben aus Industriefaufschüttungen.....	26
Tabelle 10: Schwermetallgehalte* in Bodenproben des Bootsgelände Schildhorn	27
Tabelle 11: PAK-Gehalte in Industriefaufschüttungen aus Schlacke und Asche.....	28
Tabelle 12: mobile und leicht nachlieferbare Anteile von Cadmium, Kupfer und Blei Industriefaufschüttungen	29
Tabelle 13: mobile und leicht nachlieferbare Anteile von Zink, Arsen und Quecksilber in Industriefaufschüttungen	29
Tabelle 14: Boden- und Grundwassereigenschaften Mischaufschüttung Rodelbergweg	32
Tabelle 15: Belastungssituation Mischaufschüttung Rodelbergweg und Vorsorge – bzw. Gefahrenwerte	32
Tabelle 16: Datenbasis für statistische Untersuchungen der Grundgesamtheit	36
Tabelle 17: Vorsorgewerte nach Bundesbodenschutzgesetz (1999).....	37
Tabelle 18: Prüfwerte nach Bundesbodenschutzgesetz (1999), Wirkungspfad Boden-Mensch	37
Tabelle 19: mittlere Nachweisgrenzen	37
Tabelle 20: Datenbasis für substratbezogene statistische Untersuchungen	42
Tabelle 21: Gehalt technogener Komponenten im Bauschutt.....	43
Tabelle 22: Gehalt technogener Komponenten in Bauschuttmischungen	47
Tabelle 23: Gehalte technogener Komponenten in Sandmischsubstraten.....	53
Tabelle 24: Gehalte technogener Komponenten im Trümmerschutt	57
Tabelle 25: statistische Kennwerte von Aschen	61
Tabelle 26: statistische Kennwerte von Schlacken	62
Tabelle 27: statistische Kennwerte von Lehm	66
Tabelle 28: statistische Kennwerte von Torf.....	67
Tabelle 29: Vergggleich der statistischen Kennwerte für den Parameter „pH“	70
Tabelle 30: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Blei“	72
Tabelle 31: multipler Vergleich der p-Werte für „Bleigehalt“, $p=0,05$	72

Tabelle 32: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Cadmium“	74
Tabelle 33: multipler Vergleich der p-Werte für „Cadmiumgehalt“, $p=0,05$	74
Tabelle 34: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Kupfer“ ...	76
Tabelle 35: multipler Vergleich der p-Werte für „Kupfergehalt“, $p=0,05$	76
Tabelle 36: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Zink“	78
Tabelle 37: multipler Vergleich der p-Werte für „Zinkgehalt“, $p=0,05$	78
Tabelle 38: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „PAK“	80
Tabelle 39: multipler Vergleich der p-Werte für „ Σ PAK“, $p=0,05$	81
Tabelle 40: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „BaP“	82
Tabelle 41: multipler Vergleich der p-Werte für „Benzo(a)pyren“, $p=0,05$	83
Tabelle 42: prozentualer Anteil von 2/3-Ring-, 4-Ring-, 5-Ring- und 6-Ring-PAK in den Substraten ..	85
Tabelle 43: PAK-Quotienten unter Berücksichtigung von konstantem Abbau und 5-tägigem atmosphärischem Transport (Dickhut et al. 2000)	86
Tabelle 44: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle im Bauschutt	87
Tabelle 45: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in Bauschuttmischsubstraten	88
Tabelle 46: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in humosen Oberboden; Korrelationen signifikant ($p < 0,05$)	88
Tabelle 47: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in sandigen Substraten	89
Tabelle 48: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in Trümmerschutt	89
Tabelle 49: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in Sandmischungen	90
Tabelle 50: Vergleich der Korrelationen einzelner Substrate	90
Tabelle 51: Mediane der Schadstoffbelastung aus Datenbankwerten und nach Kühn et al. (1996) ...	93
 Anhang Tabelle 1: Abkürzungen und Symbole	 104
Anhang Tabelle 2: Profilbeschreibung für Berliner Trümmerschuttböden der Innenstadt	106
Anhang Tabelle 3: Bodenparameter von 5 Trümmerschuttprofilen der Berliner Innenstadt	108
Anhang Tabelle 4: Verteilung der PAK-Spezies in den Profilen P1-P3	109
Anhang Tabelle 5: Profil P1 Teufelsberg	111
Anhang Tabelle 6: Profil P2/ Teufelsberg	112
Anhang Tabelle 7: Profil P3/ Teufelsberg	113
Anhang Tabelle 8: Profil P4/ Teufelsberg	114
Anhang Tabelle 9: Profil P5/ Teufelsberg	115
Anhang Tabelle 10: Profil P6/ Teufelsberg	116
Anhang Tabelle 11: Skelettgehalt und -zusammensetzung P1 Teufelsberg	117
Anhang Tabelle 12: Skelettgehalt und -zusammensetzung P2 Teufelsberg	118
Anhang Tabelle 13: Skelettgehalt und -zusammensetzung P3 Teufelsberg	118
Anhang Tabelle 14: Skelettgehalt und -zusammensetzung P4 Teufelsberg	119
Anhang Tabelle 15: Skelettgehalt und -zusammensetzung P5 Teufelsberg	120
Anhang Tabelle 16: Skelettgehalt und -zusammensetzung P6 Teufelsberg	120

Anhang Tabelle 17: Oxalatlösliches Eisen und Aluminium in Trümmerschuttproben des Teufelsberges	121
Anhang Tabelle 18: Dithionitlösliches Eisen und Aluminium in Trümmerschuttproben des Teufelsberges.....	122
Anhang Tabelle 19: Ergebnisse der Desorptionsversuche mit Regenwasser; desorbierte Schwermetalle in [µg/l],	123
Anhang Tabelle 20: Ergebnisse der Desorptionsversuche mit Havelwasser; desorbierte Schwermetalle in [µg/l],	124
Anhang Tabelle 21: Kartierprotokoll Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS2	125
Anhang Tabelle 22: Kartierprotokoll Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS3	125
Anhang Tabelle 23: Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS4.....	125
Anhang Tabelle 24: Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS5.....	126
Anhang Tabelle 25: Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS6.....	126
Anhang Tabelle 26. Probenahmepunkt: Schildhorn/ BP 7 (neben RS 3 und BP2).....	126
Anhang Tabelle 27: Profil R1-R3/ Rodelbergweg	127

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der hierarchischen Struktur der Datenbank	5
Abbildung 2: Beispiel für Gutachtenspeichertitel und Parameterschlüssel.....	6
Abbildung 3: typische Trümmerschuttprofile in Berlin	13
Abbildung 4: pH, Carbonat, Kohlenstoff, Stickstoff, C/N-Verhältnis und Tongehalt von Trümmerschuttproben aus der Berliner Innenstadt.....	14
Abbildung 5: Variabilität der PAK- und Bleigehalte sowie Hauptkomponenten in 3 Trümmerschuttprofilen der Berliner Innenstadt.....	17
Abbildung 6: Korngrößenabhängigkeit der PAK-Belastung in 3 Trümmerschuttprofilen	19
Abbildung 7: Sulfatgehalte von 2 Trümmerschuttstandorten in Berlin [mg/kg]	21
Abbildung 8: prozentuale Verteilung der Siebfractionen am Beispiel eines Trümmerschuttprofils.....	23
Abbildung 9: Skelettgehalte in Horizontproben zweier Trümmerschuttstandorte	24
Abbildung 10: mobile und nachlieferbare Schwermetalle von 13 Schlacke-, Asche- und Sandproben	30
Abbildung 11: Desorption von Kupfer aus technogenen Substraten unter dem Einfluss von 3 verschiedenen Lösungsmitteln.....	33
Abbildung 12: Desorption von Blei aus technogenen Substraten unter dem Einfluss von 3 verschiedenen Lösungsmitteln.....	33
Abbildung 13: Schwermetallfracht Profil P2 (kapillarer Aufstieg ca. 0.2mm/d; SWR 73mm/a)	34
Abbildung 14: Cu-Fracht in Abhängigkeit vom Wasserhaushalt.....	35
Abbildung 15: Verteilung von Cadmium, Blei und Kupfer in der Grundgesamtheit	38
Abbildung 16: Verteilung von Zink, Arsen und Quecksilber in der Grundgesamtheit	39
Abbildung 17: Verteilung von PAK (16 PAK/EPA), Benzo(a)pyren und Mineralölkohlenwasserstoffe in der Grundgesamtheit.....	40
Abbildung 18.: Verteilung von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit über die Grundgesamtheit	41
Abbildung 19: Verteilung von pH-Wert und Leitfähigkeit im Bauschutt.....	43
Abbildung 20: Verteilung von Blei im Bauschutt.....	44
Abbildung 21: Verteilung von Kupfer im Bauschutt.....	44
Abbildung 22: Verteilung von Cadmium im Bauschutt	45
Abbildung 23: Verteilung von Zink im Bauschutt.....	45
Abbildung 24: Verteilung von PAK im Bauschutt	46
Abbildung 25: Verteilung von BaP im Bauschutt.....	46
Abbildung 26: pH und elektrische Leitfähigkeit von Bauschuttmischungen.....	47
Abbildung 27: Verteilung von Blei in Bauschuttmischungen.....	48
Abbildung 28: Verteilung von Kupfer und Cadmium in Bauschuttmischungen.....	48
Abbildung 29: Zink in Bauschuttmischungen	49
Abbildung 30: PAK in Bauschuttmischungen	49

Abbildung 31: Benzo(a)pyren in Bauschuttmischungen	50
Abbildung 32: pH und Leitfähigkeit in sandigen Substraten der Berliner Innenstadt.....	50
Abbildung 33: Bleibelastung in sandigen Substraten.....	51
Abbildung 34: Kupfer in sandigen Substraten.....	51
Abbildung 35: Cadmium in sandigen Substraten	52
Abbildung 36: Zink in sandigen Substraten.....	52
Abbildung 37: PAK in sandigen Substraten	52
Abbildung 38: BaP-Gehalte in sandigen Substraten.....	53
Abbildung 39: pH und Leitfähigkeit in Sandmischsubstraten	54
Abbildung 40: Blei in Sandmischsubstraten	54
Abbildung 41: Kupfer in Sandmischsubstraten	55
Abbildung 42: Cadmium in Sandmischsubstraten	55
Abbildung 43: Zink in Sandmischsubstraten	56
Abbildung 44: PAK in Sandmischsubstraten.....	56
Abbildung 45: BaP in Sandmiaschsubstraten	56
Abbildung 46: pH und Leitfähigkeit im Trümmerschutt	58
Abbildung 47: Blei und Cadmium im Trümmerschutt.....	58
Abbildung 48: Kupfer im Trümmerschutt.....	59
Abbildung 49: Zink im Trümmerschutt.....	59
Abbildung 50: PAK in Trümmerschutt	60
Abbildung 51: Benzo(a)pyren im Trümmerschutt.....	60
Abbildung 52: pH und Leitfähigkeit in humosen Oberböden.....	62
Abbildung 53: Blei in humosen Oberböden.....	63
Abbildung 54: Cadmium in humosen Oberböden	63
Abbildung 55: Kupfer und Zink in humosen Oberböden	64
Abbildung 56: PAK in humosen Oberböden.....	64
Abbildung 57: BaP in humosen Oberböden.....	65
Abbildung 58: pH und Kupfer im Mergel	66
Abbildung 59: Blei und Zink im Mergel.....	66
Abbildung 60: Vergleich der substratbezogenen pH-Werte	69
Abbildung 61: signifikante pH-Wertunterschiede zwischen den Substraten.....	70
Abbildung 62: Vergleich der substratbezogenen Bleigehalte.....	71
Abbildung 63: Vergleich der substratbezogenen Cadmiumgehalte	73
Abbildung 64: Vergleich der substratbezogenen Kupfergehalte	75
Abbildung 65: Vergleich der substratbezogenen Zinkgehalte.....	77
Abbildung 66: Vergleich der substratbezogenen PAK-Gehalte	79
Abbildung 67: Vergleich der substratbezogenen BaP-Gehalte.....	82
Abbildung 68: Vergleich der substratbezogenen PAK-Muster	85
Abbildung 69: mittlere Quotienten BbF/ BkF für alle Substrate.....	86

Zusammenfassung

Die Böden im Innenstadtbereich von Berlin haben im Laufe der Besiedlungszyklen eine intensive anthropogene Überprägung erfahren. Die ursprünglichen Bodenvergesellschaftungen fehlen weitestgehend und an deren Stelle dominieren Bodenaufschüttungen. Diese Aufschüttungen bedingen Kontaminationen durch Schwermetalle und organische Schadstoffe sowie veränderte Bodenreaktionen, Nährstoffangebote und Sorptionsverhältnisse gegenüber natürlichen Böden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zum Einen Ergebnisse eigener Laboruntersuchungen zu Bodeneigenschaften und Bodenlösungskonzentrationen von Schadstoffen urbaner Standorte in Berlin vorgestellt (Teil I/ Fallbeispiele). Zweitens wurden ca. 90.000 Datensätze zu Schadstoffkontaminationen und Bodeneigenschaften innerstädtischer Böden, die aus Gutachten der Berliner Bezirksämter stammen, statistisch ausgewertet (Teil II/ Datenbank). Die Arbeit greift dabei folgende Aspekte auf.

- In welchen Spannweiten sind urbane Böden Berlins durch Schadstoffe belastet und mit welchen Verteilungsfunktionen (Normalverteilung, Lognormalverteilung, Exponentialverteilung usw.) lassen sich die Kontaminationen beschreiben?
- Liegen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Substraten bezüglich ihrer Schadstoffgehalte und Bodeneigenschaften vor?
- Wie lassen sich real vorhandene Beziehungen zwischen Schadstoffen in den Substraten nachweisen und sind einzelne Substrate durch typische Schadstoffmuster gekennzeichnet?

Die Laboruntersuchungen an **Trümmerschutt** zeigten sehr schwach saure (s1) bis schwach alkalische (a2) Bodenreaktionen bei weiten C/N-Verhältnissen von 18 bis 80. Die Trümmerschuttpuben erwiesen sich als durch PAK sowie Schwermetalle hoch belastet. Überschreitungen der diesbezüglichen Vorsorgewerte nach BBodSchG traten in nahezu 80% aller Proben auf. Eine Korngrößen- oder eine Komponentenabhängigkeit der PAK-Belastung konnte anhand dieser Proben nicht festgestellt werden.

Die **Industrieraufschüttungen aus Schlacken und Aschen** waren ebenfalls gekennzeichnet durch teilweise erhebliche Überschreitung der Vorsorgewerte für Schwermetalle und PAK nach BBodSchG. Die Kationenaustauschkapazitäten der Industrieraufschüttungen variierten stark und lagen insbesondere in den Aschen noch über den Werten tonreicher Böden (20 cmol/kg nach Blume). Untersuchungen zur Schwermetallverfügbarkeit an diesen Proben nach der Methode von Zeien & Brümmer (1989) zeigten, dass zwischen der Höhe der mobilen und leicht nachlieferbaren Fraktion einerseits sowie der Ausgangskonzentration andererseits kein Zusammenhang bestand. Ebenso wenig bestand ein Zusammenhang zwischen der Schwermetallverfügbarkeit und der Art des Ausgangssubstrats.

Die Untersuchungen an der **Aufschüttung aus Industrieabfällen, Hausmüll und Trümmerschutt** ergaben hohe PAK- und Schwermetallbelastungen in den Bodenproben und in den Proben aus dem oberflächennahen Grundwasser. Um die auf der Fläche vorhandenen Desorptionsbedingungen für Schadstoffe möglichst naturnah wider zu spiegeln, wurden an den Bodenproben Desorptionsversuche mit Regenwasser, pH-8-Lösung sowie Rindenmulchlösung durchgeführt. Dabei zeigten Kupfer und Blei ein unterschiedliches Verhalten: während Kupfer in 90% der Proben die höchsten Desorptionsraten unter dem Einfluss der pH-8-Lösung aufweist, wird Blei in der überwiegenden Zahl der Proben durch die Rindenmulchlösung freigesetzt. Auf Basis der Desorptionsraten für Kupfer im pH 8-Versuch wurden Frachtszenarien berechnet mit Sl2 und Ls2 als Bodenart a) für Grünlandvegetation und b) für Baumvegetation. Die Berechnung wies den Standort mit Baumvegetation auf Sl2 als potenziell am höchsten Grundwasser gefährdend aus: die dort zu erwartende Sickerwasserrate und – damit

verbunden – Cu-Fracht lag mehr als 100% über der Fracht, die für den Grünlandstandort über lehmigem Substrat berechnet wurde. Ausgehend von den Ergebnissen der Desorptionsversuche und der Berechnungen zur Schadstofffracht wurden Empfehlungen zur Umgestaltung der Altlastenfläche ausgesprochen.

Um Bodendaten der Berliner Bezirksämter statistisch untersuchen zu können, wurde eine **Datenbank** mit hierarchischer Struktur entwickelt, in die ca. 90.000 Datensätze zu Schadstoffgehalten und Bodeneigenschaften in frei konvertierbarem Format aufgenommen wurden. Für die Grundgesamtheit der Proben sowie substratbezogen wurden die statistischen Verteilungen der Bodeneigenschaften und Schadstoffgehalte analysiert. Über die **Grundgesamtheit** liegen die Bodeneigenschaften pH-Wert und Leitfähigkeit normal verteilt vor, Schwermetalle und organischen Schadstoffe hingegen nahezu ausschließlich in linksschiefen Lognormalverteilungen. Das Gleiche trifft auf den pH-Wert sowie die Schadstoffverteilungen der einzelnen **Substrate** zu. Die Signifikanz der Merkmalsunterschiede zwischen den Substraten wurde mit einem nichtparametrischen statistischen Verfahren – dem multiplen Vergleich der p-Werte - untersucht. Bezogen auf die einzelnen Analysenparameter zeichnen sich viele signifikante Unterschiede zwischen den Substraten ab: exemplarisch seien hier die beiden Parameter „pH Wert“ und „Bleigehalt“ genannt: in ersterem unterscheidet sich Mergel signifikant von allen anderen Substraten außer Bauschutt. Bezüglich „Pb“ unterscheidet das Substrat „Trümmerschutt“ signifikant von allen weiteren Substraten der Auswertung.

Im letzten Teil der Arbeit wird auf **Beziehungen zwischen Parametern innerhalb der Substrate** eingegangen. Es wurden mittlere Verteilungen für Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe errechnet, um Substratspezifische PAK-Muster zu erkennen: z.B. unterscheiden sich die hier erfassten Bau- und Trümmerschuttproben zwar in der Höhe der Kontamination, weisen aber vergleichbare PAK-Muster auf. Nach dem Test verschiedener PAK-Quotienten auf ihre Eignung zur „Parent Compound Analyse“ wurde anhand des BbF/BkF-Quotienten nach Dickhut versucht, den Substraten PAK-Quellen zuzuordnen.

Für die Substrate Bauschutt, Trümmerschutt, Sand, Sandmischsubstrat und humoser Oberboden wurden Korrelationen zwischen den Schwermetallen untersucht, um spezifische „Schwermetallparagenesen“ zu erkennen. Hierfür wurden Rangfolgekorrelationen nach Spearman angewandt, da diese wesentlich besser konvergieren als einfache Korrelationsmethoden, die Normalverteilung der Messgrößen voraussetzen. Die nachgewiesenen Zusammenhänge sind signifikant (ab $p < 0,05$), aber nicht eng. Im Bauschutt und in sandigen Substraten besteht mit $r=0,7$ bzw. $r=0,78$ die engste Beziehung zwischen Chrom und Nickel. Im Bauschuttmischsubstrat sind Chrom und Arsen mit 0,72 die am stärksten korrelierten Schwermetalle. Die engste Korrelation im humosen Oberboden wurde mit nur 0,53 zwischen Blei und Zink nachgewiesen. Im Trümmerschutt sind nur wenige signifikante Zusammenhänge zwischen den Schwermetallen vorhanden, mit einem Korrelationskoeffizienten von nur 0,62 sind Nickel und Arsen am stärksten verbunden. Die Sandmischsubstrate weisen den engsten Zusammenhang mit 0,89 zwischen Kupfer und Zink auf.

Die Auswertung der Gutachtendaten erlaubt einen Überblick über die Belastungssituation urbaner Böden in Berlin. Die Bodenart-abhängigen Vorsorgewerte nach BBodSchG für die Schwermetalle Cadmium, Blei, Kupfer, Zink und Quecksilber werden jeweils durch einen hohen Prozentsatz der Proben überschritten. Das in den Gutachten am häufigsten benannte Substrat „Bauschutt“ weist die höchsten Spannweiten für Schadstoffe und Bodeneigenschaften auf, was auf die Heterogenität dieses Substrates zurückgeführt werden muss. Die Ergebnisse eigener Laboruntersuchungen zu Schadstoffgehalten von Trümmerschutt, Schlacken sowie Aschen unterscheiden sich partiell von den Aussagen der statistischen Datenauswertung: die Ursache hierfür ist zum Einen in der Heterogenität der Substrate zu sehen, zum Anderen kann aber unkorrekte Substratansprache in den Gutachten nicht ausgeschlossen werden.

Durch die eigenen Laboruntersuchungen und die Datenauswertung werden in erster Linie stoffliche Aspekte urbaner Böden behandelt – zukünftige Arbeiten sollten verstärkt physikalische Eigenschaften in den Mittelpunkt

Abstract

Soils in the inner city of Berlin have been changed strongly in the course of settlement. Natural soils have been replaced by filling material to a large extent. This often entails contamination with heavy metals and organic pollutants as well as changed soil reaction, nutrients and sorption conditions.

Firstly, this work shows the results of own investigations of properties of urban soils as well as the pollutant concentration in their leachate (part I; case studies). Secondly, I statistically evaluated about 90.000 data sets from soil expertises of six district exchanges of Berlin (part II; data base). The research objective was to answer the following questions:

- What are the contamination ranges of urban soils in Berlin and what are the most suitable distribution functions (Gaussian distribution, lognormal distribution, exponential distribution) for describing the contaminations?
- Do significant differences exist between several substrates because of their contaminations?
- What are the appropriate mathematic methods for verifying relationships between pollutants in substrates?
- Do several substrates show characterizing patterns of pollutants?

Laboratory investigations of building rubble distinguish this substrate as very low acidic to alkalescent ($s_1 - a_2/KA_5$) with a wide C/N-ratio of 18 – 80. The rubble was highly contaminated with PAH and heavy metals. We did not find any dependence of contamination height on the grain size or kind of technogenic compounds in the rubble samples.

The slag- and ash-rich industrial waste was also characterized by partially considerable exceedance of prevention values of the Bundesbodenschutzgesetz. The kation exchange capacity of this material was heavily varying. Ashes showed the highest values. Investigation of heavy metal availability in the industrial waste (method of Zeien & Brümmer 1989) showed no connection between height of contamination and amount of mobile fraction, nor was there any relation to the kind of substrate.

Investigation of mixed substrates (industrial and residential waste, building rubble) revealed high PAH- and heavy metal contaminations in the substrates, as well as in the leachate of the investigated area. Desorption experiments with rainwater, pH 8-solution and bark-mulch-solution showed different behaviour of copper and lead: copper desorbed the highest amounts under the influence of pH 8-solution, whereas lead showed the highest desorption under rainwater.

Based on the Desorption rates for copper I estimated two case scenarios for his dislocation to groundwater, depending on soil type and vegetation. Highest dislocation rates were found for sandy soils with grass vegetation, lowest for loamy soil with trees.

For statistic analysis of data originating from soil expertises, I developed a hierarchic data base containing about 90.000 data sets of pollutants and soil properties. I analyzed the distribution function of pollutants and of soil properties for the whole entity as well as depending on substrates.

The pH-value and electrical conductivity of the whole entity can be described by a Gaussian function. Heavy metals and PAH on the other hand are subjected to a left skewed lognormal distribution function. The same can be said about distribution functions in substrates.

I investigated the significance of the difference between substrates with non parametric statistical methods and I found a lot of significant differences in relation to various parameters. Building rubble for example is distinguishable from all the other substrates because of its lead content.

The last part of this work contains an correlation analyze between parameters inside of substrates, investigation of substrat-dependent PAH-patterns and a try to identify PAH-sources on the hand of PAH-ratios (Parent Compound Analyse).

In order to identify specific heavy metal paragenesis within widespread substrates such as rubble, building rubble, sand, blended sands and humic top soils I had to investigate correlations between heavy metals. Because of the lognormal distribution of the parameters I utilized the non-parametric Spearman`s rank correlation coefficient. The verified coherences were significant, but not close.

The statistical analysis of data from soil expertises gives an overview of the contamination of the urban soils of Berlin. A high percentage of measured values of cadmium, lead, copper, zinc and mercury exceed the prevention values of the Bodenschutzgesetz. The frequently mentioned substrate in expertises – building rubble – shows the widest ranges of pollutants and soil properties because of its heterogeneity. Results of own investigations of rubble, slag and ashes differ partially from conclusions of statistic analysis: this can either be caused by the heterogeneity of substrates or by incorrect substrate declaration.

Own laboratory investigations and data from soil expertises primarily discuss chemical aspects of urban soils. Future research should attract notice to physical properties of urban soils, so that spacious mass balances and leaching of pollutants can be predicted.

1 Einleitung

Der Anteil Menschen, der in Städten lebt, wächst weltweit: 2007 lebte mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in urbanen Regionen (Lehmann & Stahr 2007). Dementsprechend werden die Boden/Mensch-Interaktionen intensiver. Unter diesem Aspekt sind detaillierte Kenntnisse urbaner Böden nötig, um deren Funktionsfähigkeit als Filter, Puffer, Transformator und Speicher innerhalb des Ökosystems zu bestimmen, um ihre nachhaltige Nutzung zu ermöglichen und um Menschen sowie natürliche Ressourcen wie Grundwasser vor schädlichen Einflüssen zu bewahren.

Rohstoffe durchlaufen für ihre Verwertung einen Kreislauf: sie werden abgebaut, veredelt, genutzt und letztlich als Abfall wieder verworfen. In der Regel werden diese Stoffe in deutlich höheren Konzentrationen als im natürlichen Zustand und in großen Mengen vor allem in Böden urbaner Regionen punktförmig (Deponien) oder diffus (atmosphärische trockene und nasse Deposition) verteilt. In Bezug auf die Schutzgüter „menschliche Gesundheit“, „Boden“ und „Grundwasser“ können diese ehemaligen Rohstoffe so als Schadstoffe wirken.

Bei der Begutachtung urbaner Böden zeigen sich meist komplizierte Verhältnisse: reguläre und illegale Ablagerungen liegen eng beieinander, deponierte Substrate werden überschwemmt oder durch Grundwasser beeinflusst und atmosphärische Stoffeinträge verändern die Böden zusätzlich. Sie sind häufig durch hohe Skelettgehalte gekennzeichnet, was eine Veränderung von Speichergrößen und Fließquerschnitten bewirkt. Damit verbunden ist eine Reduzierung des Feinbodengehaltes als Träger der natürlichen Bodenfunktionen (Burghardt 1997, 2001). Im Ergebnis dessen ist die Heterogenität der Böden in urbanen Räumen sehr hoch und ihre Eigenschaften variieren stark auf engstem Raum. Auch lassen sich statistisch gesicherte Erkenntnisse über die Beziehungen zwischen einzelnen Komponenten und Schadstoffen in einer Beprobungsfläche oder innerhalb verschiedener Substrate nur schwer finden. So wurde in Einzeluntersuchungen versucht, Zusammenhänge zwischen dem Substrattyp und der Schadstoffbelastung abzuleiten. Blume et al. (1996) charakterisierte im Verbundvorhaben "Bewertung anthropogener Stadtböden" 14 Leitprofile bezüglich ihrer Schadstoffgehalte und Bodeneigenschaften. Anhand dieser Daten konnten keine substratspezifischen Gehaltsbereiche oder Tiefengradienten für Schwermetalle nachgewiesen werden. Auch Meuser (1996) konnte in seiner Arbeit einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen den quantitativ erfassten Beimengungsgrad technogener Substrate und den Schadstoffgehalten im Boden nicht errechnen. Mekiffer & Smettan (1995) untersuchten am Beispiel von Trümmerschuttböden komponentenbedingte PAK-Gehalte. Smettan et al. (1996) stellten fest, dass unterschiedliche technogene Komponenten im Trümmerschutt unterschiedliche Kontaminationen bewirken und forderten bei der Klassifizierung eine Trennung des Schlacke- und aschereichen Trümmerschutts vom Bauschutt. Allerdings ließen sich die an reinen Komponentenproben gewonnenen Ergebnisse nicht auf Horizontproben übertragen.

Renger et al. (1998) kam hingegen zu dem Schluss, dass die Schadstoffgehalte in urbanen Böden vor allem von der Art des Substrates (z.B. Trümmerschutt, Bauschutt, Hausmüll) bzw. vom Ursprung der Belastung (z.B. Abwasser, Klärschlamm, Straßenverkehr) abhängig sind.

Im Rahmen dieser Arbeit werden erstens Ergebnisse eigener Laboruntersuchungen zu Bodeneigenschaften und –kontamination urbaner Standorte in Berlin vorgestellt (Teil I/ Fallbeispiele). Zweitens werden ca. 90.000 Datensätze zu Schadstoffkontaminationen und Bodeneigenschaften innerstädtischer Böden, die aus Gutachten der Berliner Bezirksämter stammen, statistisch ausgewertet (Teil II/ Datenbank). Die Bodengutachten wurden

unter verschiedenen Aspekten erstellt, z.B. im Zusammenhang mit Flächennutzungsplanung, Bauanfragen oder bei Altlastenverdacht.

Mit der vorliegenden Arbeit sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- In welchen Spannweiten sind urbane Böden Berlins durch Schadstoffe belastet und mit welchen Verteilungsfunktionen lassen sich die Kontaminationen beschreiben?
- Liegen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Substraten bezüglich ihrer Schadstoffgehalte und Bodeneigenschaften vor?
- Wie lassen sich real vorhandene Beziehungen zwischen Schadstoffen in den Substraten nachweisen und sind einzelne Substrate durch typische Schadstoffmuster gekennzeichnet?

Die eigenen Untersuchungsergebnisse und die Auswertung der Daten aus Bodengutachten sollen einen umfassenden Überblick über die Belastung anthropogen veränderter Böden Berlins sowie fundierte Aussagen zur Substratabhängigkeit von Schadstoffbelastungen und Bodeneigenschaften ermöglichen.

2 Material und Methoden

2.1 Laboruntersuchungen an urbanen Substraten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden anthropogen veränderte Böden Berlins hinsichtlich ihrer Bodeneigenschaften und Schadstoffkontamination untersucht. Hier vorgestellt werden die Untersuchungen zu

- 5 innerstädtischen Trümmerschuttprofilen (Tab. 2/ Anhang)
- 6 Trümmerschuttprofilen entlang eines Transekts auf dem Teufelsberg in Berlin (Ta. 5-10/ Anhang)
- 5 Profilen einer asche- und schlackehaltigen Industriefaufschüttung (Tab.21-26/Anhang) sowie
- 3 Profilen und Proben des oberflächennahen Grundwassers einer gemischten Industriefaufschüttung über Talsand (Tab. 27/ Anhang).

Die im Regelfall angewandten Untersuchungsmethoden sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Untersuchungsmethodik für Standardparameter und Schwermetalle

Untersuchungsziel	Verfahren
Bestimmung der Schwermetallgehalte (Pb, Zn, Cu, Cd, As, Hg)	DIN 38 406 / DIN 38414/ Teil7
Bestimmung der 16 PAK nach EPA	Extraktion mit Acetonitril (Alternativverfahren a/ Berl.Liste), HPLC (DAD/ FLD)
Bestimmung des pH-Wertes	10g FE/ 25ml 0,01mol CaCl ₂ -Lösung bis Gleichgewichtslösung schütteln (4h), Analyse über pH-Meter der Fa. KNICK
Kationenaustauschkapazität	Verfahren nach MEHLICH (1942): Bestimmung der Einzelkationen und nach Rücktausch Bestimmung der Summe der austauschbaren Kationen
Versuche zur Schwermetallverfügbarkeit	nach ZELEN & BRÜMMER (1989), Extraktion mit Ammoniumnitrat (mobile SM-Fraktion) und Ammoniumacetat (wasserlösliche und austauschbare SM)/ AAS
Anionenanalytik	a) Boden/Lösungsverhältnis 1:5/ Filtration und Membranfiltration; Ionenchromatografie (2000i/SP DIONIX), b) mittels Kapillarelektrophorese Hewlett Packard 3DCE mit UV- Detektor aus dem wässrigen 1:2 Extrakt (HFA A3.2.2.1/ Grundwerk 2005)
Oxalataufschluss zur Bestimmung der leicht löslichen, amorphen oxidischen und hydroxidischen Verbindungen des Eisens und Aluminiums/	In Anlehnung an DIN 19684-6, nach "Handbuch der forstlichen Analytik" (Grundwerk 2005)
Dithionitaufschluss zur Bestimmung der pedogenen Eisenoxide und Al-Oxide	
Desorptionsversuche	Batchversuch 3-stufig: Boden-Lösungsverhältnis 1:5, LM Regenwasser, Flusswasser, pH-8-Lösung (Abb2/ Anhang)

2.2 Aufbau der Datenbank zu urbanen Substraten

2.2.1 Die Datensätze

Datenbasis sind Gutachten von Bezirksämtern zu urbanen Böden im Innenstadtbereich von Berlin. Das im Rahmen der Gutachten beprobte Gebiet umfasst eine Fläche von etwa 200 km². Aus diesen Gutachten wurden

Datensätze zu ca. 5000 Proben erfasst, die relativ gleichmäßig und zufällig über diese Fläche verteilt sind. Die Beprobung und Analytik wurde durch etwa 70 unabhängige Gutachter vorgenommen. Die Proben wurden im Maximalfall auf vier Bodeneigenschaften und 30 Schadstoffe untersucht, häufig wurde jedoch eine deutlich geringere Zahl an Parametern pro Probe analysiert.

In der Datenbank sind alle Primärdaten der verschiedenen Gutachter unverändert in einem frei konvertierbaren Format erfasst. Eine Konvertierung und Selektion der Daten erfolgte erst im Rahmen der statistischen Untersuchungen.

Datengrundlage der vorliegenden Untersuchung sind im Einzelnen Daten zu:

- 162 Bodengutachten aus verschiedenen Stadtbezirken Berlins
- 3 Trümmerschuttstandorten (eigene Laboruntersuchung)
- einer Asche- und Schlackefläche (eigene Laboruntersuchung)
- einer Industriemüllfläche (eigene Laboruntersuchung)

Auswahlkriterium für die Aufnahme von Analysendaten aus Bodengutachten der Bezirksämter in die Datenbank ist die vollständige Profilbeschreibung mit Benennung der technogenen Komponenten, der Bodenfarbe und des Substrates. Die Vergleichbarkeit der Analysenverfahren für die Bestimmung der Einzelparameter muss gewährleistet sein.

Pro Gutachten wurden im Durchschnitt 10 Bohrpunkte in jeweils 3 Entnahmetiefen beprobt, so dass insgesamt ca. 5000 Bodenproben für die Auswertung zur Verfügung standen. An diesen Bodenproben wurden im Detail meist folgende Parameter bestimmt:

- 16 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe/ EPA
- die Schwermetalle Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Zn, As und Hg
- die Bodenparameter pH, Leitfähigkeit, Glühverlust sowie der Carbonatgehalt
- die Substratkennzeichnung durch Farbe, Substrattyp, technogene Komponenten sowie die Bodenart

Häufig analysiert wurden weiterhin die Parameter Cyanide, Phenole, Mineralölkohlenwasserstoffe, Polychlorierte Biphenyle (6 PCB nach Ballschmiter) sowie Herbizide/Insektizide.

Unter Einbeziehung aller verwertbaren Daten umfasst die Datenbank ca. 150.000 Analysenwerte und ca. 30.000 Datensätze mit Substratbeschreibungen, von denen letztlich 90.000 Datensätze in die statistische Auswertung einbezogen wurden.

2.2.2 Beprobungs- und Analysenverfahren der Bodengutachten

Die Probenahme auf den einzelnen Untersuchungsflächen erfolgte in Abhängigkeit vom Gutachtenzweck in der Regel nach den Vorgaben des Auftraggebers. In den meisten Fällen wurde in einem Raster mit ungleichmäßigen Abständen beprobt. Als Probenahmeverfahren wurde in der Regel die Rammkernsondierung eingesetzt mit einer Probeentnahme in definierten Abständen über die Horizontgrenzen hinweg.

Übliche Probenahmeintervalle waren 0-0.30 m, 0.30-1.0 m, 1.0-2.0 m 2.0-3.0 m usw., was den Vorgaben nach Berliner Liste entsprach. In diesen Fällen wurde den Proben in der Datenbank die Bezeichnung „Mischprobe“ zugeordnet und die Substratbezeichnung aus dem Schichtenverzeichnis entsprechend den Anteilen der erfassten Horizonte zusammengefasst. In ca. 20% der Fälle erfolgte eine horizontbezogene Probenahme. Vereinzelt wurden Oberflächenmischproben entnommen und analysiert. Diese Proben wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da keine Substratkennzeichnung zugeordnet werden konnte.

Um die Vergleichbarkeit der Analysenergebnisse zu gewährleisten, wurde bei der Datenauswertung bevorzugt auf die Gutachten zurückgegriffen, deren Analysenparameter nach den Vorgaben der Berliner Liste 1993/1997 ermittelt wurden.

2.2.3 Hierarchie der Datenbank

Abbildung 1 zeigt die hierarchische Struktur der Datenbank. Jedes erfasste Gutachten erhielt einen eigenen Speichertitel, der sich aus dem Datum seiner Erstellung und der Nummer des jeweiligen Bezirksamtes zusammensetzt. Die allgemeinen Angaben wurden in der Regel dem Textteil des Gutachtens entnommen und enthalten Informationen zu:

- Analysenmethoden
- Maßeinheiten für Analysenwerte
- Untersuchungszweck
- Probenahmeverfahren
- Erstellende Firma

Für jedes Gutachten wurden Bohrungen in unterschiedlicher Anzahl abgeteuft. Diese Bohrungen sind eindeutig durch eine Bohrnummer gekennzeichnet. Ortsbezogene Parameter konnten aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht aufgenommen werden.

Aus jeder Bohrung resultiert eine unterschiedliche Anzahl von Bodenproben. In der Datenbank werden die Proben, die aus einer Bohrung stammen, mit der Bohrnummer und einer fortlaufenden Nummer entsprechend der Probenreihenfolge versehen, sowie durch Angaben zur Probenahmetiefe eindeutig charakterisiert.

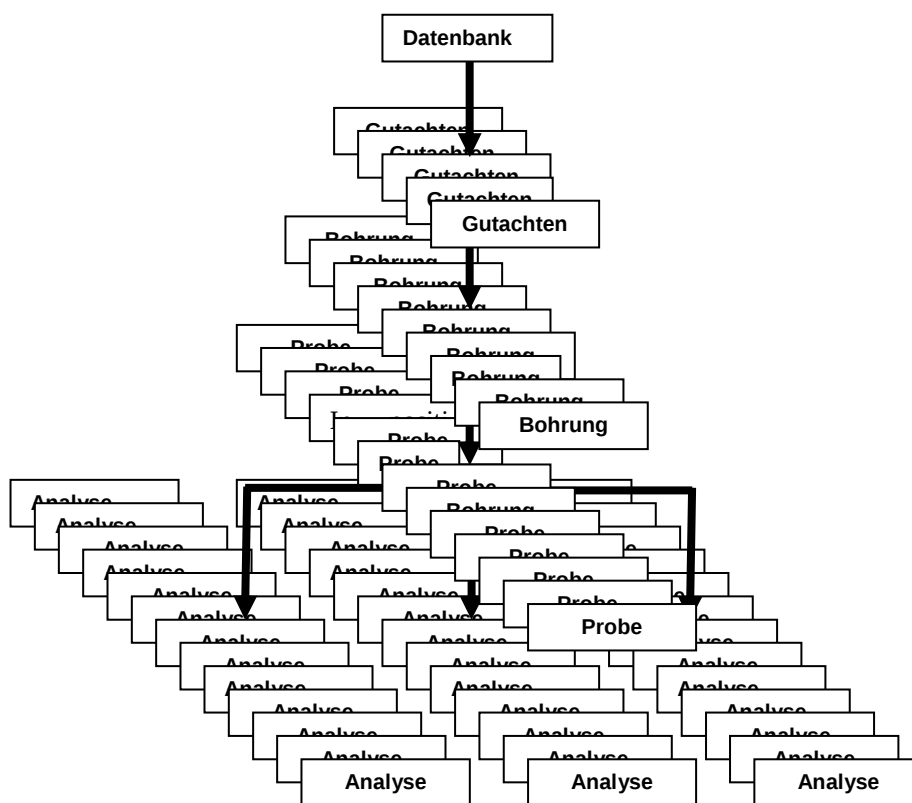


Abbildung 1: Schematische Darstellung der hierarchischen Struktur der Datenbank

Zu jeder Bodenprobe wurde das Substrat entsprechend den Angaben im Profilverzeichnis bzw. im Gutachten-text, beschrieben. Folgende Parameter wurden in der Datenbank erfasst:

- Art der Probe (Horizont- oder Mischprobe)
- Substrattyp
- Technogene Komponenten
- Bodenart bzw. Korngrößenzusammensetzung
- Bodenfarbe

- Grundwasserstand
- Probenmächtigkeit

Jede dieser Bodenproben wurde durch die Gutachterfirmen auf eine unterschiedliche Anzahl von Analysenparametern untersucht. Die Analysenwerte wurden jeweils als einzelner Datensatz unter der zugehörigen Probe aufgeführt. Analysen werden in folgender Struktur gespeichert:

- Alphanumerischer Analysenschlüssel
- Analysenwert
- Optionaler Kommentartext

Jedem zu erfassenden Merkmal wurde ein eigener dreiteiliger Schlüssel zugewiesen. Ein optionaler Kommentartext ermöglicht die Berücksichtigung von Randinformationen. Ein Beispiel für die Datenerfassung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Methode zur Erfassung der Primärdaten in die Datenbank hat einen erheblichen Einfluss auf die erforderliche Arbeitsleistung und die erreichbare Qualität der Daten. An die Qualität der Datenbank, insbesondere die Fehlerfreiheit, wurden sehr hohe Anforderungen gestellt. Speziell musste die Quote für systematische Fehler, die sich durch eine große Anzahl von Messwerten nicht statistisch reduzieren lassen, sehr gering gehalten werden. Der Einsatz von Maßnahmen zur Eliminierung von Ausreißern war nur bedingt möglich, da die Verteilung der realen Daten sich in einem sehr breiten Spektrum bewegt. Außerdem ist die Verteilung der Daten das Untersuchungsziel der Arbeit selbst, so dass deren Eigenschaften nicht als bekannt vorausgesetzt werden konnten.

Die Gutachten wurden in einem ersten Arbeitsgang durch einen Erfasser aufgenommen. Ein unabhängiger Prüfer verifizierte die übernommenen Daten nochmals vollständig. Bei zu hoher Fehlerquote wurde das Gutachten komplett verworfen.

Die Gestalt der verschiedenen Gutachten und die Darstellung der Analysendaten ist sehr variabel. Um eine flexible und schnelle Erfassung zu ermöglichen, erfolgte die Datenaufnahme nicht über Erfassungsmasken sondern in einem freien Textformat. Für etwa 50 % der Analysendaten konnte ein Handscanner (Lesestift) eingesetzt werden.

```
03950722.txt Gutachten aus dem BA Wedding vom 22.07.95

rks 1/ 1; 0.3-1.0 Rammkernsondierung 1, 1. Probe, Tiefe 0.3-1m

b c c 2.3 bodenkundl. Parameter, Gesmtkohlenstoff 2.3%
a s cr 5.5 anorgan. Analytik Schwermetall Chrom 5.5ppm
a s cd 0.3 anorgan. Analytik Schwermetall Cadmium 0.3ppm
a s cu 5.0 anorgan. Analytik Schwermetall Kupfer 5.0ppm
o p ap 0.9 organ. Analytik, PAK Benzo(a)pyren 0.9ppm
o p s 10,7 organ. Analytik, PAK Summe 10.7ppm
k s ts bs 70 Kopfdaten, Substrat: technogen, Bauschutt 70%
k s ns to 100 Kopfdaten, Substrat: natürlich, Torf 100%
** originale Texte
```

Abbildung 2: Beispiel für Gutachtenspeichertitel und Parameterschlüssel

Die Datenstruktur sichert die weitgehend unmodifizierte Speicherung von Primärinformationen. Eine Extraktion der Analysenwerte erfolgte aus der hierarchischen Datenbank in Form von Wertelisten, wie sie zur Verwendung von statistischer Standardsoftware erforderlich sind.

2.3 Statistische Analyse

2.3.1 Verteilungsanalyse

Jede Häufigkeitsverteilung stellt eine Zuordnung zwischen variierenden Merkmalen und ihren empirisch gefundenen oder theoretisch ermittelten Häufigkeiten dar [MARSAL 1979]. Man unterscheidet zwischen diskreten

und kontinuierlichen Verteilungen. Ein Beispiel für die diskrete Verteilung ist die wechselnde Anzahl einzelner Schlackestücke in Stichproben eines Aufschüttungsbodens, während deren Gewichtsanteil an Stichproben dieser Grundgesamtheit einer kontinuierlichen Verteilung entspricht. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Analysenwerte entsprechen kontinuierlichen Verteilungen. Aus diesem Grund wird auf diskrete bzw. Anzahlverteilungen nicht näher eingegangen.

Eine Verteilung ist gekennzeichnet durch ihre Wahrscheinlichkeits- und Verteilungsfunktion sowie durch die Parameter Mittelwert (Schätzung für den Erwartungswert), Streuung/Varianz, Standardabweichung, Schiefe und Kurtosis.

Tabelle 2 zeigt die wichtigsten stetigen Verteilungen.

Tabelle 2: Charakteristika verschiedener Verteilungstypen

Verteilungstyp	Wahrscheinlichkeits (Dichtefunktion)	Verteilungsfunktion	Erwartungswert	Varianz
stetige Verteilung	$f(x) = \int_{-\infty}^x f(\varepsilon) d\varepsilon$			0.5
Normalverteilung	$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$E(e^{itX}) = e^{i\mu t - \frac{1}{2}\sigma^2 t^2}$	$E(x) = \mu$	$Var(x) = \sigma^2$
Logarithmische Normalverteilung	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sqrt{\frac{1}{t}}$	$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$	$Var(X) = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$
Exponentialverteilung	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$	$E(X) = \frac{1}{\lambda}$	$Var(X) = \frac{1}{\lambda^2}$

Für eine stetig verteilte Zufallsvariable X ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Verteilungsfunktion F und der Dichtefunktion f zu

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

falls F (wenigstens stückweise) differenzierbar ist.

Die größte Bedeutung unter den stetigen Verteilungsmodellen kommt der **Gaußschen Normalverteilung** zu. Eine Normalverteilung ist durch die Angabe des Lageparameters μ und des Streuungsparameters σ^2 vollständig beschrieben. Die Wendepunkte des Funktionsgraphen einer Normalverteilungs-Dichte liegen an den Stellen μ . Eine besondere Bedeutung hat die Normalverteilung mit $\mu = 0$ und $\sigma^2 = 1$, die so genannte Standard-

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Normalverteilung $n(0;1)$. Jede $n(\mu; \sigma^2)$ -verteilte Zufallsvariable X lässt sich durch die Transformation in eine standard-normalverteilte Zufallsvariable Z überführen. Deswegen reicht es aus, die Standard-Normalverteilung zu tabellieren.

Für eine Vielzahl von Anwendungsfällen spielen jedoch auch andere stetige Verteilungsmodelle eine Rolle.

So eignet sich die **Lognormalverteilung** zur Beschreibung von Zufallsvariablen, die nur positive Werte annehmen können und in schiefer Verteilung vorliegen. Grundgesamtheiten, in denen sehr kleine oder sehr große Werte dominieren, werden folgerichtig mit dieser Verteilung beschrieben. Eine Lognormalverteilung ist für Zufallsvariablen X gegeben, wenn $\ln(X)$ normal verteilt ist. Die logarithmische Normalverteilung (Lognormalverteilung) einer stetigen Zufallsvariablen ist durch die Parameter μ und σ^2 sowie durch die Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

für $x > 0$ und $f(x) = 0$

gekennzeichnet.

Die Exponentialverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen. Sie wird vorrangig bei der Beantwortung der Frage nach der Dauer von zufälligen Zeitintervallen benutzt und behandelt Probleme mit konstanter Ausfallrate λ . Anwendungsbeispiele liegen z.B. in der Betrachtung der Lebensdauer von Atomen beim radioaktiven Zerfall oder der Lebensdauer von Bauteilen, Maschinen und Geräten (wenn Alterungserscheinungen nicht betrachtet werden müssen)

Die Exponentialverteilung wird auch als typische Lebensdauerverteilung bezeichnet.

Die Daten der Bodengutachten zu Schadstoffgehalten und Bodeneigenschaften werden hinsichtlich ihrer Verteilung geprüft. Der Test auf Normalverteilung erfolgt über den Vergleich des arithmetischen Mittelwertes mit dem Median.

2.3.2 Behandlung von Werten unterhalb der Nachweisgrenze

In den Protokollen der Gutachten treten häufig Analysenwerte unterhalb der Nachweisgrenze auf. Die Behandlung dieser Werte stellt in der Statistik ein Problem dar und war häufig Gegenstand von Diskussionen (z.B. DVWK 1990, HELSEL 1990). Für die statistische Auswertung von Bodendaten, beispielsweise die Berechnung von Mittelwert oder Standardabweichung, sind konkrete Zahlenwerte erforderlich, Ergebnisse unterhalb der NWG stellen jedoch Zahlenbereiche dar. Werden im Rahmen der statistischen Auswertung Analysenwerte $< NWG$ gesetzt, bewirkt das z.B. zu niedrige Mittelwerte. Setzt man diese Analysenwerte mit der Nachweisgrenze gleich, ergeben sich in der statistischen Auswertung zu hohe Ergebnisse. Das Ansetzen der halben Nachweisgrenze für alle Werte $< NWG$ bedingt mindestens eine bimodale Verteilung der Analysenparameter und damit Schwierigkeiten in der Korrelationsanalyse (KÜHN et al. 1996).

In dieser Arbeit wird folgende Herangehensweise gewählt: Für jedes Analysenverfahren wird als mittlere Nachweisgrenze (NWG) der geringste in allen Gutachten gemessene Wert festgelegt. Alle Analysenwerte $< NWG$ werden per Zufallsgenerator zwischen "0" und dieser mittleren Nachweisgrenze verteilt.

2.3.3 Bestimmung von Beziehungen

In Abhängigkeit der Anzahl der zu korrelierenden Variablen unterscheidet man zwischen bivariablen und multivariablen Methoden. Nach dem Skalenniveau der Variablen lassen sich die Methoden in die Gruppen metrisch, ordinal und nominal einteilen. Bei den metrischen Verfahren werden die Messwerte korreliert, bei den ordinalen Methoden benutzt man die Rangfolge der nach der Grösse sortierten Messwerte und die nominalen Verfahren teilen die Messwerte in wenige Klassen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Korrelations- und Kontingenzkoeffizienten (Röhr et al. 2007)

Skalenniveau der beteiligten Variablen X_i	für bivariable Verteilungen	für multivariable Verteilungen
I Metrisch	Produkt-Momenten-Korrelationskoeffizient r_{12} biserieller Korrelationskoeffizient r_{bis} punktbiserieller Korrelationskoeffizient r_{pbis}	partieller Korrelationskoeffizient $r_{12 \cdot 34 \dots m}$ multipler Korrelationskoeffizient $r_{1 \cdot 23 \dots m}$
II Ordinal	Rangkorrelationskoeffizient R von Spearman (und korrigierte Formel r_{R^*} nach Kendall) Rangkorrelationskoeffizient τ von Kendall	Johnsons partieller Rangkorrelationskoeffizient $\Phi_{12 \cdot 3}$ Kendalls partieller τ -koeffizient $\tau_{1 \cdot 23}$ multipler Rangkorrelationskoeffizient $\tau_{1 \cdot 23 \dots m}$
III Nominal	Quadrantenkorrelation ϕ und ϕ_{korr} Tetrachorischer Koeffizient r_{tet} Kontingenzkoeffizient K Kontingenzkoeffizienten C	partieller Quadranten-Koeffizienten $\phi_{12 \cdot 3}$ partieller Kontingenzkoeffizient $K_{12 \cdot 3}$

Nachfolgend werden die in Tabelle 3 benannten Koeffizienten erläutert.

Produkt-Momenten-Korrelationskoeffizient r

Der in der Statistik am häufigsten verwendete Korrelationskoeffizient zur Bestimmung von Beziehungen basiert auf der Produkt-Momenten-Formel nach Pearson (1966). Nimmt man einen linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen x und y an, so wird der Zusammenhang durch die folgende Gleichung beschrieben

Dabei ist x und y die auf die entsprechenden Mittelwerte normierten Messwerte. Die Formel ergibt automatisch

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} \quad \text{mit } -1 \leq r \leq +1$$

das richtige Vorzeichen von r . Sie zeigt deutlich die Symmetrie zwischen den Zufallsvariablen X und Y .

Die Produkt-Momenten-Methode setzt normalverteilte Zufallsvariablen voraus. Bestehen bei den zu korrelierenden Zufallsvariablen signifikante Abweichungen von der Normalverteilung, so gibt es verschiedene Möglichkeiten, dies zu berücksichtigen, indem man verteilungsfreie Korrelationsrechnungen durchführt.

Rangkorrelationskoeffizient r_R nach Spearman

Die wichtigste Methode, die Korrelationsrechnung verteilungsfrei durchzuführen, ist die Rangkorrelationsrechnung nach Spearman (Spearman 1904, 1908). Dieses Verfahren weist den Vorteil auf, auch bei nichtlinearen Regressionen (z.B. logarithmischer oder exponentieller Zusammenhang) brauchbare Abschätzungen für die

Korrelation zu liefern. Weitgehend monotone Regression (d.h. Regressionskurve ohne Maxima und Minima) und stetige Grundgesamtheiten werden jedoch vorausgesetzt (Schönwiese 1985).

Der Bestimmung nach Spearman liegt das Konzept zugrunde, die Rangskalen den Maßskalen gleichzusetzen und die Rangplätze rechnerisch wie Messwerte zu behandeln. Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman lautet

$$r_R = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{mit } i = 1, \dots, n \quad 0 \leq r_R \leq +1$$

wobei beide Zufallsvariablen in eine aufsteigende Rangfolge gebracht werden müssen und d_i die Rangplatzdifferenzen sind. Wie in der Formel ausgedrückt, gehen dann die quadratischen Rangplatzdifferenzen in die Berechnung ein. Bei gleichen Messwerten werden gleiche Rangplätze vergeben.

Korrigierte Spearman-Formel r_R nach Kendall

Treten sehr viele gleiche Messwerte und damit mehrfach belegte Rangplätze auf (Richtwert > 25%) sollte die durch Kendall (1969) modifizierte Form der Spearman-Formel

$$r_R = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1) - T_x - T_y} \quad \text{mit } 0 \leq r_R \leq +1$$

mit

$$T_x = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J [h_j^3(x) - h_j(x)]$$

und

$$T_y = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J [h_j^3(y) - h_j(y)]$$

verwendet werden, wobei h_j die Anzahl jeweils gleicher Rangplätze in den Zufallsvariablen X und Y ist und J angibt, wie oft dies der Fall ist.

Rangkorrelationskoeffizient τ von Kendall

Die Methode der Berechnung des Rangkorrelationskoeffizient τ von Kendall (1969) beruht auf dem Prinzip der Auszählung von Inversionen I (Vertauschen der Rangplätze) in der Y -Rangfolge bei natürlich geordneter X -Rangfolge.

$$\tau = 1 - \frac{4I}{n(n-1)} \quad \text{mit } -1 \leq \tau \leq +1$$

Sind in der Y -Folge viele gleiche Ränge, sogenannte Rangbindungen vorhanden, so muss die Gleichung ähnlich der korrigierten Spearman-Formel um ein Korrekturglied erweitert werden (Sillitto 1947).

Quadrantenkorrelation Φ

Eine weitere Möglichkeit der verteilungsfreien Korrelationsrechnung ist die so genannte Quadrantenkorrelation die den Nominal-Korrelationen zuzuordnen ist. Die Darstellung der Datenpaare erfolgt in einem Streudiagramm, das durch die Mediane der Zufallsvariablen X und Y in vier Quadranten geteilt wird. Entsprechend der Häufigkeiten der Datenpaare in den vier Feldern A, B, C und D gilt nun

$$r_v = \frac{AD - BC}{\sqrt{(A+B)(A+C)(B+D)(C+D)}} \quad \text{mit } -1 \leq r_v \leq +1$$

Gelegentlich findet man dafür auch die Formel

$$r_v^* = \Phi = \cos \left[180^\circ / \left(1 + \sqrt{\frac{AD}{BC}} \right) \right]$$

wobei r_v^* auch als „Phi-Koeffizient“ Φ bezeichnet wird (Schönwiese 1985).

Um statistische Zusammenhänge zwischen den Parametern der Datenbank – z. b. typische Kontaminationsmuster in urbanen Substraten – zu erkennen, werden bi- und multivariate Datenanalysen durchgeführt. Für die Korrelationsanalysen werden ordinal skalierte Daten verwendet, da nicht von einer Normalverteilung der Analysendaten ausgegangen werden kann.

3 Ergebnisse

I urbane Böden in Berlin – Fallbeispiele

Die Böden im Innenstadtbereich von Berlin haben im Laufe der Besiedlungszyklen eine sehr starke anthropogene Überprägung erfahren. Die ursprünglichen Bodenvergesellschaftungen fehlen weitestgehend. An deren Stelle dominieren Bodenaufschüttungen, die sowohl aus natürlichen Substraten, aus technologischen Substraten oder aus einer Mischung beider Materialien bestehen können. So sind neben Lehm, Mergel, Sand und Torf, Siedlungs-, Trümmer- und Straßenschutt, Industrie- und Hausmüll, Aschen und Schlacken zu finden. Diese Aufschüttungen bedingen Kontaminationen durch Schwermetalle wie Blei, Kupfer, Zink, Cadmium, Arsen, Quecksilber und organische Schadstoffe wie Polychlorierte Biphenyle, Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe, Mineralölkohlenwasserstoffe oder Phenole. Die Bodenreaktion, das Nährstoffangebot sowie das Ad- und Desorptionsverhalten anthropogen beeinflusster Böden ist gegenüber natürlichen Böden verändert.

3.1 Trümmerschutt

In Deutschland entstanden durch den zweiten Weltkrieg ca. 400 Mio. m³ Trümmerschutt, der aus der Zerstörung von Wohn- und Industriegebäuden stammte (Blaum-Jordan 1947). Der weitaus überwiegende Teil des Trümmerschutts fiel in den industriellen Ballungsgebieten -z.B. Ruhrgebiet, Halle/ Leipzig- und in Großstädten wie Hamburg, Berlin und Dresden an. In Berlin z.B. waren 30% der Wohngebäude völlig, 45% teilweise zerstört (Arndt 1947). Daraus resultierte allein in Berlin eine Schuttmenge von ca. 75 Mio. m³ (Keiderling 1999). Der schwer sortierbare Anteil des Trümmerschutts mit Korngrößen < 35 mm wurde in Bombentrichtern aufgefüllt, wobei die Grundmauern zerstörter Gebäude meist nicht beräumt wurden. Es ist davon auszugehen, dass ca. 30% der innerstädtischen Baulücken und Stadtumbauflächen in Berlin **Trümmergrundstücke** sind [Karte Berlin 1:25000], was schätzungsweise einer Fläche von **3,7 Mio m²** entspricht. Der überwiegende Teil des Schutts wurde in Trümmerbergen aufgeschüttet – Beispiel dafür sind die Tempelhofer Höhe, die Friedrichshainer Berge und der Teufelsberg im Grunewald, der allein ca. 12 Mio m³ umfasst (Keiderling 1999).

In den siebziger Jahren wurden zum ersten Mal am Beispiel von Berliner Böden ökologische Eigenschaften solcher Trümmerschuttböden untersucht, wobei der Schwerpunkt auf Wasserhaushaltsuntersuchungen lag (RUNGE 1978, BLUME 1981). In der Bodenkarte Berlins 1:75 000 (GRENZIUS 1984) wurden diese entsprechend der Kartieranleitung der AG Bodenkunde (1982) als Aufschüttungsböden durch die Bodentypen Syrosem, Pararendzina, Kalkregosol und Regosol gekennzeichnet und ihre ökologischen Eigenschaften beschrieben (GRENZIUS 1987). Dabei wird davon ausgegangen, dass Trümmerschuttböden aus einem Hauptgemenge aus Ziegel und Mörtel bestehen und mit Böden aus Bauschuttauffüllungen gleichzusetzen sind. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von Böden technogener Substrate in Essen (Meuser 1993). Blume (1992) unterscheidet bei Aufschüttungsböden nur Gemenge von technologischen mit natürlichen Substraten und nicht Gemenge von technologischen Substraten untereinander. In den Empfehlungen des Arbeitskreises Stadtböden (1989) werden technologische Substrate durch Substratsteckbriefe charakterisiert und diese nach Hauptkomponentengruppen, Komponenten-

gruppen und Einzelkomponenten unterschieden. Danach werden Trümmerschuttböden der Hauptkomponentengruppe Bauschutt von Siedlungsbauten, der Komponentengruppe Ziegel- und Mörtelschutt und den Einzelkomponenten wie Ziegel, Mörtel, Schlacke, Asche, Holzkohle usw. zugeordnet. In diesen Empfehlungen wird auf eine mögliche Kontamination der Feinerde von Trümmerschuttböden mit Schwermetallen hingewiesen.

In Trümmerschuttböden können- im Gegensatz zu anderen technogenen Substraten wie Bauschutt - häufig extrem hohe PAK-Gehalte $> 100\text{mg/kg TS}$, im Einzelfall bis zu 650mg/kg TS auftreten (Smettan & Mekiffer 1996). Untersuchungen zu Schwermetallgesamtgehalten zeigen ebenfalls starke Belastungen, z.B. durch Pb bis zu 1600mg/kg , Zn 2500mg/kg und As 500mg/kg TS .

Eigene Untersuchungsergebnisse zu Schadstoffgehalten im Trümmerschutt werden hier am Beispiel von 5 Profilen aus dem Innenstadtbereich vorgestellt. Die Profile wurden kartiert und an den Horizontproben wurden bodenkundliche Standardparameter (pH, Carbonat, Korngröße) sowie die Belastung mit Schwermetallen und PAK analysiert. Um die Korngrößenabhängigkeit der Schadstoffbelastung bewerten zu können, wurden die durch Siebung von der Feinerde abgetrennten Bodenskelettanteile von drei Trümmerschuttprofile getrennt untersucht. Zusätzlich wurden reine technogene Komponenten wie Schlacke, Ziegel und Schiefer, Holzkohle und Asche analysiert, um Aussagen zur Komponentenabhängigkeit der Schadstoffbelastung in diesen Profilen treffen zu können.



Abbildung 3: typische Trümmerschuttprofile in Berlin

An 6 weiteren Profilen einer großräumigen Trümmeraufschüttung in Berlin wurden Untersuchungen zu Anionengehalten, pedogenen Aktivitäten sowie zur Skelettzusammensetzung im Trümmerschutt durchgeführt.

3.1.1 Bodeneigenschaften von innerstädtischen Trümmerschuttböden

Vier der untersuchten 5 Profile (Kartierprotokolle Profile P1-P5 Tabelle 2/ Anhang) lagen im Bereich einer Baulücke in der südwestlichen Innenstadt. Dieser Stadtteil gehört geologisch zur Teltow-Hochfläche. Der Grundwasserflurabstand auf der Untersuchungsfläche beträgt mehr als 16m. Das in den Profilen kartierte Material war nach dem 2. Weltkrieg in den Kellern bzw. im Bombentrichter eines ehemaligen Hauses aufgefüllt worden. Es handelte sich dabei um unsortiertes Baumaterial verschiedener Korngrößen. Für die Anlage eines Spielplatzes wurden diese Aufschüttungen mit einer geringmächtigen Mutterbodenschicht bedeckt, in einzelnen Bereichen des Spielplatzes standen die Aufschüttungen oberflächlich an. Lediglich in einem Profil (P4) wurde natürlich anstehendes Bodenmaterial vorgefunden, das jedoch durch Brandeinwirkung geprägt war.

Profil 5 unterlag Staunäseeinfluss – der G_o -Horizont wurde in einer Tiefe von 1,95m kartiert. Der Trümmerschutt in diesem Profil wurde nochmals durch eine Sandaufschüttung von 0,8m überdeckt.

Die Skelettgehalte aller untersuchten 29 Horizontproben lagen zwischen 5 und 80% (siehe Abb. 9). Dabei traten wechselnde Hauptkomponenten unterschiedlicher Korngröße wie Ziegel, Putz, Mörtel, Schlacken, Aschen,

Schiefer und Holzkohle auf. Ein Horizont bestand nahezu vollständig aus Asche und Kohle. Natürliches, umgelagertes Material war nur in zwei Horizontproben (P3/18-51 und P4) der Hauptbestandteil.

An den 29 Horizontproben dieser Profile wurden die Parameter pH, C/N, Carbonat, Glühverlust, Tongehalt untersucht (Abbildung 4; Tabelle 3/ Anhang).

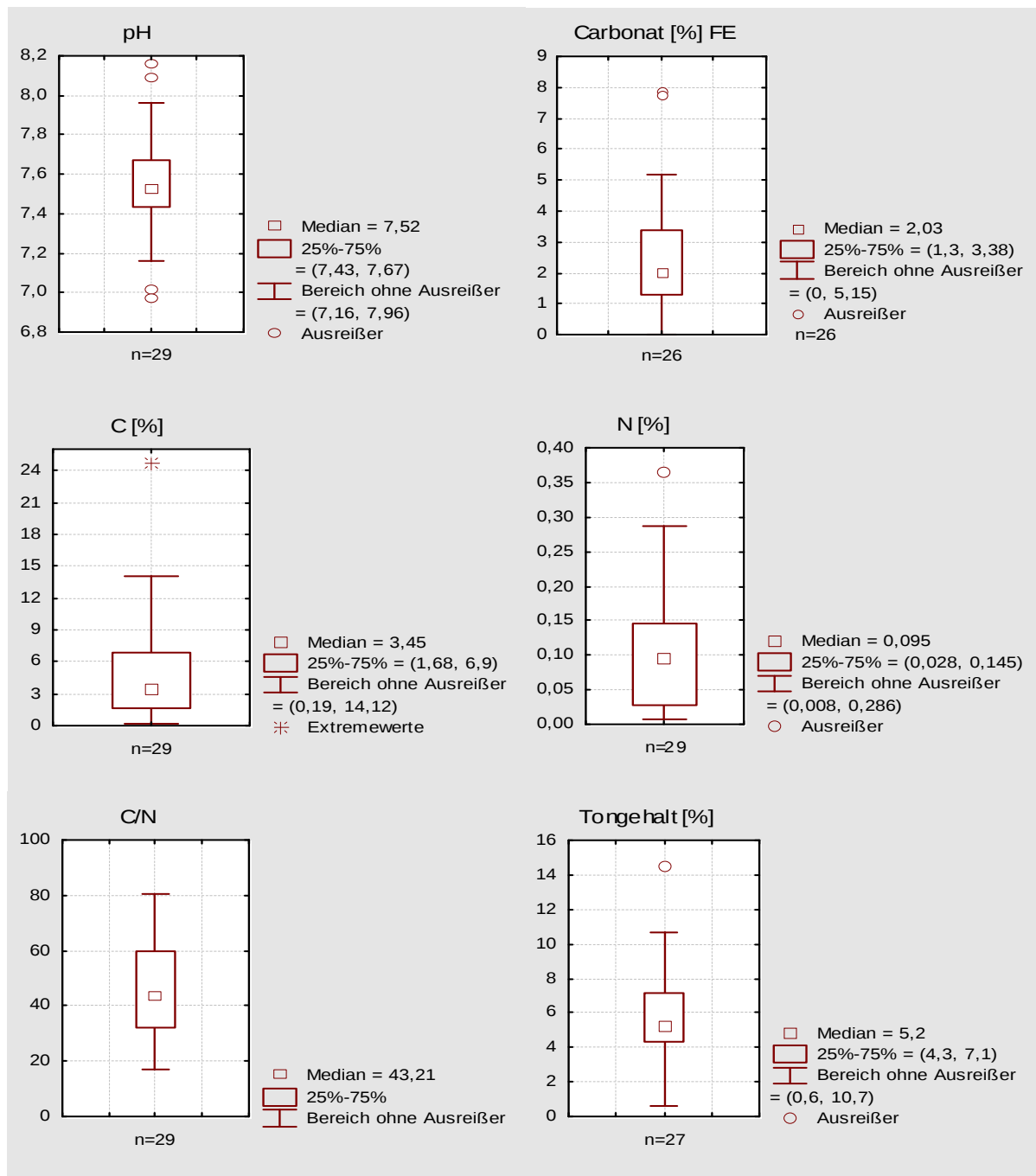


Abbildung 4: pH, Carbonat, Kohlenstoff, Stickstoff, C/N-Verhältnis und Tongehalt von Trümmerschuttproben aus der Berliner Innenstadt

Die Boxplots für den pH-Wert, den Carbonatgehalt, das C/N-Verhältnis sowie den Tongehalt weisen auf eine Normalverteilung dieser Eigenschaften in den untersuchten Proben hin (Abbildung 4).

Die **Bodenreaktion** liegt im neutralen bis alkalischen Bereich mit einem Minimalwert von 6,97 im fA_n des Trümmerschuttprofils P4 und einem Maximalwert von 8,16 im mit Ziegel sowie Putz und Mörtel angereicherten yC₄ des gleichen Profils.

Die Trümmerschuttprofile zeigen horizontbezogen große Unterschiede im **Karbonatgehalt**. Die Karbonatgehalte differieren innerhalb der Profile in Abhängigkeit von den Hauptkomponenten im jeweiligen Horizont.

Hohe CO_3 -Gehalte treten mit 7,76% in einem aschereichen Horizont yC_2 des Profils P5Fr auf sowie mit 7,90% in der Mergellinse des Profils P4 in 25-40cm Bodentiefe. Die Talsande des Profils P5Fr sind karbonatfrei, ebenso der fA_h des Profils P4.

Der Median des **Kohlenstoffgehaltes** der Trümmerschuttproben liegt deutlich über den Kohlenstoffgehalten von Oberbodenhorizonten natürlicher Böden. Allerdings kann von diesen Kohlenstoffgehalten nicht auf hohe Humusgehalte geschlossen werden, da gerade im Trümmerschutt häufig Ruß; Kohle und Asche enthalten sind. Dieser Anteil technogenen Kohlenstoffs (TOCtech) am Gesamtkohlenstoff kann nach Makowsky und Meuser (2007) unter Umständen zu einer Überbewertung des Humusanteils in Stadtböden und schließlich zu einer fehlerhaften Bewertung, z. B. bei den Vorsorgewerten der BBodSchG führen. Gleichzeitig ist durch Beimengungen von technogenem Kohlenstoff das Bindungsvermögen für organische Schadstoffe verändert (Beyer et al. 2001).

Die untersuchten Trümmerschuttproben sind mit einem Median von > 43 überwiegend durch ein weites **C/N-Verhältnis** gekennzeichnet (z. Vergleich: Rohhumus 30-40, Mull 10-15).

Die **Korngrößenanalyse** von Horizontproben aus den Berliner Trümmerschuttprofilen gestaltete sich auf Grund der z. T. hohen Carbonat- und Sulfatgehalte schwierig. So konnten die Tongehalte für einzelne Horizontproben (mit * gekennzeichnet) nur überschlägig berechnet werden. Ein hoher Tongehalt ist in der Mergellinse in 25-40cm Bodentiefe des Profils P2 analysiert worden, die 14,5% Ton enthält. Ein ebenfalls hoher Tongehalt ist im yC_1 / P4 mit 10,7% zu finden, was auf die in der Feinerde vorhandene Asche zurückgeführt werden kann. Im Profil P5 sind in den Horizonten yC_4 mit 10,4% und im G_{or1} mit 9,3 ein hoher Tongehalt festgestellt worden.

3.1.2 Schadstoffgehalte von innerstädtischen Trümmerschuttböden

Die Schadstoffbelastung der Trümmerschuttböden variiert in sehr weiten Grenzen. Tabelle 4 zeigt die Schwermetall- und PAK-Belastung der 5 Profile aus der Innenstadt.

Tabelle 4: Schwermetall –, PAK- und Benzo(a)pyren-Gehalte von 5 innerstädtischen Trümmerschuttprofilen Berlins

Tiefe [cm]	Pb [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	As [mg/kg]	BaP [mg/kg]	PAK [mg/kg]
P1/ 0-30	439,30	97,60	436,90	123,2	2,22	22,36
P1/ 30-40	476,50	98,90	344,20	130,3	5,29	38,93
P1/ 40-73	382,20	189,50	1196,10	106,1	1,44	37,81
P1/ 73-85	336,20	76,80	331,10	95,1	2,63	26,13
P1/ 85-100	1034,20	46,10	341,50	295,6	2,36	23,93
P2/ 0-10	205,20	173,90	346,20	61,7	3,71	35,81
P2/ 10-15	233,60	149,50	450,60	69,5	3,95	34,96
P2/ 15-25	223,10	72,50	363,40	63,6	2,81	27,56
P2/ 25-48	171,90	132,60	146,60	60,5	3,60	29,45
P2/ 48-62	125,70	320,60	265,50	74,6	5,59	63,88
P2/ 62-100	80,60	26,10	155,50	19,4	0,82	8,24
P3/ 0-18	184,00	75,10	391,10	51,1	4,50	37,24
P3/ 18-51	20,70	17,40	52,00	2,2	0,02	0,24
P3/ 51-100	309,40	52,80	228,80	84,1	5,48	53,14
P4/ 0-10	115,00	52,60	204,90	60,20	2,22	0,01
P4/ 10 - 25	188,9	79,8	403,1	53,2	1,20	18,75
P4 ES/ 25-40	18,1	13,0	43,9	0,9	0,01	0,15
P4/ 40-90	48,30	14,00	335,70	11,90	2,57	34,87
P4/ 90-103	61,20	10,80	60,20	15,30	0,10	1,40
P4/ 103-109	3188,40	180,00	810,80	993,50	0,06	1,22
P4/ 109-140	35,30	7,10	35,30	5,70	0,03	0,49
FS yY2/ 80-100	133,20	109,20	186,10	53,00	0,34	4,11
FS yY3/ 100-120	916,20	254,80	297,30	256,70	0,86	10,02
FS yY4/ 120-130	53,40	12,10	90,20	12,30	2,46	26,97
FS yY5/ 130-175	118,50	46,30	182,80	32,80	3,54	40,09
FS yY6/ 175-195	91,50	168,60	104,40	26,20	0,39	5,58
FS Gor/ 195-205	17,50	7,30	26,30	1,70	0,01	0,21
FS Gor/ 205-225	6,70	3,90	17,90	0,00	0,00	0,00
FS Gor2/ 225-247	6,10	5,00	16,70	0,00	0,00	0,01

Die Profile P1 bis P4 gehören zu einer Trümmeraufschüttung in einer Baulücke. Die in Tabelle 4 aufgeführten Schadstoffgehalte verdeutlichen die horizontbezogene und flächenhafte Variabilität der Schadstoffgehalte im Trümmerschutt. Kennzeichnend für diese Trümmerschuttprofile ist zudem die hohe Heterogenität der Beimengungen. Für die Trümmerschuttprofile P1 – P3 sind die Blei- und PAK-Gehalte den jeweiligen Hauptkomponenten der Horizonte gegenübergestellt (Abb. 5), um eventuelle Zusammenhänge zwischen Schadstoffgehalten und der Art der technogenen Komponente zu zeigen. Sichtbar wird, dass in diesen Profilen keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Art und Höhe der Schadstoffkontamination anhand der technogenen Komponenten möglich sind.:

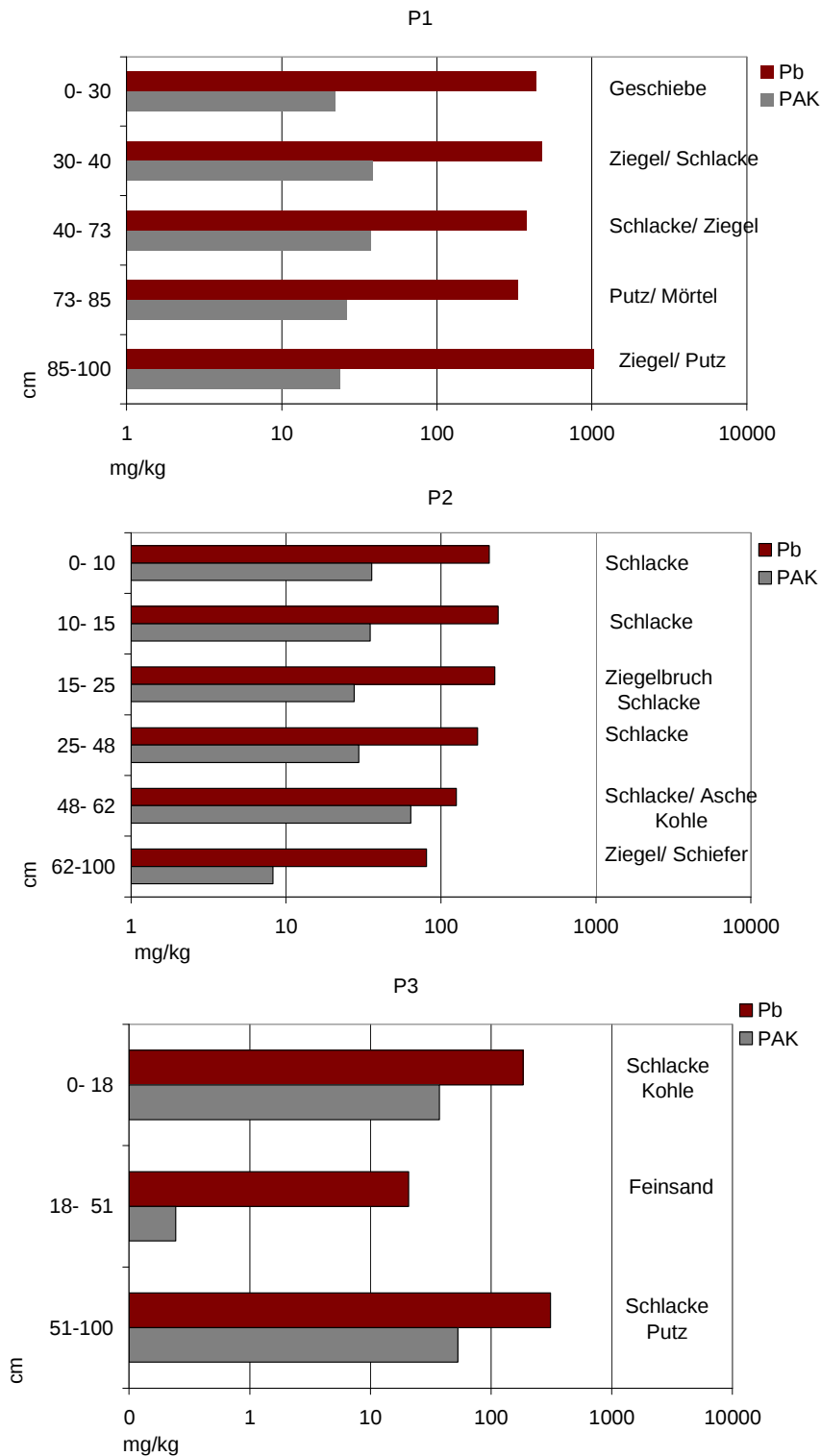


Abbildung 5: Variabilität der PAK- und Bleigehalte sowie Hauptkomponenten in 3 Trümmerschuttprofilen der Berliner Innenstadt

Die Blei-Gehalte hingegen variieren unabhängig von den Beimengungen stark: so zeigt der Oberbodenhorizont P1 mit Geschiebe als Hauptkomponente ebenso hohe Bleigehalte wie die Schlacke- oder Ziegelhaltigen Unterbodenhorizonte, was vermutlich auf atmosphärische Deposition von Blei zurückzuführen ist.

Im BBodSchG ist für PAK insgesamt kein Prüfwert festgelegt, sondern BaP fungiert als Leitparameter. Die Prüfwertvorschläge liegen zwischen 1mg/kg (Spielplätze) und 12mg/kg BaP für Böden von Industrieflächen. Dieser Wert wurde in mehr als 80% aller Proben z. T. um ein Vielfaches überschritten. Lediglich die Sandschüttung in P3 ist mit 0,24 mg/kg (16PAK/ EPA) bzw. 0,02mg/kg BaP als unbelastet einzustufen (siehe Tab. 4).

Die Verteilung der PAK-Spezies (Tab. 4/ Anhang) in den einzelnen Horizonten lässt keine Rückschlüsse auf eine PAK-Verlagerung zu, da die Kontamination des Schüttgutes zum Zeitpunkt der Ablagerung nicht bekannt war. Der geringe Anteil niedrig kondensierter PAK an der Gesamtbelastung kann entweder auf Abbau- bzw. Verlagerungsprozesse zurückzuführen oder durch einen geringen Gehalt im Ausgangsmaterial verursacht sein.

Die Betrachtung relativer PAK-Verteilungsmuster bzw. der „parent compound distribution“ (PCD) wird zur Quellenanalyse für PAK in Böden genutzt. Von verschiedenen Autoren wird dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Quotienten betrachtet. Yunker et al (1999) und Zeng und Vista (1997) differenzierten u.a. über das Verhältnis zwischen Fluoranthen und Pyren. zwischen petrogenem und pyrolytischen Quellen. Dabei soll ein Verhältnis >1 auf Verbrennungseinträge hinweisen, ein Verhältnis <1 auf Ölkontamination.

Unter dieser Annahme sind die PAK-Kontamination der in Tabelle 5 aufgeführten Proben bis auf 3 Ausnahmen auf Verbrennungseinträge zurückzuführen, was für einen Trümmerschuttboden mit Asche-, Ruß- und Schlackeanteilen letztlich auch zu erwarten war.

Tabelle 5: Verhältnis Fluoranthen/ Pyren in den Horizonten dreier Trümmerschuttprofile

	Fluoranthen /Pyren
P1/ 0-30	1,01
P1/ 30-40	0,93
P1/ 40-73	1,04
P1/ 73-85	1,12
P1/ 85-100	1,11
P2/ 0-10	1,21
P2/ 10-15	1,2
P2/ 15-25	1,61
P2/ 25-48	0,77
P2/ 48-62	1,32
P2/ 62-100	1,54
P3/ 0-18	0,75
P3/ 18-51	0
P3/ 51-100	1,03

Da Trümmerschutt- und Bauschuttböden sehr skelettreich sind, wurden exemplarisch für die Profile P1 – P3 die PAK-Gehalte in der Feinerde und im Skelett gesondert untersucht.

In Abbildung 6 ist die PAK-Kontamination der Feinerde ($>2\text{mm}$) der des Grobkorns ($<2\text{mm}$) gegenüber gestellt. Die Trennung zwischen Feinerde und Grobkorn erfolgte durch Sieben. Beide Fraktionen wurden anschließend auf eine Korngröße von $0,2\text{mm}$ gemahlen, extrahiert und getrennt analysiert.

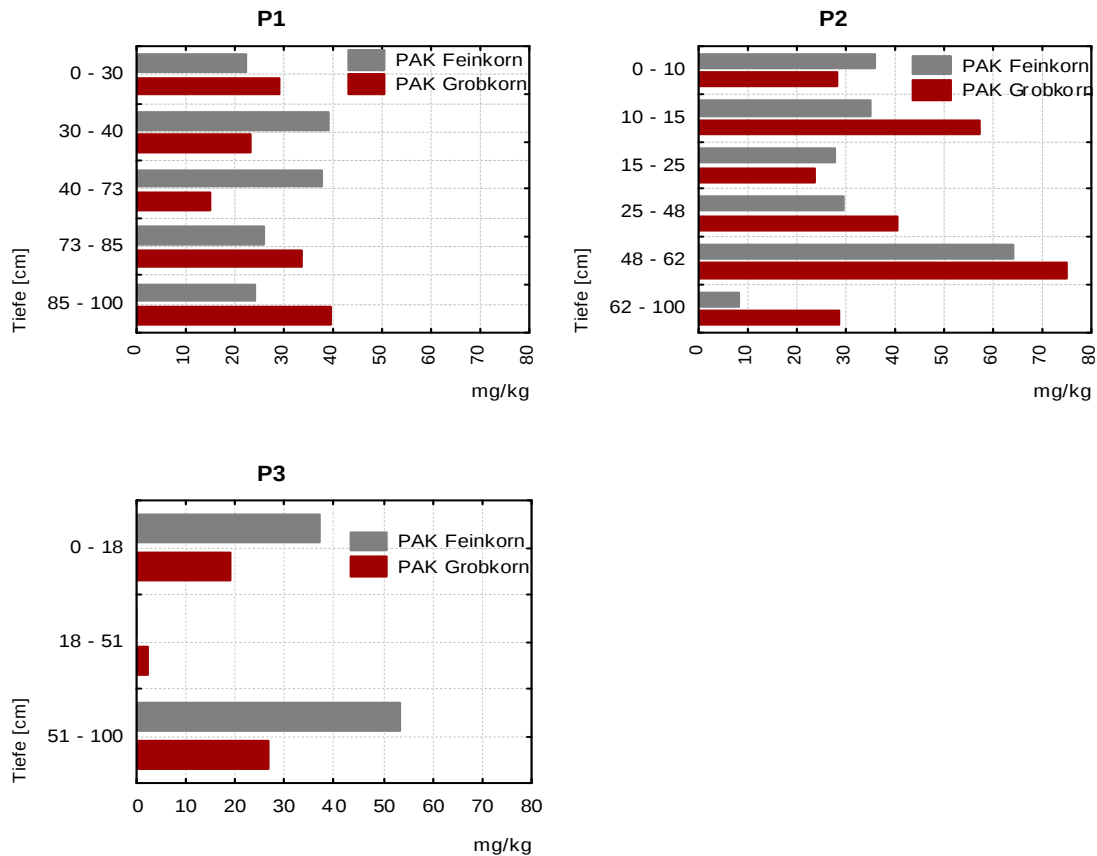


Abbildung 6: Korngrößenabhängigkeit der PAK-Belastung in 3 Trümmerschuttprofilen
(Grobkorn > 2mm, Feinkorn < 2mm)

Am Beispiel der hier untersuchten Trümmerschuttprofile lässt sich keine generelle Anreicherung von PAK in einer der beiden Korngrößenfraktionen feststellen. Auch ein Zusammenhang zwischen den PAK-Gehalten in einer der beiden Korngrößenfraktion und der Hauptkomponente im Skelett ist nicht ersichtlich.

3.1.3 Anionengehalte von Trümmerschuttböden

An Horizontproben von 6 Profilen entlang eines Transekts auf dem Teufelsberg (Abb.1/ Anhang) wurden die Anionen Chlorid, Sulfat und Nitrat bestimmt. Die Messungen erfolgten aus dem wässrigen 1:2-Extrakt an einer CE-Anlage (siehe Pkt. 2.1). Dies geschah vor dem Hintergrund steigender Sulfatgehalte in den oberen Grundwasserleitern von Berlin, für die Trümmerschutt als Quelle in Betracht gezogen werden muss und mit dem Ziel, die Sulfatmenge abschätzen zu können, die aus der größten Trümmeraufschüttung Berlins –dem Teufelsberg- in Lösung geht.

Tabelle 6: Anionengehalte von Proben der Trümmeraufschüttung am Teufelsberg Berlin

Horizont	Cl ⁻ [mg/l]	[mg/kg]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	[mg/kg]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	[mg/kg]
Tb P1 Ah	50,33	100,65	43,40	86,79	11,96	23,92
Tb P1 jC ₁	41,73	83,46	83,80	167,60	4,49	8,97
Tb P1 yC ₂	42,57	85,13	35,25	70,50	15,95	31,90
Tb P1 yC ₃	n.b.	n.b.	3479,23	6958,46	n.b.	n.b.
Tb P1 yC ₄	n.b.	n.b.	352,52	705,04	n.b.	n.b.
Tb P2 Ah	26,63	53,26	37,91	75,82	9,68	19,37
Tb P2 mC ₁	9,02	18,03	29,60	59,19	7,26	14,52
Tb P2 yC ₂	8,39	16,78	80,14	160,28	5,27	10,54
Tb P2 Linse	17,61	35,23	83,14	166,27	1,31	2,62
Tb P3 Ah	6,29	12,58	37,74	75,49	6,27	12,53
Tb P3 jC ₁	6,29	12,58	26,44	52,87	2,56	5,13
Tb P3 jC ₂	18,87	37,74	50,88	101,76	6,83	13,67
Tb P3 yC ₃	n.b.	n.b.	892,03	1784,06	n.b.	n.b.
Tb P4 Ah	7,97	15,94	31,09	62,18	14,81	29,62
Tb P4 M ₁	5,45	10,90	26,77	53,54	4,56	9,11
Tb P4 M ₂	12,37	24,74	25,11	50,21	3,99	7,97
Tb P4 M ₃	4,82	9,65	21,28	42,57	1,71	3,42
Tb P4 llyC ₁	7,97	15,94	59,86	119,71	1,71	3,42
Tb P5 Ah	10,07	20,13	36,25	72,49	9,40	18,80
Tb P5 jC ₁	9,23	18,45	30,93	61,85	6,41	12,82
Tb P5 yC ₂	n.b.	n.b.	2843,16	5686,32	n.b.	n.b.
Tb P6 Ah	8,18	16,36	110,90	221,80	3,42	6,83
Tb P6 M ₁	5,66	11,32	16,63	33,25	1,71	3,42
Tb P6 M ₂	5,24	10,48	10,14	20,28	3,99	7,97
Tb P6 M ₃	5,24	10,48	24,94	49,88	2,99	5,98
Tb P6 M ₄	7,76	15,52	27,43	54,87	5,27	10,54
* n.b.: durch das ausgewählte Analyseverfahren nicht bestimmbar						

Die **Nitrat**gehalte der hier untersuchten Trümmerschuttproben liegen zwischen 2,62 – 31,9 mg/kg bei einem Mittelwert: 11,96 mg/kg (siehe Tab. 6). Diese Werte sind denen anderer urbaner Standorte wie Normreduktosolen aus Klärschlamm bzw. Pararendzinen aus anthropogenen Aufschüttungen (Blume 1997, S. 70 ff.) vergleichbar. Auch dort traten Nitratgehalte bis max. 43mg/kg auf, wobei sowohl jahreszeitliche als auch tiefenabhängige Veränderungen in diesen Profilen verzeichnet wurden. Innerhalb der hier vorgestellten Trümmerschuttprofile treten ebenfalls horizontbezogen große Unterschiede auf: die Nitratkonzentration ist im Allgemeinen in den Ah-Horizonten am höchsten und nimmt mit der Tiefe tendenziell ab. Der Vergleich der 6 auf einem 200m langen Transekt liegenden Profile untereinander bezüglich ihrer Nitratgehalte zeigt die geringsten Werte im Kolluvisol von Profil 6. Dieses unterscheidet sich von Profil 1 bis 5 durch die Dominanz natürlicher Substrate (Sand, Schluff)

Die Trümmerschuttproben weisen **Chlorid**gehalte zwischen 9,65 – 100,65 mg/kg (Mittelwert: 28,88 mg/kg) auf, wobei die höchsten Konzentrationen im Profil 1 am Oberhang des Teufelsberges gemessen wurden. Bezüglich der Chloridkonzentrationen lassen diese Proben somit keine Unterschiede zu naturnahen Böden feststellen.

Die **Sulfat**gehalte in Trümmerschutthorizonten unterscheiden sich für die beiden gegenübergestellten Standorte „Teufelsberg“ und „Innenstadt“ erheblich (Abb. 7). Ersterer weist einen Median von 74 mg/kg und die 25:75% - Quartile decken einen Wertebereich von 53 bis 166mg/kg Sulfat ab. Die Sulfatkonzentrationen in Trümmer-

schuttproben aus der Innenstadt liegen mit einem Median von 365 mg/kg und einem 25:75%-Quartil von 64 – 3672 mg/kg noch deutlich über den Werten der untersuchten Profile am Teufelsberg. Diese Unterschiede können ihre Ursache allerdings in der unterschiedlichen Art der Probenaufbereitung für die Anionenanalytik haben: während die Proben der Innenstadt-Profile im Verhältnis 1:5 für 24h geschüttelt und dann analysiert wurden, sind an den Teufelsberg-Profilen die Anionenmessungen an einem wässrigen 1:2 Bodenextrakt (Vorgaben „Handbuch forstliche Analytik“) ohne Schütteln durchgeführt worden.

Ein Trend zur Zu- oder Abnahme der Sulfatkonzentrationen über die Tiefe ist in den Teufelsbergprofilen (Tab. 6) nicht zu erkennen. Allerdings lässt sich ein Zusammenhang zu Skelettgehalt und -bestandteilen ableiten. Hohe Sulfatgehalte gehen mit hohen Skelettgehalten und Beimengungen wie Putz, Ziegel, Schamott usw. einher. Die Ah-Horizonte der untersuchten Profile weisen geringe Trümmerschuttanteile auf, was sich auch in niedrigeren Sulfatgehalten widerspiegelt. In diesen Horizonten beruht die Sulfatkonzentration eher auf atmosphärischen Eintrag bzw. Freisetzung aus der organischen Bodensubstanz, weniger auf anthropogene Beimengungen oder geogene Vorgabe. Die hohen Werte der Teufelsberghorizonte P1 yC₃, P3 yC₃ und P5 yC₂ sind nicht untypisch für anthropogene Aufschüttungen: so wurden von Blume et al. (1997) vor allem in aschehaltigen Böden und in Böden, die Kokereiabfälle enthalten, Gesamtschwefel-Gehalte bis zu 22.000 mg/kg gemessen.

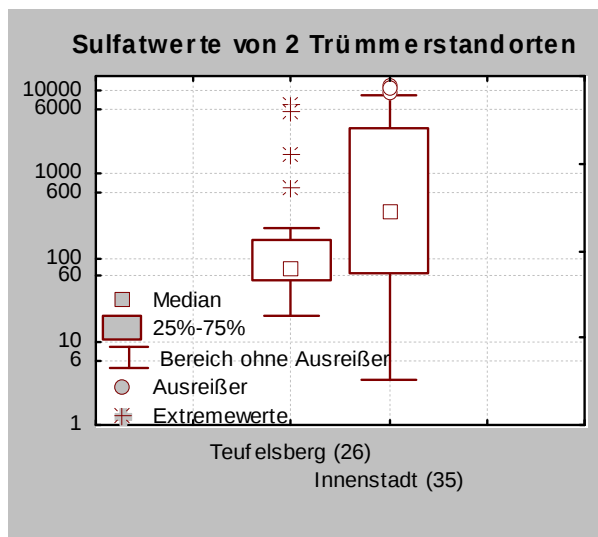


Abbildung 7: Sulfatgehalte von 2 Trümmerschuttstandorten in Berlin [mg/kg]

Für den Teufelsberg wurde -ausgehend von ca. 22,5 Mio. t Trümmerschutt auf diesem Gelände (konservative Schätzung) und einem durchschnittlichen Sulfatgehalt von 653,58 mg/kg ein Gesamtsulfatvorrat von 14,72 Mio. kg errechnet.

Bei einer Sulfatlöslichkeit von 1,9g/l und einer mittleren Versickerung von 200 l/m² könnten unter idealen Löslichkeitsbedingungen maximal 3.800kg/ha*a dieses Sulfatvorrates ausgetragen werden.

Dass eine Sulfatfreisetzung aus diesem Substrat stattfindet ist unzweifelhaft, was steigende Sulfatkonzentrationen des Grundwassers und von Pegelproben: aus dem Umfeld des Teufelsberges zeigen (Sommer-von-Jarmersted et al. 2001, digitaler Umweltatlas Berlin 2006, Karte 02.04).

3.1.4 pedogene Aktivität in Trümmerschuttböden

Trümmerschutt ist als Bodenausgangsmaterial vor allem durch seine Heterogenität und seinen Skelettreichtum gekennzeichnet. Zur Intensität der Boden bildenden Prozesse unter diesen Ausgangsbedingungen ist wenig bekannt. Die Mineralneubildung bzw. chemische Verwitterung (z.B. Oxide und Hydroxide des Al und Fe, Tonminerale) im Trümmerschutt besitzt aber Relevanz für dessen Schadstoffbindungsvermögen und vermutlich auch für sein Sulfatfreisetzungsverhalten sowie für seine physikalischen Bodeneigenschaften. Unter diesem Aspekt

wurde an den Profilen P1 – P6 des Transektes auf dem Teufelsberg Berlin (Abb. 1/ Anhang)) die sog. „pedogene Aktivität“ anhand des Quotienten von Oxalat- zu Dithionitlöslichem Eisen (Fe_o/Fe_d) abgeschätzt.

Der Oxalataufschluss extrahiert amorphe, aktive Eisen-, Mangan- und Aluminiumverbindungen, die in der Regel ein geringes Bildungsalter auszeichnet. Nicht erfasst werden die gut kristallisierten pedogenen Eisenoxide. Der Dithionitaufschluss extrahiert das Gesamteisen und –aluminium, welches kristallin und inaktiv ist, also die freien amorphen und zusätzlich die kristallinen pedogenen Fe-Oxide. Beide – der Oxalat- und der Dithionitaufschluss – erfassen nicht die primären, silikatisch gebundenen Eisenoxide sowie Primärminerale wie Magnetit, Ilmenit und Fe-haltige Tonminerale. (Hintermaier-Erhard und Zech 1997). Der Aktivitätsgrad der bodenbildenden Prozesse wird ermittelt aus dem Quotienten von oxalatlöslichem Eisen zu dithionitlöslichem Eisen (Fe_o/Fe_d). Dabei zeigen Werte von 0,03 -0,3 geringe pedogene Aktivität an, mittlere Aktivitäten liegen im Bereich 0,3 – 0,6, während Quotienten > 0,6 hohe pedogene Aktivitäten signalisieren.

In den Profilen P1 – P4 weisen vor allem die Proben aus dem Unterboden hohe pedogene Aktivitäten auf, während die Oberbodenhorizonte der gleichen Profile lediglich als gering bis mittel aktiv einzustufen sind. Tendenziell entgegen gesetzte Verhältnisse zeigen sich in den beiden am Unterhang des Teufelsberges gelegenen Profilen P5 und P6: in diesen Profilen ist die pedogene Aktivität im Oberboden höher als im Unterboden (Tabelle 7). Diese Aktivitätsverteilung ist typisch für Profile mit humusreichen Oberbodenhorizonten, deren Gehalt an organischer Bodensubstanz die Alterung pedogener Oxide hemmt. Allerdings zeichnen sich die Ah-Horizonte von P5 und P6 gegenüber den Ah-Horizonten der Profile P1 – P4 nicht durch übermäßig hohe Humusgehalte aus.

Im Vergleich aller Profile zeigt das aus kolluvialen Sanden aufgebaute Profil P6 die niedrigsten pedogenen Aktivitäten auf Basis des Quotienten Fe_o/Fe_d . Ein statistisch signifikanter Zusammenhang der pedogenen Aktivität zu einer der anderen untersuchten Parameter (Kationen, Tab. 17/ Anhang und Anionen, Tab.7) ist anhand der vorliegenden Daten nicht nachweisbar.

Ein nicht geklärtes Phänomen stellen die hohen Gehalte an Oxalat-löslichem Aluminium dar: sie übersteigen in 25 von 26 Fällen die Werte für Dithionit-lösliches Aluminium. Die Konzentrationsunterschiede sind zwar nicht sehr groß, erwartet wurden allerdings Al_o -Werte maximal in Höhe der Al_d . Messfehler scheiden als Ursache hierfür aus, da die im gleichen Extrakt gemessenen Fe-Gehalte den Erwartungen entsprechen (siehe Tab. 17 u. 18/ Anhang). Als Ursache könnten theoretisch Fe-substituierendes Aluminium in Eisenmineralen wie Goethit oder Magnetit in Frage kommen.

Tabelle 7: pedogene Aktivität* in 6 Trümmerschuttprofilen

Horizont	Fe_o/Fe_d	Horizont	Fe_o/Fe_d
P1 Ah	0,4	P4 Ah	0,39
P1 jC ₁	0,6	P4 M ₁	0,44
P1 yC ₂	0,71	P4 M ₂	0,55
P1 yC ₃	0,77	P4 M ₃	0,42
P1 yC ₄	0,5	P4 llyC ₁	0,64
P2 Ah	0,27	P5 Ah	0,47
P2 mC ₁	0,46	P5 jC ₁	0,5
P2 yC ₂	0,43	P5 yC ₂	0,39
P2 Linse	0,65	P6 Ah	0,41
P3 Ah	0,49	P6 M ₁	0,43
P3 jC ₁	0,46	P6 M ₂	0,25
P3 jC ₂	0,43	P6 M ₃	0,47
P3 yC ₃	0,65	P6 M ₄	0,31

3.1.5 Skelettzusammensetzung von Trümmerschuttböden

Die Menge und Zusammensetzung des Bodenskeletts variieren im Trümmerschutt in Abhängigkeit von

- Ausgangsmaterial (welche Art von Gebäuden wurde zerstört)
- Abkipplemechanismus (wurden Klein- oder Großtransporte durchgeführt) sowie vom
- Sortiermechanismus (wurden wieder verwertbare Komponenten aussortiert, wurde gesiebt).

Letzterer ist wiederum vom Zeitpunkt der Entsorgung abhängig: wurden vor dem Kriegsende und kurz danach Trümmer häufig unsortiert entsorgt, kamen nach Kriegsende sukzessive Sortierverfahren zum Einsatz, um wieder verwertbares Baumaterial zu gewinnen. Dementsprechend heterogen ist das Bodenskelett in Trümmerschuttböden. Exemplarisch wurde für das Untersuchungsgebiet Teufelsberg die Zusammensetzung des Bodenskeletts untersucht. Sowohl innerhalb der einzelnen Profile als auch auf der Fläche treten große Unterschiede hinsichtlich der Skelettkomponenten und -gehalte auf. Auch die Verteilung der Komponenten innerhalb der einzelnen Siebfraktionen des Skeletts von >2mm bis >63mm variiert sehr stark (Abb. 7, Tab. 10/ Anhang.).

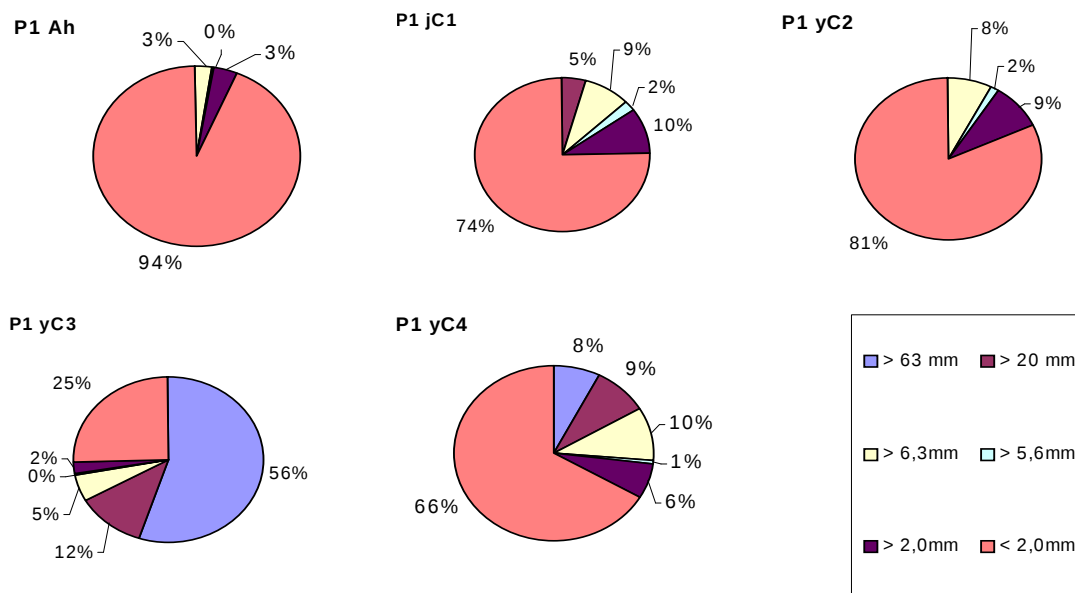


Abbildung 8: prozentuale Verteilung der Siebfraktionen am Beispiel eines Trümmerschuttprofils

Die einzelnen Komponenten des Skelettanteils zeigen keine oder geringe Verwitterungsanzeichen und sind nur vereinzelt umgewurzelt. Ziegel, Gips, Schamottgestein und Putz sind technogene Hauptkomponenten des Bodenskeletts. Die in den Profilen vorgefundenen Ziegel sind sehr dicht und treten in unterschiedlichster Erhaltungsform (im Normziegelformat bis hin zu kantigen Bruchstücken) auf. Gips zeigt in Böden normalerweise keine hohe Stabilität, da er in Anwesenheit des Bodenwassers langfristig wasserlöslich ist. Die hier vorgefundenen Gipsbruchstücke sind allerdings sehr wenig verwittert. Putz tritt in Bruchstücken auf und ist Schutt im Krieg zerstörter Gebäudewände und -decken. Die im Substrat vorgefundenen Schlacken unterscheiden sich in ihrem Habitus stark voneinander und sind nicht einem einzelnen Prozess zuzuordnen. Sie können aus Hausbrandanlagen, Heizkraftwerken sowie der Metallverhüttung stammen. Metall, Glas, Porzellan, Kohle, Kunststoffe und Teerpappe sind weitere Bestandteile des Trümmerschutts. Lehmige Anteile und Kies sind natürliche Bestandteile, die künstlich als Bedeckung des Trümmerschuttes aufgekippt wurden. Die technogenen Substrate treten nicht als isolierte Monosubstrate, sondern in Gemengeformen auf. In den Kolluvisolen der Profile 4 und 6 nimmt der Skelettanteil von oben nach unten ab, während er in den Pararendzinen der Profile 1, 2, 3 und 5 tendenziell von oben nach unten zunimmt. Mit zunehmender Profiltiefe steigt in den Pararendzinen auch der Anteil technogener Komponenten am Skelett, während es in den Kolluvisolen keine starke Veränderung der Komponenten gibt. Die yC₃- und yC₄-Horizonte der Pararendzinen bestehen zum überwiegenden Teil aus technogenen Komponenten, deren Feinkornanteil Aschen stellen.

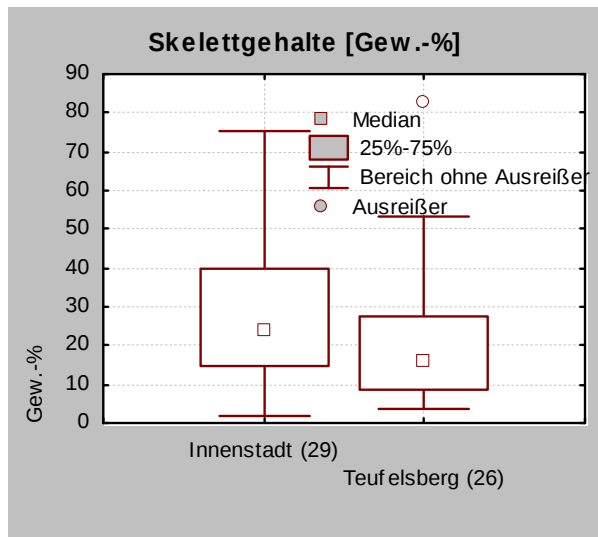


Abbildung 9: Skelettgehalte in Horizontproben zweier Trümmerschuttstandorte

Für die Profile der Innenstadt (P1-P5) sowie die Teufelsberg-Profile wurden die prozentualen Skelettanteile bestimmt (Abb. 9)

Die Gegenüberstellung der Skelettanteile zeigt große Unterschiede zwischen den Profilen P1-P5, die in Baulücken der Innenstadt angelegt waren und den Teufelsberg-Profilen. Diese Unterschiede sind aber m. E. nicht kennzeichnend für Trümmerschutt in Baulücken einerseits und Trümmerschuttdeponien andererseits, sondern sie sind symptomatisch für die Heterogenität des Trümmerschutts allgemein.

3.1.6 Zusammenfassung

Trümmerschutt ist in der Berliner Innenstadt ein weit verbreitetes Ausgangssubstrat für die Bodenbildung. Die Bodenreaktion ist überwiegend sehr schwach bis mittel alkalisch, 50% der Proben haben Carbonatgehalte zwischen 1,3 und 3,5%. Typisch für Trümmerschuttböden sind erhöhte PAK-Gehalte und - hier dargestellt – Bleigehalte. Anhand der untersuchten Proben konnte weder eine Komponentenabhängigkeit noch eine Korngrößenabhängigkeit der PAK-Belastung festgestellt werden. Die wasserlöslichen Nitrat- und Chloridgehalte der untersuchten Profile liegen im Bereich natürlicher Böden. Die Gehalte an wasserlöslichem Sulfat übersteigen die Werte natürlicher Böden um ein Vielfaches – sie lagen im Mittel bei 653,5g mg/kg (Teufelsbergprofile) bzw. 2334,9 mg/kg (Innenstadt). Damit liegen die Sulfatgehalte ähnlich hoch wie die Werte anderer anthropogener Aufschüttungen wie Kokereilehm und Hausmüll. Die Intensität bodenbildender Prozesse („pedogene Aktivität“) entlang eines Transekts auf Trümmerschutt ist in den skelettreichen Profilen höher als in den kolluvialen Profilen der Trümmeraufschüttung. Während sie in ersteren mit der Tiefe eher zunimmt, ist die pedogene Aktivität der Kolluvien im humosen Oberboden höher als im Unterboden. Die Trümmerschuttböden sind gekennzeichnet durch einen starken Wechsel der Skelettgehalte und Hauptkomponenten innerhalb der Profile sowie auf der Fläche.

3.2 Industrieaufschüttungen aus Schlacke und Asche

Auf einem Gelände am Ufer der Havel wurden Bodeneigenschaften und Schadstoffgehalte von industriellen Schlacken und Aschen charakterisiert. Die Schadstoffmobilisierbarkeit aus diesen Aufschüttungen wurde –um möglichst naturnahe Desorptionsbedingungen zu simulieren – in 3-stufigen Schüttelversuchen mit Regen- und Havelwasser als Lösungsmittel bestimmt. Die Desorptionsversuche waren von Interesse, weil das untersuchte Gebiet als Wasserschutzzone Kategorie III ausgewiesen ist (Umweltatlas Berlin2003) und sich an eine Brunngalerie anschließt.

Das Untersuchungsgebiet liegt zwischen der weichseleiszeitlichen Schmelzwasserrinne, die von der Havel durchflossen wird sowie der Kamesbildung des Grunewaldes (Eisspaltenausfüllung). Dementsprechend besteht

das geologische Ausgangsmaterial der ursprünglichen Bodenbildung im Wesentlichen aus Sanden unterschiedlicher Korngrößen, die zum Einen aus den Abschlammmassen des Grunewald-Kames, zum Anderen aus Havelse-dimenten stammen.

Auf diesem Gelände wurde teilweise natürliches Bodenmaterial abgetragen und technogene Substrate bzw. Mischungen aus technogenen Substraten sowie natürlichem Material aufgebracht. Auf Grund dessen sind Senken verfüllt und der Uferstreifen verbreitert. Horizonte der ursprünglichen Bodentypengesellschaften (Gley, kolluvierte Braunerde, Regosol, Rostbraunerde) waren im Rahmen der Kartierung nur noch in einzelnen Boh-rungen anzutreffen.

3.2.1 Bodeneigenschaften der Industriaufschüttungen

Die Aufschüttungen im Uferbereich der Havel setzen sich in einem Teilbereich nahezu ausschließlich aus Asche, Schlacke, Kohle bzw. aus Mischungen der Komponenten zusammen. In einem zweiten Bereich wurden Substrate mit einem Anteil >5% Mörtel, Ziegel, Glas sowie Verbrennungsrückständen aufgeschüttet. In randli-chen Bereichen finden sich Substrate mit <5% technogenen Beimengungen (Profilbeschreibung (Tab. 21-26/ Anhang) zu finden.

Bei den abgelagerten Aschen ist zwischen Fe-armen, in der Färbung grauen Aschen und Fe-reichen, rötlichen Aschen zu unterscheiden. Bei den Schlacken handelt es sich überwiegend um nichtporöse schwarze Schlacken mit Glasstruktur. Die Aufschüttungsmächtigkeiten (incl. yAh) differieren stark und liegen zwischen 32cm bis 106cm. Bei Bohrung RS 7 reicht die Aufschüttung bis in das Grundwasser, das in dieser Bohrung bei 65cm ansteht.

Im natürlich anstehenden Bodenmaterial variiert die Bodenart zwischen Fein- und Mittelsand. Die aufge-schütteten Mischsubstrate zeigen eine größere Spannweite im Korngrößenspektrum. Hier treten sowohl stark sandige Lehme, lehmige Sande, schluffige Sande als auch Mittelsande auf. Die Skelettgehalte (Körnung>2mm) der Aufschüttungen liegen zwischen 5 und 40%. Die natürlich anstehenden Sande hingegen sind skelettfrei.

Die im Feld durch HCl-Probe ermittelten Karbonatgehalte lagen für die Aufschüttungen zwischen 0,5 und 10%. Die natürlichen Substrate im Liegenden weisen nur dort Karbonatgehalte bis zu 10% auf, wo Muschelscha-len angereichert sind, ansonsten liegen die Karbonatgehalte zwischen 0,5 bis 2%.

Tabelle 8: pH-Werte in Industriaufschüttungen von Schlacken und Aschen

Probe	pH
RS 2/ 0-24cm	6,67
RS 2/ 24-98cm	7,36
RS 3/ 0-40cm	7,18
RS 3/ 40-60cm	7,21
RS 4/ 10-32cm	6,99
RS 4/ 32-53cm	6,56
RS 4/ 53-100cm	7,24
RS 5/ 10-62cm	7,52
RS 5/ 62-75cm	7,50
RS 5 75-106cm	7,37
RS 6/ 10-41cm	7,46
RS 7/ 0-40cm	7,39
RS7/ 40-65cm	7,38

Die pH-Werte aller untersuchten Proben liegen ausnahmslos im schwach sauren bis schwach alkalischen Be-reich. Die Bodenproben mit großen Asche- oder Schlackebeimengungen weisen die höheren pH-Werte auf, während Sand bzw. Mischungen aus Sand und humosem Boden schwach sauer reagieren.

Da diese Proben überwiegend Carbonathaltig waren, erfolgte die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität (KAK) nach der Methode von MEHLICH (1942)., d.h. es wurde die potenzielle KAK im Perkolationsverfahren mit gepufferter Ba-haltiger Austauscherlösung ermittelt. Der Kationen-Rücktausch erfolgt durch Magnesium. Die Summe der Na-, K-, Mg- und Ca-Äquivalente sollte mit der der Ba-Äquivalente auf +/- 10 % übereinstimmen. Die Summe der einzelnen Kationen kann von der Menge rücktauschbarer Kationen v. .a. dann abweichen, wenn außer den gemessenen Hauptaustauschern Kationen wie Eisen, Mangan oder Schwermetalle nennenswert am Austauschprozess beteiligt sind.

Tabelle 9: potenzielle Kationenaustauschkapazität* von Proben aus Industrieaufschüttungen
(* nach MEHLICH in cmolc/kg)

Probe	Ca	K	Mg	Na	Al	S-Wert	Ba	Substrat
RS2/ 0-24cm	3,0	0,2	0,1	n.n.	0,9	3,3	5,1	Sand+ Bauschutt
RS 4/ 32-53cm	3,9	0,1	n.n.	n.n.	0,3	3,9	6,7	Sand, leicht humusangereichert
RS 4/ 53-100cm	3,2	0,1	0,1	0	0,1	3,4	4,7	Talsand
RS 5 75-106cm	3,7	0,2	0,2	0	0,1	4,1	4,7	Sand+ 5% schwarze Glasschlacke
RS 3/ 0-40cm	6,0	0,3	0,1	n.n.	0,2	6,4	7,9	Sand+ Bauschutt+ graue Asche
RS 6/ 10-41cm	5,6	0,1	0,1	0,1	0,2	5,8	6,3	Rote Asche
RS 7/ 0-40cm	13,7	0,1	1,0	1,3	0,3	16,1	23,2	Rote Asche
RS7/ 40-65cm	6,7	0,3	0,2	0,3	0,1	7,6	8,1	Rote Asche
RS 2/ 24-98cm	12,5	0,2	0,7	0,4	0,14	14,86	20,7	rote Asche+ Schlacke
RS 5/ 10-62cm	26,2	0,4	0,7	n.n.	0,3	27,5	20,1	rote Asche + rote Schlacke
RS 3/ 40-60cm	8,1	0,4	0,2	0,2	0,3	8,9	8,0	Rote+ schwarze Glasschlacke
RS4/ 10-32cm	7,1	0,4	0,2	n.n.	0,3	7,7	9,7	Glasschlacke
RS 5/ 62-75cm	6,0	0,2	0,1	n.n.	0,1	6,3	7,1	schwarze Glasschlacke + Sand

Die KAK natürlicher Böden liegt zwischen 20 cmolc/kg (tonreiche Böden) und 0,5cmolc/kg (humusarme Sandböden). In den hier untersuchten technogenen Substraten bzw. Mischungen aus Sand und technogenen Komponenten weisen die niedrigsten S-Werte erwartungsgemäß die Sandproben auf. Die höchsten S-Werte zeigen die aschehaltigen Proben, deren S-Werte z.T. noch über denen tonreicher natürlicher Böden lagen. Die Schlackeproben sind durch mittlere Kationenaustauschkapazitäten gekennzeichnet. Größere Differenzen zwischen austauschbaren und rücktauschbaren Kationen traten vor allem in den roten Aschen auf – die Ursache hierfür könnte in hohen Eisengehalten dieser Proben liegen, die ihre Färbung in der Regel dem Mineral Hämatit verdanken. Fe-Gehalte wurden in der Messung nicht berücksichtigt.

3.2.2 Schadstoffgehalte der Industrieaufschüttungen

In Tabelle 10 sind die Schwermetallgehalte dargestellt. Die räumliche Variabilität der Schwermetallgehalte ist sehr hoch. Zum Vergleich sind im Fuß der Tabelle die Vorsorgewerte für Schwermetalle lt. BBodSchG (Bodenart Sand) aufgeführt. Diese Vorsorgewerte werden in der überwiegenden Zahl der untersuchten Proben überschritten. Die Gefahrenwertüberschreitungen treten insbesondere in den Horizonten auf, die hauptsächlich aus roten Aschen bestehen bzw. größere Mengen schwarzer Glasschlacke enthalten.

Tabelle 10: Schwermetallgehalte* in Bodenproben des Bootsgelände Schildhorn
(*Königswasseraufschluss)

Probe	Cd [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	As [mg/kg]	Hg [mg/kg]	dominierendes Substrat
RS2/ 0-24c	<1,03	10,80	127,06	113,20	3,27	0,15	Sand+ Bauschutt
RS 4/ 32-53cm	< 1,0	115,89	29,36	278,54	2,79	0,19	Sand, leicht humus- angereichert
RS 4/ 53- 100cm	< 1,0	15,38	11,00	14,75	1,52	0	Talsand
RS 5 75- 106cm	< 0,97	200,60	190,54	266,00	4,00	0,27	Sand+ 5% schwarze Glasschlacke
(RS 3/ 0-40cm	0,94	58,27	139,12	131,40	5,40	0,37	Sand + Bauschutt + graue Asche
RS 6/ 10-41cm	2,09	471,18	1272,57	2406,75	19,58	3,98	Rote Asche
RS 7/ 0-40cm	2,2	627,06	3883,39	1287,13	19,8	2,75	Rote Asche
RS7/ 40-65cm	1,77	445,60	803,07	914,05	14,30	4,79	Rote Asche
RS 2/ 24-98cm	1,64	177,83	605,90	467,20	20,80	1,39	Rote Asche+ Schla- cke
RS 5/ 10-62cm	< 1,03	167,48	526,22	413,51	22,30	2,26	Rote Asche +rote Schlacke
RS 3/ 40-60cm	1,03	82,50	122,25	147,90	13,20	0,42	Rote+schwarze Glasschlacke
RS4/ 10-32cm	< 1,02	59,60	73,12	64,17	15,65	0,08	Schwarze Glas- schlacke
RS 5/ 62-75cm	1,140	1158,45	209,38	1055,33	10,84	0,44	schwarze Glasschla- cke mit Sand
Vorsorgewerte BBodSchG	0,4	20	40	60	-	0,1	Werte für Bodenart Sand

Lediglich zwei der untersuchten Proben - ein reiner Sand und ein leicht humoser Sand - weisen Schwermetallgehalte unter den Vorsorgewerten des BBodSchG auf.

Die PAK-Analytik wurde exemplarisch an technogenen und natürlichen Substraten dieser Fläche durchgeführt (Tab.11).

Tabelle 11: PAK-Gehalte in Industriefaufschüttungen aus Schlacke und Asche

Probe	Summe 16 PAK [mg/kg]	Substrat
RS 2/ 24-98 cm	6,53	Rote Asche + Schlacke
RS 3/ 0-40cm	15,12	Sand + Bauschutt + graue Asche
RS 4/ 32-53cm	1,32	Sand, leicht humusangereichert
RS 4/ 53-100cm	0,45	Talsand
RS 5/ 75-106cm	7,55	Sand mit 5% schwarzer Glasschlacke
RS 6/ 10-41cm	1,38	Rote Asche
RS 7/ 0-40cm	46,59	Rote Asche
RS7/ 40-65cm	5,35	Rote Asche (GW-beeinflusst)
Vorsorgewert BBodSchG 16PAK [mg/kg]	3 (Humus>8%)	

Die Humusgehalte der untersuchten Proben lagen jeweils unter 8%, d.h. als Vorsorgewert für die PAK-Belastung ist nach BBodSchG ein PAK-Gehalt von 3mg/kg anzusetzen. Dieser wird von 5 der analysierten 8 Proben überschritten. Anhand der Substrate lassen sich keine Rückschlüsse auf die Höhe der PAK-Kontamination ziehen, was das Beispiel der Proben RS 6/10-41 und RS 7/ 0-40 verdeutlicht: beide Proben bestehen zu nahezu 100% aus eisenreichen Aschen, unterscheiden sich aber im PAK-Gehalt um mehr als das 30-fache.

3.2.3 Schwermetallverfügbarkeit

Die Schwermetallbindungsformen und ihre Verfügbarkeit wurden über die beiden ersten Stufen der sequentiellen Extraktion nach Zeien & Brümmer (1989) charakterisiert.

Durch die 1. und 2. Stufe der sequentiellen Extraktion werden die als mobil und leicht nachlieferbar bezeichneten Schwermetalle erfasst. Die Ergebnisse der Versuche zur Schwermetallmobilität sind in Tabelle 12 und 13 dargestellt

Tabelle 12: mobile und leicht nachlieferbare Anteile von Cadmium, Kupfer und Blei Industrieaufschüttungen
(Angaben in [mg/kg] /Boden und in [%] bezogen auf Gesamtgehalte (Königswasseraufschluss))

Element	Cd				Cu				Pb			
	a)	b)	c)	d)	a)	b)	c)	d)	a)	b)	c)	d)
RS2/ 0-24cm*	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,37	3,47	0,00	0,00	31,5	24,79
RS 2/ 24-98cm	0,00	0,00	0,5	30,58	0,11	1,05	3,63	2,04	0,00	0,00	18,24	3,01
RS 3/ 0-40cm	0,00	0,00	0,25	26,60	1,5	2,57	4,25	7,29	0,00	0,00	15,88	11,41
RS 3/ 40-60cm	0,00	0,00	0,25	24,39	1,12	1,36	4,25	5,15	0,00	0,00	5,0	4,09
RS4/ 10-32cm*	0,00	0,00	0	0	0,63	1,05	2,75	4,61	0,00	0,00	0,00	0,00
RS 4/ 32-53cm*	0,00	0,00	0	0	4,13	3,56	16,63	14,35	0,00	0,00	4,00	13,63
RS 4/ 53-100cm*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	5,69	1,37	8,94	0,00	0,00	0,00	0,00
RS 5/ 10-62cm*	0	0	0	0	2,75	1,64	2,5	1,49	2,10	0,40	11,0	2,09
RS 5/ 62-75cm	0,00	0,00	0,25	22,03	129,51	11,18	218,71	18,88	2,01	0,96	11,49	5,49
RS 5 75-106cm*	0,00	0,00	0,00	0,00	15,63	7,79	24,5	12,21	2,5	1,31	64,38	33,79
RS 6/ 10-41cm	0,00	0,00	0,00	0,00	18,75	3,98	39,11	8,30	0,00	0,00	28,63	2,25
RS 7/ 0-40cm	0,25	11,36	0,5	22,73	6,27	1,00	6,90	1,30	0,00	0,00	286,21	7,37
RS7/ 40-65cm	0,00	0,00	0,25	14,12	3,25	0,73	4,23	0,95	0,00	0,00	18,47	2,30

Spalte a: mobile Fraktion [mg/kg]; Spalte b: mobile Fraktion [%] bezogen auf Gesamtkontamination (Königswasseraufschluss); Spalte c: nachlieferbare Fraktion [mg/l]; Spalte d: nachlief. Fraktion [%] bezogen auf Gesamtkontamination (Königswasseraufschluss)

Tabelle 13: mobile und leicht nachlieferbare Anteile von Zink, Arsen und Quecksilber in Industrieaufschüttungen
(Angaben in [mg/kg] Boden und in [%] bezogen auf Gesamtgehalte (Königswasseraufschluss))

Probe	Zn				As		Hg	
	Mobil mg/kg	Mobil %/C1	nachlieferb. mg/kg	Nachlieferb. %/C1	Mobil mg/kg	Mobil %/C1	Mobil mg/l	Mobil %/C1
RS2/ 0-24cm*	3,25	2,87	15,5	13,69	0,06	1,72	0,00	0,00
RS 2/ 24-98cm	1,73	0,37	27,61	5,91	0,06	0,30	0,00	0,00
RS 3/ 0-40cm	2,38	1,81	19,63	14,94	0,08	1,41	0,006	1,69
RS 3/ 40-60cm	1,63	1,10	27,12	18,34	0,05	0,40	0,008	1,79
RS4/ 10-32cm*	0,62	0,97	5,75	8,96	0,03	0,20	0,006	7,81
RS 4/ 32-53cm*	46,24	16,60	65,01	23,34	0,09	3,32	0,01	5,26
RS 4/ 53-100cm*	0,75	5,09	3,87	26,28	0,02	1,15	0,00	0,00
RS 5/ 10-62cm*	1,24	0,30	14,27	3,45	0,1	0,46	0,01	0,40
RS 5/ 62-75cm	29,97	2,84	202,52	19,19	0,14	1,25	0,00	0,00
RS 5 75-106cm*	8,11	3,05	69,99	26,31	0,199	4,95	0,00	0,00
RS 6/ 10-41cm	0,48	0,02	37,54	1,56	0,06	0,33	0,00	0,00
RS 7/ 0-40cm	6,31	0,49	110,05	8,55	0,06	0,30	0,00	0,00
RS7/ 40-65cm	2,38	0,26	20,47	2,24	0,08	0,54	0,00	0,00

In den Abbildungen 10 ist der prozentuale Anteil der mobilen und leicht nachlieferbaren Schwermetallfraktionen, bezogen auf den Gesamtgehalt, für Zink, Blei und Kupfer dargestellt. Für Blei besteht zwischen diesen beiden Fraktionen der sequentiellen Extraktion kein erkennbarer Zusammenhang, für Kupfer hingegen besteht

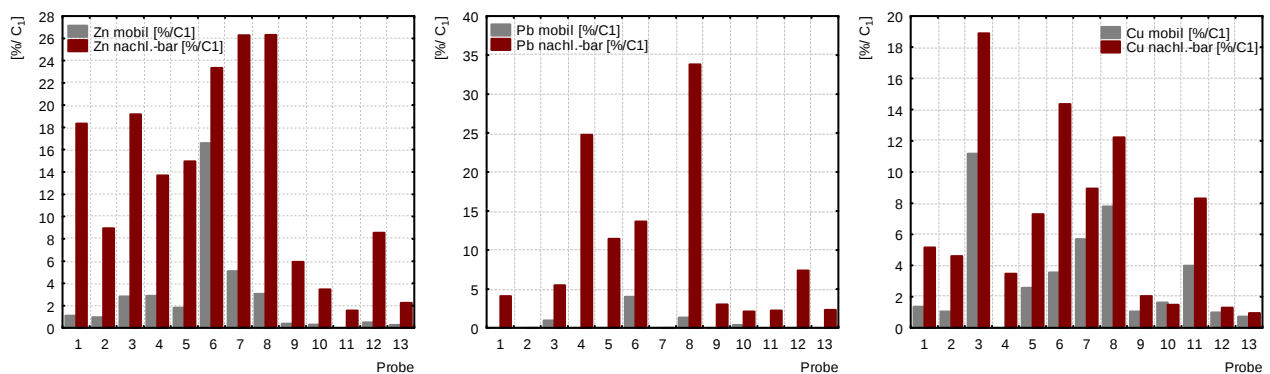


Abbildung 10: mobile und nachlieferbare Schwermetalle von 13 Schlacke-, Asche- und Sandproben

zwischen der mobilen und leicht nachlieferbaren Fraktion eine Korrelation von 0,99. Zink zeigt zwischen diesen beiden Fraktionen einen schwachen Zusammenhang von 0,6. Eine klare Abhängigkeit der Höhe der Schwermetallverfügbarkeit vom Ausgangssubstrat fehlt: so zeigen sowohl sandige Proben (Nr. 3, 6 und 7) teilweise hohe Schwermetallmobilitäten, aber auch Aschereiche Proben (Nr. 8, 11 und 12). Ebenso fehlt eine Abhängigkeit der Schwermetallmobilität vom pH-Wert des Ausgangssubstrates.

In Bezug auf die Ausgangskontamination C_1 sind zwischen 0,1 und 16,2% des Zinks mobil und die mobilen Bleianteile liegen zwischen 0 und 4,5%. Cu weist – bezogen auf C_1 – 0 bis 11% mobile Anteile auf, As 0,1 bis 5%, während 0,4 bis 7,8% des Hg als mobil einzustufen sind (siehe auch Tab. 13).

Dem stehen deutlich höhere Anteile leicht nachlieferbarer Schwermetalle gegenüber: diese Fraktion liegt für Zink, bezogen auf C_1 bei bis zu 26,5%, für Blei zwischen 2 und 34,5% sowie für Cu zwischen 1 und 19%. Zwischen der Höhe von Ausgangskontamination und Schwermetallverfügbarkeit besteht kein signifikanter Zusammenhang. Diese Aussage deckt sich mit Ergebnissen von Meuser et al. (2007), der im Rahmen seiner Untersuchungen zum substratspezifischen Austragsrisiko für Schwermetalle ebenfalls zu dem Schluss kommt, dass keine Beziehung zwischen der Höhe der Anfangskontamination und dem Austragsrisiko besteht.

3.2.4 Zusammenfassung

Die untersuchten Aschen, Schlacken und Mischsubstrate sind gekennzeichnet durch neutrale bis schwach basische pH-Werte. Die Kationenaustauschkapazitäten liegen z.T. über denen tonreicher natürlicher Böden. Die Schwermetallgehalte der Proben überschreiten fast ausnahmslos die Vorsorgewerte lt. Bodenschutzgesetz. Die Belastung durch PAK liegt in 5 der 8 untersuchten Proben ebenfalls oberhalb der Vorsorgewerte. Zwischen Bodeneigenschaften bzw. Schadstoffgehalten einerseits sowie der Art des technogenen Substrates andererseits lassen sich anhand der untersuchten Proben keine Zusammenhänge ableiten.

3.3 Aufschüttungen heterogener Substrate über Talsand

In Berlin existiert eine Vielzahl von Altlasten, die auf Talsanden lagern und häufig grundwasserbeeinflusst sind. Unter dem Aspekt der hohen Erkundungs- und Analytikskosten ist eine komplexe ökologische Bewertung solcher Flächen sehr schwierig.

Am Beispiel einer typischen Berliner Altlast werden die Heterogenität der Boden- und Grundwasserbelastung vorgestellt, durch Schüttelversuche die Lösungsbedingungen für Schwermetalle auf dieser Fläche bestimmt sowie Probleme diskutiert, die bei der Bewertung der Altlast auftreten können.

3.3.1 Untersuchungsgebiet

Die Altlast liegt im Bereich des Berliner Urstromtals. Die ursprünglichen Sedimente waren Weichsel- und Saalekaltzeitliche Flusssande, tw. Torfe und Mudden. Der Grundwasserflurabstand beträgt 1-5m, der oberste Grundwasserleiter ist unbedeckt. Das Gebiet wird der Wasserschutzzone II (Berl. Liste) zugeordnet. Auf den überwiegend sandigen Sedimenten hatten sich Auenböden und Anmoorgleye entwickelt, die jedoch durch die jüngere Nutzungsgeschichte vollständig anthropogen überprägt bzw. entfernt wurden. Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von ca. 3.5 ha und ist im N begrenzt durch die Spree. Im SW befindet sich ein Wasserwerk. Die GW-Fließrichtung unterliegt wechselnden Bedingungen von NO nach SW. Seit 1870 wurden auf der Fläche Abfälle der chemischen sowie der metallverarbeitenden Industrie (Blutlaugensalze, Säuren, Naphthol, Farbreste, Thoriumsalze) abgekippt. Ab 1930 wurde das Gebiet als Hausmüll- und Bauschuttdeponie sowie nach 1945 als Trümmerschuttablageplatz genutzt. Die Aufschüttungsmächtigkeiten nehmen von S nach N kontinuierlich zu und erreichen bis zu 2.5m. Seit 1955 wird die Fläche für Freizeit- und Erholungszwecke intensiv genutzt.

3.3.2 Material und Methoden

Zur Untersuchung gelangten 24 Bodenproben aus 3 Profilen, davon zwei Profile unter Laubwald und eins unter Grünland. 5 Wasserproben wurden aus Pegeln gewonnen. 10 weitere Wasserproben wurden mittels Saugsonde aus dem oberflächennahen Grundwasser, z.T. unterhalb der Profile, gezogen. Die Bodenproben wurden auf pH, Carbonat, Anionen C/ N, KAK, SM, sowie PAK untersucht. In den Wasserproben wurden Schwermetall- und PAK-Gehalte sowie pH und Anionengehalte analysiert. Die Schadstoffanalytik erfolgte nach DIN bzw. EPA, die Kationenaustauschkapazitäten wurden nach MEHLICH ermittelt. Um eine Schadstoffdesorption unter natürlichen Bedingungen zu simulieren, wurden Batchversuche mit den folgenden drei Lösungsmitteln durchgeführt:

- Regenwasser (pH 4.3)
- Rindenmulchlösung (pH 5.25), da ein Teil der Fläche gemulcht ist
- pH-8-Lösung, da ca. 20% der Fläche mit einem Aschebelag versehen sind, der diesen pH-Wert aufweist).

Die Versuche erfolgten im Boden/ Lösungsverhältnis 1:3/ 24h bei langsamer Schüttelgeschwindigkeit.

3.3.3 Bodeneigenschaften und Belastungssituation

Tabelle 14 enthält Anionengehalte und pH-Werte von Boden- und Grundwasserproben, außerdem die C/N-Werte sowie die KAK des Bodens. Um die Anionengehalte bewerten zu können, sind zum Vergleich die gültigen Schadenswerte für das Grundwasser lt. Berliner Liste (1996) aufgeführt.

Tabelle 14: Boden- und Grundwassereigenschaften Mischaufschüttung Rodelbergweg

	Boden (n=24) [mg/kg]	Wasser (n=15) [mg/l]	Schadenswerte GW (Berliner Liste 1996)
Fluorid	0,31 – 36,2	1,57 – 32,17	2
Chlorid	10,49 – 826,64	127,23 – 355,85	-
Nitrat	7,47 – 1669,07	7,97 – 92,14	80
Phosphat	1,53 – 70,18	n.n	7
Sulfat	97,5 – 0283,98	419,97 – 2159,15	750
C [%]	1.38-46.64	TC [mg/l] 26.2-117.7	-
N [%]	0.043-0.60	-	-
KAK [cmol _c /kg]	1.95-226.04	-	-
pH	4.25-7.78	7.23-7.86	-
Carbonat [%]	0.05-30.50	-	-

Die Anionenkonzentrationen von Sulfat, Nitrat und Fluorid der Wasserproben überschreiten die Schadenswerte für Grundwasser lt. Berliner Liste (1996) z. T. erheblich. Im BBSchG ist außer für Fluorid (750 µg/l) kein Prüf- oder Vorsorgewerte für Anionen genannt. Die Wasserproben stammen zum einen aus der ungesättigten Bodenzone, zum anderen aus Pegeln. Die höheren Sulfat- und Chloridgehalte treten in den Wasserproben der ungesättigten Zone auf.

In Tabelle 15 ist die Belastung der Boden- und Wasserproben mit Schwermetallen sowie PAK dargestellt.

Tabelle 15: Belastungssituation Mischaufschüttung Rodelbergweg und Vorsorge – bzw. Gefahrenwerte (Wirkungspfad Boden/ Grundwasser in [µg/l]; a) Analysenwerte, b) Vorsorgewerte, c) Gefahrenwerte)

	BODEN [mg/ kg]			WASSER [µg/ l]		
	a)	b)	c)	a)	b)	c)
Pb	114-2448	1000	40	n.n.-0.5	25	80
Cu	45.6-625.2	-	50	1.6-24.7	50	100
Cd	n.n.-12.12	50	0,2	n.n.-1.0	5	10
Zn	1.08-112.8	-	100	10-50	500	500
PAK	4.68-88.48	-	0,8	n.n.-4389 (Naphth.)	2 (Naphthalin)	4 (Naphthalin)

Zum Vergleich enthält die Tabelle Vorsorgewerte nach dem Bundesbodenschutzgesetz für Böden von Freizeitanlagen sowie Gefahrenwerte lt. Berliner Liste (1996) für Grundwasser der Wasserschutzzone II. Im Boden des Untersuchungsstandortes werden diese Werte für alle Schwermetalle und PAK überschritten. Im oberflächennahen Grundwasser unter Profil 1 kommt es zu einer Überschreitung des Gefahrenwertes für Naphthalin um mehr als das 1000-fache. Alle anderen Grundwasser- und Pegelproben weisen keine Überschreitung der Gefahrenwerte für Schwermetalle oder PAK auf.

Im **Desorptionsversuch** verhalten sich die hier dargestellten Schwermetalle Kupfer und Blei in Abhängigkeit vom Lösungsmittel Regenwasser, Rindenmulch-Lösung und pH 8-Lösung unterschiedlich (Abb. 11 und 12).

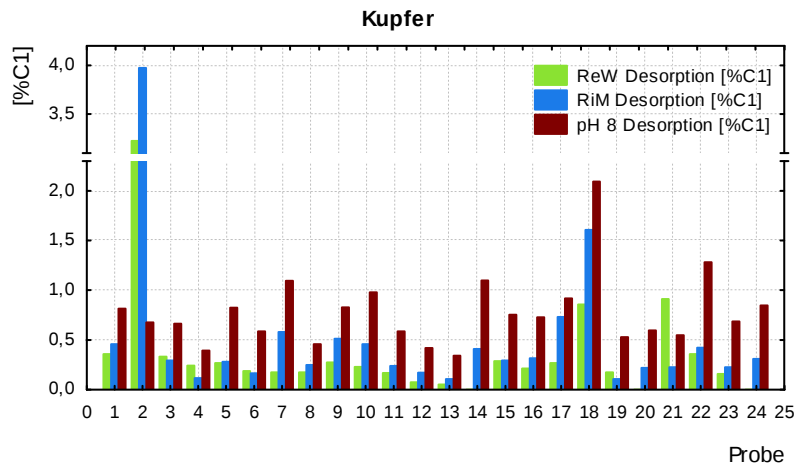


Abbildung 11: Desorption von Kupfer aus technogenen Substraten unter dem Einfluss von 3 verschiedenen Lösungsmitteln

In der überwiegenden Zahl der Proben (22 von 24) ist die Desorption von Kupfer unter dem Einfluss der pH-8-Lösung am höchsten, Lediglich Probe 2 und Probe 21 zeigen ein anderes Desorptionsverhalten für Kupfer. Probe 2, die in Relation zu ihrer Gesamtkontamination die höchsten Cu-Mengen freisetzt, war gekennzeichnet durch einen C-Gehalt von 46,3% und kommt somit einem Torf nahe. Diese Probe setzt ca. 6,5fach höhere Kupfermengen im Schüttelversuch mit Rindenmulchlösung frei als im Versuch mit der pH 8-Lösung. Auch die Cu-Desorption durch Regenwasser übersteigt in dieser Probe die der pH8-Lösung um das ca. 5fache. Die Probe 21, die eine hohe Kupferfreisetzung unter dem Einfluss von Regenwasser aufweist, ist durch keinerlei Auffälligkeiten gekennzeichnet.

Die hier untersuchten Industrieaufschüttungen stammen zu einem Teil aus der Farb- und Lackindustrie. Die dort verwendeten Cu-Farbstoffe (Ultramarin, Kupfer- oder Berggrün, Berg- oder Azurblau) sind Kupferkarbonate bzw. -hydroxide. Zwar wurden im Rahmen dieser Arbeit keine Kupferspezies untersucht. In den Profilen war jedoch teilweise eine intensive Blaufärbung erkennbar, die auf solche Kupferpigmente zurückgeführt werden kann. Untersuchungen verschiedener Autoren zeigen eine erhöhte Kupfermobilisierbarkeit in alkalischen Böden in Abhängigkeit von der Kupferbindung: bei neutraler bis alkalischer Bodenreaktion ist zwar die Löslichkeit von freiem Cu^{2+} äußerst gering, es kann aber durch die Bildung löslicher Cu^{2+} -Komplexe (v.a. Hydroxide, Carbonate und metallorganischer Komplexe) zu einer deutlichen SM-Mobilisierung im Boden kommen (Lindsay 1979, Hornburg 1991). Die gelösten Anteile der SM steigen bei einem pH-Wert im Boden von 8 in der Reihenfolge $\text{Pb} < \text{Zn} < \text{Cd} < \text{Cu}$. (Styperek, 1986). Damit wäre auch die hohe Cu-Desorption bei alkalischem pH-Wert plausibel.

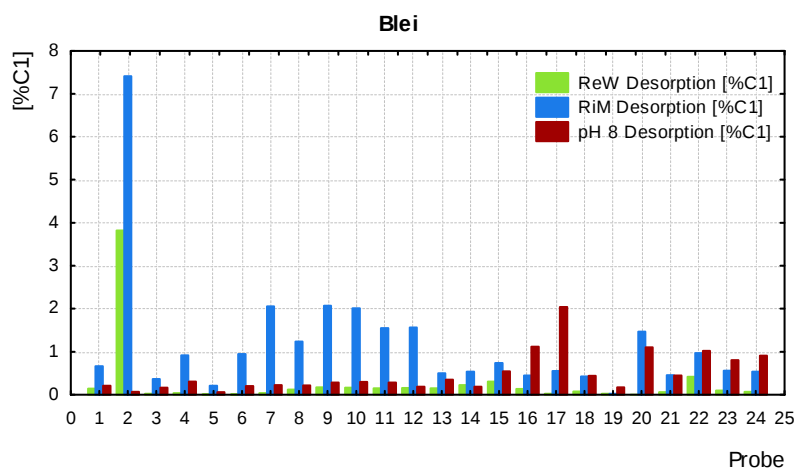


Abbildung 12: Desorption von Blei aus technogenen Substraten unter dem Einfluss von 3 verschiedenen Lösungsmitteln

Demgegenüber wird Blei bevorzugt unter dem Einfluss der Rindenmulchlösung desorbiert: 16 der 24 Proben setzen die höchsten Bleimengen im Schüttelversuch mit diesem Lösungsmittel frei. In 2 weiteren Proben liegen

die Desorptionsraten von Rindenmulch- und pH8-Lösung gleich auf und in 6 Proben bewirkt die pH-8-Lösung die höchste Bleidesorption. Regenwasser hat als Desorptionsmittel für Blei in diesen Proben die geringste Wirkung.

Für die Bewertung der Fläche im Hinblick auf eine Grundwassergefährdung durch Schadstoffe wurden Schwermetallfrachten auf der Basis der Desorptionsraten aus den Schüttelversuchen nach der Formel

$$Fracht = C \times S$$

C.... Konzentration im Desorptionsversuch [mg/l]

S.... Sickerwasserrate

berechnet.

Wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Fracht haben die in die Berechnung einzubeziehenden Wasserhaushaltsdaten. Da keine Messwerte zum Wasserhaushalt zur Verfügung standen, musste auf langjährige Mittelwerte zurückgegriffen werden, was die Zuverlässigkeit der Frachtberechnungen beeinträchtigt

Die Frachtberechnung für das Profil 2/ Asche und Trümmerschutt unter Grünland (Abbildung 13) basiert auf folgenden Annahmen:

V_{kap}= 120d * 0.2mm (dgw=6dm und mSgs)

E_{ta}= 492mm/ a

P= 589mm/ a.

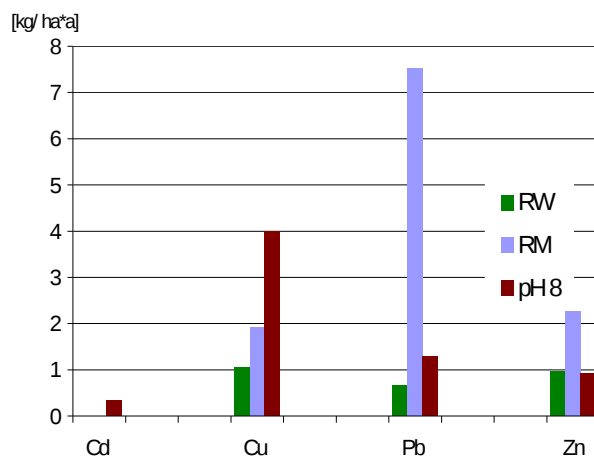


Abbildung 13: Schwermetallfracht Profil P2 (kapillarer Aufstieg ca. 0.2mm/d; SWR 73mm/a)

In dem Grünlandprofil, aber auch in den beiden Laubwaldprofilen war die Hauptbodenart einzelner Horizonte Grobsand – durch diese Einlagerungen kann der kapillare Aufstieg auf 0 reduziert werden, was zu einer stärkeren Versickerung aus dem Boden und damit zu noch höheren Frachten führt. Bedenklich erscheint das vor allem für die gemulchten Teilflächen dieses Geländes sowie für die Teilflächen mit dem Aschebelag.

In Abbildung 14 ist am Beispiel der zwei Laubwaldprofile der Einfluss des Wasserhaushaltes auf die Höhe der Schwermetallfracht dargestellt. Geringe Frachten treten auf unter der Annahme, dass die Laubbäume ihren Wasserbedarf überwiegend aus dem Boden decken. Die für diese Annahme errechneten mittleren Versickerungsraten liegen bei 83mm/ a für Profil 1 und 86mm/a für Profil 3 (Fall 1).

Da das Grundwasser unter den beiden Profilen bei ca. 1m unter GOK ansteht, kann man davon ausgehen, dass die Baumvegetation ihr Wasser auch direkt aus dem Grundwasser bezieht. Unter dieser Annahme erhöht sich die reale Evapotranspiration auf E_{pot}-Werte (potenzielle Verdunstung) und auch die Versickerung steigt an. Nach Berechnungen mit dem Ansatz von Wessolek & Renger (1987) wurde für diesen Fall eine Versickerung von =180mm/a ermittelt. Dementsprechend erhöht sich gegenüber der ersten Annahme die mögliche Schadstofffracht um mehr als 100% (Fall 2).

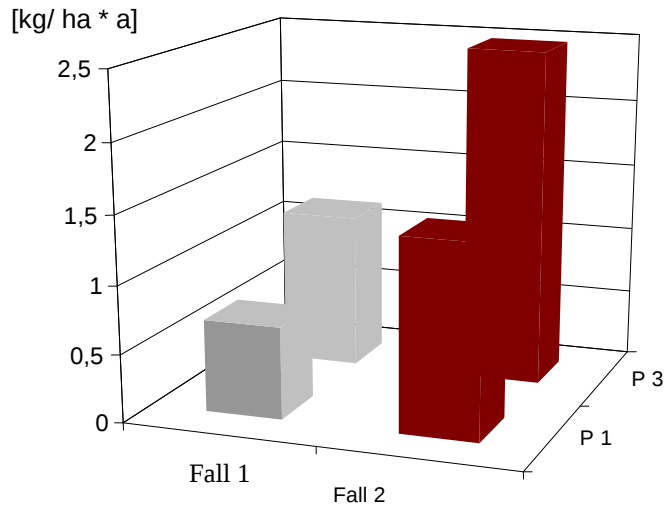


Abbildung 14: Cu-Fracht in Abhängigkeit vom Wasserhaushalt
(Desorptionsraten aus Regenwasserschüttelversuch)

3.3.4 Zusammenfassung

Anhand der Daten aus der Schadstoffanalytik ist die Fläche als Altlast einzustufen. Die Beurteilung der Gefährdung des Grundwassers ist aufgrund der Heterogenität der Altlast und ihrer Nutzung sowie der veränderlichen Grundwasserfließrichtung sehr schwierig. Eine ökologische Bewertung scheint nur durch den Einsatz von Wasser- und Stofftransportmodellen möglich, die die ungesättigte und gesättigte Zone einbeziehen.

Aus den Versuchen zur Schwermetalldesorption wurde die Empfehlung abgeleitet,

- in den Bereichen hoher Cu-Kontamination keine Ascheplätze anzulegen,
- in Bereichen hoher Bleikontamination nicht zu mulchen und
- die Vegetation –falls Ersatzmaßnahmen vorgenommen werden – dahingehend zu optimieren, dass der Laubwald durch Strauch- und Grasvegetation ersetzt wird. Dadurch wird die Wasseraufnahme der Pflanzen aus dem Boden erhöht, die Sickerwasserrate und damit die Schwermetallfracht verringert

II Statistische Auswertung von Gutachtendaten

Die aus Gutachten stammenden Daten zu den Schadstoffen Pb, Cd, Cu, Zn, As, Hg, PAK, BaP und MKW sowie den Bodeneigenschaften pH, Glührückstand und Leitfähigkeit wurden mit

- deskriptiven statistischen Verfahren (Box-Whisker) und
- nichtparametrischen Verfahren (Korrelationen Spearmans, Kendalls Tau

untersucht. Die statistischen Analysen werden a) über die Grundgesamtheit aller Proben und b) für einzelne Substrate vorgenommen.

3.4 Verteilung von Schadstoffen in der Grundgesamtheit

Die in die Verteilungsanalyse einbezogenen Bodengutachten wurden unter verschiedenen Fragestellungen erstellt. Deshalb liegen für die einzelnen Analysenparameter unterschiedliche Grundgesamtheiten vor. Die Anzahl der verwertbaren Analysendaten für die hier statistisch untersuchten Parameter ist in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 16: Datenbasis für statistische Untersuchungen der Grundgesamtheit

Parameter	Anzahl verwertbarer Analysendaten
Blei	2561
Cadmium	2310
Kupfer	2168
Zink	1635
Arsen	2494
Quecksilber	2310
PAK	2275
BaP	2215
MKW	1645
pH	2400
Glührückstand	517
Leitfähigkeit	1202

Bewertungsgrundlage für die Schadstoffkontamination sind die in Tabelle 18 und Tabelle 19 dargestellten Vorsorge- bzw. Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden/ Mensch nach dem Bundesbodenschutzgesetz (1999). Im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) sind –in Abhängigkeit von Bodenart und Humusgehalt - Vorsorgewerte für einige der hier untersuchten Schwermetalle und für organischen Schadstoffe genannt. Für Arsen und MKW sind keine Vorsorgewerte genannt und für die Schwermetalle Kupfer und Zink ist im BBodSchG kein Prüfwert für diesen Wirkungspfad angesetzt.

Tabelle 17: Vorsorgewerte nach Bundesbodenschutzgesetz (1999)

Stoff	Bodenart Ton	Bodenart Lehm/ Schluff	Bodenart Sand	Humusgehalt > 8%	Humusgehalt <= 8%
Cadmium	1,5	1	0,4		
Blei	100	70	40		
Kupfer	60	40	20		
Quecksilber	1	0,5	0,1		
Zink	200	150	60		
Benzo (a)pyren				1	0,3
PAK				10	3

Die Festlegung der Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden/ Mensch erfolgt zusätzlich in Abhängigkeit von der jeweiligen Bodennutzung.

Tabelle 18: Prüfwerte nach Bundesbodenschutzgesetz (1999), Wirkungspfad Boden-Mensch

Stoff	Kinderspielflächen	Wohngebiete	Park- und Freizeitanlagen	Industrie- und Gewerbeflächen
Arsen	25	50	125	140
Blei	200	400	1000	2000
Cadmium	10*	20	50	60
Quecksilber	10	20	50	80
Benzo (a)pyren	2	4	10	12

* in Haus- und Kleingärten, die sowohl für Kinder als auch für den Nutzpflanzenanbau genutzt werden, ist ein Cd-Wert von 2mg/kg TS anzuwenden

Die Verteilungen einzelner Parameter über die Grundgesamtheit aller Daten sind als Boxplots und als Summenkurven dargestellt. In letzteren ist der Prozentsatz an Messwerten unterhalb der Nachweisgrenze (NWG) sowie unterhalb der 25%-, 50%- und 75%-Quartile benannt. In den Boxplots sind pro Parameter alle Werte der Grundgesamtheit einschließlich der unter der Nachweisgrenze berücksichtigt. Die mittleren Nachweisgrenzen der einzelnen Parameter sind in Tabelle 20 aufgeführt, Werte unterhalb dieser Grenzen wurden zwischen „0“ und der Nachweisgrenze per Zufallsgenerator erzeugt.

Tabelle 19: mittlere Nachweisgrenzen

Element	Mittl. Nachweisgrenze [mg/kg]
Arsen	0,02
Blei	0,03
Cadmium	0,01
Quecksilber	0,006
Kupfer	0,007
Zink	0,01
MKW	0,18
PCB	0,008
PAK	0,001
Benzo (a)pyren	0,001

Extremwerte sind in den Boxplots ebenfalls berücksichtigt. Da die Spannweite der Messwerte häufig mehrere Zehnerpotenzen umfasst, sind in vielen Darstellungen die x-Achsen der Summenkurven bzw. die Y-Achsen der Boxplots logarithmisch dargestellt.

Die in den Abbildungen 15 und 16 dargestellten Schwermetallgehalte sind nicht normal verteilt. Es handelt sich um linksschiefe Verteilungen. Viele Verteilungen, die aus natürlichen Prozessen stammen, sind nicht symmetrisch und können meist durch die Lognormalverteilung angenähert werden.

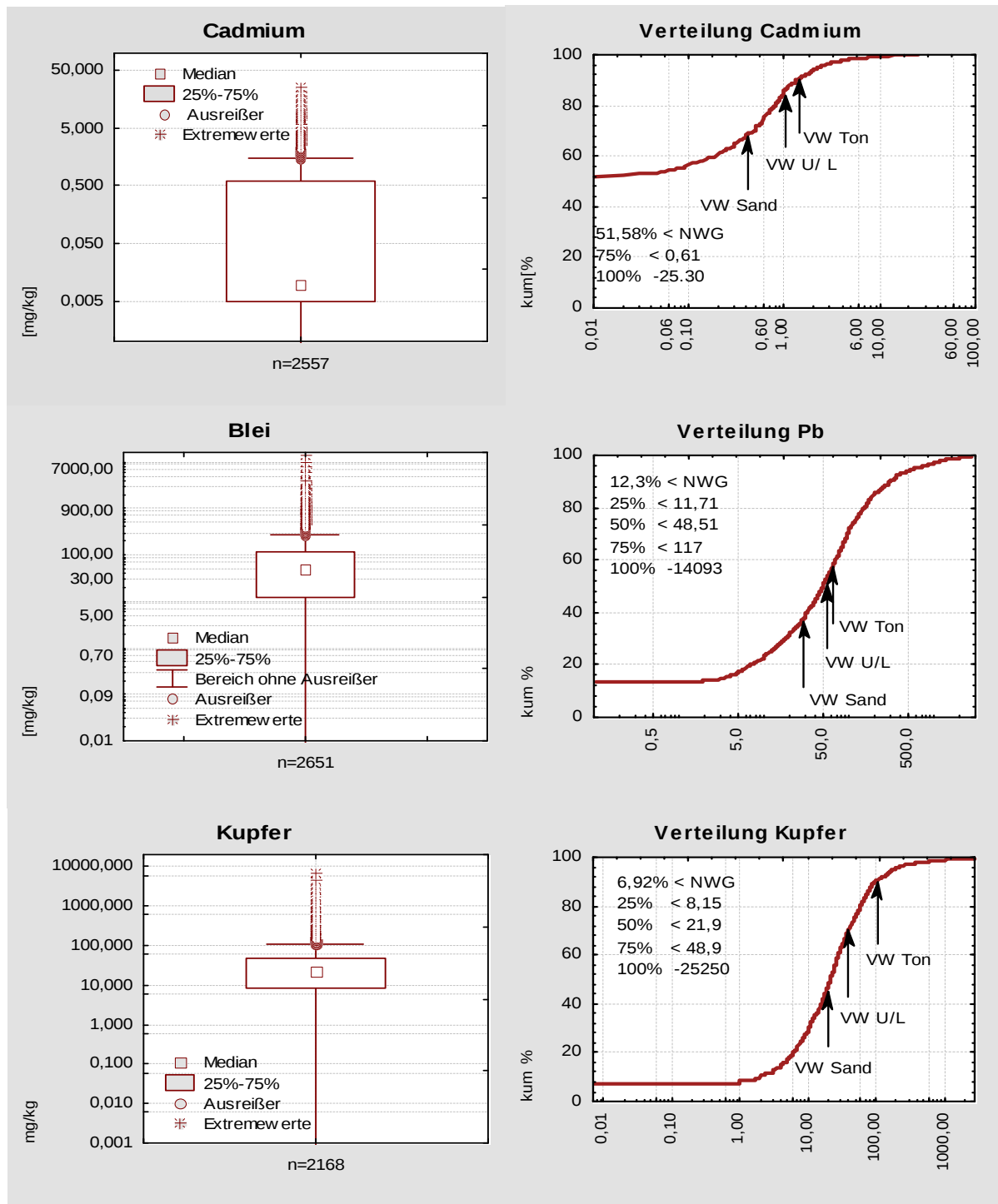


Abbildung 15: Verteilung von Cadmium, Blei und Kupfer in der Grundgesamtheit

Kennzeichnend für die Kontamination durch Schwermetalle ist die große Spannweite der Messwerte über die Grundgesamtheit, die z. T. 5 Zehnerpotenzen beträgt: Von den 2557 Analysenwerten für **Cadmium** liegen ca. 52% zwischen 0 und der mittleren Nachweisgrenze von 0,01mg/kg Boden. Extremwerte treten auf bis zu einem Cd-Gehalt von 25,3mg/kg. Der für den Wirkungspfad Boden/ Mensch festgelegte Prüfwert des BBodSchG für sensible Flächen (Tabelle 18) wird von max. 1,56% aller auf Cd untersuchten Proben überschritten.

Ca. 12,7% der 2651 **Blei**werte lagen unter der Nachweisgrenze von 0.03 mg/kg. Ca 20% der Bleiwerte überschreiten den Prüfwert des BBodSchG für sensible Flächen von 200mg/kg TS. Den Prüfwert für Wohngebiete von 400mg/kg TS überschreiten immerhin noch 10% aller Proben und ca. 3% der Analysenwerte lagen über dem Prüfwert für Parkflächen von 1000mg/ kg TS.

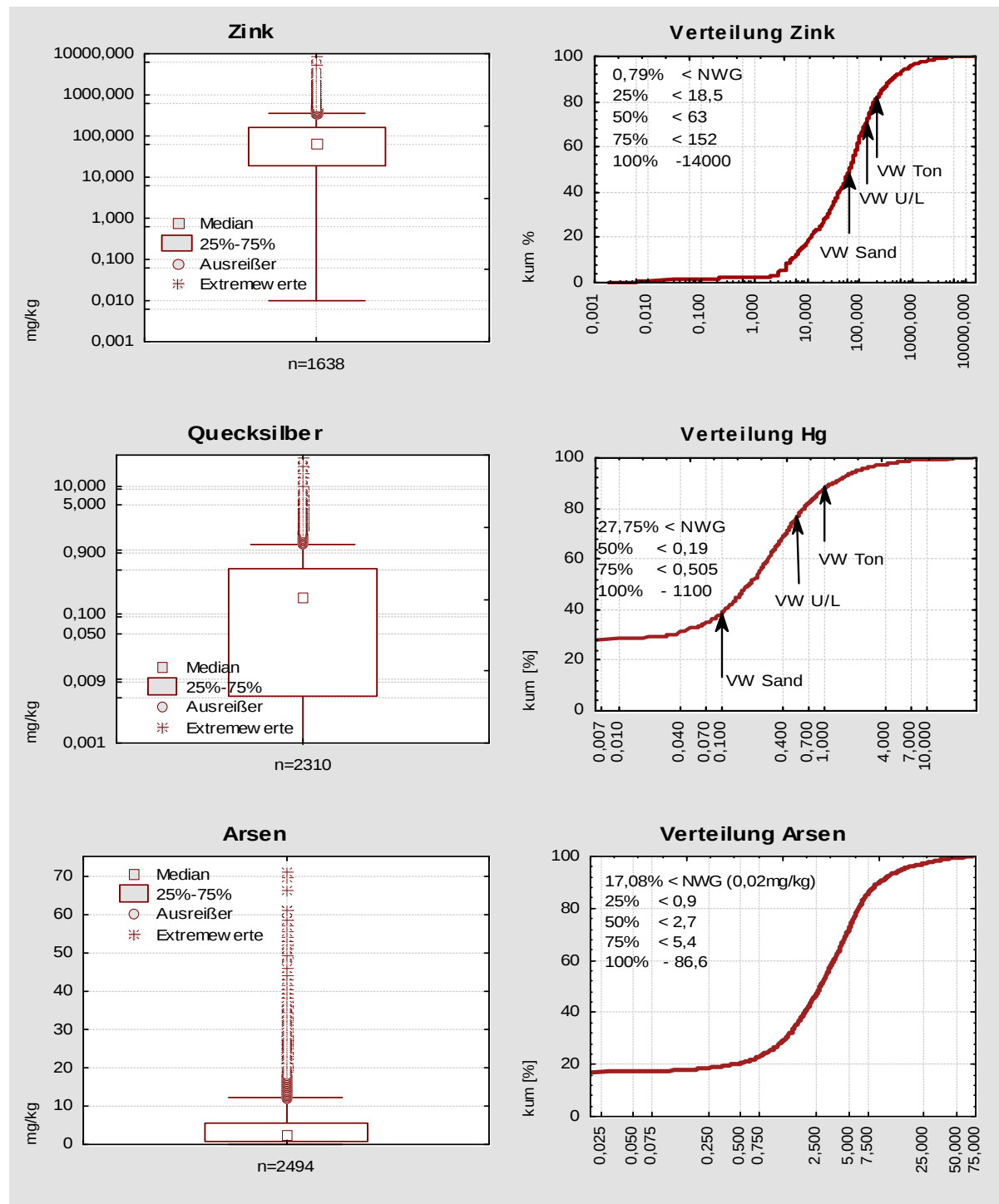


Abbildung 16: Verteilung von Zink, Arsen und Quecksilber in der Grundgesamtheit

6,92% der 2658 **Kupfer**- und 0,79% der 1685 **Zink**-Messwerte liegen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,01mg/kg.

Unter der Annahme sandiger Bodenart liegen ca. 31% aller Cd-Werte, 88% aller Bleiwerte, jeweils 52% der Kupfer- und Zinkgehalte und rund 61% aller Quecksilbergehalte über dem jeweiligen Vorsorgewert.

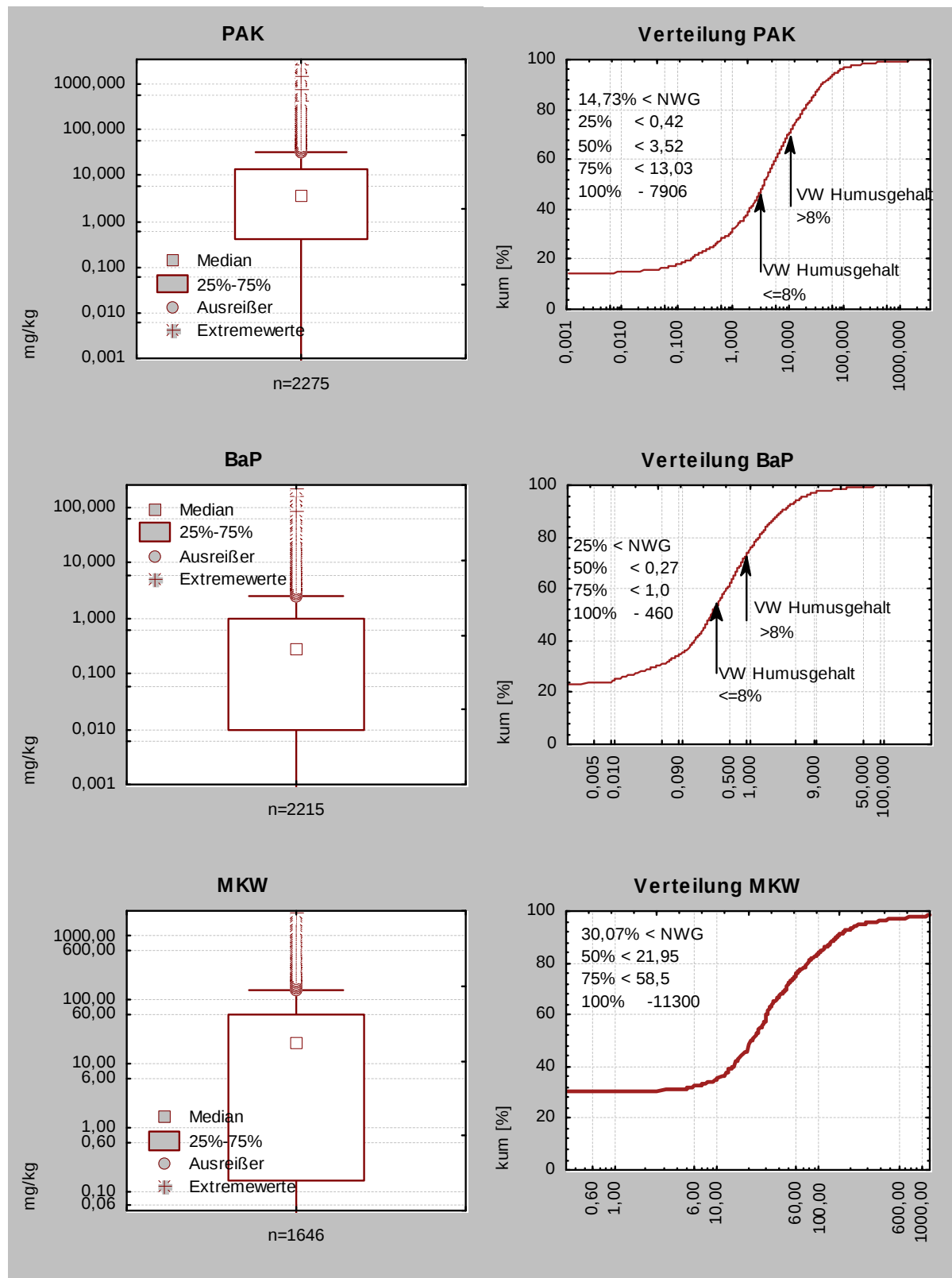


Abbildung 17: Verteilung von PAK (16 PAK/EPA), Benzo(a)pyren und Mineralölkohlenwasserstoffe in der Grundgesamtheit

Die in Abbildung 17 dargestellten Beispiele für die Verteilung von organischen Schadstoffen in der Grundgesamtheit sind repräsentativ für die Verteilung für die ebenfalls in diesem Rahmen untersuchten organischen Schadstoffe PCB und weitere PAK-Spezies. Auch die organischen Schadstoffe liegen nicht normal verteilt, sondern in einer unsymmetrischen linksschiefen Verteilung vor. Ein hoher Anteil aller auf organische Schadstoffe untersuchten Proben liegt unter den jeweiligen Nachweisgrenzen der Einzelsubstanzen, so 14,73% von 2275 PAK-Summenwerten, 24,38% der 2215 BaP-Gehalte sowie 30,07% der 1645 MKW-Messwerte.

Der im BBodSchG für den Wirkungspfad Boden/ Mensch angegebene **BaP**-Prüfwert (Tabelle 19). für Flächen mit sensibler Nutzung (2mg/kg) wird von 15% aller Proben überschritten. Über den Vorsorgewerten humusarmer Böden lt. BBodSchG (Tabelle 17) liegen 53% aller Gesamt-PAK und 47% der BaP-Gehalte.

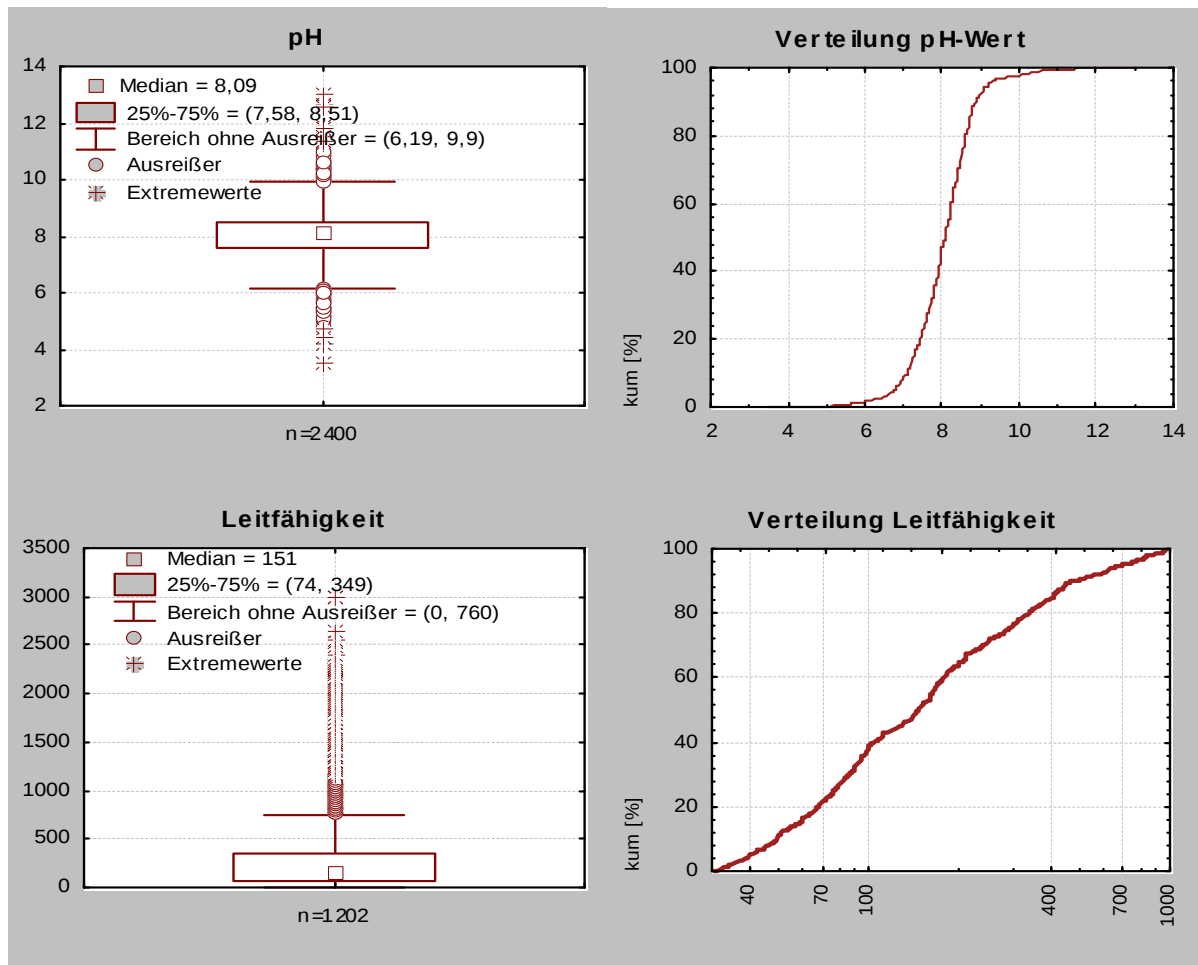


Abbildung 18.: Verteilung von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit über die Grundgesamtheit

Die Bodeneigenschaften pH-Wert und Leitfähigkeit zeigen andere Verteilungskurven als die Schadstoffe (Abb. 18). Die **pH-Werte** sind über die Grundgesamtheit normal verteilt. Dabei sind ca. 50% der 2400 Proben als mittel alkalisch einzustufen – der Median aller Proben liegt bei 8,09. Diese im Durchschnitt hohen pH-Werte sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass Gutachten meistens zu Bodenproben aus Baulücken erstellt wurden, die durch den 2. Weltkrieg entstanden sind. In solchen Baulücken wurde häufig Trümmerschutt und damit carbonatreiches Material verkippt- Oberbodenproben aus dem Stadtgebiet Berlins sind im Vergleich dazu lt Umweltatlas 2006 nur schwach alkalisch bis neutral.

Die Bodeneigenschaft „**Leitfähigkeit**“ ist nicht normal verteilt, sondern kann am ehesten durch eine Exponentialfunktion angenähert werden. Der Median der einbezogenen 1202 Leitfähigkeitswerte liegt bei 151 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die hohe Zahl von Extremwerten ist vermutlich ebenfalls darauf zurückzuführen, dass häufig trümmerschuttreiche Proben mit hohen Sulfatgehalten analysiert wurden.

3.5 Eigenschaften einzelner Substrate

In die substratbezogene Auswertung von Analysendaten wurden diejenigen 162 Gutachten aufgenommen, die eine Bodenansprache in Anlehnung nach KA4 enthielten. Dementsprechend waren mindestens die Parameter Bodenart und -farbe, Bodenfeuchte, Horizontierung, Haupt- und NebenkompONENTEN und Carbonatgehalt sowie der Bodentyp bekannt. Die Substratzuordnung wurde i. d. R. durch die Gutachterfirmen vorgenommen, Dabei ist die Trennung zwischen Bau- und Trümmerschutt wahrscheinlich in vielen Fällen nicht korrekt. Falls in den Gutachten kein Substrat benannt, aus der Textbeschreibung bzw. historischer Recherche aber eine eindeutige Zuordnung möglich war, wurde diese durch den Erfasser vorgenommen.

Zu den einzelnen Substraten liegen unterschiedliche Probenzahlen vor. Eine horizontbezogene Probenahme fand nur teilweise statt. Oft wurden Mischproben über Horizontgrenzen hinweg genommen. Aus diesem Grund waren z.B. sehr wenige Proben dem Substrat „humoser Oberboden“ zugeordnet. Der überwiegende Teil aller Proben stammt aus dem Unterboden, d.h. aus Probenahmetiefen > 30cm.

Einzelwerte, die zu Hauptkomponenten Beton, Kies, Kohle, Müll, Ton, Kalkmudde, Steinboden und Schotter vorlagen, werden hier nicht betrachtet.

Als technogene Substrate werden Bau- und Trümmerschutt, Bauschuttmischsubstrate, Sandmischsubstrate, Schlacke und Asche angesprochen. Sand, Humoser Oberboden, Torf, Lehm und Mergel sind natürliche Substrate, die am Beprobungsort entweder natürlich anstehen oder anthropogen umgelagert wurden. Als Bauschutt- bzw. Sandmischungen wurden die Proben bezeichnet, die lt. Gutachten Anteile dieser beiden Substrate sowie zwischen 30 und 50% andere nicht genauer definierte Substrate enthielten.

Die Gutachten wurden unter verschiedenen Aspekten erstellt, dementsprechend liegt zu den einzelnen Analysenparametern substratbezogen eine ungleiche Zahl von Messwerten vor (Tab. 21).

Tabelle 20: Datenbasis für substratbezogene statistische Untersuchungen

	Anzahl verwertbarer Analysendaten					
	pH	Pb	Cd	Zink	Σ PAK	BaP
Bauschutt	1141	1309	1300	900	1225	1199
Bauschuttmischsubstrate	21	39	39	7	26	11
Sand	693	773	433	471	650	639
Sandmischsubstrate	27	39	35	24	37	24
Schlacke	9	9	9	7	9	9
Trümmerschutt	209	246	214	81	187	187
Asche	4	5	5	4	5	5
Humoser Oberboden	53	72	71	22	49	34
Torf	9	9	9	4	11	11
Mergel	21	21	21	19	21	21
Lehm	6	6	6	3	5	5

Werte unterhalb der Nachweisgrenze werden zur vollständigen Darstellung der Verteilung in die Betrachtung einbezogen.

Die Analysendaten zu den einzelnen Parametern liegen - bis auf den pH-Wert- nicht normal verteilt vor, weshalb nichtparametrische Tests zum Nachweis signifikanter Unterschiede genutzt wurden. Die Signifikanz der Merkmalsunterschiede zwischen den einzelnen Substraten wurde durch den Man-Whitney-U-Test bzw. über multiple Vergleiche der p-Werte untersucht. Als Signifikanzniveau wurde $p=0,05$ gewählt, d.h. $p\text{-Werte} < 0,05$ weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Substraten bezüglich des jeweiligen Analysenparameters hin.

3.5.1 Bauschutt

Die als Bauschutt bezeichneten Substrate enthalten lt. Gutachten technogene Komponenten in folgenden Anteilen:

Tabelle 21: Gehalt technogener Komponenten im Bauschutt

Komponente	Anteil [Vol%]
Ziegel	2 – 70
Mörtel	2 – 50
Schlacke	2 -60
Asche	2 – 30
Glas	5 – 70
Schotter	5 – 50
Teer	5 – 15
Holzkohle	2 – 10
Beton	2 – 20
Holz	5 – 10

Der pH-Wert ist die am häufigsten bestimmte Bodeneigenschaft in den Gutachten. Dagegen wird die elektrische Leitfähigkeit deutlich seltener analysiert.

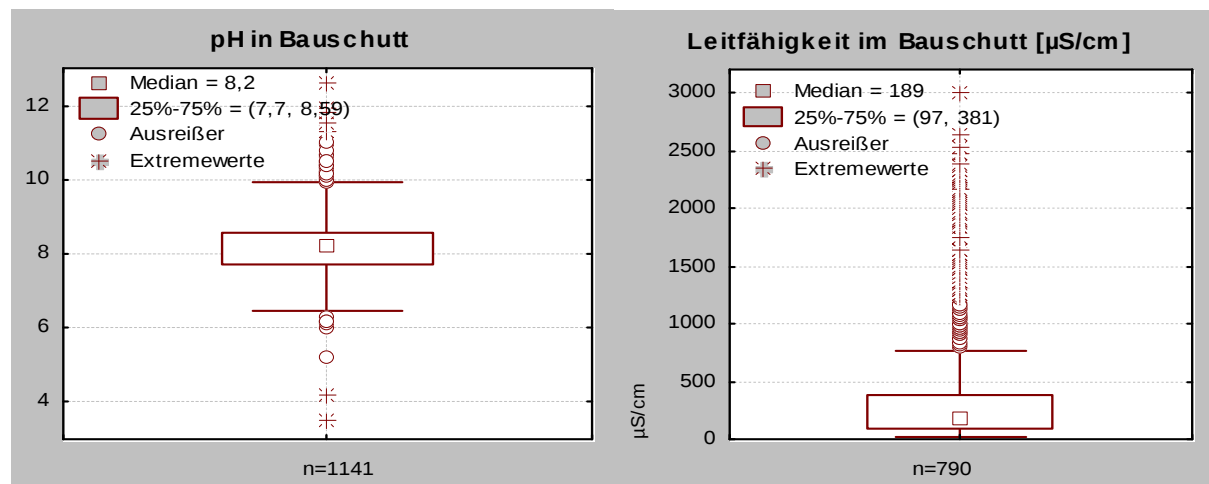


Abbildung 19: Verteilung von pH-Wert und Leitfähigkeit im Bauschutt

Die als Bauschutt eingestuft Substrate zeigen im Mittel basische pH-Werte sowie –inklusive aller Ausreißer – eine große Spannweite über 4 pH-Stufen. Die Werte liegen normal verteilt vor (Abb. 19).

Der Median der elektrischen Leitfähigkeit aller Bauschuttproben liegt mit 189 µS/cm über dem Median der Grundgesamtheit für diesen Parameter (151 µS/cm). Die 25%- und 75%-Quantile (97 und 381 µS/cm) verdeutlichen die hohe Spannweite der Leitfähigkeit von Bauschuttproben. Dieses Substrat ist außerdem gekennzeichnet durch eine große Zahl von Leitfähigkeitswerten oberhalb des Bereiches ohne Ausreißer: ca. 13% aller Bauschuttproben liegen über dem Wert von 772 µS/cm und genau 10% aller Bauschuttproben weist eine Leitfähigkeit von > 1mS/cm auf. Hohe EC-Werte im Bauschutt sind meist auf Gipsanreicherungen in diesem Substrat zurückzuführen. Sie sind pflanzenphysiologisch problematisch, da sie ab ca. 1mS/cm zu Wachstumsbeeinträchtigungen an Ziergehölzen und ab 2mS/cm zu Blattchlorosen führen (Hiller & Meuser 1997). Des Weiteren besteht in Gebieten mit Bauschuttanreicherungen die Gefahr der Salzauswaschung und –Verlagerung in das Grundwasser.

Die Gehalte an Schwermetallen und PAK variieren im Bauschutt sehr stark. Die Ursache dafür liegt in der Beteiligung unterschiedlichster technogener Komponenten in den Bauschuttgemengen.

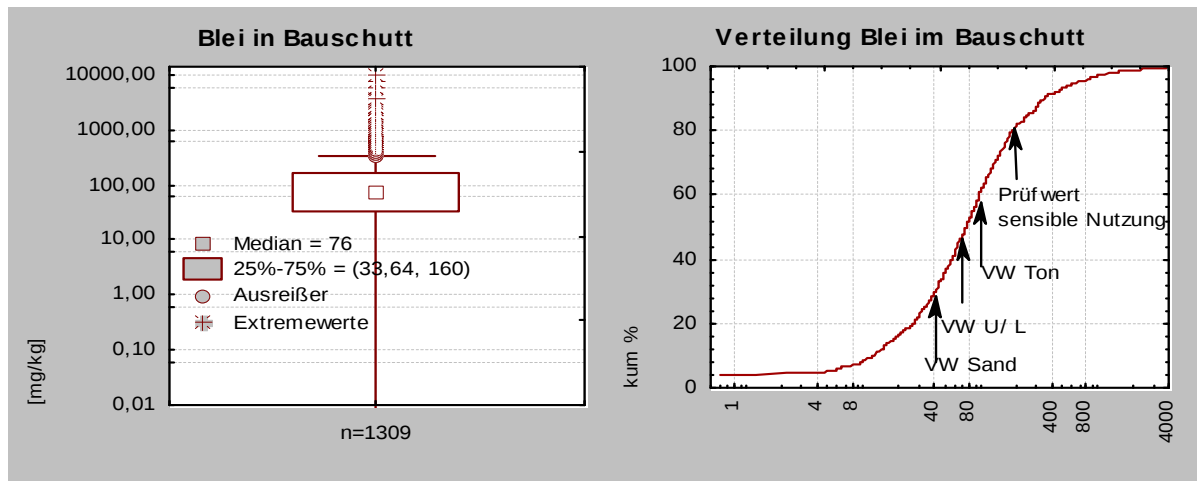


Abbildung 20: Verteilung von Blei im Bauschutt

Für **Blei** liegen die Vorsorgewerte nach BBodSchG (1999) in Abhängigkeit von der Bodenart für den Wirkungspfad Boden/Mensch zwischen 40 (Sand) und 100 (Ton) mg/kg. Unterhalb des Vorsorgewertes für sandige Bodenart liegen lediglich 29,26% und über dem Blei-Vorsorgewert für Ton noch 38,43% aller Bauschuttproben. Die Prüfwerte für Blei lt. BBodSchG sind nutzungsabhängig zwischen 200 und 2000 mg/kg festgesetzt, wobei der niedrige Wert für sensible Nutzungen wie Kinderspielplätze, der hohe Wert für Industrieflächen gilt. Der Blei-Prüfwert für sensible Nutzungen wird durch 18,33%, der für Industrieflächen durch 1,5% aller Bauschuttproben überschritten (Abb. 20).

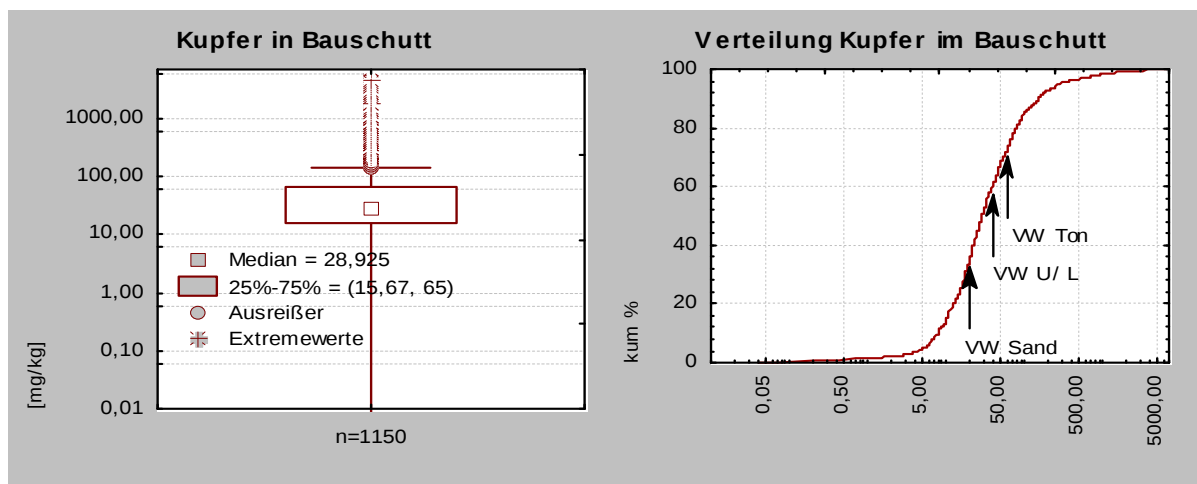


Abbildung 21: Verteilung von Kupfer im Bauschutt

Für **Kupfer** sind Bodenart-abhängige Vorsorge- aber keine Prüfwerte genannt. Für Sand liegt dieser bei 20mg/kg, für Schluff bei 40 und für Ton bei 60mg/kg TS. Unter dem Vorsorgewert für Sand liegen 34% der Analysenwerte für Bauschutt, unter dem für Schluff 60,43% und unterhalb des Vorsorgewertes für Ton 71,91% der Analysendaten. D.h. 76% aller Proben überschreiten den Cu-Vorsorgewert für die in Berlin am weitesten verbreitete Hauptbodenart Sand (Abb. 21). Dementsprechend wäre für Kupfer die Festlegung eines nutzungsabhängigen Prüfwertes ebenso sinnvoll wie für andere Schwermetalle. Dieser könnte – in Analogie zu Blei – für sensible Flächen bei der 5-fachen Konzentration des Vorsorgewertes für sandige Böden, also bei einem Wert von 100mg/kg TS angesetzt werden.

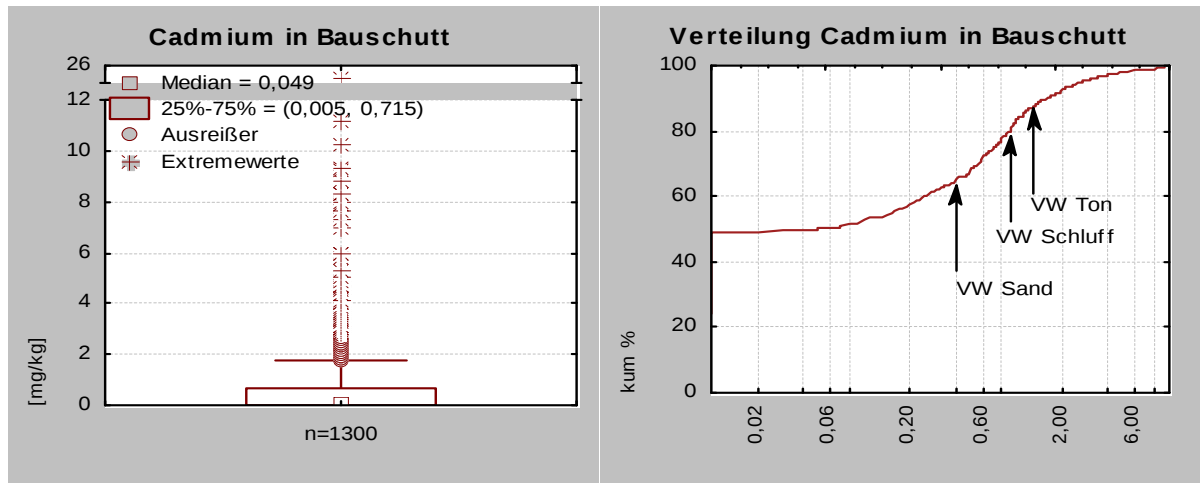


Abbildung 22: Verteilung von Cadmium im Bauschutt

Der Median für Cadmium im Bauschutt liegt mit 0,049 um nahezu eine Größenordnung unter dem Vorsorgewert/ Wirkungspfad Boden-Mensch von 0, 4 mg/kg für die Bodenart Sand lt. BBodSchG. Das ist darauf zurück zu führen, dass nahezu 49% aller analysierten Bauschuttproben einen Cd-Gehalt $\leq$ der mittleren Nachweisgrenze für Cadmium von 0,01mg/kg aufweisen. 10,69% aller Cd-Analysenwerte im Bauschutt überschreiten den Vorsorgewert für Cadmium der Bodenart Ton, der bei 1,5mg/kg liegt. Über den nutzungsabhängigen Prüfwerten für Cadmium von 10 (Spielplätze), 50 (Park/Freizeitanlage) bzw. 60 mg/kg (Gewerbegebiet) liegen maximal 0,5% aller Cd-Werte im Bauschutt.

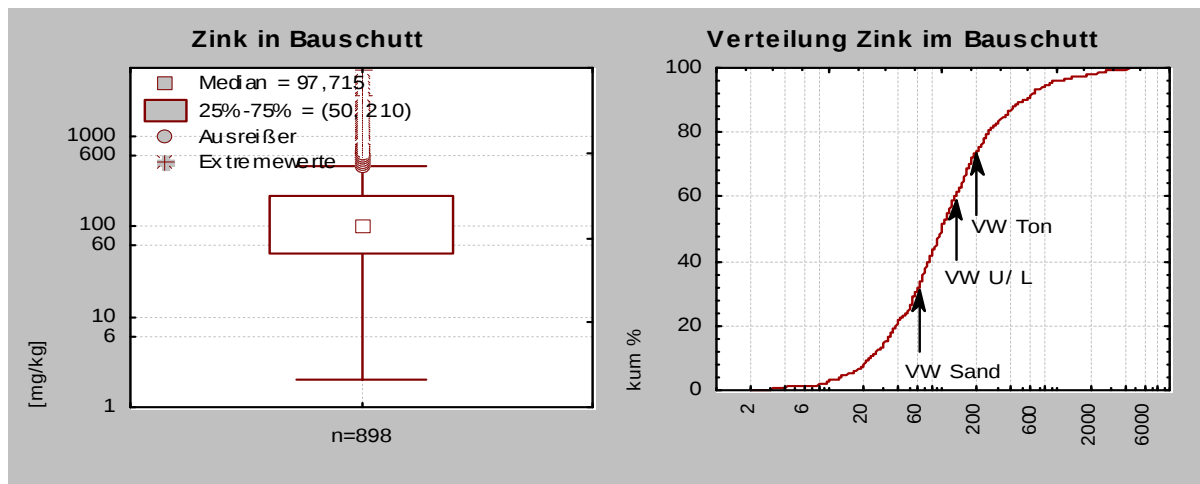


Abbildung 23: Verteilung von Zink im Bauschutt

Für **Zink** sind keine Prüfwerte im BBodSchG festgelegt. Die Vorsorgewerte für Zink liegen bei 60 (Sand), 150 (Schluff) und 200 (Ton) mg/kg TS. 68,82% der Analysendaten überschreiten den Vorsorgewert für Sand, 35,52% den Wert für Schluff und 25,61% aller Zink-Messwerte im Bauschutt lagen über dem Vorsorgewert für Ton (Abb. 23).

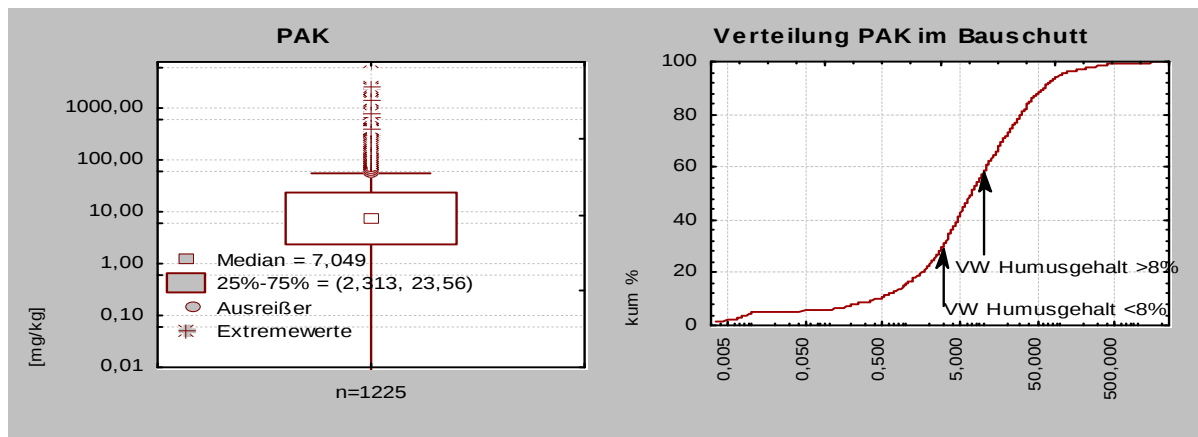


Abbildung 24: Verteilung von PAK im Bauschutt

Mehr als 40% aller im Bauschutt analysierten PAK-Werte liegen über dem Vorsorgewert (BBodSchG 1999, Wirkungspfad Boden/ Mensch) für humusreiche Böden und nahezu 70% überschreiten den Vorsorgewert für humusarme Böden (Abb. 24).

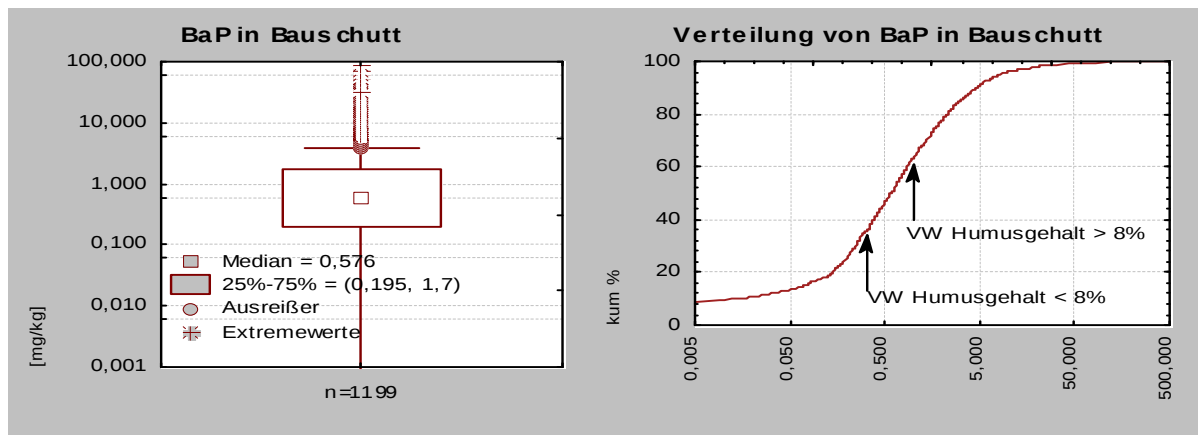


Abbildung 25: Verteilung von BaP im Bauschutt

Die Kontamination von Bauschutt durch Benzo (a)Pyren liegt ca. um eine 10-er Potenz unter den PAK-Gehalten und zeigt in Bezug auf die Vorsorgewerte ein ähnliches Verhalten (Abb. 25).

Fazit

Die in den Gutachten als „Bauschutt“ eingestuften Substrate sind gekennzeichnet durch

- schwach bis mittel alkalische pH-Werte (Kurzzeichen a2 bis a3)
- mittlere bis hohe EC-Werte, die z. T. im pflanzenphysiologisch schädlichen Bereich liegen
- hohe Blei und Kupferkontaminationen
- sehr geringe Cadmium-Gehalte
- hohe Zinkgehalte
- hohe PAK- und Benzo(a)pyren-Gehalte.

3.5.2 Bauschuttmischungen

Als Bauschuttmischungen werden alle Substrate bezeichnet, die lt. Gutachten weniger als 100% Bauschuttanteil haben, in denen Bauschutt aber das dominierende Substrat ist. Weitere Bestandteile dieser Mischsubstrate sind häufig humoser Boden und/ oder Sand. Insgesamt wurden lediglich 41 Proben als Bauschuttmischsubstrate eingeordnet. Darin waren technogene Komponenten wie folgt enthalten:

Tabelle 22: Gehalt technogener Komponenten in Bauschuttmischungen

Komponente	Anteil [Vol%]
Ziegel	2 – 20
Mörtel	2 – 10
Schlacke	2 -10
Glas	5 – 10
Keramik	5 – 10
Beton	5 – 10
Holz	2 – 5

Die einzelnen Parameter (pH, Lf usw.) wurden nur an Teilmengen dieses Probenkollektives bestimmt. Aus diesem Grund wird tw. auf die Darstellung der Verteilung in Summenkurven verzichtet.

Beide Kennwerte – der pH und die elektrische Leitfähigkeit – liegen normal verteilt in diesem Substrat vor. Der Median für pH ist schwach basisch und die pH-Spannweite ohne Ausreißer umfasst 2 pH-Stufen. Die elektrische Leitfähigkeit der Bauschuttmischungen liegt mit allen Werten unterhalb der als Pflanzen schädigend geltenden Leitfähigkeit von 1mS/cm. Allerdings ist der Lf- Median von 360µS/cm nahezu doppelt so hoch wie dieser Median für die Grundgesamtheit, der bei 151µS/cm liegt.

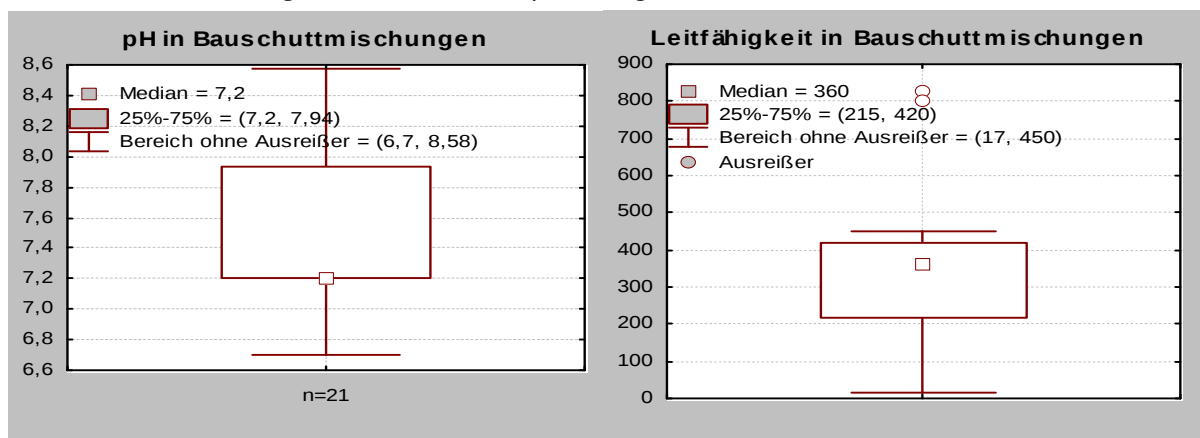


Abbildung 26: pH und elektrische Leitfähigkeit von Bauschuttmischungen

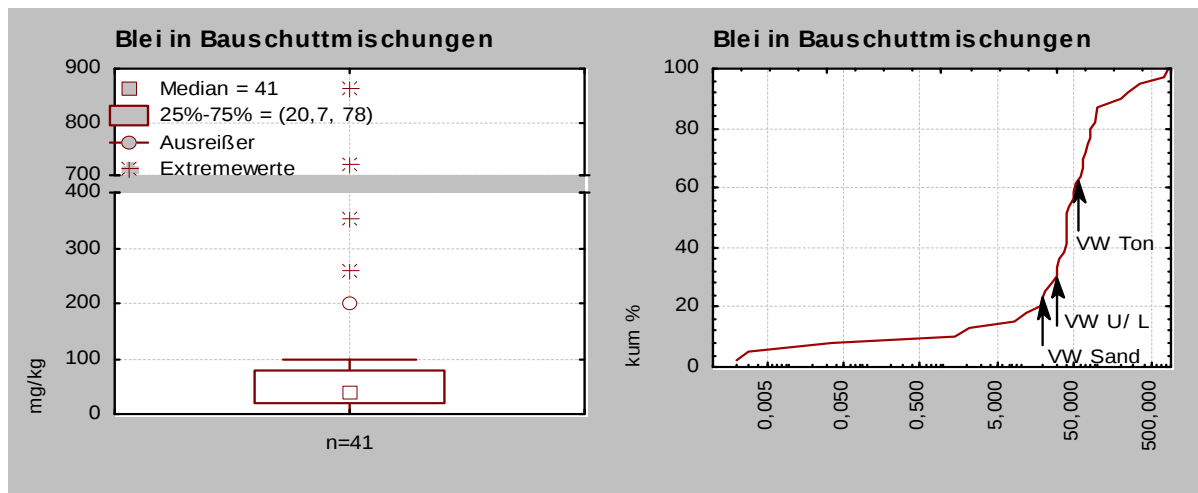


Abbildung 27: Verteilung von Blei in Bauschuttmischungen

Der Median der **Bleib**elastung für die untersuchten Proben aus Bauschuttmischungen liegt mit 41mg/kg unter dem Median der Grundgesamtheit mit 48mg/kg. Trotzdem überschreitet ein erheblicher Anteil dieser Proben – nämlich nahezu 80% den Pb-Vorsorgewert für sandige Böden lt. BBodSchG 1999 und 68% bzw. 28% aller Proben überschreiten den Vorsorgewert für schluffig-lehmige bzw. tonige Böden (Abb. 27).

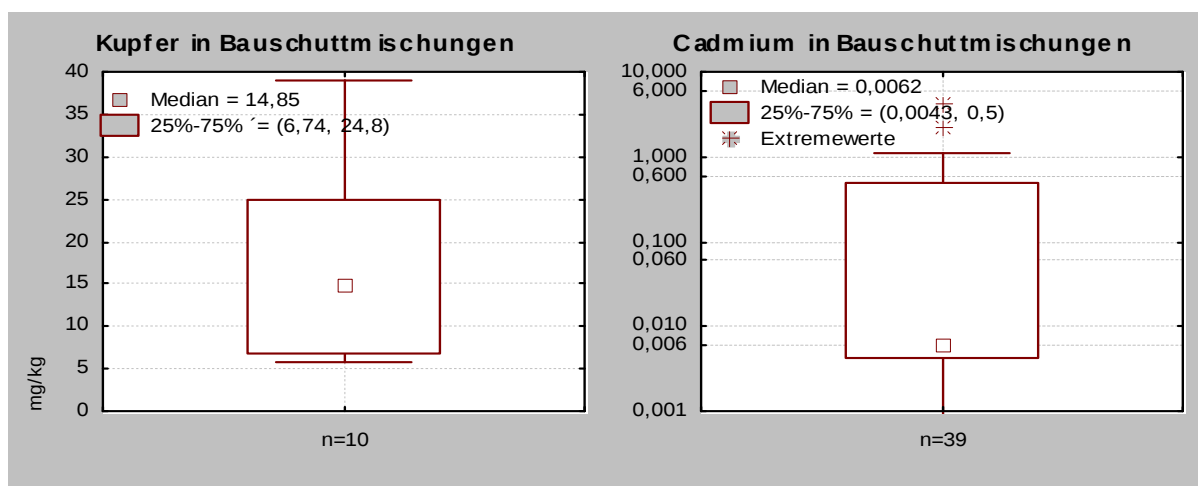


Abbildung 28: Verteilung von Kupfer und Cadmium in Bauschuttmischungen

Für **Kupfer** liegen lediglich 10 Messwerte in Bauschuttmischungen vor, von denen keiner den Kupfer - Vorsorgewert von 60mg/kg für tonreiche Böden überschreitet. Der Median der Cu-Belastung in Bauschuttmischungen liegt deutlich unter dem Median der Grundgesamtheit von 21,9mg/kg in der TS. Es ist aber grundsätzlich mit einer Cu-Belastung zu rechnen, da keine Messwerte unter der Nachweisgrenze auftreten. Von den 39 auf Cadmium analysierten Proben wiesen 28 Cd-Gehalte unter der mittleren Nachweisgrenze von 0,01mg/kg TS auf, dadurch entsteht eine linksschiefe Verteilung dieses Parameters. Der Bereich ohne Ausreißer liegt unterhalb der Vorsorgewerte für Cadmium nach BBodSchG und auch die 2 Ausreißerwerte überschreiten keinen der nutzungabhängigen Prüfwerte nach BBodSchG (Abb. 28).

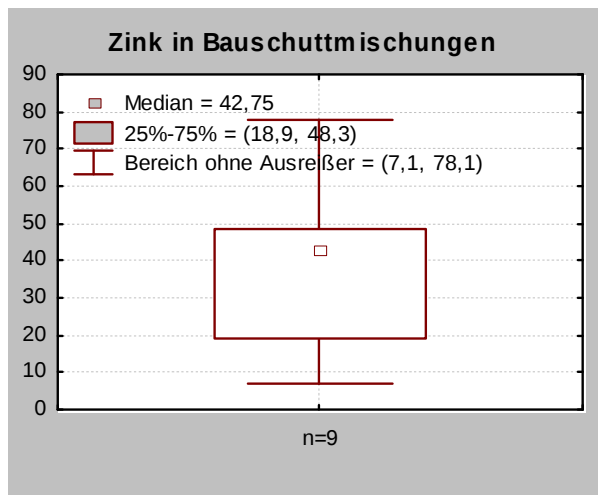


Abbildung 29: Zink in Bauschuttmischungen

Für **Zink** lagen zu Bauschuttmischungen 9 Analysenwerte vor, deren Verteilung in Abbildung 29 dargestellt ist. Diese Zinkwerte zeigen –verglichen mit den Zinkgehalten über die Grundgesamtheit– eine deutlich geringere Belastung der Bauschuttmischungen an.

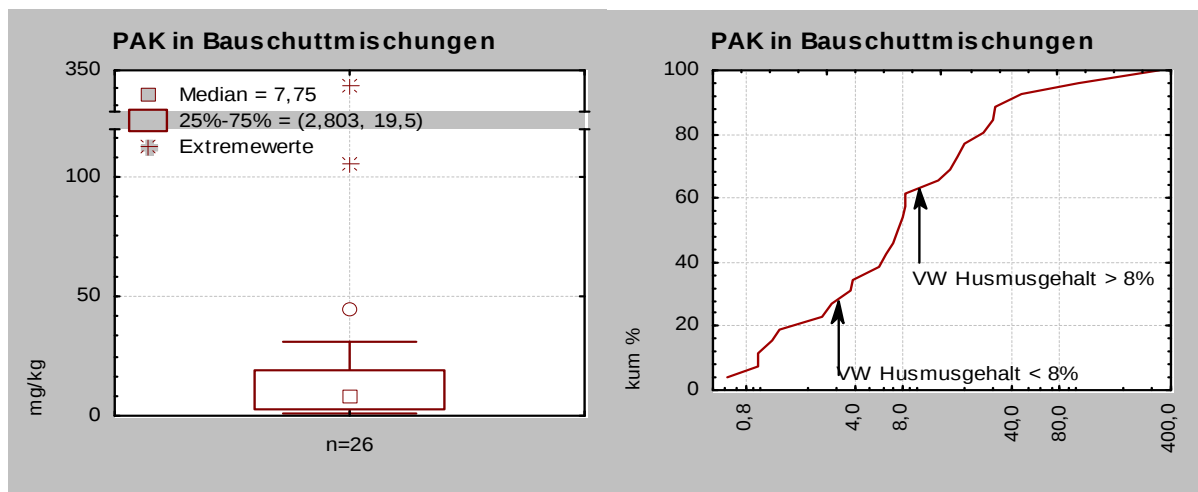


Abbildung 30: PAK in Bauschuttmischungen

In Bauschuttmischungen liegen **PAK** nahezu normal verteilt vor (Abb. 30). Ein Großteil der analysierten Proben (70%) überschreitet den Vorsorgewert/ Wirkungspfad Boden-Mensch von 3mg/kg TS erheblich. Der Median der PAK-Belastung liegt mit 7,75 mg/kg PAK in der TS mehr als doppelt so hoch wie der PAK-Median der Grundgesamtheit von 3,52mg/kg. Unter der mittleren Nachweisgrenze für PAK liegt keiner der Messwerte.

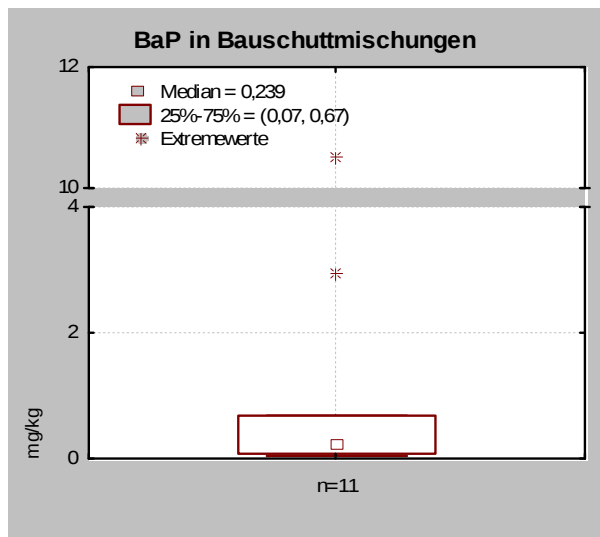


Abbildung 31: Benzo(a)pyren in Bauschuttmischungen

Benzo(a)pyren wurde in den Bauschuttmischungen nur in geringem Umfang analysiert. Abgesehen von zwei Ausreißerwerten liegen die restlichen 9 Messwerte zu BaP unter dem Vorsorgewert für humusreiche Böden von 1mg/kg TS. Das bedeutet, dass die relativ hohe PAK-Gesamtkontamination in den Bauschuttmischsubstraten aus anderen PAK-Spezies resultiert.

Fazit

Insgesamt zeigen die hier erfassten Bauschuttmischsubstrate

- sehr schwach bis schwach alkalische pH-Werte
- im Mittel hohe EC-Werte
- im Mittel geringe Bleibelastung
- geringe Kupferbelastung
- sehr geringe Cadmium-Gehalte
- hohe PAK-Gehalte und mittlere BaP-Gehalte.

3.5.3 Sand

In Berlin sind als Ausgangsgestein für die Bodenbildung natürlicherweise Tal- bzw. Geschiebesande weit verbreitet. Die geogenen Grundgehalte sandiger Substrate liegen für Blei zwischen 10 und 15mg/kg, für Cadmium unter 0,25mg/kg (Blume 1993, Kretschmer et al 1997), für Kupfer nach Blume (1985) bei 2mg/kg (Talsand) und für Zink bei 10mg/kg.

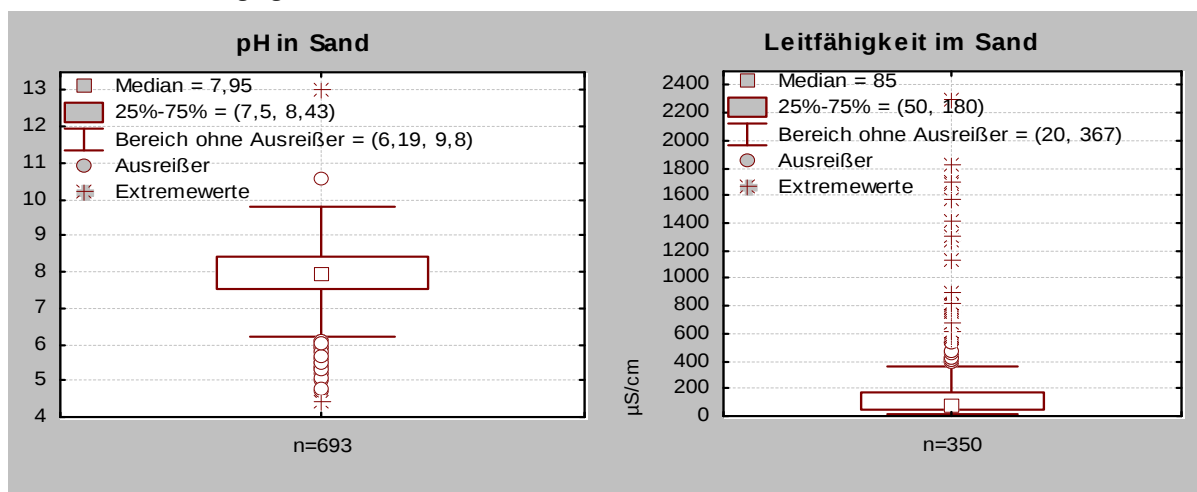


Abbildung 32: pH und Leitfähigkeit in sandigen Substraten der Berliner Innenstadt

Die in der Innenstadt vorliegenden sandigen Substrate sind aber in der Regel anthropogen umgelagert.

Der Median des **pH-Wertes** liegt mit 7,95 nur geringfügig unter dem Median der Grundgesamtheit für diesen Parameter mit 8,09. Der hohe pH-Wert der sandigen Substrate kann zum einen als Hinweis auf eine Alkalisierung der Böden, andererseits aber auch als Hinweis auf eine ungenaue Substratansprache gedeutet werden, da Sande in der Regel eher sehr schwach saure bis saure Substrate sind (Abb. 32).

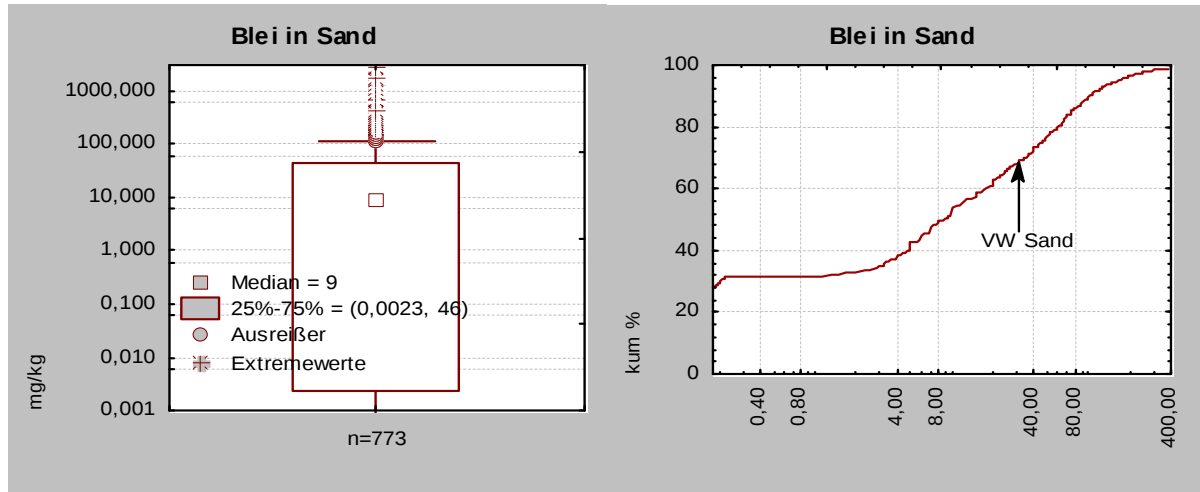


Abbildung 33: Bleibelastung in sandigen Substraten

Der Median der **Bleibelastung** von 9mg/kg liegt unter den geogenen Grundgehalt für Blei im Sand von 10 bis 15mg/kg und unter dem bodenart-unabhängigen Hintergrundgehalt für Blei in Berliner Oberböden; Dieser wurde auf der Basis von 843 Proben auf 22 (50. Perzentilwert) bzw. 44 (90.Perzentilwert) festgelegt wurde (Dorn 1999). Überschreitungen der bodenart-abhängigen Vorsorgewerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch sind in Abbildung 33 verdeutlicht. Die sandigen Substrate sind hinsichtlich der Bleibelastung durch eine hohe Anzahl von Ausreißern bzw. Extremwerten gekennzeichnet, die geltende Prüfwerte lt. BBodSchG (1999) zum Teil erheblich überschreiten.

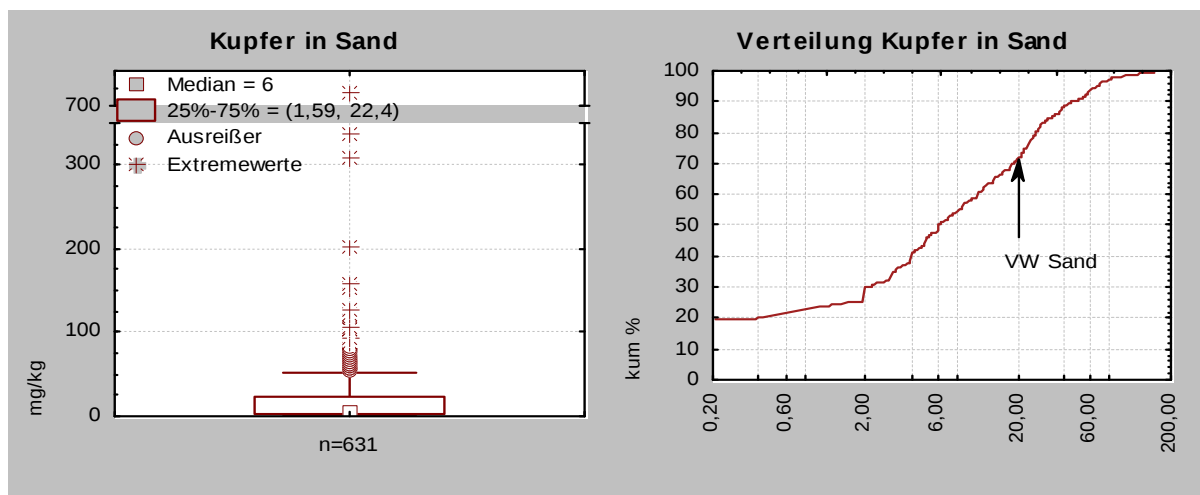


Abbildung 34: Kupfer in sandigen Substraten

Auch die **Kupfergehalte** sandiger Substrate liegen – verglichen mit der Grundgesamtheit – niedrig, was durch den Median von 6 mg/kg (Abb. 34) gegenüber 21,9 deutlich wird (Abbildung 12). Der prozentuale Anteil von Proben, die die Vorsorgewerte lt. BBodSchG überschreiten, ist unabhängig davon hoch.

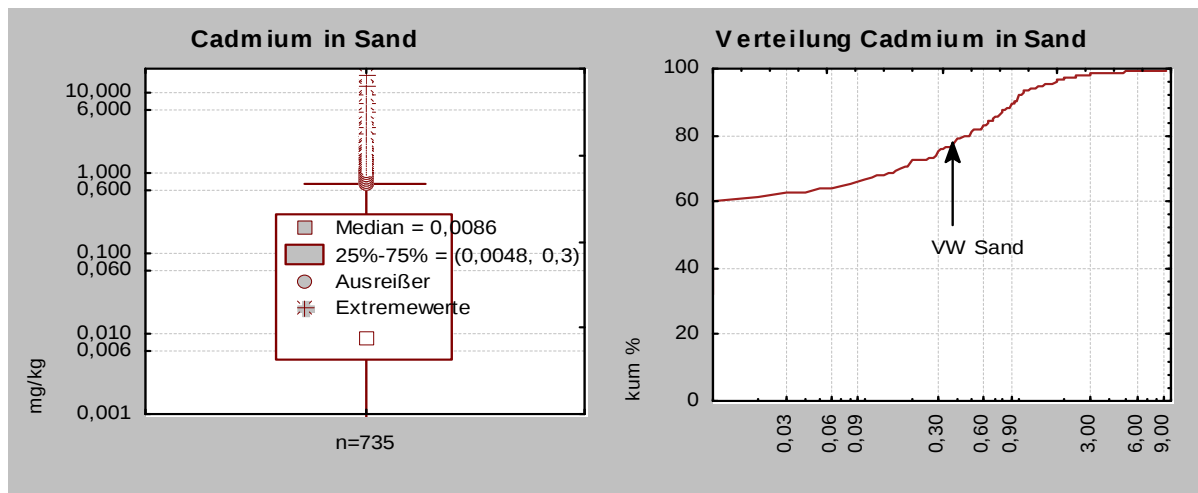


Abbildung 35: Cadmium in sandigen Substraten

Ca. 60% der **Cd**-Werte in den sandigen Substraten liegt unterhalb der mittleren Nachweisgrenze von 0,01mg/kg TS. Somit liegt auch der Median unter diesem Wert. Die Vorsorgewerte lt BBodSchG werden in Abhängigkeit von der Bodenart durch 22%, 5% bzw. 2% aller Proben überschritten (Abb. 35).

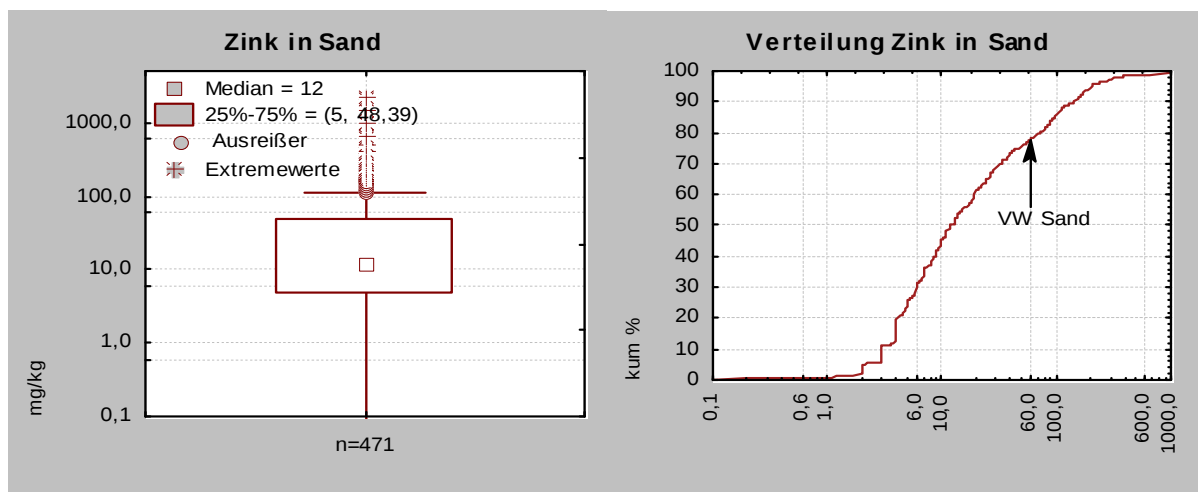


Abbildung 36: Zink in sandigen Substraten

Sandige Substrate sind durch geringe **Zink**gehalte gekennzeichnet, was sich in dem niedrigen Median von 12 mg/kg TS widerspiegelt - der Median für Zink der Grundgesamtheit liegt bei 65,68mg/kg TS. 22% aller im Sand gemessenen Zn-Werte überschreiten den vorsorgewert für dieses Substrat. (Abb. 36).

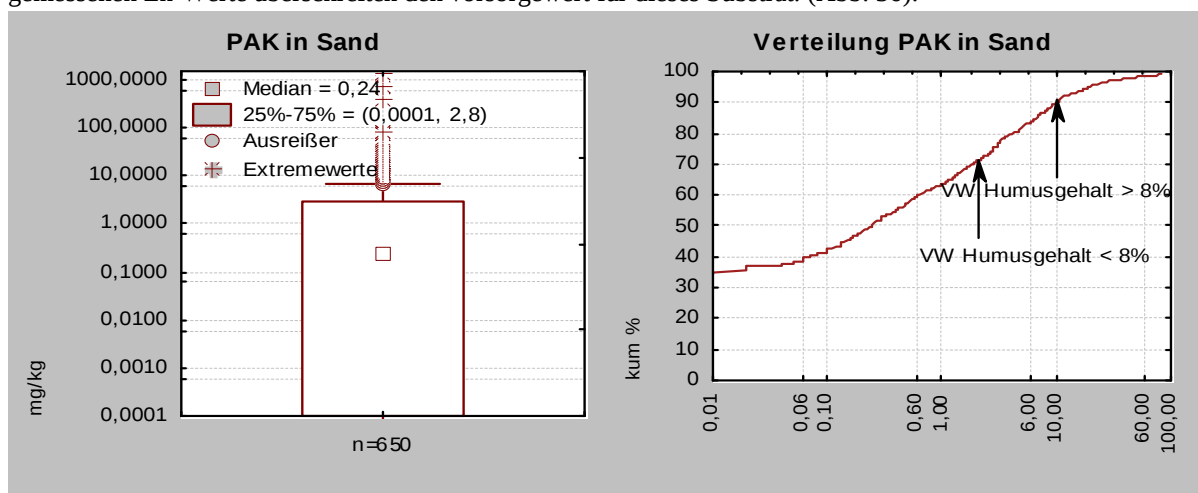


Abbildung 37: PAK in sandigen Substraten

Annähernd 34% aller Proben dieses Substrates weisen **PAK**-Gehalte unter der Nachweisgrenze (0,001mg/kg TS) auf. Die je nach Humusgehalt bei 3 bzw. 10 mg/kg TS liegenden Vorsorgewerte für PAK werden durch 28 bzw. 10% aller in sandigen Substraten analysierten PAK-Werte überschritten (Abb. 37).

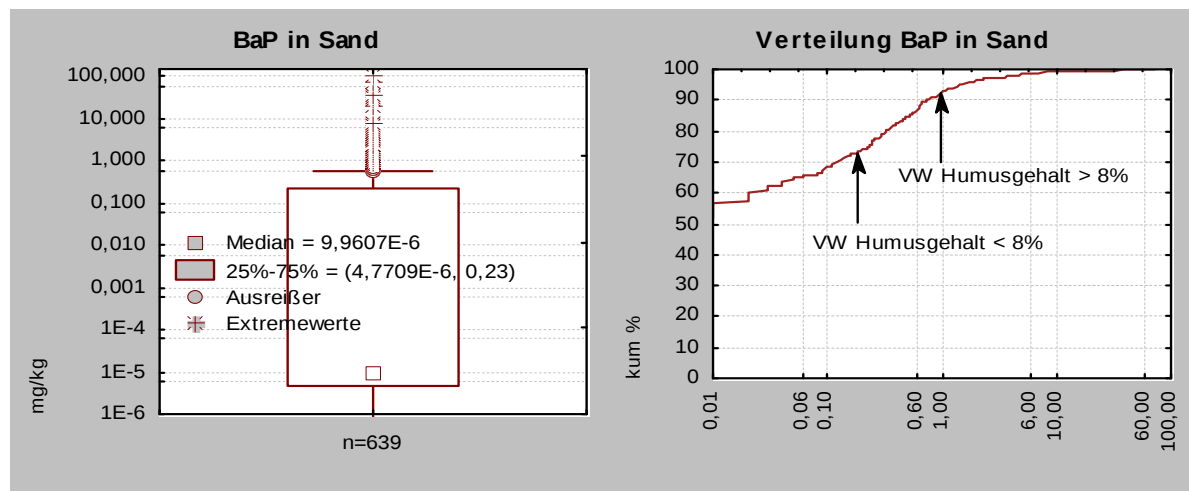


Abbildung 38: BaP-Gehalte in sandigen Substraten

50,1% der BaP-Analysenwerte in Sandproben liegt unterhalb der Nachweisgrenze, was sich in dem Median für BaP in Sand widerspiegelt.

Fazit

Die als sandige Substrate eingeordneten Proben sind durch

- im Mittel schwach alkalische pH-Werte
- niedrige EC-Werte
- geringe Bleigehalte
- geringe Kupfergehalte
- geringe Cadmiumgehalte
- geringe PAK- und BaP-Gehalte

gekennzeichnet.

3.5.4 Sandmischsubstrate

Als Sandmischungen werden diejenigen Substrate bezeichnet, die lt. Gutachten weniger als 100% Sandanteil haben, in denen Sand aber das dominierende Substrat ist. Beigemischte Substrate sind lt. Gutachten humoser Boden und Bauschutt. Technologene Komponenten können in folgenden Anteilen vertreten sein.

Tabelle 23: Gehalte technogener Komponenten in Sandmischsubstraten

Komponente	Anteil [Vol%]
Ziegel	2 – 20
Mörtel	2 - 20
Schlacke	2 -20
Asche	5 - 10
Glas	5 – 10
Holzkohle	10 - 20
Beton	2 – 10
Holz	2 - 5

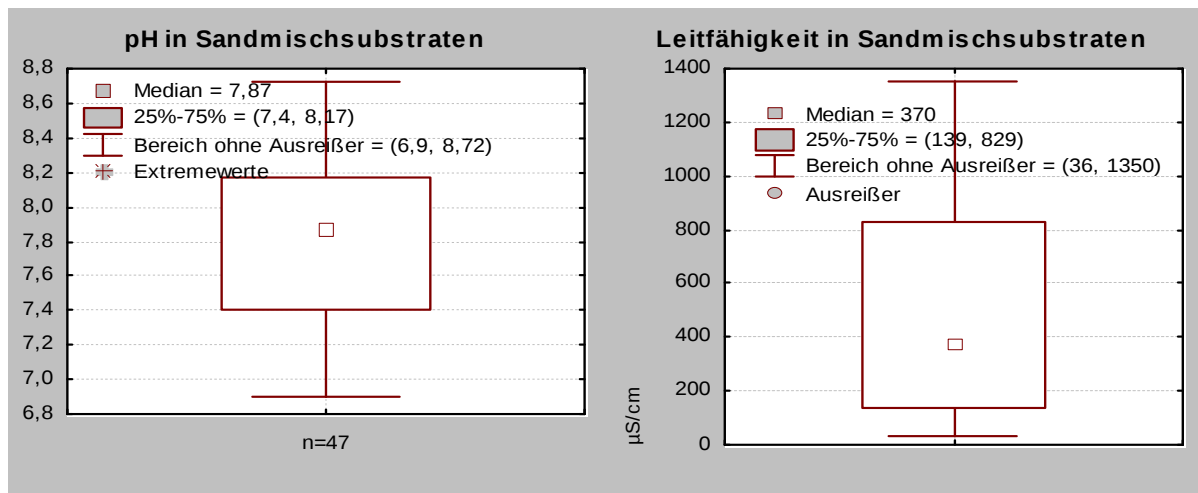


Abbildung 39: pH und Leitfähigkeit in Sandmischsubstraten

Der Median des **pH**-Wertes dieser Mischsubstrate liegt unter dem der Grundgesamtheit (8,09) im schwach alkalischen Bereich. Extremwerte treten in diesen Substraten nicht auf. Der Median der elektrischen Leitfähigkeit erreicht dagegen mit 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mehr als den doppelten Wert der Grundgesamtheit von 151 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Auch hinsichtlich dieses Parameters fehlen Extrem- und Ausreißerwerte (Abb. 39).

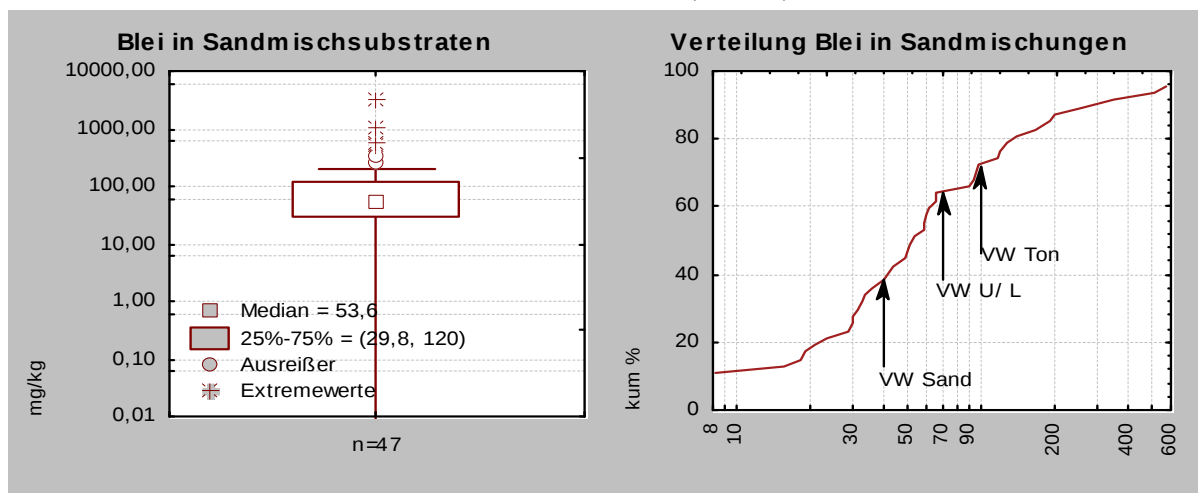


Abbildung 40: Blei in Sandmischsubstraten

Der Median der **Blei**werte der hier dargestellten Sandmischungen liegt mit 53,6 mg/kg TS über dem der Grundgesamtheit. Ca. 10% aller Proben weisen Pb-Gehalte unter der mittleren Nachweisgrenze von 0,03 mg/kg auf. Der Bodenart-abhängige Vorsorgewert für Blei wird von 62% (Sand), 35% (Schluff/ Lehm) und 28% (Ton) überschritten (Abb. 40).

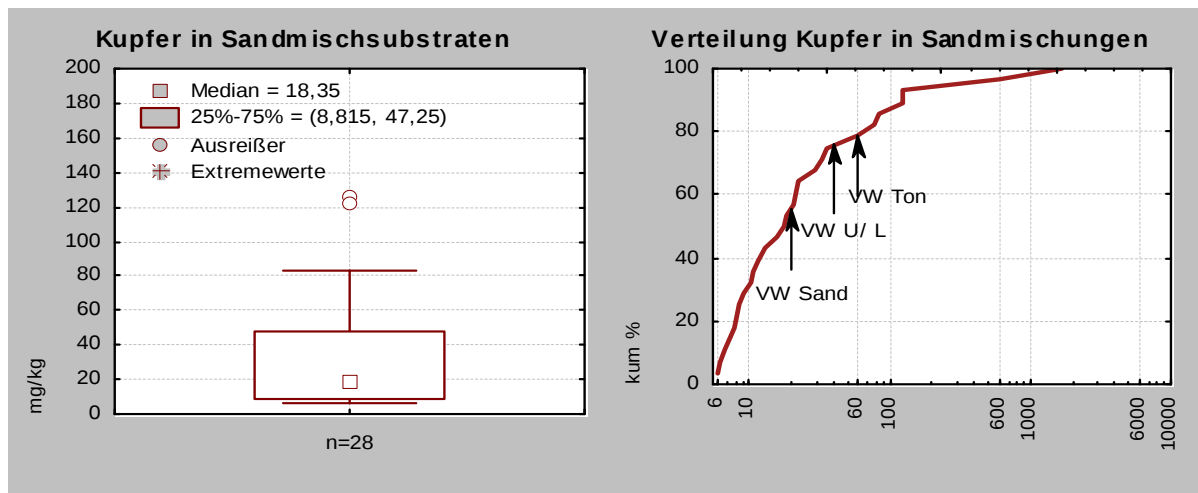


Abbildung 41: Kupfer in Sandmischsubstraten

Der Median der **Kupfer**werte von Sandmischsubstraten liegt unterhalb des Medians der Grundgesamtheit. Die Kupferwerte sind nahezu normal verteilt. Den Vorsorgewert für Sand überschreiten 45% der Cu-Werte, den für Schluff/ Lehm 25% und den für Ton immerhin noch 21% aller in Sandmischsubstraten gemessenen Cu-Gehalt (Abb. 41)

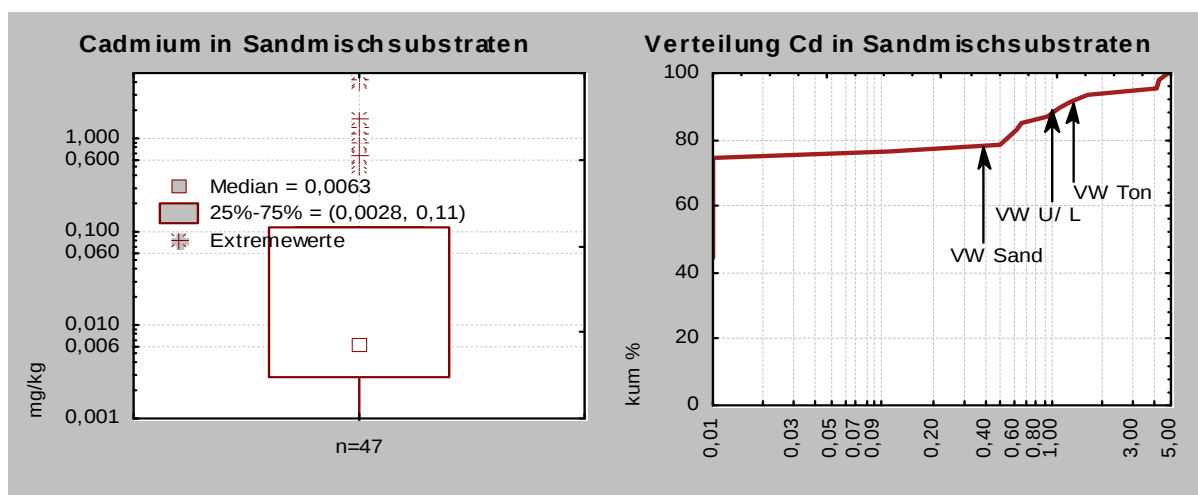


Abbildung 42: Cadmium in Sandmischsubstraten

Der überwiegende Teil der Cadmiumwerte in Sandmischungen –nämlich 75% - liegt unter der mittleren Nachweisgrenze von 0,01mg/kg TS. Dadurch errechnet sich ein Median unter diesem Wert. Der höchste in diesen Substraten gemessene Cd-Wert liegt bei 4,9mg/kg TS. Überschreitungen der Vorsorgewerte für Cadmium erfolgen durch 22% (Sand), 12% (Schluff, Lehm) bzw. 10% aller Werte in Sandmischsubstraten.

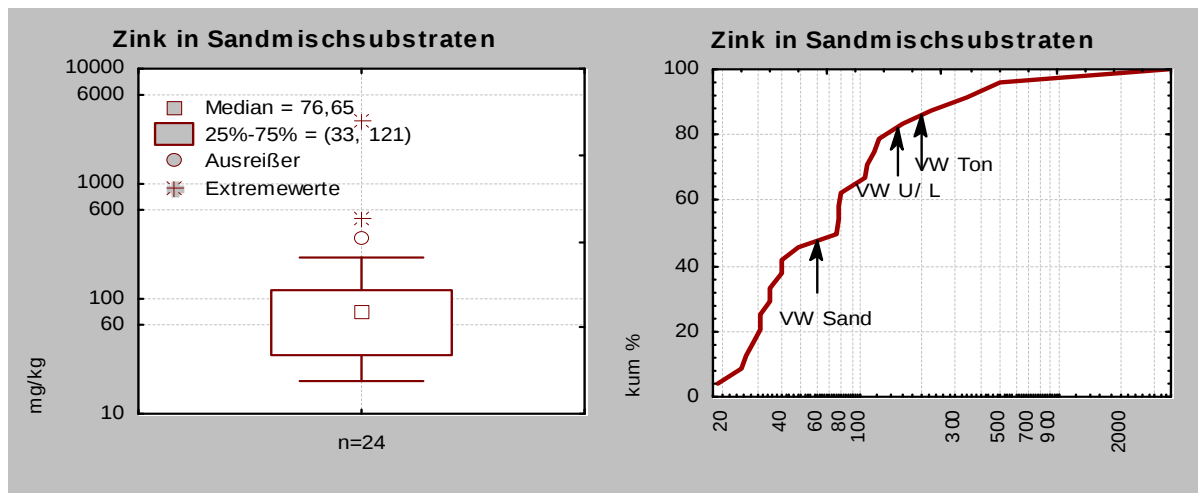


Abbildung 43: Zink in Sandmischsubstraten

Der Median der **Zink**belastung von Sandmischsubstraten liegt über dem der Grundgesamtheit, deren Median für Zink 64,9 mg/kg TS beträgt. Eine Überschreitung der Vorsorgewerte für Zink erfolgt für die Bodenart Sand durch 52%, für Schluff/ Lehm durch 16% und für die Bodenart Ton durch 12% der in Sandmischsubstraten analysierten Zinkgehalte. Allerdings liegen für dieses Substrat insgesamt nur 24 Zinkmesswerte vor.

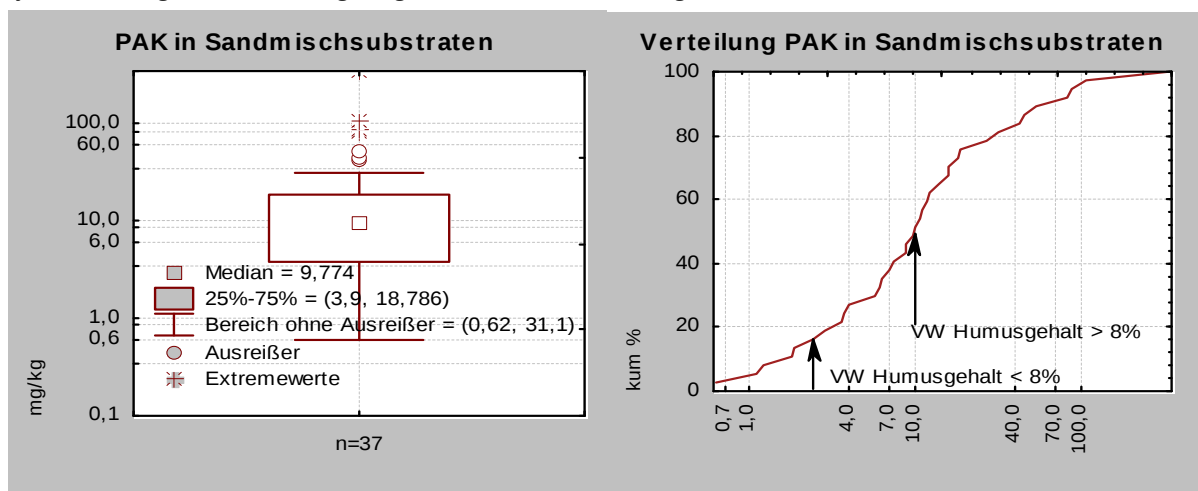


Abbildung 44: PAK in Sandmischsubstraten

Die insgesamt hohe **PAK**-Belastung der Sandmischsubstrate spiegelt sich auch in den **BaP**-Werten: deren Median liegt ca. 4-fach höher als der Median der Grundgesamtheit.

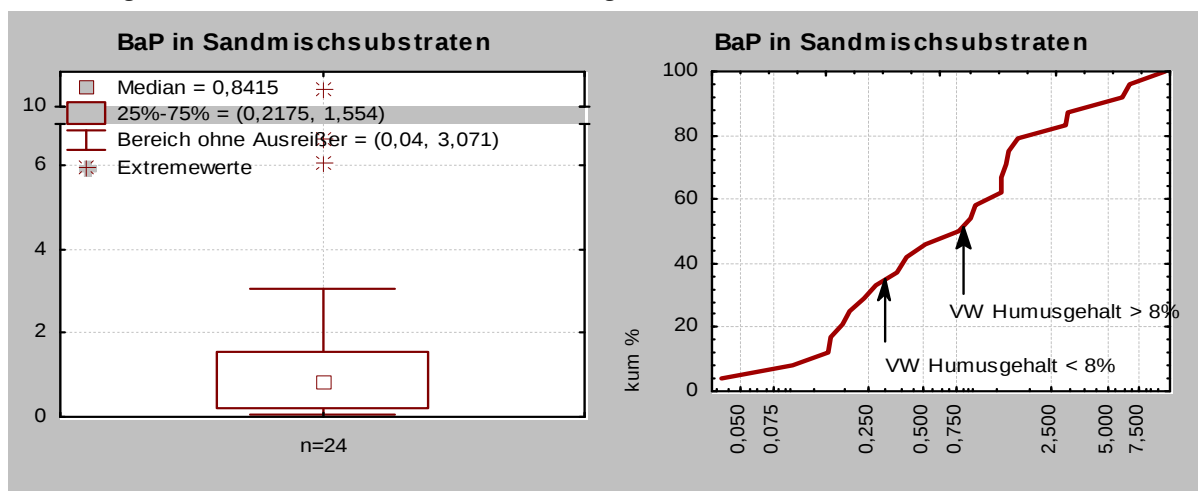


Abbildung 45: BaP in Sandmischsubstraten

Der prozentuale Anteil der Proben mit Überschreitung der Vorsorgewerte liegt bei 68% für humusarme und bei 50% für humusreiche Böden (Abb. 45).

Fazit

Sandmischsubstrate sind gekennzeichnet durch

- im Mittel schwach alkalische pH-Werte
- im Mittel hohe EC-Werte
- im Mittel hohe Bleigehalte
- im Mittel niedrige Kupfergehalte
- im Mittel hohe Zinkgehalte
- im Mittel sehr hohe PAK- und BaP-Gehalte.

Diesen Aussagen liegen allerdings vergleichsweise wenige Proben zugrunde.

3.5.5 Trümmerschutt

In den Gutachten waren nur ein geringer Teil der Substrate eindeutig als Trümmerschutt eingeordnet. In diesen Substraten wurden lt. Gutachten folgende technogene Komponenten benannt

Tabelle 24: Gehalte technogener Komponenten im Trümmerschutt

Komponente	Anteil [Vol%]
Ziegel	2 – 60
Mörtel	2 - 50
Schlacke	2 -30
Asche	2 - 50
Glas	2 – 10
Teer	5 - 10
Holzkohle	bis 5
Beton	5 – 10
Ruß	bis 2

Im Vergleich zu anderen Substraten sind im Trümmerschutt deutlich höhere Anteile von Schlacken und Aschen zu finden. Ruß wird ausschließlich in Trümmerschutt als technogene Komponente benannt.

Schätzwerte für den Gesamtskelettgehalt liegen für die 266 Trümmerschuttproben nicht vor. Lediglich an 25 Proben wurde der Kiesgehalt abgeschätzt – der Mittelwert für diesen Parameter lag bei 10,44 Vol %. der Mittelwert für den Steingehalt, der an weiteren 10 Proben abgeschätzt wurde, beträgt 17,5%.

Die **pH**-Werte im Trümmerschutt liegen im Mittel im schwach alkalischen Bereich. Das 25% bis 75%-Perzentil umfasst den sehr schwach bis mittel alkalischen Bereich. Damit weist Trümmerschutt eine geringere Alkalität auf als die Grundgesamtheit aller Proben, deren Median für pH im mittel-alkalischen Bereich zu finden ist. Der Median der EC-Werte von Trümmerschutt liegt geringfügig unter dem der Grundgesamtheit (151µS/cm), allerdings umfasst das 75%-Perzentil und der Bereich ohne Ausreißer deutlich höhere EC-Werte als der vergleichbare Bereich der Grundgesamtheit (Abb. 46).

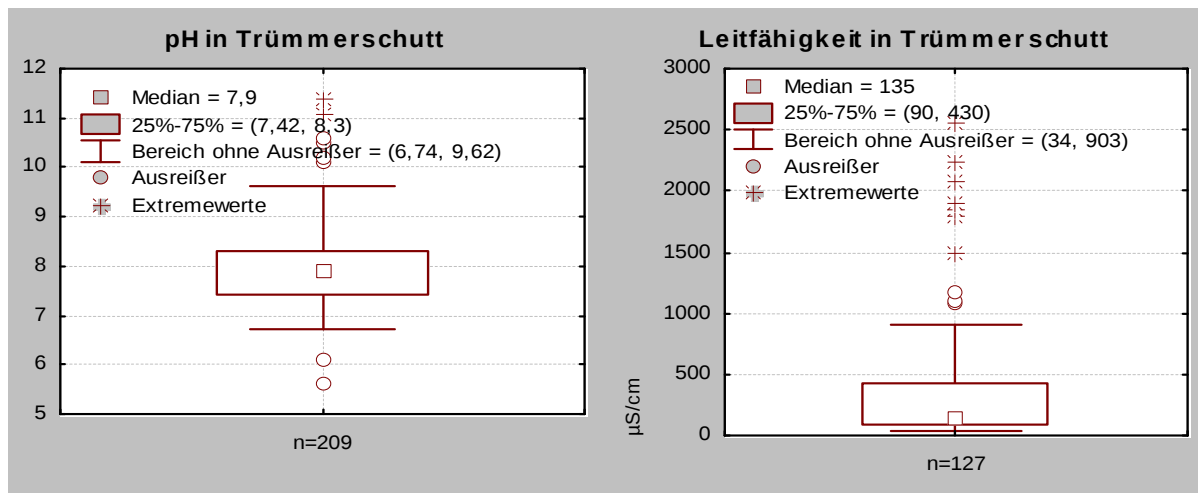


Abbildung 46: pH und Leitfähigkeit im Trümmerschutt

Die Trümmerschuttproben sind durch im Mittel deutlich höhere **Bleigehalte** als die Grundgesamtheit gekennzeichnet, deren Median bei 48,5mg/kg TS liegt. Ein erheblicher Anteil der Trümmerschuttproben – nämlich 72% (Sand), 56% (U/L) und 38% (Ton) überschreitet die Vorsorgewerte (Abb. 47) – auch das ist ein deutlich größerer Prozentsatz als in der Grundgesamtheit.

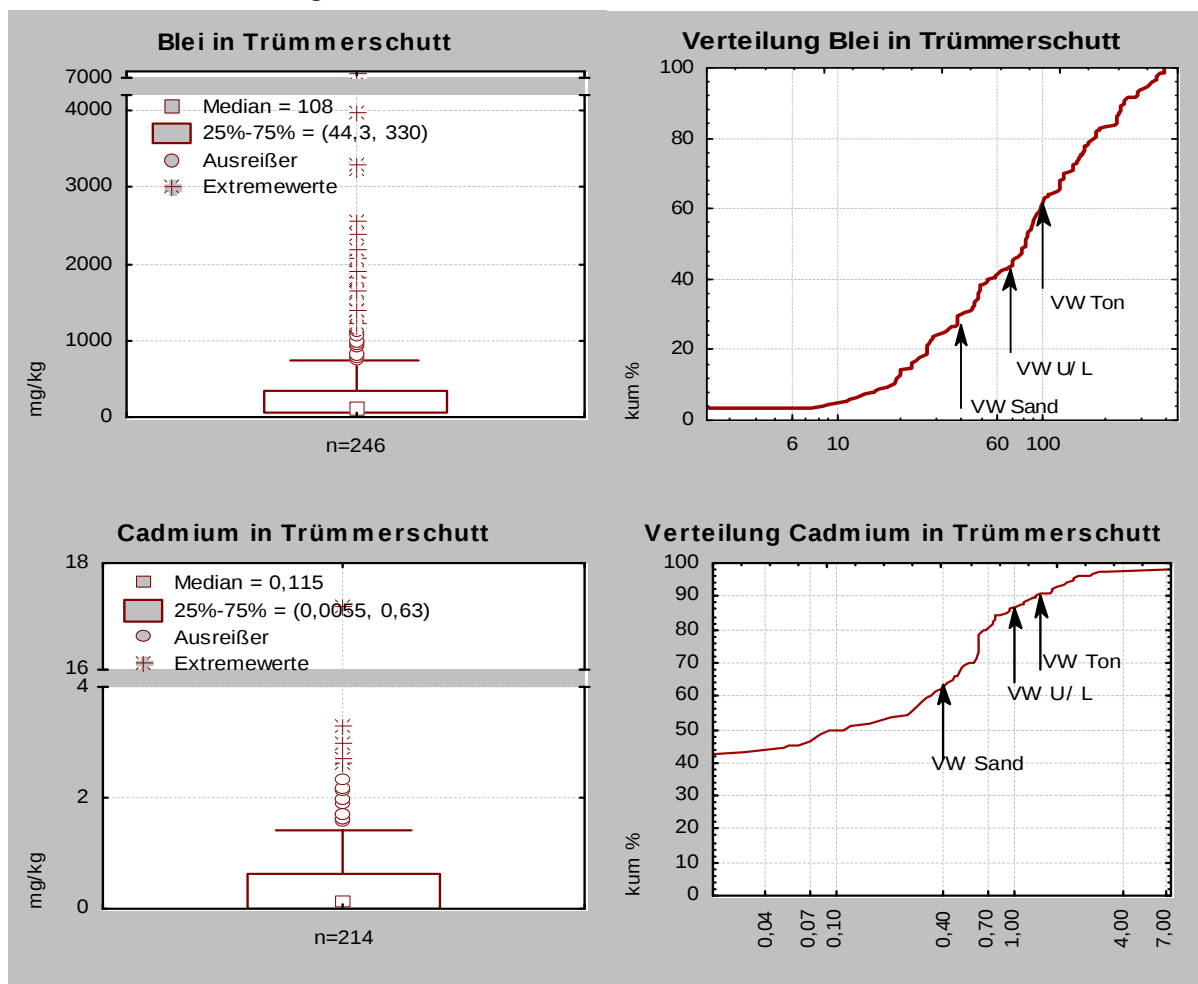


Abbildung 47: Blei und Cadmium im Trümmerschutt

Auch der Median der **Cadmiumbelastung** liegt im Trümmerschutt über dem der Grundgesamtheit. Das ist darauf zurückzuführen, dass Trümmerschutt „nur“ bei ca. 43% aller Cd-Analysen Werte unterhalb der mittleren Nachweisgrenze von 0,01mg/kg aufweist, während das in der Grundgesamtheit für mehr als 51% aller Werte der Fall ist. Im Bereich höherer Kontaminationen zeigt Trümmerschutt aber eine der Grundgesamtheit vergleichbare

Belastungssituation: 36%, 14% und 10% gegenüber 32%, 12% und 10% übersteigen die bodenartabhängigen Vorsorgewerte lt. BBodSchG (Abb. 47).

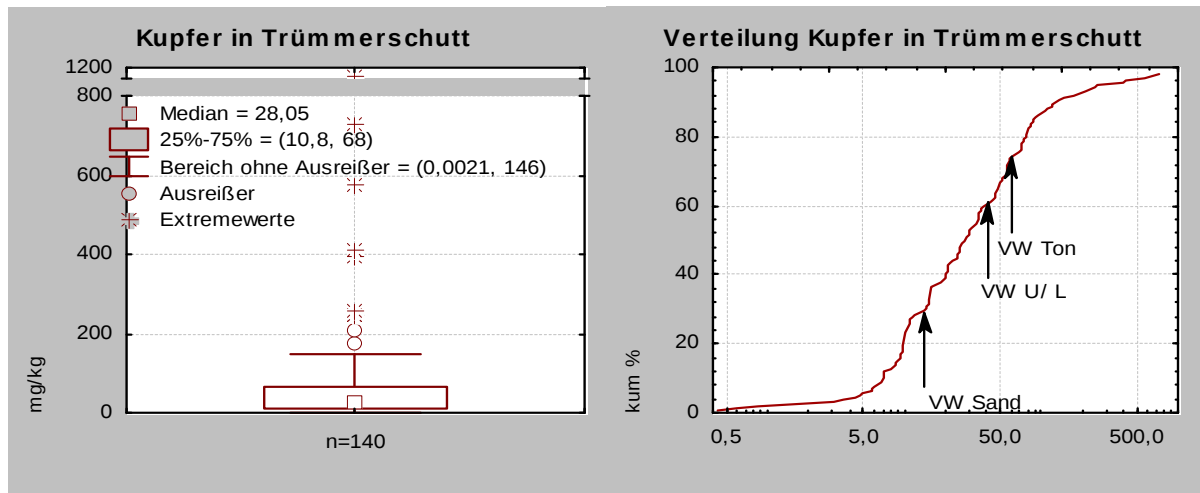


Abbildung 48: Kupfer im Trümmerschutt

Verglichen mit den für die Grundgesamtheit ermittelten **Kupfer**gehalten weist Trümmerschutt eine deutlich höhere Kontamination auf: das zeigt sich sowohl im Median als auch in der Spannweite des 25-75%Perzents. Trümmerschutt ist außerdem gekennzeichnet durch eine geringe Anzahl von Ausreißern bzw. Extremwerten für Kupfer. Die Vorsorgewerte für Kupfer werden durch 70%, 40% bzw. 24% der Proben überschritten (Abb. 48).

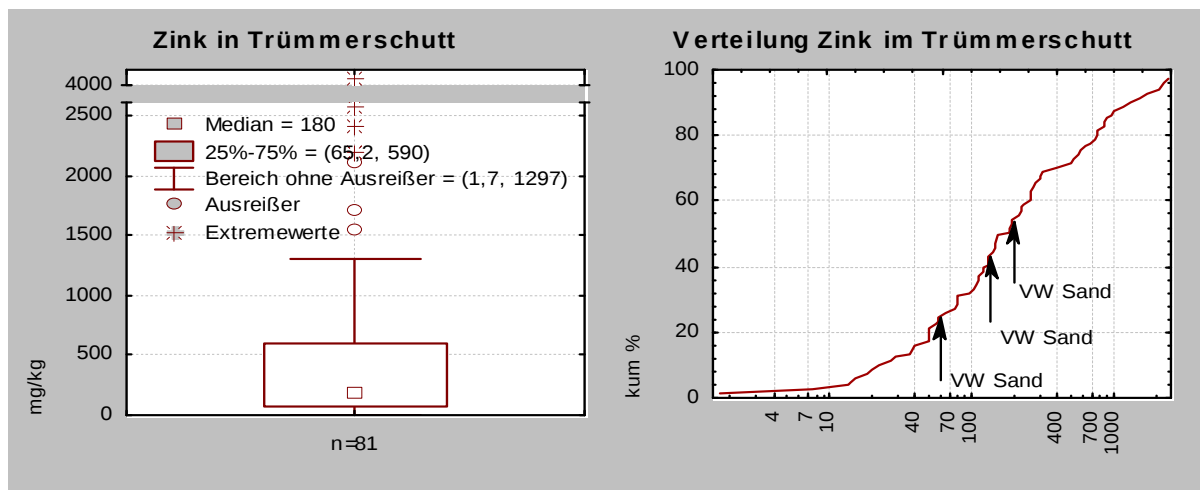


Abbildung 49: Zink im Trümmerschutt

Hinsichtlich der **Zink**belastung weicht Trümmerschutt sehr stark von der Grundgesamtheit ab. So liegt hier der Zn-Median bei 180mg/kg gegenüber 65mg/kg in der Grundgesamtheit. Auch die Spannweite der Zn-Belastung, ausgedrückt durch das 25-75%Perzentil (Abb. 49), ist um ein Vielfaches größer als über alle Proben (19 bis 158mg/kg). Dementsprechend hoch ist auch der Prozentsatz der Trümmerschuttproben, die die Vorsorgewerte lt. BBodSchG überschreiten: das sind 76%, 56% bzw. 45% der Proben, während in der Grundgesamtheit die Zn-Vorsorgewerte nur durch 56,16 bzw. 12% der Proben überschritten werden.

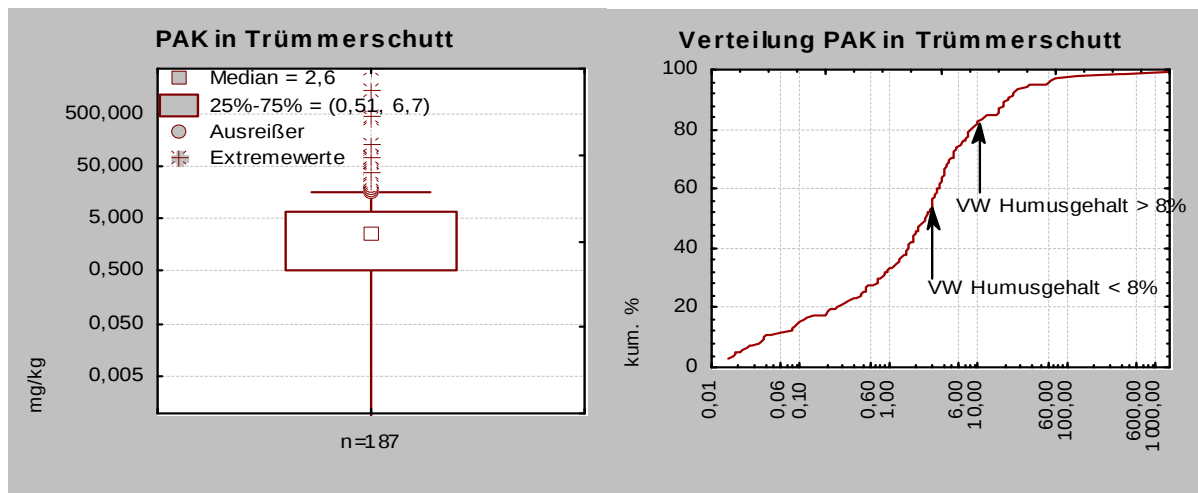


Abbildung 50: PAK in Trümmerschutt

Sowohl der Median als auch die Spannweite aller **PAK**-Werte im Trümmerschutt liegen niedriger, als die Entstehungsgeschichte dieses Substrates (Gebäudetrümmern aus dem 2. Weltkrieg, z. T. mit Brandeinwirkung) erwarten lassen: Während die Grundgesamtheit einen PAK-Median von 3,52mg/kg und ein 25-75%Perzentil von 0,42 – 13,3 aufweist, liegt ersterer im Trümmerschutt nur bei 2,6mg/kg und das 25-75%Perzentil reicht nur von 0,51 – 6,7mg/kg TS. Die Humusgehalt-abhängigen Vorsorgewerte nach BBodSchG werden allerdings trotzdem durch ca. 50 bzw. 16% der Trümmerschuttproben überschritten.

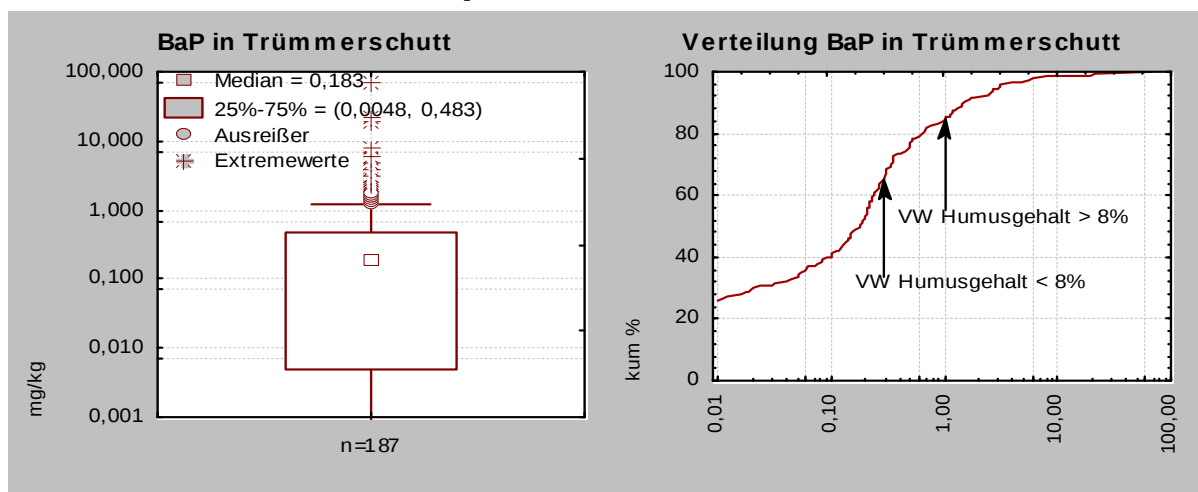


Abbildung 51: Benzo(a)pyren im Trümmerschutt

Ähnlich wie die Summe der PAK ist auch Benzo(a)pyren im Trümmerschutt in niedrigeren Konzentrationen vorhanden als in der Grundgesamtheit. Für BaP wurde hier ein Median von 0,183 ermittelt und 50% aller Werte liegen in einem Bereich zwischen 0,0048 und 0,483 mg/kg TS. Der Median der Grundgesamtheit hingegen liegt bei 0,27mg/kg und das 25-75%Perzentil für BaP zwischen 0,01 und 1mg/kg. Eine Überschreitung der Vorsorgewerte erfolgt durch ca. 35 bzw. 15% aller BaP-Werte im Trümmerschutt (Abb. 51).

Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die lt. Gutachten als Trümmerschutt bezeichneten Substrate gekennzeichnet sind durch

- im Mittel schwach alkalische pH-Werte (Kurzzeichen a2)
- mittlere EC-Werte, die selten im pflanzenphysiologisch schädlichen Bereich liegen
- hohe Blei und Kupferkontaminationen
- geringe Cadmium-Gehalte
- sehr hohe Zinkgehalte
- im Mittel geringe PAK- und Benzo(a)pyren-Gehalte.

3.5.6 Asche

Für „Asche“ als reines Substrat lagen nur sehr wenige Messwerte zu den einzelnen Parametern vor, so dass auf die Darstellung in Boxplots bzw. der Verteilungen verzichtet wird.

Tabelle 25: statistische Kennwerte von Aschen
(Anzahl der Messwerte in Klammern)

Parameter	Median	25% Perzentil	75% Perzentil
pH (4)	8,66	8,48	9,23
Pb (5)/ mg/kg	0,003	0,002	11,1
Cu (5)/ mg/kg	8,2	8	11,08
Cd (5)/ mg/kg	0,0053	0,0016	0,05
Zn (5)/ mg/kg	0,0065	0,0023	0,02
Σ PAK (5)/ mg/kg	0,23	0,17	0,34
BaP (5)/ mg/kg	0,01	0,0052	0,024

Die Ascheproben sind gekennzeichnet durch mittel bis stark alkalische pH-Werte. Der Median für Blei, Cadmium und Zink liegt jeweils unterhalb der mittleren Nachweisgrenze des jeweiligen Schwermetalls. Die Kupferwerte der Ascheproben sind – verglichen mit der Grundgesamtheit – als sehr gering einzustufen. Das Gleiche gilt für PAK als Summenparameter sowie Benzo(a)pyren: die Gehalte dieser organischen Schadstoffe sind im Vergleich zur Grundgesamtheit als sehr niedrig einzustufen.

Diese Messwerte besitzen aufgrund der geringen Probenzahl keine Repräsentativität.

3.5.7 Schlacke

„Schlacke“ wurde als reines Substrat in den Gutachten ebenfalls nur selten benannt und analysiert. Zu den einzelnen Parametern lagen zwischen 7 und 11 Messwerten vor, die hier tabellarisch aufgeführt werden.

Tabelle 26: statistische Kennwerte von Schlacken
(Anzahl der Messwerte in Klammern)

Parameter	Median	25% Perzentil	75% Perzentil
pH (9)	7,72	7,43	8,1
Pb (9)/ mg/kg	657	42,2	683
Cu (11)/ mg/kg	155	55,8	413
Cd (9)/ mg/kg	0,39	0,36	5,33
Zn (7)/ mg/kg	206	196	1719
Σ PAK (11)/ mg/kg	51,06	8,88	92,72
BaP (10)/ mg/kg	4,86	0,15	6,78

Die in den Gutachten analysierten Schlacken weisen sehr schwach bis mittel alkalische pH-Werte auf. Die Mediane der Schwermetallgehalte von Schlacken liegen um ein Vielfaches über denen der Grundgesamtheit. Auch die Belastung durch PAK und BaP ist für alle Schlackeproben sehr hoch, was sich in nahezu 20fach höheren Medianwerten gegenüber der Grundgesamtheit ausdrückt.

Nach den hier vorliegenden Daten sind Schlacken als hoch kontaminierte Substrate anzusehen. Aufgrund der geringen Probenbasis sind diese Aussagen aber nicht repräsentativ.

3.5.8 Humoser Oberboden

In den Gutachten wurden in der Regel Oberbodenmischproben bzw. die obersten 30cm Boden beprobt, so dass nur relativ wenige Daten zu reinen humosen Oberbodenhorizonten vorliegen.

Die Geländeschätzung der Humusgehalte an 29 dieser Proben erscheinen bei einem Mittelwert für diesen Parameter von 48,5% und Maximalangaben von 100% unplausibel –derartig hohe Humusgehalte sind selbst in reinen organischen Horizonten (H, L, O bzw. h7/ Kartieranleitung) nicht selbstverständlich. Dies verdeutlicht, dass in der Geländeansprache von Böden durch Gutachter ein hohes Fehlerpotenzial liegt. Im Vergleich dazu: eigene Untersuchungen zu Humusgehalten von 24 Oberbodenproben ergaben mit einen Mittelwert von 4,42 % deutlich niedrigere Werte.

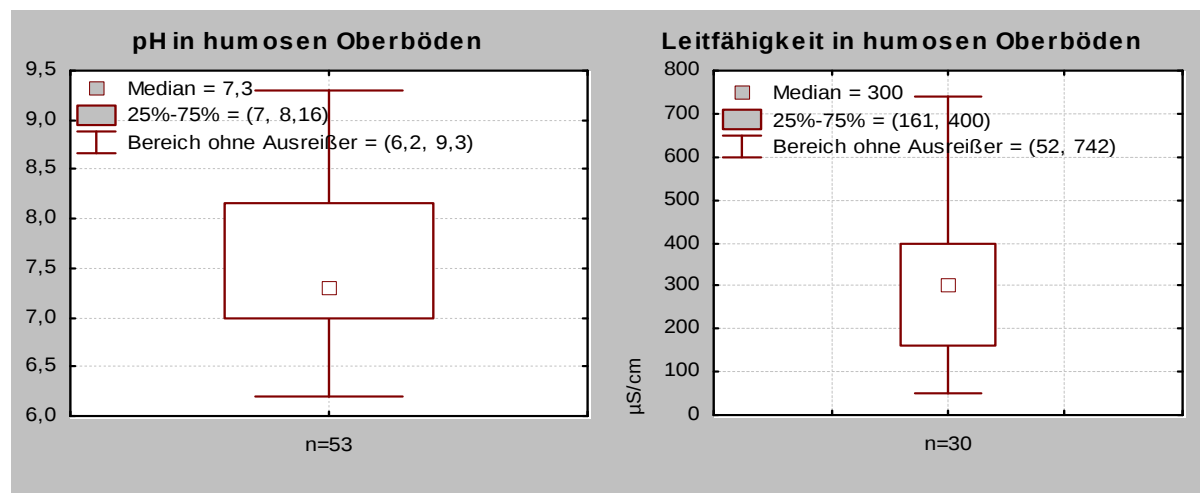


Abbildung 52: pH und Leitfähigkeit in humosen Oberböden

Die humosen Oberböden sind gekennzeichnet durch sehr schwach bis mittel alkalische pH-Werte sowie im Vergleich zur Grundgesamtheit erhöhte EC-Werte. Der Median der Leitfähigkeit liegt in humosen Oberböden bei

300 $\mu\text{S/cm}$ (EC Grundgesamtheit=151 $\mu\text{S/cm}$).

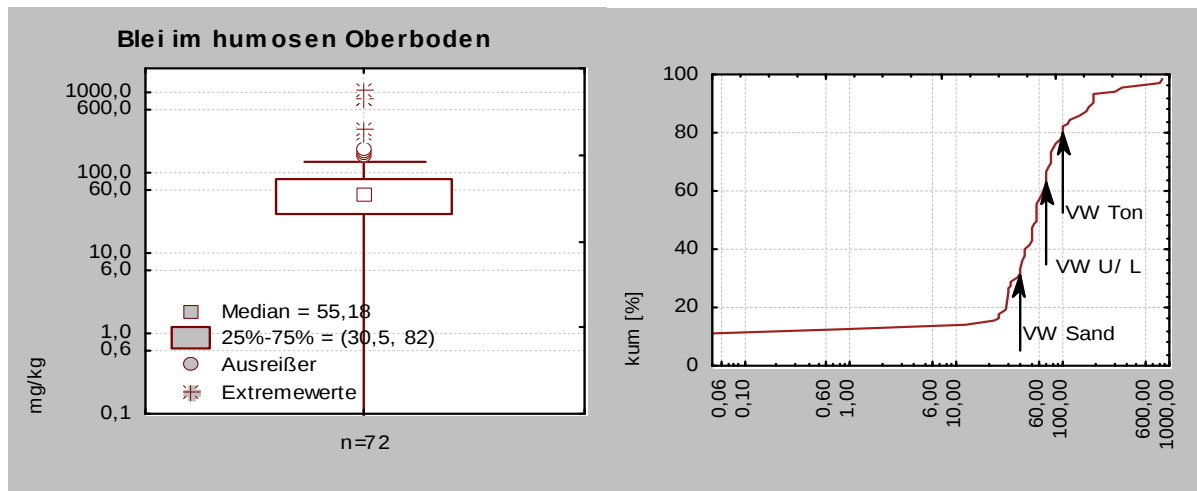


Abbildung 53: Blei in humosen Oberböden

Der Median der **Bleibelastung** liegt im humosen Oberboden mit 55,18 in der Größenordnung der Grundgesamtheit (48,51mg/kg). Allerdings ist die Spannweite der Bleigehalte gering. Ein erheblicher Prozentsatz der Proben überschreitet die Vorsorgewerte nach BBodSchG (Abb. 53) deutlich.

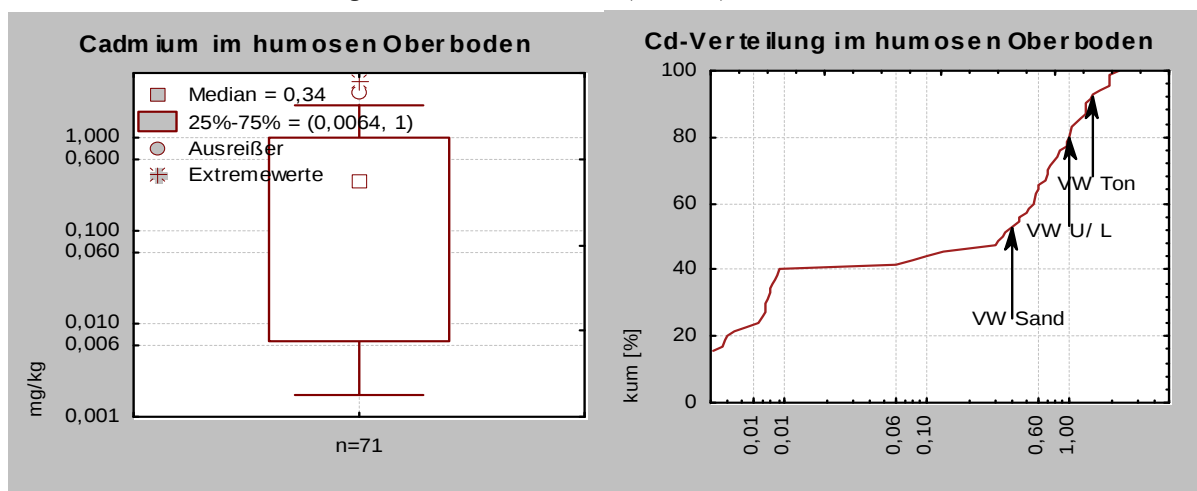


Abbildung 54: Cadmium in humosen Oberböden

Die Oberbodenproben sind im Mittel stärker durch **Cadmium** kontaminiert als die Grundgesamtheit. Während für letztere mehr als 50% aller Proben Cd-Gehalte unter der mittleren Nachweisgrenze von 0,01mg/kg aufweisen, d.h. auch der Median unter dieser Nachweisgrenze liegt, ist der Cd-Median der Oberbodenproben mit 0,34 vergleichsweise hoch. Ein deutlich geringerer Prozentsatz dieser Proben –nämlich 40% gegenüber 51% in der Grundgesamtheit -weist Cd-Gehalte unter der mittleren Nachweisgrenze auf. Auch ist der Anteil der Proben mit Vorsorgewert-Überschreitung höher als in der Grundgesamtheit (Abb. 54)

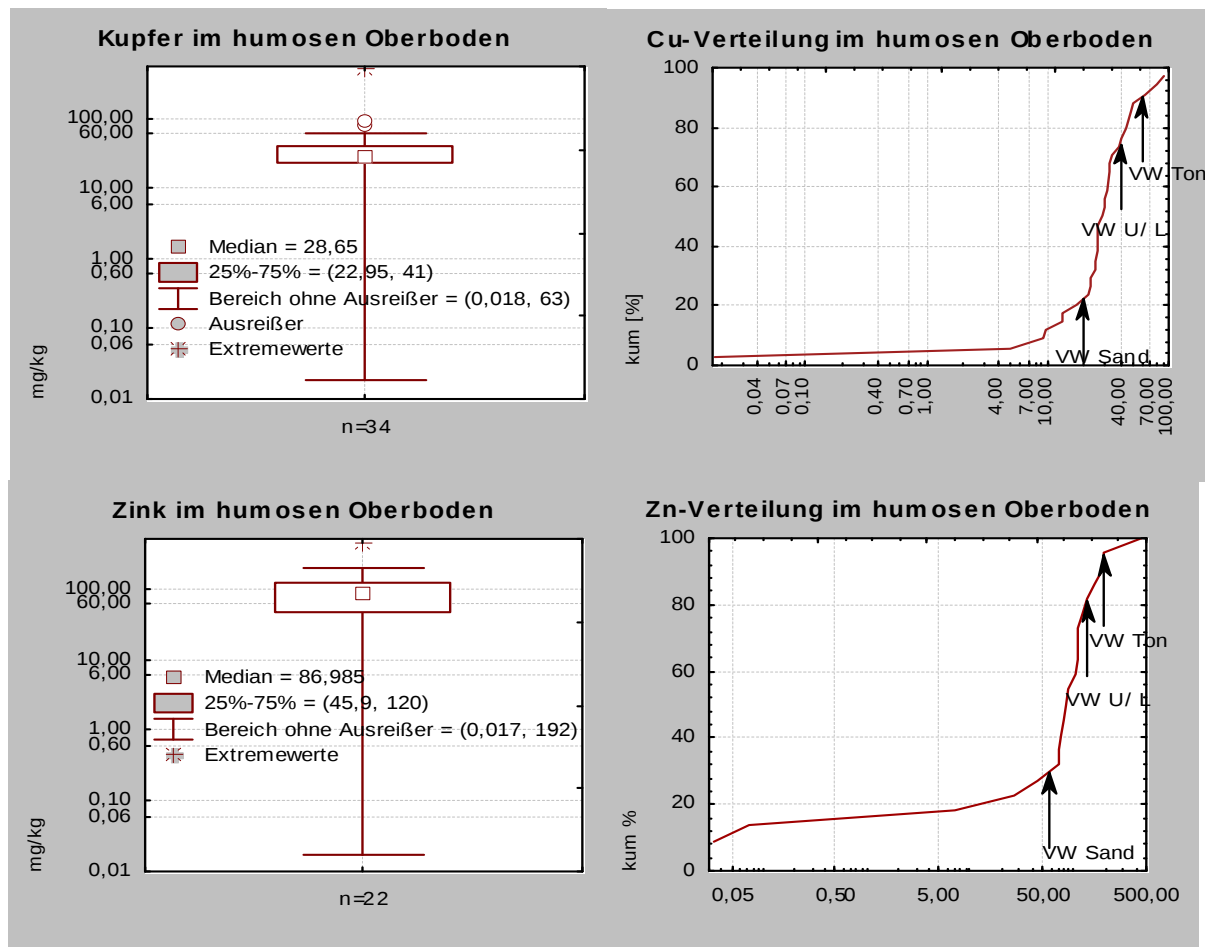


Abbildung 55: Kupfer und Zink in humosen Oberböden

Kupfer ist im humosen Oberboden leicht angereichert im Vergleich zur Grundgesamtheit: einem Median von 28,65 steht der von 21,9mg/kg gegenüber. 80% der Cu-Analysenwerte liegen über dem Vorsorgewert für die Bodenart Sand.

Die **Zink**gehalte humoser Oberböden liegen im Mittel über denen der Grundgesamtheit. Die Basisbelastung in Oberböden scheint hoch zu sein: keiner der Analysenwerte liegt unter der mittleren Nachweisgrenze und der Wert des 25%Perzentils ist mit 45,9 mg/kg nahezu doppelt so hoch wie in der Grundgesamtheit. Hohe Belastungen und Ausreißer treten hingegen selten auf. Der Zn-Vorsorgewert für die Bodenart Sand wird durch immerhin 71% aller Proben überschritten, der für Schluff/Lehm durch 20% und der für Ton durch 6% aller Proben (Abb. 55).

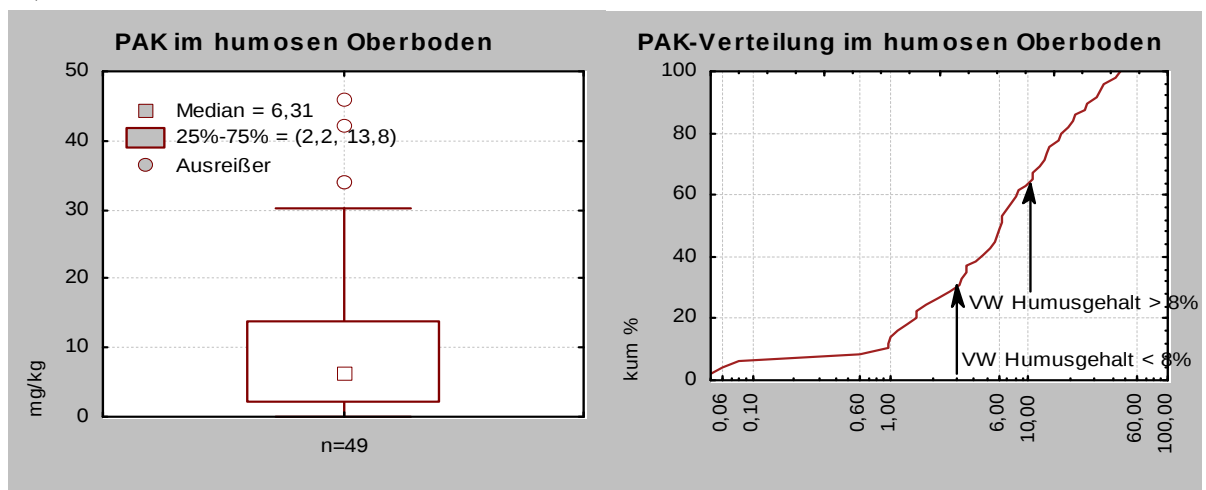


Abbildung 56: PAK in humosen Oberböden

Der **PAK**-Median humoser Oberböden liegt mit 6,31mg/kg ca. beim doppelten Wert der Grundgesamtheit mit 3,52mg/kg. Ähnlich wie im Fall der Zinkgehalte scheint dabei eine höhere Grundbelastung durch PAK vorhanden zu sein, was wiederum im 25% Perzentil seinen Ausdruck findet. Dieser Wert liegt fünffach über dem der Grundgesamtheit. Dagegen zeigt das 75%Perzentil mit 13,8mg/kg nahezu den gleichen Wert wie die Grundgesamtheit mit 13,3mg/kg. PAK-Ausreißer bzw. -Extremwerte wurden in den humosen Oberbodenproben nicht analysiert. Die Vorsorgewerte werden in den humosen Oberböden durch 70 bzw. 36% aller Proben überschritten (Abb. 56).

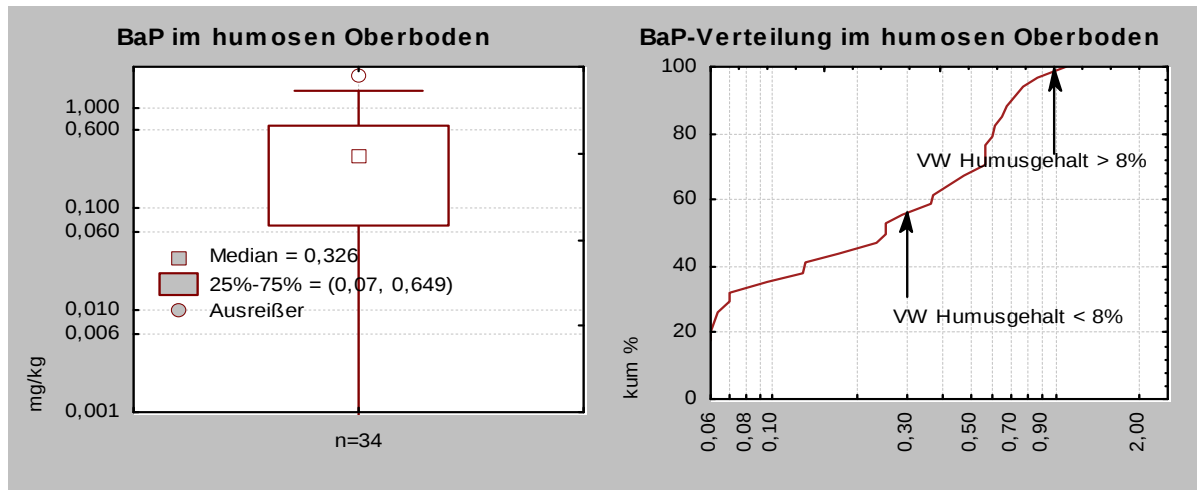


Abbildung 57: BaP in humosen Oberböden

Die Basis-Belastung durch **BaP** ist in humosen Oberböden höher als in der Grundgesamtheit, was der BaP-Wert für das 25%-Perzentil belegt. Dagegen scheinen in den Oberbodenproben hohe BaP-Kontaminationen zu fehlen, was sich im niedrigen 75%Perzentilwert und den fehlenden Ausreißern bzw. Extremwerten wieder spiegelt. Die Humusgehalt-abhängigen Vorsorgewerte werden durch 45 bzw. 2% der Proben überschritten (Abb. 57).

Fazit

Die als humose Oberböden bezeichneten Substrate sind gekennzeichnet durch

- im Mittel sehr schwach alkalische pH-Werte (Kurzzeichen a1)
- mittlere EC-Werte, die selten im pflanzenphysiologisch schädlichen Bereich liegen
- im Mittel leicht erhöhte Blei und Kupfergehalte
- im Mittel erhöhte Cadmium-Gehalte
- erhöhte Zinkgehalte
- im Mittel erhöhte PAK- und Benzo(a)pyren-Gehalte.

3.5.9 Mergel

Mergel wurde in den Gutachten selten als eigenes Substrat benannt und zu einzelnen Analysenparametern wie z. B. elektrischen Leitfähigkeit lagen keine Messwerte vor. Als Bodeneigenschaft wurde in den Mergelproben lediglich der pH-Wert analysiert. Die Cadmiumverteilung in Mergelproben wird nicht dargestellt, da 90% der 21 Analysenwerte zu Mergel unter der Nachweisgrenze liegen. Mehr als 50% der 19 auf PAK analysierten Mergelproben zeigten Werte unterhalb der mittleren Nachweisgrenze von 0,01mg/kg. Ähnliches trifft auf die BaP-Analysen im Mergel zu: hier lagen 65% der Werte unter der Bestimmungsgrenze. Aus diesem Grund wird auf die Darstellung von PAK und BaP im Mergel verzichtet.

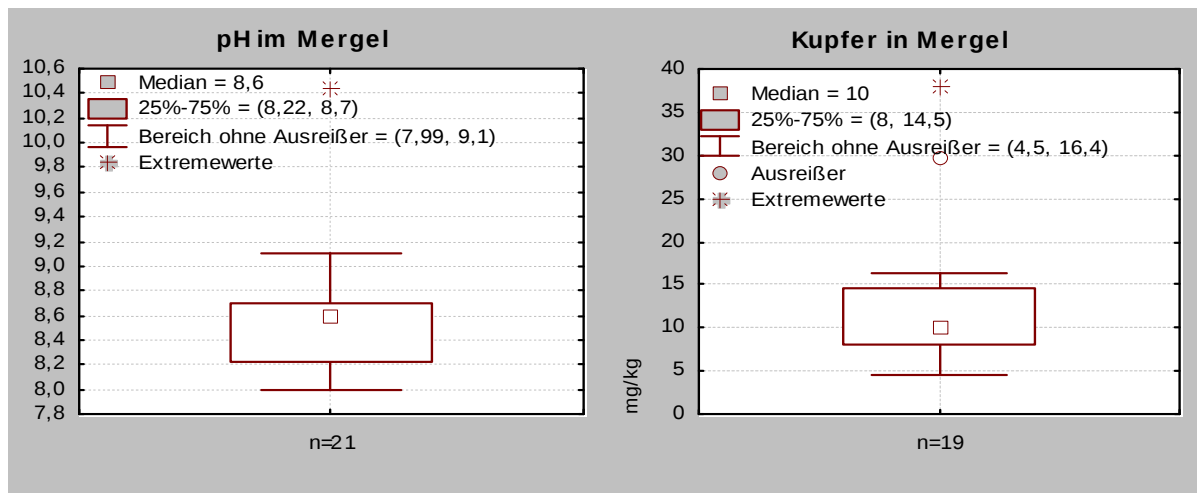


Abbildung 58: pH und Kupfer im Mergel

Erwartungsgemäß lagen die pH-Werte der Mergelproben im mittel alkalischen Bereich.

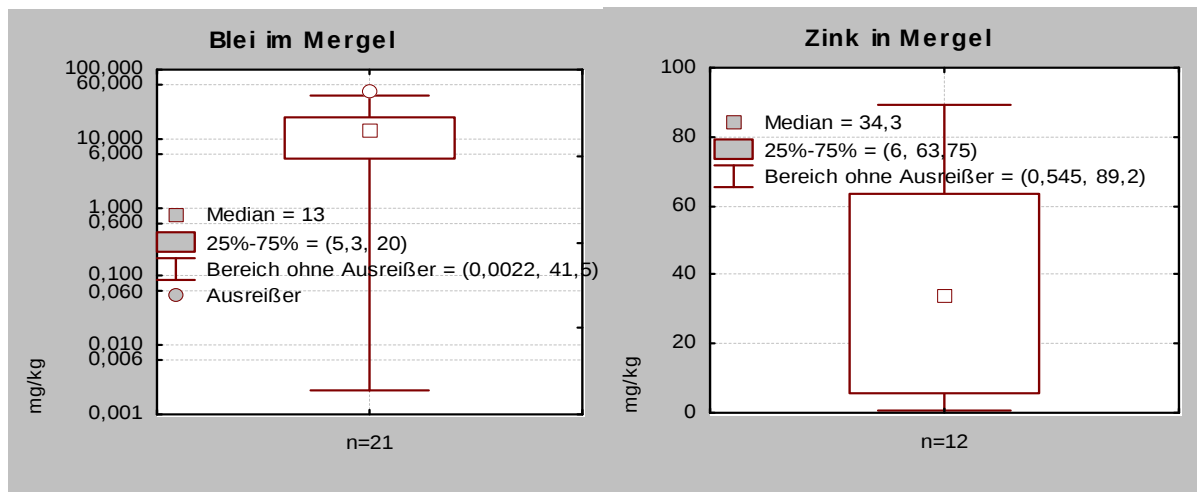


Abbildung 59: Blei und Zink im Mergel

Die Belastungen durch Kupfer, Blei und Zink im Mergel sind gering und liegen weit unterhalb der mittleren Belastung, die in der Grundgesamtheit für diese Schwermetalle ermittelt wurden (Cu-Median 21,9mg/kg, Pb-Median 49mg/kg, Zn-Median 65,87mg/kg).

3.5.10 Lehm

Zu dem natürlichen Substrat „Lehm“ lagen in den Gutachten pro Parameter nur sehr wenige Messwerte vor, so dass eine statistische Analyse wenig sinnvoll ist. Angaben zu bodenkundlichen Merkmalen wie Leitfähigkeit, Carbonatgehalt oder zur Korngrößenverteilung wurden nicht gemacht.

Tabelle 27: statistische Kennwerte von Lehm
(Anzahl der Messwerte in Klammern)

Parameter	Median	25% Perzentil	75% Perzentil
pH (6)	7,9	7,1	8,3
Pb (6)/ mg/kg	16	10	26
Cu (5)/ mg/kg	14	9,6	15
Cd (4)/ mg/kg	0,0091	0,0046	0,07
Σ PAK (5)/ mg/kg	0,24	0,0045	1,58
BaP (5)/ mg/kg	0,022	0,007	0,1

Die Lehmproben erwiesen sich als schwach durch Schwermetalle und organische Schadstoffe belastet. Die pH-Werte liegen im sehr schwach bis mittel alkalischen Bereich.

3.5.11 Torf

Zu Torf waren in den Gutachten nur sehr wenige Schadstoffanalysen vorhanden. 6 der 9 Cd-Analysenwerte dieses Substrates lagen unter der Nachweisgrenze und für den Parameter Zink lagen insgesamt nur 4 Analysenwerte vor.

Tabelle 28: statistische Kennwerte von Torf
(Anzahl der Messwerte in Klammern)

Parameter	Median	25% Perzentil	75% Perzentil
pH (9)	7,6	7,5	7,68
Pb (9)/ mg/kg	28	17	33
Cu (7)/ mg/kg	11	11	63
Σ PAK (11/ mg/kg	1	0,16	134,41
BaP (5)/ mg/kg	0,022	0,007	0,1

3.6 Vergleich der Substrateigenschaften

In den Vergleich der Analysendaten wurden nur nach KA4 erstellte Gutachten aufgenommen, bei deren Proben eine eindeutige Substratansprache vorhanden bzw. eine Zuordnung möglich war.

Es werden die Eigenschaften der technogenen Substrate Bau- und Trümmerschutt, Bauschuttmischsubstrat, Sandmischsubstrat, Schlacke und Asche sowie der natürlichen Substrate Sand, Humoser Oberboden, Torf, Lehm und Mergel miteinander verglichen.

Einzelwerte, die zu den technogenen Komponenten Beton, Kies, Kohle, Müll, Ton, Kalkmudde, Steinboden und Schotter vorlagen, werden hier nicht betrachtet.

Werte unterhalb der Nachweisgrenze wurden zur vollständigen Darstellung der Verteilung in die Betrachtung einbezogen.

Die Analysendaten zu den einzelnen Parametern liegen fast ausschließlich nicht normal verteilt vor, weshalb nichtparametrische Tests zum Nachweis signifikanter Unterschiede genutzt wurden. Die Signifikanz der Merkmalsunterschiede zwischen den einzelnen Substraten wurde durch den Kruskal-Wallis-Test bzw. über multiple Vergleiche der p-Werte untersucht. Als Signifikanzniveau wurde $p=0,05$ gewählt, d.h. p-Werte $< 0,05$ weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Substraten innerhalb des jeweiligen Analysenparameters hin.

Der **Kruskal-Wallis-Test** ist ein parameterfreier statistischer Test, mit dem im Rahmen einer Varianzanalyse verglichen wird, ob sich verschiedene unabhängige Stichproben (Gruppen) hinsichtlich einer ordinal skalierten Variable unterscheiden. Er basiert auf Rangplatzsummen, und wird für den Vergleich von mehr als zwei Gruppen angewendet. Voraussetzung ist, dass die Messwerte nicht normal verteilt oder die Varianzen der Gruppen stark unterschiedlich sind bzw. beides gegeben ist. Weitere Bedingungen sind die Unabhängigkeit der Stichproben, eine stetige Verteilung und mindestens ordinal skalierte Daten.

Die Nullhypothese H_0 lautet: Zwischen den Gruppen besteht kein Unterschied. Als Prüfgröße des Kruskal-Wallis-Tests wird ein so genannter H-Wert berechnet. Dieser folgt einer Chi-Quadrat-Verteilung. Die Freiheitsgrade (Df) berechnen sich nach $Df=k-1$, wobei k die Anzahl der Klassen (Gruppen) ist.

Die berechnete Prüfgröße H wird mit einer theoretischen Größe aus der Chi-Quadrat-Verteilung für eine gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit verglichen. Ist der errechnete H-Wert größer als der H-Wert aus der Chi-Quadrat-Tabelle, wird H_0 verworfen, es besteht also ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen.

Der p-Wert ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, unter H_0 den beobachteten Prüfgrößenwert oder einen in Richtung der Alternative extremeren Wert zu erhalten. Ist der p-Wert kleiner oder gleich dem vorgegebenen Signifikanzniveau α , so wird H_0 verworfen.

Ist die Anzahl der Stichproben innerhalb einer Gruppe sehr gering, können auch die nichtparametrischen Signifikanztests zu falschen Ergebnissen führen. Aus diesem Grund werden hier unabhängige Gruppen mit Stichprobenzahlen < 10 nicht in die Signifikanztests einbezogen.

3.6.1 pH-Wert

Der pH-Wert wurde als Bodeneigenschaft in den meisten Gutachten analysiert. Pro Substrat liegen unterschiedlich große Probenkollektive vor:

- Bauschutt 1141
- Bauschuttmischsubstrate 21
- Sand 693
- Sandmischsubstrate 27
- Schlacke 9
- Trümmerschutt 209
- Asche 4
- Humoser Oberboden 53
- Torf 9
- Mergel 21
- Lehm 6

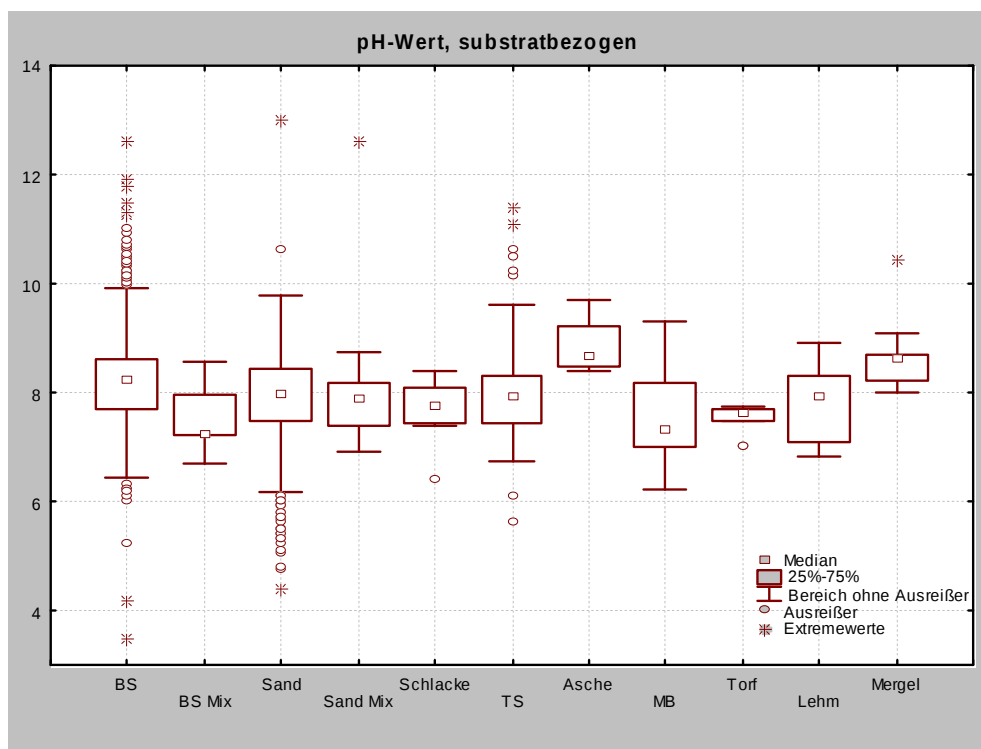


Abbildung 60: Vergleich der substratbezogenen pH-Werte

(BS=Bauschutt, BS Mix=Bauschuttmischung, TS=Trümmerschutt, MB=humoser Oberboden)

Die größte Spannweite der pH-Werte (einschließlich Extremwerte) weisen die als „Bauschutt“, „Sand“ und Trümmerschutt angesprochenen Substrate auf. Für die beiden technogenen Substrate Bau- und Trümmerschutt entspricht das der Erwartung, da diese heterogenen Aushangsmaterialien und Ablagerungsbedingungen entstammen. Für „Sand“ als natürliches Substrat weisen der hohe Median und die große Spannbreite der pH-Werte dagegen auf eine ungenaue Substratansprache hin.

Die höchsten pH-Werte zeigen die reinen Aschen. Die hier zugrunde liegende Probenzahl (4) ist allerdings sehr gering. Meuser et al (1997) fanden in Rostaschen von Hausfeuerungsanlagen neutrale bis schwach alkalische pH-Werte, in den Aschen von MV-Anlagen hingegen stark alkalische Werte.

Die Proben, die hier als reine Schlacken angesprochen wurden, weisen geringere pH-Werte auf als der Bauschutt, was im Widerspruch zu den Ergebnissen anderer Autoren steht (Meuser 1996).

Tabelle 29: Vergleich der statistischen Kennwerte für den Parameter „pH“

Substrat	Median	25%	75%
Bauschutt	8,2	7,7	8,59
Bauschuttmischsubstrate	7,2	7,2	7,94
Sand	7,95	7,5	8,43
Sandmischsubstrate	7,87	7,4	8,17
Schlacke	7,72	7,43	8,1
Trümmerschutt	7,9	7,42	8,3
Asche	8,66	8,48	9,22
Humoser Oberboden	7,3	7,0	8,16
Torf	7,6	7,5	7,68
Lehm	7,9	7,1	8,3
Mergel	8,6	8,22	8,7

Die in der Datenbank erfassten pH-Werte stammen überwiegend von Proben aus dem Unterboden. Die Substrateinträge dort bewirken vermutlich eine Alkalisierung, die über die Alkalisierung des Oberbodens lt. Berliner Umweltatlas 2006 hinausgeht.

Da der pH-Wert eine normal verteilte Größe ist, wurden signifikante Unterschiede des pH-Wertes zwischen den Substraten durch einfaktorielle ANOVA festgestellt.

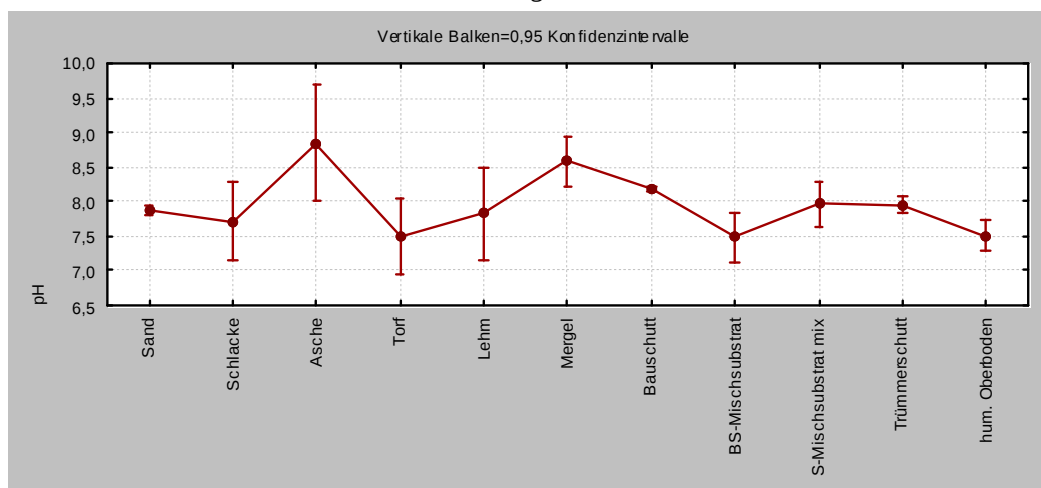


Abbildung 61: signifikante pH-Wertunterschiede zwischen den Substraten

Signifikante Unterschiede treten auf z.B. zwischen Sand einerseits und Asche, Mergel, Bauschuttmischsubstraten sowie Bauschutt andererseits. Aschen unterscheiden sich bezüglich ihres pH-Wertes signifikant von BS-Mischsubstraten und humosen Oberböden (Abb. 61).

3.6.2 Blei

In Berlin sind als Ausgangsgestein für die Bodenbildung natürlicherweise Tal- bzw. Geschiebesande sowie Geschiebemergel und -lehm verbreitet. Für erstere liegen die geogenen Grundgehalte für Blei zwischen 10 und 15mg/kg, für letztere zwischen 12-40mg/kg (Blume 1993, Kretschmer et al 1997):

Urbane Böden sind häufig durch erhöhte Bleigehalte gekennzeichnet. Eintragspfade sind technogene Substrate im Boden sowie verkehrs- und industriebedingte Einträge über die Luft bzw. den Niederschlag. Die Bleibelastung differiert in Böden unterschiedlicher Ausgangsmaterialien (Renger et al. 1998, Blume et al. 1997, Hiller et al. 1997). Blei ist im Boden wenig mobil. Die Mobilität wird durch das Bodenausgangssubstrat beeinflusst: sie

liegt zwischen 0,1 bis 13% (mobile Fraktion) und 0,7 bis ca 30% (mobil +leicht nachlieferbar), wobei hohe Mobilitätswerte in Pararendzinen aus Trümmerschutt auftraten (Renger & Mekiffer 1998).

In den Gutachten waren substratbezogene Bleigehalte wie folgt erfasst:

• Bauschutt	1309
• Bauschuttmischsubstrate	39
• Sand	773
• Sandmischsubstrate	39
• Schlacke	9
• Trümmerschutt	246
• Asche	5
• Humoser Oberboden	72
• Torf	9
• Mergel	21
• Lehm	6

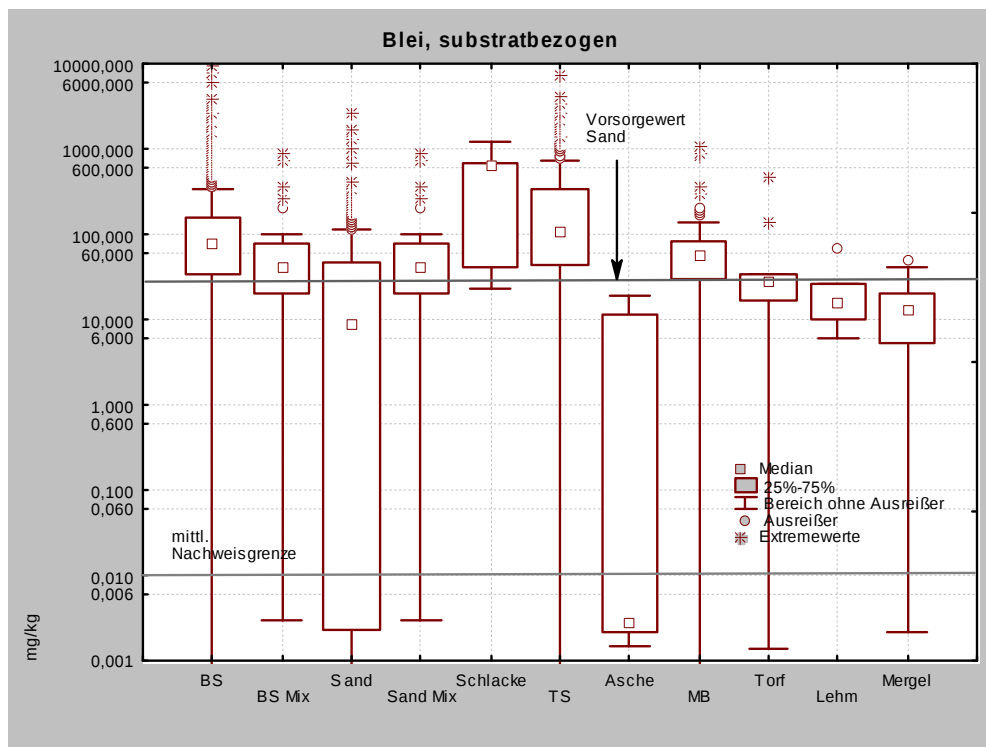


Abbildung 62: Vergleich der substratbezogenen Bleigehalte

(BS=Bauschutt, BS Mix=Bauschuttmischung, TS=Trümmerschutt, MB=humoser Oberboden)

Nur bedingt aussagekräftig sind aufgrund der geringen Wertezahl die Boxplots zu Asche, Schlacke, Torf und Lehm.

Unter Einschluss der Ausreißer weist Bauschutt die größte Spannbreite der Bleigehalte auf, gefolgt von Trümmerschutt und dem in den Gutachten als „Sand“ angesprochenen Substrat. Die zu Aschen sowie Lehm, Mergel und Torf vorliegenden Analysenwerte zeigen eine geringere Spannweite der Bleigehalte. Der Median der Bleibelastung liegt für Schlacke besonders hoch, aber auch im Trümmerschutt deutlich über dem Median der anderen hier dargestellten Substrate (Tab. 31).

Tabelle 30: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Blei“

Substrat	Median	25%	75%
Bauschutt	76	33,4	160
Bauschuttmischsubstrate	41	20,7	78
Sand	9	0,0023	46
Sandmischsubstrate	53,6	29,8	120
Schlacke	657	42,2	683
Trümmerschutt	108	44,3	330
Asche	0,0029	0,0022	11,1
Humoser Oberboden	5,185	30,5	82
Torf	28	17	33
Lehm	16	10	26
Mergel	13	5,3	20

Die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Substraten bezüglich ihres Bleigehaltes ist nachfolgend dargestellt (Tab. 32). Die Substrate Schlacke, Asche, Torf und Lehm werden wegen der Stichprobenzahlen < 10 nicht mit betrachtet.

Tabelle 31: multipler Vergleich der p-Werte für „Bleigehalt“, p=0,05

	BS	BS-Mix	Sand	S-Mix	TS	MB	Mergel
BS			X		X		
BS-Mix			X		X		
Sand	X	X		X	X		
S-Mix			X		X		
TS	X	X	X	X		X	X
MB			X		X		X
Mergel	X				X	X	

Trümmerschutt unterscheidet sich bezüglich seines Bleigehaltes signifikant von allen in der Tabelle erfassten Substraten. Höhere Bleigehalte weisen nur Schlacken auf, die häufig selbst Bestandteil von Trümmerschutt sind. Sande sind in ihrem Bleigehalte von allen Substraten außer Mergel signifikant verschieden.

3.6.3 Cadmium

Cadmium ist aufgrund seiner Depotwirkung im menschlichen Körper und den stattfindenden Verdrängungsreaktionen von Zink aus Enzymen schon in geringen Dosen toxisch. Die Pflanzenverfügbarkeit von Cadmium ist im Vergleich zu anderen Schwermetallen sehr hoch (Vigerlist & Selmer-Olsen, 1986). Die geogenen Grundgehalte der im Berliner Raum natürlich anstehenden Substrate liegen unter 0,25mg/kg Cadmium. Anthropogene Quellen für Cadmium sind u. a. Farbpigmente, Batterien, Klärschlämme und Abgase. Cadmium wird vor allem über feste Abfälle wie Klärschlamm, durch atmosphärische Deposition oder durch Abwasserverrieselung in den Boden eingebracht. Die Mobilität von Cadmium im Boden ist stark pH-abhängig – sie steigt unterhalb eines pH-Wertes von 6,5 (Grenz-pH nach Horneburg & Brümmer, 1989) an. Urbane Böden weisen mobile Cd-Anteile (Ammonium-Nitrat-Extrakt) von 0,3 bis ca. 20% der Gesamtkonzentration auf. Der mobile + leicht nachlieferbare Anteil (Ammonium-Acetat-Extrakt) liegt zwischen 2 und 90%. Sehr hohe Mobilisierbarkeit tritt dabei vor allem in Pararendzinen aus Bauschutt und im humosen Oberboden von Rieselfeldern auf. Im Umweltatlas von Berlin sind Cadmiumgehalte nutzungsbezogen für die oberen 20 bis 30 cm, also in der Regel für den Oberbodenhorizont angegeben. Die Durchschnittswerte liegen demnach zwischen 0,4 mg/kg in Hausgärten und 6,6mg/kg auf Spielplätzen. Maximalwerte bis zu 80mg/kg wurden in Böden von Kleingärten festgestellt.

Die hier zu Grunde liegenden substratbezogenen Datensätze zu Cadmium verteilen sich wie folgt:

- Bauschutt 1300
- Bauschuttmischsubstrate 39
- Sand 433
- Sandmischsubstrate 35
- Schlacke 9
- Trümmerschutt 214
- Asche 5
- Humoser Oberboden 71
- Torf 9
- Mergel 21
- Lehm 6

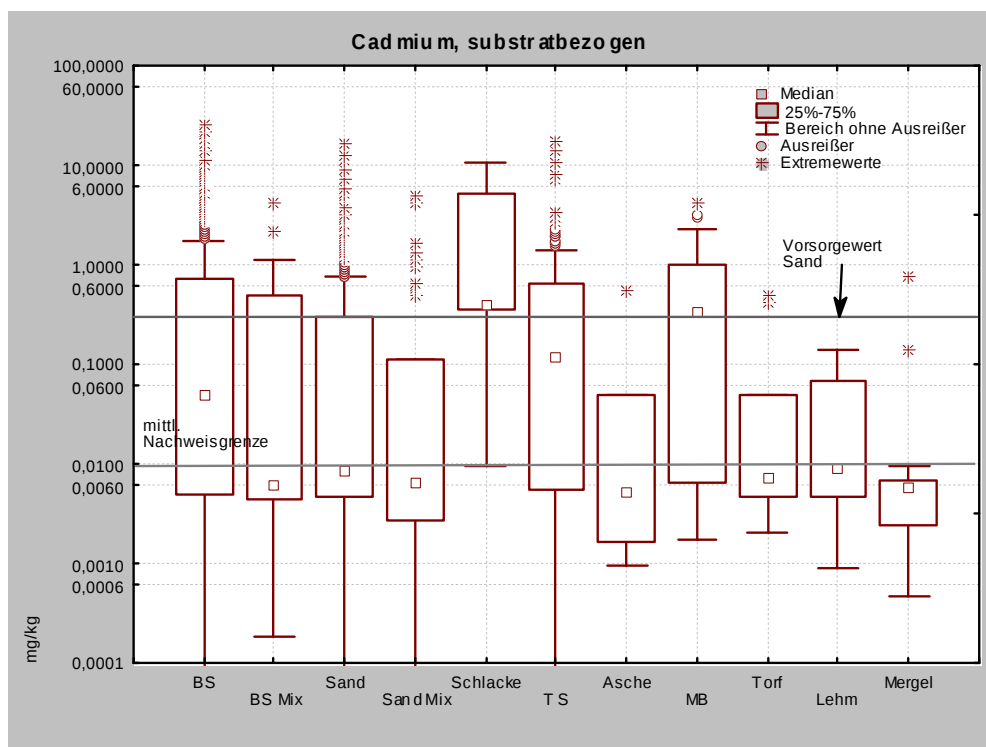


Abbildung 63: Vergleich der substratbezogenen Cadmiumgehalte
(BS=Bauschutt, BS Mix=Bauschuttmischung, TS=Trümmerschutt, MB=humoser Oberboden)

Die mittlere Nachweisgrenze für Cadmium lag bei 0,01 mg/kg. Damit befanden sich mehr als die Hälfte aller Messwerte von Bauschuttmischsubstraten, Sand und Sandmischsubstraten unterhalb dieser Nachweisgrenze. Höhere Belastungen zeigen reine Schlacken, Humoser Oberboden, Bauschutt sowie Trümmerschutt.

Unter Einbeziehung der Ausreißer und Extremwerte sind im Bauschutt, Sand, Trümmerschutt und im humosen Oberboden die größten Spannweiten der Cd-Gehalte zu verzeichnen. Die natürlichen Substrate Torf, Lehm und Mergel sowie die Analysenwerte der Aschen zeigen hingegen keine große Schwankungsbreite der Cd-Kontamination.

Tabelle 32: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Cadmium“

Substrat	Median	25%	75%
Bauschutt	0,0485	0,005	0,715
Bauschuttmischsubstrate	0,0062	0,0043	0,5
Sand	0,0086	0,0043	0,3
Sandmischsubstrate	0,0063	0,0028	0,11
Schlacke	0,39	0,36	5,33
Trümmerschutt	0,115	0,055	0,63
Asche	0,053	0,0016	0,05
Humoser Oberboden	0,34	0,0064	1,0
Torf	0,0071	0,0046	0,05
Lehm	0,0091	0,0046	0,07
Mergel	0,0057	0,0024	0,007

Signifikante Unterschiede in Bezug auf den Cadmiumgehalt sind in der nachfolgenden Matrix ersichtlich.

Tabelle 33: multipler Vergleich der p-Werte für „Cadmiumgehalt“, p=0,05

	BS	BS-Mix	Sand	S-Mix	TS	MB	Mergel
BS			X				X
BS-Mix							
Sand	X					X	
S-Mix						X	
TS							X
MB			X	X			X
Mergel	X				X		

Bauschutt weist signifikante Unterschiede zu Sand und Mergel auf. Bauschuttmischsubstrate unterscheiden sich bezüglich ihrer Cadmiumgehalte von keinem der anderen Substrate signifikant. Sand unterscheidet sich – außer von Bauschutt - noch signifikant vom humosen Oberboden, während Sandmischsubstrate sich nur von diesem Substrat abgrenzen lassen. Trümmerschutt hebt sich aufgrund der großen Spannweite der Cd-Messwerte lediglich von Mergel signifikant ab, der extrem niedrige Cd-Gehalte (90% aller Werte liegen unter der Nachweisgrenze) aufweist.

3.6.4 Kupfer

Die geogenen Grundgehalte für Kupfer liegen nach Blume (1985) zwischen 2mg/kg (Talsand) und 40mg/kg (Geschiebemergel). Quellen für Kupfer in der Umwelt waren lange Zeit die Metall verarbeitende Industrie und in jüngerer Zeit der Fahrzeugbau bzw. Bestandteile an Fahrzeugen. Der Eintrag von Kupfer in den Boden erfolgte zum Einen über Klärschlamme, aber auch durch atmosphärische Deposition. Gegenwärtig nehmen die diffusen Kupfer-Emissionen in die Gewässer und den Boden aufgrund seines verstärkten Einsatzes in der Bauwirtschaft zu (Hillebrandt et al. 2005). Oberbodenwerte sind in Berlin für einzelne Standorte erfasst, u. a. liegen Daten zum Oberboden des Rieselfeldes Berlin-Buch vor: Dort wurden Kupfergehalte zwischen 50 und 250mg/kg analysiert. Die Kupfergehalte korrelieren dabei gut mit den Humusgehalten (Schlentherr 1992). Der Grenz-pH-Wert für Kupfer liegt zwischen 4,5 und 5: unterhalb dieses pH-Wertes kommt es zu einer Cu-Mobilisierung.

In den Gutachten der Berliner Bezirksämter war Kupfer seltener Gegenstand von Untersuchungen als Blei. Demzufolge liegen weniger substratbezogene Datensätze vor:

- Bauschutt 1150
- Bauschuttmischsubstrate 10
- Sand 631
- Sandmischsubstrate 28
- Schlacke 9
- Trümmerschutt 140
- Asche 5
- Humoser Oberboden 34
- Torf 7
- Mergel 19
- Lehm 4

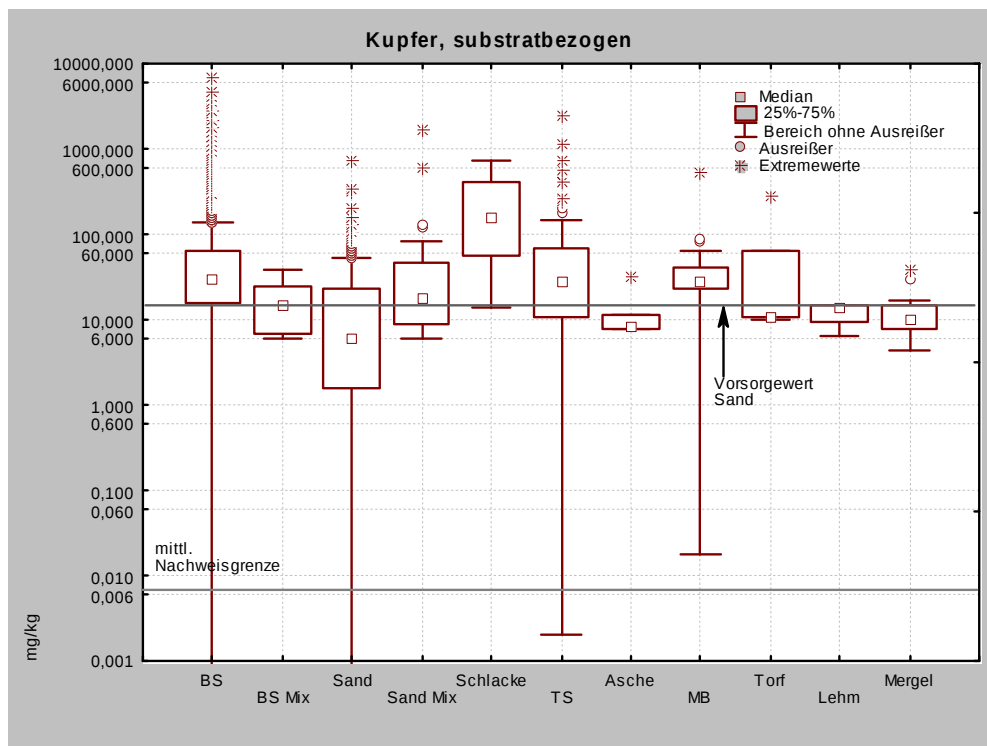


Abbildung 64: Vergleich der substratbezogenen Kupfergehalte
(BS=Bauschutt, BS Mix=Bauschuttmischung, TS=Trümmerschutt, MB=humoser Oberboden)

Unter Einbeziehung der Ausreißer und Extrema weist Bauschutt die größte Spannbreite der Kupfergehalte auf. Bezüglich seines Medians sowie des 25%- und 75%-Perzentils besteht eine gute Übereinstimmung mit Trümmerschutt. Die höchsten Kupferwerte zeigten Schlacken. Die natürlichen Substrate Torf, Lehm und Mergel sowie die Sande und Aschen wiesen nur geringe Kupferkontaminationen und -spannweiten der Messwerte auf.

Tabelle 34: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Kupfer“

Substrat	Median	25%	75%
Bauschutt	28,925	15,67	65
Bauschuttmischsubstrate	14,85	6,47	24,8
Sand	6	1,59	22,4
Sandmischsubstrate	18,35	8,815	47,25
Schlacke	155	55,8	413
Trümmerschutt	28,05	10,8	68
Asche	8,2	8	11,08
Humoser Oberboden	28,65	22,95	41
Torf	11	10	63
Lehm	14	9,6	15
Mergel	10	8	14,5

Schlacken, Aschen, Torf und Lehm werden aufgrund der geringen Anzahl von Kupfermesswerten nicht in den Signifikanztest einbezogen.

Tabelle 35: multipler Vergleich der p-Werte für „Kupfergehalt“, $p=0,05$

	BS	BS-Mix	Sand	S-Mix	TS	MB	Mergel
BS			X				X
BS-Mix							
Sand	X			X	X		
S-Mix			X				
TS			X				X
MB			X				
Mergel	X				X		

Anhand des Kupfergehaltes liegen signifikante Unterschiede zwischen den hier dargestellten Substraten insbesondere für „Sand“ vor: dieses Substrat lässt sich aufgrund seiner niedrigen Cu-Werte von Bau – und Trümmerschutt, Sandmischungen sowie vom humosen Oberboden abgrenzen. Mergel unterscheidet sich in diesem Merkmal von 3 anderen Substraten (Bau- und Trümmerschutt, Schlacke) signifikant.

3.6.5 Zink

Die geogenen Grundgehalte für Zink liegen nach Blume (1985) im Bodenausgangsmaterial des Berliner Raumes zwischen 10 und 50 mg/kg. Anthropogene Zinkquelle ist in erster Linie die Metall verarbeitende Industrie. Zink findet – ebenso wie Kupfer – in den letzten Jahren zunehmend Verwendung in der Bauwirtschaft. Eine weltweite Produktionssteigerung um 55% von 1980 bis 2001 unterstreicht das (Hillebrand et al. 2005). Eintragspfade für Zink waren in der Vergangenheit zum Einen Abwässer und Klärschlämme, zum Anderen Stäube aus Reifenabrieb und diffuse Emissionen aus der vielfältigen Verwendung von Zink als Baumaterial.

Im Berliner Raum sind Zinkgehalte u. a. aus den Oberböden der Berliner Rieselfelder bekannt: dort wurden je nach Distanz vom Einlauf Gehalte zwischen 12,7 und 3584 mg/kg festgestellt (Strohbach et al. 1992).

Die hier vorliegenden Datensätze zu Zink teilen sich wie folgt auf die verschiedenen Substrate

- Bauschutt 900
- Bauschuttmischsubstrate 7
- Sand 471
- Sandmischsubstrate 24
- Schlacke 7
- Trümmerschutt 81
- Asche 4
- Humoser Oberboden 22
- Torf 4
- Mergel 19
- Lehm 3

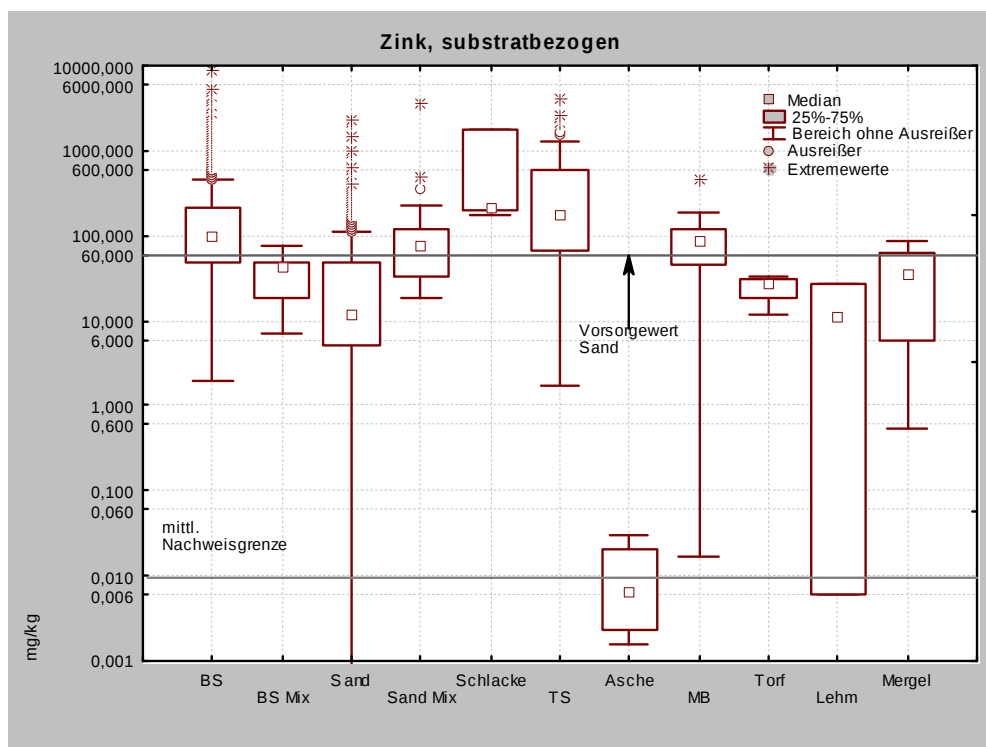


Abbildung 65: Vergleich der substratbezogenen Zinkgehalte
(BS=Bauschutt, BS Mix=Bauschuttmischung, TS=Trümmerschutt, MB=humoser Oberboden)

Die höchsten Zinkgehalte zeigen Schlacken, wobei diese Aussage nur auf 7 Proben basiert. Die Substrate Bau- und Trümmerschutt weisen die höchste Spannweite der Zinkwerte auf. Der Median der Zn-Belastung von Trümmerschutt ist allerdings mit 180mg/kg nahezu doppelt so hoch wie der Median des Bauschutts mit 97,72. Die Analysenwerte zu den Substraten Sand, Torf und Lehm liegen im Bereich der geogenen Grundgehalte. Von den 4 Zn-Werten für Asche lagen 3 unter der mittleren Nachweisgrenze für Zink von 0,01mg/kg.

Tabelle 36: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „Zink“

Substrat	Median	25%	75%
Bauschutt	97,72	50	210
Bauschuttmischsubstrate	42,75	5	48,39
Sand	12	5,0	48,9
Sandmischsubstrate	76,65	33	121
Schlacke	206	196	1719
Trümmerschutt	180	65,2	590
Asche	< NWG	< NWG	0,02
Humoser Oberboden	86,99	45,9	120
Torf	26,5	18,5	30
Lehm	14	9,6	15
Mergel	34,3	6	63,75

Bauschutt weist signifikante Unterschiede im Zinkgehalt zu den Substraten Sand und Mergel auf, während sich Bauschuttmischsubstrate hinsichtlich ihrer Zinkgehalte von keinem anderen Substrat signifikant unterscheiden. Das Substrat „Sand“ hebt sich am deutlichsten hinsichtlich seines Zn-Gehaltes von anderen Substraten ab: es bestehen signifikante Unterschiede zu Bau – und Trümmerschutt sowie zu Sandmischsubstraten und zu humosen Oberbodenproben. Sandmischsubstrate unterscheiden sich hingegen nur von Sand. Trümmerschutt lässt sich bezüglich dieses Parameters von Sand und Mergel abgrenzen, die humosen Oberbodenproben von Sand sowie Mergel von Bau- und Trümmerschutt.

Tabelle 37: multipler Vergleich der p-Werte für „Zinkgehalt“, $p=0,05$

	BS	BS-Mix	Sand	S-Mix	TS	MB	Mergel
BS			X				X
BS-Mix							
Sand	X			X	X	X	
S-Mix			X				
TS			X				X
MB			X				
Mergel	X				X		

3.6.6 16 PAK/EPA

Als Hintergrundwerte (90. Perzentil) werden für die Summe der 16 EPA-PAK in Böden des Landes Brandenburg ohne Gebietsdifferenzierung unter Ackernutzung 356 µg/kg und unter Grünlandnutzung 995 µg/kg angegeben (LABO, 1998). Natürliche, rezente Quellen für PAK sind vor allem vulkanische Aktivitäten, Waldbrände sowie vermutlich auch Mikroorganismen. PAK entstehen als unerwünschte Nebenprodukte bei unvollständigen Verbrennungs- und Inkohlungsprozessen (Temperatur = 500 bis 700 °C) aus organischen Substanzen wie Kohle, Heizöl, Kraftstoffen, Holz und Torf.

Der Eintrag in den Boden erfolgt einerseits durch trockene oder nasse Deposition, andererseits häufig durch Klärschlamm-Ausbringung.

Die Löslichkeit und Beweglichkeit von PAK in Böden ist generell gering, kann aber durch Tenside, Öl bzw. Lipide erhöht werden. Die Bindung an mobile Fulvosäuren kann den PAK-Transport begünstigen (Gauthier et

al., 1986). Zur PAK-Belastung von Berlin liegen nur Angaben für den Oberboden ausgewählte Flächen vor. So wurden im Oberboden von Rieselfeldböden zwischen 0,009 und 7,48mg/kg PAK gemessen.

Die substratbezogene Auswertung der PAK-Kontamination stützt sich auf die nachstehenden Datensätze:

- Bauschutt 1225
- Bauschuttmischsubstrate 26
- Sand 650
- Sandmischsubstrate 37
- Schlacke 9
- Trümmerschutt 187
- Asche 5
- Humoser Oberboden 49
- Torf 11
- Mergel 21
- Lehm 5

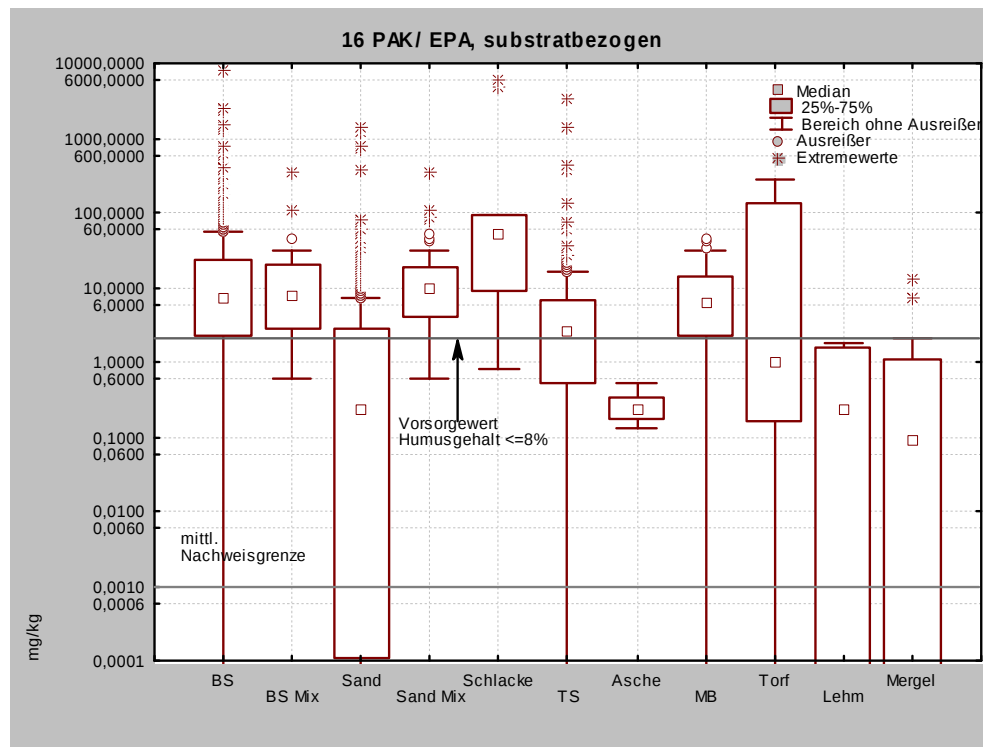


Abbildung 66: Vergleich der substratbezogenen PAK-Gehalte
(BS=Bauschutt, BS Mix=Bauschuttmischung, TS=Trümmerschutt, MB=humoser Oberboden)

Schlacken weisen im Vergleich zu anderen Substraten den höchsten Median für PAK auf, wobei Analysenwerte lediglich zu 9 Schlackeproben vorlagen. Niedrige PAK-Mediane zeigen hingegen Aschen (5 Analysenwerte) sowie die natürlichen Substrate Sand und Mergel (Abb. 66, Tabelle 39).

Tabelle 38: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „PAK“

Substrat	Median	25%	75%
Bauschutt	7,05	2,31	23,56
Bauschuttmischsubstrate	7,75	2,80	19,5
Sand	0,24	0,0001	2,8
Sandmischsubstrate	9,77	3,9	18,79
Schlacke	51,06	8,88	92,72
Trümmerschutt	2,6	0,51	6,7
Asche	0,23	0,17	0,34
Humoser Oberboden	6,31	2,2	13,8
Torf	1	0,16	134,41
Lehm	0,24	0,0053	1,58
Mergel	0,09	0,0078	1,11

Die aus den Berliner Bodengutachten stammenden Analysenwerte weisen PAK-Gehalte weit über den Hintergrundwerten des Umlandes von <1mg/kg Boden aus. Auch die im Oberboden von Rieselfeldern gefundenen Maximal-Kontaminationen von bis zu 7,5mg/kg Boden werden in den urbanen Böden Berlins offenbar vielfach überschritten. Die höchste Spannweite der PAK-Kontamination zeigen die Torfproben. Ebenfalls hohe PAK-Gehalte wurden in Schlackeproben gefunden. Für das Substrat „Torf“ liegen jedoch nur 11 und für „Schlacken“ 9 PAK-Werte in der Datenbank vor. Auch Bauschutt sowie Bauschutt- und Sandmischsubstrate zeigen hohe PAK-Gehalte. Die statistische Auswertung der Daten zu dem Substrat „Trümmerschutt“ hingegen weist auf deutlich niedrige PAK-Gehalte hin. Das steht im Gegensatz zu früheren eigenen Untersuchungen (Smettan & Mekiffer, 1996), in denen in Trümmerschutt tw. extrem hohe PAK-Belastungen nachgewiesen worden waren und daraufhin eine Abgrenzung als eigenes Substrat gegenüber dem Bauschutt in der bodenkundlichen Kartierung gefordert wurde. Allerdings ist Trümmerschutt – ebenso wie die Substrate Bauschutt und Sand – durch eine hohe Anzahl von Ausreißern bei den PAK-Werten gekennzeichnet (Abb.66).

Die PAK-Gehalte der natürlichen Substrate „Lehm“ und „Mergel“ liegen im Bereich der Hintergrundwerte. Auch „Sand“ zeigt innerhalb des 75%-Quartils keine starke Kontamination. Die zu den humosen Oberbodenproben vorliegenden PAK-Werte nehmen eine mittlere Position zwischen natürlichen und technogenen Substraten ein, was evtl. als Hinweis auf den Eintragspfad für PAK gedeutet werden kann: während die verschiedenen technogenen Substrate vor allem punktförmige Kontaminationen mit sich bringen (verrußte Baustoffreste, Teeranteile, Kohlereste), sind für den Oberboden diffuse atmosphärische Einträge wahrscheinlich, die zu einer tendenziell niedrigeren, dafür ubiquitären Belastung führen.

Tabelle 39: multipler Vergleich der p-Werte für „Σ PAK“, p=0,05

	BS	BS-Mix	Sand	S-Mix	TS	MB	Torf	Mergel
BS			X		X			X
BS-Mix			X					X
Sand	X	X		X	X	X		
S-Mix			X		X			X
TS	X		X	X				
MB			X					X
Torf								
Mergel	X	X		X		X		

Bauschutt zeigt hinsichtlich der PAK-Werte signifikante Unterschiede zu den natürlichen Substraten Sand und Mergel sowie zu Trümmerschutt. Bauschuttmischsubstrate unterscheiden sich nur von den beiden natürlichen Substraten Sand und Mergel. Die als „Torf“ angesprochenen Substrate unterscheiden sich von keinem der anderen Substrate signifikant im PAK-Gehalt, was aus der hohen Spannweite der PAK-Werte resultiert. Dagegen hebt sich „Sand“ in diesem Parameter signifikant von allen technogenen Substraten sowie dem natürlichen Substrat „Humoser Oberboden“ ab. Sandmischsubstrate lassen sich bezüglich der PAK-Gehalte signifikant von Sand, Trümmerschutt und Mergel abgrenzen, Trümmerschutt von Sand und Sandmischsubstraten. Die humosen Oberböden wiesen signifikante Unterschiede zu Sanden und Mergel auf. Mergel weicht bezüglich der PAK-Gehalte signifikant von Bauschutt, Bauschutt- sowie Sandmischsubstraten und vom humosen Oberboden ab.

3.6.7 Benzo(a)pyren

Benzo(a)pyren wird häufig als repräsentative Einzelsubstanz anstelle des PAK-Gehaltes (16PAK/ EPA) angegeben: In vielen Fällen beträgt die Konzentration der 16 EPA-PAK ungefähr das 10-fache der Konzentration von BaP. Die Benzo(a)pyren-Gehalte unbelasteter Böden liegen zwischen 0,001 und 0,003 mg/kg und übersteigen 0,01 mg/kg normalerweise nicht. Als Hintergrundwerte (90. Perzentil) für BaP in Böden des Landes Brandenburg ohne Gebietsdifferenzierung werden 0,036 mg/kg unter Ackernutzung und 0,076 mg/kg unter Grünlandnutzung angegeben (LABO, 1998). Maximalgehalte für BaP wurden bundesweit bis 1,3 mg/kg unter landwirtschaftlicher Nutzung und bis zu 650mg/kg im Umfeld von Kokereien festgestellt (Marquardt & Schäfer, 2004). Bekannte Emittenten sind Kokereien, Gaswerke sowie Teer- und Holzschutzmittelverarbeitende Betriebe. Der Eintrag von BaP erfolgt hauptsächlich über die Atmosphäre bzw. durch Ausbringung von Klärschlamm. Substratbezogen auswertbare Daten zu BaP-Gehalten lagen in folgendem Umfang vor:

- Bauschutt 1199
- Bauschuttmischsubstrate 11
- Sand 639
- Sandmischsubstrate 24
- Schlacke 9
- Trümmerschutt 187
- Asche 5
- Humoser Oberboden 34
- Torf 11
- Mergel 21
- Lehm 5

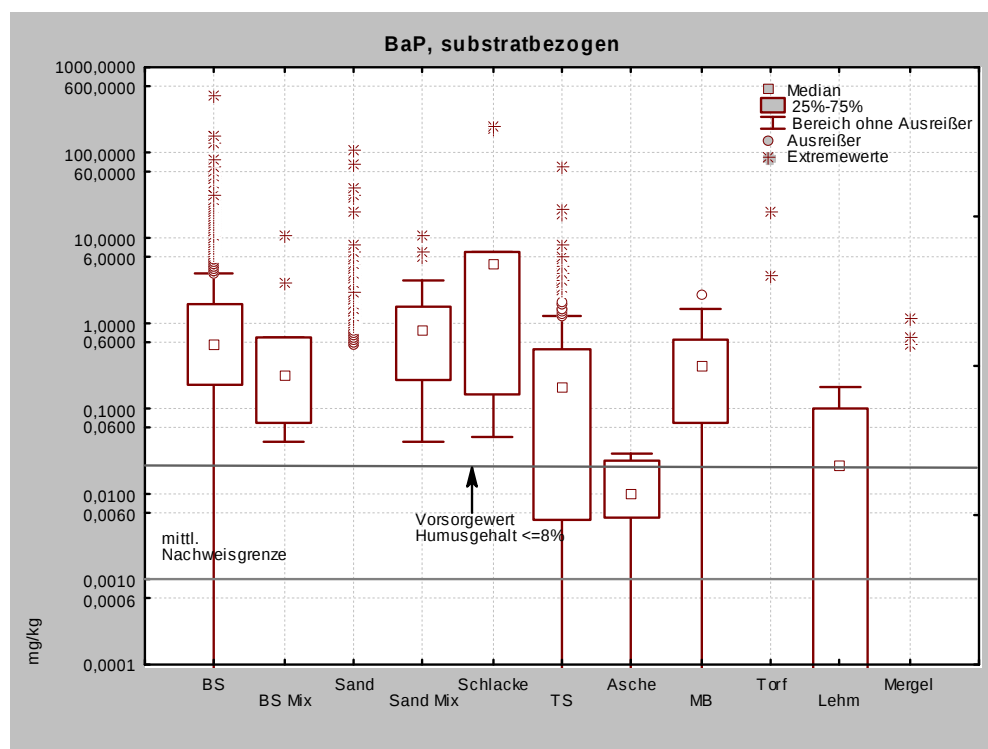


Abbildung 67: Vergleich der substratbezogenen BaP-Gehalte
(BS=Bauschutt, BS Mix=Bauschuttmischung, TS=Trümmerschutt, MB=humoser Oberboden)

Die wenigen Daten, die zu „Schlacke“ vorliegen (9), weisen diese als BaP-hochkontaminiert aus. Die Substrate „Bauschutt“ und „Sand“ sind durch eine hohe Zahl von Extremwerten gekennzeichnet. Sand weist allerdings mit $9,96 \cdot 10^{-6}$ einen Median unterhalb der Nachweisgrenze auf. Der Median aller technogenen Substrate außer „Asche“ liegt um ein Vielfaches über den Hintergrundwerten des Umlandes und auch das natürliche Substrat „Humoser Oberboden“ zeigt x-fach höhere BaP-Werte. Die Mediane der natürlichen Substrate „Torf“, „Lehm“ und „Mergel“ entsprechen den in der Literatur angegebenen Hintergrundwerten.

Tabelle 40: Vergleich der statistischen Kennwerte einzelner Substrate für den Parameter „BaP“

Substrat	Median	25%	75%
Bauschutt	0,67	0,26	1,98
Bauschuttmischsubstrate	0,24	0,07	0,67
Sand	0,00099	0,00048	0,23
Sandmischsubstrate	0,841	0,218	1,554
Schlacke	4,837	0,15	6,776
Trümmerschutt	0,183	0,0048	0,463
Asche	0,01	0,0052	0,024
Humoser Oberboden	0,326	0,07	0,649
Torf	0,0008	0,00027	0,57
Lehm	0,022	0,0007	0,1
Mergel	0,00081	0,00051	0,095

Die Substrate „Schlacke“, „Asche“ und „Lehm“ wurden aufgrund geringer Stichprobenzahl nicht in den Signifikanztest einbezogen.

Tabelle 41: multipler Vergleich der p-Werte für „Benzo(a)pyren“, $p=0,05$

	BS	Sand	BS-Mix	S-Mix	TS	MB	Torf	Mergel
BS		X			X			X
Sand	X			X	X	X		
BS-Mix								
S-Mix		X			X			X
TS	X	X		X				
MB		X						
Torf								
Mergel	X			X	X			

Bauschutt unterscheidet sich im BaP-Gehalt signifikant von Sand, Trümmerschutt und Mergel. Sand differiert signifikant von Bauschutt, Sandmischsubstraten, Trümmerschutt sowie vom humosen Oberboden. Bauschutt-mischsubstrate und Torf lassen sich bezüglich des BaP-Gehaltes statistisch signifikant von keinem der anderen Substrate abgrenzen. Die Sandmischsubstrate weisen gegenüber Sand, Trümmerschutt und Mergel signifikant andere BaP-Gehalte auf. Trümmerschutt ist von Bauschutt und Sandmischsubstraten sowie Sand und Mergel signifikant abgrenzbar. Humoser Oberboden weist lediglich signifikante Unterschiede zu Sand auf, Mergel zu Bauschutt und Sandmischsubstraten.

Der multiple zweiseitige Vergleich für die p-Werte des BaP-Gehaltes ergab weniger signifikante Unterschiede zwischen den Substraten als derselbe multiple Vergleich für den PAK-Gehalt. Das kann als Beleg für unterschiedliche PAK-Musterverteilung in den einzelnen Substraten gewertet werden.

3.7 Beziehungen zwischen einzelnen Analysenparametern

Untersucht werden Zusammenhänge zwischen verschiedenen Schwermetallen unter dem Aspekt, ob sich bestimmte Substrate durch typische „Schwermetallparagenesen“ auszeichnen. Die Verteilung von PAK wird mit der Fragestellung betrachtet, inwieweit sich einzelnen Substraten typische PAK-Muster zuordnen lassen und ob anhand von PAK-Quotienten auf Kontaminationsquellen geschlossen werden kann.

Die Analysenwerte für alle Schadstoffe liegen in den meisten Fällen nicht normal verteilt vor, dementsprechend wird auf eine verteilungsfreie Methode der Korrelationsanalyse – den Spearmans Korrelationskoeffizient – zurückgegriffen. Hierfür ordnet man jedem x-Wert aus $x_1 \dots x_n$ als Rang die Platzzahl zu, die der Wert bei größtmäßiger Anordnung aller Werte erhält. Damit beschreibt dieser Koeffizient die Stärke des monotonen Zusammenhangs zwischen x und y (Fahrmeir et al. 2007).

Problematisch ist wiederum die Behandlung von Messwerten unterhalb der Nachweisgrenze. Je nach Analysenparameter liegen unterschiedliche Mengen von Werten unterhalb der NWG, d.h. ein „Abschneiden“ dieser Werte mit ausschließlicher Betrachtung von Werten $> \text{NWG}$ ist nicht möglich. Werden Werte unterhalb der NWG auf einen definierten Wert – z.B. halbe NWG – gesetzt, treten Verschiebungen in den Rangfolgesummen auf und die Berechnung der Korrelation wird fehlerhaft. Um das zu vermeiden, werden analog der Vorgehensweise für die Verteilungsanalyse die Messwerte unterhalb der NWG zwischen „0“ und der NWG per Zufallsgenerator erzeugt.

Da nichtparametrische Korrelationsverfahren Ausreißer-unempfindlich sind, werden diese in die Analyse einbezogen.

Für die Berechnung von PAK-Quotienten werden die Werte unterhalb der Nachweisgrenze ausgeschlossen, da sie für die PAK-Quellen-Analyse nicht relevant sind.

3.7.1 PAK-Muster in Substraten

Neben den Absolutgehalten von PAK sind bezüglich dieser organischen Schadstoffe 2 Fragen von Interesse:

- Existieren substratspezifische PAK-Muster?
- Ist auf der Basis von PAK-Quotienten eine Identifizierung von PAK-Quellen möglich bzw. welche Quotienten sind – ausgehend von bekannten Quellen – sinnvoll?

Verschiedene Autoren haben sich mit PAK-Mustern von Böden befasst. Tebaay et al 1993, untersuchte 60 Bodenproben unterschiedlicher Nutzung aus Nordrhein-Westfalen u. a. hinsichtlich typischer PAK-Muster. Er stellte in durch KFZ-Immissionen beeinflussten Böden eine Dominanz von Benzo (b)fluoranthen und Benzo (ghi)perylen fest, während auf einem Kokereisstandort Fluoranthen hervortrat. In Böden von Kleingartenanlagen und wenig belasteten Standorten konnten aufgrund diffuser Einträge keine spezifischen PAK-Muster nachgewiesen werden. Gras et al (1996) fand in 108 Proben von Hamburger Oberböden untereinander sehr ähnliche PAK-Muster. Die Art der Nutzung hat das PAK-Muster dieser Proben nicht signifikant geprägt. Allerdings zeigten höher kontaminierte Proben untereinander ähnliche Muster mit einer Dominanz von 3- und 4-Ring-PAK. Diese Proben enthielten oft Trümmerschutt oder andere technogene Beimengungen wie Holzkohle, Teer oder Dachpappe. In niedrig kontaminierten Proben waren die 3- und 4-Ring-PAK nicht vorherrschend. Insgesamt hält Gras die Identifizierung einzelner PAK-Quellen auf der Basis von PAK-Mustern im zentralen Hamburger Stadtgebiet für sehr schwierig bzw. unmöglich.

Aus den vorliegenden Datensätzen zu PAK-Gehalten in Berliner Böden wurden substratbezogen die Mittelwerte der PAK-Gesamtgehalte und -Einzelsubstanzen berechnet und auf 100% normiert. Auch hier werden die Werte unterhalb der Nachweisgrenze in die Berechnung mit einbezogen.

In Abbildung 68 zeigt die gemittelten PAK-Muster der einzelnen Substrate –dabei wurden PAK gleicher Ringzahl zusammengefasst.

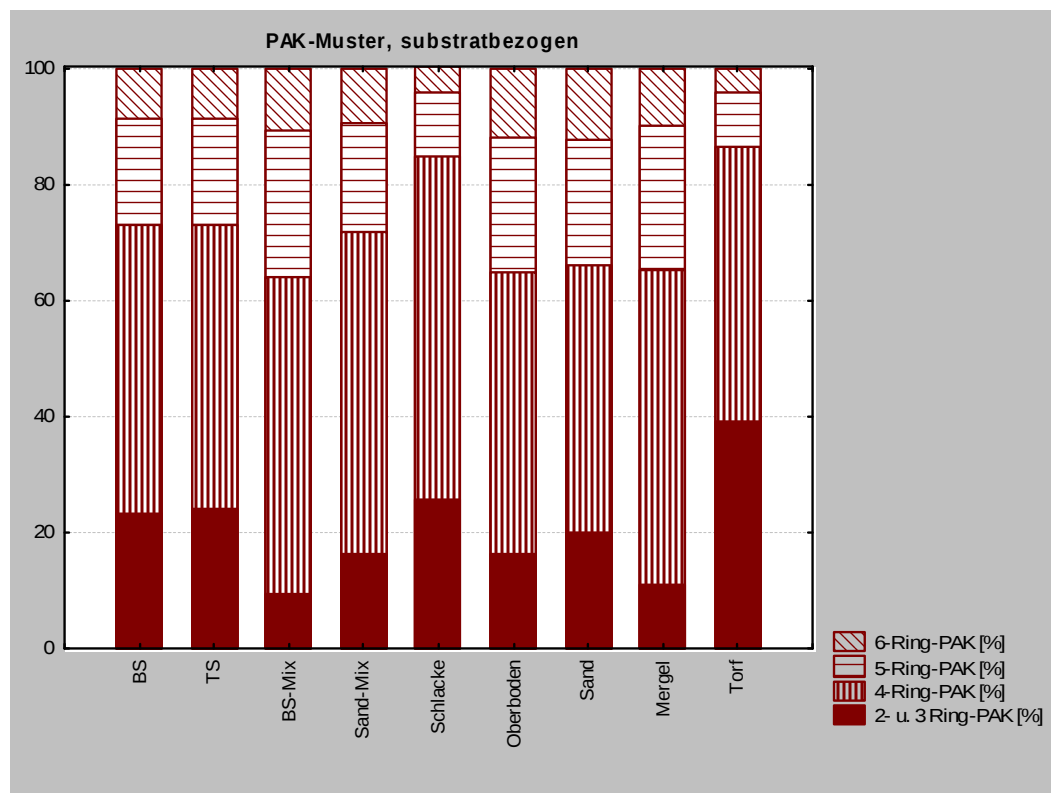


Abbildung 68: Vergleich der substratbezogenen PAK-Muster
(BS=Bauschutt, TS=Trümmerschutt,)

Ergänzend dazu sind in Tabelle 43 die prozentualen Anteile der PAK, zusammengefasst nach Anzahl ihrer Ringe, aufgeführt.

Tabelle 42: prozentualer Anteil von 2/3-Ring-, 4-Ring-, 5-Ring- und 6-Ring-PAK in den Substraten

	Summe 2- und 3-Ring-PAK [%]	Summe 4-Ring-PAK [%]	Summe 5-Ring-PAK [%]	Summe 6-Ring-PAK [%]
Bauschutt	23,26	49,52	18,33	8,90
Trümmerschutt	23,97	49,15	18,17	8,72
Bauschuttmischungen	9,46	54,35	25,47	10,70
Sandmischungen	16,13	55,73	18,49	9,65
Schlacke	25,50	59,73	10,86	4,24
Humoser Oberboden	16,12	48,47	23,23	12,19
Sand	19,85	46,23	21,53	12,40
Mergel	11,02	54,29	24,82	9,87
Torf	39,09	47,12	9,59	4,20

Unabhängig von den PAK-Gesamtgehalten, die in Bau- und Trümmerschutt signifikant verschieden waren, zeigen diese beiden Substrate - gemittelt über das jeweilige Probenkollektiv – ähnliche PAK-Muster. Das widerspricht den Ergebnissen von Gras (1996), die in Abhängigkeit von der Höhe der Kontamination typische PAK-Muster nachwies.

Die als Mergel und Bauschuttmischungen angesprochenen Substrate weisen ebenfalls vergleichbare PAK-Muster bei signifikant verschiedener Kontaminationshöhe auf, was genetisch kaum erklärbar ist.

Sandmischungen sind gekennzeichnet durch eine starke Präferenz der 4-Ring-PAK und relativ geringe Anteile von 6-Ring-PAK.

Zwischen den Substraten „humoser Oberboden“ und Sand treten geringfügige Unterschiede in den Gehalten niedrig kondensierter und 4-Ring-PAK auf: im Sand ist der Anteil 2- und 3-Ring-PAK geringfügig höher als im humosen Oberboden, dafür weist das letztgenannte Substrat etwas höhere 4- und 5-Ringverbindungen auf. :

Die hier untersuchten Schlacken sind durch eine deutliche Dominanz von 4-Ring-PAK und sehr geringe Gehalte der 6-Ring-Verbindungen gekennzeichnet.

Die sehr hohen Anteile mobiler 2- und 3-Ring-PAK im Torf können als Hinweis auf Verlagerung dieser Einzelsubstanzen aus hangenden Horizonten in den Torf und dortige Fixierung gewertet werden.

Als Indikator für PAK-Quellen werden von verschiedenen Autoren Verhältnisse von PAK-Einzelsubstanzen zueinander genutzt (u.a. Li & Kamens 1993; Lim et al. 1999; Yang et al. 2002). Auf der Basis dieser Quotienten lassen sich v.a. petrogenetisch und pyrogenetische PAK voneinander trennen. Diesen Quotienten gemeinsam ist, dass sie mögliche Abbaureaktionen und Verlagerungen von Einzel-PAK nach der Emission bzw. während der Deposition nicht berücksichtigen. Dickhut et al. (2000) berechnete PAK-Quotienten unter Einbeziehung von konstanten Abbauraten und 5-tägigem atmosphärischen Transport (Tabelle 44).

Tabelle 43: PAK-Quotienten unter Berücksichtigung von konstantem Abbau und 5-tägigem atmosphärischem Transport (Dickhut et al. 2000)

	Indeno/ BghiP	BaA/ Chr	BbF/ BkF	BaP/ BeP
Waldbrand	0,3	0,8	0,9	1,5
Verkehr	0,3	0,5	1,3	0,9
Kohle/ Koks	1,1	1,1	3,7	1,5
Industrie	1,0	0,6	2,7	0,8

PAK-Quellen scheinen nach diesen Berechnungen über den breit gefächerten Quotienten Benzo(b) fluoranthen/ Benzo (k) fluoranthen (BbF/BkF) am ehesten differenzierbar zu sein.

Dementsprechend sind in Abbildung 69 die mittleren BbF/BkF-Quotienten für die verschiedenen Substrate einander gegenübergestellt.

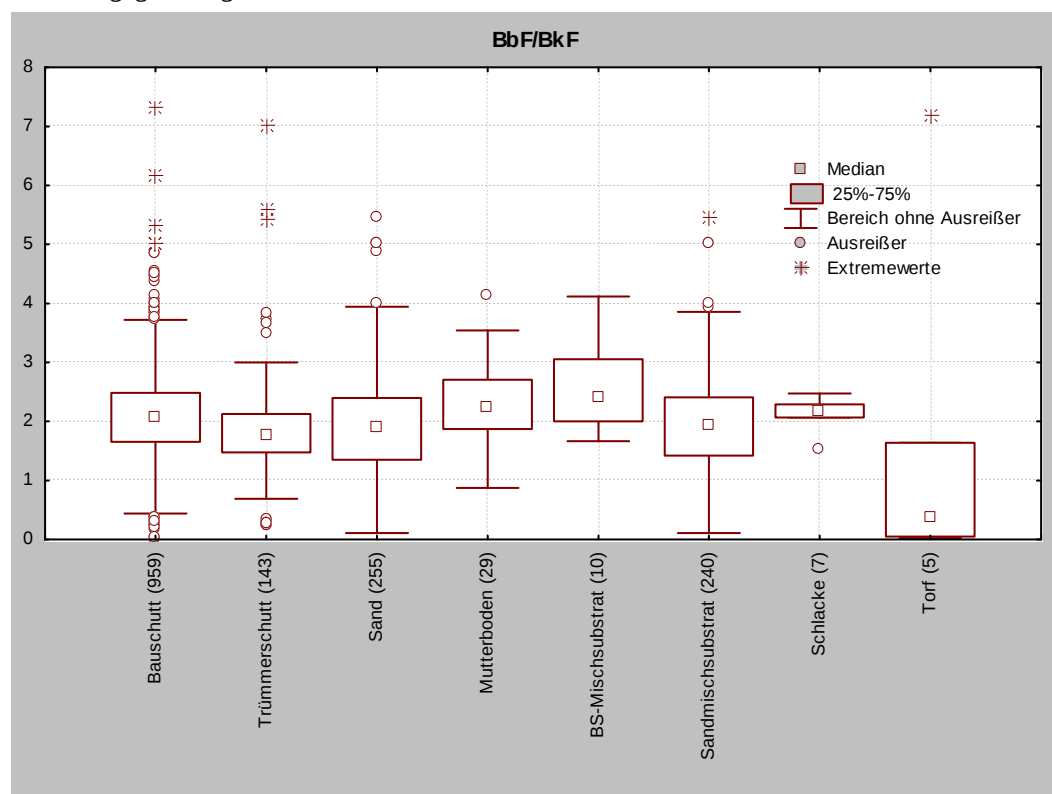


Abbildung 69: mittlere Quotienten BbF/ BkF für alle Substrate

Lediglich die beiden Substrate Schlacke und Torf unterscheiden sich deutlich von anderen Substraten bezüglich dieses Quotienten. Torf zeigt einen sehr niedrigen BbF/ BkF-Quotienten, was nach den Untersuchungen von Dickhut am ehesten als ein Hinweis auf Beeinflussung durch Brände bzw. Waldbrände gewertet werden könnte. Das wirft die Frage nach einer korrekten Substratansprache der Torfproben auf. Die Schlacken fallen durch eine geringe Streuung dieses Quotienten auf – ihre PAK-Kontamination könnte dementsprechend aus ein und derselben Quelle resultieren. Allerdings sind die Probenkollektive für Schlacke und Torf sehr klein.

Der mittlere BbF/BkF-Quotient der anderen Substrate tendiert nicht zu einem bestimmten, in Tabelle 44 aufgeführten Wert, d.h. anhand der durchschnittlichen PAK-Quotienten scheint es nicht möglich, Aussagen zu dominierenden Quellen zu geben.

3.7.2 Beziehungen zwischen Schwermetallen

In die Korrelationsuntersuchungen zu Schwermetallen werden die Substrate Bauschutt, Trümmerschutt, Sand, Sandmischsubstrat, Bauschuttmischsubstrat und Humoser Oberboden einbezogen. Zu diesen Substraten liegt eine ausreichende Zahl Schwermetallanalysen vor.

Unter Einschluss von Werten unterhalb der Nachweisgrenze ergeben sich für Bauschutt die in Tabelle 45 aufgeführten Korrelationskoeffizienten nach Spearman.

Tabelle 44: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle im Bauschutt
(Korrelationen signifikant ($p < 0,05$))

Bauschutt	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
Arsen (1274)	-	0,48	0,35	0,45	0,50	0,50	0,55	0,45
Blei (1309)	0,48	-	0,36	0,37	<u>0,60</u>	0,49	0,47	<u>0,64</u>
Cadmium (1300)	0,35	0,36	-	0,43	0,41	0,41	0,28	0,44
Chrom (1299)	0,45	0,37	0,43	-	0,47	<u>0,70</u>	0,31	0,50
Kupfer (1151)	0,48	0,64	0,45	0,50	-	<u>0,67</u>	0,44	<u>0,66</u>
Nickel (1180)	0,50	0,49	0,41	0,70	0,64	-	0,40	0,58
Quecksilber (1184)	0,55	0,47	0,28	0,31	0,47	0,40	-	0,35
Zink (900)	0,45	0,64	0,44	0,50	0,66	0,58	0,35	-

Der deutlichste Zusammenhang besteht in diesem Substrat zwischen Chrom und Nickel. Auch die Kupfer-, Blei- und Zinkwerte zeigen im Bauschutt tendenziell ein gleiches Verhalten, d.h. steigende Werte eines dieser Schwermetalle geht meist einher mit zunehmendem Gehalt der anderen beiden Schwermetalle, ohne dass die Zunahme in der gleichen Größenordnung liegen muss.

Der schwächste Zusammenhang besteht zwischen Quecksilber einerseits sowie Cadmium bzw. Chrom andererseits.

In Bauschuttmischsubstraten bestehen signifikante Zusammenhänge zwischen Schwermetallen nur in wenigen Fällen (Tabelle 46). Zu Quecksilber liegen lediglich 8 und zu Zink 7 Analysenwerte vor. Deshalb sind die ermittelten Korrelationskoeffizienten für diese Schwermetalle unter Vorbehalt zu sehen.

Tabelle 45: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in Bauschuttmischsubstraten
Korrelationen signifikant ab $p < 0,05$

BS-Mix	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
Arsen (38)	-	-	-	<u>0,72</u>	-	-	-	-
Blei (39)	-	-	-	-	-	0,41	-	-
Cadmium (39)	-	-	-	-	-	-	(-0,74)	-
Chrom (39)	0,72	-	-	-	-	0,47	-	(0,89)
Kupfer (10)	-	-	-	-	-	0,70	-	-
Nickel (38)	-	0,41	-	0,47	<u>0,7</u>	-	(-0,79)	-
Quecksilber (8)	-	-	(-0,74)	-	-	(-0,78)	-	-
Zink (7)	-	-	-	(0,89)	-	-	-	-

Die hier analysierten Bauschuttmischsubstrate weisen die stärksten Zusammenhänge zwischen den Schwermetallen Chrom und Arsen sowie Kupfer und Nickel auf. Damit zeigen die Bauschuttmischsubstrate andere Rangkorrelationen als der reine Bauschutt. Allerdings sind Bauschuttmischsubstrate in ihrer Zusammensetzung - bis auf den Bauschuttanteil – so unspezifisch, dass die hier gefundenen Korrelationen wenig aussagekräftig sind, zumal für die Elemente Kupfer, Quecksilber und Zink nur eine sehr geringe Zahl von Analysen vorliegt.

Tabelle 46: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in humosen Oberboden; Korrelationen signifikant ($p < 0,05$)

Mubo	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
Arsen (62)	-	-	0,45	0,52	-	0,45	0,50	-
Blei (72)	-	-	-	-	-	-	-	0,53
Cadmium (72)	0,44	-	-	0,41	-	-	0,36	-
Chrom (67)	0,52	-	0,41	-	-	0,42	0,43	-
Kupfer (34)	-	-	-	-	-	0,36	0,40	-
Nickel (62)	0,45	-	-	0,42	0,36	-	0,50	-
Quecksilber (32)	0,50	-	0,36	0,43	0,40	0,50	-	-
Zink (24)	-	0,53	-	-	-	-	-	-

Die in Tabelle 47 aufgeführten Korrelationskoeffizienten geben signifikante Zusammenhänge für Schwermetalle im humosen Oberboden an. Dieses Substrat ist dadurch gekennzeichnet, dass nur in wenigen Fällen signifikante Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schwermetallen bestehen. Diese liegen alle in einer ähnlichen Größenordnung und sind in keinem Fall als eng zu bezeichnen. Die Elemente Blei und Zink korrelieren lediglich untereinander und zeigen mit keinem der anderen Schwermetalle signifikante Zusammenhänge.

Tabelle 47: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in sandigen Substraten
Korrelationen signifikant ab $p < 0,05$

Sand	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
Arsen (744)	-	0,57	0,32	0,57	0,58	0,51	0,51	0,49
Blei (773)	0,57	-	0,41	0,65	<u>0,72</u>	<u>0,70</u>	0,62	0,63
Cadmium (736)	0,32	0,41	-	0,39	0,43	0,40	0,39	0,17
Chrom (720)	0,57	0,65	0,39	-	0,60	<u>0,78</u>	0,55	0,51
Kupfer (631)	0,58	0,72	0,43	0,60	-	0,60	0,56	<u>0,75</u>
Nickel (618)	0,51	0,70	0,40	0,78	0,60	-	0,51	0,47
Quecksilber (708)	0,51	0,62	0,39	0,55	0,55	0,51	-	0,47
Zink (471)	0,49	0,63	0,17	0,51	0,75	0,47	0,47	-

In den sandigen Substraten korrelieren alle untersuchten Schwermetalle signifikant miteinander. Die engsten Zusammenhänge bestehen zwischen Chrom und Nickel, Kupfer und Blei, Blei und Nickel sowie Zink und Kupfer. Damit zeigen die als sandige Substrate eingeordneten Proben ähnliche Korrelationen wie die Bauschuttproben (Tab. 48).

Tabelle 48: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in Trümmerschutt
Korrelationen signifikant ab $p < 0,05$

TS	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
Arsen (233)	-	-	0,18	-	0,36	<u>0,62</u>	-	-
Blei (247)	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium (213)	0,18	-	-	-	0,33	0,24	0,16	-
Chrom (159)	-	-	-	-	0,20	0,26	-	-
Kupfer (140)	0,36	-	0,33	0,20	-	<u>0,61</u>	-	-
Nickel (71)	0,62	-	0,24	0,26	0,61	-	-	-
Quecksilber (211)	-	-	0,16	-	-	-	-	-
Zink (81)	-	-	-	-	-	-	-	-

Trümmerschutt (Tab. 49) zeigt nur wenige signifikante Zusammenhänge zwischen den Schwermetallen. Am deutlichsten sind die Korrelationen für Nickel und Arsen sowie Kupfer und Nickel ausgeprägt. Die insgesamt nur schwachen Zusammenhänge im Trümmerschutt dürften auf die extreme Heterogenität dieses Substrates zurückzuführen sein.

Tabelle 49: Rangkorrelation nach Spearman für Schwermetalle in Sandmischungen
(Korrelationen signifikant ab $p < 0,05$)

Sandmix	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
Arsen (46)	-	<u>0,73</u>	0,31	0,61	0,53	0,38	-	0,58
Blei (47)	0,73	-	0,38	0,69	<u>0,70</u>	0,57	0,43	<u>0,71</u>
Cadmium (47)	0,31	0,38	-	0,46	0,46	0,41	0,63	0,42
Chrom (47)	0,6	0,69	0,46	-	0,59	<u>0,78</u>	-	0,61
Kupfer (47)	0,53	0,71	0,46	0,59	-	0,55	0,45	<u>0,89</u>
Nickel (46)	0,38	0,57	0,41	0,78	0,55	-	0,52	0,5
Quecksilber (23)	-	0,43	0,63	-	0,46	0,52	-	-
Zink (24)	0,58	0,71	0,42	0,61	0,89	0,50	-	-

Die Sandmischsubstrate sind gekennzeichnet durch eine Vielzahl vergleichsweise enger Zusammenhänge. Am deutlichsten korrelieren Kupfer und Zink miteinander, aber auch Nickel und Chrom, Blei und Arsen, Zink und Blei sowie Kupfer und Blei weisen Korrelationskoeffizienten $\geq 0,7$ auf.

In Tabelle 51 sind die jeweils engsten Korrelationen der einzelnen Substrate einander gegenüber gestellt.

Tabelle 50: Vergleich der Korrelationen einzelner Substrate

Bauschutt	Cr/Ni=0,7	Cu/Ni=0,67	Cu/Zn=0,66
BS-Mix	Cr/As=0,72	Cu/Ni=0,70	-
Humoser Oberboden	Pb/Zn=0,53	Cr/As=0,52	Hg/As=0,50
Sand	Cr/Ni=0,78	Cu/Zn=0,75	Cu/Pb=0,72
Trümmerschutt	Ni/As=0,62	Cu/Ni=0,61	-
Sand-Mix	Cu/Zn=0,89	Cr/Ni=0,78	Pb/As=0,73

Der Vergleich zeigt Unterschiede in den „Schwermetallparagenesen“. Diese sind zumindest für Bauschutt, Sand und Trümmerschutt aufgrund der großen Stichprobenzahlen abgesichert und können damit für den Berliner Raum als substrat-typisch angesehen werden.

4 Diskussion, Fazit und Ausblick

4.1 Diskussion

Urbane Böden Berlins sind durch vielfache anthropogene Überprägung gekennzeichnet. In einer Reihe von Arbeiten (Smettan et al 1996, Blume et al. 1996; Meuser 1996; Hiller & Meuser 1998; Renger et al.1998) wurde die Frage diskutiert, ob es zwischen den technogenen Substraten bzw. Komponenten einerseits und deren Schadstoffbelastungen andererseits Zusammenhänge gibt – bzw: welche Aufschüttungen welche Qualitäten und Quantitäten an Schadstoffen und Bodeneigenschaften bedingen. Die zur Klärung dieser Fragen vorgenommenen eigenen Laboruntersuchungen an Mono- und Mischsubstraten lieferten außerordentlich heterogene und zum Teil widersprüchliche Ergebnisse.

So zeigten PAK-Analysen an Aschen aus Mischsubstraten einerseits sehr geringe Gehalte dieser organischen Schadstoffe, andererseits wurden in Ascheproben einer Industrieaufschüttung sehr hohe PAK-Gehalte gefunden. An Horizontproben aus verschiedenen Profilen einer Trümmerschuttfläche wurden sehr große Schadstoffgehaltsdifferenzen in einander überlagernden Horizonten festgestellt. Die Annahme, dass sich diese auf die Beimengungen von technogenen Komponenten in den jeweiligen Horizonten zurückführen lassen, hat sich in entsprechenden Untersuchungen jedoch nicht bestätigt. Auch Schadstoff-Anreicherungen in bestimmten Korngrößenfraktionen konnten nicht festgestellt werden.

Zur Beantwortung der o.g. Fragen wurden deshalb zusätzlich Bodendaten der Berliner Bezirksämter in einer hierarchischen Datenbank erfasst und statistisch untersucht. Der Aufbau der Gutachten und die Darstellung von Analysendaten variierte stark, so dass deren Erfassung über feste Masken ausgeschlossen war. Aus diesem Grund wurden die Daten – eindeutig gekennzeichnet durch vorangestellte Parameterkürzel - in einem frei konvertierbaren Textformat in die Datenbank aufgenommen. Grundsätzlich wurden nur unveränderte Primärdaten erfasst. Die Extraktion der Analysenwerte erfolgte als Wertelisten. Aufgrund der Vielzahl der Datensätze – ca. 90.000 – wurde auf „STATISTIKA“ als Auswertesoftware zurückgegriffen.

Die Grundvoraussetzungen für die Aufnahme der Daten in die Datenbank - eine vollständige Profil- bzw. Bohrgutbeschreibung in Anlehnung an die bodenkundlichen Kartieranleitung (zum Zeitpunkt der Datenaufnahme KA4) sowie eine Analytik nach Maßgabe der Berliner Liste (1996) – erfüllten lediglich 162 Bodengutachten. Die ursprünglich erfasste Zahl an Bodengutachten war höher, wurde aber nach einer Zweidurchsicht reduziert, da nicht alle Gutachten beide Grundvoraussetzungen erfüllten.

Bei den letztlich erfassten Gutachten ist kritisch zu bewerten, dass sich die Substratbeschreibungen in der Regel auf Horizontmischproben beziehen. Die Ursache hierfür liegt in der gängigen Praxis, in festen Bohrabständen – meist 0 bis 30cm, 30 bis 100 und 100 bis 200cm über die Horizontgrenzen hinweg zu beproben. Inwieweit die Substratansprache tatsächlich korrekt durch die Gutachter vorgenommen wurde, lässt sich nicht bewerten. Das häufige Auftreten von Bauschutt legt die Vermutung nahe, dass bei der Substratansprache nicht ausreichend differenziert wurde.

Eine Vielzahl der erfassten Analysenwerte lag unter der Nachweisgrenze des jeweiligen analytischen Verfahrens – im Fall von Cadmium waren das z. B. mehr als 50% aller Werte. Dementsprechend wurde nach geeigneten Ansätzen zur Behandlung dieser Werte gesucht. Sie sind Teil der statistischen Verteilung und können somit nicht vernachlässigt werden. Sie =0 bzw. auf die halbe Nachweisgrenze zu setzen würde in der Verteilungsanalyse eine bimodale Verteilungsdichte bewirken und Korrelationsbeziehungen verändern. Kühn et al (1996) hat bei den Korrelationsuntersuchungen für Bodendaten Wertepaare mit einem Wert unter der Nachweisgrenze nicht

berücksichtigt. Dieser Ansatz wurde hier nicht verfolgt, da die Möglichkeit besteht, dass hohen Werten eines Parameters sehr niedrige Werte bzw. Werte $< \text{NWG}$ des zu korrelierenden Parameters gegenüber stehen. Bei der statistischen Auswertung der Bodendaten wurden daher alle Werte $< \text{NWG}$ zwischen der Nachweisgrenze und „0“ per Zufallsgenerator erzeugt und in die Verteilung eingefügt. Dadurch sind manche der dargestellten Verteilungen im niedrigen Zahlenbereich normal und im Bereich $> \text{NWG}$ lognormal verteilt.

Ein weiteres Problem im Rahmen der statistischen Auswertung stellten die variierenden Nachweisgrenzen für die einzelnen Analysenparameter dar. Zwar wurden in die Datenbank nur Gutachtendaten aufgenommen, deren Analytik nach den Vorgaben der Berliner Liste erfolgte. Trotzdem traten –in Abhängigkeit von den Analysengeräten– für gleiche Parameter unterschiedliche Messempfindlichkeiten auf. Die höchste ermittelte Nachweisgrenze anzusetzen ist nicht praktikabel, da eine große Anzahl von echten Messwerten aus Gutachten mit niedrigeren Nachweisgrenzen dann nur noch als zufallsgenerierte Daten auftreten würden. Das Ansetzen der niedrigsten Nachweisgrenze aller Labors hätte zur Folge, dass die Messwerte unter der NWG aus Labors mit höherer Nachweisgrenze quasi verlorengehen. Als Kompromiss wurde aus allen Nachweisgrenzen eines Parameters die mittlere Nachweisgrenze ermittelt und diese angesetzt.

Die Überprüfung der erfassten Daten auf Plausibilität wurde grundsätzlich durch einen zweiten Datenerfasser vorgenommen. Traten in der Datenbank gehäuft unplausible Werte auf – z.B. EC-Werte von $0,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ oder $20.000 \text{mS}/\text{cm}$ – wurde diese in den entsprechenden Gutachten nochmals kontrolliert. War das nicht möglich, wurde das gesamte Gutachten verworfen. Für PAK wurden Plausibilitätstests durch den Vergleich der PAK-Summe mit der Summe der Einzelsubstanzen durchgeführt.

Im Ergebnis der statistischen Untersuchungen liegen für die Grundgesamtheit aller Daten die Verteilungskurven für die Schwermetalle Cadmium, Blei, Kupfer, Zink, Quecksilber, Arsen, für die organischen Schadstoffe 16 PAK/ EPA, Benzo(a)pyren, und Mineralölkohlenwasserstoffe sowie für die Bodeneigenschaften pH-Wert und Leitfähigkeit vor. Substratbezogen konnten bei zu geringem Stichprobenumfang nicht immer alle diese Parameter statistisch ausgewertet werden. Aus den Verteilungsfunktionen können wichtige statistischen Kenngrößen wie der Median oder die Perzentile abgeleitet werden. Auch der Anteil an Werten unterhalb der Nachweisgrenze geht aus den Kurven hervor. In Boxplots sind die genannten Kenngrößen sowie zusätzlich Ausreißer und Extremwerte nochmals verdeutlicht. In den Verteilungskurven ist der Prozentsatz an Proben gekennzeichnet, die die Vorsorgewerte für den jeweiligen Parameter lt. BBodSchG überschreiten.

Die in der **Grundgesamtheit** aller ausgewerteten Daten vorgefundenen Verteilungsfunktionen für die Belastung durch Cadmium, Blei, Kupfer, Zink, Quecksilber und Arsen entsprechen Lognormalverteilungen. Das Gleiche gilt für die Polzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe. Diese Ergebnisse decken sich mit den Untersuchungen von Kühn et al. (1996), der Schadstoffgehalte an drei Datensätzen aus Berlin tiefenbezogen auswertete. Er fand an dem Datensatz, den er für den Innenstadtbereich Berlins als repräsentativ ansah (Tiergarten-Tunnel, Fernbahntrasse), für den Tiefenbereich 0 – 1m nahezu perfekt lognormal verteilte As-, Pb-, Cd-, Cr-, Cu-, Zn- und PAK-Werte. Mineralölkohlenwasserstoffe unterlagen dagegen (unter Ausschluss der Werte $< \text{Nachweisgrenze}$) einer Normalverteilung.

In größeren Tiefenbereichen wurden durch Kühn et al. auch andere Verteilungsfunktionen für die genannten Schadstoffe vorgefunden. Hier fehlt ein Vergleich, da im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit keine tiefenbezogene Auswertung erfolgte.

Die Verteilung von Hg und Arsen in der Grundgesamtheit ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl von Ausreißern in Richtung höhere Messwerte. Cadmium hingegen fällt durch den hohen Anteil an Messwerten unter der Nachweisgrenze auf (51,8%). Die Mediane für die Schwermetall- und PAK-Belastung der Grundgesamtheit aller Daten aus der Datenbank sind den Medianen der Datensätze von Kühn et al. vergleichbar (Tab. 52), vor allem wenn man berücksichtigt, dass in die Grundgesamtheit Analysenwerte über alle Tiefenstufen einbezogen sind.

Tabelle 51: Mediane der Schadstoffbelastung aus Datenbankwerten und nach Kühn et al. (1996)

	As	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	PAK
Datenbank	2,7	< 0,01	48,51	0,19	21,9	64,9	3,52
Kühn et al 0 – 1m	5,2	0,26	97,5	0,36	41;	113	6,1
Kühn et al 1 - 3m	1,7	0,02	11,9	0,09	5,1	17,5	<0,8
Kühn et al > 3m	0,83	<0,01	4,1	0,04	2,1	10,0	<0,8

Für die **substratbezogene Auswertung** der Daten zu Schadstoffbelastung und Bodeneigenschaften stehen nur wenige Vergleichsarbeiten zur Verfügung. Diesen ist gemeinsam, dass sie sich i.d.R. auf einen geringen Stichprobenumfang beziehen. Das Gleiche trifft für die hier in der Arbeit vorgestellten eigenen Laboruntersuchungen an technogenen Substraten zu, die an Trümmerschutt, Schlacken, Aschen sowie Mischsubstraten aus Abfällen der Farben und Metall verarbeitenden Industrie durchgeführt wurden.

Eine Gegenüberstellung der eigenen Labordaten zu denen der Datenbank ist nur für einen Teil der Analysenparameter möglich, da teilweise unterschiedliche Parameter analysiert wurden - so fehlen partiell die Vergleichsmöglichkeiten für die Schwermetalle Cadmium und Quecksilber. Auch wurden in der Datenbank eine größere Anzahl technogener bzw. natürlicher Substrate ausgewertet, für die es keine eigenen Laboruntersuchungen als Pendant gibt, was am Beispiel der Substrate Bauschutt und Sand deutlich wird. Dementsprechend findet der Vergleich von Daten aus der Datenbank und eigenen Untersuchungen anhand der Parameter As, Cd (teilweise), Cu, Pb, Zn sowie PAK für die Substrate Trümmerschutt, Asche und Schlacke statt.

Trümmerschutt ist aufgrund seiner Genese ein außerordentlich variables Bodenausgangssubstrat. Seine Zusammensetzung hängt ab von der Art des ursprünglichen Baumaterials, von der Art der Zerstörung der ursprünglichen Bausubstanz (Druckwelle, Brand), dem Sortierprozessen nach Gebäudezerstörung sowie den Verkipungsmechanismen des Schutts. Die Datenlage für Trümmerschutt ist seitens eigener Untersuchungen (29 Proben) sowie seitens der Datenbank (je nach Parameter 187 bis 246 Proben) ausreichend für grundsätzliche Aussagen. Die eigenen Untersuchungen weisen Trümmerschutt als ein vor allem mit Arsen und PAK hoch belastetes Substrat aus. Die gleichen Parameter aus der Datenbank kennzeichnen dagegen Trümmerschutt als gering belastet. Bezüglich der Parameter Blei, Kupfer und Zink stimmen zumindest die Größenordnungen der Werte überein. Zu Cadmium lagen keine eigenen Analysen vor. Die PAK-Belastung von Trümmerschutt entsteht in der Regel durch Brandeinwirkung – insofern erscheinen die eigenen Untersuchungsergebnisse bezüglich dieses Parameters plausibel. Die niedrigeren PAK-Werte der Datenbank sind evtl. darauf zurückzuführen, dass die analysierten Schutt-Proben überwiegend aus durch Druckwelle zerstörten Gebäuden stammten.

Sehr große Unterschiede zeigen sich zwischen den Schadstoffgehalten aus eigenen Untersuchungen an Aschen im Vergleich zu denen aus der Datenbank: hier gibt es – außer bei Arsen – keinerlei Übereinstimmungen. Allerdings waren beide Datenkollektive sehr klein (5 bzw. 6 Proben). Die Unterschiede können darauf zurückzuführen sein, dass die Aschen der eigenen Laborversuche ihre Genese einem anderen technologischen Prozess verdanken als die der Datenbank. So unterscheiden Hiller und Meuser (1998) zwischen Aschen aus 7 verschiedenen technologischen Prozessen. Von diesen sind die Rostaschen aus der Stein- bzw. Braunkohlenverarbeitung gering bis mittelstark durch Schwermetalle belastet. MV-Roh – bzw. Flugaschen sowie Flugaschen der Kohleindustrie dagegen sind hoch kontaminiert.

Die eigenen Analysenergebnisse zu Schlacken bestätigen die in der Datenbank erfassten Schadstoffgehalte für Schlacken –sie liegen zumindest in vergleichbaren Größenordnungen. Die hohen Blei- und Zinkwerte dieser Schlacken könnten ein Indiz für ihre Herkunft aus einem Stahlwerksprozess sein. Dieser Beurteilung liegen aber wiederum nur wenige Proben zugrunde (5 Proben für Laboruntersuchungen, 9 bis 11 Proben in der Datenbank).

In der Datenbank konnten anhand der Substratbeschreibungen in den Gutachten die 11 Substrate Bauschutt, Bauschuttmischsubstrat, Trümmerschutt, Sand, Sandmischsubstrat, Aschen, Schlacken, humoser Oberboden, Torf, Lehm und Mergel ausgewiesen werden. Die Verteilungskurven für Schwermetalle und PAK der genannten

Substrate folgen nahezu ausnahmslos linksschiefen Lognormalverteilungen, d.h. der überwiegende Anteil aller Analysen hat niedrige Werte ergeben.

Die Boxplots der Schadstoffe im Bauschutt zeigen die höchsten Spannbreiten der Messwerte im Vergleich aller Substrate, eine hohe Zahl von Ausreißern und - außer bei Cadmium – einen hohen Prozentsatz an Proben, die die Vorsorgewerte lt. BBodSchG überschritten. Auch Hiller und Meuser (1998) stellen für Gemenge aus Ziegel, Mörtel und Beton hohe Spannbreiten der Schwermetall- und BaP-Gehalte fest. Sie ordnen diese Gemenge deshalb bezüglich der Parameter Arsen, Blei, Chrom und Benzo(a)pyren den Gefährdungsklassen 1 – 4 zu.

Bei den als „Sand“ angesprochenen Substraten ist anhand der Beschreibung keine Unterscheidung zwischen natürlich anstehenden und anthropogen umgelagerten Sanden möglich. Die Ergebnisse der Datenauswertung weisen die Sande als gering belastetes Bodenausgangsmaterial aus. Die Boxplots der Schwermetall- und PAK-Verteilung in sandigen Substraten zeigen aber ebenso wie die Verteilungen des Bauschutts einen hohen Prozentsatz an Ausreißern.

Im Trümmerschutt liegen die Schwermetalle und PAK wiederum nahezu ausschließlich in Lognormalverteilungen vor. Wie im Bauschutt und Sand sind die Verteilungen zusätzlich durch eine hohe Anzahl von Ausreißern gekennzeichnet, was im Trümmerschutt – ähnlich wie im Bauschutt – durch die große Substratheterogenität bedingt sein dürfte. Charakteristisch für Trümmerschutt sind offensichtlich die hohen Zinkgehalte und die hohe Blei/ Kupferkontamination. Da die Gehalte dieser Elemente aber im Trümmerschutt nicht korrelieren, spricht das für unterschiedliche Quellen für die jeweilige Belastung (siehe auch Kap.3/II; Abschnitt 3.7).

Für den pH-Wert, Blei, Cadmium, Kupfer, Zink, 16 PAK/ EPA sowie BaP wurde getestet, inwieweit sich die einzelnen in den Gutachten benannten Substrate bezüglich dieser Parameter signifikant voneinander unterscheiden. Der pH-Wert folgte in den Substraten einer Normalverteilung, so dass für ihn über den Vergleich der Mittelwerte und Konfidenzintervalle eine Aussage zu signifikanten Substratunterschieden möglich war. Da die anderen angeführten Analysenparameter innerhalb der Gruppen (Substrate) nicht normal verteilt vorlagen und durch unterschiedliche Varianzen der Werte gekennzeichnet waren, wurden für die Signifikanztests verteilungsfreie statistische Verfahren angewandt. Die Substrate Bauschutt, Trümmerschutt und Sand decken bezüglich einzelner Parameter häufig die gesamte Spannbreite der Messwerte ab und weisen dadurch wenige signifikante Unterschiede zu anderen Substraten auf. Das verdeutlichen die multiplen Boxplots der jeweiligen Parameter (Kap. 3.6). Die Ergebnisse der Signifikanztests zeigen z. T. logische und nicht neue Ergebnisse, so - am Beispiel des pH-Wertes – signifikante Unterschiede zwischen Mergel und allen anderen Substraten außer Bauschutt. Signifikant waren gemäß dieser Auswertung auch die Unterschiede zwischen dem pH-Wert des Trümmerschutts und des Bauschutts, was zwar bezogen auf deren Ausgangsmaterial nicht plausibel erscheint, aber durch die Vielzahl der Analysenwerte belegt ist.

Im Abschnitt **„Beziehungen zwischen Analysenparametern“** wird zum einen untersucht, ob die in der Datenbank erfassten Substrate durch typische PAK-Muster gekennzeichnet sind und ob anhand von PAK-Quotienten eine PAK-Quellenanalyse möglich ist. Aussagekräftig sind die mittleren PAK-Muster insbesondere für die Substrate mit einer hohen Anzahl von Stichproben, also für Bauschutt, Trümmerschutt, Sand und Humosen Oberboden. Es zeichnen sich ähnliche PAK-Muster auf der Basis gemittelter PAK-Anteile - unabhängig von der Höhe der Kontamination - z.B. zwischen Trümmer- und Bauschutt ab, was für gleiche Kontaminationsquellen spricht. Anhand des von Dickhut zur Quellenidentifizierung vorgeschlagenen Quotienten BbF/ BkF kann allerdings keines der beiden Substrate einer der vier Quellen nach Dickhut – Waldbrand, Verkehr, Kohle/Koks, Industrie zugeordnet werden. Bauschuttmischsubstrate und Mergel sind zwar in ihren PAK-Mustern ähnlich, unterscheiden sich aber stark in der Kontaminationshöhe.

Die 2- und 3-Ring-PAK sind die PAK-Einzelverbindungen mit der höchsten Mobilität. Unter diesem Aspekt wären die in der Datenbank als Bauschutt eingestuft Substrate aufgrund ihres PAK-Musters und ihrer Kontaminationshöhe potenziell umweltgefährdend. Die Substrate Schlacke und Sand mit ebenfalls hohen mittleren Anteilen von 2- und 3-Ring-PAK sind entweder in urbanen Böden gering vertreten (Schlacken) oder niedrig kontaminiert (Sand).

Durch Korrelationsanalyse wurde untersucht, inwieweit innerhalb der Substrate einzelne Schwermetalle typische Paragenesen bilden. Das wäre besonders dann zu erwarten, wenn die Schwermetalle geogenetisch miteinander verbunden sind oder über den gleichen technologischen Prozess in den Boden eingebracht wurden. Die Verteilungsfunktionen der Schwermetalle in den einzelnen Substraten erforderte den Einsatz nichtparametrischer, also verteilungsfreier Korrelationsverfahren, die auf der Basis von Rangplatzsummen Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern berechnen.

Die einzelnen Substrate sind durch unterschiedliche Korrelationen gekennzeichnet: so besteht die engste Korrelation im Bauschutt zwischen Chrom und Nickel, im Bauschuttmischsubstrat zwischen Chrom und Arsen und im humosen Oberboden zwischen Blei und Zink. Die gefundenen Korrelationen sind nicht eng – die höchste Korrelation wurde in Sandmischsubstraten mit 0,89 zwischen Kupfer und Zink berechnet. Einträge in den humosen Oberboden stammen aus vielfältigen Quellen und werden über unterschiedliche Pfade (atmosphärische trockene und nasse Deposition, Verkipfung) eingebracht. Dementsprechend sind die Beziehungen zwischen den einzelnen Schwermetallen weit: die engste Korrelation in diesem Substrat besteht mit 0,53 zwischen Blei und Zink.

4.2 Fazit und Ausblick

Die Daten aus Bodengutachten der Berliner Bezirksämter sind für generelle Aussagen zur Belastungssituation in urbanen Böden des Stadtgebietes gut geeignet.

Zusammenhänge zwischen bodenkundlichen Parametern und Belastungssituationen lassen sich nur anhand der pH- und Leitfähigkeitswerte herleiten, da lediglich diese beiden Parameter in großem Umfang nach einheitlichen Verfahren gemessen wurden. Andere bodenkundliche Parameter wie z.B. Carbonat- und Humusgehalte lagen überwiegend als im Feld geschätzte Werte vor und – am Beispiel des Humusgehaltes – für weniger als 10% aller Proben.

Die Ableitung substratbedingter Eigenschaften ist auf der Basis von Gutachtendaten nur bedingt möglich, da selten eine Substrat- bzw. Horizontbezogene Beprobung erfolgte. Insofern erscheinen die Ergebnisse zu Schadstoffbelastung und Bodeneigenschaften im Rahmen eigener, am Institut für Ökologie durchgeführter Laboruntersuchungen aussagekräftiger, obwohl die zugrunde liegenden Probenkollektive teilweise sehr klein waren.

Das Fehlen ortsbezogener Daten lässt die Erstellung von detaillierten Belastungskarten und somit großräumige Gefährdungsabschätzungen nicht zu, da keine Zuordnung zu den einzelnen Themenkarten des Umweltatlas von Berlin möglich ist.

Um die Interpretierbarkeit der bodenkundlichen Untersuchungen der Bezirksämter zu verbessern, wäre folgende Herangehensweise sinnvoll:

- horizontbezogene Probenahme; um eine eindeutige Substratansprache zu ermöglichen
- Kartierung nach KA 5 (enthält Kriterien für die Stadtbodenkartierung)
- Ausgabe ortsbezogener Daten, um Belastungskarten erstellen zu können
- Abschätzung der Lagerungsdichte in den Profilen
- detaillierte Beschreibung des Bodenskeletts (Anteile und Zusammensetzung)
- Einheitlichkeit/ Vergleichbarkeit der Methoden zur Abschätzung/ Analytik aller interessierenden Parameter (z.B. des Humusgehaltes der Bodenproben, um Austauschkapazitäten abschätzen zu können).

Die in dieser Arbeit dargestellten Verteilungsfunktionen und Spannweiten der Bodeneigenschaften und Schadstoffgehalte urbaner Böden in Berlin sind als Basis für die Parametrisierung von Modellen nutzbar. Sie spiegeln aber überwiegend stoffliche Aspekte dieser Böden wieder. Diese Informationen gewinnen an Gewicht, wenn gleichzeitig mit den Gutachten bodenphysikalische Eigenschaften erhoben und sie mit diesen verknüpft und ausgewertet werden können. Auf dieser Basis wären großräumige Massenbilanzen und Stoffausträge berechenbar.

5 Literatur

- AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage. Hannover
- Amt für Kartographie und Kartendruck: Gebäudeschäden im Gebiet der Stadt Berlin, Stand 1945. Topographische Karten 1: 25000.
- Arbeitskreis Stadtböden der DBG (1989): Empfehlungen für die Kartierung von Stadtböden
- Arndt, M. (1947): „Wiederaufbau in der Bauwirtschaft“. Frankfurt/ Main
- Autorenkollektiv (2005): Handbuch der forstlichen Analytik. Grundwerk. Herausgeber: Gutachterausschuss forstliche Analytik, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
- Benninghaus, H. (1996): Einführung in die sozialwissenschaftliche Datenanalyse, 4. Auflage mit Diskette, München: R. Oldenbourg Verlag.
- Beyer, L., Kahle, P., Kretschmer, H., Wu, Q. (2001): Soil organic matter composition of man-impacted urban sites in North Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 164, 359-364.
- Blaum-Jordan, J. (1947): Trümmerbeseitigung, Trümmerverwertung“. Frankfurt/ Main
- Blum, U. (1997): Wirkungsbezogene Kupferspeziesanalytik unter dynamischen Gesichtspunkten im System Wasser/Boden. Dissertation, TU Clausthal
- Blume, H. P. (1985): Schwermetallbelastung Berliner Böden. Schriftenreihe Umwelt und Naturschutz für Berliner Gewässer, H. 2, 47-54, Hrsg. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Berlin
- Blume, H.-P. & Hellriegel, Th. (1981): Blei- und Cadmium-Status Berliner Böden. Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde 144, 181-191
- Blume, H.-P. (1987): Bodenkartierung von städtischen Verdichtungsräumen. Die Heimat 94, Jg. Heft 9, S. 280-288
- Blume, H.-P., Schleuss, U. (1997): Bewertung anthropogener Stadtböden. Schriftenreihe Inst. f. Pflanzenernährung u. Bodenkunde Universität Kiel, Nr. 38
- Bortz, J. (1993): Statistik – Für Sozialwissenschaftler, 4., vollständig überarbeitete Auflage, Berlin: Springer-Verlag.
- Brose, F. & Brühl, H. (1993): Untersuchungen zur geogenen und anthropogenen Grundlast umweltrelevanter Schadstoffe in oberflächennahen Lockergesteinen und Grundwässern im westlichen Stadtgebiet von Berlin. Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 144, 279-294, Hannover
- Brümmer, G. W., Gerth, J., Herms, U. (1986): Heavy metal species, mobility and availability in soils. Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde. 149, 382-398.
- Bundesverband Boden (ED.) 2000:Böden und Schadstoffe. BVB-Materialien, 4. Berlin.
- Burghardt, W. (1998): The information from soil science for the use of urban, industrial and mining sites. Symposium 28; urban and sub-urban-soils. proc. world congress soil science. Montpellier. France

- Burghardt, W. 1997: Skelettgehalte von Böden aus technogenen Substraten. Mitt. Dt. Bodenk. Ges., 85, III, 1115-1118.
- Burghardt, W. 1997A: Kennzeichnung von Böden durch Grobbodengehalte hinsichtlich potentieller Schadstoffgehalte aus Immissionen. Mitt. Dt. Bodenk. Ges., 84, 127-130.
- Burghardt, W. 2001: Funktionserfüllung und Leitbilder im Bodenschutz der Stadt. Mitt. Dt. Bodenk. Ges., 95, 154-157.
- Burghardt, W., Ohlemann, S. (1993): Bodenphysikalische Merkmale der urban-industriell überformten Böden in Oberhausen-Brücktorviertel. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 73, S.855-858
- Clauß, G.; Finze, F.-R.; Partzsch, L. (1995): Statistik – Für Soziologen, Pädagogen, Psychologen, und Mediziner, Band 1: Grundlagen, 2, überarbeitete und erweiterte Auflage, Frankfurt a. M.; Verlag Harry Deutsch.
- De Kimpe, C.R., Marel, J.L. (2000): Urban soil management- a growing concern. Soil Science 2000; Vol. 165/No. 1. S. 31-40)
- Dickhut, R.M., Canual, E.A., Gustafson, K.E., Liu, K., Arzayus, K.M., Walker, S.E., Edgecomb, G., Gaylor, M.O., MacDonald, E.H. (2000): Automotive sources of carcinogenic of Polycyclic aromatic hydrocarbins associated with particulate matter in the Chesapeake Bay Region. Enviro. Sci. Technol., 34, S. 4635-4640
- Dijkstra, J. J., Meussen, J. C. L., Comans, R. N. J. (2004): Leaching of heavy metals from contaminated soils: An experimental and modelling study. Envir. Sci. Technol. 38; S. 4390-4395
- Donda, A.; Herrde, E; Kuhn, O.; Struck, R. [Hrsg:] (1969): Allgemeine Statistik – Lehrbuch, 4. Auflage, berichtigter Nachdruck der 3. Auflage, Berlin: Verlag die Wirtschaft.
- Dorn, J. (1999) Untersuchungen zu Einzel- und Kombinationswirkungen von ausgewählten anorganischen und organischen Schadstoffen beim Anbau verschiedener Pflanzenarten auf Rieselfeldboden. Dissertation Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin 1999
- Dües, G. (1987): Untersuchungen zu den Bindungsformen und ökologisch wirksamen Fraktionen ausgewählter toxischer Schwermetalle in ihrer Tiefenverteilung in Hamburger Böden. .Dissertation Universität Hamburg, 266 S. 305-308
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) 1990: Methodensammlung zur Auswertung und Darstellung von Grundwasserbeschaffenhkeitsdaten. DVWK-Schriften, 89, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G., (2007): Statistik: der Weg zur Datenanalyse. Springer-Verlag Berlin Bonn Heidelberg
- Fetzer, K. D.; Grenzius, R., König, K., Larres, M., Lobenhofer, A., Portz and P.Schliker (1993): Beispielhafter Aufbau eines Bodeninformationssystems für das Saarland (SAAR-BIS): Geologisches Landesamt Saarland, i. A. des Umweltbundesamtes Saarbrücken
- Fetzer, K.D., E. Enright, R.Grenzius, J. Kubionik, C. Schwartz and J.-L. Morel (1998): Garden soils in southwestern Germany (Saarland) and northeastern France (Lorraine). Symposium 28. urban and suburban soils. Proc. world congress soil. Montpellier France
- Gauthier, T. D., Shame E. C., Guerin W. F., Seitz W. R. and Grant C. L. (1986): "Fluorescence quenching method for determining equilibrium constants for polycyclic aromatic hydrocarbons binding to dissolved humic materials." Environ. Sci. Technol. 20, 1162-1166.

- Gerth, J.; Brümmer, G.W. & Tiller, K.G. (1993): Retention of Ni, Zn and Cd by Si-associated Goethite. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 156, S. 123-129
- Gras, B., Jaeger, C., Sievers, S. (1996): Gehalte an PAK in Hamburger Oberböden. Hamburger Umweltberichte 52/96
- Grenzius, R.(1987): Die Böden Berlins (West), Klassifizierung, Vergesellschaftung, ökologische Eigenschaften. Dissertation, Technische Universität Berlin 1-522
- Helmes, T. (2004): Urbane Böden : Genese, Eigenschaften und räumliche Verteilungsmuster ; eine Untersuchung im Stadtgebiet Saarbrücken. Dissertation Universität SaarbrückenURN (NBN): urn:nbn:de:bsz:291-scidok-3358
- Helsel, D., R. (1990): Treatment of data below the detection limit. Environmental Science and Technology, 24, (No. 12) 1766-1774
- Herms, U. (1982): Untersuchungen zur Schwermetalllöslichkeit in kontaminierten Böden und kompostierten Siedlungsabfällen in Abhängigkeit von Bodenreaktion, Redoxbedingungen und Stoffbestand. Dissertation Universität Kiel.
- Herms, U. (1989): Löslichkeit von Schwermetallen in Böden unter variierenden Milieubedingungen. In: Behrens, D. und Wiesner, J. (Hrsg): Dechema. Beurteilung von SM-Kontaminationen im Boden. Frankfurt/Main, S. 189-199.
- Herms, U. und G. Brümmer (1984): Einflussgrößen der Schwermetalllöslichkeit und -bindung in Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. 147, 400-424.
- Hillebrand, T., Toussaint, D., Böhm, E., Fuchs, S., Scherer, U., Rudophi, A., Hoffmann, M. (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden. Umweltbundesamt, Texte 19/05
- Hiller, D. A. (1996): Ökologische Eigenschaften urban-industriell überformter Böden des Brücktorviertels in Oberhausen (Ruhrgebiet). Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 159 , 241- 249 (1996)
- Hiller, D.A., Meuser, H. (1998): Urbane Böden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- Hiller, D.A.. (1995): Allgemeine Merkmale sowie Blei - und Zinkmobilität in urban-industriell überformten Böden des Brücktorviertels in Oberhausen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 158, 269-277
- Hindel, R., Fleige, H. (1991): Schwermetalle in Böden der BRD - geogene und anthropogene Anteile. UBA Forschungsbericht 91-020, Texte 13/ 91, Umweltbundesamt Berlin
- Hintermaier-Erhard und Zech (1997): Wörterbuch der Bodenkunde, Enke Verlag, Stuttgart.
- Hornburg, V. (1991): Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Cadmium, Zink, Mangan, Blei und Kupfer in Böden.
- Hornburg; V., Brümmer, G.W. (1989): Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen in Böden. Mitteilung Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 59(II), S. 727-731
- Ifland, K., D.A. Hiller, R.H. Tebayy (1993): Produktionsstättenbedingte Verteilungsmuster von PAK in Böden ehemaliger Kokerei- und Gaswerksstandorte des Ruhrgebietes. Mitteilungen. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 72/ II, S. 943-946
- Institut für Ökologie/ FG Bodenkunde (1996): Ergebnisse der bodenkundlichen Kartierung auf dem Bootsgelände in Schildhorn. Kartierbericht

- Kalbe, U., Smettan, U. (1995): Beziehungen zwischen Schwermetallgehalten und -verfügbarkeiten in Berliner Trümmerschuttböden, Mitteilungen. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 76/I
- Keiderling, G. (1999): Zur Entrümmerung Berlins. Edition Luisenstadt 1999
- Kendall, M.G., Stuart, A. (1969): The Advanced Theory of Statistics. Vol. 1, Griffin, London
- Kretschmer, H., P. Kahle, L. Belau, E. Coburger (1993): Kennzeichnung von Teerdeposolen im Stadtgebiet von Rostock Mitt. Dtsch. Bodenk. Gesellsch. 72, 981 – 984.
- Kühn, S., UHLIG, A & PILZ, P. (1996): Statistische Auswertung von Bodensstoffdaten aus Berlin. Bericht im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz. September 1996
- Kuntze, H.; Grupe, M.; Filipinski, M. & Pluquet, E. (1991): Geogene und anthropogene Schwermetalle in Böden - Lösbarkeit und Pflanzenaufnahme. UBA-Texte 22/91
- LABO (1998): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden (Entwurf der 2. überarbeiteten und ergänzten Auflage).
- Lefort, C., Schwartz, C, Florentine, L., Le Roux, Y., Gury, M., Morel, J.-L. (2007): Quantification of the heterogeneity of highly anthropized soils and consequences in classification. In "The first International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas (SUITMA). S.27
- Lehmann, A., Stahr, K. (2007): Nature and Significance of Anthropogenic Urban Soils. Journal of Soils and Sediments 7 (4) 247 – 260.
- Lindsay, W. L. (1979): Chemical equilibria in soils. 449 S.; New York.
- Makowsky, L., Meuser, H. (2007): Quantitative Abschätzung des Kohlenstoffgehaltes von technogen geprägten Böden der Altablagerungen. Zeitschrift Altlastenspektrum, 02/2007, S. 53-60. Herausgeber: Ingenieurtechnischen Verband Altlasten e. V. (ITVA)
- Mekiffer, B, Renger, M., Wessolek, G. (2000): Contamination of urban soils - first results from a databank. SUITMA 2000. S. 593-598
- Mekiffer, B., Smettan, U. (1995): Komponentenabhängigkeit der PAK-Kontamination in Trümmerschuttböden. Mitteilungen der DBG, Bd. 76, S.369-372,
- Meuser, 2002: Anthropogene Gesteine. Handbuch Bodenk., 14. Erg. Lfg., 12/2002. Kap. 2.1.2.6.
- Meuser, H. (1993): Technogene Substrate in Stadtböden des Ruhrgebietes. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 156, S. 137-142
- Meuser; H., Tapernon, S., Makowsky, L. (2005): Substratspezifisches Austragsrisiko bei Schwermetallen aus anthropogenen Auftragsböden". Abschlussbericht. Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur, Fachgebiet Bodenschutz und Bodensanierung; Fachhochschule Osnabrück
- Pearson, E.S., Hartley, H.O. (1966/ 1972): Biometrika Tables for Statisticians. Vol 1, 2. Cambridge Univ. Press, Cambridge 1: 1966, 2:1972
- Raber, B., Kögel-Knabner, I. (1995): Desorption von PAK aus Böden unter dem Einfluss von gelöster organischer Bodensubstanz
- Renger, M. & G. Wessolek (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. In: Folgen anthropogener Einflüsse auf den Wasserhaushalt und die Wasserbewirtschaftung. Mitt. Inst. für Wasserwesen 38b, 295-305.

- Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Rieck, W., Schäfer, W., Wessolek, G und Zacharias, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Berlin.
- Renger, M., Mekiffer, B. (1998): Belastungen und Gefährdungspotentiale urbaner Böden. Bodenökologie & Bodengenese, Heft 23; 3-22
- Renger, M; Mekiffer, B. (1997): Bewertung von Trümmerschuttböden hinsichtlich ihrer Belastung mit PAK. In: Blume, H.P., U. Schleuß (HRSg.) (1997): Bewertung anthropogener Stadtböden. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel, Nr. 38
- Röhr M., Lohse H., Ludwig, R. (2007). Statistische Verfahren. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/ Main. ISBN 978-3-87144-596-5
- Rosenkranz, D, Bachmann, G., Einsele, G., Harreß, H.M. (1988): Bodenschutz. ergänzbares Handbuch. Erich Schmidt Verlag
- Rossiter, D.G. (2007): Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. J. Soils Sediments, DOI <http://dx.doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Sachs, L. (1992): Angewandte Statistik (Anwendung statistischer Methoden), 7, völlig neu bearbeitete Auflage, Berlin: Springer-Verlag.
- Sauerwein, M. (2004)): Urbane Bodenlandschaften: Eigenschaften, Funktionen und Stoffhaushalt der siedlungsbeeinflussten Pedosphäre im Geoökosystem. <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/habil-online/05/08H116/t4.pdf>
- Schlenther, L., Eggert, T., Hoffmann, C., Renger, M. (1992): Bodenökologische Untersuchungen auf dem Rieselfeld Berlin-Buch. Forschungsgutachten im Auftrag der Berliner Forsten, Berlin, 215 S.
- Schlenther, L., Marschner, B., Hoffmann, C., Renger; M. (1996): Ursachen mangelnder Anwuchserfolge bei der Aufforstung der Rieselfelder in Berlin-Buch. Bericht im Rahmen des ÖSP
- Schönwiese, C.-D. (1985): Praktische Statistik. Gebrüder Borntraeger Berlin Stuttgart
- Schulze, P. (1990): Beschreibende Statistik, München: R. Oldenbourg Verlag
- Senatsverwaltung f. Stadtentwicklung, Gesundheit & Umweltschutz (1992): Umweltatlas Berlin
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und für Gesundheit und Umweltschutz (1996): Berliner Liste. Amtsblatt A1262A
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz (1994): Flächennutzungsplan 1994.
- Show, R.K., Azzolina, N., Skorobogatov, J., Hammer, D., Reinhardt, L.P. (2007): Some properties of soils in the urban core of NYC. In "The first International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas (SUITMA). S.48
- Smettan, U., Ehrig, C. (1995): Transfer von Schwermetallen und PAK aus urbanen Schuttböden in anstehende Sedimente? Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 76/ I, S. 453-456
- Smettan, U., Mekiffer, B. (1996): Kontamination von Trümmerschuttböden mit PAK. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 159, 169-175
- Smettan, U.; Ehrig, Ch., Gerstenberg, G. (1993): Belastungen von Böden mit As, Pb und PAK in zwei Berliner Bezirken. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 72, S. 1259-1262

- Sommer-von-Jarmersted, C., Knappe, A., Fritz, B., Pekdeger, A. (Editors), (2001): Einfluss der Oberflächenwassergüte auf die Trinkwasserversorgung. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A, Band 214. Selbstverlag Fachbereich Geowissenschaften, FU Berlin, Berlin, 45-57.
- Spearman, C. (1908): The Method of Right and Wrong Cases (Constant Stimuli) Without Gauss' Formulae. Brit. Journ. Psychol. 2, 227-242
- Spiegel, M. R. (1976): Statistik. Mc Graw-Hill Book Company, Hamburg, New York
- Stasch, D., Stahr, K. (2002): Steine und Skelettgehalte als Merkmal von Stadtböden. Mitt. Dt. Bodenk. Ges., 99, 21-22.
- Strohbach, B., Krauss, H.H., Bolduan, L., Branse, C., Heisterberg, B. (1992): Bericht über die Schwermetallbelastung und Nährstoffversorgung der Böden im Rahmen des ÖSP Rieselfelder Berlin-Buch.. Im Auftrag der Berliner Forsten. 35 S.
- Styperek, P. (1986): Die Cd-Aufnahme von Pflanzen aus verschiedenen Böden und Bindungsformen und ihre Prognose durch chemische Extraktionsverfahren. UBA-Texte 9/86, Umweltbundesamt, Berlin.
- Taubner, H., HORN, R. (1995): Kennwerte des Wasserhaushalts in urbanen Böden. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 76/ I, S. 173-176
- Tebaay, R. H. (1994): Untersuchungen zu Gehalten, zur mikrobiellen Toxizität und zur Adsorption und Löslichkeit von PAKs und PCBs in verschiedenen Böden Nordrhein-Westfalens. Dissertation, Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 14,
- Umweltatlas Berlin (2006): Karte der pH-Wert-Verteilung
- Vigerlist, E., Selme-Olsen, A.R. (1986): Basis for metal limits relevant to sludge utilisation. In: Davies, R. D., Haeni, H. & L'Hermite, P. (Eds.): Factors influencing sludge Utilization Practices in Europe. Elsevier App. Sci. Pub. Ltd.: Barking 26-42
- Welp, G., Hamer, G.W. Brümmer & r. Lichtfuß (1995): Mobilität und Bindungsformen von Cd, Cr, As und V in urbanen Böden unterschiedlicher Belastung. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 76/ I, S. 487-490
- Wessolek, G. (1989): Einsatz von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen in der Ökosystemanalyse. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung. Schriftenreihe des FB Landschaftsentwicklung der TU Berlin. Nr. 61
- Wilcke, W., Krauss, M., Safronov, G., Fokin, a.D., Kaupenjohann, M. (2005): Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in soils of the Moscow region – concentrations, temporal trends, small-scale distribution, -J. Environ. Qual., 34, 1581-1590
- Yunker, M.B. et al. (1996): Polycyclic aromatic hydrocarbon composition and potential sources for sediment samples from Beaufort and Barent sea. Environ. Sci. Technol. 30, S. 1310-1320
- Zeien, H., Brümmer, G.W. (1989): Chemische Extraktionen zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 59, S. 505-510
- Zeien, H., Brümmer, G.W. (1991): Ermittlung der Mobilität und Bindungsformen von Schwermetallen in Böden mittels sequentieller Extraktionen. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 66, S. 439-442
- Zurmühl, T. (1995): Eignung von Batch Ad- und Desorptionsversuchen zur Vorhersage des stationären Transports von organischen Substanzen im Boden. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, Bd. 76, S. 499-502

Danksagung

Mein Dank gilt

zu allererst Prof. Dr. Gerd Wessolek: durch ihn bekam ich die Möglichkeit, wieder im Fachgebiet arbeiten zu können, er führte mit mir die maßgeblichen fachlichen Diskussionen und gab wertvolle Anregungen. Er motivierte mich zur Fertigstellung der Dissertation.

Prof. Dr. Manfred Renger: er war für mich seit Beginn meiner Tätigkeit am Institut für Ökologie als Wissenschaftler und als Mensch ein Vorbild. Er hat meine Arbeit wohlwollend gefördert und sie strategisch unterstützt.

Prof. Dr. Wolfgang Burghardt für sein umfassendes Wirken im Arbeitskreis Stadtböden der DBG – dadurch eröffneten sich mir Anknüpfungspunkte und ein Diskussionsforum für meine Arbeiten – sowie für seine Bereitschaft, als Gutachter zu fungieren

Prof. Martin Kaupenjohann für die seltenen, aber äußerst konstruktiven Gespräche

den ehemaligen Studentinnen und Studenten Petra Mersmann und Ingo Schäfer, Monique Lucka, Sebastian Zanoth und Janine Lahr für ihre interessierte, engagierte Bearbeitung verschiedenster Aufgaben und insgesamt einem nennenswerten Beitrag zu dieser Arbeit.

Frau Dr. Höring, Frau Hörmann, Herrn Dr. Päch, Herrn Teschner-Steinhardt und Herrn Sydow - Bodensachverständige der beteiligten Berliner Bezirksämter- für ihre Unterstützung bei der Bereitstellung der Daten.

Frau Dr. Uschi Smettan (BA Wilmersdorf) ihr verdanke ich meine ersten Kontakte zu urbanen Böden und eine langjährige gute Zusammenarbeit auf diesem Gebiet sowie viele freundschaftliche Aktivitäten außerhalb der Arbeit.

Herrn Dr. R. Grenzius (BA Wedding):– er gab die Anregung zur Bearbeitung dieses Themas und unterstützte mich bei der Durchführung der praktischen Arbeiten außerordentlich.

Dr. Heiner Stoffregen, Dr. Silvia Pieper, Dr. Peter Dominik, Dr. Birgit Kocher, Dr. Reimo Kindler und Lutz Schlenther für anregende Fachdiskussionen.

Claudia Kunz und Eva Maria Schreiner: sie haben großen Anteil an der Datenaufnahme und - gemeinsam mit Frau Dr. Ute Kalbe, Uta Ben Slimane, Helga Diessner, Christine Ehrlicher, Sabine Rautenberg und Sabine Dumke - an der Versuchsdurchführung und Analytik.

„meiner“ Bürogemeinschaft mit Dr. Katrin Ilg und –nochmals - Claudia Kuntz – sie waren meine Gefährtinnen über lange Zeit, mit denen mich viele fachliche, aber auch erinnernswerte private Aktivitäten verbinden. Die Zeit mit ihnen war geprägt von Offenheit, Hilfsbereitschaft und Freundschaft.

allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des FG Standortkunde/ Bodenschutz und des FG Bodenkunde für die konstruktive, aufgeschlossene und gute Atmosphäre, die Leistungs- und Hilfsbereitschaft bei allen Fragen und Problemen, mit denen ich an sie herangetreten bin.

meinen Kindern Falk, Susanne, Ellen und Eva: durch sie hat meine Arbeit die richtigen Relationen zum gesamten Dasein bekommen - ihnen sind meine Bemühungen gewidmet.

Lebenslauf

1958	geboren am 19. August in Ilmenau (Deutschland)
1977	Abitur am Geschwister-Scholl-Gymnasium, Freiberg/ Sachsen (Deutschland)
1977-1982	Studium der Geologie an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald und der TU Bergakademie Freiberg, Spezialisierung für Exploration und Braunkohlengeologie
1982	Diplom an der Bergakademie Freiberg, Thema „Tagebaukartierung durch Einsatz von Photogrammetrie“
1982-1984	wissenschaftliche Mitarbeiterin VEB Geophysik Leipzig, Abteilung Potenzialmethoden
1984-1991	wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für chemische Technologie der Akademie der Wissenschaften der DDR/ Berlin (Deutschland)
1992-1993	Projektleiterin einer BMBF-geförderten Arbeitsgruppe bei K.A.I. e.V., Thema „Schadstoffgehalte und -bindung in Rieselfeldböden“
1994-2000	wissenschaftliche Mitarbeiterin, Projektleiterin im FG Bodenkunde und im FG Standortkunde & Bodenschutz des Institutes für Ökologie an der TU Berlin; Themen „Belastung urbaner Böden durch organische Schadstoffe“ und Aufbau einer Datenbank zu urbanen Böden Berlins
2001-2005	Mitarbeiterin MediaScan GmbH Berlin/ OMTAG AG Berlin; Forschungskooperation mit der TU Berlin/ Institut für Ökologie zum Thema Ökosystemmonitoring
2006	Mitarbeiterin INTUS e.V.; Forschungskooperation mit der TU Berlin zum Thema „Bewertung von Aufschüttungen mit geophysikalischen Verfahren“, geophysikalische Messkampagne in Hamadab/ Sudan
2007	wissenschaftliche Mitarbeiterin FG Standortkunde & Bodenschutz des Institutes für Ökologie; Industrieforschung zum Thema „Strategien zur Optimierung von Kabeltrassen“
seit 2008	wissenschaftliche Mitarbeiterin FG Standortkunde & Bodenschutz des Institutes für Ökologie; Forschungskooperation mit Vattenfall Europe Distribution GmbH Berlin zum Thema „Bewertungsinstrument für die Übertragungsfähigkeit von Kabeltrassen“

6 Anhang

Anhang Tabelle 1: Abkürzungen und Symbole

Symbol	Bedeutung
$Z; X; J$	Zufallsvariablen
μ	Lageparameter
σ^2	Streuungsparameter
F	Verteilungsfunktion
f	Dichtefunktion
r_R	Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman
Df	Freiheitsgrad
H_0	Nullhypothese
p-Wert	Probability/ Wahrscheinlichkeitswert
τ	Rangkorrelationskoeffizient nach Kendall
16 PAK/ EPA	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe nach Environmental Protection Agency
PCDA	Parent Compound Distribution Analysis
KAK	Kationenaustauschkapazität
C	Kohlenstoff
N	Stickstoff
Pb	Blei
Cu	Kupfer
Cd	Cadmium
Zn	Zink
Eta	Evapotranspiration

S-Wert	Summe der Gehaltswerte austauschbar gebundener, basischer Kationen, besonders K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , bezogen auf 1 kg Trockenmasse des Bodens
GW	Grundwasser
GOK	Geländeoberkante
kg	Kilogramm
ha	Hektar
a	Jahr
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BghiP	Benzo(ghi)perylene
BaA	Benzo(a)anthracen
Chr	Chrysen
BbF	Benzo(b)fluoranthene
BkF	Benzo(k)fluoranthene
BeP	Benzo(e)pyrene
BaP	Benzo(a)pyrene
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
TS	a) Trockensubstanz b) Abkürzung für Trümmerschutt in einigen Grafiken
BS	Abkürzung für Bauschutt in einigen Grafiken
NWG	Nachweisgrenze
KA4/ KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung 4 bzw. 5
$\mu S/cm$	Maßeinheit für die Leitfähigkeit (Mikrosiemens pro Zentimeter)
EC	Electrical Conductivity
Lf	Leitfähigkeit

Anhang Tabelle 2: Profilbeschreibung für Berliner Trümmerschuttböden der Innenstadt

Tiefe [cm]	Horizontmerkmale	Komponenten
P1		
0 – 30	yAh, 10YR 3/1, carbonathaltig	humoser mS, 35% Skelett, HK: 40% Ziegel, 40% Schiefer, NK: Putz, Schlacke
30 – 40	yC ₁ , 10YR 2/1, carbonatarm	humoser mS, 30% Skelett, HK: 40% Ziegel, 40% Schlacke, NK: Holzkohle, Putz, Glas, Schiefer
40 – 73	yC ₂ , 10YR 3/1, carbonathaltig	humoser mS, 20% Skelett, HK: 80% Schlacke, NK: Ziegel, Schiefer, Metall
73 – 85	yC ₃ , 10YR 5/2, carbonatreich	mS, 40% Skelett, HK: 60% Ziegel, 20% Putz, NK: Glas, Schlacke, Porzellan
85 – 100	yC ₄ , 10YR 6/2, sehr carbonatreich	gsmS, 50% Skelett, HK: 50% Ziegel, 30% Putz, NK: Schlacke, Schiefer, Kohle
P2		
0 – 10	yAh, 10YR 3/1, carbonathaltig	humoser mS, 35% Skelett HK: 50% Schlacke, 30% Putz, 10% Schiefer, NK: Ziegel, Teer, Geschiebe
10 – 15	yC ₁ , 2YR 3/0, 10 YR 4/6, carbonatfrei	MS (Asche), 70% Skelett, HK: 90% Schlacke, NK: Holz, Putz, Geschiebe
15 – 25	yC ₂ , 10 YR 3/2, carbonatreich	humoser mS, 30% Skelett, HK:85% Ziegel, 10% Schlacke, NK: Putz
25 – 48	yC ₃ , 10 YR 2/1, carbonatfrei	mS, 50% Skelett, HK: 80% Schlacke, NK: Geschiebe, Ziegel
48 – 62	yC ₄ , 10 YR 3/3, carbonatfrei	mS, 90% Skelett, HK: 40% Schlacke, 40% Kohle, 10% Asche, NK: Schiefer, Putz
62 - 100	yC ₅ , 10 YR 6/3, carbonatfrei	mS, 35% Skelett, HK: 40% Ziegel, 40% Schiefer, NK: Geschiebe, Schlacke
P3		
0 – 18	yA _h , 10 YR 3/2, carbonathaltig	humoser mS, 25% Skelett, HK: 40% Schlacke, 20% Kohle, 40% Geschiebe, NK: Putz, Ziegel, Glas
18 – 51	jC ₁ , 10 YR 5/4, carbonatfrei	msfS, skelettfrei
51 - 100	yC ₂ , 10 YR 5/2, carbonathaltig	mS, 35% Skelett, HK: 40% Schlacke, 40% Putz, NK: Putz, Ziegel, Glas
P4		
0- 10	A _h , 10YR 3/1, carbonathaltig	humoser mS, 20% Skelett, HK: 100% Schiefer
10- 25	yC ₁ , 10YR 3/1, carbonathaltig	Kohle-Asche-Schicht, 15% Skelett, HK: 75% Ziegel
25- 40	jC ₂ , 10YR 5/ 3	Mergel, 5% Skelett, HK: 95% Ziegel
40- 90	yC ₃ , 7,5 YR 5/2,	mS, 60% Skelett, HK: Ziegel, Putz (stark verwittert)
90-103	yC ₄ , 10YR 4/ 3	mS, 25% Skelett, HK: Ziegelbruch, Putz, Mörtel
103-109	fO _i , 10YR 2/1,	humoser mS, < 5% Skelett, verkohlter Wurzelhorizont
109-140	A _h , 10YR 3/1	humoser mS, < 5% Skelett, Boden mit Brandspuren

P5/ Franz 1

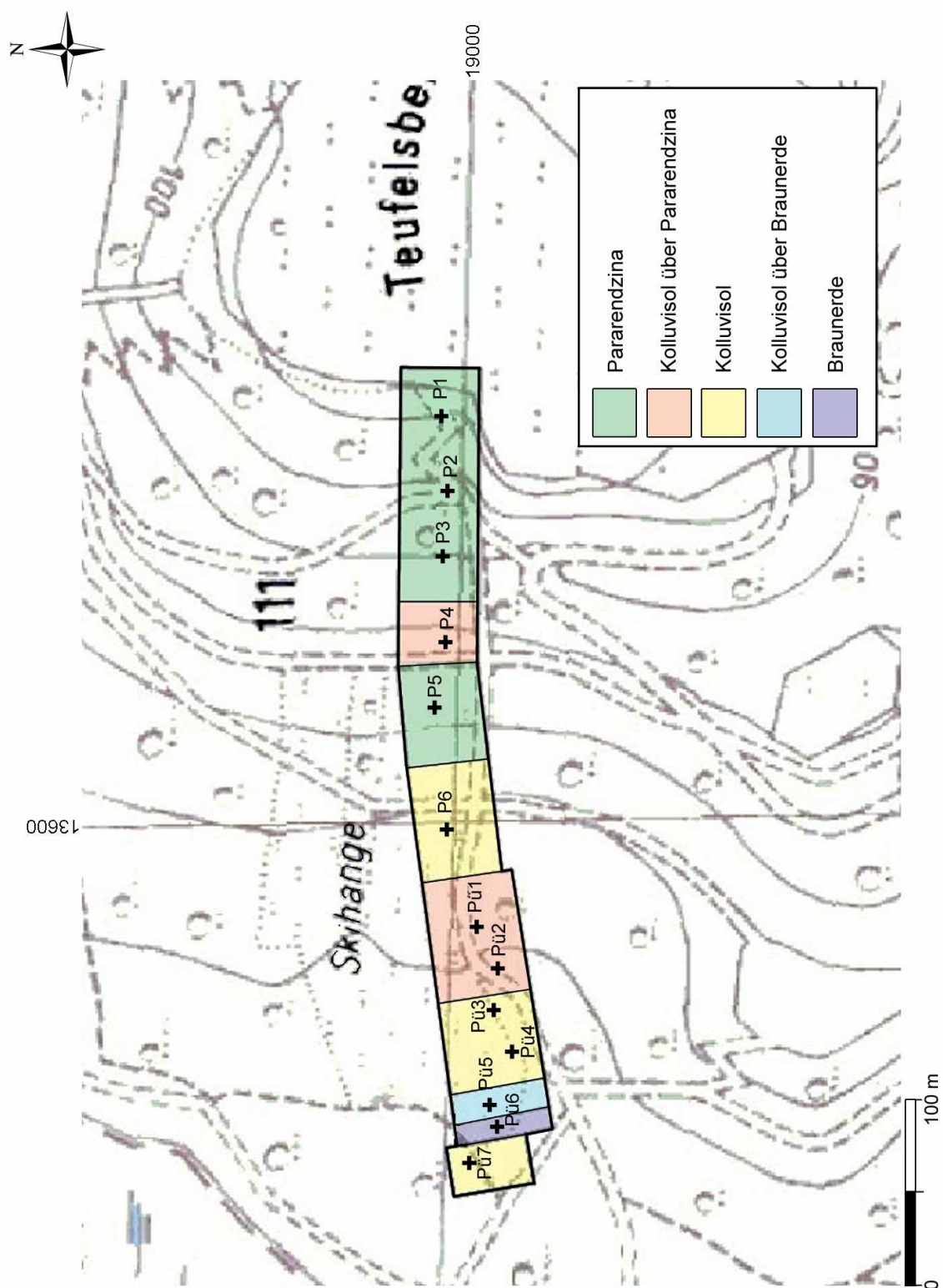
0-80	jY ₁ , 10YR: 6/3	Sandaufschüttung, skelettfrei
80-100	yC ₂ , 10R: 3/1	humoser mS, 55% Skelett, Schlacke 70%, Schiefer 20%, Steine 10%
100-120	yC ₃ , 7,5YR: 4/4	humoser mS, 45% Skelett,, Schlacke 80%, Asche 10%, Keramik 10%
120-130	yC ₄ , 10YR: 4/3	mS, 47% Skelett, Putz 70%, Ziegel 20%,
130-175	yC ₅ , 5/ 10YR: 3/3	mS, 50% Skelett, Ziegel 50%, Putz/ Mörtel 30%, Schlacke 20%
175-195	yC ₆ , 10YR: 4/2	fsmS, 16% Skelett, Geschiebe 90%, Putz 10%
195- 205	fA _h + Gor, 10YR: 4/3	humoser mS, Skelett < 5%, Geschiebe
205-225	Gor ₁ , 10YR: 4/4	humoser mS, Skelett < 5%, Geschiebe
225 - 247	Gor ₂ , 10YR: 5/4	Humoser mS, Skelett < 5%, Geschiebe

Anhang Tabelle 3: Bodenparameter von 5 Trümmerschuttprofilen der Berliner Innenstadt

Probe	pH	CO ₃ [%]/ FE	N [%]/ FE	C[%]/ FE	C/N	Glühverlust [%]	Tongehalt [%]	S-Wert (K+Mg+Na+Ca) [cmol/kg]
P1								
0 – 30/ yA _h	7,63	2,03	0,12	4,47	37,25	3,55	4,70	51,0
30 – 40/ yC ₁	7,43	2,05	0,10	3,65	36,50	4,41	4,50	45,94
40 – 73/ yC ₂	7,38	1,57	0,15	4,88	32,53	5,30	4,10	38,67
73 – 85/ yC ₃	7,64	3,03	0,10	6,73	67,2	3,90	4,40	53,77
85 – 100/ yC ₄	7,73	5,15	0,06	2,91	48,5	1,75	4,40	61,11
P2								
0 – 10/ yA _h	7,5	n.b.	0,19	8,45	44,47	7,01	7,10	59,49
10 – 15/ yC ₁	7,45	1,30	0,16	8,81	55,06	4,75	4,30	40,24
15 – 25/ yC ₂	7,65	2,38	0,07	4,20	60,0	3,52	5,20	57,09
25 – 48/ yC ₃	7,43	0,73	0,37	24,75	66,89	20,10	5,20	52,64
48 – 62/ yC ₄	7,67	n.b.	0,11	8,68	78,91	4,66	n.b.	43,45
62 – 100/ yC ₅	7,92	3,38	0,04	3,22	80,5	1,68	4,20	61,29
P3								
0 – 18/ yA _h	7,47	1,1	0,07	2,78	39,71	3,06	5,10	32,05
18 – 51/ jC ₁	7,01	<0,05	0,03	0,66	22,0	1,35	3,60	5,39
51 – 100/ yC ₂	7,61	1,65	0,10	3,04	30,4	2,33	4,30	44,14
P4								
0-10/ yA _h	7,50	3,61	0,128	7,46	58,44	7,01	0,6*	62,30
10-25/ yC ₁	7,91	1,68	0,103	4,46	43,21	5,17	10,7	60,40
25-40/ jC ₂	8,09	7,90	0,008	1,86	225,22	1,58	14,5*	74,30
40-90/ yC ₃	7,78	3,16	0,008	1,50	192,91	1,54	7,9	93,30
90-103/ yC ₄	8,16	2,92	0,017	0,93	54,71	1,61	3,2*	83,50
103-109/ fO _I	6,97	0,00	0,286	14,12	49,30	30,05	n.b.	136,60
109-140/ fA _h	7,96	1,63	0,157	3,45	21,98	6,12	5,2	87,90
P5Fr								
80-100/ jC ₁	7,48	1,00	0,145	8,98	61,70	1,94	7,1	44,30
100-120/ yC ₂	7,56	7,76	0,217	6,90	31,85	7,41	0,8	119,90
120-130/ yC ₃	7,44	2,04	0,025	0,99	39,71	1,25	0,9	48,30
130-175/ yC ₄	7,64	1,72	0,067	1,89	28,32	2,31	10,4	51,40
175-195/ yC ₅	7,52	1,31	0,042	1,68	40,28	1,69	6,6	40,70
195-205/ fA _h	7,16	0,00	0,020	0,43	21,39	0,97	6,0	21,70
205-225/ Gor ₁	7,28	0,00	0,012	0,24	20,17	0,54	9,3	19,30
225-247/ Gor ₂	7,26	0,00	0,011	0,19	17,32	0,64	6,7	37,70

Anhang Tabelle 4. Verteilung der PAK-Spezies in den Profilen P1-P3

	Σ PAK	Naphthalen	Naphthylen	Naphthen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthren	Pyren	Benz(a)anthracen	Chrysen	Benz(b)fluoranthren	Benz(k)fluoranthren	Benz(a)pyren	Dibenz(a,h)anthracen	Benz(g,h,i)perilen	Indenopyren
P1/ 0-30	22,36	0,00	0,00	0,04	0,05	1,39	0,07	4,10	4,07	1,72	2,03	1,80	0,71	2,22	0,12	3,24	0,81
P1/ 30-40	38,93	0,00	0,08	0,08	0,09	0,08	0,39	6,66	7,19	3,04	3,77	3,01	1,43	5,29	0,50	6,13	1,27
P1/ 40-73	37,81	0,00	0,05	0,04	0,03	3,31	0,37	6,59	6,35	2,93	3,28	2,96	1,29	1,44	0,17	4,84	1,46
P1/ 73-85	26,13	0,00	0,00	0,00	0,07	1,84	0,25	5,03	4,49	1,91	2,04	2,09	0,90	2,63	0,17	3,48	1,23
P1/ 85-100	23,93	0,00	0,00	0,06	0,12	1,72	0,27	4,40	3,97	2,00	1,95	1,96	0,82	2,36	0,36	2,84	1,10
P2/ 0-10	35,81	0,00	0,00	0,08	0,17	2,44	0,63	6,05	5,00	3,46	3,25	3,18	1,46	3,71	0,75	3,73	1,92
P2/ 10-15	34,96	0,00	0,00	0,04	0,11	2,06	0,53	5,58	4,63	3,20	3,12	2,98	1,37	3,95	0,76	4,59	2,04
P2/ 15-25	27,56	0,00	0,00	0,06	0,14	2,01	0,43	5,57	3,55	2,35	2,41	2,33	1,08	2,81	0,88	2,24	1,72
P2/ 25-48	29,45	0,00	0,00	0,01	0,09	1,75	0,37	3,68	4,78	2,53	3,05	2,71	1,16	3,60	0,35	3,68	1,70
P2/ 48-62	63,88	0,16	0,05	0,23	0,19	3,62	0,66	13,36	13,03	6,18	6,17	5,19	2,42	5,59	0,45	4,19	2,38
P2/ 62-100	8,24	0,00	0,00	0,04	0,08	0,91	0,10	1,62	1,05	0,52	0,51	0,57	0,28	0,82	0,09	1,10	0,55
P3/ 0-18	37,24	0,00	0,00	0,12	0,13	2,75	0,42	4,92	6,52	3,29	3,52	2,77	1,34	4,50	0,44	4,32	2,21
P3/ 18-51	0,24	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,05
P3/ 51-100	53,14	0,11	0,13	0,27	0,32	2,77	0,65	10,28	10,71	4,43	4,82	4,07	2,00	5,48	0,49	4,60	2,02



Anhang Abbildung 1: Karte der Bodentypen/ Untersuchungsgebiet Teufelsberg

Anhang Tabelle 5: Profil P1 Teufelsberg

Proben nr.	Tiefe [cm]	Mächtigkeit [dm]	Horizont- Übergang	Bode- Art	Kies Steine [Vol.-%]	Bodenfarbe (frisch)	Humus- gehalt [Gew.-%]	aktuelle Feuchte
1	0-10	1		mS	0 - 1	10YR 3/1	1,5 - 3	feucht
2	10-24	1,4	diffus	mSgs	3 - 5	10YR 4/2	0,6 - 0,9	frisch-feucht
3	24-31	0,7	scharf	mSgs	5 - 7	10YR 3/2	1,5 - 3	frisch
4	31-58	2,7	scharf	mSfs	40 - 50	10YR 3/2	1,5 - 3	trocken
5	58-81	2,3	scharf	mSgs	30 - 40	10YR 4/3	0,6 - 0,9	trocken
	pH-Wert	Carbonat [Gew.-%]	Gefügeform	Lagerungs- dichte verbal	Trocken- rohdichte [g/cm ³]	Durch- wurzelungs- intensität	Horizont-	
1	5,5	< 0,5		gering	1,3	stark	Ah	
2	6,0	0,5 - 2		gering	1,3	mittel	jC ₁	
3	6,0	2 - 10		mäßig dicht	1,5	mittel	yC ₂	
4	5,5	0,5 - 2		dicht	1,7	schwach	yC ₃	
5	7,0	> 10		gering	1,3	-	yC ₄	

Anhang Tabelle 6: Profil P2/ Teufelsberg

Probe- nr.	Tiefe [cm]	Mächtigkeit [dm]	Horizont- übergang	Boden- art	Kies Steine [Vol.-%]	Bodenfarbe (frisch)	Humus- gehalt [Gew.-%]	aktuelle Feuchte
6	0 - 9	0,9		mSfs	0 - 1	10YR 3/1	1,5 - 3	feucht
7	9 - 36	2,7	diffus	mSgs	1 - 5	10YR 4/2	0,6 - 0,9	frisch
8	36 - 74	3,8	scharf	mSfs	30 - 40	10YR 3/1	1,5 - 3	trocken
9	42 - 51	0,9	scharf	-		10YR 4/4	0,3 - 0,6	trocken
	pH-Wert	Carbonat [Gew.-%]	Gefügeform	Lagerungsdichte verbal	Trocken- rohdichte [g/cm ³]	Durch- wurzelungs- intensität	Horizont	
6	5,3	< 0,5		gering	1,3	stark	Ah	
7	6,0	2 - 10		mäßig dicht	1,5	mittel	jC ₁	
8	6,0	0,5 - 2		dicht	1,7	schwach	yC ₂	
9	6,0	2 - 10		Sehr dicht	1,8		Linse	

Anhang Tabelle 7: Profil P3/ Teufelsberg

Probe-nr.	Tiefe [cm]	Mächtigkeit [dm]	Horizont-übergang	Boden-art	Kies Steine [Vol.-%]	Bodenfarbe (frisch)	Humus-gehalt [Gew.-%]	aktuelle Feuchte
10	0-10	1		mS	0 - 1	10YR 3/1	1,5 - 3	feucht
11	10-25	1,5	diffus	mSgs	1 - 2	10YR 3/2	1,5 -3	feucht
12	25-30	0,5	scharf	mSfs	0 - 1	10YR 3/1	1,5 - 3	frisch
13	30-81	5,1	diffus	mSgs	30 - 40	2,5Y 4/1	0,6 - 0,9	trocken
	pH-Wert	Carbonat Gehalt [Gew.-%]	Gefügeform	Lagerungsdichte verbal	Trocken-rohdichte [g/cm ³]	Durch-wurzelungs-intensität	Horizont	
10	5,5	0	Einzelkorn	gering	1,3	stark	Ah	
11	5,5	0,5 - 2	Einzelkorn	mäßig dicht	1,5	stark	jC ₁	
12	5,5	2 - 10	Einzelkorn	dicht	1,7	mittel	jC ₂	
13	7,0	> 10	Einzelkorn	dicht	1,7	-	yC ₃	

Anhang Tabelle 8: Profil P4/ Teufelsberg

Proben-Nr.	Tiefe [cm]	Mächtigkeit [dm]	Horizont-übergang	Boden-art	Kies und Steine [Vol.-%]	Bodenfarbe (frisch)	Humus-gehalt [Gew.-%]	aktuelle Feuchte
14	0-5	0,5		mSfs	0 - 1	10YR 3/1	1,5 - 3	frisch
15	5-13	0,8	diffus	mS	2 - 5	10YR 4/2	0,6 - 0,9	frisch
16	13-52	3,9	scharf	mSgs	10 - 20	2,5Y 4/3 u. 10YR 3/3	0,6 - 3	feucht
17	52-70	1,8	scharf	mSfs	5 - 10	10YR 3/2	1,5 - 3	frisch
18	70-77	0,7	scharf	mSfs+gs	60 - 70	10YR 4/2	0,6 - 0,9	trocken
	pH-Wert	Carbonat-Gehalt [Gew.-%]	Gefügeform	Trocken-rohdichte verbal	Trocken-rohdichte [g/cm ³]	Durch-wurzelungs-intensität	Horizont-bezeichnung	
14	5,5	0	Einzelkorn	sehr gering	<< 1,1	stark	Ah	
15	6,5	2 - 10	Einzelkorn	gering	1,3	stark	M ₁	
16	7,0	2 - 10	Polyeder	mäßig dicht	1,5	schwach	M ₂	
17	7,0	0	Plattig	dicht	1,7	-	M ₃	
18	7,5	< 10	Einzelkorn	sehr dicht	> 1,8	-	IlyC ₁	

Anhang Tabelle 9: Profil P5/ Teufelsberg

Proben Nr.	Tiefe [cm]	Mächtigkeit [dm]	Horizont- übergang	Boden- art	Kies Steine [Vol.-%]	Bodenfarbe (frisch)	Humus- gehalt [Gew.-%]	aktuelle Feuchte
19	0-6	0,6		mSfs	0 - 2	10YR 3/1	1,5 - 3	feucht
20	6-16	1	diffus	mS	5 - 10	10YR 3/2	1,5 - 3	frisch
21	16-82	6,6	scharf	mSgs	70 - 80	10YR 5/3	0	trocken
	pH-Wert	Carbonat- Gehalt [Gew.-%]	Gefüge-form	Lagerungsdichte verbal	Trocken- rohdichte [g/cm³]	Durch- wurzelung- intensität	Horizont- bezeich-nung	
19	5,5	0	Einzelkorn	sehr gering	<< 1,1	stark	Ah	
20	6,0	< 0,5	Polyeder	gering	1,3	mittel	jC ₁	
21	7,0	> 10	Einzelkorn	dicht	1,7	-	yC ₂	

Anhang Tabelle 10: Profil P6/ Teufelsberg

Proben-nr.	Tiefe [cm]	Mächtigkeit [dm]	Horizont-übergang	Boden-art	Kies [Vol.%]	Steine	Bodenfarbe (frisch)	Humus-gehalt [Gew.-%]	aktuelle Feuchte
22	0-7	0,7		mSfs+gs	0 - 1		10YR 3/1	1,5 - 3	frisch
23	7-23	1,6	diffus	mSfs+gs	1 - 3		10YR 4/2	0,6 - 0,9	feucht
24	23-57	3,4	scharf	mSgs	0 - 1		10YR 4/4	0,3 - 0,6	feucht
25	57-64	0,7	scharf	mSgs	0		10YR 4/4	0,3 - 0,6	feucht
26	64-80	1,4	scharf	mS	0		10YR 6/6	0	feucht
Einlagerung				mS			10YR 2/1	> 6	
	pH-Wert	Carbonat-[Gew.-%]	Gefüge-form	Lagerungsdichte verbal	TRD [g/cm ³]		Durch-wurzelung	Horizont	
22	5,5	0	Einzelkorn	sehr gering	<< 1,1		stark	Ah	
23	6,0	0	Polyeder	mäßig dicht	1,5		mittel	M ₁	
24	5,5	0	Einzelkorn	mäßig dicht	1,5		-	M ₂	
25	5,5	0	Plattig	dicht	1,7		-	M ₃	
26	6,0	0	Einzelkorn	mäßig dicht	1,5		-	M ₄	
schwarze Einlagerung	5,5	0					-		

Anhang Tabelle 11: Skelettgehalt und -zusammensetzung P1 Teufelsberg

Horizont Skelett [M%]	Skelett				
	> 63 mm	> 20 mm	> 6,3 mm	> 5,6 mm	> 2,0 mm
TB P1 Ah 5,88			HK: 30% Kies 25% Putz 20% Ziegel 15% Schlacke NK: 10% lehm. Agg.	HK: 30% lehm. Agg. 30% Kies 30% Putz NK: 10% Schlacke	HK: 45% lehm. Agg. 40% Kies NK: 10% Putz 5% Schlacke
TB P1 jC ₁ 32,27		HK: 100% Schamott-	HK: 60% lehm. Agg. 30% Putz NK: 5% Steine 5% Ziegel	HK: 85% lehm. Agg. NK: 5% Putz 5% Kies 3% Ziegel 2% Schlacke	HK: 70% lehm. Agg. 15% Putz NK: 10% Kies 5% Ziegel
TB P1 yC ₂ 17,99			HK: 35% lehm. Agg. 30% Putz 15% Ziegel 15% Kies NK: % Schlacke 2% Glas	HK: 65% lehm. Agg. NK: 10% Putz 10% Kies 10% Schlacke 5% Ziegel	HK: 50% lehm. Agg. 25% Putz 10% Schlacke NK: 10% Kies 5% Ziegel
TB P1 yC ₃ 44,95	HK: 95% Ziegel NK: 5% Schamotte	HK: 35% Putz 30% Schlacke 25% Ziegel NK: 10% Gips	HK: 30% Ziegel 30% Schlacke 30% Putz NK: 10% Kies	HK: 30% Putz 25% Schlacke 25% Ziegel NK: 10% lehm. Agg. 10% Kies	HK: 50% Putz 20% Schlacke NK: 10% Kies 10% Ziegel 5% lehm. Agg. 3% Kohle 2% Glas
TB P1 yC ₄ 33,49	HK: 100% Ziegel	HK: 50% Putz 40% Ziegel NK: 5% Schlacke 5% Kies	HK: 60% Putz 20% Kies 15% Ziegel NK: 5% Schlacke	HK: 60% Putz 20% Schlacke 20% Ziegel	HK: 70% Putz 15% Schlacke NK: 10% Ziegel 3% Kies 2% Glas

Anhang Tabelle 12: Skelettgehalt und -zusammensetzung P2 Teufelsberg

Horizont Skelett [M%]	Skelett				
	> 63 mm	> 20 mm	> 6,3 mm	> 5,6 mm	> 2,0 mm
TB P2 Ah 10,07			HK: 60% lehm. Agg 40% Kies	HK: 80% lehm. Agg NK: 10% Putz 5% Schlacke 5% Kies	HK: 95% lehm. Agg NK: 3% Kies 2% Ziegel
TB P2 M ₁ 11,85			HK: 35% lehm. Agg. 30% Kies 25% Schlacke NK: 5% Putz 5% Ziegel	HK: 40% lehm. Agg. 35% Ziegel NK: 10% Schlacke 10% Kies 5% Putz	HK: 70% lehm. Agg. 20% Putz NK: 5% Kies 3% Ziegel 2% Schlacke
TB P2 yC ₂ 26,90	HK: 100% Metall	HK: 60% Putz 30% Ziegel NK: 5% Schlacke 3% Glas 2% lehm. Agg.	HK: 30% Putz 30% Ziegel 30% Schlacke NK: 5% Metall 5% Kies	HK: 50% Putz 20% Schlacke 15% Ziegel NK: 10% Kies 5% lehm. Agg.	HK: 40% Kies 30% Putz 20% Ziegel NK: 10% Schlacke
TB P2 Linse 82,97		HK: 75% lehm. Agg. NK: 10% Kies 10% Kohle 5% Gips	HK: 90% lehm. Agg. NK: 5% Putz 3% Schlacke 2% Ziegel	HK: 75% lehm. Agg. NK: 10% Schlacke 10% Putz 5% Kies	HK: 70% lehm. Agg. 15% Putz NK: 10% Schlacke 3% Ziegel 2% Glas

Anhang Tabelle 13: Skelettgehalt und -zusammensetzung P3 Teufelsberg

Horizont Skelett [M%]	Skelett				
	> 63 mm	> 20 mm	> 6,3 mm	> 5,6 mm	> 2,0 mm
TB P3 Ah 14,21		HK: 100% lehm. Agg	HK: 70% lehm. Agg. NK: 10% Kies 10% Ziegel 5% Putz 5% Schlacke	HK: 40% Kies 20% lehm. Agg. 15% Schlacke 15% Ziegel NK: 10% Putz	HK: 50% lehm. Agg. 40% Kies NK: 5% Ziegel 3% Putz 2% Schlacke
TB P3 jC ₁ 7,78			HK: 40% Putz 30% Schlacke 15% Kies NK: 10% Ziegel 5% lehm. Agg.	HK: 65% Kies 15% Putz 15% Schlacke NK: 5% lehm. Agg.	HK: 40% lehm. Agg. 40% Kies 15% Putz NK: 3% Schlacke 2% Ziegel
Tb P3 jC ₂ 12,24			HK: 40% Putz 40% Kies NK: 10% Ziegel 5% Schlacke 5% lehm. Agg.	HK: 25% Putz 25% Kies 20% Ziegel 15% Schlacke 15% lehm. Agg.	HK: 30% lehm. Agg. 30% Putz 30% Kies NK: 10% Ziegel
TB P3 yC ₃ 26,82	HK: 100% Ziegel	HK: 50% Ziegel 40% Putz NK: 10% Glas	HK: 40% Putz 40% Ziegel NK: 10% Schlacke 5% Glas 5% Metall	HK: 60% Putz 15% Schlacke 15% Ziegel NK: 5% Kies 5% Glas	HK: 40% Putz 30% Schlacke 20% Ziegel NK: 10% Kies

Anhang Tabelle 14: Skelettgehalt und -zusammensetzung P4 Teufelsberg

Horizont Skelett [M%]	Skelett				
	> 63 mm	> 20 mm	> 6,3 mm	> 5,6 mm	> 2,0 mm
TB P4 Ah 6,20			HK: 65% lehm. Agg 15% Putz 15% Kies NK: 5% Schlacke	HK: 30% Kies 30% Ziegel 20% Putz 20% Schlacke	HK: 50% lehm. Agg 40% Kies NK: 5% Putz 5% Ziegel
TB P4 M ₁ 22,60		HK: 100% Putz	HK: 60% lehm. Agg. 20% Putz NK: 10% Ziegel 10% Schlacke	HK: 80% lehm. Agg. NK: 5% Putz 5% Kies 5% Ziegel 5% Schlacke	HK: 60% lehm. Agg. 20% Putz NK: 10% Kies 5% Ziegel 5% Schlacke
TB P4 M ₂ 27,49		HK: 100% Ziegel	HK: 85% lehm. Agg. NK: 10% Ziegel 5% Putz	HK: 95% lehm. Agg. NK: 3% Putz 2% Ziegel	HK: 90% lehm. Agg. NK: 5% Putz 3% Kies 2% Ziegel
TB P4 M ₃ 6,15			HK: 75% Kies 15% Putz NK: 5% Schlacke 5% Ziegel	HK: 90% Kies NK: 10% Schlacke	HK: 80% Kies NK: 10% Schlacke 5% Ziegel 5% Putz
TB P4 IlyC ₁ 27,14		HK: 80% Putz NK: 10% Ziegel 10% Schamott	HK: 50% Putz 40% Ziegel NK: 5% Metall 3% Schlacke 2% Glas	HK: 80% Putz NK: 10% Ziegel 5% Schlacke 5% Glas	HK: 60% Putz 20% Ziegel 15% Glas NK: 5% Schlacke

Anhang Tabelle 15: Skelettgehalt und -zusammensetzung P5 Teufelsberg

Horizont Skelett [M%]	Skelet				
	> 63 mm	> 20 mm	> 6,3 mm	> 5,6 mm	> 2,0 mm
TB P5 Ah 12,12			HK: 50% Putz 30% lehm. Agg. NK: 10% Ziegel 10% Kies	HK: 50% lehm. Agg. 20% Putz NK: 10% Ziegel 10% Kies 10% Schlacke	HK: 60% lehm. Agg. 15% Putz 15% Kies NK: 10% Ziegel
TB P5 jC ₁ 19,31		HK: 55% Putz 45% Kies	HK: 35% Ziegel 20% Kies 15% lehm. Agg. 15% Putz NK: 10% Schlacke 5% Glas	HK: 40% Putz 35% Ziegel 15% Kies NK: 10% Schlacke	HK: 30% lehm. Agg. 30% Putz 20% Schlacke 15% Ziegel NK: 5% Kies
TB P5 yC ₂ 53,11	HK: 100% Ziegel	HK: 80% Ziegel NK: 10% Putz 5% Schlacke 3% Glas 2% Porzell.	HK: 40% Putz 35% Schlacke 20% Ziegel NK: 5% Glas	HK: 65% Putz 15% Schlacke NK: 10% Ziegel 5% Kies 3% Metall 2% Kohle	HK: 50% Putz 40% Schlacke NK: 5% Ziegel 5% Kies

Anhang Tabelle 16: Skelettgehalt und -zusammensetzung P6 Teufelsberg

Horizont Skelett [M%]	Skelet				
	> 63 mm	> 20 mm	> 6,3 mm	> 5,6 mm	> 2,0 mm
TB P6 Ah 3,61			HK: 30% Schlacke 30% Ziegel 25% Putz NK: 10% Kies 5% Glas	HK: 30% Kies 30% Putz 30% Ziegel NK: 10% Glas	HK: 70% lehm. Agg. 15% Kies NK: 10% Putz 5% Schlacke
TB P6 M ₁ 33,61		HK: 100% lehm. Agg.	HK: 90% lehm. Agg. NK: 7% Kies 3% Metall, Gips	HK: 90% lehm. Agg. NK: 5% Kies 3% Schlacke 2% Ziegel	HK: 95% lehm. Agg. NK: 3% Kies 2% Putz
TB P6 M ₂ 11,91		HK: 100% lehm. Agg.	HK: 65% lehm. Agg. 35% Kies	HK: 55% lehm. Agg. 40% Kies NK: 5% Putz	HK: 50% Kies 45% lehm. Agg. NK: 5% Schlacke
TB P6 M ₃ 8,65		HK: 95% Kies NK: 5% lehm. Agg.	HK: 50% Kies 45% lehm. Agg. NK: 3% Putz 2% Ziegel	HK: 65% Kies 35% lehm. Agg.	HK: 70% Kies 30% lehm. Agg.
TB P6 M ₄ 4,91			HK: 35% Kies 30% Teerpappe 30% lehm. Agg. NK: 5% Putz	HK: 80% Kies NK: 10% Putz 5% Teerpappe 5% lehm. Agg.	HK: 60% Kies 40% lehm. Agg.

Anhang Tabelle 17: Oxalatlösliches Eisen und Aluminium in Trümmerschuttproben des Teufelsberges

Probenr.	Horizontbezeichnung	Fe ox mg/kg Boden	Al ox mg/kg Boden
1	P1 Ah 0-10	1474,5	651,5
2	P1 jC ₁ 10-24	1411	490
3	P1 yC ₂ 24-31	2658	1129,5
4	P1 yC ₃ 31-58	2261,5	965,5
5	P1 yC ₄ 58-81	1524,5	729
6	P2 Ah 0-9	953,75	322,25
7	P2 mC ₁ 9-36	1604,25	347
8	P2 yC ₂ 36-74	2323,75	1030,75
9	P2 Linse 42-51	1649,25	874,75
10	P3 Ah 0-10	1423,75	469,25
11	P3 jC ₁ 10-25	1079,25	281,75
12	P3 jC ₂ 25-30	2484,75	1133,25
13	P3 yC ₃ 30-31+	1475,5	839,75
14	P4 Ah 0-5	974,25	356,25
15	P4 IM ₁ 5-13	1445,5	445,5
16	P4 IM ₂ 13-52	1101,75	317,25
17	P4 IM ₃ 52-70	1158	908,5
18	P4 llyC ₁ 70-77	1978	819
19	P5 Ah 0-6	1366,5	891,75
20	P5 jC ₁ 6-16	1373,25	774,75
21	P5 yC ₂ 16-82	1696,25	772,5
22	P6 Ah 0-7	1017,25	452,5
23	P6 M ₁ 7-23	1332	344,75
24	P6 M ₂ 23-57	422,5	298,75
25	P6 M ₃ 57-64	923,5	895,5
26	P6 M ₄ 64-80	493,75	524,25

Anhang Tabelle 18: Dithionitlösliches Eisen und Aluminium in Trümmerschuttproben des Teufelsberges

Probenr.	Horizontbezeichnung	Fe [mg/kg]	Al [mg/kg]
1	P1 Ah 0-10	3730	546
2	P1 jC ₁ 10-24	2142,5	301
3	P1 yC ₂ 24-31	3755	529,75
4	P1 yC ₃ 31-58	2955	492,25
5	P1 yC ₄ 58-81	3030	243,5
6	P2 Ah 0-9	3580	476
7	P2 mC ₁ 9-36	3517,5	246
8	P2 yC ₂ 36-74	3592,5	424,75
9	P2 Linse 42-51	3855	683,5
10	P3 Ah 0-10	2880	386
11	P3 jC ₁ 10-25	2355	234,75
12	P3 jC ₂ 25-30	4817,5	633,5
13	P3 yC ₃ 30-31+	2805	331
14	P4 Ah 0-5	2492,5	341
15	P4 IM ₁ 5-13	3280	336
16	P4 IM ₂ 13-52	2017,5	196
17	P4 IM ₃ 52-70	2767,5	599,75
18	P4 llyC ₁ 70-77	3105	231
19	P5 Ah 0-6	2917,5	452,25
20	P5 jC ₁ 6-16	2742,5	401
21	P5 yC ₂ 16-82	4305	487,25
22	P6 Ah 0-7	2455	329,75
23	P6 M ₁ 7-23	3092,5	243,5
24	P6 M ₂ 23-57	1680	227,25
25	P6 M ₃ 57-64	1955	529,75
26	P6 M ₄ 64-80	1567,5	299,75

Anhang Tabelle 19: Ergebnisse der Desorptionsversuche mit Regenwasser; desorbierte Schwermetalle in [µg/l],

Prüfwerte	5 µg/l			50 µg/l			25 µg/l			500 µg/l			10 µg/l			1 µg/l		
	Cd [µg/l]			Cu[µg/l]			Pb[µg/l]			Zn[µg/l]			As[µg/l]			Hg[µg/l]		
Regenwasser	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III
RS2/ 0-24cm	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	27,00	150,00	296,00	160,40	210,00	330,00	197,00	2,80	3,42	2,76	0,00	0,00	0,00
RS 2/ 24-98 cm	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,50	2,05	0,00	0,10	0,19
RS 3/ 0-40cm	0,00	0,00	0,00	30,00	37,00	26,40	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	19,00	2,50	2,35	1,47	0,10	0,09	0,69
RS 3/ 40-60cm	0,00	0,00	0,00	50,00	15,00	28,60	40,00	76,00	12,40	10,00	79,00	22,00	3,10	2,59	2,14	0,10	0,00	0,00
RS4/ 10-32cm	0,00	0,00	0,00	40,00	26,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	1,60	1,14	1,19	0,00	0,00	0,00
RS 4/ 32-53cm	0,00	0,00	0,00	690,00	472,00	332,80	400,00	290,00	211,00	3000,00	2000,00	1300,00	20,00	14,70	11,78	2,60	1,14	0,48
RS 4/ 53-100cm	0,00	0,00	0,00	70,00	33,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	40,00	0,50	0,95	0,51	0,00	0,00	0,00
RS 5/ 10-62cm	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	6,10	3,60	2,34	0,00	0,00	0,20
RS 5/ 62-75cm	0,00	0,00	0,00	170,00	183,00	91,80	30,00	47,00	25,40	110,00	160,00	640,00	3,90	2,61	1,90	0,00	0,40	0,00
RS 5 75-106cm	0,00	0,00	0,00	160,00	104,00	239,60	160,00	214,00	258,60	220,00	178,00	292,20	7,86	6,14	2,92	0,60	0,24	0,00
Rs 6/ 10-41cm	0,00	0,00	0,00	53,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,40	3,86	2,00	0,86	0,32	0,00	0,00
RS7/ 0-40cm	0,00	0,00	0,00	112,00	36,80	28,40	0,00	0,00	0,00	0,00	32,00	12,80	4,64	0,00	0,00	0,32	0,00	0,16
RS 7/ 40-65cm	0,00	0,00	0,00	140,00	46,00	115,00	80,00	132,00	206,00	80,00	152,00	144,80	6,80	3,72	7,60	0,40	0,60	0,54

Anhang Tabelle 20: Ergebnisse der Desorptionsversuche mit Havelwasser; desorbierte Schwermetalle in [$\mu\text{g/l}$],

Prüfwerte	5 $\mu\text{g/l}$			50 $\mu\text{g/l}$			25 $\mu\text{g/l}$			500 $\mu\text{g/l}$			10 $\mu\text{g/l}$			1 $\mu\text{g/l}$		
	Cd [$\mu\text{g/l}$]			Cu [$\mu\text{g/l}$]			Pb [$\mu\text{g/l}$]			Zn [$\mu\text{g/l}$]			As [$\mu\text{g/l}$]			Hg [$\mu\text{g/l}$]		
Havelwasser	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III	Des. I	Des. II	Des. III
RS2/ 0-24cm	0,00	0,00	0,00	60,00	10,00	16,60	90,00	140,00	54,00	50,00	53,40	52,20	2,30	2,04	3,22	0,10	0,06	0,00
RS 2/ 24-98 cm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	1,82	1,22	2,10	0,20	0,38
RS 3/ 0-40cm	0,00	0,00	0,00	50,00	35,00	36,40	0,00	0,00	0,00	10,00	9,00	9,00	2,10	1,89	0,00	0,40	0,36	0,16
RS 3/ 40-60cm	0,00	0,00	0,00	30,00	20,00	13,40	60,00	40,00	46,00	10,00	6,60	7,80	2,80	1,77	1,21	0,50	0,33	0,09
RS4/ 32cm	0,00	0,00	0,00	70,00	16,60	34,40	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	0,74	1,25	0,70	0,00	0,00
RS 4/ 53cm	0,00	0,00	0,00	100,00	90,00	92,00	0,00	0,00	0,00	270,00	352,00	324,00	4,70	4,54	3,14	0,10	0,19	0,48
RS 4/ 53-100cm	0,00	0,00	0,00	30,00	38,00	16,20	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	1,60	3,76	3,14	0,20	0,08	0,09
RS 5/ 10-62cm	0,00	0,00	0,00	40,00	16,60	14,40	80,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,60	0,97	2,08	0,20	0,00	0,00
RS 5/ 62-75cm	0,00	0,00	0,00	100,00	66,00	78,00	0,00	0,00	0,00	30,00	40,00	36,60	3,50	9,74	1,65	0,10	0,06	0,00
RS 5 75-106cm	0,00	0,00	0,00	100,00	80,00	7,20	0,00	0,00	0,00	90,00	71,00	62,80	4,10	3,60	2,94	0,30	0,27	0,24
Rs 6/ 10-41cm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	27,00	7,20	1,00	1,10	1,59	0,00	0,00	0,00
RS 7/ 0-40cm	0,00	0,00	0,00	40,00	16,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	8,00	9,20	3,60	0,64	0,74	0,10	0,09	0,00
RS7/ 40-65cm	0,00	0,00	0,00	30,00	27,00	27,20	0,00	0,00	0,00	10,00	9,00	9,20	1,50	0,00	0,80	0,00	0,00	0,10

Anhang Tabelle 21: Kartierprotokoll Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS2

Tiefe [cm]	Bodenart Torfart	Kies/ Steine [%]	Bodenfarbe (frisch)	aktuelle Feuchte	Karbonat	Horizont	Bemerkungen
0-24	LS	5	10YR:4/2	tro	stellenweise stark 2-10%	yAh ?	Sand mit Bauschutt
24-90	SL	20	5YR: 3/3	fri	stark10%	yC1	rote Asche und Schlacke

Anhang Tabelle 22: Kartierprotokoll Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS3

Tiefe [cm]	Bodenart Torfart	Kies Steine [%]	Bodenfarbe (frisch)	aktuelle Feuchte	Karbonat	Horizont	Bemerkungen
0-40	IS	10	10YR: 2/1	tro	stark 10%	yAh	Sand/ Bauschutt/ graue Asche (Mubo)
40-60	ssL	20-30	5YR: 4/3	fri	stark 10%	yC1	rote Schlacke/ Asche + schwarze Glasschlacke
60-80	mS	<5	10YR: 5/2	fri	schwach 0.5-2%	yC2	Sand mit Bauschutt
80-200	mS	0	10YR: 5/2	feucht - naß	schwach-stark (Muschelschalen) 0.5-2% (10%	C	Sand

Anhang Tabelle 23: Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS4

Tiefe [cm]	Bodenart Torfart	Kies Steine [%]	Bodenfarbe (frisch)	aktuelle Feuchte	Karbonat	Horizont	Bemerkungen
0-10	IS	10	10YR: 2/2	tro	-	yAh	Rostflecken
10-32	IS	30-40	5YR: 3/1	tro	-	C1	schwarze Glasschlacke, humose Einlagerung/ Rostbänder
32-53	mS	-	10YR: 3/1	tro-fri	schwach 0.5-2%	C	humoses Material + Sand
53-100	mS	-	10YR: 7/3	tro-fri	mittel 2%	C	Sand

Anhang Tabelle 24: Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS5

Tiefe [cm]	Bodenart Torfart	Kies Steine [%]	Bodenfarbe (frisch)	Aktuelle Feuchte	Karbonat	Horizont	Bemerkungen
0-10	mS	5-10	10YR: 3/1	sehr tro	-	yAh	
10-62	sL	20-30	5YR: 3/2	fri	mäßig-stark 2-10%	yC1	rote Schlacke + rote Asche
62-75	IS	20	10YR: 2/1	fri	mäßig 2%	yC2	Schwarze Schlacke mit Sand
75-106	mS	5-10	10YR: 4/1	tro-fri	stark 10%	Go	Sand mit schwarzer Glasschlacke Rostbänder, Rostflecken
106-200	fS	-	2,5YR: 6/2	feuchtnaß	stark 10%	Gr (?)	freies Wasser ab 1,25m

Anhang Tabelle 25: Probenahmepunkt: Schildhorn/ RS6

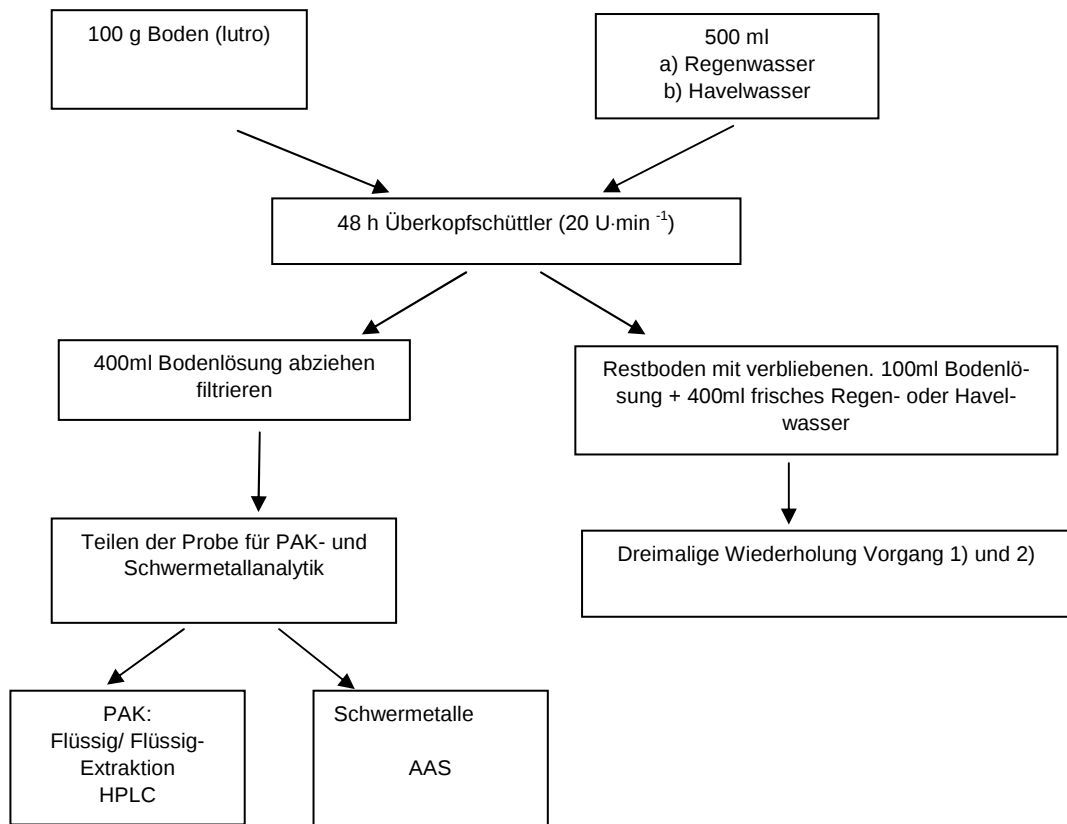
Tiefe [cm]	Bodenart Torfart	Kies Steine [%]	Bodenfarbe (frisch)	Aktuelle Feuchte	Karbonat	Horizont	Bemerkungen
0-10	uS	10	10YR: 3/2	sehr tro	mäßig 2%	yAh	-
10-41	sL	20-30	5YR: 4/4	tro-fri	stark 10%	yC1	rote Asche
41-53	fmS	-	10YR: 6/6	tro-fri	gering 0.5%	Go	Rostflecken stellenweise
53-73	mS	-	10YR: 7/3	tro-fri	-	C	Wenig Rostflecken

Anhang Tabelle 26. Probenahmepunkt: Schildhorn/ BP 7 (neben RS 3 und BP2)

Tiefe [cm]	Bodenart Torfart	Kies Steine [%]	Bodenfarbe (frisch)	Aktuelle Feuchte	Karbonat	Horizont	Bemerkungen
0-40	uS	<5	10YR: 4/2	Sehr tro	schwach 0.5-2%	yAh	rote Asche
40-65	sL	10-20	5YR: 4/4	fri	stark 10%	yC1	rote Asche mit Glas, Porzellan

Anhang Tabelle 27: Profil R1-R3/ Rodelbergweg

Humus (%)	Bodenfarbe (frisch)	akt. Feuchte	Karbonat (%)	Lagerungs- dichte (g/cm3)	Wassergehalt (Gew.%)	pH-Wert	pH-Wert	Horizont.	Bemerkung	
1,5 - 3	10YR 3/1	frisch	> 0,5	1,18	21,5	6,52	6,59	Ah		R1 Ah
> 6	7,5YR 2/0	frisch		1,22	28,8	4,4	4,25	oYif / C1		R1 C1
0,9 - 1,5	10R 3/4	feucht	>0,5	0,86	64	5,89	6,68	oYi / C2		R1 C2
						4,69	5,01		Schappe 1	R1 S1
						5,1	6,08		Schappe 2	R1 S2
						5,5	5,25		Schappe 3	R1 S3
1,5 - 3	10YR 3/1	frisch-feucht	0,5 - 2,0	1,78	9	6,81	6,85	Ah		R2 Ah
> 6	10YR 2/2	frisch-feucht	< 0,5	1,38	17,7	6,94	6,95	oYjib / C1		R2 C1
1,5 - 3	10YR 3/3	feucht	0,5 - 2,0	1,16	19,4	7,1	7,08	oYjib / C2	Bauschutt	R2 C2
						7,15	7,22		Schappe 1	R2 S1
						6,45	7,42		Schappe 2	R2 S2
						7,41	7,5		Schappe 3	R2 S3
						7,2	7,38		Schappe 4	R2 S4
1,5 - 3	10YR 3/1	frisch		1,14	29,4	6,55	6,46	Ah		R3 Ah
1,5 - 3	10YR 3/1	frisch	0,5 - 2,0	1,08	21,9	6,95	7,06	oYif / C1		R3 C1
> 6	10YR 2/2	trocken	0,5 - 2,0	1,14	21,6	7,1	7,07	oYif / C2		R3 C2
< 0,3	10R 4/6	frisch		1,26	12,8	7,57	7,66	oYif / C3		R3 C3
0	10YR 5/4	frisch	< 0,5	1,33	7,6	7,57	7,66	ojmS / C4	verockert	R3 C4
>6	10YR 2/1	frisch	< 0,5	1,04	37,2	7,18	7,36	oYif / C5	blaue Abfälle	R3 C5
						7,31	7,4		Schappe 1	R3 S1
						7,46	7,55		Schappe 2	R3 S2
						7,59	7,78		Schappe 3	R3 S3
						7,28	7,76		Schappe 4	R3 S4
						7,25	7,71		Schappe 5	R3 S5



Anhang Abbildung 2: Schema der Desorptionsversuche Schildhorn