

TEXTE

69/2011

Zusammenstellung und Bewertung von Proben- nahmeverfahren für den vorsorgenden und nach- sorgenden Bodenschutz sowie die Abschätzung der Messunsicherheit für die Probenahme

UBA-FB 001548

**Zusammenstellung und Bewertung von
Probennahmeverfahren für den
vorsorgenden und nachsorgenden
Bodenschutz sowie die Abschätzung der
Messunsicherheit für die Probennahme**

von

Prof. Dr. Rolf O. Kuchenbuch

LUFA Rostock der LMS und Universität Rostock, Rostock

Dr. Jeanette Holz

LUFA Rostock der LMS, Rostock

Dr. Uwe Buczko

Universität Rostock, Rostock

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4192.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	LUFA Rostock der LMS Landwirtschaftsberatung Mecklenburg-Vorpommern/S-H GmbH Graf-Lippe-Str. 1 18059 Rostock	Universität Rostock Ulmenstr. 69 18051 Rostock
Abschlussdatum:	Januar 2011	
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/	
Redaktion:	Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes Prof. Dr. mult. Dr. h.c. Konstantin Terytze	

Dessau-Roßlau, November 2011

Inhaltsverzeichnis

Glossar.....	5
Begriffe und Definitionen.....	7
Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	8
Zusammenfassung.....	10
Summary.....	13
1. Einleitung und Problemstellung	16
Teil 1 Zusammenstellung und Bewertung von Probennahmeverfahren für den vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutz	
2. Stand der Normen und Regelwerke der BBodSchV sowie länderübergreifender und -spezifischer Materialien zur Bodenprobennahme	17
2.1 Normen und Regelwerke	17
2.1.1 Anhang 1 BBodSchV - Kapitel 2.4 „Probengewinnung“ und Kap. 2.5 „Probenkonservierung, -transport und -lagerung“	17
2.1.2 Anhang 1 BBodSchV Kapitel 2.1 „Probennahmeplanung für Bodenuntersuchungen“ und Kapitel 2.3 „Probennahmeplanung bei abgeschobenem und ausgehobenem Bodenmaterial“	23
2.2 Länderübergreifende und -spezifische Materialien und Vorgaben	26
3. Vergleich und Bewertung der Probennahmeverfahren	28
3.1 Begriff „Probennahmeverfahren“	28
3.2 Probenauswahl, Entnahme von Bodenproben, Misch- und Einzelproben	29
3.3 Auswahl von Probennahmeverfahren	32

3.4	Aufschlussverfahren	34
3.4.1	Bohrungen.....	38
3.4.1.1	Auswahl des Bohrdurchmessers	38
3.4.1.2	Handbohrungen	39
3.4.1.3	Kleinrammbohrungen.....	40
3.4.1.4	Rammkernbohrungen.....	42
3.4.1.5	Rotationskernbohrungen	42
3.4.1.6	Schlauchkernbohrung	43
3.4.1.7	Verfahren für Sonderproben (ungestörte Proben).....	43
3.4.2	Schürfe.....	44
3.5	Entnahme von Bodenproben.....	45
3.5.1	Probenmenge.....	45
3.5.2	Durchführung der Probennahme, Transport und Lagerung	47
3.5.2.1	Querkontaminationen.....	47
3.5.2.2	Probenentnahme aus der Bohrung	48
3.5.2.3	Konservierung, Transport und Lagerung.....	49
3.5.2.4	Dokumentation (Probennahmeberichte, -protokolle)	50
3.5.3	Probennahme bei Verdacht auf leichtflüchtige Stoffe	52
3.5.4	Probenentnahme bei Schürfen.....	54
3.5.5	Probenteilung	54
3.6	Bodenansprache und Profilbeschreibung.....	55
3.7	Qualitätssicherung und Probennahmefehler	58
3.7.1	Allgemeines.....	58

3.7.2 Hinweise in der BBodSchV, in den Normen und länderübergreifenden und -spezifischen Materialien.....	58
3.7.3 Messunsicherheit und Validierung	61
3.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	62
Literaturverzeichnis zu Teil 1	70

Teil 2 Abschätzung der Messunsicherheit für die Probennahme

4. Zusammenstellung von Probennahmeverfahren	75
4.1 Kriterien für die Auswahl von Probennahmeverfahren.....	75
4.2 Charakterisierung von Probennahmeverfahren	75
4.2.1 Art der Proben.....	75
4.2.2 Probennahmemuster	76
4.2.3 Beprobungsdichte	77
4.2.4 Probennahmetiefe	77
4.2.5 Probennahmegerät.....	77
4.2.6 Probenmenge.....	78
5. Bewertung der Probennahmeverfahren.....	78
5.1 Methoden zur Bewertung von Probennahmeverfahren	78
5.2 Untersuchungen zur Probennahmeunsicherheit.....	80
5.3 Vergleichsprobennahmen	82
5.3.1 Schweiz (FAC)	82
5.3.2 Wirksworth (England)	83
5.3.3 Imperial College – synthetischer Kontaminationsherd	83
5.3.4 Comparative Evaluation of European Methods for Sampling and Sample Preparation of Soils (CEEM Soil)	84

5.3.5 „Probennahme Acker“ (PronAck).....	85
5.3.6 Ingenieurtechnischer Verband Altlasten (ITVA)	85
5.3.7 “Assessment of uncertainty associated with soil sampling in agricultural, semi-natural, urban and contaminated environments” (SOILSAMP)	86
5.3.8 International Atomic Energy Agency (IAEO)	86
5.3.9 LfU Bayern-ITVA	87
5.3.10 VDLUFA - Hessen.....	87
6. Zusammenschau und Auswertung der Probennahmeunsicherheit für verschiedene Probennahmeverfahren.....	88
7. Abschließende Diskussion und Bewertung	107
Literaturverzeichnis zu Teil 2	108

Glossar

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BGR	Berufsgenossenschaftlichen Regeln
BLfU	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole
CEEM Soil	Comparative Evaluation of European Methods for Sampling and Sample Preparation of Soils
CHAID	Chi-squared automatic interaction detector
C _{org}	organischer Kohlenstoff
C&RT	Classification and regression tree
CT	„comparative trial“
CV	Variationskoeffizient (%)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.; Deutsche Industrienorm
E	Entwurf (z.B. in Verbindung mit E DIN ISO...)
EN	Europäische Norm des Europäischen Komitees für Normung (CEN)
FAC	Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Schweiz
FBU	Fachbeirat für Bodenuntersuchungen
GZV	geschichtete (stratifizierte) Zufallsverteilung
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation

ISO	International Organization for Standardization
ITVA	Ingenieurtechnische Vereinigung Altlasten
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
KA	Kartieranleitung
KW	Kohlenwasserstoffe
LABO	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LfUBW	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
LHKW	Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
LUA	Landesumweltamt
LV	Probennahme entlang einer linearen Quelle (Transekt)
MW	Mittelwert
NV	Nichtsystematische, vereinfachte Muster
OFD	Oberfinanzdirektion
PNV	Probennahmeverfahren
PTFE	Polytetrafluorethylen
RD	Raster dreieckig
RG	Raster geschachtelt
RR	Raster rechtwinklig
SOILSAMP	Assessment of uncertainty associated with soil sampling in agricultural, semi-natural, urban and contaminated environments
Stabw	Standardabweichung
SPT	„sampling proficiency test“
SV	Subjektive Verteilung nach Einschätzung des Probennehmers

$u_{a,i}$	analytische Unsicherheit innerhalb eines Labors (%)
$u_{a,b}$	analytische Unsicherheit zwischen Labors (%)
u_s	Standard-Probennahmeunsicherheit (%)
U_s	erweiterte Probennahmeunsicherheit (%)
u_t	gesamte Messunsicherheit für eine chemische Analyse eines Bodeninhaltsstoffes (%)
VDLUFA	Verband deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VEGAS	Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart
VIM	Internationales Wörterbuch der Metrologie
VKS	Varianzkomponentenschätzung
VSA	Vergleichsstandardabweichung
ZV	Zufällige (stochastische) Verteilung

Begriffe und Definitionen

Probennahmeverfahren: Arbeitsanforderungen und/oder -anweisungen im Bezug auf die Anwendung eines bestimmten Probennahmeplans

Messunsicherheit: ein „dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“ (VIM, 1994-02)

Probennahmeunsicherheit: Gesamtheit der Unsicherheiten der mit einem Probeentnahmeverfahren verbundenen Tätigkeiten (Ramsey & Ellison, 2007);

gesamte Messunsicherheit, bzw. Genauigkeit, besteht aus Präzision (Streuung) und Richtigkeit (Abweichung vom „wahren“ Wert);

gesamte Messunsicherheit für Bodenproben setzt sich zusammen aus Probennahmeunsicherheit und Labor-Unsicherheit;

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über Normen / Regelwerke der Kapitel 2.4.1 und 2.5 des Anhangs 1 der BBodSchV (FBU 2005, 2009; aktualisiert durch Handbuch Bodenuntersuchungen).....	18
Tabelle 2: Überblick über Normen der Kapitel 2.1 und 2.3 des Anhangs 1 der BBodSchV (FBU 2005,2009; aktualisiert durch Handbuch der Bodenuntersuchungen)	24
Tabelle 3: Übersicht über Aufschlussverfahren bei der Erkundung von Altlastenflächen nach „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010), ergänzt durch „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002).....	35
Tabelle 4: Zusammenfassender Überblick über den Beitrag der Regelwerke (Normen / Richtlinien) des Anhangs 1 der BBodSchV zu den Probennahmeverfahren für Böden (aktualisierte Fassung).....	66
Tabelle 5: Beprobungstiefen nach Wirkungspfad und Flächennutzung gemäß BBodSchV.(1999)	77
Tabelle 6: Übersicht über Vergleichsprobennahmen mit mehreren Probennehmern (VSA: Vergleichsstandardabweichung; PNV: Probennahmeverfahren).....	89
Tabelle 7: Übersicht der für die Auswertung der Probennahmeunsicherheit verwendeten Untersuchungen (CT: „comparative trial“; SPT: „sampling proficiency test“; u_s : Standard-Probennahmeunsicherheit (%); VKS: Varianzkomponentenschätzung).....	94
Tabelle 8: Übersicht u_s -Werte für unterschiedliche Probennahmemuster.	103
Tabelle 9: u_s -Werte für unterschiedliche Landnutzungsarten	103
Tabelle 10: u_s -Werte für unterschiedliche Heterogenitätsklassen.	104
Tabelle 11: u_s -Werte für unterschiedliche Probennahmetiefen.	105
Tabelle 12: u_s -Werte für unterschiedliche Analyte.	105
Tabelle 13: u_s -Werte für unterschiedliche Beprobungsdichten.....	106
Tabelle 14: u_s -Werte für unterschiedliche Probennahmegeräte.	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der u_s -Werte aller für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 313$, $MW = 10,98$, $Md = 6,6$, $Stabw = 11,96$).....	97
Abbildung 2: Häufigkeitsverteilung der CV-Werte der für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 268$, $MW = 20,8$, $Md = 16,0$, $Stabw = 14,8$).....	97
Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der $u_{a,i}$ -Werte der für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 313$, $MW = 6,2$, $Md = 4,5$, $Stabw = 5,2$).	98
Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der $u_{a,b}$ -Werte der für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 140$, $MW = 11,3$, $Md = 9,2$, $Stabw = 6,7$).	98
Abbildung 5: Baumdiagramm für C&RT Analyse (abhängige Variable: u_s ; unabhängige Variablen: Probennahmeschema, CV, Probennahmetiefe, Analyt, Landnutzung, Probennahmedichte, u_a).....	100
Abbildung 6: Baumdiagramm für CHAID Analyse (abhängige Variable: u_s ; unabhängige Variablen: Probennahmeschema, CV, Probennahmetiefe, Analyt, Landnutzung, Probennahmedichte, u_a).....	101
Abbildung 7: u_s -Werte vs CV (d.h., Feldheterogenität).....	104

Zusammenfassung

Zusammenstellung und Bewertung von Probennahmeverfahren für den vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutz sowie die Abschätzung der Messunsicherheit für die Probennahme

In dem vorliegenden Gutachten wurden folgende Aufgabenstellungen bearbeitet, sodass zwei Teile vorliegen:

- Teil 1: Zusammenstellung und Bewertung von Probennahmeverfahren für den vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutz (Bearbeiter: Dr. Jeanette Holz, LUFA Rostock der LMS) (Kapitel 2 und 3 der Arbeit)
- Teil 2: Abschätzung der Messunsicherheit für die Probennahme (Bearbeiter: Dr. Uwe Buczko, Lehrstuhl für Angewandte Pflanzenernährung der Universität Rostock) (Kapitel 4 bis 7 der Arbeit)

Kapitel 2 gibt einen Überblick über den Stand und die Aktualisierungen der Regelwerke und Normen der Verfahren zur Probennahme von Böden des Anhangs 1 der BBodSchV, wobei die für Probennahmeverfahren relevanten Kapitel der Probengewinnung und der Probenkonservierung, -transport und -lagerung betrachtet werden. Seit Verabschiedung der BBodSchV (1999) zeigte sich eine zunehmende Diskrepanz zwischen starren Methodenverweisen und den fortschreitenden Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen, die sich nicht immer in den Normenänderungen niederschlagen. In Kapitel 3 werden die Bodenprobennahmeverfahren der Regelwerke und Normen vergleichend mit länderübergreifenden und -spezifischen Materialien diskutiert, die u.a. in Form von Arbeitshilfen oder Merkblättern zur Probennahme von Böden im Rahmen der Altlastenbearbeitung erarbeitet worden sind. Anforderungen an die Probennahme werden herausgearbeitet und Lücken insbesondere in Hinblick auf die Qualitätssicherung einschließlich Probennahmefehler und Messunsicherheit werden aufgezeigt. Diese wird im Rahmen der Bewertung von Probennahmeverfahren zukünftig in zunehmendem Maße gefordert.

Zurzeit existiert kein „Dokument“, das alle erforderlichen Aspekte einer Handlungsempfehlung für Probennahmeverfahren für Böden insbesondere auch unter Einbeziehung der Qualitätssicherung und der Bewertung von Messunsicherheiten erfüllt. Auch der Begriff „Probennahmeverfahren“ wird nicht einheitlich verwendet, der entsprechend der DIN ISO 10381-2:08.03 in dem vorliegenden Gutachten als zweistufiger Prozess –

Aufschluss und Probenentnahme – einschließlich Probenlagerung und -transport sowie Dokumentation gesehen wird. Die BBodSchV greift zur Festlegung der Vorgehensweise bei der Probengewinnung sowohl auf Normen zur Untersuchung der „Bodenbeschaffenheit“ (insbesondere Normenreihe ISO 10381) als auch auf Normen aus dem „geotechnischen Bereich“ zurück, wobei es Diskrepanzen zwischen der Anwendung dieser Methoden gibt. Die DIN 10381-2:08.03 und ergänzend auch die anderen Teile der Normenreihe ISO 10381 werden aber mehr als die geotechnischen Normen den Qualitätsansprüchen möglicher Kontaminationen bei der Bodenprobennahme gerecht. In dieser Norm sind jedoch der Zusammenhang zwischen Aufschlussverfahren und Probenqualität, Fragen der Messunsicherheit und Qualitätssicherung sowie Aspekte der Repräsentativität und der Heterogenität von Bodenproben nicht in ausreichendem Maße im Hinblick auf Anforderungen chemischer Untersuchungen herausgearbeitet. Länderübergreifende und -spezifische Materialien stellen eine wertvolle Unterstützung für die Anwendung der Normen und Regelwerke des Anhangs 1 der BBodSchV dar, die einerseits selbst auf Normen zurückgreifen, andererseits aber praxisrelevante Handlungsempfehlungen einschließlich der Praxistauglichkeit und qualitätssichernder Maßnahmen ergänzen. Normen und Regelwerke des Anhangs 1 der BBodSchV sowie länderübergreifende und -spezifische Materialien für Bodenprobennahmen geben auch nach deren Aktualisierung keine Hinweise auf die Auswahl und Bewertung von Probennahmeverfahren hinsichtlich der Messunsicherheit. Die Bewertung der Verfahren erfolgt nur qualitativ im Hinblick auf Vor- und Nachteile und damit verbundenen Probennahmefehlern, die oftmals aber nicht bekannt sind und vernachlässigt werden. Insbesondere bestehen Unklarheiten zur Größe der Probennahmefehler, die im Zusammenhang mit der Heterogenität von Bodenproben stehen.

Der zweite Teil des vorliegenden Gutachtens (Kapitel 4 – 7) setzt sich mit der Bewertung von Bodenprobennahmeverfahren im Hinblick auf die Einschätzung der Messunsicherheit auseinander. Grundlage bilden Vergleichsprobennahmen und Ergebnisse aus Projekten zur externen Qualitätssicherung sowohl im Altlastenbereich als auch im Bereich landwirtschaftlicher Beprobungen. Erstmals wurden Auswertungen zur Probennahmeunsicherheit aus diesen Feldstudien zusammengefasst und kritisch bewertet. Die Auswertung von 13 Feldstudien zur Probennahmeunsicherheit ergab insgesamt einen Mittelwert von $u_s = 11 \%$, jedoch mit einer großen Streuung der Werte (Stabw = 12, Spannbreite 0 bis über 100 %). Obwohl die Anzahl der Datensätze insgesamt über 300 beträgt, ist es schwierig, die Probennahmeunsicherheit mit einzelnen Komponenten des Probennahmeverfahrens oder Standortfaktoren in Beziehung zu setzen. Der Grund dürfte in der Mannigfaltigkeit der Faktoren zu suchen sein, welche die Probennahmeunsicherheit beeinflussen. Dies sind zum einen Faktoren des Probennahmeverfahrens: Art der Probe,

Probennahmemuster, Probennahmetiefe, Beprobungsdichte, Probennahmegerät. Daneben spielen aber auch Standortfaktoren eine Rolle, vor allem die Heterogenität der Fläche und die Landnutzung. Erschwert wird der Vergleich von unterschiedlichen Probennahmeverfahren zudem noch durch den Einfluss des Analyts, der sich meist einer kausalen Erklärung entzieht. Das heißt als Konsequenz, dass die Datenlage bezüglich konkreter Zahlenwerte für u_s für klar definierte Probennahmeverfahren insgesamt immer noch unzureichend ist, obwohl gerade in den letzten 15 Jahren zahlreiche Studien zur Probennahmeunsicherheit veröffentlicht wurden. Für Oberflächenproben mit denen der mittlere Gehalt von gängigen Analyten abgeschätzt werden soll, bietet es sich daher an, für gängige Probennahmeverfahren die Probennahmeunsicherheit gleich dem hier gefundenen Mittelwert (d.h. $u_s = 11 \%$, bzw. für die erweiterte Probennahmeunsicherheit $U_s = 22 \%$) zu setzen, sofern keine weiteren Informationen über den Standort verfügbar sind. Existieren Informationen über die Heterogenität der beprobten Fläche, so kann dieser Wert modifiziert werden.

Weitere Ringversuche zur Einschätzung der Probennahmeunsicherheit bei der Beprobung von Böden sind notwendig, wobei unbedingt unterschiedliche Nutzungsformen und unterschiedliche prioritäre Schadstoffe, insbesondere organische Verbindungen, einbezogen werden sollten.

Summary

Compilation and evaluation of soil sampling procedures for precautionary and follow-up soil protection and the assessment of sampling uncertainty

This report consists of two parts:

- Part 1: Compilation and evaluation of soil sampling procedures for precautionary and follow-up soil protection (author: Dr. Jeanette Holz, LUFA Rostock of LMS) (section 2 and 3 of the report)
- Part 2: Assessment and analysis of sampling uncertainty for different sampling procedures (author: Dr. Uwe Buczko, Rostock University) (section 4 - 7 of the report)

Section 2 gives a review about the state of the art and current updates of regulations and standards for soil sampling procedures according to the annex 1 of the German Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV). The pertinent aspects of sample extraction, sample conservation, transport and storage are discussed. Since the adoption of the BBodSchV in 1999, there has been emerging an increasing discrepancy between rigid standard methods texts on the one hand, and the increasing theoretical knowledge and practical experiences on the other hand. These are not always accounted for in the updates of the standards texts.

Section 3 provides a comparative discussion of the soil sampling procedures prescribed by the standards and regulations with federal and state-specific texts, which have been, among others, produced in form of technical bulletins and guidelines for soil sampling in the framework of remediation of contaminated sites. The requirements for soil sampling are discussed and gaps concerning especially quality assurance including sampling errors and measurement uncertainty are highlighted. This will increasingly be required in the future within the framework of evaluation of soil sampling procedures. Currently there does not exist any single document covering all aspects of a guideline manual for soil sampling procedures, especially considering quality assurance and evaluation of measurement uncertainty. Even the term “soil sampling procedure” is not being used uniformly. In accordance with DIN ISO 10381-2:08.03, it is defined in this report as a two-stage process – soil exposure and sample extraction – including sample storage and transport, and documentation. In the BBodSchV the procedures for sample extraction are prescribed on the basis of standards concerning the investigation of soil quality (especially the standards series ISO 10381) and on the basis of geotechnical standards. Discrepancies between both groups of methods are inevitable. The

DIN 10381-2:08.03 and the other parts of the standards series ISO 10381, however, are more suited than the geotechnical standards for the quality requirements of possible contaminations occurring during soil sampling. In this standard, however, the relation between soil exploration and sample quality, questions of measurement uncertainty and quality assurance, and aspects of representativity and heterogeneity of soil samples are not sufficiently elaborated, especially concerning the requirements of chemical investigations.

Federal and state-specific reports and guidelines are an important supplement for the application of the standards and regulations of the annex 1 of the BBodSchV. They are based on the one hand themselves on standards, but supplement on the other hand the practical guidelines including practical feasibility and measures of quality assurance. Standards and regulations cited in annex 1 of the BBodSchV and federal and state-specific guidelines for soil sampling even in their updated versions do not provide information about selection and evaluation of soil sampling procedures as regards especially sampling uncertainty. Sampling procedures are evaluated merely in a qualitative manner (advantages and disadvantages, possible sampling errors are often neglected). The exact numerical values for sampling errors are mostly unknown, especially those which are connected with soil heterogeneity.

In part 2 of this report (sections 4 – 7) soil sampling procedures are discussed and analysed in more detail, especially with regard to sampling uncertainty. Field soil sampling studies (collaborative trials in sampling and other sampling trials) both on contaminated sites and on agricultural fields are analysed and evaluated in terms of sampling uncertainty and the pertinent factors which influence sampling uncertainty.

The evaluation of 13 field soil sampling studies yielded an overall mean soil sampling uncertainty value of $u_s = 11\%$. However, the scatter of u_s values for the whole dataset is large (standard deviation 12, range between 0 and more than 100%). Although the total number of datasets is more than 300, there is no clear relation between sampling uncertainty and soil sampling parameters or site-specific factors. This is probably due to the large variety of factors which possibly exert an influence on soil sampling uncertainty. These factors are related on the one hand to the soil sampling procedure: type of sample, sampling pattern, sampling depth, sampling density, sampling equipment. On the other hand, sampling uncertainty is influenced by site-specific factors, especially heterogeneity and land use. The quantitative analysis of sampling uncertainty of different sampling procedures is further impeded by the influence of different analytes which is often beyond any causal explanation.

Consequently, the overall database of numerical u_s values for defined soil sampling procedures is still too low, although there have published many studies especially during the past 15 years. Until a broader database is available, when sampling the surface soil with standard sampling procedures for estimation of mean contents of usual inorganic analytes, it is suggested to assume a sampling uncertainty value of $u_s = 11\%$ ($U_s = 22\%$ for expanded uncertainty), i.e., the mean value of the database analysed here. When more detailed information about the site is available, this value can be modified. For instance, when data about soil heterogeneity are available, higher or lower values of u_s can be adopted.

Nevertheless, this analysis demonstrated that much more comparative soil sampling studies are necessary to gain a broader database of sampling uncertainty for different sampling procedures, land use types, and analytes. A special focus should be on organic contaminants, for which until now virtually no information about sampling uncertainty is available.

1. Einleitung und Problemstellung

Im Rahmen des Vollzugs des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) sind Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmewerte sowie die Untersuchungsverfahren des Anhangs 1 der BBodSchV von großer Bedeutung (BBodSchG 1998, BBodSchV 1999). Die bei Untersuchungen im Rahmen der BBodSchV anzuwendenden Methoden müssen dem Stand der Bodenanalytik und der Probennahmeverfahren entsprechen. Mit dem vorliegenden Gutachten soll ein Beitrag im Rahmen der gegenwärtigen Novellierung der BBodSchV (Stand 2011) geleistet werden.

Der Art und der Durchführung von Probennahmeverfahren kommt eine außerordentliche Schlüsselfunktion zu. Eine nicht ordnungsgemäß durchgeführte Probennahme lässt sich weder durch hoch präzise Analysemethoden noch durch komplexe statistische Algorithmen nachträglich korrigieren. Anzustreben ist, das Fehlerpotenzial durch fundierte Planung und fachgerechte Durchführung so weit wie möglich einzuschränken. Dabei muss ein angemessenes Verhältnis von Nutzen zu Aufwand gegeben sein. Planung und Durchführung der Probennahme müssen so angelegt werden, dass mit einiger Sicherheit Präzision und Richtigkeit des Untersuchungsergebnisses in Bereichen liegen, die für den Zweck der Untersuchungen angemessen sind. Während die Angabe der Messunsicherheit für Prüfergebnisse im Anhang 1 der BBodSchV gefordert wird, gibt es keine Angaben zur Messunsicherheit der Probennahme. Die gesamte Messunsicherheit umfasst jedoch auch die Unsicherheit der Probennahme. In dieser Hinsicht ist die Probennahme in der Vergangenheit oft als „Stiefkind“ behandelt worden. In Zukunft spielen Angaben zur Qualitätssicherung einschließlich der Messunsicherheit für gesicherte Ergebnisse eine zunehmende Rolle, denn die räumliche Variabilität von Bodenmerkmalen (Heterogenität des Bodenkörpers, Inhomogenitäten von Bodenproben) und damit die Probennahmestrategie, die Probenentnahme sowie die Probenvorbereitung können einen erheblichen Beitrag zur gesamten Unsicherheit von Untersuchungsergebnissen liefern.

Das vorliegende Gutachten setzt bei der Probennahme an und befasst sich mit dem aktuellen Stand und der Bewertung von Probennahmeverfahren für den vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutz, wobei insbesondere die Probennahmeverfahren für Böden betrachtet werden. Gerade bei Bodenproben spielt die Ergebnisunsicherheit aufgrund der räumlichen Variabilität und Heterogenität eine große Rolle. Die Bodenluft, welche auch ein Beprobungsmedium der BBodSchV darstellt, ist nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

Teil 1 Zusammenstellung und Bewertung von Probennahmeverfahren für den vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutz

2. Stand der Normen und Regelwerke der BBodSchV sowie länderübergreifender und -spezifischer Materialien zur Bodenprobennahme

2.1 Normen und Regelwerke

Im Kapitel 2 „Probennahme“ des Anhangs 1 der BBodSchV sind die Anforderungen an die Probennahme von Boden, Bodenmaterial und sonstigen Materialien sowie von Bodenluft bei der Untersuchung von Verdachtsflächen und Altlastenstandorten festgelegt (BBodSchV 1999).

Das Vorgehen bei der Probennahmeplanung, die vor der eigentlichen Probennahme notwendig ist, wird in den Kapiteln 2.1 bis 2.3 des Anhangs 1 der BBodSchV behandelt. Diese richten sich u.a. insbesondere nach dem im Einzelfall berührten Wirkungspfaden und der auf Grund der Erfassungsergebnisse vermuteten vertikalen und horizontalen Schadstoffverteilung. Es werden Vorgaben zur Festlegung der Probennahmestellen und Beprobungstiefen bei Bodenproben gegeben. Die Probennahmeplanung im Sinne der Festlegung einer Probennahmestrategie und der Erstellung von Probennahmeprogrammen ist nicht Gegenstand des vorliegenden Gutachtens (BBodSchV 1999).

Kapitel 2.4 und 2.5 des Anhangs 1 der BBodSchV enthalten jeweils Anforderungen an die „Probengewinnung“ und „Probenkonservierung, -transport und -lagerung“ wobei das Kapitel 2.4.1 für Boden, Bodenmaterial und sonstige Materialien gilt. Diese Kapitel mit deren normativen Verweisen werden nähert betrachtet (BBodSchV 1999).

2.1.1 Anhang 1 BBodSchV - Kapitel 2.4 „Probengewinnung“ und Kap. 2.5 „Probenkonservierung, -transport und -lagerung“

Kapitel 2.4 „Probengewinnung“ des Anhangs 1 der BBodSchV enthält Vorgaben zur notwendigen Probenmenge und Anwendung bzw. Auswahl von Verfahren zur Entnahme von Böden, Bodenmaterial und sonstigen Materialien. Für die Durchführung der Bodenprobennahme sind laut Kapitel 2.4 des Anhangs 1 der BBodSchV die in Tabelle 1 zusammen gestellten Normen maßgebend. Die zur Durchführung der Probennahme relevanten Normen der Probenkonservierung, -transport und -lagerung unter Kapitel 2.5 des Anhangs 1 der BBodSchV enthält ebenfalls die Tabelle 1.

Diese Normen, 1999 zur Verabschiedung der BBodSchV teilweise in der Überarbeitungsphase und im Entwurf vorliegend, haben sich im Rahmen der Anpassung an die internationale Normung und den Stand der Technik sowie dem fortschreitenden Erkenntniszuwachs und praktischer Erfahrungen geändert bzw. Normen sind neuerschienen als Ersatz für bisher gültige.

Die Normenänderungen machen die Anwendung der Vorgaben der BBodSchV nicht unbedingt einfacher. Der Fachbeirat Bodenuntersuchungen des UBA (FBU) verfolgt diesen Umstand und gibt laufend Empfehlungen für die Aufnahme der geänderten Normen bei Fortschreibung der BBodSchV (dokumentiert im „Handbuch der Bodenuntersuchungen“) (Handbuch der Bodenuntersuchung). 2005 führte der FBU erstmalig eine „Vergleichende Bewertung der Verfahren und Methoden des Anhangs 1 der BBodSchV mit aktuellen Fassungen“ durch. Die Veröffentlichung wurde mit dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit abgestimmt (FBU 2005). 2009 erfolgte eine weitere Aktualisierung der Normen vom Fachbeirat Bodenuntersuchungen des UBA (FBU 2009).

Tabelle 1: Überblick über Normen / Regelwerke der Kapitel 2.4.1 und 2.5 des Anhangs 1 der BBodSchV (FBU 2005, 2009; aktualisiert durch Handbuch Bodenuntersuchungen)

Anhang 1 der BBodSchV Stand 1999	Aktuelle Fassung / Alternativverfahren	Empfehlung des FBU (Gleichwertige Verfahren, FBU 2009)
Kapitel 2.4.1 Probengewinnung; Boden, Bodenmaterial und sonstige Materialien		
E DIN ISO 10381-2: 02.96 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 2: Anleitung für Probennahmeverfahren (ISO/ DIS 10381 - 2: 1995)	DIN ISO 10381-2: 08.03 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 2: Anleitung für Probennahmeverfahren (ISO 10381-2: 2002)	Der Norm-Entwurf wurde mit geringen Änderungen übernommen. Der FBU empfiehlt die Aufnahme der DIN ISO 10381-2: 08.03 bei der Fortschreibung der BBodSchV (FBU 2005, 2009)
DIN 18123: 11.96 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung	DIN 18123: 03.10 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung LAGA PN 98 Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung / Beseitigung von Abfällen	Der FBU empfiehlt die Anwendung der DIN 18123 zur Bestimmung der Korngrößenverteilung. Zur Ermittlung der erforderlichen Probenmenge bei der Bodenprobennahme führt die Anwendung dieser Norm bei grobkörnigem Material zu unpraktikabel großen Mengen. Für diese Fragestellung empfiehlt der FBU anstelle der DIN 18123 die LAGA PN 98 anzuwenden und bei einer Fortschreibung der BBodSchV aufzunehmen (FBU 2005, 2009)

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Anhang 1 der BBodSchV Stand 1999	Aktuelle Fassung / Alternativverfahren	Empfehlung des FBU (Gleichwertige Verfahren, FBU 2009)
DIN 4021: 10.90 Baugrund - Aufschluss durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben	DIN 4021: 10.90 zusammen DIN 4022-1:1987-09, DIN 4022- 2:1981-03 und DIN 4022- 3:1982-05 zurückgezogen: Ersatz durch DIN EN ISO 22475-1:01.07 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probennahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung - zusammen mit DIN EN ISO 14688-1: 01.03 und DIN EN 14689-1:04.04	Der FBU hat die Aufnahme der DIN EN ISO 22475-1:01.07 bei der Fortschreibung des BBodSchV vorgeschlagen (FBU 2005, 2009).
Kapitel 2.5 Probenkonservierung, -transport und -lagerung		
E DIN ISO 10381-1: 02.96 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probennahme- programmen (ISO/ DIS 10381 - 1: 1995)	DIN ISO 10381-1: 08-03 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probennahmeprogrammen (ISO 10381-1: 2002)	Der Norm-Entwurf wurde mit geringen Änderungen übernommen. Der FBU empfiehlt die Aufnahme der DIN ISO 10381-1: 08-03 bei der Fortschreibung der BBodSchV.
E DIN ISO 14507: 02.96 Bodenbeschaffenheit - Probenvorbehandlung für die Bestimmung von organischen Verunreinigungen in Böden (ISO/DIS 14507)	DIN ISO 14507: 07.04 Bodenbeschaffenheit - Probenvorbehandlung für die Bestimmung von organischen Verunreinigungen in Böden (ISO 14507:2003) DIN 19474:07.09 Untersuchung von Feststoffen – Probenvorbehandlung, - vorbereitung und – Aufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen (Ersatz für DIN ISO 11464:12.06 Bodenbeschaffenheit - Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen und teilweise Ersatz für DIN ISO 14507:07.04)	Die Unterschiede zwischen dem Norm- Entwurf E DIN ISO 14507: 02.96 und der DIN ISO 14507: 07.04 sind gering. Gegen diese Norm bestehen aber erhebliche Vorbehalte wegen des hohen Aufwandes, daher empfiehlt der FBU die Aufnahme der DIN ISO 14507: 07.04 nicht mehr (FBU 2009). Dies war 2005 noch der Fall (FBU 2005). Das Mahlen von Proben unter flüssigem Stickstoff ist nur in Einzelfällen für die Untersuchung von mäßig flüchtigen organischen Verbindungen notwendig, in der Routine ist der hohe Aufwand gemäß dieser Norm nicht erforderlich. In dieser Norm wird zudem auf die einzelnen Analyse-Normen verwiesen, in denen spezielle Verfahren der Probenvorbereitung beschrieben sind, die dann anzuwenden sind (FBU 2005, FBU 2009). Der FBU empfiehlt die Anwendung der DIN 19474:07.09 (FBU 2009).

In die Anforderungen zur Durchführung der Bodenprobennahme des Anhangs 1 der BBodSchV sind sowohl Normen aus dem Bereich Baugrunduntersuchungen bzw. Geotechnischer Erkundung und Untersuchung als auch aus dem Bereich der Untersuchung der Bodenbeschaffenheit integriert. Die Richtlinie LAGA PN 98 erstreckt sich auf den Bereich der Abfalluntersuchungen (LAGA 2001).

Kapitel 2.4.1 des Anhangs 1 der BBodSchV

Probengewinnung; Boden, Bodenmaterial und sonstige Materialien

Der 1999 bei der Verabschiedung der BBodSchV vorliegende Entwurf E DIN ISO 10381-2:02.96 wurde 2003 mit nur redaktionellen Änderungen in die **DIN ISO 10381-2:08.03** überführt (DIN ISO 10381-2, 2003). Diese Norm enthält eine allgemeine Anleitung zur Entnahme und Aufbewahrung von Bodenproben, die anschließend zur Gewinnung von Angaben über die Bodenbeschaffenheit einschließlich des Nährstoffgehaltes und des Vorhandenseins von Kontaminationen untersucht werden können. Technische Rahmenbedingungen und Durchführungsmöglichkeiten bei der Entnahme von Bodenproben mittels manueller und geräteunterstützter Verfahren werden beschrieben. Somit ist der Anwendungsbereich dieser Norm aber auch des Normentwurfs auf die Untersuchung von Verdachtsflächen und Altlastenstandorten bzw. zur Entnahme von Bodenproben zur Durchführung chemischer Analysen ausgelegt. Zusätzliche Angaben zu leichten Probennahmegeräten sind den folgenden Normen – Erdborgeräte für den Landeskulturbau - zu entnehmen:

- **DIN 19671-1:05.64** (DIN 19671-1, 1964)
- **DIN 19671-2:11.64** (DIN 19671-1, 1964)
- **DIN 19672-1:04.68** (DIN 19672-2, 1968)
- **DIN 19672-2:04.68** (DIN 19672-2, 1968)

Diese aus dem Jahr 1964 und 1968 stammenden Normen sind vom Normenausschuss in den 90er Jahren in Absprache mit den Geräteherstellern bestätigt worden (Handbuch der Bodenuntersuchung). Die DIN ISO 10381-2:08.03 (DIN ISO 10381-2, 2003) greift teilweise auf die DIN 4021:10.90 zurück, eine Norm der Baugrunduntersuchung, die 2007 zurückgezogen und durch die DIN EN ISO 22475-1:01.07 (Geotechnische Erkundung und Untersuchung) (DIN EN ISO 22475-1, 2007) ersetzt wurde.

Entgegen der DIN ISO 10381-2:08.03 legt die **DIN EN ISO 22475-1:01.07** die Entnahme von Boden- und Felsproben sowie von Grundwasserproben und der Errichtung von Grundwassermessstellen im Rahmen von geotechnischen Untersuchungen fest. Diese Untersuchungen werden u.a. zur allgemeinen Prüfung der Eignung des Untergrunds für bautechnische Zwecke und der Schichtenbeschreibung durchgeführt. Die Norm weist ausdrücklich darauf hin, dass sie nicht für die Gewinnung von Bodenproben für landwirtschaftliche und umweltbezogene Bodenuntersuchungen gilt. Dies soll nach der Normenreihe DIN ISO 10381 erfolgen.

Mit dem Ersatz der DIN 4021:10.90 durch die DIN EN ISO 22475-1:01.07 wurde vom FBU geprüft, ob diese neue Norm auch die DIN 4021:10.90 im Anhang 1 der BBodSchV ersetzen kann. So ist dieser Ersatz insbesondere durch die erweiterte Darstellung moderner Verfahren der Probengewinnung gerechtfertigt und der FBU hat die Aufnahme der DIN EN ISO 22475-1:01.07 in den Anhang 1 im Rahmen der Novellierung der BBodSchV vorgeschlagen (Handbuch Bodenuntersuchung, FBU 2009). Es ist zu beachten, dass diese Norm zusammen mit den Normen der Geotechnische Erkundung und Untersuchung – „Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung“ - **DIN EN 14688-1:01.03** und „Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung“ - **DIN EN 14689-1:04.04** die DIN 4021 ersetzt (DIN EN 14688-1, 2003; DIN EN 14689-1, 2004). Folgende Änderungen wurden in der DIN EN ISO 22475-1:01.07 gegenüber DIN 4021:10.90 und der DIN 4022-Normenreihe vorgenommen (FBU 2009):

- a) Anpassung an internationale Festlegungen
- b) Weitergehende Festlegungen für Aufschluss- und Probennahmeverfahren in Boden und Fels
- c) Neuaufnahme eines Abschnittes zur Berichterstattung
- d) Neuaufnahme eines Abschnittes Feldprotokolle in einem informativen Anhang
- e) Neuaufnahme von Beispielen für Geräte und Ausrüstung für Bohrungen und die Entnahme von Boden-, Fels- und Wasserproben in informative Anhänge

Die **DIN 4021:10.90** machte Vorgaben für die Bodenprobennahme für die Ermittlung bodenmechanischer Kenndaten zur Bewertung der Eignung des Bodens als Baugrund und war auch wie die „neue“ **DIN EN ISO 22475-1:01.07** nicht für die Probennahme hinsichtlich der Bewertung einer möglichen Verunreinigung des Bodens mit Schadstoffen geeignet und

begrenzt auf den Altlastenbereich anwendbar. Trotzdem hat diese Norm Eingang in die Praxis der Untersuchung von Altlasten gefunden.

Für die Ermittlung der notwendigen Probenmenge bei der Bodenprobennahme ist die **DIN 18123:11.96** im Anhang 1 der BBodSchV aufgeführt. Die Anwendung dieser Norm führt bei grobkörnigem Material jedoch zu unpraktikabel großen Mengen. Für diese Fragestellung empfiehlt der FBU anstelle der DIN 18123:03.10 (im März 2010 aktualisiert) die LAGA-Richtlinie PN 98 (LAGA 2001) anzuwenden und bei einer Fortschreibung der BBodSchV in den Anhang 1 aufzunehmen (FBU 2005, FBU 2009).

Kapitel 2.5 des Anhangs 1 der BBodSchV

Probenkonservierung, -transport und -lagerung

Laut Kapitel 2.5 des Anhangs 1 der BBodSchV sind für Probenkonservierung, -transport und -lagerung die Untersuchungsvorschriften der Analysenvorschriften in Kapitel 3.1.3 des Anhangs 1 zu beachten. Bei Fehlen derartiger Regelungen wird auf die **DIN ISO 10381-1:02.96** (ersetzt durch **DIN ISO 10381-2:08.03**) verwiesen. Die **DIN ISO 10381-1:08.03** stellt ohne ein definiertes Verfahren vorzuschlagen allgemeine wesentliche Punkte der Probennahme dar: u.a. Formulierung der Fragestellung einer Bodenuntersuchung, Voruntersuchung, Sicherheitsaspekte bei der Probennahme, Probennahme, Probennahmebericht, Auswahl einer geeigneten Probennahmestrategie in Abhängigkeit von der vermuteten räumlichen Verteilung eines Parameters. Die Norm listet Aspekte auf, die bei jedem Probennahmeprogramm berücksichtigt werden sollten. Die Wahl der geeigneten Probennahmestrategie ist immer einzelfallbezogen durchzuführen. Dieser Teil zusammen mit den Teilen 2 und 4 der Normenreihe DIN ISO 10381 angewendet werden. Er enthält keine Angaben u.a. zu Probennahmegeräten.

Nach Anhang 1 der BBodSchV ist beim Transport und der Lagerung von Bodenproben der Entwurf **E DIN ISO 14507:02.96** aktualisiert **DIN ISO 14507:04.07** (DIN ISO 14507, 2007) anzuwenden. Da die Bestimmung organischer Schadstoffe in Böden ganz wesentlich durch die Vorbehandlung beeinflusst wird, stellt diese Norm auch ein wichtiges Verbindungsglied hinsichtlich der Abstimmung mit dem analytischen Labor dar. Die Norm enthält die wichtigsten Vorbehandlungsverfahren, die sich im Routinebetrieb bewährt haben (Handbuch Bodenuntersuchung). Im Vergleich zum Entwurf wurden in der Norm DIN ISO 14507:04.07 einige Ergänzungen eingefügt, wobei Ergebnisse der Validierung dargelegt wurden. Sonst ergaben sich nur Änderungen hinsichtlich normativer Verweise. Allerdings bestehen erhebliche Vorbehalte wegen des befürchteten großen Aufwandes, insbesondere beim

Mahlen von Proben unter flüssigem Stickstoff. In der Routine ist der Aufwand nicht erforderlich. Außerdem ist diese spezielle Vorgehensweise nur in Einzelfällen notwendig, wenn mäßig flüchtige organische Verbindungen bei Proben mit erheblichen Anteilen > 2 mm und inhomogener Verteilung des Kontaminanten untersucht werden sollen und eine sehr hohe Genauigkeit gefordert ist. Die Probenvorbehandlung entfällt bei Proben zur Untersuchung flüchtiger organischer Verbindungen. Es wird auf die Analysen-Normen verwiesen, in den stoffspezifisch spezielle Verfahren der Probenvorbereitung eingeschlossen sind (FBU 2005, FBU 2009). Dennoch empfiehlt der Fachbeirat Bodenuntersuchungen die DIN ISO 14507:04.07 nicht mehr, sondern die **DIN 19747:07.09** (DIN 194747, 2009), die eine matrixübergreifende Norm zur Probebehandlung darstellt (FBU 2009). In diese Norm wurden die wesentlichen Elemente der DIN ISO 11464:12.06 (DIN ISO 11464, 2006) und der DIN ISO 14507:04.07 (DIN ISO 14507, 2007) aufgenommen. Die DIN 19747:07.09 beschreibt Vorgehensweisen bei der Probenvorbehandlung, Probenvorbereitung und Probenaufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen von Feststoffproben, wie z.B. Böden, bodenähnlichen Materialien, Sedimenten sowie Abfällen. Die Messwerte können sowohl qualitativ als auch quantitativ für eine normgerechte Beurteilung und Bewertung auf Grundlage von Vorgabewerten herangezogen werden (Handbuch Bodenuntersuchung). Durch die Veröffentlichung der DIN 19747:07.09 wurde die DIN ISO 11464:12.06 ersetzt, teilweise auch DIE DIN ISO 14507:04.07.

2.1.2 Anhang 1 BBodSchV Kapitel 2.1 „Probennahmeplanung für Bodenuntersuchungen“ und Kapitel 2.3 „Probennahmeplanung bei abgeschobenem und ausgehobenem Bodenmaterial“

Weitere Normen insbesondere bei der Probennahmeplanung sind in den Kapiteln 2.1 und 2.3 des Anhangs 1 der BBodSchV verankert. Die Probennahmeplanung soll eigentlich nicht Gegenstand des vorliegenden Gutachtens sein. Einerseits spielen Probennahmeplanung und -strategie und Durchführung der Probennahme insbesondere auch bei der Auswahl der Probennahmeverfahren zusammen. Andererseits enthalten diese Normen auch wesentliche Vorgaben zur Probengewinnung, -entnahme bis hin zur Lagerung, Transport und Dokumentation. Tabelle 2 gibt einen Überblick über diese Normen und deren aktuellen Fassungen.

Tabelle 2: Überblick über Normen der Kapitel 2.1 und 2.3 des Anhangs 1 der BBodSchV* (FBU 2005,2009; aktualisiert durch Handbuch der Bodenuntersuchungen)

Anhang 1 der BBodSchV Stand 1999	Aktuelle Fassung / Alternativverfahren	Empfehlung des FBU, gleichwertige Verfahren (FBU 2009)
Kapitel 2.1* Probennahmeplanung für Bodenuntersuchungen - Festlegung der Probennahmestellen und Beprobungstiefen		
E DIN ISO 10381-4: 02.96 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 4: Anleitung für das Vorgehen bei der Untersuchung von natürlichen, naturnahen und Kulturstandorten (ISO/ DIS 10381 - 4: 1995)	DIN ISO 10381-4: 04.04 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 4: Anleitung für das Vorgehen bei der Untersuchung von natürlichen, naturnahen und Kulturstandorten (ISO 10381-4: 2003)	Der Norm-Entwurf wurde mit geringen Änderungen übernommen. Der FBU empfiehlt die Aufnahme der DIN ISO 10381-4: 04.04 bei der Fortschreibung der BBodSchV (FBU 2005, 2009).
Kapitel 2.3 Probennahmeplanung bei abgeschobenem und ausgehobenem Bodenmaterial		
DIN 52101: 03.88 Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen - Probennahme	DIN 52101:06.05 Prüfverfahren für Gesteinskörnungen – Probennahme Diese Norm gilt ergänzend zu DIN EN 932-1:11.96	Die DIN 52101: 03.88 wurde zurückgezogen. Der FBU empfiehlt die DIN 52101:06.05 in Ergänzung der DIN EN 932-1, die bereits in der BBodSchV zitiert wird und LAGA PN 98 (FBU 2009).
DIN EN 932-1: 11.96 Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probennahmeverfahren; Deutsche Fassung EN 932-1:1996 anzuwenden	LAGA PN 98 Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung / Beseitigung von Abfällen	Der FBU empfiehlt die LAGA PN 98 in Ergänzung der DIN EN 932-1: 11.96 bei den Probennahmen aus abgeschobenem und ausgehobenem Bodenmaterial anzuwenden und bei einer Fortschreibung der BBodSchV aufzunehmen (FBU 2009).

* DIN ISO 10381-1:08.03, DIN ISO 10381-2:08.03, DIN EN ISO 22475-1:01.07 (Ersatz für DIN 4021), die auch nach BBodSchV für die Probennahmeplanung anzuwenden sind, enthält bereits Tabelle 1

Die **DIN ISO 10381-4:04.04** beschreibt die sachgerechte Vorgehensweise bei der Entnahme, dem Transport und der Zwischenlagerung von Bodenproben in gestörter und ungestörter Lagerung einschließlich der Entnahmetechnik aus Oberböden und aus größerer Bodentiefe (DIN ISO 10381-4, 2004). Weiterhin bietet sie Entscheidungshilfen zur Wahl der geeigneten Probenart (Einzelprobe, Mischprobe, Gewichtsprobe, Volumenprobe) in Abhängigkeit vom Zweck der Untersuchung. Angesprochen werden u.a. die landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Nutzung der Böden.

Ein besonderer Fall der Bodenprobennahme ist die Probennahme bei abgeschobenem und ausgehobenem Bodenmaterial. Hier empfiehlt der FBU die **DIN 52101:06.05** (DIN 52101, 2005) in Ergänzung der **LAGA- Richtlinie PN 98** (LAGA 2001) und der **DIN EN 932-1:11.96** (DIN EN 932-1, 1996), die bereits in der BBodSchV verankert ist, anzuwenden und bei einer Fortschreibung der BBodSchV aufzunehmen (FBU 2009). Die DIN 52101:03.88 wurde zurückgezogen und durch DIN EN 932-1:11.96 (DIN EN 932-1, 2006) ersetzt. Eine Neufassung DIN 52101:06.05 wurde als Ergänzung zu DIN EN 932-1:11.96 veröffentlicht.

Neben den in Tabelle 1 und 2 aufgeführten Normen ist nach der Verabschiedung der BBodSchV eine neue Norm in der Normenreihe DIN ISO 10381 „Bodenbeschaffenheit – Probennahme“ 2007 veröffentlicht worden: **DIN ISO 10381-5:02.07** Teil 5: Anleitung für die Vorgehensweise bei der Untersuchung von Bodenkontaminationen auf urbanen und industriellen Standorten (ISO 10381-5:05.07) (DIN ISO 10381-5, 2007). Das Hauptanliegen dieser Norm ist die Entwicklung von Kontaminationshypothesen, die in schrittweisen Prozessen durch Ergänzung weiterer Informationen bestätigt oder verworfen werden. In diesem Teil von ISO 10381 wird die Untersuchung von urbanen und industriellen Standorten beschrieben, die kontaminiert sind oder von denen dies vermutet wird. Mit dieser Norm steht eine Anleitung für das Zusammentragen von Informationen, die für die Gefährdungsabschätzung und/oder die Entwicklung von Plänen für Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind. So gibt diese Norm auch wertvolle Hinweise zu Beprobungsdichten, Probennahmepunkten und Raster u.a. auch in Hinblick auf die Herstellung von Mischproben.

Die Sicherheit sowie der Arbeits- und Gesundheitsschutz spielen insgesamt eine übergeordnete Rolle und sind insbesondere bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen von großer Bedeutung. Hier ist die **DIN ISO 10381-3:08.02** Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 3: Anleitung zur Sicherheit – zu beachten, die vom FBU für die Aufnahme bei der Fortschreibung der BBodSchV empfohlen wurde (DIN ISO 10381-3, 2002; Handbuch der Bodenuntersuchung). Aufgrund der Änderung der Rechtsgrundlage, wie Abfallrecht und Gefahrstoffrecht, wurde die ZH 1/183:04.97, die in der BBodSchV (1999) aufgeführt ist, aktualisiert und umbenannt in Berufsgenossenschaftliche Regel **BGR 128 Kontaminierte Bereiche** des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Fachausschuss „Tiefbau“ der BGZ (BGR 128, 2006; FBU 2005, 2009). Auch die Teile 1, 2, 4 und 5 der Normenreihe ISO 10381 enthalten teilweise Anforderungen und Hinweise zum Arbeits- und Gesundheitsschutz. Nicht zu unterschätzen ist neben dem Schutz von Personen und Gebäuden auch die Beachtung des Umweltschutzes insbesondere bei der Bodenprobennahme im Bereich der Altlastenuntersuchungen (DIN ISO 10381-2, 2003).

2.2 Länderübergreifende und -spezifische Materialien und Vorgaben

Neben den Normen und Regelwerken existieren zahlreiche länderübergreifende und -spezifische Vorgaben und Empfehlungen u.a. in Form von Arbeitshilfen und Merkblättern für die Probennahme von Böden im Bereich der Altlastenuntersuchungen. So spielen bei länderübergreifenden Materialien zur Bodenuntersuchung insbesondere die Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), die Oberfinanzdirektion (OFD) Hannover und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) sowie der Ingenieurtechnische Verband Altlasten e.V. (ITVA) eine wichtige Rolle:

- „Anforderungen an Probennahme, Probenvorbehandlung und chemische Untersuchungsmethoden auf Bundesliegenschaften“ (aktualisierte Fassung: Oktober 2008) auf Grundlage der Verwaltungsvereinbarung zwischen der OFD Hannover und der BAM vom 05.09.1995 (nachfolgend „*OFD-BAM-Anforderung*“ genannt) (OFD-BAM 2008)
- „Arbeitshilfe Qualitätssicherung“ LABO – Altlastenausschuss (ALA), Unterausschuss „Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung“, Mai 2002; Kapitel 2: Gewinnung von Boden-, Bodenluft- und Grundwasserproben, Beitrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz und des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (nachfolgend „*LABO-Arbeitshilfe*“ genannt) (LABO 2002)
- ITVA-Arbeitshilfe F2-1 „Aufschlussverfahren zur Feststoffprobengewinnung für die Untersuchung von Verdachtsflächen und Altlasten“, Berlin 1995 (nachfolgend „*ITVA-Arbeitshilfe*“ genannt) (ITVA 1995)

Folgende ausgewählte länderspezifische Vorschriften herausgegeben von den jeweiligen Landesumweltämtern sind von Bedeutung:

- Merkblatt Nr. 3.8/4 „Probennahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer“ Stand: 15. Februar 2010, alte Nummer: 3.8/4 vom 14. März 2003, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Referate 95 und 92 (nachfolgend „*Merkblatt Nr. 3.8/4*“ genannt) (BLfU 2010)
- Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 2: „Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen und Schadensfällen“, Wiesbaden 2002, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (nachfolgend „*Handbuch Altlasten*“ genannt) (HLUG 2002)

- „Empfehlungen zur Entnahme von Feststoffproben für die Analyse auf leichtflüchtige Verbindungen im Altlastenbereich“, August 2002, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Abteilung 4 - Wasser und Altlasten (nachfolgend *„Empfehlungen für leichtflüchtige Verbindungen“* genannt) (LfUBW 2002)
- „Probennahme von Boden und Abfall im Rahmen der Altlastenbearbeitung“, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 1997 (nachfolgend *„Bericht Boden-Abfall“* genannt) (LfUBW 1997)

Diese meist als Arbeitshilfen und Empfehlungen erstellten Materialien zeigen einerseits Überschneidungen, andererseits greifen sie in unterschiedlichem Maße auf Normen wie die DIN ISO 10381-2:08.03 und die DIN 4021:10.90 (entsprechend neu die DIN EN ISO 22475-1:01.07) zurück. Das „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010) und die „OFD-BAM-Anforderung“ (OFD-BAM 2008) nehmen u.a. bei der Wahl der Aufschlussverfahren gleichermaßen Bezug auf die o.g. Normen. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Materialien oftmals auf veraltete und zurückgezogene Normen aufbauen. Hier sind die „OFD-BAM-Anforderung“ und das „Merkblatt 3.8/4“ hervorzuheben, die jeweils 2008 und 2010 überarbeitet und aktualisiert worden sind. Dabei lehnt sich die „OFD-BAM-Anforderung“ streng an den Anhang 1 der BBodSchV. Das „Merkblatt 3.8/4“ dagegen ist eine wichtige praktische Handlungsanleitung und wurde hinsichtlich konkreter Vorgaben zur Durchführung und Dokumentation der Probennahme zur Erhöhung der Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Untersuchungsergebnisse überarbeitet (BLfU 2010):

- Qualitätssicherung bei der Durchführung und Dokumentation der Probennahme von Boden und Bodenluft
- Erstellung einer Checkliste zur Überprüfung der Einhaltung der Merkblattanforderungen hinsichtlich der Qualitätssicherung
- Überarbeitung der Muster-Probennahmeprotokolle unter Beachtung der Qualitätssicherung und der Praxistauglichkeit

Wertvolle Hinweise bietet die „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002), die sich bei der Auswahl der Aufschlussverfahren auf die „ITVA Arbeitshilfe“ (ITVA 1995) stützt.

In den folgenden Kapiteln werden wichtige Aspekte der Probennahmeverfahren hinsichtlich einer Handlungsanleitung mit qualitätssichernden Maßnahmen herausgearbeitet. Gemeinsamkeiten und Widersprüche sowie fehlende Aspekte der Qualitätssicherung und Messunsicherheit der aufgeführten Werke und Normen sind zu diskutieren.

Ein vom UBA 2003 in Auftrag gegebenes Gutachten zur Überprüfung von Methoden des Anhanges 1 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) zur Beurteilung der Bodenqualität soll Beachtung finden (nachfolgend „UBA-Vorhaben“ genannt) (Meiler et al. 2003).

3. Vergleich und Bewertung der Probennahmeverfahren

3.1 Begriff „Probennahmeverfahren“

Hinsichtlich der Erstellung einer Handlungsanleitung für Probennahmeverfahren von Böden im vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutz sollte der Begriff „Probennahmeverfahren“ eindeutig festgelegt sein. Der in dem vorliegenden Gutachten verwendete Begriff „Probennahmeverfahren“ beinhaltet die Aufschlussverfahren, die Probengewinnung (Probenentnahme) einschließlich des Probentransportes und der -lagerung von Boden und Bodenmaterialien.

So wird dieser Begriff auch in der DIN ISO 10381-2:08.03 verstanden (DIN ISO 10381, 2003). Jedes Probennahmeverfahren besteht aus zwei getrennten Schritten:

- Freilegen der Stelle der Probennahme (Entfernen der Abdeckung oder Versiegelung, Graben oder Bohren eines Loches, um die für die Probennahme geforderte Tiefe zu erreichen) und
- Entnahme der Bodenprobe (Probengewinnung)

Diese beiden Schritte hängen voneinander ab und müssen die Anforderungen der Probennahmeregeln erfüllen (DIN ISO 10381-2, 2003). Während Arbeitshilfen und Merkblätter inhaltlich als „Handlungsanleitung“ dementsprechend aufgebaut sind, ist dies sowohl im Entwurf E DIN ISO 10381-2:02.96 als auch in der „neuen“ DIN ISO 10381-2:08.03 nicht der Fall. Hier sind unter dem Kapitel „Probennahmeverfahren“ die Aufschlussverfahren (Bohrverfahren, Schurf) und das „Fördern der Probe“ zusammenhängend dargestellt. Dann schließt sich in einem weiteren Kapitel die Aufbewahrung der Proben an.

Bereits das „UBA-Vorhaben“ stellte fest, dass der Begriff „Probennahmeverfahren“ nicht immer einheitlich verwendet wird (Meiler et al. 2003). Es bestehen Unklarheiten, ob das Probennahmeverfahren nur die Aufschlussmethoden darstellt, nur die eigentliche Entnahme des Bodens oder sogar alle Tätigkeiten von der Untersuchungsstrategie bis zur Probeneinlagerung. So wird aufgrund der Abhängigkeit zwischen der Probenqualität und dem Bohrverfahren vorgeschlagen, unter dem Begriff „Probennahmeverfahren“

- das Bohr- und Aufschlussverfahren und
- die Gewinnung der Bodenprobe einschließlich Proben transport

zusammenzufassen (Meiler et al. 2003).

Dieser Ansatz wird in diesem Gutachten weiter verfolgt.

Nach E DIN ISO 11074:06.06 sind Probennahmeverfahren Arbeitsanforderungen und / oder -anweisungen im Bezug auf die Anwendung eines bestimmten Probennahmeplans (E DIN ISO 11074, 2006). Dies deckt sich auch mit der Begriffsdefinition der LAGA-Richtlinie PN 98, die aus dem Bereich der Bodenuntersuchungen nach abfallrechtlichen Bestimmungen kommt (LAGA 2001). Demnach sind Probennahmeverfahren Durchführungsanforderungen und -anleitungen bezogen auf einen speziellen Probennahmeplan inklusive der Probenvorbereitung (vereinigen, mischen, homogenisieren, verjüngen) bis zum Vorliegen der Probe für den gewünschten Zweck, technische Umsetzung und Anleitung.

3.2 Probenauswahl, Entnahme von Bodenproben, Misch- und Einzelproben

Misch- und Einzelproben stellen prioritäre Begriffe im Zusammenhang mit der Repräsentativität der Probennahme von Böden dar. Nach DIN ISO 10381-1:08.03 sind Untersuchungen von **Einzelproben** dann erforderlich, wenn die Verteilung einer Substanz in einer definierten Fläche oder in der Tiefe gesucht ist. Die Norm definiert den Begriff Einzelprobe (Punktprobe): „Probe aus einem Material, das an einem einzelnen Punkt entnommen wurde“ (DIN ISO 10381-1, 2003).

Die „LABO-Arbeitshilfe“ benennt einige Fälle (LABO 2002):

- bei Antreffen optisch auffälliger Horizonte,
- bei Antreffen geruchlich besonders auffälliger Horizonte wie z. B. Ölkontaminationen,
- bei Antreffen von auffälligen Gegenständen wie z. B. Kanistern mit Inhalt,
- für die Untersuchung auf leichtflüchtige organische Schadstoffe,
- aus den Bereichen direkt über dichtenden Bodenschichten,
- aus der Grundwasserwechselzone

Mischproben sind nach DIN ISO 10381-1:08.03 dann erforderlich, wenn die durchschnittliche Konzentration einer Substanz in einem definierten Horizont/einer Schicht gesucht ist (DIN ISO 10381-1, 2003).

Das „Merkblatt 3.8/4“ betrachtet diesbezüglich die Wirkungspfade. Für den Wirkungspfad Boden-Gewässer sollten die entnommenen Bodenproben repräsentativ für die jeweilige Mächtigkeit des zu beprobenden Horizonts, bzw. für die zu beprobende Bodentiefe, sein. Die Probenentnahme muss immer horizont- bzw. schichtbezogen erfolgen und darf nicht über Schichtwechsel durchgeführt werden. Dabei sind die beprobten Tiefenintervalle auf maximal einen Meter zu begrenzen. Eine Bildung von flächenbezogenen Mischproben (Bildung einer Mischprobe aus mehreren Beprobungspunkten) ist für den Pfad Boden - Gewässer nicht zulässig. Reichen die Probenmengen bei einem Beprobungspunkt nicht, so können dicht nebeneinander Bohrungen durchgeführt werden (BLfU 2010). Das Mischen von Proben aus unterschiedlichen Bodenschichten würde zum Informationsverlust führen, und nur das Mischen aneinandergrenzender Proben sichert die Feststellung großer räumlicher Konzentrationsschwankungen in der Ebene der Bodenschichten (DIN ISO 10381-5, 2007).

Es wird nach DIN ISO 10381-1:08.03 eine Sammelprobe erhalten („Probe, die sich aus nahe beieinander entnommenen Einstichen zusammensetzt“) (DIN ISO 10381-1, 2003). Für die Untersuchung des Wirkungspfades Boden - Mensch soll die entnommene Bodenmischprobe hinsichtlich ihres mittleren Schadstoffgehaltes repräsentativ für die zu beurteilende Fläche sein. So werden oberflächennahe flächenbezogene Mischproben gebildet (BLfU 2010). Entsprechend DIN ISO 10381-1:08.03 wird in den meisten Anleitungen für die Probennahme zu landwirtschaftlichen oder vergleichbaren Untersuchungen empfohlen, dass Mischproben durch eine bestimmte Anzahl von Einstichen vereinigt werden (DIN ISO 10381-1, 2003). Im Normenentwurf E DIN ISO 10381-4:02.96 sollten mindestens 25 Einstiche erfolgen, in der DIN ISO 10381-4:04.04 fehlt diese Angabe, wird aber durch den FBU weiter empfohlen (Handbuch der Bodenuntersuchung). Die Norm fordert, dass zur Bildung einer flächen- und bodeneinheitsbezogenen Mischprobe die Verfahren so gewählt werden sollten, dass die Endprobe äquivalente Teile der Einstiche enthält und für alle Einstiche repräsentativ ist. Diese Norm enthält Angaben zum Verhältnis von Mischprobenanzahl und Größe der zu beprobenden Flächen (DIN 10381-4, 2004).

Auch für die Untersuchung des Wirkungspfades Boden - Nutzpflanze sollte die entnommene Bodenmischprobe hinsichtlich ihres mittleren Schadstoffgehaltes repräsentativ für die zu beurteilende Fläche sein. Hier stellt auch die VDLUFA-Methode A 1.2.3 „Probennahme für die Untersuchung auf Spuren von umweltrelevanten Fremdstoffen“ eine Anleitung zur

Auswahl einer repräsentativen Fläche mit einer bestimmten Anzahl von Einzelproben (Einstichen) zur Verringerung des Probennahmefehlers dar (VDLUFA Methodenbuch).

Nach „LABO-Arbeitshilfe“ erfolgt die Entnahme oberflächennaher Mischproben i.d.R. für die Wirkungspfade Boden - Mensch, Boden - Nutzpflanze, Boden - oberirdisches Gewässer (Abschwemmung) und Boden - Luft (Verwehung), wobei die annähernd gleichmäßige Verteilung Schadstoffe in der beurteilungsrelevanten Bodenschicht über die zu beprobende Fläche verteilt sein sollte. Es wird jedoch nicht angegeben, was eine „annähernd gleichmäßige“ Verteilung bedeutet. Eine Mischprobe soll aus 15 bis 25 Einzelproben einer definierten Fläche oder Teilfläche gewonnen werden (LABO 2002).

Die Problematik **Mischproben** steht in engem Zusammenhang mit dem **Probennahmeraster** und Abständen zwischen den Entnahmestellen der Bodenproben, in der Planung ein Teil der Probennahmestrategie (DIN ISO 10381-1, 2003; DIN ISO 10381-5, 2007). Die DIN ISO 10381-5:02.07, die speziell für die Untersuchung von Bodenkontaminationen auf urbanen und industriellen Standorten erarbeitet wurde, besagt, dass die für jeden potenziell kontaminierten Bereich des Bodens der Fläche des Standortes proportional sein sollte, jedoch sollte eine Mindestanzahl an Proben entnommen werden, um die räumliche Variabilität im beprobten Bereich zu erfassen. Üblicherweise werden dafür sechs Proben verwendet. Weiterhin heißt es: „Selbstverständlich steigt mit zunehmender Probenanzahl die Zuverlässigkeit der Abschätzung der Kontaminationsverteilung an.“ (DIN ISO 10381-5, 2007) Homogenität und Heterogenität von zu beprobenden Flächen spielen für die Festlegung des Probennahmerasters sowohl für Untersuchung im landwirtschaftlichen Bereich als auch für Altlastenuntersuchungen gleichfalls eine prioritäre Rolle. Bei Altlastenuntersuchungen kommt noch das Problem hinzu, dass Kontaminationen oft scharf umrissenen Grenzen vorliegen.

Die DIN ISO 10381-5:02.07 legt fest, wann Mischproben bei Untersuchungen auf Bodenkontaminationen verwendet werden (DIN ISO 10381-5, 2007):

- wenn eine homogene Verteilung vorliegt,
- wenn kleinräumig eine heterogene Verteilung vorliegt, großräumig gemittelt jedoch eine homogene Verteilung besteht.

Auch hier besteht die Frage, wie homogene und heterogene Verteilung definiert sind.

Gerade beim Herstellen der Mischproben mit dem Ziel der Wahrung der Probenrepräsentativität auch unter dem Gesichtspunkt der Heterogenität von Bodenproben sind Abschätzungen des Probennahmefehlers notwendig. Diese Messunsicherheit ist in den

Normen und Regelwerken sowie länderübergreifenden und -spezifischen Materialien nicht benannt.

Ebenfalls die Probenteilung ist eine Art der Herstellung von Mischproben, bei der die Frage der Repräsentativität höchste Priorität besitzt (Kapitel 3.5.5). Weiterhin ist das Aussortieren von Grobmaterialien zu beachten (Kapitel 3.5.1). Beim Herstellen von Mischproben stehen auch Fragen der Homogenisierung eine Rolle, auf die die Normen keine Antworten geben. Nach dem „Bericht-Boden-Abfall“ soll eine Homogenisierung durch intensives Verrühren der Mischproben bereits vor Ort erfolgen, sollte aber auf jeden Fall nochmals im Labor durchgeführt werden (LfUBW 1997).

Bei der Untersuchung der Bodenproben auf leichtflüchtige organische Schadstoffe dürfen keine Mischproben hergestellt werden (DIN ISO 10381-1, 2003; DIN ISO 10381-5, 2007; LABO 2002, BLfU 2010, LfUBW 1997, LfUBW 2002). Mischproben sollten auch nicht von Einzelproben mit sich deutlich voneinander unterscheidenden organoleptischen Auffälligkeiten untersucht werden (DIN ISO 10381-5, 2007).

„Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010) und „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002) fordern, dass die Herstellung von Mischproben vom Sachverständigen im Einzelfall immer zu begründen und zu dokumentieren ist. Entsprechend DIN ISO 10381-5:02.07 sind bei Verwendung von Mischproben die Ausgangsproben getrennt zu lagern (DIN ISO 10381-5, 2007).

3.3 Auswahl von Probennahmeverfahren

Entsprechend DIN ISO 10381-2:08.03 Kapitel 5.1 hängt die Wahl der Probennahmeverfahren, der Probennahmegeräte und des Verfahrens zur Entnahme der Bodenproben von folgenden Faktoren ab (DIN ISO 10381-2, 2003):

1. dem Ziel der Probennahme
2. den Bodenschichten, denen Proben entnommen werden sollen
3. der Art möglicher Kontaminationen
4. der Art der Analyse bzw. Untersuchung der Proben

Bei der Auswahl des Verfahrens stehen solche Fragen im Mittelpunkt, die auch im Rahmen dieses Gutachtens betrachtet werden sollen (DIN ISO 10381-2, 2003):

1. Welche Bodeneigenschaften sind von Interesse?
2. Welche Probenart ist deshalb erforderlich?
3. Welche Probenmenge ist für die Untersuchungen notwendig?
4. Welche Präzision der Ergebnisse wird benötigt und welches Verfahren kann demzufolge benutzt werden?
5. Wie ist die Zugänglichkeit des Probennahmegeländes?
6. Welche Probennahmetiefe muss erreicht werden und welches sind die grundlegenden physikalischen Eigenschaften des Bodens?

Für die Art der zu nehmenden Proben ist die Probengüte ein wichtiger Ansatzpunkt. Die DIN ISO 10381-2:08.03 gibt unter Frage 2 hinsichtlich der Auswahl des Probennahmeverfahrens vor, welche Probenart erforderlich ist. Dabei unterscheidet die Norm in gestörte und ungestörte Proben, zwei grundlegende Probenarten, die für Bodenuntersuchungen und zur Feststellung des Bodenzustandes entnommen werden. Die DIN EN ISO 22475-1:01.07, als Ersatz für DIN 4021, gibt Güteklassen von Bodenproben für Laborversuche im Zusammenhang mit der zu verwendenden Kategorie der Probenentnahme vor (DIN EN ISO 22475-1, 2007). Auch die „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002), die „ITVA-Arbeitshilfe“ (ITVA 1995) und das „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010) berücksichtigen diese Güteklassen. Im „UBA-Projekt“ wurde der Vorschlag unterbreitet, dass Qualitätsstufen von Bodenproben zur Untersuchung von Verdachtsflächen und Altlasten – ungestörte Bodenprobe und gestörte Bodenprobe/Schichtenfolge unverändert – genutzt werden sollten (Meiler et al. 2003).

So eignen sich ungestörte Bodenproben für Untersuchungen auf bodenphysikalische Parameter und für Säulenversuche. Die gestörten Bodenproben erlauben chemische Analysen (DIN ISO 10381-2, 2003). Auch die DIN ISO 10381-4:04.04, die nicht im Anhang 1 der BBodSchV im Kapitel 2.4 zur Probengewinnung aufgeführt wird, enthält wertvolle Handlungsempfehlungen für die Probennahme von Böden hinsichtlich ihrer Probengüte. Die Probennahme jeweils von Oberboden und aus größeren Tiefen wird getrennt für ungestörte und gestörte Proben betrachtet (DIN ISO 10381-4, 2004)

Die DIN ISO 10381-2:08.03 weist unter Frage 4 auf die Bedeutung der Präzision hinsichtlich der Ergebnisse der Untersuchung und der Auswahl des Probennahmeverfahrens hin (DIN ISO 10381-2, 2003). Angaben zur Präzision fehlen aber gänzlich. Hinweise zu qualitätssichernden Maßnahmen werden in der Norm unter dem Aspekt der Querkontaminationen (Kapitel 7.2 der Norm) und der Wahl der Probenbehälter (Kapitel 8.2 der Norm) gegeben. Gerade im Bereich der Altlastenuntersuchungen spielen Fragen der Kontamination und Verlusten bei hohen Schadstoffgehalten eine dominierende Rolle (Kapitel 3.5.2.1 dieser Arbeit).

3.4 Aufschlussverfahren

Die Art der Bodenaufschlüsse im Bereich der Altlastenuntersuchungen wird u.a. von den örtlichen, geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten, der Mächtigkeit und der Zugänglichkeit der Kontamination, sowie den Anforderungen an die Probenmenge und -güte bestimmt.

In den Normen DIN ISO 10381-2:08.03 (DIN ISO 10381-2, 2003) und DIN EN ISO 22475-1:01.07 (DIN EN ISO 22475-1, 2007) erfolgt in Abhängigkeit u.a. vom Untersuchungsziel und der Erreichung einer bestimmten Probengüte die Einteilung der Aufschlussverfahren unterschiedlich. Die Herangehensweise dieser Normen ist dementsprechend auch differenziert bedingt durch den Anwendungsbereich der Normen, DIN ISO 10381-2:08.03 für die Bodenbeschaffenheit zur Untersuchung sowohl landwirtschaftlicher Flächen als auch Flächen im Rahmen der Altlastenbearbeitung, DIN EN ISO 22475-1:01.07 für die geotechnische Erkundung und Untersuchung.

- DIN ISO 10381-2:08.03 Einteilung der Verfahren: manuelle Verfahren, maschinelle Bohrverfahren und maschineller Aushub (in Tabelle 1 der Norm)
- DIN EN ISO 22475-1:01.07 Betrachtung der Aufschlussverfahren separat nach: durchgehende Gewinnung von Proben mittels Bohrverfahren (Tabelle 2 der Norm), Probenentnahme mittels Entnahmegeräten (Tabelle 3 der Norm).

Die DIN ISO 10381-2:08.03 gibt eine Anleitung zur Auswahl geeigneter Probennahmeverfahren unter den Bedingungen, die bei einer Geländeuntersuchung zu erwarten sind. An dieser Stelle ist der Hinweis der Norm hervorzuheben, dass zur Festlegung des am besten geeigneten Probennahmeverfahrens eine fallbezogene Entscheidung notwendig sein wird (DIN ISO 10381-2, 2003).

Die „ITVA-Arbeitshilfe“ stellt auf Grundlage dieser Normen Aufschlussverfahren zusammen, die auf die Anwendung dieser Verfahren in den aufeinander aufbauenden Erkundungsphasen (u.a. Orientierung, Detailuntersuchung) zielen. Das Ziel der Arbeitshilfe ist nicht, Standardlösungen für bestimmte Fragestellungen anzubieten. Sie stellt eine Informationsgrundlage für eine schnelle, kompetente Einzelfallentscheidung bei der Auswahl von Aufschlussverfahren zur Festprobengewinnung für die Untersuchung von Verdachtsflächen und Altlasten dar (ITVA 1995).

Auf Grundlage dieser Normen und der „ITVA-Arbeitshilfe“ (ITVA 1995) gibt „Merkblatt 3.8/4“ eine Übersicht über Aufschlussverfahren (Bohrungen und Schurf), die wichtige Parameter, wie den Bohrdurchmesser, die Eignung für Bodenarten, Vor- und Nachteile der Verfahren und deren Fehlerquellen detailliert betrachtet (siehe Tabelle 3) (BLfU 2010). Zusätzlich wurden Verfahren für Sonderproben (ungestörte Proben) aufgenommen, die u.a. auch in der „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002) betrachtet werden.

Tabelle 3: Übersicht über Aufschlussverfahren bei der Erkundung von Altlastenflächen nach „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010), ergänzt durch „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002)

Verfahren	Bohr- durch- messer (mm)	Eignung für Bodenart		Vorteile	Nachteile	Fehlerquellen
		ungeeignet für Bodenart	geeignet für Bodenart			
Bohrungen						
Handbohrung	15–80	Grobkies, Steine, Schutt, klumpige Böden	Ton, Schluff, bindiger Sand und ähnliche Böden	sehr schnell und kosten- günstig	nicht immer repräsentati- v, nur bis max. 2 m	Randkonta- mination, ungenau- e Profil- ansprache, Verlust leicht- flüchtiger Schadstoffe
Kleinramm- bohrung	35-80	Grobkies, große Steine, klumpige Böden, bevorzugt bis De/5	Ton, Schluff, bindiger Sand und ähnliche Böden	kostengünsti- g, schnell, auch in Kellern, Häusern usw.	Kernverluste durch Stau- chungen, Nachfall, Ausgasung	Ungenauigkeit im Profil, Randkonta- mination, Verlust leicht- flüchtiger Schadstoffe

Tabelle 3 (Fortsetzung)

Verfahren	Bohr- durch- messer (mm)	Eignung für Bodenart		Vorteile	Nachteile	Fehlerquellen
		ungeeignet für Bodenart	geeignet für Bodenart			
Rammkern- bohrung	80-300	Böden mit Korn- durchmesser größer als De/3, feinge- schichtete Böden	Ton, Schluff und Böden mit Korn- durchmesser bis höchstens De/3	gute Kerne, auch unter Grundwasser einsetzbar	Erwärmung in festen Böden, Vermischung g beim Entleeren der Schuppe in nicht- bindigen Böden	Verlust leicht- flüchtiger Schadstoffe, Verschleppung von Schad- stoffen
Rotations- kernbohrung	65-200	feste Hindernisse	alle Böden	kosten- günstig, große Proben- mengen	Störung der Proben, Entmischung rolliger Böden, Erwärmung in festen Böden	Vermischung von Probengut, Verlust von Feinkorn unter Grundwasser- oberfläche, Verlust leicht- flüchtiger Schadstoffe
Schlauch- kernbohrung	80-200	Böden mit Korndurch- messer größer als De/3, feinge- schichtete Böden	Ton, Schluff und Böden mit Korn- durchmesser bis höchstens De/3	exakte Profile, kein Luft- und Wasserzutrit t zum Proben- material, Schutz vor Entgasung	aufwändiges Verfahren, anfällig gegen Störkörper	Wechsel- wirkung mit Schlauch- material
Sonderprobe (ungestörte Proben- nahme)	50-200	-	Güteklasse 1	hydraulische und boden- mechanische Parameter	aufwändiges Verfahren	
Schurf						
Schurf (begebar)	beliebig	große feste Hindernisse	alle Böden und Materialien	exakte Profile, Lagerung erkennbar, jede Proben- menge und -güte	Arbeits- schutz, Verbau, Entsorgung, Platzbedarf	Luftzutritt, Ausgasung leicht- flüchtiger Schadstoffe

De: Innendurchmesser des Bohrwerkzeugs

Das Bodenmaterial sollte während des Probennahmeprozesses in seiner chemischen, physikalischen und biologischen Beschaffenheit möglichst nicht verändert werden. Deshalb werden Spülbohrungen hier nicht betrachtet, da diese aufgrund der starken Beeinflussung des Bohrgutes durch das Spülmittel für die Untersuchung von Böden auf Bodenverunreinigungen ungeeignet sind (DIN 10381-2, 2003; LABO 2002; OFD-BAM 2008, ITVA 2005, LfUBW 1997). So kann es während der Probennahme u.a. zur Auswaschung von Schadstoffen, Beeinflussung der Bodenzusammensetzung und Veränderung des Wassergehaltes kommen. Kritisch ist die Empfehlung der DIN ISO 10381-2:08.03 zur Anwendung von Spülmittel z.B. Wasser zusehen, damit die Abteufung einer Probennahmebohrung erleichtert wird. Es sollte nur ein Spülmittel zur Anwendung kommen, das Kontaminationen und Matrixeffekte an den Bodenproben vermeidet (DIN ISO 10381-2, 2003). Dagegen stehen Aussagen u.a. der „LABO-Arbeitshilfe“, des „Merkblattes 3.8/4“ und der „ITVA-Arbeitshilfe“ (LABO 2002, BLfU 2010, ITVA 1995), die darauf verweisen, dass bei Altlastenuntersuchungen Bohrungen ohne Spülung durchzuführen sind (Trockenbohrverfahren). Die „ITVA-Arbeitshilfe“ lässt nur einen Kompromiss zu, wenn keine andere Möglichkeit mehr besteht, z.B. im Felsgestein (ITVA 1995).

Erkundungsgeräte, die eine starke Vermischung von aufzuschließendem Boden über die Tiefe verursachen, beispielsweise Spiralsondierungen und Spiralbohrungen mit kleinem Durchmesser, sind ebenfalls für Altlastenuntersuchungen nicht zulässig. Schlitzsondierungen sollen aufgrund der Umlagerungseffekte beim Eintreiben an der Sondierspitze, der Verdrängungseffekte, der Verschleppung von Kontaminationen und des ungünstigen Verhältnisses von Probenvolumen/Oberfläche nicht eingesetzt werden (ITVA 1995).

Zu den Kleinbohrungen zählen die Handbohrung und die Kleinrammbohrung. Bei den Großbohrungen wird in Bohrungen mit Kerngewinn (Rammkernbohrung, Rotationskernbohrung, Schlauchkernbohrung) und in Bohrungen ohne Kerngewinn (Greiferbohrungen). Greiferbohrungen sind in der „ITVA-Arbeitshilfe“ näher beschrieben (ITVA 1995).

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Aufschlussverfahren werden in Zusammenhang mit den Normen und länderübergreifenden und -spezifischen Materialien in den folgenden Kapiteln diskutiert.

3.4.1 Bohrungen

3.4.1.1 Auswahl des Bohrdurchmessers

Der **Bohrdurchmesser** ist eine wichtige Randbedingung und ein qualitätssichernder Parameter für die Auswahl des Probennahmeverfahrens. Kleine Bohrdurchmesser können zunehmend zu Stauchungen und Störungen an den Bohrkernrändern führen. Der Bohrdurchmesser steht auch in engem Zusammenhang mit der Probenmenge. In Abhängigkeit von der Aufschlussart sollte der Innendurchmesser mindestens das Drei- bzw. Fünffache des Größtkorndurchmessers betragen (siehe Tabelle 3) (BLfU 2010). Der kleinste Bohrdurchmesser ist nach DIN EN ISO 22475-1:01.07 mit 30 mm für Kleinramm- und Kleindruckbohrverfahren aber nur für geringe Tiefen festgelegt (DIN EN ISO 22475-1, 2007). So eignen sich diese kleinen Bohrdurchmesser für die Entnahme von Einzelproben für den Wirkungspfad Boden - Mensch und Boden - Nutzpflanze. Bohrungen unter 50 mm (sog. Schlitzsondierungen) sind aufgrund der Störungen an den Bohrkernrändern nicht für Bodenproben zur Untersuchung des Wirkungspfades Boden - Gewässer geeignet (BLfU 2010). In der „ITVA-Arbeitshilfe“ werden nur Aufschlussmethoden für Böden diskutiert, deren Durchmesser 35 mm übersteigt, so dass Schlitzstangenbohrungen, die für Untersuchungen von Baugrund-Fragestellungen verbreitet sind, ausgeschlossen werden (ITVA 1995).

Der Bohrdurchmesser richtet sich auch nach dem zu erwartenden **Größtkorn** des Bodens (ITVA 1995, LABO 2002, BLfU 2010, LfUBW 1997). Diese Angaben beruhen auf der zurückgezogenen DIN 4021:10.90, ohne dass ihre Festlegung näher erläutert wird. Sie sind in den oben genannten Materialien als Richtwerte übernommen worden. Das stellte bereits das „UBA-Projekt“ fest (Meiler et al. 2003). Die genannten Materialien enthalten ebenfalls Angaben zu Mindestprobenlängen, die in Abhängigkeit des Bohrdurchmessers erforderlich sind, um ein Kilogramm Probe zu gewinnen. Hier zeigen sich jedoch Diskrepanzen, da mit unterschiedlichen Dichten gerechnet wurde.

Desweiteren ergeben sich Unterschiede hinsichtlich des Bezugs zur gewonnenen Probenmenge auf den vollständigen Kern oder das entnommene Segment. Das „Merkblatt 3.8/4“ bezieht sich auf das gewonnene Segment, da der unmittelbare Wandungsbereich nicht beprobt werden sollte (BLfU 2010). Generell stellt sich hier die Frage, wie bereits auch im „UBA-Projekt“ angesprochen (Meiler et al. 2003), inwieweit Anforderungen von Normen aus Baugrunduntersuchungen auf Untersuchungen zur Bodenbeschaffenheit anzuwenden sind. Es existieren bisher keine konkreten Untersuchungen, die die gemachten Aussagen beweisen.

Die DIN ISO 10381-2:08.03 enthält keine Angaben zum Zusammenhang des zulässigen Bohrdurchmessers in Abhängigkeit des erwartenden Größtkorns im Untergrund (DIN ISO 10381-2, 2003).

3.4.1.2 Handbohrungen

In der DIN ISO 10381-2:08.03 werden die Handbohrungen als „Handdrehbohrungen“ bei den manuellen Verfahren neben dem Aushub mit der Hand (grabend) genannt, anwendbar bis zu einer Entnahmetiefe von 2 m. So werden Handdrehbohrer üblicherweise zur Probennahme homogener Böden z.B. landwirtschaftlich genutzter Böden verwendet (DIN ISO 10381-2, 2003). Sie sind auch bei Untersuchungen landwirtschaftlicher Flächen im Rahmen der VDLUFA-Verfahren zur Probennahme integriert (VDLUFA Methodenbuch).

Handbohrungen sind schnelle und kostengünstige Verfahren. Nach der „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002) und dem „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010) finden sie nur beschränkte Anwendungsmöglichkeiten, da sie in ihrer Aussagekraft wegen der eingeschränkten Güte der Aufschlüsse (Güteklasse 5 nach ITVA (ITVA 2005)) z.B. in Hinblick auf die Schichtenfolge begrenzt repräsentativ sind. Es wird unterschieden zwischen Drehbohrungen (z.B. mit Spiral- oder Flügelbohrer) und Probennahmen mit Bohrstock. So können bis ca. 1 m Tiefe Oberbodenproben mit Bohrstöcken (z.B. Bohrstock nach Pürckhauer (DIN 19671-1, 1964)) genommen werden. Die Bohrstöcke werden mit Hilfe eines Hammers von Hand eingeschlagen. Diese Bohrstock-Probennahmen liefern ein relativ ungestörtes Bodenprofil, das eine Bodenansprache gut ermöglicht und demzufolge auch bei Boden- bzw. standortlichen Kartierungen eingesetzt wird. Durch den Rammvorgang kann jedoch die Bodensäule zusammengestaucht werden. Da das Bohrgut zur Probengewinnung mit Spatel oder Löffel aus Rille oder Rohr entfernt werden muss, erhält man nur gestörte Proben (LABO 2002, LfUBW 1997)

Außerdem erfordern Handbohrungen aufgrund der geringen Durchmesser besondere Sorgfalt bei der Entnahme und der Reinigung der Bohrgeräte sowie eine Berücksichtigung der Einschränkungen bezüglich Probenmenge und Größtkorn (LABO 2002, LfUBW 1997).

Aufgrund der kleinen Bohrdurchmesser können nur geringe **Probenmengen** gewonnen werden. Hier besteht die Möglichkeit, durch mehrere benachbarte Bohrungen eine Mischprobe zu erhalten. Auf das Problem der Anzahl der Einstiche hinsichtlich der Gewährleistung der Probenrepräsentativität wurde bereits in Kapitel 3.2 eingegangen. Handdreh- und Bohrstockbohrung werden allenfalls bei der Voruntersuchung der obersten Bodenschichten von Altlastverdachtsflächen zur orientierenden Abschätzung der

Belastungssituation, Wirkungspfad Boden - Mensch und Boden - Nutzpflanze angewandt (LABO 2002).

3.4.1.3 Kleinrammbohrungen

Der praktische Einsatz von Kleinrammbohrungen oder sog. Rammkernsondierungen zur Untersuchung von Altlastverdachtsflächen ist insbesondere auch aus Kostengründen weit verbreitet. Bei dieser, nach dem Prinzip her Rammkehrbohrung mit geringem Durchmesser (35 – 80 mm), wird das Kernrohr oder Schlitzgestänge ohne maschinelle Drehbewegung in den Untergrund getrieben werden (HLUG 2002, LABO 2002, ITVA 1995). Um ausreichende Probenmengen und eine hohe Probenqualität zu gewährleisten und möglichst repräsentative Bodenproben bei einer möglichst detailgetreuen Aufnahme des Untergrundprofils zu gewinnen, ist ein Außendurchmesser von 80 mm zu bevorzugen (BLfU 2010). Somit können Stauchungen des Bohrkerns und Störeinflüsse an den Bohrkernrändern minimiert werden. Ebenfalls wird nicht die Verwendung eines Kernrohres über 1 m vorgeschlagen (ITVA 2005, BLfU 2010, LfUBW 1997). In begründeten Einzelfällen, z. B. im Rahmen der orientierenden Untersuchung, kann bei Kleinrammbohrungen ein Außendurchmesser von 50 mm ausreichend sein (LABO 2002). Je nach Untergrund sind mit Rammkernsondierungen Tiefen von 5 bis 10 m erreichbar.

Rammkernsondierungen besitzen den Vorteil, dass sie anschließend für temporäre Bodenluftuntersuchungen genutzt und als Grundwasserkleinmessstelle ausgebaut werden können. Weitere Vorteile sind die flexible Einsatzmöglichkeit bei beengten Verhältnissen, die hohe Mobilität und der im Vergleich zu Kernbohrungen geringere Zeit- und Kostenaufwand (LABO 2002, HLUG 2002, ITVA 1995).

Neben den genannten Vorteilen können zahlreiche Fehlerquellen auftreten, die sich nachteilig auf das Untersuchungsergebnis auswirken können. Diese sollten bekannt sein, um sie zu minimieren. Dazu zählen (ITVA 2005):

- a. In rolligen Böden treten vor allem in der gesättigten Zone Kernverluste auf. Hohe Kernverluste (> 20 %) verhindern eine zuverlässige Profilbeschreibung.
- b. Der oberste Teil des Bohrkernes ist oft durch Nachfall verfälscht.
- c. Unter ungünstigen Umständen (z.B. Kies über weichem Ton) wird ein erheblicher Teil des Bohrkerns beim ziehen durch nachbrechendes Material höherer Schichten unbrauchbar.

- d. Auch bei größeren Durchmessern können noch deutliche Stauchungen im Kern auftreten.
- e. Die offenen Kernrohre ermöglichen einen Verlust flüchtiger Komponenten.

Insbesondere für die unter den Punkten a. – d. genannten Aspekte können Probennahmefehler durch Vergleichsprobennahmen eingeschätzt werden, die durch den ITVA aufgrund der Priorität von Kleinrammbohrungen für Untersuchung von Altlastenflächenflächen organisiert wurden (siehe Teil 2 der Arbeit). In den genannten Werken und Normen sind keine Angaben zu Messunsicherheiten und zur Einschätzung des Probennahmefehlers zu finden.

Für Bodenprobennahmen zur Untersuchung auf leicht flüchtige organische Verbindungen sind spezielle Handlungsanleitungen erarbeitet worden (Kapitel 3.5.3).

Auf die Entnahme der Bodenproben aus einer Rammkernsonde zur Vermeidung von Randeffekten wird in Kapitel 3.5 detailliert eingegangen.

Zum Einrammen der Entnahmerohre kann ein Elektrohammer, ein mittels Kraftstoff angetriebener Motorhammer, ein Presslufthammer oder eine Kleinramme (mit Fallgewicht) verwendet werden. Nach DIN ISO 10381-2:08.03 ist im Hinblick auf die Vermeidung von Querkontaminationen die Benutzung von Verbrennungsmotoren mit Vorsicht zu betrachten (DIN ISO 10381-2, 2003). Hier gibt es Möglichkeiten der Kontamination der Bodenproben durch Kraftstoff, Motorschmierung und Abgase. Die „OFD-BAM-Anforderung“ lässt kraftstoffbetriebene Bohrhämmer nicht zu (OFD-BAM 2008). Dagegen wird in den „Merkblättern 3.8/4“ (BLfU 2010) und in der „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002) keine Einschränkung gemacht. Es erfolgt jedoch der Hinweis, dass die Probenentnahme außerhalb der Abluftfahne der Bohraggregate durchzuführen ist und die Aggregate so aufzustellen sind, dass Probenkontaminationen bzw. -veränderungen ausgeschlossen werden können.

Die DIN ISO 10381-2:08.03 schlägt Systeme vor, die es erlauben, einen Sondenkopf mit einem Probennahmegerät in die zuvor abgeteufte Bohrung bis zu der Tiefe herabzulassen, die zur Probennahme vorgesehen ist. Dieses System erlaubt auch die Probennahme von ungestörten Proben (DIN ISO 10381-2, 2003).

3.4.1.4 Rammkernbohrungen

Beim Rammkernbohren wird ein Kernrohr von 1 bis 2 m Länge mittels einer Schlagvorrichtung in den Untergrund eingetrieben. Dies erfolgt in der Regel von fahrbaren Geräteträgern, sodass der technische und finanzielle Aufwand erheblich höher ist bei den Kleinrammbohrungen. Diese Großbohrung nutzt Bohrdurchmesser von 80 – 300 mm und erreicht Bohrtiefen bis 50 m (bei günstigen geologischen Verhältnissen und Verwendung einer Verrohrung). So können aufgrund des großen Bohrdurchmessers eine detaillierte Aufnahme des Untergrundprofils sowie eine repräsentative und tiefenorientierte Beprobung unterschiedlicher Bodenhorizonte bzw. -schichten erfolgen. Es wird eine hohe Probengüte und eine große Probenmenge erzielt. Die Rammkernbohrungen sind im Bereich des Lockergesteins weit verbreitet und werden meist im Rahmen der Detailuntersuchung neben der Errichtung von Grundwassermessstellen zum Aufschluss mächtiger Altablagerungen sowie sehr grobkörnigen Böden eingesetzt (ITVA 1995, BLfU 2010, LABO 2002).

Mögliche Nachteile dieser Bohrung, die u.a. auch zum Probennahmefehler beitragen können, sind (ITVA 2005):

- a. Der Bohrfortschritt nimmt mit zunehmender Festigkeit oder Lagerungsdichte des Bodens stark ab. Gleichzeitig wird das Bohrgut zunehmend erwärmt, so dass Verluste an leichtflüchtigen Stoffen auftreten können
- b. Beim Auspressen des Bohrgutes aus der Schappe kommt es bei rolligen Böden zu Vermischungseffekten (außer bei aufklappbaren Schappen).
- c. Für grobkörnige rollige Böden ist die Rammkernbohrung nicht geeignet.

Bei der Entnahme der Proben ist wie bereits bei den Kleinrammbohrungen auch das Abstechen der Kernränder zu beachten, um den Probennahmefehler zu minimieren (siehe Kapitel 3.5). Das Problem der Bodenprobennahme zur Untersuchung auf leichtflüchtige Stoffe ist wie bei den Kleinrammbohrungen gegeben (Kapitel 3.4.1.3).

3.4.1.5 Rotationskernbohrungen

Die Rotationskernbohrungen (Bohrdurchmesser 65 – 200 mm) werden mit Hilfe von Einfachkernrohren oder Hohlbohrschnecken ausgeführt und sind vor allem im bindigen Lockergestein einsetzbar. Durch die Drehbewegung erfolgt eine Vermischung des Probengutes im Bereich der Kontaktzone zwischen Bohrkern und Entnahmerohr. Somit muss sehr sorgfältig gearbeitet und ein erhöhter Überwachungsaufwand ist gegeben (ITVA 1995, BLfU 2010)

Zur Probenentnahme sollten vor allem die weitgehend unbeeinflussten Bereiche des Kernrohres benutzt werden, wie bereits bei den Kleinrammbohrungen und Rammkernbohrungen bereits angesprochen wurde.

3.4.1.6 Schlauchkernbohrung

Bohrungen mit Schlauch oder „liner“ zur Kernaufnahme werden für spezielle Fragestellungen eingesetzt z.B. Erstellung eines exakten Bodenprofils, Entnahme von fließenden Böden, Untersuchung von Böden auf leichtflüchtige Stoffe. Kennzeichnend ist, dass das Bohrgut schon beim Bohren in einen Schlauch gedrückt wird. Es können Kontaminationen im Randbereich des Kerns, Sauerstoffzutritt und Verluste von leichtflüchtigen Stoffen weitgehend vermieden werden. Allerdings spielt hier das Schlauchmaterial eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Detaillierte Angaben zu diesem Bohrverfahren geben die „ITVA-Arbeitshilfe“ (ITVA 1995), das „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010) und die „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002). Die DIN ISO 10381-2:08.03 erwähnt das Verfahren nicht (DIN ISO 10381-2, 2003).

In Kapitel 3.5.3 wird auf die Anwendung dieses Verfahren zur Bodenprobennahme für die Bestimmung auf leichtflüchtige Stoffe eingegangen.

3.4.1.7 Verfahren für Sonderproben (ungestörte Proben)

Ungestörte Proben sind Bodenproben, die nach einem zum Schutz des Bodengefüges entwickelten Verfahren entnommen werden. Dies erfolgt nach DIN ISO 10381-2:08.03 z.B. mit einem Probennahmerahmen, einem Kernbohrwerkzeug oder einem Entnahmezylinder. Die Probennahmewerkzeuge werden in den Boden gedrückt und anschließend mit der Probe herausgezogen, sodass der Boden in seiner ursprünglichen physischen Form entnommen wird (DIN ISO 10381-2, 2003). Die DIN ISO 10381-4:04.04 Kapitel 8 gibt ausführliche Darstellungen zur Entnahme von ungestörten Proben (DIN ISO 10381-4, 2004). Diese Norm beschreibt Bodenproben in ungestörter Lagerung als Proben aus volumenproportionaler Probennahme, die mit einem Verfahren entnommen werden, welches das Bodengefüge erhält. Gestörte Proben werden im Gegensatz dazu als Proben aus massenproportionaler Probennahme beschrieben, die keinen Anspruch auf Erhaltung des Bodengefüges haben. Als Anwendung der ungestörten Probennahme werden hier allgemein physikalische Untersuchungen sowie besondere chemische und biologische Analysen.

Die Bodenkundliche Kartieranleitung – KA 4 definiert eine ungestörte Probe als „eine Probe, die so sorgfältig aus dem Bodenverband gelöst wird, dass ihr Bodengefüge weitgehend erhalten bleibt“. Somit ist hier das Bodengefüge der Probe im Vergleich zum natürlichen Boden (z.B. in der Ansprache aus Profilgruben) als Qualitätsmaß nutzbar (Bodenkundliche Kartieranleitung 2005).

Eine vom ITVA 2004 erarbeitete Arbeitshilfe F 2-2 liefert Hinweise zur praktischen Umsetzung der ungestörten Bodenprobennahme und beschreibt Anforderungen, die sich aus der Verwendung dieser Proben in Säulenversuchen ergeben (ITVA 2004). Diese liegt als Entwurf vor, wird aber wegen der Entwicklung neuer Elutionsverfahren nicht als Weißdruck veröffentlicht (ITVA 2004).

Geräte zur Entnahme von Bodenproben in ungestörter Lagerung werden in der DIN 19672-1:04.68 empfohlen, die im Landeskulturbau Anwendung findet (DIN 19672-1, 1968).

3.4.2 Schürfe

In der DIN ISO 10381-2:08.03 (Anhang A.4) werden Schürfe unter Aufgrabungen ausführlich dargestellt, wobei in manuelles Ausschachten und maschinelles Ausschachten jeweils bis auf Tiefen zwischen 3 m und 4,5 m sowie bis 6 m unterschieden wird. So sind Schürfe offene Gruben, Gräben oder Schächte, die entweder mit einer Schaufel oder mit Hilfe eines Baggers gegraben werden. Das Anlegen von Schürfen ist eine weitverbreitete bei geringer Tiefe kostengünstige Erkundungsmethode (DIN ISO 10381-2, 2003). Die „ITVA-Arbeitshilfe“ erfasst alle relevanten Aspekte detailliert im Hinblick auf Fehlerquellen bzw. Vor- und Nachteile des Verfahrens (ITVA 2005).

Das Anlegen von Schürfen mit Baggern (vorzugsweise Schaufelbaggern) empfiehlt sich als preisgünstiges und schnelles Aufschlussverfahren vor allem auf Brachflächen und zum Aufschluss von Altablagerungen. Schürfe liefern über einen größeren Bereich einen guten Einblick in den Untergrundaufbau und gewährleisten die Entnahme von ausreichenden Probenmengen. Sie eignen sich zum Aufschluss grobkörniger Schichtabfolgen, insbesondere für die Probennahme bei heterogenen Auffüllungen mit hohem Anteil an grobkörnigen Bestandteilen (BLfU 2010, LABO 2002). Sie sollten nach Möglichkeit begehrbar sein. Maßnahmen des Arbeitsschutzes sind zu beachten.

Durch den großen Kontaktbereich der Aufschlusswand zur Umgebungsluft werden Oxidationsprozesse begünstigt und flüchtige Komponenten können entweichen. Hier liegt

eine große Fehlerquelle der Schürfe für Untersuchungen auf bestimmte chemische Verbindungen (BLfU 2010).

3.5 Entnahme von Bodenproben

Bei der Entnahme von Bodenproben können zahlreiche Fehler auftreten, die zu unsicheren bzw. falschen Untersuchungsergebnissen führen. Hierzu zählen einerseits die Durchführung der Probennahme, das „Handling“, von der Entnahme der Probe aus dem Aufschluss, über den Transport und die Lagerung bis zur Dokumentation und schließlich die Übergabe an das Labor und andererseits die erforderliche Probenmenge.

3.5.1 Probenmenge

Die erforderliche Probenmenge wird bestimmt durch:

- Anforderungen an die Repräsentativität der Bodenprobe für die Fragestellung der Untersuchung,
- den geplanten Analysenumfang (einschließlich u.a. von Analysen zur Qualitätssicherung und Rückstellproben).

Nach Anhang 1 BBodSchV richtet sich die notwendige Probenmenge gemäß der DIN 18123:11.96 (aktualisiert DIN 18123:03.10) nach dem Größtkorn und muss ausreichen, um nach sachgerechter Probenvorbehandlung die Laboruntersuchung zu gewährleisten. Auch die Bereitstellung von Rückstellproben ist zu beachten (BBodSchV 1999). Der FBU empfiehlt aber die Anwendung der DIN 18123:03.10 (DIN 18123, 2010) nur zur Bestimmung der Korngrößenverteilung (FBU 2005). Zur Ermittlung der erforderlichen Probenmenge bei der Bodenprobennahme führt die Anwendung dieser Norm bei grobkörnigem Material zu unpraktikabel großen Mengen. Für diese Fragestellung empfiehlt der FBU anstelle der DIN 18123:03.10 (DIN 18123, 2010) die LAGA Richtlinie-PN 98 (LAGA 2001) anzuwenden und bei einer Fortschreibung der BBodSchV aufzunehmen.

Das „Merkblatt 3.8/4“ und die „LABO-Arbeitshilfe“ nehmen ebenfalls die LAGA-Richtlinie PN 98 als Grundlage zur Ermittlung der Probenmenge (BLfU 2010, LABO 2002). Ältere Materialien wie die „ITVA-Arbeitshilfe“ (ITVA 1995) und der „Boden-Abfall-Bericht“ (LfUBW 1997) greifen auf die ältere LAGA-Richtlinie PN 2/78 zurück. Sowohl die LAGA-Richtlinien als auch die DIN 18123:03.10 (DIN 18123, 2010) geben die erforderliche Mindestprobenmenge in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser an, wobei sich aber

einige relevante Unterschiede zeigen, die vom „UBA-Vorhaben“ detailliert ausgearbeitet wurden (Meiler et al. 2003). Da die DIN 18123:10.03 keinen Bezug auf die Entnahme einer repräsentativen Bodenprobe zur Durchführung chemischer Analysen hat, sollte bei der Festlegung der Mindestprobenmenge in Abhängigkeit vom Größtkorn nicht mehr auf diese Norm zurückgegriffen werden. Sie ist zielgerichtet auf die Ermittlung der Korngrößenverteilung durch Siebung anzuwenden. Dies hat der FBU berücksichtigt (FBU 2005, 2009).

So sind nach LAGA-Richtlinie PN 98 bei feinkörnigen Böden (Korngrößen bis ≤ 2 mm) in der Regel von 0,5 – 1,0 l (entsprechend 0,8 – 1,6 kg) feldfrisches Probenmaterial ausreichend, damit die Repräsentativität gewahrt bleibt und für chemische Untersuchungen ausreichend Material zur Verfügung steht (Tabelle 3 der Richtlinie). Bei sehr inhomogenem Material und Boden mit einem hohen Skelettgehalt (d. h. Material mit einem Durchmesser > 2 mm) sollte die Entnahmemenge ca. 4 kg umfassen, um eine ausreichende Menge an Feinanteil (1 bis 2 kg) gewinnen zu können (LAGA 2001).

Der Durchmesser des Größtkorns bestimmt auch den zulässigen Bohrdurchmesser und das anzuwendende Bohr- bzw. Aufschlussverfahren. Betrachtungen im Zusammenhang mit der Probenmenge sind im Kapitel 3.4.1.1 enthalten.

Die DIN ISO 10381-2:08.03 macht keine Angaben zur erforderlichen Probenmenge, sie weist aber bei der Auswahl der Probennahmeverfahren darauf hin, dass die für die vorgesehenen Untersuchungen erforderliche Probenmenge berücksichtigt werden sollte (DIN ISO 10381, 2003). Weiterhin benutzt diese Norm den Begriff „Probengröße“. Bei der Auswahl des Probennahmegerätes muss die Probengröße ausreichend sein, um die Durchführung aller Untersuchungen und Analysen zu gewährleisten und um alle zu bestimmenden Bodeneigenschaften zu repräsentieren. Die Proben sollten auch nicht zu groß sein, um Änderungen in den zu bestimmenden Bodeneigenschaften nicht zu verwischen.

Nach DIN ISO 10381-1:08.03 sollten mindestens 500 g feldfrischer Boden für chemische Untersuchungen gewonnen werden. Eine Probenmenge für Bestimmung von physikalischen Bodenkennwerten wird nicht festgelegt (DIN ISO 10381-1, 2003).

Analog der Richtlinie-LAGA PN 98 werden einzelne größere Stücke oder in einem geringen Prozentsatz (<5 Vol.%) enthaltene größere Fraktionen nicht zur Bestimmung des Größtkornkomponentendurchmessers herangezogen (LAGA 2001, BLfU 2010). Grobmaterialien > 2 mm und Fremdmaterialien, die möglicherweise Schadstoffe enthalten oder denen diese anhaften können, sollten nach Anhang 1 der BBodSchV der gesamten Probe entnommen werden und gesondert der Laboruntersuchung zugeführt werden. Die

„OFD-BAM-Anforderung“ gibt den Hinweis, dass eine Abtrennung von Fremdmaterial nur in der Grobfraction praktikabel ist (OFD-BAM 2008). Die „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002) und das „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010) weisen darauf hin, dass Grobmaterialien, die möglicherweise Schadstoffe enthalten, als repräsentative Anteile als Sonderproben zu entnehmen und für Einzelanalysen aufzubereiten sind. Ihr Massenanteil an der beprobten Schichteinheit bzw. am Bodenhorizont ist zu dokumentieren, so wie es bereits auch die BBodSchV fordert (BBodSchV 1999). Entsprechende Hinweise gibt die DIN ISO 10381-1:08.03, wobei auf die DIN ISO 11464:12.06 (DIN ISO 11464, 2006), eine Norm der Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen zurückgegriffen werden sollte.

Die Probenmenge u.a auch im Zusammenhang mit den Aufschlussverfahren ist ein nicht zu vernachlässigender Parameter im Hinblick auf Fehlerbetrachtungen, Repräsentativität der Probennahme und der Probennahmeunsicherheit. So basieren die in den vorhandenen Normen und Regelwerken enthaltenen Empfehlungen und Vorgaben zur Bestimmung der jeweils notwendigen Mindestprobenmenge auf der Abhängigkeit des Probennahmefehlers von der jeweiligen Korngröße. Die Probenmenge wird je nach Aufgabenstellung über Größen wie Gewicht oder Körnung bestimmt. Die Abhängigkeit des Probennahmefehlers von der **Heterogenität** wird in keinem der betrachteten Regelwerke zur Bestimmung der Probenmenge berücksichtigt. Hier spielen u.a. auch Verteilungsmuster von Schadstoffen im Boden (volumen- und oberflächenproportionale Schadstoffbindung bei Bodenpartikel) eine wesentliche Rolle. Die Dissertation von Spirgath beleuchtet dieses Problem ausführlich (Spirgath 2006). In dem Teil 2 zur Probennahmeunsicherheit des vorliegenden Gutachtens wird dieses Thema wieder aufgegriffen. Auch das „UBA-Vorhaben“ zeigt dieses kritische und nicht zu unterschätzende Problem auf (Meiler et al. 2003).

3.5.2 Durchführung der Probennahme, Transport und Lagerung

3.5.2.1 Querkontaminationen

Die „LABO-Arbeitshilfe“ weist darauf hin, dass eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse maßgeblich durch die Vorgehensweise bei der Entnahme aus dem Probengewinnungsgerät bestimmt wird (LABO 2002). In jedem Fall müssen die Proben zur Vermeidung von entnahmebedingten Kontaminationen verschleppungsfrei gewonnen werden. Kontaminationsfreiheit und Vermeidung von Verschleppungen bei der Probenentnahme aber auch bei den Aufschlüssen (Kapitel 3.4) sind sowohl in der DIN ISO 10381-2:08.03 (DIN ISO 10381-2, 2003) und DIN ISO 10381-4:04.04 (DIN ISO 10381-4,

2004) als auch in den länderübergreifenden und -spezifischen Materialien (u.a. „LABO-Arbeitshilfe“, „Merkblatt 3.8/4“, „OFD-BAM-Anforderung“ (LABO 2002; BLfU 2010, OFD-BAM 2008) ein grundsätzliches Thema. So geht die DIN ISO 10381-2:08.03 in einem gesonderten Kapitel auf Querkontaminationen der Probennahmeverfahren ein. Die Norm gibt weiterhin eine ausführliche Darstellung zur Aufbewahrung der Proben im Zusammenhang mit Materialien der Probengefäße (DIN ISO 10381-2, 2003). Die „LABO-Arbeitshilfe“ stellt die Problematik der Kontamination von Schadstoffen sehr detailliert dar (LABO 2002). Auch die ITVA-Arbeitshilfe weist auf Schadstoff-Verschleppungen hin (ITVA 1995).

Diese Querkontaminationen bedürfen einer Fehlerabschätzung, denn sie tragen zur Messunsicherheit bei. Es sind zwar Maßnahmen zur Minderung der Querkontamination bekannt, diese können aber nicht quantifiziert werden. Hier sind wieder Vergleichsprobennahmen notwendig.

3.5.2.2. Probenentnahme aus der Bohrung

Bei Sondierungen und Bohrungen mit seitlich offenem Kernrohr erfolgt die Entnahme gestörter Proben u.a. mit Kelle oder Spachtel direkt aus dem Kernrohr, unmittelbar nachdem der Bohrkern an die Oberfläche befördert wurde. Bei geschlossenen Kernrohren (großkalibrige Bohrungen) wird das Kernmaterial vor der Probenentnahme in einer Kernkiste tiefenorientiert ausgelegt. Die Art und Sorgfalt der Kernentleerung (mechanische Werkzeuge, Pressluft) und die Lagerdauer des Probenmaterials in der Kernkiste beeinflussen die Probenqualität (BLfU 2010).

Die DIN ISO 10381-2:08.03 gibt zu diesen Probenentnahmen keine Anleitung oder Handlungsempfehlung. Die Norm gibt nur den Hinweis auf Benutzung einer Kelle aus nicht rostendem Stahl bei Überführen der Bodenproben in die Probengefäße (DIN ISO 10381-2, 2003). Detaillierte Vorgehensweisen bei der Entnahme von Bodenproben aus Sondiersonden finden sich im „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010) und „Handbuch Altlasten“ (HLUG 2002). Nach erfolgter Bodenansprache wird die Probe aus der Längsöffnung der Rammsonde durch Ausstechen eines Segments gewonnen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Kontaktbereiche zum Bohrgestänge, die durch den Bohrvorgang am stärksten beeinflusst wurden (z.B. durch Erwärmung, Verschleppung), abgetrennt werden (BLfU 2010). Auf die Entnahme der Bodenproben aus einer Rammkernsonde zur Vermeidung von Randeffekten wurde bereits in Kapitel 3.4.1.3 hingewiesen.

In Bezug zu den bereits erläuterten Querkontaminationen empfiehlt die DIN ISO 10381-2:08.03 Gerätschaften aus nichtrostendem Stahl (DIN ISO 10381-2, 2003), die „OFD-BAM-

Anforderung“ Edelstahl (nicht lackiert) (OFD-BAM 2008), das „Merkblatt 3.8/4“ inerte Materialien, die keine Stoffe aus der Probe aufnehmen und keine an die Probe abgeben z.B. auch unlackierte Edelstahlgeräte (BLfU 2010).

In diesem Zusammenhang wird in den genannten Werken auf die Sauberkeit und Reinigung der Geräte hingewiesen. Gerade im Handling und Umgang mit den Probennahmegeräten liegt eine erhebliche Fehlerquelle, die stark von der Verantwortung des Probennehmers abhängig ist. In diesem Zusammenhang steht auch die Auswahl der Probennahmegeräte zur Vermeidung von Kontaminationen (Kapitel 3.5.2.1). Die DIN ISO 10381-2:08.03 weist ausdrücklich darauf hin, dass zwischen dem Wechsel der Probennahmepunkte die Probennahmegerätschaften zu reinigen sind. Reinigungsmittel werden nicht vorgeschlagen (DIN ISO 10381-2, 2003). Das „Merkblatt 3.8/4“, die „LABO-Arbeitshilfe“ und die „OFD-BAM-Anforderung“ geben für diese Reinigungsschritte Wasser für anorganische Verunreinigungen und organisches Lösungsmittel z.B. Alkohol oder Aceton für organische Verunreinigungen an (BLfU 2010, LABO 2002, OFD-BAM 2008). Auch die „ITVA-Arbeitshilfe“ gibt Hinweise zur Reinigung der Gerätschaften (ITVA 1995).

3.5.2.3 Konservierung, Transport und Lagerung

Ein wichtiger Schritt der Probennahme ist der Transport und die Lagerung der Proben einschließlich der Probenkonservierung. Der Anhang 1 der BBodschV widmet sich dieser Problematik in einem eigenständigen Kapitel (Kapitel 2.5 der Verordnung). Hier kommt der Auswahl der Probengefäße eine zentrale Rolle zu. Dabei wird auf die Regelungen der Untersuchungsvorschriften hingewiesen. Fehlen Regelungen gibt es den Verweis auf DIN ISO 10381-1:08.03 (BBodSchV 1999). Diese regelt Maßnahmen der Konservierung, Verwendung von geeigneten Behältern einschließlich der Reinigung, des Transportes und der Lagerung sowie die Beschriftung (DIN ISO 10381-1, 2003). Verweise auf die DIN 10381-2:08.03 im Anhang 1 der BBodSchV gibt es nicht. Diese Norm enthält einen sehr detaillierten Überblick über Eignung von Probenbehältern (u.a. Behältermaterial) im Hinblick auf die vorhandene Verunreinigung und die analytischen Anforderungen und betrachtet die Vor- und Nachteile. Es wird ebenfalls auf das Füllen der Behälter hingewiesen. Der verbleibende Luftraum in den Behältern sollte so klein wie möglich gehalten werden (DIN ISO 10381-2, 2003). Das „Merkblatt 3.8/4“ besagt nur, dass für Untersuchungen auf organische Schadstoffe die Proben in gasdichte, verschließbare (Braun)Glasflaschen aufbewahrt werden sollten und für Untersuchungen auf anorganische Parameter Gefäße oder Beutel aus Polyethylen ausreichend sind (BLfU 2010). Sehr detailliert beschäftigt sich die „LABO-Arbeitshilfe“ mit dieser Problematik, wobei in Ablaufschemata Schritte der Reinigung und

Konditionierung der Probengefäße dargestellt werden (LABO 2002). Auch die „OFD-BAM-Anforderung“ hat ein ausführliches Kapitel zu dieser Problematik entsprechend des Anhangs 1 der BBodSchV und gibt u.a. Materialien der Probengefäße in Abhängigkeit von den zu bestimmenden Parametern an (OFD-BAM 2008).

Die Zugabe chemischer Konservierungsmittel oder stabilisierender Substanzen ist bei der Bodenprobennahme nicht üblich, wobei eine Einteilung der Probenstabilität in drei Klassen erfolgt. Der Transport und die Lagerung erfolgen in gekühltem Zustand (unterhalb 5°C) (DIN ISO 10381-1, 2003).

Für Untersuchungen auf organische Schadstoffe in Böden wird für die Lagerung und den Transport die DIN ISO 14507:04.07 im Anhang 1 der BBodSchV benannt (DIN ISO 14507, 2007). Die Norm enthält die wichtigsten Vorbehandlungsverfahren, die sich im Routinebetrieb bewährt haben (Handbuch Bodenuntersuchung). Allerdings bestehen erhebliche Vorbehalte wegen des befürchteten großen Aufwandes (siehe Kapitel 2.1.1). Es wird auf die Analysen-Normen verwiesen, in den stoffspezifisch spezielle Verfahren der Probenvorbereitung eingeschlossen sind (FBU 2005, FBU 2009). Dennoch empfiehlt der Fachbeirat Bodenuntersuchungen die DIN ISO 14507:04.07 nicht mehr, sondern die **DIN 19747:07.09** (DIN 194747, 2009), die eine matrixübergreifende Norm zur Probebehandlung darstellt (FBU 2009).

Hier stellt sich die Frage, in wieweit sich Probenentnahme und Probenvorbehandlung überschneiden und nicht strikt abzugrenzen sind. Auch die enge Zusammenarbeit des Probennehmers mit dem Labor spielt eine zentrale Rolle. Die genannten Normen und Materialien weisen darauf hin, dass Absprachen mit dem Labor zutreffen sind.

3.5.2.4 Dokumentation (Probennahmeberichte, -protokolle)

Nach Anhang 1 der BBodSchV wird im Kapitel 4 „Qualitätssicherung“ die Dokumentation der Probennahme gefordert, die alle für die Laboruntersuchung und die Auswertung der Untersuchungsergebnisse relevanten Informationen (Probennahmezeitpunkt, Probennehmer, Lage der Untersuchungsfläche und der Probennahmepunkte, Flächenbezeichnung, Beprobungstiefe, Bodenhorizonte gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung, Schichtenverzeichnis, Entnahmeverfahren, ehemalige und gegenwärtige Flächennutzung, Vorkenntnisse zu Kontaminationen) enthält. So sollten bestehende Normen, Regelungen der Länder und fachliche Regeln zur Qualitätssicherung beachtet werden (BBodSchV 1999). Die „OFD-BAM-Anforderung“ präzisiert und erweitert die Angaben des Anhangs 1 der BBodSchV, die sich zwar auf Untersuchungen auf

Bundesliegenschaften beziehen, aber auch auf andere Fragestellungen anwendbar sind (OFD-BAM 2008). Dazu zählen:

- Probenbezeichnung,
- Lageskizze der Probennahmepunkte bzw. -flächen
- Meteorologische Bedingungen
- Geologisches Aufschlussverfahren, Probennahmepunkte, -intervalle, -tiefe im Profil
- Beschreibung von Art, Lage und Verteilung von Fremdmaterialanteilen, Hinweise auf Kontaminationen, Auffälligkeiten usw.
- Probennahmeart (Einzelprobe, Mischprobe)
- Probennahmegeräte (Material), Angaben zu Probengefäßen und zur Probenkonservierung
- Angaben zu Untersuchungen vor Ort.

Weiterhin sind die Ergebnisse der Bohrkerndokumentation, die Aufnahme von Schürfen sowie anderer natürlicher und künstlicher Aufschlüsse grafisch darzustellen und gegebenenfalls durch Fotodokumentationen zu ergänzen (OFD-BAM 2008).

Die DIN ISO 10381-1:08.03 enthält detaillierte Angaben zum Probennahmebericht (Titel- und Standortdaten, Durchführung der Probennahme, Transport und Lagerung, Proben-, Profil- und Standortbeschreibung). Dieser dokumentiert den lückenlosen Verbleib der Proben, so wie es für gesetzliche Maßnahmen erforderlich ist. Die Rückverfolgung von Proben dient der Information über den Weg der Probe vom Ort der Entnahme bis zur Datenauswertung. Die Norm gibt kein Musterprobennahmeprotokoll vor (DIN ISO 10381-1, 2003). Die DIN ISO 10381-2:08.03 verweist auf DIN ISO 10381-1 im Probennahmebericht, fordert aber auch eine genaue Beschreibung der Probennahmeverfahren und der benutzten Geräte. So sollte bei Abweichungen der tatsächlich benutzten Verfahren und Geräte von den ursprünglich geplanten eine Dokumentation erfolgen (DIN ISO 10381-2, 2003).

Sehr umfangreich erweist sich in dieser Hinsicht das „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010). Der wesentliche Bestandteil der Dokumentation der Probennahme ist das Probennahmeprotokoll, in dem alle relevanten Daten (Titeldaten, Standortbeschreibung, Beschreibung der Aufnahmesituation sowie des Bohr- und Entnahmeverfahrens, Probenbeschreibung sowie Angaben zum Probentransport und zur Lagerung) enthalten sein müssen. Ein Muster-Probennahmeprotokoll ist im Anhang 3 des Merkblattes enthalten. Zur vollständigen Dokumentation gehören auch die genaue Profilbeschreibung

(Schichtenverzeichnis nach Kurz-KA 5 bzw. auf Grundlage der DIN EN ISO14688-1:06.04 und 14689-1:01.03 unter Einbeziehung der Parameter der Kurz-KA 5) (DIN EN ISO 14688-1, 2004; DIN EN ISO 14689, 2003; Kurz-KA 5, 2009) und die grafische Darstellung der aufgenommenen Profile (nach DIN 19673:10.02 (DIN 19673, 2002) bzw. DIN 4023:02.06 (DIN 4023, 2006)) (nähere Erläuterungen in Kapitel 3.6).

Nach der DIN EN ISO/IEC 17025:2005 muss jeder Prüfbericht alle Informationen enthalten, die der Kunde verlangt und alle die, die für die Interpretation der Prüfergebnisse erforderlich sind (siehe dort Ziffer 5.10.1). Der Gutachter ist verpflichtet diese Informationen zu liefern, da das Analytiklabor Bodenproben meist nicht selbst entnimmt. Nur mit umfassender Probenbeschreibung ist die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf untersuchte Fläche möglich (DIN EN ISO/IEC 17025, 2005).

Vorgaben zur Dokumentation gibt auch die ITVA-Arbeitshilfe „Beschreibung und Benennung von Bodenproben bei der Verdachtsflächenerkundung“ (ITVA 2006).

3.5.3 Probennahme bei Verdacht auf leichtflüchtige Stoffe

An die Entnahme von repräsentativen Bodenproben für Untersuchungen auf leichtflüchtige organische Verbindungen, z.B. Aromaten (BTEX) und leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen (LHKW), sind erhöhte und spezielle Anforderungen an die Probennahme zu stellen. Dies stellt einen Spezialfall der Bodenprobennahme dar, da sich diese Substanzen zwischen dem Aufschluss und der Entnahme bzw. Überführung in ein Probengefäß verflüchtigen können. Somit können Minderbefunde entstehen. Die DIN ISO 10381-1:08.03 weist auf die Notwendigkeit eines speziellen Probennahmeverfahrens hin. Es sollte die Probe nach der Entnahme im Gelände mit einer geeigneten Flüssigkeit überschichtet werden (DIN ISO 10381-1, 2003). Die DIN ISO 10381-2:08.03 und die „OFD-BAM-Anforderung“ empfehlen die Zugabe eines nichtwässrigen Lösungsmittels z.B. Methanol zur Vermeidung von Verlusten an flüchtigen Verbindungen (DIN ISO 10381-2, 2003; OFD-BAM 2008).

Eine Handlungsempfehlung zur Entnahme von Feststoffproben für die Analyse auf leichtflüchtige Verbindungen im Altlastenbereich wurde 2002 von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg erarbeitet (LfUBW 2002). Dabei galt es, einen praxisnahen Kompromiss zwischen Minimierung von Analytverlusten und hoher Praktikabilität zu finden. Diese Empfehlung gilt insbesondere für Bestimmung von Aromaten (BTEX) und leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen (LHKW) in Bodenproben

(originalfeuchte Ausgangsprobe, maximale Korngröße ca. 2 mm). Für andere leichtflüchtige Schadstoffe kann die Empfehlung sinngemäß angewendet werden. Probleme bestehen bei Böden mit größerem Korndurchmesser, insbesondere bei sandig kiesigen Böden. Die Probenentnahme erfolgt mit einem metallischen Probenstecher mit Ausstoßzylinder. Das Probenmaterial (10 g) ist mit dem Ausstoßzylinder in das vorbereitete Probengefäß (Schraubdeckelglas mit PTFE-beschichtetem Deckel) möglichst zügig zu überführen. Vom frischen Bohrkern sind die Randbereiche abzuschälen und bei frischen Schürfgruben ist die Grubenwandung abzusteichen. Die Probengefäße müssen bei unter 10°C und lichtgeschützt ins Labor transportiert werden.

Auch das „Merkblatt 3.8/4“ greift auf diese Methode zurück (BLfU 2010). Eine detaillierte Beschreibung dieser Art der Probennahme ist ebenfalls in der „OFD-BAM-Anforderung“ enthalten (OFD-BAM 2008).

Die Auswahl des Lösungsmittels spielt bei den vorgestellten Methoden eine zentrale Rolle. Das zur Konservierung und Extraktion verwendete Lösemittel muss prinzipiell folgende Eigenschaften erfüllen: gute Löslichkeit für die Analyten, gute Benetzung der Feststoffpartikel, vollständige Mischbarkeit mit Wasser, relativ geringer Dampfdruck, keine Störung bei der analytischen Detektion mittels Gaschromatographie (Aufnahme eines Chromatogramms, Verfügbarkeit in blindwertfreier Qualität) sowie geringe Toxizität und Umweltbeeinträchtigung (LfUBW 2002). Ein optimales Lösungsmittel ist nicht bekannt. Methanol wird auch durch die Anwendung des Analysenverfahrens favorisiert (Headspace-Verfahren (DIN ISO 22155, 2006)).

Auch Schlauchkern- oder Linerbohrungen (siehe Kapitel 3.4.1.6) können für die Probenentnahme von Böden zur Untersuchung auf leichtflüchtige Stoffe angewendet werden. So können Verluste dieser Verbindungen weitgehend vermieden werden. Dabei muss das Schlauch- bzw. Linermaterial und die weitere Lagerung und Aufarbeitung der Bohrkerns den jeweils zu erwartenden Schadstoffen angepasst werden, da z.B. leichtflüchtige organische Stoffe Wechselwirkungen mit dem Schlauchmaterial eingehen können (Adsorption) (BLfU 2010).

Die „ITVA-Arbeitshilfe“ empfiehlt zur teilweisen Vermeidung von Minderbefunden leichtflüchtiger Verbindungen bei Probenmaterialien aus offenen Kernrohren das schnelle Ausstechen von „Mini-Cores“, welches aber nur bei bindigem Material anwendbar ist (ITVA 1995).

3.5.4 Probenentnahme bei Schürfen

Die „OFD-BAM-Anforderung“ gibt Hinweise zur Entnahme von Bodenproben aus Schürfen. Die Entnahmestellen der Proben im Schurf sind von nachgefallenem Aushub zu säubern. Die Beprobung aus vertikalen Profilen erfolgt stets von unten nach oben. In Abhängigkeit von der Zielstellung und dem zu erwartenden Schadstoffspektrum sollte die Entnahme der Proben zeitnah erfolgen (OFD-BAM 2008).

Die DIN ISO 10381-2:08.03 geht hauptsächlich auf das Anlegen der Schürfe einschließlich von Sicherheitsmaßnahmen ein, gibt aber auch einige Hinweise zur Probenentnahme. Bei Schürfen bis zu 4,5 m (maschinelles Ausschachten) sollte vor Entnahme einer Probe (gestörte oder ungestörte Lagerung) die Sohle des Schurfes lose oder hereingefallenem Material gesäubert werden. Unter Benutzung eines Baggerlöffels mit einer aus nicht rostendem Stahl bestehenden Kelle wird die Entnahme von gestörten Proben aus der Sohle beschrieben. Für ungestörte Proben wird die Benutzung eines Stechrahmens empfohlen (DIN ISO 10381-2, 2003).

3.5.5 Probenteilung

Eine Teilung von Proben ist dann notwendig, wenn bei der Probennahme z. B. Beprobung von Schürfen große Probenmengen anfallen. Die DIN ISO 10381-1:08.03 und 10381-2:08.03 enthalten keine Angaben zur Probenteilung. Hinweise zur Durchführung der Probenteilung finden sich in der „LABO-Arbeitshilfe“ (LABO 2002) und im „Merkblatt 3.8/4“ (BLfU 2010). Hier wird Bezug genommen auf die LAGA-Richtlinie PN 98 (LAGA 2001). Diese gibt verschiedene Methoden zur Probenverjüngung an:

- fraktioniertes Schaufeln
- Verjüngung durch Aufkegeln und Vierteln mittels Probenkreuz
- Teilen mittels Probenstecher
- Riffelteiler / Rotationsteiler

Das Mindestvolumen der nach der Teilung erhaltenen Probe (Laborprobe) sollte in Abhängigkeit vom Größtkorn die in Tabelle 3 der LAGA-Richtlinie PN 98 festgelegten Werte nicht unterschreiten (LAGA 2001) (siehe Kapitel 3.5.1 dieses Gutachtens).

Durch die Vorgänge bei der Probenteilung besteht die Gefahr der Veränderung der Probe. Für Proben zur Untersuchung auf leichtflüchtige Substanzen ist mit Verlusten zu rechnen.

Fragen der Repräsentativität und Heterogenität der Proben spielen hier ebenfalls eine dominierende Rolle (siehe auch Kapitel 3.5.1).

3.6 Bodenansprache und Profilbeschreibung

Die Bodenansprache und die Profilbeschreibung stellen notwendige Kriterien für die Aussagefähigkeit und die Bewertung der Untersuchungsergebnisse von Böden dar. Diese erfolgen unmittelbar nach Ziehen der Bohrkerns bzw. nach dem Anlegen des Schurfs. Die Profilbeschreibung ist auch ein wichtiger Bestandteil der Dokumentation Bodenprobennahme (siehe Kapitel 3.5.2.4).

Der Anhang 1 der BBodSchV (Kapitel 1. „Untersuchungsumfang und erforderlicher Kenntnisstand“, Kapitel 1.1 „Orientierende Untersuchung“) fordert eine Bodenansprache in dem Umfang, wie sie für die Gefahrenbeurteilung notwendig ist. Grundlage soll die Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage (KA 4, seit 2005 durch KA 5 ersetzt (Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005)) sein. Der FBU hebt bei der verbesserten und erweiterten 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 5) die Einarbeitung der Kriterien für die Stadtbodenkartierung hervor und empfiehlt die KA 5 für die Aufnahme in die BBodSchV bei einer Fortschreibung (FBU 2005, 2009). Von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ist ein Auszug der bodenkundlichen Kartieranleitung speziell für den Vollzug des BBodSchG erarbeitet worden (Bodenkundliche Kartieranleitung – Auszug für den vor- und nachsorgenden Bodenschutz - Kurz-KA 5 (Kurz-KA 5, 2009). Dieser Auszug dient der Beschreibung von Bodenhorizonten und -profilen sowie der bodenkundlichen und sensorischen Ansprache von Bodenproben in dem Umfang, wie er für vorsorgenden Bodenschutz und für die Gefahrenbeurteilung nach BBodSchV erforderlich ist, und wird vom FBU zur Anwendung empfohlen (FBU 2009).

Das „Merkblatt 3.8/4“ enthält ein daraus entwickeltes und an die Altlastenbearbeitung angepasstes Muster-Probennahmeprotokoll (BLfU 2010). Auch die ITVA-Arbeitshilfe F2-3 „Beschreibung und Benennung von Bodenproben bei der Verdachtsflächenerkundung“ zielt in die gleiche Richtung (ITVA 2006). Bei Aufnahme der Kurz-KA 5 2009 in das Handbuch der Bodenuntersuchung standen noch keine ausreichenden Aussagen zur Anwendung in der Praxis zur Verfügung (Handbuch der Bodenuntersuchung).

Auch die Normen der Baugrunduntersuchung und der geotechnischen Erkundung sind eine wichtige Arbeitsgrundlage zur Dokumentation von Schichten- und Probenbeschreibungen für Böden. Insbesondere bei Bohrprofilen von Auffüllungen und bei Baggerschürfen ist in der Regel eine Fotodokumentation durchzuführen. Bei Mischproben kann es erforderlich sein,

jeden einzelnen Einstich zu beschreiben. Allerdings gab es hier zahlreiche Anpassungen der Normen vor dem Hintergrund der Fortschritte in der Europäischen Normung (CEN). Die DIN 4022 regelte die für Deutschland gültige Benennung und Beschreibung von Boden und Fels (u.a. Erstellung eines Schichtenverzeichnisses für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels). Im August 2002 wurde die DIN 4022 durch die Normen DIN EN ISO 14688-1:04.04, DIN EN ISO 14689-1:01.03 und DIN EN ISO 22475-1:01.07 abgelöst. Die DIN 4022 hat im Januar 2007 offiziell ihre Gültigkeit verloren. Die DIN EN ISO 14688-1:04.04 behandelt die Benennung von Boden, die DIN EN ISO 14689-1:01.03 von Fels bei Baugrunduntersuchungen. Allein die DIN 4023:02.06 wurde "nur" aktualisiert (DIN 4023, 2006). Daneben kommt die DIN 19673:10.02 "Zeichnerische Darstellung bodenkundlicher Untersuchungsergebnisse" zum Einsatz (DIN 19673, 2002).

Der FBU empfiehlt bei entsprechenden Aufgabenstellungen die mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung abgestimmte Norm DIN 19673:10.02 (19673, 2002) hinzuziehen (FBU 2009).

Im Anwendungsbereich der DIN EN ISO 14688-1:04.04 heißt es: „Die Benennung von Böden für bodenkundliche Aufgaben sowie im Rahmen von Maßnahmen zum Schutz der Böden und zur Sanierung erfolgen nach ISO 11259“. Die DIN ISO 11259:08.00-Bodenbeschaffenheit - Vereinfachte Bodenbeschreibung - fasst die grundlegenden Datensätze zusammen, die für eine Beschreibung des Bodens nach vereinfachten Regeln auf internationaler Ebene erforderlich sind.

Die Arbeitshilfe 13 „Boden- und Grundwasserschutz“ der OFD (Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz) schlussfolgert, dass es für die Untersuchung von Altlasten doch beim „Alten“ bleibt, so wie es die BBodSchV mit der Anwendung der bodenkundlichen Kartieranleitung regelt (OFD 2008). So weist die Arbeitshilfe auch darauf hin, dass z.B. Beschreibungen für Oberboden für Baugrund-Untersuchungen oft nicht für Untersuchungen im Bereich Altlasten ausreichend sind, insbesondere wenn es um den Wirkungspfad Boden - Mensch geht. Es ist die Standortbeurteilung in dem Umfang durchzuführen, der für die Gefahrenbeurteilung erforderlich ist. Je nach Fragestellung und Standort sind ggf. weitere relevante Feld- und Laborparameter (z. B. Hohlräume wie Risse und Poren, Anzeichen biologischer Aktivität etc.) zu bestimmen und zu dokumentieren (BLfU 2010). So sollten auch Beobachtungen im Bereich der Probennahmestellen u.a. über Makroporen im Boden notwendig sein (OFD 2008). Es wird sich zeigen, in wieweit die auf die internationale Norm ISO 25177:2008 fußende DIN EN ISO 25177.01.11 (Bodenbeschaffenheit - Vereinfachte Bodenbeschreibung im Feld- hier Zugang findet (DIN EN ISO 25177, 2011) (Publikation in Vorbereitung).

Die Bodenansprache ist ein sensibler Schritt im Bereich der Altlastenuntersuchung, denn es kann zu Verschleppungen von Schadstoffen im Bodenprofil kommen. Vor der Bodenansprache sind Verschleppungen an den Bohrkernrändern bzw. entlang der Sondenöffnung z.B. mittels einer Spachtel senkrecht zur Längsachse des Bohrkerns zu entfernen. Sollen Bodenproben auf leichtflüchtige Schadstoffe untersucht werden, ist die detaillierte geologische Aufnahme des Bohrkerns direkt nach der Probennahme durchzuführen (BLfU 2010).

Gerade im Altlastenbereich sollte ein besonderes Augenmerk auf organoleptische Auffälligkeiten (Farbe, Geruch, Konsistenz, Auftreten von Schadstoffen in Phase etc.) und anthropogene Beimengungen (Art, Korngrößen, Farbe) gelegt werden.

Nach BBodSchV ist die Vorgehensweise bei der Probennahme zu begründen u.a. auch Form und Umfang der Proben- und Schichtenbeschreibung. Nach der Arbeitshilfe des OFD ist es wichtig, alle maßgeblichen Informationen zu dokumentieren, nicht unbedingt die Verwendung eines bestimmten Formulars (OFD 2008).

Das „Merkblatt 3.8/4“ weist darauf hin, dass es für die Praxis sinnvoll sein kann, die Bodenbeschreibung auf Grundlage der Normen für geotechnische Erkundung unter Einbeziehung der Parameter der Kurz-KA 5 (Kurz-KA 5, 2009) durchzuführen (BLfU 2010). Die grafische Darstellung des Profils kann dann nach DIN 4023:02.06 erfolgen (DIN 4023, 2006).

Die DIN ISO 10381-1:08.03 besagt, dass eine genaue Beschreibung von Böden, Profilen und Standorten sehr zeitaufwendig ist. Daher sollte eindeutig festgelegt sein, ob sie für jede einzelne Probe oder für eine Reihe von Proben in Abhängigkeit von der örtlichen Variabilität des Bodens, der Dichte der Probennahmepunkte und der Einteilung des Probennahmemusters durchgeführt werden sollte. Die Norm bezieht sich auf die Nutzung der Dokumente der ISO 11259 (DIN ISO 11259, 2000). Folgende Angaben sind für eine Beschreibung von Bodenproben und -profilen notwendig: Bodentyp, Bodenart, Gesteinsart, Mächtigkeit von Schichten und Horizonten, Farbe, Geruch, Humus-Gehalt (geschätzt), Carbonat-Gehalt (geschätzt), Eisen- und Sesquioxid-Gehalte (geschätzt), Bodenfeuchte, Dichte und Bodengefüge (DIN ISO 10381-1, 2003).

3.7 Qualitätssicherung und Probennahmefehler

3.7.1 Allgemeines

Die Qualität umweltanalytischer Untersuchungen hängt von der Qualität jedes einzelnen Schrittes in der Gesamtuntersuchung ab, von der Planung, der Probennahme, der Probenbehandlung, der chemischen Analyse bis hin zur Auswertung und Interpretation der Analysenergebnisse. Die Probennahme ist ein kritischer Arbeitsschritt, da Fehler anschließend im Labor nicht (mehr) feststellbar und zu korrigieren sind.

Grundlegendes Ziel der Qualitätssicherung ist die Sicherstellung richtiger und reproduzierbarer Untersuchungsergebnisse:

- die Sicherung der Probenrepräsentativität
- die Vermeidung von Kontaminationen und unerwünschten Veränderungen der Proben bei der Probennahme
- eine definierte Reproduzierbarkeit und Präzision (Probennahme und Analytik) sowie Nachvollziehbarkeit (Dokumentation, Planung, Auswertung) aller Arbeiten
- ein einheitliches Qualitätsniveau, um die Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse zu gewährleisten

Die Forderung nach Repräsentativität ist im Medium Boden wegen der Heterogenität besonders problematisch (siehe auch Kapitel 3.5.1). Die erreichbare Repräsentativität ist nicht nur vom Medium sondern auch vom Schadstoff abhängig.

3.7.2 Hinweise in der BBodSchV, in den Normen und länderübergreifenden und - spezifischen Materialien

Der Anhang 1 der BBodSchV verweist im Kapitel 4 „Qualitätssicherung“ nur allgemein auf gültige Aspekte der Qualitätssicherung bei der Probennahme und Probenlagerung (BBodSchV 1999). Dagegen werden für die Probenvorbereitung und Analytik konkrete externe und interne Maßnahmen festgelegt. Die Beeinflussung der chemischen, physikalischen und biologischen Beschaffenheit des Probenmaterials sollte durch Arbeitsverfahren und/oder -materialien sowie aus Lagerungsbedingungen so weit wie möglich ausgeschlossen werden. Dementsprechend haben die Probennahme, der Probentransport und die Probenlagerung zu erfolgen. Auf die notwendige Dokumentation wurde bereits im Kapitel 3.5.2.4 dieser Arbeit eingegangen.

Weiterhin wird auf den Einsatz von qualifiziertem Personal hingewiesen. Die „OFD-BAM-Anforderung“ ergänzt diese Punkte insbesondere im Hinblick auf die Dokumentation. So ist die einheitliche Probenansprache und -dokumentation eine wesentliche Voraussetzung für die Aussagefähigkeit der Ergebnisse. Weiterhin wird zur Vermeidung von Informationsverlusten gefordert, dass der Berichtersteller die Proben selbst zu entnehmen hat, mindestens aber bei der Probennahme anwesend sein muss (OFD-BAM 2008).

So legt die BBodSchV fest, dass bestehende Normen, Regelungen der Länder und fachliche Regeln zur Qualitätssicherung bei der Probennahme zu beachten sind (BBodSchV 1999). Hier gibt die „LABO-Arbeitshilfe“ eine detaillierte Aufstellung von qualitätssichernden Maßnahmen, die Teil des Probennahmeplans sind: u.a. Reinigungsvorschrift für das Probennahmegerät, Qualitätssicherungsproben, Blindwert der Umgebung der Probennahmestelle, Blindwert zur Überprüfung für den Transport, Doppelbestimmungen, Aufstockproben, Probenbeschriftung, Festlegung der zu füllenden Flaschen sowie Art und Weise der Füllung, Vor-Ort-Aufbereitung (Filtration, Homogenisierung), Stabilisierung der Proben vor Ort mit Kennzeichnung, Lagerung der Proben bis zum Abtransport, Lagerbedingungen, Festlegung der erlaubten Lagerzeiten von der Probennahme bis zur Messung, Transport und Transportbedingungen für die Proben (LABO 2002).

Das „Merkblatt 3.8/4“ legt eine Checkliste für die Qualitätssicherung zur Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen bei der Bodenprobennahme vor (BLfU 2010).

Der „Bericht-Boden-Abfall“ stellt separate Betrachtungen zu Einflüssen auf die Probenqualität mit entsprechenden Fehlerquellen an (u.a. Einfluss der Lage der Bohrungen, des Bohrverfahrens, der Art der Entnahme und der Gefäße, Probenaufbereitung) und gibt Hinweise zur Planung und praktischen Möglichkeiten der Qualitätssicherung. Wichtig ist der Hinweis, dass manche Fehlerquellen sich nur begrenzt ausschalten lassen und methodisch und strategisch bedingte Probleme und Ungenauigkeiten in die Auswertung der Ergebnisse einfließen sollten. Es wird sogar von der Möglichkeit einer realistischen Einschätzung der Unschärfe der getroffenen Aussagen bezüglich der Schadstoffgehalte und -verteilungen gesprochen (LfUBW 1997).

Eine Kontrolle der Probenqualität ist möglich durch:

- Sorgfalt bei der Planung und Vorbereitung der Probennahme, z.B. durch rechtzeitige Prüfung der Vollständigkeit und Sauberkeit der Ausrüstung (Checklisten u.a. zur Ausrüstung)

- Konkrete Arbeitsanweisungen; allerdings ist die Standardisierung der praktischen Entnahme nur mit Einschränkungen möglich, da die sehr unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Böden und die diversen Schadstoffe in diesen Böden zu flexiblen Vorgehensweisen zwingen
- stichprobenartige Kontrollen der Präzision und Sauberkeit bei der Durchführung der Probenahme vor Ort
- Blindwertproben, Eigenkontrollen
- Prüfung der Dokumentation auf Vollständigkeit und Plausibilität
- Berücksichtigung der einzelfallspezifischen Gegebenheiten bei der Auswertung und Interpretation

Nach DIN ISO 10381-1:08.03 besteht aufgrund der verschiedenen Zielsetzungen der Probennahme keine Möglichkeit der einfachen Aufreihung von Verfahren zur Qualitätsüberwachung und -sicherung, die von allen Einrichtungen mit Probennahmendiensteleistungen verfolgt werden kann. Konsequenter Weise ist dies bei der Probennahme schwieriger als bei der Analytik (DIN ISO 10381-1, 2003). So sollten die Einrichtungen u.a. die Anweisungen der DIN EN ISO/IEC 17 025: 08.05 befolgen.

Dagegen nimmt die DIN ISO 10381-2:08.03 keine Stellung zur Qualitätssicherung. Sie stellt aber im Hinblick auf die Auswahl der Verfahren die Frage, welche Präzision der Ergebnisse benötigt wird und welches Verfahren demzufolge benutzt werden kann. Hinweise zu Querkontaminationen sind auch ein Beitrag dieser Norm zu qualitätssichernden Maßnahmen (DIN ISO 10381-2, 2003).

Die DIN ISO 10381-4:04.04 stellt Anforderungen an die Bodenprobennahme im Rahmen der Qualitätssicherung, die folgende Aspekte einschließt (DIN ISO 10381-4, 2004):

- Messungen zur Qualitätssicherung müssen durch qualifiziertes Personal durchgeführt werden.
- Anwendung geeigneter Probennahmeausrüstung zur Vermeidung von Schadstoffverschleppungen und -verlusten
- Anwendung nachvollziehbarer Probennahmesysteme und -verfahren
- Off-site-Abschätzung der Probennahmevarianz

Während die ersten drei Punkte ähnlich den Anforderungen der anderen Normen und Materialien sind, fordert diese Norm als einzige der Normen zur Bodenbeschaffenheit eine Off-site-Abschätzung der Probennahmevarianz. So steht mehr die Frage nach der Abschätzung des Probennahmefehlers und der Messunsicherheit im Vordergrund (Kapitel 3.7.3).

3.7.3 Messunsicherheit und Validierung

Alle in verschiedenen Normen und Materialien dargestellten Betrachtungen zur Qualitätssicherung (Kapitel 3.7.2) sind Maßnahmen der internen Qualitätssicherung, die dazu beitragen, den **Probennahmefehler** und damit die **Messunsicherheit** zu minimieren. Diese ist aber kaum bekannt bzw. kann nur in komplex angelegten Versuchsreihen ermittelt werden. Externe Qualitätssicherungsmaßnahmen, die für die Analytik in der BBodSchV gefordert werden, werden in den Normen und Materialien nicht betrachtet. Hierzu zählen die erfolgreiche Teilnahme an Vergleichsprüfungen (insbesondere Ringversuche) und Kompetenzbestätigung gemäß DIN EN 45001: 05.90 (ersetzt durch die weltweit gültige Norm DIN EN ISO/IEC 17 025:08.05 (DIN EN ISO/IEC 17025, 2005).

Mit der DIN EN ISO/IEC 17025:08.05 steht nicht nur die Frage nach der Kompetenzbestätigung der Untersuchungseinrichtungen sondern auch die der **Validierung von Methoden**, als ein wesentlicher Bestandteil der Norm. Der Anspruch „gerichtsfeste Verfahren“ im Bereich des vor- und nachsorgenden Bodenschutzes zu erstellen, wird für den Bereich der chemischen Untersuchungsverfahren fast ausnahmslos verfolgt, lässt sich aber für die Probennahme nicht „so einfach“ wie in der Analytik erfüllen. Hier gibt es Grenzen, die die Validierungen auf Grund der Erfüllung bestimmter statistischer Parameter nicht oder sehr schwer möglich machen (Handbuch Bodenuntersuchung). In diesem Zusammenhang steht wieder die **Frage nach der Größe der Messunsicherheit bei der Probennahme**. Diese Thematik wird unter zu Grundlegung der Ergebnisse zahlreicher externer Vorhaben und Feldversuche tiefgründiger im 2. Teil des Gutachtens betrachtet.

Zur Messunsicherheit heißt es im Anhang 1 der BBodSchV: „Für das Analysenergebnis ist eine Messunsicherheit gemäß DIN 1319-4:12.85 (überarbeitet DIN 1319-4:02.99) und DIN 1319-3:05.96 anzugeben“ (DIN 1319-4, 1999; DIN 1319-3, 1996). Die „OFD-BAM-Anforderung“ ergänzt, dass die Veröffentlichungen des FBU zur Messunsicherheit zu beachten sind (OFD-BAM 2008).

Weiterhin stellt sich im Rahmen der Qualitätssicherung die Frage nach der **Gleichwertigkeit** von Verfahren. Hier heißt es nach Anhang 1 der BBodSchV, Kapitel 3.1.3 „Analysen-

verfahren“: „Sollen andere als die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Bundesanzeiger veröffentlichten Verfahren angewendet werden, ist dies zu begründen sowie nachzuweisen und zu dokumentieren, dass deren Ergebnisse mit den Ergebnissen der veröffentlichten Verfahren gleichwertig sind.“ Bei Anwendung von Alternativ-Verfahren ist nachzuweisen, dass diese zu den festgelegten Verfahren vergleichbar und gleichwertig sind (BBodSchV 1999).

Dies sind Betrachtungen, die bei der Probennahme auf lückenhafte Informationen stoßen.

3.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Ausführungen zum Stand der Probennahmeverfahren für Böden im Rahmen des vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutzes unter Einbeziehung von Normen und Regelwerken des Anhangs 1 der BBodSchV sowie von länderübergreifenden und -spezifischen Materialien zeigen, dass es zurzeit kein „Dokument“ gibt, das alle erforderlichen Aspekte einer Handlungsempfehlung für Probennahmeverfahren für Böden insbesondere auch unter Einbeziehung der Qualitätssicherung und der Bewertung von Messunsicherheiten gibt.

Auch der Begriff „Probennahmeverfahren“ wird nicht einheitlich verwendet. Er wird entsprechend der DIN ISO 10381-2:08.03 in dem vorliegenden Gutachten als zweistufiger Prozess – Aufschluss und Probenentnahme – einschließlich Probenlagerung und -transport sowie Dokumentation gesehen. Die Probennahmeplanung, die auch in die Auswahl der Probennahmeverfahren eingreift und einen unabdingbaren vorbereitenden Vorgang darstellt, soll nicht unbeachtet bleiben.

Tabelle 4 gibt einen Überblick über den jeweiligen inhaltlichen Beitrag der Normen des Anhangs 1 der BBodSchV zur Probengewinnung – Aufschlussverfahren und Probenentnahme (u.a. auch Probenart, Probenmenge), zur Konservierung, Lagerung und Transport, zum Probennahmebericht und zur Qualitätssicherung/Angaben zur Messunsicherheit. Diese für ein Probennahmeverfahren wichtigen Teilaspekte sollten im Hinblick auf eine Handlungsanleitung für ein Probennahmeverfahren im Zusammenhang betrachtet werden. Es wird jeweils die aktualisierte Fassung derjenigen betrachtet, die vom FBU bei Novellierung der BBodSchV empfohlen wird. Die Probennahmeplanung wird hier nicht miteinbezogen.

Die BBodSchV greift zur Festlegung der Vorgehensweise bei der „Probengewinnung“ (Kap. 2.4 des Anhangs der BBodSchV) sowohl auf Normen zur Untersuchung der „Bodenbeschaffenheit“ (insbesondere Normenreihe ISO 10381) als auch auf Normen aus

dem „geotechnischen Bereich“ zurück. Für spezielle Fragestellungen dient die Richtlinie LAGA PN 98 aus dem Abfallbereich, die zur Aufnahme bei Novellierung der BBodSchV durch das FBU empfohlen wurde (LAGA 2001). Obwohl die DIN 4021 als bautechnische Untersuchungsmethode zurückgezogen, durch die DIN EN ISO 22475-1:01.07 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung – ersetzt und durch das FBU in die Aufnahme des Anhangs 1 der BBodSchV empfohlen wurde, gibt es noch bestehende Diskrepanzen zwischen der Anwendung der Methoden der „Bodenuntersuchung“ und der Methoden aus dem geotechnischen Bereich. Im Anwendungsbereich der DIN EN ISO 22475-1:01.07 steht nun unmissverständlich „... gilt nicht für die Gewinnung von Bodenproben für landwirtschaftliche und umweltbezogene Bodenuntersuchungen“. So wird auf die Normenreihe DIN ISO 10381 verwiesen. Die Arbeitshilfe 13/2008 der OFD Hannover diskutiert diese Probleme ausführlich auch im Zusammenhang mit Problemen zur Bodenansprache und Profilbeschreibung (OFD 2008).

Zentrale Rolle für die Probennahmeverfahren von Böden spielt die Normenreihe DIN ISO 10381 - Bodenbeschaffenheit. Speziell mit der DIN ISO 10381-2:08.03 liegt eine Norm vor, die Anforderungen an die Probennahme von Boden im Hinblick auf die Untersuchung von Nährstoffgehalten und von Schadstoffgehalten festlegt. Mit der ersetzten DIN 4021 ist sie nach Anhang 1 der BBodSchV für die Auswahl von Probennahmeverfahren zur Fortschreibung der BBodSchV bestimmt. Die Norm nimmt bezüglich der Probenqualität keinen Bezug auf die geotechnischen Normen DIN 4021 (jetzt DIN EN ISO 22475-1:01.07) sondern unterscheidet in gestörte und ungestörte Proben. Die DIN 10381-2:08.03 ergänzend auch die anderen Teile der Normenreihe ISO 10381 werden aber mehr als die geotechnischen Normen den Qualitätsansprüchen möglicher Kontaminationen gerecht.

Es zeigte sich auch, dass in dieser Norm der Zusammenhang zwischen Aufschlussverfahren und Probenqualität nicht in ausreichendem Maße in Hinblick auf Anforderungen chemischer Untersuchungen herausgearbeitet wird. Hier spielen die Fragen der Messunsicherheit und Qualitätssicherung eine wichtige Rolle, die kaum betrachtet werden. Das gilt ebenfalls für Aspekte der Repräsentativität und der Heterogenität von Bodenproben, insbesondere wenn diese mit Schadstoffen angereichert sind. Auch die LAGA PN 98 gibt hier nicht ausreichend Antwort (LAGA 2001).

Weiterhin gibt die DIN ISO 10381 Normenreihe keine praktischen Hinweise zur Probennahme von Bodenproben zur Untersuchung auf leichtflüchtige Stoffe.

Mit der DIN 19474:07.09 steht eine matrixübergreifende Norm zur Untersuchung von Feststoffen einschließlich Böden und Abfall zur Probenvorbehandlung, Probenvorbereitung

und Probenaufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen zur Verfügung, die auch durch den FBU zur Aufnahme in die BBodSchV empfohlen wurde (FBU 2009). Diese Norm ist in Tabelle 4 nicht separat aufgeführt.

Es wurde deutlich, dass länderübergreifende und -spezifische Materialien eine wertvolle Unterstützung für die Anwendung der Normen und Regelwerke des Anhangs 1 der BBodSchV darstellen, die einerseits selbst auf Normen zurückgreifen, andererseits aber praxisrelevante Handlungsempfehlungen ergänzen und erweitern. Zentrale Rolle bei der Systematisierung und Aufstellung von Anforderungen an Aufschlussverfahren spielt die „ITVA-Arbeitshilfe“ zur Gewinnung von Feststoffproben, die auch auf die zurückgezogene „Baugrund-Norm“ DIN 4021 aufbaut, aber mehr als die ISO 10381-2:08.03 den Anforderungen an die Probenqualität und den Qualitätsansprüchen möglicher Kontaminationen gerecht wird (ITVA 1995). Allerdings fehlen auch Angaben zur Messunsicherheit. Alle anderen Materialien, u.a. die „LABO-Arbeitshilfe“ der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung, das 2010 vom Bayerischen Landesamt für Umwelt überarbeitete „Merkblatt 3.8/4“ und die „OFD-BAM-Anforderung“ vom OFD Hannover und der BAM als Anforderung an Untersuchungen auf Bundesliegenschaften herausgegeben, bauen hinsichtlich der Einteilung der Aufschlussverfahren darauf auf (LABO 2002, BLfU 2010, OFD-BAM 2008).

Weiterhin steht bei diesen Materialien die Praxistauglichkeit der Bodenuntersuchungen von altlastenverdächtigen Flächen und Altlastenflächen im Vordergrund. Besonders wertvoll sind Zusammenstellungen von qualitätssichernden Maßnahmen u.a. Nutzung von Checklisten. Hier ist die „LABO-Arbeitshilfe“ hervorzuheben, die bereits 2002 erarbeitet, aber immer noch von den genannten Werken die qualitätssichernden Maßnahmen am tiefgründigsten beleuchtet. Auch die „OFD-BAM-Anforderung“, die sich inhaltlich direkt an den Anhang 1 der BBodSchV anlehnt, gibt hinsichtlich der Aktualisierung der Normen und Regelwerke praxisrelevante Anforderungen.

Bei den Arbeitsschritten der Probenlagerung und Probentransport sowie der Dokumentation geben die genannten Materialien ebenfalls detailliertere Hinweise als DIN ISO 10381-2:08.03 (hier auch Bezug zu den anderen Teilen der DIN ISO 10381-Normenreihe). Gerade hier liegen zahlreiche Fehlerquellen insbesondere für Kontaminationen und Verluste an Schadstoffen, die bei der Entnahme der Bodenproben aus dem Ausschluss zusammen mit dem gesamten Handling bis zur Übergabe ins Labor.

Das vom UBA beauftragte Vorhaben zur Überprüfung der Methoden des Anhangs 1 der BBodSchV weist ebenfalls auf die Bedeutung des Zusammenhangs zwischen

Aufschlussverfahren und Probenqualität und unzureichender Klärung der dargestellten Diskrepanzen hin (Meiler et al. 2003). Es wird vorgeschlagen, zwei Qualitätsstufen für die Untersuchung von Bodenproben einzuführen und eine anwenderfreundliche Einteilung der Aufschlussverfahren in Standard- bzw. Routineverfahren und Spezialverfahren zu nutzen. Zum Zeitpunkt dieses Vorhabens war die ISO DIN 10381-2 noch im Entwurf, hat aber bei der Aktualisierung die erläuterten Aspekte nicht berücksichtigt.

Die Normen und Regelwerke des Anhangs 1 der BBodSchV sowie länderübergreifende und -spezifische Materialien für Bodenprobennahmen im vor- und nachsorgenden Bodenschutz geben auch nach deren Aktualisierung keine Hinweise auf die Auswahl und Bewertung von Probennahmeverfahren hinsichtlich der Messunsicherheit.

Die Bewertung der Verfahren erfolgt in den Materialien nur qualitativ im Hinblick auf Vor- und Nachteile und den damit verbundenen Probennahmefehlern, die oftmals auch nicht bekannt sind und vernachlässigt werden. Insbesondere bestehen Unklarheiten zur Größe der Probennahmefehler, die im Zusammenhang mit der Heterogenität von Bodenproben stehen (bei Altlastenflächen und altlastenverdächtigen Flächen auch die Schadstoffverteilung an den Bodenpartikeln):

- bei der Herstellung von Mischproben u.a. zur Bestimmung der durchschnittlichen Konzentration einer Substanz in einem definierten Horizont/einer Schicht,
- bei der Festlegung von Probenmengen

Tabelle 4: Zusammenfassender Überblick über den Beitrag der Regelwerke (Normen / Richtlinien) des Anhangs 1 der BBodSchV zu den Probennahmeverfahren für Böden (aktualisierte Fassung)

Norm	Probengewinnung - Aufschlussverfahren / Probenentnahme (Probenarten, Probenmenge)	Konservierung/ Transport / Lagerung	Probennahmebericht/ Dokumentation	Qualitätssicherung/ Angaben zur Messunsicherheit
Normen aus dem Bereich Bodenbeschaffenheit				
DIN ISO 10381-2: 08.03 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 2: Anleitung für Probennahmeverfahren	Kap. 5 Wahl der Probennahmeverfahren (Vorinformationen, Art der Probe (gestörte und ungestörte Proben), Auswahl des Probennahmeegerätes, Querkontaminationen) Kap. 7 Verfahren – Anwendbarkeit von Verfahren zum Schürfen, Bohren und zur Probennahme (manuelle und maschinelle Bohrverfahren, maschineller Aushub, Querkontaminationen)	Kap. 8 Aufbewahrung der Proben, Speziell Anwendbarkeit Behältermaterialien in Bezug auf die zu bestimmenden Substanzen, Verweis auf ISO 10381-1	Kap. 9 Verweis auf ISO -10381-1	keine Angaben zur Qualitätssicherung, aber Hinweise zu Querkontaminationen (Kap.5.4) und die Angaben zu Aufbewahrung der Proben (Kap. 8) sind Aspekte der Qualitätssicherung, keine Angaben zur Probennahmeunsicherheit
DIN ISO 10381-1: 08.03 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probennahme-programmen	Kap. 9.6 Wahl des geeigneten Probennahmeegerätes Verweis auf ISO 10381-2, spezielle Anforderungen u.a. Zwecke ISO 10381-4, ISO 10381-5, Kap. 9.7 Probennahmetiefe – keine allgemeine Empfehlung! Kap. 9.9 Probenmenge (Mindestprobenmenge, Aussortieren von Überkorn) Kap. 9.10. Einzelproben oder Mischproben	Kap. 9.11. Laborkonservierung, Handhabung und Verpackung, Beschriftung und Transport Verweis auf ISO 10381-2, ISO 10381-4, ISO 10381-5	Kap. 10, mit Angaben u.a. zur Durchführung der Probennahme bis Transport und Lagerung	Kap. 11 Qualitätsüberwachung, Qualitätssicherung und Betrieb und Prüfung von Laboratorien, wegen verschiedener Zielsetzungen der Probennahme keine einheitlichen Vorgaben möglich Verweis u.a. auf ISO/IEC 17025; keine Angaben zur Probennahmeunsicherheit

Tabelle 4 (Fortsetzung)

Norm	Probengewinnung - Aufschlussverfahren / Probenentnahme (Probenarten, Probenmenge)	Konservierung/ Transport / Lagerung	Probennahmebericht/ Dokumentation	Qualitätssicherung/ Angaben zur Messunsicherheit
DIN ISO 10381-4: 04.04 Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 4: Anleitung für das Vorgehen bei der Untersuchung von natürlichen, naturnahen und Kulturstandorten (ISO/ DIS 10381 - 4: 1995)	Kap. 5. Allgemeine Anforderungen und Schlussfolgerungen zur Bodenprobennahme Kap. 5.7 Probenarten (gestörte und ungestörte Lagerung), Kap. 5.9 Probennahmeverfahren z.B. nur Sondierung, Bohrung/Handbohrung, Profilgrube , Kap. 5.10 Probennahmegerät - Verweis auf ISO 10381-2, Kap. 5.13 Probenmenge Kap. 7 Entnahme von Proben in gestörter Lagerung und Kap. 8 Entnahme von Proben in ungestörter Lagerung (jeweils Beprobung von Oberboden, Probennahme aus größerer Bodentiefe)	Kap. 5 Allgemeine Anforderungen und Schlussfolgerungen zur Bodenprobennahme Kap. 5.14 – 5.16 Probenbehälter, Transport, Lagerung, Kap. 7.1.4, 7.2.4 und Kap. 8.1.4, 8.2.4 entsprechend der Entnahme der Bodenarten (alle nahezu gleich)	Kap. 5 Allgemeine Anforderungen und Schlussfolgerungen zur Bodenprobennahme Kap 5.19 Allgemeine Hinweise für einen Probennahmebericht Kap. 7.1.5, 7.2.5 und Kap. 8.1.5, 8.2.5 entsprechend der Entnahme der Bodenarten (alle gleich)	Kap. 5. Allgemeine Anforderungen und Schlussfolgerungen zur Bodenprobennahme Kap. 5.18 Qualitätssicherung (Messungen zur Qualitätssicherung durch qualifiziertes Personal, Anwendung geeigneter Probennahmeausrüstung zur Vermeidung von Schadstoffverschleppung und Stoffverlusten, Anwendung nachvollziehbarer Probennahmesysteme und – verfahren, Off-site Abschätzung der Probennahmevarianz
DIN ISO 10381-5:02.07* Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 5: Anleitung für die Vorgehensweise bei der Untersuchung von Bodenkontaminationen auf urbanen und industriellen Standorten (ISO 10381-5:2005)	Kap. 7 Planung probenbasierter Untersuchungen, Aspekte der Verfahren zur Entnahme von Proben, einschließlich Bohrlöchern, Löcher für Sonden und Schürfgruben – Verweis auf ISO 10381-1 und ISO 10381-2 Hinweis auf möglichen Vorteil von Vor-Ort- und/oder In-situ-Verfahren Kap. 7.4.6 Probenumfang und Verwendung von Mischproben , Kap. 7.5.2.3 Verwendung von Einzel- und Mischproben	Kap. 7 Planung probenbasierter Untersuchungen, Kap. 7.5.2.4 Lagerung und Transport von Proben – verweis auf ISO 10381-2	keine Angaben	keine Angaben

Tabelle 4 (Fortsetzung)

Norm	Probengewinnung - Aufschlussverfahren / Probenentnahme (Probenarten, Probenmenge)	Konservierung/ Transport / Lagerung	Probennahmebericht/ Dokumentation	Qualitätssicherung/ Angaben zur Messunsicherheit
DIN ISO 14507: 04.07 Bodenbeschaffenheit - Probenvorbehandlung für die Bestimmung von organischen Verunreinigungen in Böden (ISO 14507:2003)		Kap. 7 Konservierung und Lagerung, Kap. 8 Durchführung Vorbehandlungsverfahren Unterscheidung in flüchtige organische Verbindungen (Kap. 8.2) und mäßig flüchtige organische Verbindungen (Kap. 8.3)	keine Angaben.	Kap. 8.5 Kontrollmessungen (Blindwertmessungen)
Normen aus dem geotechnischen Bereich				
DIN EN ISO 22475-1:01.07 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probennahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung	Kap. 4 Bohrgeräte und -ausrüstung, Kap. 6 Verfahren zur Probenentnahme im Boden, Kap. 6.2 Kategorien der Verfahren der Probennahme von Boden: Kategorien A – C entsprechend Güteklassen 1 – 5, Kap. 6.3 Durchgehende Gewinnung von Proben mittels Bohrverfahren, Kap. 6.4 Probenentnahme mittels Entnahmegerten	Kap. 11 Behandlung, Transport und Aufbewahrung der Proben, Allgemeines, Konservierungsmaterial und Probenbehälter, Behandlung der Proben, Transport der Proben nach den Kategorien,, Etikettierung, Vorbereitung der Lager- und Transportbehälter, Lagerung der Proben	Kap. 12 Bericht, Anhang B (informativ) Feldprotokolle (Kopfblatt, Bohrprotokoll, Protokoll der Probenentnahme, Schichtenverzeichnis, Verfüllprotokoll)	keine Angaben.
DIN 18123: 03.10 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung	Der FBU empfiehlt die Anwendung der DIN 18123 nur zur Bestimmung der Korngrößenverteilung. Zur Ermittlung der erforderlichen Probenmenge bei der Bodenprobennahme führt die Anwendung dieser Norm bei grobkörnigem Material zu unpraktikabel großen Mengen. Für diese Fragestellung empfiehlt der FBU anstelle der DIN 18123 die LAGA PN 98 anzuwenden und bei einer Fortschreibung der BBodSchV aufzunehmen.			

Tabelle 4 (Fortsetzung)

Regelwerk	Probengewinnung - Aufschlussverfahren / Probenentnahme (Probenarten, Probenmenge)	Konservierung/ Transport / Lagerung	Probennahmebericht/ Dokumentation	Qualitätssicherung/ Angaben zur Messunsicherheit
DIN EN 932-1: 11.96 Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probennahmeverfahren; Deutsche Fassung EN 932- 1:1996	Verfahren der Gewinnung von Gesteinskörnungen mittels unterschiedlicher Gerätschaften (aus Haufwerken, Förderbändern, auch anwendbar auf Bodenmaterial (Bodenaushub, Baggergut) Kap. 5 Mengen für Sammel- und Einzelproben Probennahmeverfahren, Kap. 7 Geräte, Kap. 8 Probennahmeverfahren, Kap. 9 Einengung von Proben	Kap. 10 Kennzeichnung, Verpackung und Versand der Proben	Kap. 11 Probennahmebericht	keine Angaben

* nicht im Anhang 1 der BBodSchV erwähnt, aber durch FBU zur Aufnahme empfohlen;

Grau hinterlegt: Normen der Kapitel 2.4.1 und 2.5 des Anhangs 1 der BBodSchV

Literaturverzeichnis zu Teil 1

- BBodSchG Bundes-Bodenschutzgesetz - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten -) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Art. 3 Gesetz v. 9.12.2004 (BGBl. I S. 3214)
- BBodSchV Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585)
- BGR 128 - Kontaminierte Bereiche (bisherige ZH 1/183): Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Fachausschuss „Tiefbau“ der BGZ. April 1997, Aktualisierte Fassung 2006
- BLfU Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Merkblatt Nr. 3.8/4 „Probennahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer“ Stand: 15. Februar 2010, alte Nummer: 3.8/4 vom 14. März 2003, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Referate 95 und 92
- Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 5)- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geo-Wissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland; 5., verb. und erw. Aufl., Berichtigter Nachdruck. Stuttgart: Schweizerbart, 2005
- DIN 4021 - Baugrund - Aufschluss durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben. Oktober 1990 (seit Januar 2007 ungültig)
- DIN 4023 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen, Februar 2006
- DIN 52101 - Prüfverfahren für Gesteinskörnungen – Probennahme, Juni 2005
- DIN 1319-4 - Grundlagen der Meßtechnik - Teil 4: Auswertung von Messungen; Meßunsicherheit, Februar 1999
- DIN 1319-3 - Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit, Mai 1996

- DIN 18123 - Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung, März 2010
- DIN 19673 - Bodenbeschaffenheit - Zeichnerische Darstellung Bodenkundlicher Untersuchungsergebnisse; Oktober 2002
- DIN 19671-1 - Erdbohrgeräte für den Landeskulturbau. Rillenbohrer, Rohrbohrer, Mai 1964
- DIN 19671-2 - Erdbohrgeräte für den Landeskulturbau; Gestänge, Flügelbohrer, Bohrschappe, Marschenlöffel, Spiralbohrer, November 1964
- DIN 19672-1 - Bodenentnahmegeräte für den Landeskulturbau; Geräte zur Entnahme von Bodenproben in ungestörter Lagerung, April 1968
- DIN 19672-2 - Bodenentnahmegeräte für den Landeskulturbau; Geräte zur Untersuchung und Entnahme von Moorbodenproben
- DIN 19747 - Untersuchung von Festproben – Probenvorbehandlung, -vorbereitung und – aufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen, Juli 2009
- DIN EN 932-1 - Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probennahmeverfahren; Deutsche Fassung, November 1996
- DIN EN ISO 14688-1 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2002); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2003, April 2004
- DIN EN ISO 14689-1 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1:2003); Deutsche Fassung EN ISO 14689-1:2003, Januar 2003
- DIN EN ISO/IEC 17025 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2005, August 2005
- DIN EN ISO 22475-1 - Geotechnische Erkundung Und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwasser-Messungen Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung, Januar 2007
- DIN ISO 10381-1 - Bodenbeschaffenheit: Probennahme - Teil 1: Anleitung Zur Aufstellung von Probennahme-Programmen; August 2003

- DIN ISO 10381-2 - Bodenbeschaffenheit: Probennahme - Teil 2: Anleitung für Probennahmeverfahren, August 2003
- DIN ISO 10381-3 - Bodenbeschaffenheit: Probennahme - Teil 3: Anleitung zur Sicherheit; August 2002
- DIN ISO 10381-4 - Bodenbeschaffenheit: Probennahme - Teil 4: Anleitung für das Vorgehen bei der Untersuchung von natürlichen, naturnahen und Kulturstandorten, April 2004
- DIN ISO 10381-5 - Bodenbeschaffenheit: Probennahme - Teil 5: Anleitung zur Vorgehensweise bei der Untersuchung von Bodenkontaminationen auf urbanen und industriellen Standorten, Februar 2007
- DIN ISO 11259 - Bodenbeschaffenheit - Vereinfachte Bodenbeschreibung (ISO 11259:1998), August 2000
- DIN ISO 11464 - Bodenbeschaffenheit - Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen (ISO 11464:2006), Dezember 2006
- DIN ISO 145507 - Bodenbeschaffenheit - Probenvorbehandlung für die Bestimmung von organischen Verunreinigungen in Böden (ISO 14507:2003), April 2007
- DIN ISO 18512 - Bodenbeschaffenheit - Anleitung für die Lang- und Kurzzeitlagerung von Bodenproben (ISO 18512:2007), März 2009
- DIN ISO 22155 - Bodenbeschaffenheit - Gaschromatographische quantitative Bestimmung flüchtiger aromatischer Kohlenwasserstoffe, Halogenkohlenwasserstoffe und ausgewählter Ether - Statisches Dampfraum-Verfahren (ISO 22155:2005), Juli 2006
- E DIN ISO 11074 - Bodenbeschaffenheit - Wörterbuch (ISO/FDIS 11074:2005), Juni 2006
- FBU Fachbeirat Bodenuntersuchungen des Umweltbundesamtes (FBU): Vergleichende Bewertung der Verfahren und Methoden des Anhanges 1 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) mit aktuellen Fassungen; Dessau, 01.08.2005
- FBU Fachbeirat Bodenuntersuchungen des Umweltbundesamtes (FBU): Vergleichende Bewertung der Verfahren und Methoden des Anhanges 1 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) mit aktuellen Fassungen - Gleichwertige Verfahren - ; Dessau, Juni 2009

Handbuch der Bodenuntersuchung – Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter, Physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren, Gesetzliche Regelwerke: Loseblattsammlung; Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; 2000 Beuth Verlag GmbH; 2000 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA

HLUG Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 2: „Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen und Schadensfällen“, Wiesbaden 2002

ITVA Ingenieurtechnischer Verband Altlasten: ITVA-Arbeitshilfe F2-1 „Aufschlussverfahren zur Feststoffprobengewinnung für die Untersuchung von Verdachtsflächen und Altlasten“, Berlin 1995

ITVA Ingenieurtechnischer Verband Altlasten: ITVA-Arbeitshilfe F2-2 Entwurf - „Die Gewinnung von ungestörten Bodenproben in Böden zur Verwendung in Elutionsanlagen“, Berlin 2004

ITVA Ingenieurtechnischer Verband Altlasten: ITVA Arbeitshilfe F2-3 „Beschreibung und Benennung von Bodenproben bei der Verdachtsflächenerkundung“, Berlin 2006

Kurz-KA 5 - Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz – Auszug aus der für die Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5. Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geo-Wissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland; 5., verb. und erw. Aufl., Berichtigter Nachdruck. Stuttgart: Schweizerbart, 2009

LABO Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz: Arbeitshilfe Qualitätssicherung. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz – Altlastenausschuss (ALA), Unterausschuss „Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung“, Kapitel 2: Gewinnung von Boden-, Bodenluft- und Grundwasserproben, Beitrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz und des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Mai 2002

LAGA Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: LAGA PN 98- Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen; Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32; herausgegeben in dieser Fassung im Juli 2004 von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) unter Vorsitz vom Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Stand Dezember 2001

LfUBW Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Probennahme von Boden und Abfall im Rahmen der Altlastenbearbeitung“, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 1997

LfUBW Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Empfehlungen zur Entnahme von Feststoffproben für die Analyse auf leichtflüchtige Verbindungen im Altlastenbereich“, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Abteilung 4 - Wasser und Altlasten, August 2002

H. Meiler, H.; Plagemann, R.; U. Saring, U.; Uhlig, S.: Überprüfung von Methoden des Anhangs 1 der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) zur Beurteilung der Bodenqualität. Forschungsbericht 201 74 240 im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-FB 000397; Texte 37/03 Hrsg. Umweltbundesamt, Berlin 2003

OFD-BAM Oberfinanzdirektion Hannover , Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: Anforderungen an Probennahme, Probenvorbehandlung und chemische Untersuchungsmethoden auf Bundesliegenschaften (aktualisierte Fassung: Oktober 2008) auf Grundlage der Verwaltungsvereinbarung zwischen der OFD Hannover und der BAM vom 05.09.1995

OFD Oberfinanzdirektion Hannover: Arbeitshilfen Boden- und Grundwasserschutz – aktuell, 13, Januar 2008

Spirgath, T.: Entwicklung von Kriterien zur Beurteilung der Unsicherheiten bei der Probennahme von Feststoffen. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin, 2006

VDLUFA Verband der Deutschen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten: Methodenbuch (Loseblattsammlung) VDLUFA-Methode A 1.2.3 „Probennahme für die Untersuchung auf Spuren von umweltrelevanten Fremdstoffen“

Teil 2 Abschätzung der Messunsicherheit für die Probennahme

4. Zusammenstellung von Probennahmeverfahren

4.1 Kriterien für die Auswahl von Probennahmeverfahren

Die Auswahl von Probennahmeverfahren richtet sich nach dem Ziel der Untersuchung (Ermittlung der allgemeinen Bodenbeschaffenheit, Erstellung von Bodenkarten, Unterstützung gesetzlicher und behördlicher Maßnahmen, Gefährdungs- und Risikoabschätzungen), der zu messenden Größe (z.B. Schwermetallgehalte oder bodenphysikalische Parameter), danach ob Durchschnittswerte, Maximalwerte, oder die räumliche Verteilung erforderlich sind, dem „Wirkungspfad“ gemäß BBodSchV (Boden-Mensch, Boden-Pflanze, Boden-Grundwasser), dem Probennahmemedium (gewachsener Boden, kontaminierte Fläche, Aushub, Haufwerk), und der räumlichen Verteilung des zu messenden Parameters (homogen oder heterogen).

4.2 Charakterisierung von Probennahmeverfahren

Verfahren zur Probennahme von Feststoffen in Böden oder Haufwerken („Probennahmestrategie“ nach DIN ISO 10381-1) lassen sich durch folgende Parameter charakterisieren:

- Art der Proben (punktbezogen oder flächenbezogen; gestört oder ungestört)
- Probennahmemuster (räumliche Verteilung der Probennahmepunkte)
- Beprobungsdichte (d.h. Flächengröße und Anzahl der Einzelproben)
- Probennahmetiefe
- Probennahmegerät
- Probenmenge (Masse)

4.2.1 Art der Proben

Einzelne punktbezogene Proben (in der Regel in Form eines Rasters über die Fläche verteilt, siehe 4.2.2) werden gewonnen, wenn der zu messende Parameter heterogen verteilt ist, und/oder die räumliche Verteilung bzw. Konzentrationsschwerpunkte („Hot spots“) ermittelt werden sollen. Für bodenphysikalische Untersuchungen werden dabei oft ungestörte Proben

benötigt, während für chemische Analysen gestörte Proben gewonnen werden.

Flächenproben (Mischproben) werden gewonnen, wenn der zu messende Parameter homogen verteilt ist und/oder Durchschnittswerte für eine Fläche ermittelt werden sollen.

4.2.2 Probennahmemuster

Als Probennahmemuster wird die räumliche Verteilung der Probennahmeorte im festgelegten Untersuchungsgebiet bezeichnet. Das Probennahmemuster sollte das Untersuchungsgebiet unter Berücksichtigung der Probennahmeziele und des ökonomischen Aufwands adäquat repräsentieren. Ein nicht repräsentatives Probennahmemuster liefert falsche Ergebnisse, führt zu Fehlinterpretationen und ist bei Schadstoffuntersuchungen des Bodens eine der schwerwiegendsten Fehlerquellen.

Es lassen sich folgende Arten von Probennahmemuster unterscheiden (de Gruijter 2002; DIN ISO 10381-1 2003):

Probennahmemuster	Abkürzung
(1) Raster	
(1a) rechtwinklig	RR
(1b) dreieckig	RD
(1c) geschachtelt, kreisförmig um Kontaminationsherd	RG
(2) Zufällige (stochastische) Verteilung	ZV
(3) Geschichtete (stratifizierte) Zufallsverteilung	GZV
(4) Nichtsystematische, vereinfachte Muster (Zick-Zack-Muster, „N“, „S“, „W“, „X“-Muster, einfache Diagonale)	NV
(4a) gleiche Muster	NVa
(4b) versch. Muster	NVb
(5) Subjektive Verteilung nach Einschätzung des Probennehmers	SV
(6) Probennahme entlang einer linearen Quelle (Transekt)	LV

4.2.3 Beprobungsdichte

Die Beprobungsdichte ist der Quotient aus Anzahl der Einzelproben und der Flächengröße. Die erforderliche Beprobungsdichte hängt u.a. von der räumlichen Heterogenität und der geforderten Genauigkeit ab (z.B. Cameron et al. 1971).

4.2.4 Probennahmetiefe

Die Probennahmetiefe hängt vom Untersuchungsziel, dem betrachteten Wirkungspfad, der Flächennutzung und der Verteilung des zu messenden Parameters ab (Tabelle 5). Kontaminationen gelangen oft von der Oberfläche her in den Boden. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze werden dann oft die obersten 20 cm beprobt, für den Wirkungspfad Boden-Mensch sogar nur die obersten 5 cm. Wird der Wirkungspfad Boden-Grundwasser betrachtet, so ist oftmals eine Beprobung des gesamten Bodenprofils (z.B. bis in 160 cm Tiefe) erforderlich (z.B. Bücherl et al. 2010, a,b). In solch einem Fall ist es dann aber wegen des hohen Probennahmeaufwandes schwierig, Informationen für größere Flächen zu bekommen.

Tabelle 5: Beprobungstiefen nach Wirkungspfad und Flächennutzung gemäß BbodSchV (1999)

Wirkungspfad	Nutzung	Beprobungstiefe
Boden - Mensch	Kinderspielfläche, Wohngebiet	0 – 10 cm, 10 – 35 cm
	Park- und Freizeitanlage	0 – 10 cm
	Industrie- und Gewerbegrundstücke	0 – 10 cm
Boden - Nutzpflanze	Ackerbau, Nutzgarten	0 – 30 cm, 30 – 60 cm
	Grünland	0 – 10 cm, 10 – 40 cm

4.2.5 Probennahmegerät

Nach DIN ISO 10381-2 werden folgende Probennahmegeräte unterschieden:

- Kleinbohrungen: Handdrehbohrverfahren (vor allem für homogene Böden), kraftgetriebene Bohrverfahren
- Bohrungen: Seil mit Schlagschappe, Rotary-Bohrungen, mechanische Drehbohrer

- Rammkernsondierung
- Schürfe/Bodenprofile

Weitere für oberflächennahe Probennahmen verwendete Geräte sind Schaufeln oder Kellen.

4.2.6 Probenmenge

Nach DIN ISO 10381-1 sollten für chemische Untersuchungen mindestens 500 g Feinboden entnommen werden. In der Praxis sind die gewonnenen Probenmassen sehr unterschiedlich, da die Masse von der Anzahl der Einzelproben, der Probennahmetiefe und dem Probennahmegerät (inkl. Bohrerdurchmesser) abhängt. Gemäß einiger Theorien der Probennahme ist der Probennahmefehler umgekehrt proportional zur Probenmasse (z.B. Gy 1992, siehe auch Peil 2010).

Für grobkörnige Haufwerke werden größere Probenmengen, abhängig von der Korngröße, empfohlen (z.B. DIN 18 123 [1996], DIN 19 683 [1997], Peil 2010).

5. Bewertung der Probennahmeverfahren

5.1 Methoden zur Bewertung von Probennahmeverfahren

Ein Probennahmeverfahren für Böden soll eine möglichst repräsentative Charakterisierung des Gehaltes und/oder der Verteilung des zu untersuchenden Parameters ermöglichen. Für die Bewertung von Probennahmeverfahren ist daher die Abweichung des Gehaltes in der Probe vom tatsächlichen Wert ein wichtiger Faktor. Werden Einzelwerte betrachtet, bezeichnet man dies als Probennahmefehler (Ramsey 1998). Im allgemeinen Fall ist jedoch die wahrscheinlich mögliche Abweichung des Messwertes vom tatsächlichen Wert von höherer Aussagekraft, zumal der tatsächliche, „wahre“ Wert im Normalfall unbekannt ist. Man ordnet dann dem Messwert eine „Unsicherheit“ bzw. „Genauigkeit“ zu, die sich aus Präzision (=zufällige Streuung der Werte) und Richtigkeit (=systematische Abweichung, Bias) zusammensetzt.

Messunsicherheit ist ein dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können (VIM 1994; Ramsey & Ellison 2007). In der Regel wird die Messunsicherheit aus der Quadratwurzel von Varianzen berechnet und ist daher eine Standardabweichung; d.h. sie hat den Charakter einer Streuung. Diese Definition der Messunsicherheit kann sinngemäß auch auf die Probennahme angewendet werden, d.h. für die Gesamtheit der Unsicherheiten

der mit einem Probenentnahmeprovorgang verbundenen Tätigkeiten (Ramsey & Ellison 2007).

Gemäß dieser Definition ist die Unsicherheit (der Probennahme) stets eine quantitative Größe. Im Zusammenhang mit der Probennahme von Böden wird der Begriff „Unsicherheit“ jedoch häufig auch als qualitativer Begriff verwendet.

Die gesamte Messunsicherheit (u_t) für eine chemische Analyse eines Bodeneinhaltsstoffes setzt sich dann zusammen aus den Unsicherheitsbeiträgen der Probennahme (u_s), und der chemischen Analyse (u_a) (inklusive Probenaufbereitung):

$$u_t = \sqrt{u_s^2 + u_a^2}$$

Diese „einfache“ Unsicherheit charakterisiert den Bereich, in dem der wahre Wert mit 68% Wahrscheinlichkeit liegt. Für viele Zwecke ist ein 95%-Wahrscheinlichkeitsbereich erforderlich. Die einfache Unsicherheit wird dann mit dem Erweiterungsfaktor (etwa 2) multipliziert, um die erweiterte Unsicherheit zu erhalten, die konventionsgemäß mit einem großen „U“ abgekürzt wird.

Für die Abschätzung der Probennahmeunsicherheit unterscheidet man prinzipiell zwei Arten von Ansätzen (Ramsey & Ellison 2007):

1. Modellansatz („bottom-up“): Die Gesamtunsicherheit wird aus Einzelkomponenten berechnet, meist unter Zuhilfenahme von Modellvorstellungen (z.B., Kurfürst et al. 2004).
2. Empirischer Ansatz („top-down“): Die Gesamtunsicherheit und Einzelkomponenten der Unsicherheit werden durch vergleichende Untersuchungen von zahlreichen Probennahmen ermittelt. Dabei lassen sich prinzipiell 4 Fälle unterscheiden:
 - a. Ein Probennehmer nimmt mehrere Proben nach einem einheitlichen Protokoll;
 - b. Ein Probennehmer nimmt mehrere Proben nach verschiedenen Protokollen;
 - c. Verschiedene Probennehmer nehmen Proben nach einem einheitlichen Protokoll (Ringversuch - „collaborative sampling trial“, CT);
 - d. Verschiedene Probennehmer nehmen Proben nach verschiedenen Protokollen (Leistungsvergleich zur Probennahme - „sampling proficiency test“, SPT).

Die Berechnung der Probennahmeunsicherheit kann dann mit (evtl. robuster) Varianzanalyse, Varianzkomponentenschätzung, Nuggetvarianz von experimentellen Variogrammen, u.ä. erfolgen.

Beachtet werden muss hierbei auch noch der analytische Aspekt, je nachdem ob die gewonnenen Proben in einem einzigen oder in verschiedenen Labors analysiert werden. Dies kann einen großen Einfluss auf die gesamte Messunsicherheit haben (Desaules & Dahinden 1994; Lischer et al. 2001, Nestler 2007). Obwohl dies streng genommen nicht auf unterschiedlichen Probennahmeverfahren beruht, ist dieser Aspekt dennoch für Bodenprobennahmeverfahren und deren Auswirkung auf die gesamte Messunsicherheit von Bedeutung, da nicht zwingend davon ausgegangen werden kann, dass alle Proben im selben Labor analysiert werden.

Für die Einschätzung und Bewertung von Probennahmeverfahren kann die Probennahmeunsicherheit (u_s) nur verwendet werden, wenn entweder zahlreiche Daten verfügbar sind (top-down Ansatz) oder wenn man detaillierte Kenntnisse über die Einzelkomponenten der Probennahmeunsicherheit besitzt („bottom-up“ Ansatz).

Für Einzeldaten dagegen kann der Fehler nur evaluiert werden, wenn der wahre Wert bekannt ist, zum Beispiel durch eine detaillierte Referenzprobennahme.

Um die Leistung einzelner Probennahmen/Probennehmer zu bewerten, werden oft sog. z-scores verwendet (Ramsey & Thompson 2007), d.h. die Abweichung des individuellen Probennahmeergebnisses vom Referenzwert geteilt durch eine Ziel-Standardabweichung (die auch oft gleich der Standardabweichung der Ergebnisse aller Probennehmer gesetzt wird).

Daneben weist die Bodenprobennahme einen ökonomisch-pragmatischen Aspekt auf, der als „fitness for purpose“ (auf deutsch: Zweckmäßigkeit) bezeichnet wird (Ramsey & Thompson 2007). Wenn die Verringerung der Probennahmeunsicherheit höhere Kosten verursacht als dadurch entsprechende mögliche Verluste verringert werden, hat eine Verbesserung der Probennahme zur Verringerung der Unsicherheit ökonomisch gesehen keinen Nutzen.

5.2 Untersuchungen zur Probennahmeunsicherheit

Feldstudien zur Probennahmeunsicherheit in Böden werden seit etwa 100 Jahren durchgeführt (z.B., Robinson & Lloyd 1915; Munch & Bidwell 1928; Cline 1944). Während in älteren Studien der Schwerpunkt auf Nährelementen in landwirtschaftlichen Böden lag, wird in neueren Studien oft die Probennahme auf Altlastflächen untersucht. Seit etwa 15 Jahren werden auch verstärkt Probennahme-Ringversuche mit mehreren Teilnehmern, oft aus

unterschiedlichen Ländern, durchgeführt. Diese werden in Kapitel 5.3 dargestellt und diskutiert.

In Feldstudien ist es oft problematisch, den Einfluss einzelner Parameter auf die Probennahmeunsicherheit zu quantifizieren. Aus einigen Studien lassen sich spezifische Faktoren jedoch zumindest qualitativ oder semi-quantitativ abschätzen.

Beispielsweise wurden in der Vergleichsprobennahmestudie von Ramsey & Argyraki (1997) u_s -Werte für verschiedene Arten von Probennahmemustern am selben Standort evaluiert (Pb in stark erhöhten Konzentrationen). Für regelmäßige Raster in Einzelbeprobung ergab sich $u_s = 25 \%$, dagegen für Raster mit (lokalen) Mischproben 15% , während nichtsystematische vereinfachte Muster $u_s = 28 \%$ ergaben. Ein SPT am Standort mit unterschiedlichsten Mustern („W“, Zufallsverteilung, Raster) ergab andererseits lediglich $u_s = 19,5 \%$. Dies widerspricht den Erwartungen, da man bei mehr Freiheitsgraden für die Probennahme eine höhere Unsicherheit erwarten würde.

Obenauf & Seeboldt (1986) fanden dagegen für Nährelemente auf Ackerschlägen keinen signifikanten Einfluss des Probennahmemusters („N“, Diagonale, Zufallsverteilung) auf die Qualität der Ergebnisse. Es wurde verschiedentlich beschrieben, dass die Richtigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse mit der Anzahl der Proben steigt (Cameron et al. 1971, Swenson et al. 1984, Obenauf & Seeboldt, 1986). Allerdings wird diese Beziehung durch den Einfluss der Feldheterogenität stark modifiziert, indem mit steigender Heterogenität die notwendige Anzahl an Proben um eine gegebene Probennahmequalität zu erzielen, ansteigt (Cameron et al. 1971). Für sehr kleine Plots von 50 m^2 fand Seeboldt (1985) dagegen, dass eine Erhöhung der Probenanzahl auf über 20 keinen Effekt auf die Probennahmequalität hat.

Während van der Perk et al. (2008) keinen signifikanten Einfluss des Probennahmegerätes (Bohrer unterschiedlichen Durchmessers und Schaufel) auf die Probennahmeunsicherheit fand, beschreiben de Zorzi et al. (2008) für zwei von drei Analyten eine geringere Probennahmeunsicherheit für Proben, die mit Schaufeln gewonnen wurden (im Vergleich zu Bohrern), was durch die dreifach höhere Masse der mit Schaufeln gewonnenen Proben erklärt werden kann.

Obenauf & Seeboldt (1986) untersuchten den Effekt von drei Bohrerdurchmessern (10, 12, 20 mm) auf die Probennahmeunsicherheit für pH, P, K, und Mg und fanden eine Verringerung von u_s mit steigendem Bohrerdurchmesser.

Theorien zur Probennahme sagen eine geringere Probennahmeunsicherheit mit steigender Probenmasse vorher (z.B. Gy 1992). Eng damit verbunden ist die Frage der mindestens

erforderlichen Probenmasse. Für kontaminierte Standorte in denen die Schadstoffe an gesonderte Partikel gebunden sind, entwickelten Bunge & Bunge (1999) eine Berechnungsformel. Demnach ist die Mindestprobenmasse proportional zur Dichte der Partikel, invers proportional zum Massenanteil der Schadstoffpartikel, und proportional zur 3. Potenz der maximalen Partikelgröße der Schadstoffpartikel.

Es existieren jedoch kaum Felduntersuchungen, in denen die tatsächliche Beziehung zwischen Probenmasse und Probennahmeunsicherheit näher beleuchtet wird. Die Probennahmestudie von de Zorzi et al. (2008) wurde oben schon genannt, jedoch stand dort die Probenmasse durchaus nicht im Mittelpunkt der Untersuchung.

5.3 Vergleichsprobennahmen

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden einige Vergleichsprobennahmen mit mehreren Teilnehmern, sowohl auf nationaler Ebene als auch international, durchgeführt (Tabelle 6). Vergleichsprobennahmen mit mehreren Teilnehmern haben gegenüber Probennahmestudien, in denen die Proben von nur einem Probennehmer gewonnen werden, den Vorteil der größeren Realitätsnähe, weil in der Praxis Proben meist von unterschiedlichen Probennehmern genommen werden. Der Nachteil ist allerdings, dass in solchen Vergleichsprobennahmen oftmals sehr unterschiedliche Probennahmeprotokolle verwendet werden, sodass die Ergebnisse der Teilnehmer oftmals nicht ohne weiteres vergleichbar sind, und die gefundenen Unterschiede keinem spezifischen Faktor des Probennahmeverfahrens zugeordnet werden können.

5.3.1 Schweiz (FAC)

In der Schweiz wurde unter Federführung der Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC) im Frühjahr 1994 ein Probennahmeringversuch mit 14 Teilnehmern kantonaler Bodenschutzfachstellen auf 5 unkontaminierten Plots von je 100 m² durchgeführt (Desaules & Dahinden 1994). Ziel war die Ermittlung der mittleren Gehalte von Cd, Cu, Pb und Zn im Oberboden. Die gewonnenen Proben wurden sowohl in den jeweiligen Labors der Teilnehmer als auch im zentralen Referenzlabor der FAC analysiert.

Es ergab sich, dass der Streuungsanteil der Analytik aus verschiedenen Labors deutlich größer als der Anteil der Probennahme war. Demzufolge lässt sich die Reproduzierbarkeit durch Analytik im gleichen Labor am stärksten verbessern, allerdings oft unter Einbuße der Richtigkeit, da die Analyse in einem einzigen Labor evtl. einen systematischen Fehler (Bias)

in sich bergen kann. Daneben zeigte sich, dass die analytische Reproduzierbarkeit stark element- und konzentrationsspezifisch war. Als Fazit ergab sich aus dieser Vergleichsprobennahme (SPT), dass die Vergleichbarkeit von Schwermetallanalysen verschiedener Dauerbeobachtungsnetze in erster Linie durch die Analytik in verschiedenen Labors erschwert wird.

5.3.2 Wirksworth (England)

In dieser Vergleichsprobennahme wurde ein Pb-kontaminierter Standort in Derbyshire (England) untersucht (Argyaki et al. 1995; Thompson & Ramsey 1995; Ramsey & Argyaki 1997). Analysiert wurden sowohl Pb, das stark erhöhte Konzentrationen aufwies, als auch Cu, welches lediglich in Hintergrundkonzentrationen auftrat. Das Besondere an dieser Studie ist,

- (1) dass alle vier in Kapitel 5.1 genannten empirischen Verfahren zur Abschätzung der Probennahmeunsicherheit am selben Standort geprüft wurden (d.h., einzelner Probennehmer – gleiches PNV; einzelner Probennehmer – unterschiedliche PNV; mehrere Probennehmer – gleiche PNV (CT); mehrere Probennehmer – individuelle PNV (SPT), und
- (2) dass für denselben Standort die Probennahmeunsicherheiten für verschiedene Probennahmemuster evaluiert wurden.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Studie sind in den Tabellen 6 und 7 zusammengefasst.

5.3.3 Imperial College – synthetischer Kontaminationsherd

In dieser Vergleichsprobennahme wurde untersucht, mit welcher Sicherheit 9 verschiedene Teilnehmer Lage und Ausdehnung eines künstlich erzeugten Kontaminationsherds (Fläche von 30 * 30 m, dotiert mit BaSO₄) unter Verwendung (1) eines einheitlichen Probennahmeprotokolls (CT) und (2) individueller Probennahmeverfahren (SPT) identifizieren konnten (Squire et al. 2000,a,b). Für die CT-Studie ergab sich, dass das verwendete Probennahmeverfahren (Fischgrätenmuster der Probennahmepunkte) für den Zweck adäquat ist, obwohl die Unsicherheit der Probennahme für einen Einzelpunkt im Kontaminationsherd mit 60.1% (Wiederholbarkeit), bzw. 85.8 % (Reproduzierbarkeit) recht groß ist. Für den SPT ergaben sich erwartungsgemäß höhere Unsicherheiten der Resultate, und 2 von 9 Teilnehmern identifizierten die Lage des „hot spots“ nicht zufriedenstellend. Allerdings konnte mittels einer Hauptkomponentenanalyse kein Einzelfaktor der Probennahme identifiziert werden, der die Resultate der Probennahme entscheidend

bestimmte. Jedoch scheint die Qualität der Ergebnisse (geringfügig) mit der Anzahl der Einzelproben anzusteigen.

5.3.4 Comparative Evaluation of European Methods for Sampling and Sample Preparation of Soils (CEEM Soil)

Das Projekt „Comparative Evaluation of European Methods for Sampling and Sample Preparation of Soils (CEEM Soil)“ Wagner et al. (2001, a, b) war eine EU-weite (& Schweiz) Untersuchung zur Vergleichbarkeit der Probennahmestrategien und Richtlinien, die zur Ermittlung von Schadstoffkontaminationen in Böden angewendet werden.

Dafür wurde zum einen ein Referenzprobennahmestandort (Dornach, Schweiz) mit drei Landnutzungen (Acker, Grünland, Forst) und z.T. erhöhten Gehalten an Spurenmetallen ausgewählt und durch eine detaillierte Referenzbeprobung charakterisiert (Desaules et al. 2001). Auf diesem Referenzprobennahmestandort wurde eine Vergleichsprobennahme mit 15 Teilnehmern (wissenschaftliche Institute aus verschiedenen EU Ländern & Schweiz) durchgeführt (Wagner et al. 2001 a, b). Die Teilnehmer verwendeten ihre individuellen Probennahmestrategien, wobei das Ziel die Ermittlung der mittleren Gehalte und der räumlichen Verteilung von Cd, Cu, Pb, Zn, (Ni, Mn, Cr, As, Hg) war. Wegen der sehr unterschiedlichen verwendeten PNV ist eine direkte Berechnung von u_s -Werten problematisch. Der Vergleich von individuellen Messergebnissen mit den Resultaten der Referenzbeprobung ergab jedoch, dass einer der wichtigsten Faktoren für unterschiedliche Probennahmeergebnisse der Teilnehmer die Beprobungstiefe zu sein schien und dass die Probennahmeunsicherheit und analytische Unsicherheit in etwa gleich groß waren, jedoch mit großen Unterschieden zwischen den Analyten. Als Fazit wird genannt, dass alle im Projekt verwendeten PNV generell geeignet zu sein scheinen, dass jedoch eine Vereinheitlichung der PNV innerhalb Europas erforderlich sei.

Kurfürst et al. (2004) berechneten auf Basis der Ergebnisse der Referenzprobennahme des Standortes Dornach analytisch die Probennahmeunsicherheit für verschiedene Probennahmestrategien.

5.3.5 „Probennahme Acker“ (PronAck)

Im Projekt „PronAck“ (Kurfürst et al. 2005) wurden für einen Ackerschlag vergleichend Probennahmeunsicherheiten mit dem analytischen („bottom-up“) und dem empirischen („top-down“) Ansatz untersucht. Es ergaben sich für die mittleren Gehalte von Cd und P gute Übereinstimmungen zwischen beiden Verfahren.

5.3.6 Ingenieurtechnischer Verband Altlasten (ITVA)

Der Fachausschuss 2 des ITVA e.V. (Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.) führte im Herbst 2003 gemeinsam mit VEGAS (Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart) eine Vergleichsprobennahme für Rammkernsondierungen an künstlich hergestellten Bodensäulen durch (Baermann et al. 2005). Die künstlichen Bodensäulen von 170 cm Höhe und 14 cm Durchmesser enthielten eine mit Mineralöl-Kohlenwasserstoffen kontaminierte Schicht und wurden von 8 Teilnehmern im Hinblick auf Schichtmächtigkeiten, Bodenansprache, und Kohlenwasserstoff-Konzentrationen bis in 160 cm Tiefe beprobt (jeder Teilnehmer eine Bohrung mit drei Einzelproben).

Im Unterschied zu den bisher besprochenen Vergleichsprobennahmen, die sich auf den Oberboden beschränkten, deckte diese Untersuchung einen größeren Teil der ungesättigten Zone ab und zielte auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser.

Es ergaben sich z.T. erhebliche Unterschiede in den abgeschätzten Schichtmächtigkeiten (bis 400%). Die Vergleichsstandardabweichungen der Kohlenwasserstoff-Gehalte zwischen den Teilnehmern betrugen 8 % für die am stärksten belastete Schicht, 30% für die mittlere Schicht und 70 % für die am geringsten belastete Schicht.

Es zeigte sich, dass bei diesem PNV Kontaminationsverschleppungen von oben nach unten von Bedeutung sind. Außerdem zeigte sich, dass eine größere Anzahl von Teilnehmern bei einer solchen Art der Vergleichsprobennahme von Vorteil wäre. Zudem war der Durchmesser der künstlichen Bodensäulen mit 14 cm recht gering, sodass Randeffekte, speziell bei Bohrgeräten größeren Durchmessers, nicht auszuschließen waren. Auf Basis dieser Erfahrungen hat der ITVA in Zusammenarbeit mit dem LfU Bayern im Jahre 2009 eine modifizierte Vergleichsprobennahme organisiert (siehe Kapitel 5.3.9).

5.3.7 “Assessment of uncertainty associated with soil sampling in agricultural, semi-natural, urban and contaminated environments” (SOILSAMP)

Das internationale Vergleichsprobennahmeprojekt der IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) „SOILSAMP“ (“Assessment of uncertainty associated with soil sampling in agricultural, semi-natural, urban and contaminated environments”, De Zorzi et al. 2002, 2008) wurde mit dem Ziel konzipiert, den Beitrag der Probennahme zur Gesamtunsicherheit der Messergebnisse und die Rolle einzelner Faktoren zu evaluieren. Zuvor sollte ein Referenzprobennahmestandort für die Verteilung von Spurenelementen etabliert werden. Dieser Referenzprobennahmestandort in NE Italien von 1 ha unter Ackernutzung wurde durch eine detaillierte Referenzprobennahme im Hinblick auf mittlere Konzentrationen und Verteilung von As, Cr, Fe, Sc, und Zn charakterisiert (Barbizzi et al. 2004), und nachfolgend von 14 Teilnehmern mit frei wählbaren und daher sehr unterschiedlichen Probennahmeverfahren beprobt. Aufgrund der großen Mannigfaltigkeit der verwendeten Probennahmeprotokolle ließen sich die Unterschiede zwischen den Teilnehmern nicht durch spezifische Faktoren des PNV erklären, zudem ergab keines der PNV deutlich schlechtere Ergebnisse als die anderen Verfahren, sodass alle verwendeten PNV gleichermaßen für die Beprobung geeignet schienen.

5.3.8 International Atomic Energy Agency (IAEO)

Die Vergleichsprobennahme der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEO - International Atomic Energy Agency) wurde auf demselben Referenzprobennahmestandort in NE Italien, der vom SOILSAMP Projekt etabliert wurde (Barbizzi et al. 2004), durchgeführt (Belli et al. 2009, IAEA 2009). 10 Mitglieder des ALMERA (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity) Netzwerks aus 10 verschiedenen Ländern nahmen Oberflächenproben nach frei wählbaren Probennahmeverfahren. Ziel war die Ermittlung der mittleren Gehalte an As, Fe, Sc, und Zn. Es ergab sich, dass die Abweichungen vom Referenzwert stark vom jeweiligen Analyten abhingen. Wegen der sehr unterschiedlichen von den Teilnehmern verwendeten PNV ließen sich Abweichungen keinen spezifischen Parametern der Probennahme zuordnen, und es ließen sich auch keine konkreten u_s -Werte berechnen.

Als Fazit wird genannt, dass alle verwendeten PNV adäquat geeignet sind, um mittlere Konzentrationen im Oberboden abzuschätzen (Belli et al. 2009).

5.3.9 LfU Bayern-ITVA

Ausgehend von den Erfahrungen einer früheren Vergleichsprobennahme der ITVA (siehe Kapitel 5.3.6), haben der ITVA in Zusammenarbeit mit dem LfU Bayern im Jahre 2009 eine modifizierte Vergleichsprobennahme durchgeführt („Projekt zur externen Qualitätssicherung bei der Probennahme von Böden“, LfU Bayern 2009; Bücherl et al. 2010 a, b).

Wie im Vorgängerprojekt wurden standardisierte künstliche Bodenprofile von 170 cm Höhe hergestellt, jedoch in Säulen von 30 cm Durchmesser, da die zur Beprobung verwendeten Kleinrammbohrer Durchmesser bis 60 mm aufweisen können und mögliche Randeffekte vermieden werden sollten. Die Zahl der Probennehmer wurde im Vergleich zur früheren Probennahme auf 26 erhöht.

Beprobte Parameter waren Schichtgrenzen, Schichtmächtigkeiten, Profilansprache nach KA5, und die Lage einer kontaminierten Schicht mit erhöhten Gehalten an Zink, Blei, Eisen und Kalium. Die gewonnenen Proben wurden in einem Referenzlabor analysiert.

Es ergaben sich, z.T. erhebliche, Unterschiede in den abgeschätzten Schichtmächtigkeiten, die stark vom verwendeten Sondiergerät abhingen. Die stärksten Abweichungen ergaben sich für Rammsondiergeräte, während geringere Abweichungen bei Elektrohämmern auftraten. Die Bodenansprache war in weniger als 10 % der Fälle korrekt. Die Vergleichsstandardabweichung der Konzentrationen in der kontaminierten Schicht betrugen für Fe 6,5 %, für Pb 3,3 %, und für Zn 4,9 %. Dabei trug das PNV jedoch nicht signifikant zur Ergebnisvarianz der Konzentrationen bei.

5.3.10 VDLUFA - Hessen

Im Jahre 2007 wurde vom VDLUFA unter Federführung der LUFA Rostock eine umfassende Vergleichsprobennahme im Landkreis Waldeck (Hessen) durchgeführt (Kleimeier 2009, Kurfürst et al. 2011, Kuchenbuch et al. 2010, Buczko et al. 2010). 18 Teilnehmer nahmen auf 3 Feldern von unterschiedlicher Heterogenität jeweils 3 Proben, mit dem Ziel, die mittleren Gehalte von pflanzenverfügbarem B, Cu, K, Mg, Mn, P, Zn, den pH, C_{org}, sowie die Gesamtgehalte von As, B, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Tl, und Zn zu bestimmen. Die Felder wurden zuvor durch eine Referenzprobennahme, auch im Hinblick auf die räumliche Variation aller Analyte, charakterisiert. Zwei der von den Teilnehmern zu nehmenden Proben wurden nach frei wählbaren Probennahmeprotokollen gewonnen (SPT), während eine Probe nach einem standardisierten Protokoll gewonnen wurde (CT) (Doppeldiagonale, „X“, mit zwanzig Probennahmepunkten). Da es sich bei den Teilnehmern um Probennehmer von Landwirtschaftlichen Untersuchungsanstalten handelte, und das Ziel der Probennahme auch

im SPT klar umrissen war, wiesen die im SPT letztendlich verwendeten PNV relative geringe Unterschiede zwischen den Teilnehmern auf (verglichen mit anderen Vergleichsprobennahmestudien). Daher konnten auch für den SPT Probennahmeunsicherheiten abgeschätzt werden. Es ergab sich, gemittelt für alle Probennahmen, Analyte, und Felder, ein mittlerer u_s – Wert von 8 %. Im Detail variierte dieser Wert jedoch stark je nach Analyt, Feld, und Probennahme. Generell war die Probennahmeunsicherheit etwas geringer für die CT als für die SPT-Probennahmen. Die Probennahmeunsicherheit war generell etwa um den Faktor zwei höher als die analytische Unsicherheit (für ein Referenzlabor), jedoch gab es auch hier sehr große Unterschiede je nach Analyt. Die Probennahmeunsicherheit korrelierte signifikant mit der Heterogenität der Felder.

Die hier verwendeten PNV mit vereinfachten unsystematischen Mustern scheinen generell ausreichend zu sein, um die mittleren Gehalte verschiedenster Analyte im Oberboden von nicht allzu heterogenen Feldern zu ermitteln.

6. Zusammenschau und Auswertung der Probennahmeunsicherheit für verschiedene Probennahmeverfahren

Für die vergleichende Zusammenschau und Auswertung der Probennahmeunsicherheit verschiedener Probennahmeverfahren wurden Daten von 13 Probennahmestudien verwendet (Tabelle 7). Die Studien umfassen Vergleichsprobennahmen mit mehreren Teilnehmern aber auch Feldstudien, in denen Proben immer vom selben Probennehmer gewonnen wurden. Da in Probennahmevergleichstudien mit sehr stark unterschiedlichen Probennahmeverfahren meist keine Probennahmeunsicherheitswerte berechnet wurden, konnten diese Studien nicht in die Auswertung einbezogen werden.

Das gesamte Datenmaterial umfasst 313 Datensätze. Die Verteilung der u_s -Werte ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Mittelwert aller Datensätze ist 10,98 %, aber die Verteilung ist stark rechtsschief mit einem Median von 6,6 %. Die Verteilung der entsprechenden CV Werte als Maß für die Feldheterogenität (Abbildung 2) ist ebenfalls rechtsschief, aber die CV Werte sind mit einem Mittelwert von 20,8 % generell höher als die u_s -Werte. Werte der analytischen Unsicherheit innerhalb eines Labors, $u_{a,i}$, (Abbildung 3) sind dagegen deutlich niedriger, mit einem MW von 6,2 %, obwohl vereinzelt Werte > 20% auftreten. Im Gegensatz zu $u_{a,i}$ ist die analytische Unsicherheit zwischen verschiedenen Labors, $u_{a,b}$, etwa doppelt so groß, mit einem MW von 11,3 % (Abbildung 4).

Tabelle 6: Übersicht über Vergleichsprobennahmen mit mehreren Probennehmern (VSA: Vergleichsstandardabweichung; PNV: Probennahmeverfahren).

Bezeichnung	Referenz	Probennahmeobjekt	Teilnehmer	Probennahme-verfahren	Untersuchte Parameter	Ergebnisse & Fazit
Schweiz	Desaules & Dahinden (1994)	5 Standorte (Schweizer Mittelland, je 100 m ² , Acker, Grünland, Forst)	14 (Bodenschutzfach stellen mehrerer Kantone und die FAC)	SPT: Tiefe einheitl. 20 cm, Probenzahl zw. 5 u 100, Durchm. Bohrer 2 – 4 cm	mittlere Konzentrationen von Cd, Cu, Pb, Zn	Streuungsanteil der Analytik aus verschiedenen Labors ist deutlich größer als Anteil der Probennahme → Reproduzierbarkeit lässt sich durch Analytik im gleichen Labor am stärksten verbessern → analytische Reproduzierbarkeit ist stark element- und konzentrationsspezifisch
Wirksworth (England)	Argyraki et al. (1995); Thompson & Ramsey (1995); Ramsey & Argyraki (1997)	Kontaminierter Standort (Pb, Cu) (England, 0,9 ha)	9	(1) CT: „W“-Muster (Mischproben); (2) SPT: untersch. Muster („W“, Gitter, Zufallsvert.)	Cu, Pb	(1) CT: u_s für Pb (sehr hohe Bodengehalte) 28%, für Cu (Hintergrundkonzentration) 8%; (2) SPT: u_s – Werte geringer als für CT (Pb 19,5 %; Cu 7%) Probennahmeunsicherheit für Kontaminanten deutlich höher als für Elemente mit Hintergrundkonzentrationen; niedrigere u_s Werte für CT in Vergleich zu SPT sind entgegen den Erwartungen

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Bezeichnung	Referenz	Probennahmeobjekt	Teilnehmer	Probennahme- verfahren	Untersuchte Parameter	Ergebnisse & Fazit
Imperial College	Squire et al. (2000, a, b)	Synthetisch erzeugter Kontaminationsherd (Fläche 30 * 30 m, dotiert mit BaSO ₄)	9 (5 universitäre, 4 kommerzielle Einrichtungen)	(1) CT: Fischgrätenmuster (n = 25; 2 versch. räuml. Orientierungen); (2) SPT: versch. Raster, Fischgrätenmuster, "W"-Muster (n: 25 - 50)	Räumliche Lage und Ausdehnung des Kontaminationsherds (d.h. Gebiete mit Ba-Konz. >170 ppm)	(1) CT: Probennahmeverfahren adäquat; Unsicherheit der Probennahme für Einzelpunkt im Kontaminationsherd: Wiederholbarkeit: 60.1%, Reproduzierbarkeit 85.8%. (2) SPT: 2 von 9 Teilnehmern identifizierten die Lage des hot spots nicht zufrieden stellend; es konnte kein Einzelfaktor der Probennahme identifiziert werden der die Resultate der Probennahme entscheidend bestimmt
CEEM	Wagner et al. (2001, a, b)	Referenzprobennahme-standort (Dornach Schweiz, 0,61 ha), Landnutzung Forst, Grünland, Acker	15 (wiss. Institute aus versch. EU Ländern & Schweiz)	Oberflächenproben, Verfahren frei wählbar durch Teilnehmer (SPT)	räumliche Verteilung und mittlere Konzentrationen von Pb, Zn, Cu, Cd, (Ni, Mn, Cr, As, Hg)	Probennahmeunsicherheit und analytische Unsicherheit in etwa gleich groß, jedoch große Unterschiede zw. Analyten. → Alle verwendeten PNV generell geeignet, jedoch Vereinheitlichung der PNV innerhalb Europas erforderlich

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Bezeichnung	Referenz	Probennahmeobjekt	Teilnehmer	Probennahme- verfahren	Untersuchte Parameter	Ergebnisse & Fazit
PronAck	Kurfürst et al. (2005)	Ackerschlag (Braunschweig, 0,32 ha)	6	CT: Diagonale	mittlere Konzentrationen von Cd und P	Die durch die Vergleichs-probennahme abgeschätzten u_s -Werte sind in etwa gleich groß wie die analytisch berechneten
ITVA	Baermann et. al. (2005)	Künstliche Bodensäulen (170 cm Höhe, 14 cm Durchmesser), mit KW-kontaminierter Schicht	8 (Ingenieurbüros und Institute)	Rammkern-sondierung, je Teilnehmer eine Bohrung mit 3 Einzelproben	Schichtmächtigkeiten, Bodenansprache, KW-Konzentrationen	z.T. erhebliche Unterschiede in den abgeschätzten Schichtmächtigkeiten (bis 400%); VSA der KW-Gehalte 8 % (für am stärksten belastete Schicht), 30% (mittlere Schicht), 70 % (am geringsten belastete Schicht); Kontaminationsverschleppungen (von oben nach unten) sind bedeutend
SOILSAMP (=IUPAC-Projekt "Assessment of uncertainty associated with soil sampling in agricultural, semi-natural, urban and contained environments")	De Zorzi et al. (2008)	Referenzprobennahme-standort (NE Italien, 1 ha), Landnutzung Acker	14	SPT: sehr unterschiedliche PNV (meist GZV oder NV), Handbohrer oder Schaufel	mittlere Konzentrationen von As, Cr, Fe, Sc, Zn	→alle PNV geeignet →Unterschiede zw. Teilnehmern lassen sich nicht durch unterschiedliche PNV erklären →Probennahmegerät: geringere u_s -Werte für Schaufel im Vergleich zu Bohrer (vermutlich bedingt durch 3fach höhere Probenmasse)

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Bezeichnung	Referenz	Probennahmeobjekt	Teilnehmer	Probennahme- verfahren	Untersuchte Parameter	Ergebnisse & Fazit
IAEO (International Atomic Energy Agency)	Belli et al. (2009), IAEA (2009)	Referenzprobennahme- standort (NE Italien, 1 ha), Ackernutzung	10 Mitglieder des ALMERA (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity) Netzwerks aus verschiedenen Ländern	Oberflächenproben, Verfahren frei wählbar durch Teilnehmer. (verwendet wurden u.a. RR, GZV, NV)	As, Fe, Sc, Zn	Abweichungen vom Referenzwert hängen stark vom Analyt ab; wegen der sehr unterschiedlichen PNV lassen sich Abweichungen keinen spezifischen Parametern zuordnen alle PNV gleich gut geeignet um mittlere Konzentrationen im Oberboden zu untersuchen
LfU Bayern - ITVA	LfU Bayern (2009); Bücherl et al. (2010 a, b)	Künstliche Bodensäulen (170 cm Höhe, 30 cm Durchmesser), mit kontaminierter (Fe, Pb, Zn) Schicht	25 (Ingenieurbüros und Institute)	Kleinbohrungen 160 cm Tiefe, je Teilnehmer eine Bohrung	Schichtmächtigkeiten, Bodenansprache nach KA5, Konz. von K, Fe, Pb, Zn	z.T. erhebliche Unterschiede in den abgeschätzten Schichtmächtigkeiten, hängen stark vom verwendeten Sondiergerät ab (stärkste Abweichung: Rammsondiergerät); Bodenansprache in weniger als 10% der Fälle korrekt; VSA Konz. in kontam. Schicht Fe 6,5%, Pb 3,3 %, Zn 4,9 % PNV trägt nicht signifikant zur Ergebnisvarianz der Konzentrationen bei

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Bezeichnung	Referenz	Probennahmeobjekt	Teilnehmer	Probennahme- verfahren	Untersuchte Parameter	Ergebnisse & Fazit
LUFA & LS-PE Rostock	(Kleimeier, 2009; Kurfürst et al. 2011; Kuchenbuch et al. 2010; Buczko et al. 2010)	Drei Ackerschläge (Hessen, 3, 5, und 6 ha)	18 (landwirtschaftliche Untersuchungs- anstalten)	(1) CT: Doppeldiagonale („X“) (2) SPT: versch. vereinfachte Muster („X“, „W“, u.ä.), Handbohrer, Probennahmetiefe meist 20 cm	B, Cu, K, Mg, Mn, P, Zn (pflanzenverfügbare Gehalte), pH, Corg, As, B, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Tl und Zn (Gesamtgehalte)	Mittl. u_s – Wert 8 %; geringer für CT als für SPT; u_s etwa doppelt so groß wie u_a , jedoch große Unterschiede je nach Analyt; u_s positiv korreliert mit Feldheterogenität PNV mit vereinfachten Mustern generell ausreichend um mittlere Gehalte von nicht allzu heterogenen Feldern zu ermitteln

Tabelle 7: Übersicht der für die Auswertung der Probennahmeunsicherheit verwendeten Untersuchungen (CT: „comparative trial“; SPT: „sampling proficiency test“; u_s : Standard-Probennahmeunsicherheit (%); VKS: Varianzkomponentenschätzung).

Referenz	n	Probennahmeobjekt	Art der Studie	Untersuchte Parameter	Probennahmeverfahren	u_s -Werte, MW ($\pm$ Stabw)
Jacobs & Klute (1956)	5	4 Ackerplots (NY, USA, 60m ²)	Doppelte Probennahme	Ca, K, Mg, Mn, P (Flächenmittelwerte)	Zufallsverteilung	41,3 ($\pm$ 46,3) (VKS)
Kerschberger & Richter (1992)	18	82 Ackerschläge (ehem. DDR)	In zeitlichen Abständen wiederholte Probennahme	K, Mg, P (pflanzenverfügbare Gehalte, Flächenmittelwerte)	Vereinfachte Muster („N“)	16,6 ($\pm$ 5,3) (ANOVA)
Thompson & Maguire (1993)	8	16 städtische Grünlandflächen (London, 0,2 – 1 ha), moderat kontaminiert	Doppelte Probennahme	Cd, Cu, Pb, Zn (Flächenmittelwerte)	2 Mischproben je Fläche, 13 Inkremente pro Mischprobe, „W“-Muster, Handbohrer 25 mm D, Probennahmetiefe 5 cm	19,5 ($\pm$ 13,5) (robuste ANOVA)
Desaules & Dahinden (1994)	20	5 Plots (Schweizer Mittelland, je 100 m ²) Acker, Grünland, Forst; nicht kontaminiert	SPT, 14 Teilnehmer	Cd, Cu, Pb, Zn (Flächenmittelwerte)	Je Teilnehmer eine Mischprobe pro Fläche, 5 – 100 Inkremente pro Mischprobe, regelmäßiges Raster, Bohrer 2 – 4 cm D, Probennahmetiefe 20 cm	4,6 ($\pm$ 3,3) (ANOVA)
Ramsey & Argyraki (1997)	8	Altlastfläche (UK, 1,8 ha)	Vergleich von versch. Verfahren zur Ermittlung von u_s : (1) Doppelte Probennahme, identischer Probennehmer, (2) CT, 9 Teilnehmer, (3) SPT, 9 Teilnehmer	Cu, Pb (Flächenmittelwerte)	(1) Raster, Einzelproben vs Mischproben; (2) „W“-Muster (Mischproben); (3) untersch. Muster („W“, Gitter, Zufallsvert.); Probennahmetiefe 15 cm	16,7 ($\pm$ 9,7) (robuste ANOVA)

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Referenz	n	Probennahmeobjekt	Art der Studie	Untersuchte Parameter	Probennahmeverfahren	u_s -Werte, MW ($\pm$ Stabw)
Brus et al. (1999)	16	16 Schläge (Niederlande , 0,9 – 4,4 ha) Acker, Grünland	Beprobung für geostatistische Analyse	P (Flächenmittelwerte und Verteilung)	Raster	22,1 ($\pm$ 14,1) (Nugget-varianz)
Kurfürst et al. (2004)	16	Referenzprobennahmefläche (Dornach / Schweiz, 0,61 ha), Acker, Grünland, Forst; z.T. kontaminiert	Abschätzung der Unsicherheit aus Einzelkomponenten („bottom-up“ Ansatz)	Cd, Cu, Pb, Zn (Flächenmittelwerte)	(basiert auf detaillierter Referenzbeprobung)	11,9 ($\pm$ 9,6) (analytische Berechnung)
Kurfürst et al. (2005)	4	Ackerschlag (Braunschweig, 0,32 ha)	(1) Abschätzung der Unsicherheit aus Einzelkomponenten („bottom-up“ Ansatz); (2) CT 6 Teilnehmer	Cd, P (Flächenmittelwerte)	Diagonale	6,1 ($\pm$ 1,5) (analytische Berechnung & ANOVA)
Taylor et al. (2005)	4	2 Altlastflächen (UK)	Räumliche Heterogenität auf versch. Skalen, in-situ Messung der Analytgehalte, Absch. von u_s durch doppelte Beprobung	Pb, Zn (räumliche Verteilung)	In-situ Messungen, geschachteltes Raster	30 ($\pm$ 15,7) (robuste ANOVA)
Boon et al. (2007)	6	6 Altlastflächen (UK)	Abschätzung der Unsicherheit für versch. Standorte, doppelte Probennahme (identischer Probennehmer)	As, Pb, organ. Stoffe (Flächenmittelwerte)	Je nach Standort unterschiedl. Muster, Probennahmegeräte, Probennahmetiefen	36,3 ($\pm$ 22,5) (robuste ANOVA)

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Referenz	n	Probennahmeobjekt	Art der Studie	Untersuchte Parameter	Probennahmeverfahren	u _s -Werte, MW (±Stabw)
De Zorzi et al. (2008)	9	Referenzfläche (NE Italien, 1 ha), Ackernutzung	Flächendetaillierte Probennahme mit drei versch. Probennahmegeräten (identischer Probennehmer)	Cr, Sc, Zn (Flächenmittelwerte und Verteilung)	Einzelproben, stratifizierte Zufallsprobennahme, Raster 10 * 10 m, drei versch. Probennahmegeräte: Edelmannbohrer, mechanischer Bohrer, Schaufel; Probennahmetiefe 20 cm	3,5 (±0,8) (Nugget-varianz)
Van der Perk et al. (2008)	54	3 Referenzflächen (Italien): (1) Grasland (0,5 ha), (2) Acker (1 ha), (3) Altlastfläche (0,25 ha)	Flächendetaillierte Probennahme mit drei versch. Probennahmegeräten (identischer Probennehmer)	As, Cr, Zn (Flächenmittelwerte und Verteilung)	Einzelproben, stratifizierte Zufallsprobennahme, Raster 10 * 10 m, drei versch. Probennahmegeräte	8,9 (±8,6) (Nugget-varianz, Varianz d Differenzen zw. Probennahme geräten)
LUFA & LS-PE Rostock (Kleimeier, 2009; Kurfürst et al. 2011; Kuchenbuch et al. 2010; Buczko et al. 2010)	153	3 Ackerschläge (Hessen, 3, 5, und 6 ha)	(1) CT; (2) SPT, jeweils 18 Teilnehmer	B, Cu, K, Mg, Mn, P, Zn (pflanzenverfügbare Gehalte), pH, Corg, As, B, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Tl, and Zn (Gesamtgehalte) (Flächenmittelwerte)	Vereinfachte Muster („X“, „W“, u.ä.), Handbohrer, Probennahmetiefe meist 20 cm	8,0 (±6,4) (ANOVA, VKS)

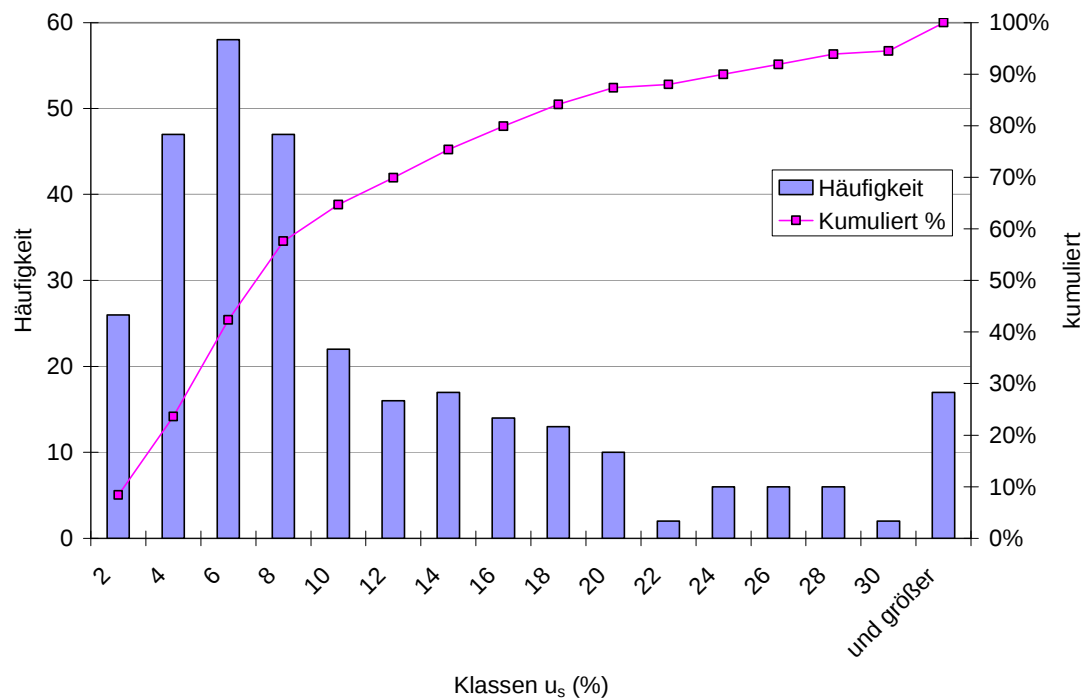


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der u_s -Werte aller für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 313$, $MW = 10,98$, $Md = 6,6$, $Stabw = 11,96$).

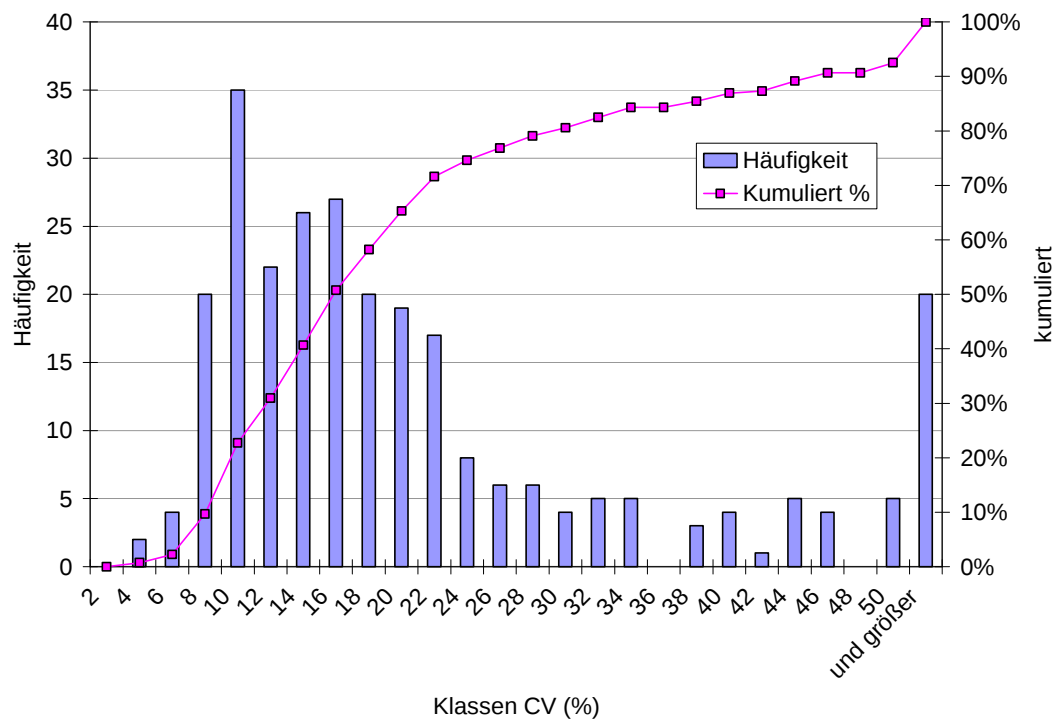


Abbildung 2: Häufigkeitsverteilung der CV-Werte der für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 268$, $MW = 20,8$, $Md = 16,0$, $Stabw = 14,8$).

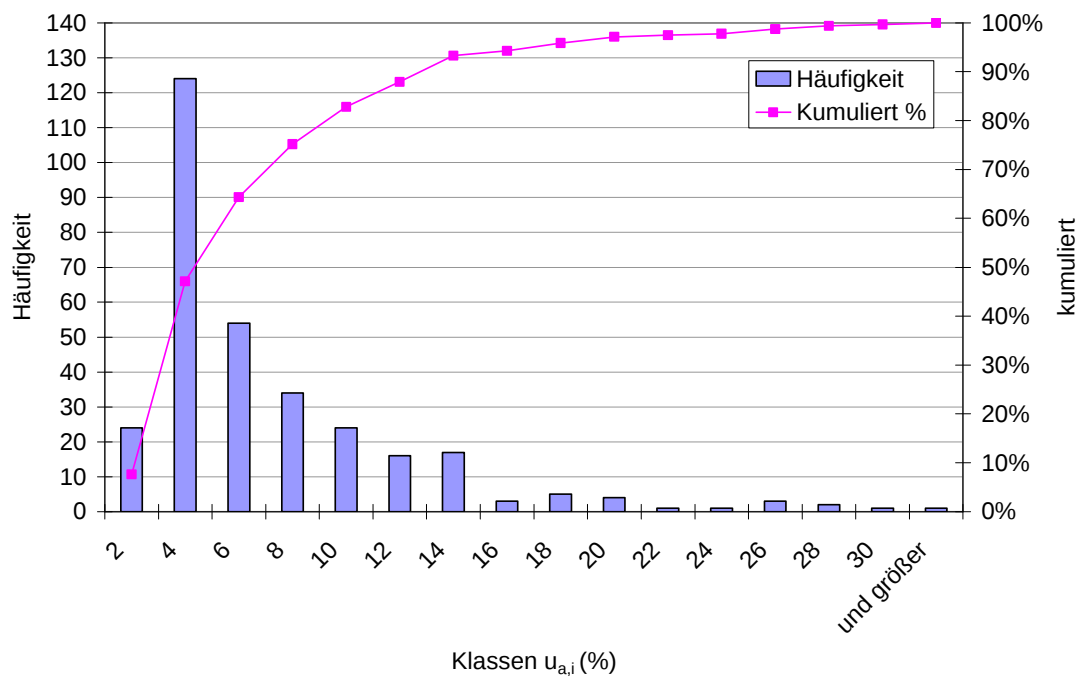


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der $u_{a,i}$ -Werte der für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 313$, $MW = 6,2$, $Md = 4,5$, $Stabw = 5,2$).

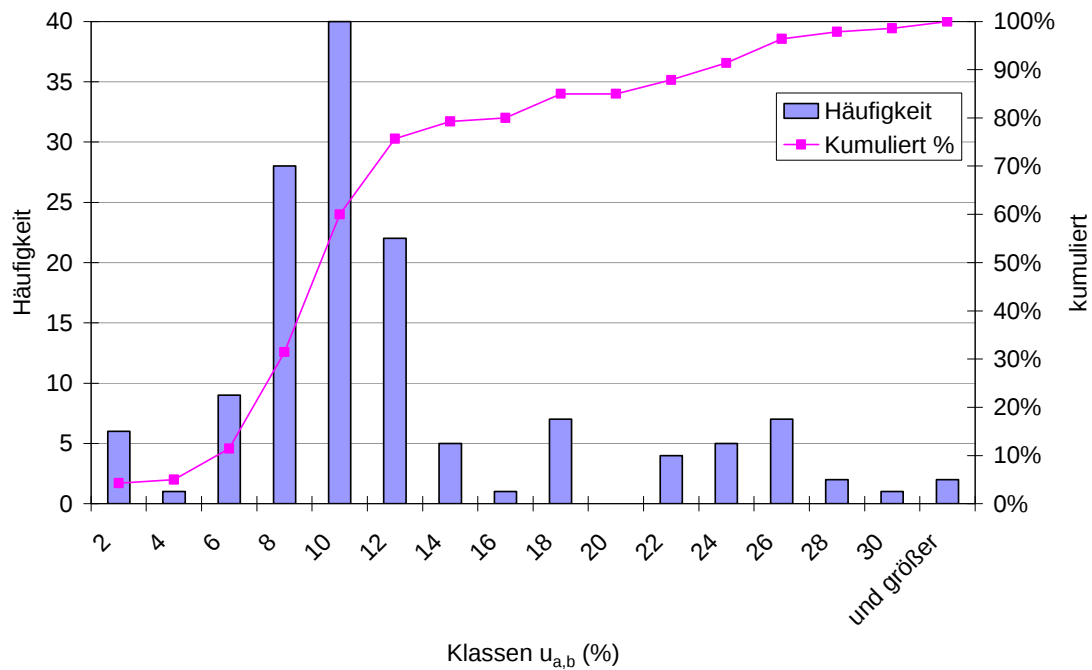


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der $u_{a,b}$ -Werte der für die vergleichende Analyse verwendeten Datensätze ($n = 140$, $MW = 11,3$, $Md = 9,2$, $Stabw = 6,7$).

Eine Analyse der Daten mit Hilfe des C&RT Ansatzes („classification and regression trees“, SPSS, v. 15.0) mit u_s als abhängiger Variable deutet darauf hin, dass das Probennahmemuster einen bedeutenden Einfluss auf die Probennahmeunsicherheit hat, da der erste Teilungsschritt durch das Probennahmemuster determiniert wird (Abbildung 5). Als nächstwichtige Variable folgen die Feldheterogenität (CV-Wert), und die Probennahmetiefe. Dabei sollte jedoch bedacht werden, dass die Anzahl der Datensätze für eine C&RT Analyse idealerweise höher sein müsste.

Eine Analyse der Daten in gleicher Weise mit dem CHAID-Ansatz („chi-square automatic interaction detector“, SPSS, v. 15.0) (Abbildung 6) ergab die Probennahmetiefe als wichtigste unabhängige Variable (erster Teilungsschritt) gefolgt von der Feldheterogenität (CV) und dem Analyten.

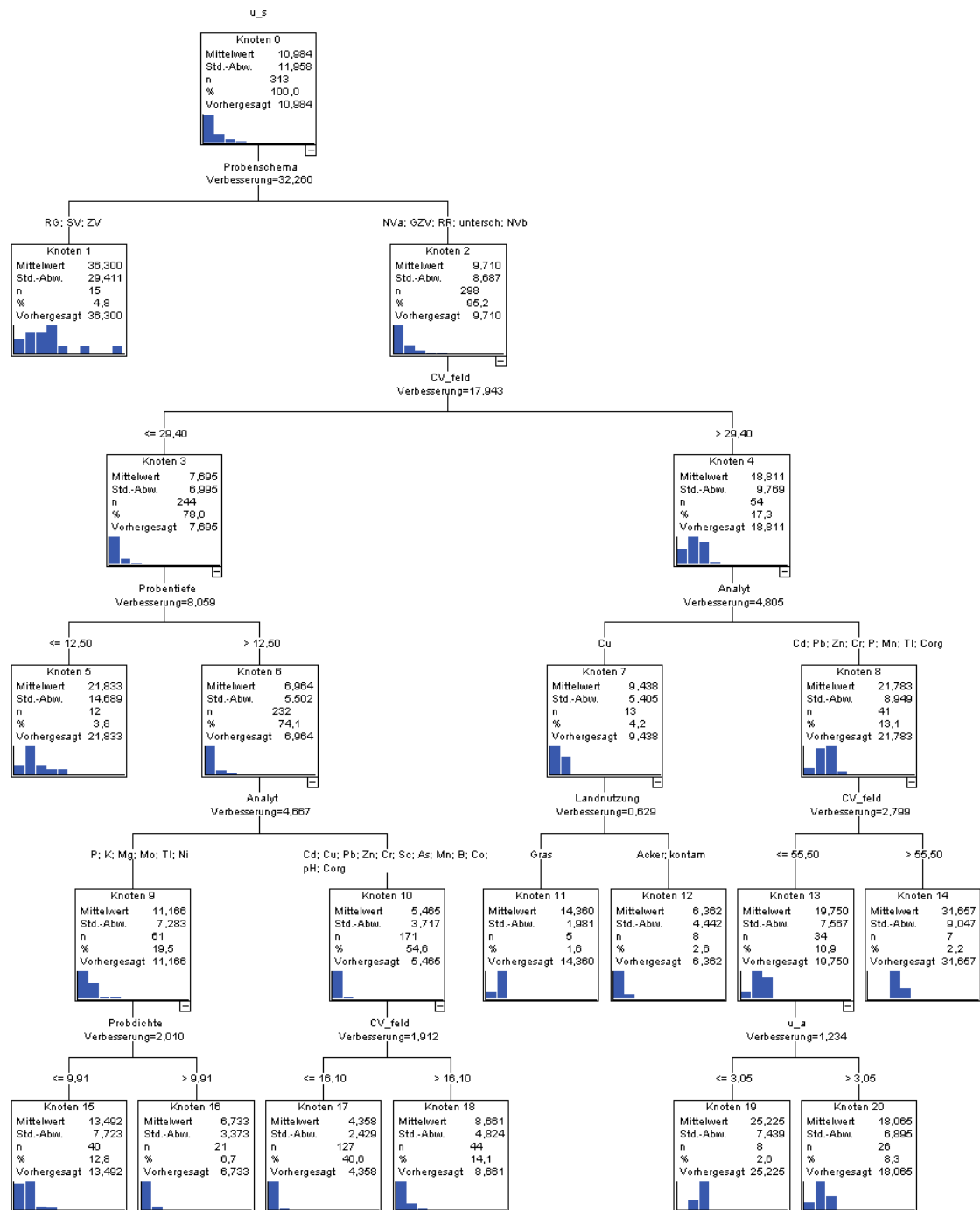


Abbildung 5: Baumdiagramm für C&RT Analyse (abhängige Variable: u_s ; unabhängige Variablen: Probennahmeschema, CV, Probennahmetiefe, Analyt, Landnutzung, Probennahmedichte, u_a).

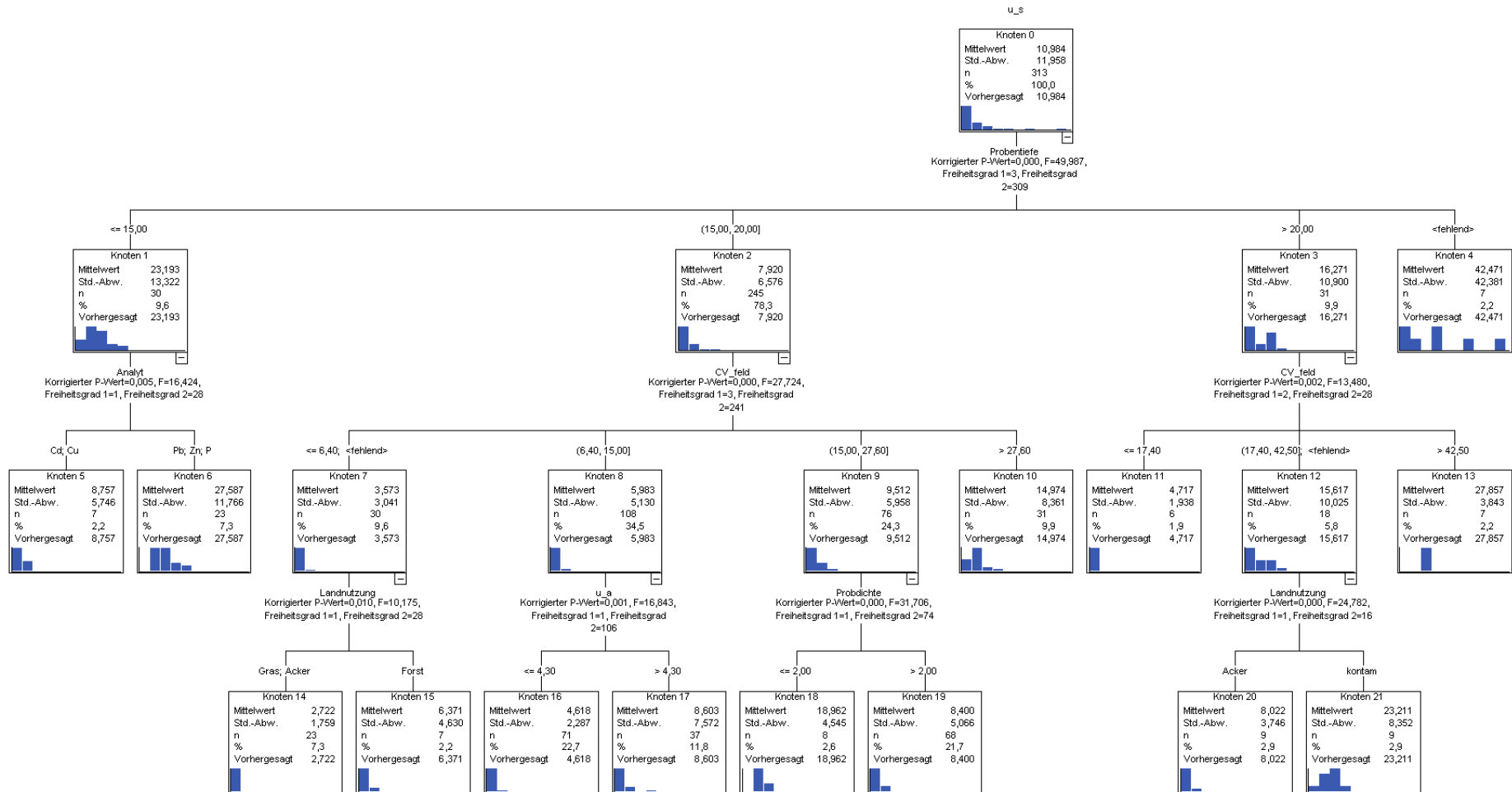


Abbildung 6: Baumdiagramm für CHAID Analyse (abhängige Variable: u_s ; unabhängige Variablen: Probennahmeschema, CV, Probennahmetiefe, Analyt, Landnutzung, Probennahmedichte, u_a).

Teilt man die Datensätze jeweils in einige wenige Gruppen gemäß der verschiedenen unabhängigen Variablen; und analysiert die sich für diese Gruppen jeweils ergebenden u_s -Werte, so kommt man zu Ergebnissen, die den Baumanalysen der Abbildungen 5 und 6 zum Teil widersprechen (Tabellen 8 bis 14).

Für unterschiedliche Probennahmemuster zeigen die mittleren u_s -Werte zum Teil sehr deutliche Unterschiede (Tabelle 8), jedoch muss man dabei bedenken, dass die Anzahl der Datensätze für die Gruppen (1a), (1c), (2), (5) und (7) recht gering ist. Zudem sind die Standardabweichungen für fast alle Gruppen sehr groß (d.h., CV etwa 100%). Die hohen Mittelwerte von u_s für die Probennahmemuster (1a), (1c), (2), (5) und (7) lassen daher nicht den Schluss zu, dass diese Probennahmemuster generell mit einer erhöhten Probennahmeunsicherheit einhergehen, bzw. dass die hohen u_s -Werte durch das Probennahmemuster verursacht sind.

Wahrscheinlicher ist es, dass die hohen Unsicherheitswerte durch andere spezifische Probennahmeparameter der verwendeten Untersuchungen bedingt sind (vgl. Tabelle 7).

Dagegen ist die Anzahl der Datensätze für die Probennahmemuster (3), (4a) und (4b) größer. Die mittlere Probennahmeunsicherheit für „geschichtete (stratifizierte) Zufallsverteilung (GZV)“ ist etwas geringer als für „Nichtsystematische vereinfachte Muster (NV)“, jedoch ist dieser Unterschied statistisch nicht signifikant.

Aussagefähiger sind hier wahrscheinlich Studien, in denen explizit versch. Arten von Mustern (Ganglinien) für denselben Standort verglichen werden, und möglichst alle anderen Parameter konstant gehalten wurden.

In der Vergleichsprobennahmestudie von Ramsey & Argyraki (1997) wurden u_s -Werte für versch. Arten von Probennahmemustern am selben Standort evaluiert (Pb in stark erhöhten Konzentrationen). Für regelmäßige Raster in Einzelbeprobung ergab sich $u_s = 25 \%$, dagegen für Raster mit (lokalen) Mischproben 15% , während nichtsystematische vereinfachte Muster $u_s = 28 \%$ ergaben. Ein SPT am Standort mit unterschiedlichsten Mustern („W“, Zufallsverteilung, Raster) ergab andererseits lediglich $u_s = 19,5 \%$. Dies widerspricht den Erwartungen, da man bei mehr Freiheitsgraden für die Probennahme eine höhere Unsicherheit erwarten würde.

Für Ackerschläge und Nährelemente fanden Obenauf & Seeboldt (1986), dass das Probennahmemuster („N“, diagonal, Zufallsverteilung) keinen signifikanten Einfluss auf die Unsicherheit der Probennahme hat.

Tabelle 8: Übersicht u_s -Werte für unterschiedliche Probennahmemuster.

Probennahmemuster	n	Mittelwert	Median	Stabw
(1a) Raster rechtwinklig, RR	35	13,0	7,7	12,9
(1c) geschachteltes Raster, RG	4	30,0	25,8	25,8
(2) Zufallsverteilung, ZV	9	39,7	35,6	37,2
(3) Geschichtete (stratifizierte) Zufallsverteilung, GZV	63	8,1	5,1	8,1
(4a) Nichtsystematische vereinfachte Muster, einheitlich, Nva	107	10,2	7,9	8,6
(4b) Nichtsystematische vereinfachte Muster, unterschiedlich, NVb	89	9,2	7,0	6,6
(5) subjektive Verteilung, SV	2	33,5	33,5	3,8
(7) unterschiedliche Muster	2	13,3	13,3	8,8

Ein Vergleich der u_s -Werte für verschiedene Landnutzungsarten (Tabelle 9) zeigt deutlich höhere mittlere Werte für kontaminierte Standorte als für Flächen „normaler“ Landnutzung (Acker, Forst, Grünland) mit Hintergrundkonzentrationen. Unterschiede zwischen diesen Landnutzungen wurden auch in Einzelstudien festgestellt (z.B. van der Perk et al. 2008).

Die höheren u_s -Werte für Grünlandnutzung im Vergleich zu Ackernutzung sind statistisch nicht signifikant, lassen sich aber durch die stärkere Homogenisierung des Oberbodens unter Ackernutzung erklären.

Tabelle 9: u_s -Werte für unterschiedliche Landnutzungsarten

Landnutzung	n	Mittelwert	Median	Stabw
Acker	165	8,4	5,5	11,4
Forst	11	7,9	9,1	4,8
Gemischt	4	19,8	13,5	15,2
Gras	97	11,4	8,3	9,7
Kontaminiert	36	21,6	23,0	15,0

Die u_s -Werte zeigen eine signifikante Korrelation mit der Heterogenität der Flächen (d.h. den CV-Werten) (Abbildung 7, $R^2 = 0,54$). Teilt man die Datensätze in drei Klassen gemäß der CV-Werte, so ergeben sich für die drei Gruppen deutliche Unterschiede in den mittleren u_s -Werten (Tabelle 10).

Eine positive Korrelation der Probennahmeunsicherheit mit der Flächenheterogenität wurde auch in Einzelstudien beschrieben (Jacob & Klute 1956, Cameron et al. 1971, Kerschberger and Richter 1992, Kurfürst et al. 2004, Taylor et al. 2005, van der Perk et al. 2008, Kuchenbuch et al. 2010).

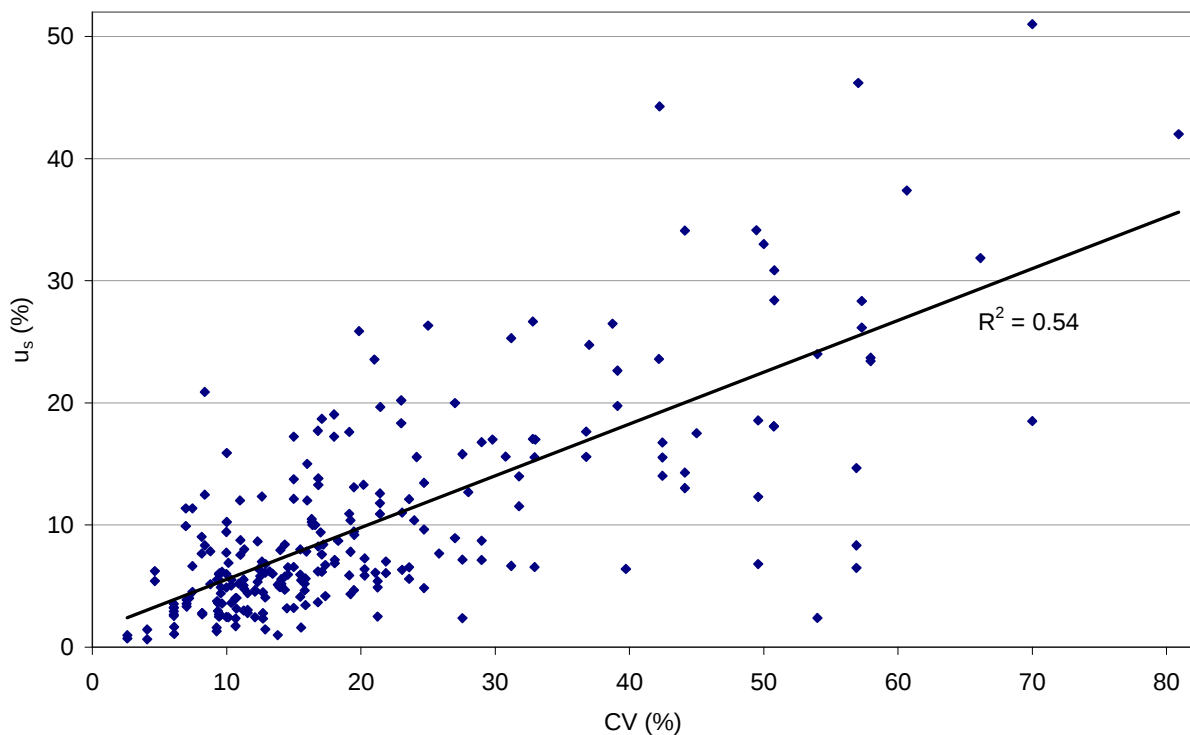


Abbildung 7: u_s -Werte vs CV (d.h., Feldheterogenität).

Tabelle 10: u_s -Werte für unterschiedliche Heterogenitätsklassen.

CV	N	Mittelwert	Median	Stabw
<12,5 %	86	5,2	4,5	3,4
>12,5 - <=21%	79	8,1	6,7	4,7
>21%	90	17,1	15,6	10,2

In der Mehrzahl der hier betrachteten Datensätze wurden die obersten 20 cm Tiefe beprobt (Tabelle 11), während nur jeweils etwa 10 % der Daten geringere oder größere Beprobungstiefen aufwiesen. Der mittlere u_s -Wert für 20 cm Beprobungstiefe ist deutlich geringer als für die anderen beiden Gruppen, allerdings ist es fraglich, ob diese geringere Probennahmeunsicherheit in einem kausalen Zusammenhang mit der Beprobungstiefe steht.

Tabelle 11: u_s -Werte für unterschiedliche Probennahmetiefen.

Probennahmetiefe	N	Mittelwert	Median	Stabw
<20 cm	30	23,2	19,0	13,3
20 cm	243	8,0	6,1	6,6
>20 cm	31	16,3	16,9	10,9

Zwischen den untersuchten Analyten sind sehr große Unterschiede in den mittleren u_s -Werten zu beobachten (Tabelle 12). Große, anscheinend erratische, Unterschiede zwischen Analyten wurden teilweise auch in Einzelstudien für jeweils identische Standorte beschrieben.

Tabelle 12: u_s -Werte für unterschiedliche Analyte.

Analyte	N	Mittelwert	Median	Stabw
As	29	8,3	4,9	14,6
B	14	6,7	5,2	4,2
Cd	21	11,0	8,4	9,5
Co	9	5,0	5,0	1,5
Corg	6	10,9	10,4	4,9
Cr	30	7,9	5,3	7,0
Cu	25	8,9	8,0	6,4
K	13	14,0	13,7	7,6
Mg	11	12,4	8,9	11,6
Mn	7	8,1	6,3	7,8
Mo	9	10,7	8,4	5,0
Ni	9	9,9	7,6	5,4

Tabelle 12 (Fortsetzung)

Analyte	N	Mittelwert	Median	Stabw
P	30	20,4	15,6	21,8
Pb	28	13,6	10,6	11,5
pH	6	1,1	1,0	0,4
Sc	3	3,9	4,0	1,3
TI	9	15,1	9,0	14,5
Zn	49	10,2	6,1	10,6

Eine Einteilung gemäß der Beprobungsdichte in drei Klassen ergibt fast identische mittlere u_s -Werte und hohe Standardabweichungen (Tabelle 13). In Einzelstudien mit regelmäßigem Probennahmeraster wurde hingegen eine Verbesserung der Probennahmesicherheit mit der Zunahme der Beprobungsdichte beschrieben (Cameron et al. 1971).

Tabelle 13: u_s -Werte für unterschiedliche Beprobungsdichten

Beprobungsdichte (Proben / ha)	n	Mittelwert	Median	Stabw
<10	120	10,9	8,1	10,3
10 bis 30	70	10,0	6,7	9,5
>30	118	10,4	6,0	10,4

Die Gruppierung der u_s -Werte nach verwendetem Probennahmegerät (Tabelle 14) ergibt, dass die Mehrzahl der Datensätze ($n = 254$) zur Gruppe „Bohrer dünn“ zu rechnen ist (eine genauere Aufgliederung der Probennahmegeräte war nicht möglich, da die dafür erforderlichen Angaben in den Originalpublikationen meist nicht angeführt wurden). Der Mittelwert von u_s für diese Gruppe liegt mit 10,5 % sehr nahe am globalen Mittelwert (10,98 %) und die Standardabweichung ist mit 11,3 sehr hoch. Eine aussagefähige Auswertung der statistischen Kennzahlen der u_s -Werte für die Probennahmegeräte-Gruppen ist nicht möglich, obwohl der Mittelwert für die Gruppe „Profilgrube“ sehr hoch erscheint. Jedoch ist die Anzahl der Datensätze (4) sehr gering. Ähnlich konnte in Einzelstudien in denen an einem einzelnen Standort mit unterschiedlichen Geräten Proben gewonnen wurden, kein signifikanter Einfluss des Probennahmegeräts auf die Probennahmeunsicherheit festgestellt werden (De Zorzi et al. 2008, van der Perk et al. 2008).

Tabelle 14: u_s -Werte für unterschiedliche Probennahmegeräte.

Gerät	N	Mittelwert	Median	Stabw
Bohrer dick (>4 cm D)	28	9,9	6,0	9,0
Bohrer dünn (<4 cm D)	254	10,5	6,9	11,3
In situ Messung	4	30,0	25,8	15,7
Profilgrube	4	42,3	33,2	24,5
Schaufel	21	8,2	4,0	9,0
unterschiedlich	2	13,3	13,3	8,8

7. Abschließende Diskussion und Bewertung

Die Auswertung von 13 Feldstudien zur Probennahmeunsicherheit ergab insgesamt einen Mittelwert von $u_s = 11 \%$, jedoch mit einer großen Streuung der Werte (Stabw = 12, Spannbreite 0 bis über 100 %).

Obwohl die Anzahl der Datensätze insgesamt über 300 beträgt, ist es schwierig, die Probennahmeunsicherheit mit einzelnen Komponenten des Probennahmeverfahrens oder Standortfaktoren in Beziehung zu setzen. Der Grund dürfte in der Mannigfaltigkeit der Faktoren zu suchen sein, welche die Probennahmeunsicherheit beeinflussen. Dies sind zum einen Faktoren des Probennahmeverfahrens: Art der Probe, Probennahmemuster, Probennahmetiefe, Beprobungsdichte, Probennahmegerät. Daneben spielen aber auch Standortfaktoren eine Rolle, vor allem die Heterogenität der Fläche und die Landnutzung. Erschwert wird der Vergleich von unterschiedlichen Probennahmeverfahren zudem noch durch den Einfluss des Analyts, der sich meist einer kausalen Erklärung entzieht.

Das heißt als Konsequenz, dass die Datenlage bezüglich konkreter Zahlenwerte für u_s für klar definierte Probennahmeverfahren insgesamt immer noch unzureichend ist, obwohl gerade in den letzten 15 Jahren zahlreiche Studien zur Probennahmeunsicherheit veröffentlicht wurden. Weitere Vergleichsprobennahmestudien sind in Zukunft daher dringend erforderlich.

Für Oberflächenproben mit denen der mittlere Gehalt von gängigen Analyten abgeschätzt werden soll, bietet es sich daher an, für gängige Probennahmeverfahren die

Probennahmeunsicherheit gleich dem hier gefundenen Mittelwert (d.h. $u_s = 11 \%$, bzw. für die erweiterte Probennahmeunsicherheit $U_s = 22 \%$) zu setzen, sofern keine weiteren Informationen über den Standort verfügbar sind. Existieren Informationen über die Heterogenität der beprobten Fläche, so kann dieser Wert gemäß Tabelle 10 und Abbildung 7 entsprechend modifiziert werden.

Weitere Ringversuche zur Einschätzung der Probennahmeunsicherheit bei der Beprobung von Böden sind notwendig, wobei unbedingt unterschiedliche Nutzungsformen und unterschiedliche prioritäre Schadstoffe, insbesondere organische Verbindungen, einbezogen werden sollten.

Literaturverzeichnis zu Teil 2

- Argyraki, A., Ramsey, M.H., & Thompson, M. (1995). Proficiency testing in sampling: pilot study on contaminated land. *Analyst*, 120: 2799–2803.
- Baermann, A., Bahrig, B., Bücherl, K., Klaas, N. (2005): ITVA-VergleichsProbennahme – Ein “Ringversuch” für Rammkernsondierungen.- *altlasten spektrum*, 2/2005: 65-69.
- Barbizzi, S., De Zorzi, P., Belli, M., Pati, A., Sansone, U., Stellato, L., Barbina, M., Deluisa, A., Menegon, S., Coletti, V. (2004): Characterisation of a reference site for quantifying uncertainties related to soil sampling.- *Environmental Pollution*, 127: 131–135.
- Belli, M., de Zorzi, P., Sansone, U., Shakhashiro, A., da Fonseca, A.G., Trinkl, A., Benesch, T. (2009): A soil sampling intercomparison exercise for the ALMERA network.- *Journal of Environmental Radioactivity*, 100 (11): 982-987.
- Boon, K.A., Taylor, P.D., Ramsey, M.H. (2007): Estimating and optimising analytical and sampling uncertainty in environmental investigations: Application and evaluation.- *Geostandards and Geoanalytical Research*, 31 (3): 237-249.
- Brus, D. J., Spätjens, L. E. E. M., de Gruijter, J. J. (1999): A sampling scheme for estimating the mean extractable phosphorus concentration of fields for environmental regulation.- *Geoderma*, 89: 129-148.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2009): Projekt zur externen Qualitätssicherung bei der Probennahme von Böden.- *UmweltSpezial*, 51 S.
- Bücherl, K., Kuchler, F., Schmid, M. (2010a): Projekt zur externen Qualitätssicherung bei der Probennahme von Böden – Teil 1: Bohrung und Bodenansprache.- *altlasten spektrum*, 4/2010: 180 - 186.

- Bücherl, K., Kuchler, F., Schmid, M. (2010b): Projekt zur externen Qualitätssicherung bei der Probennahme von Böden – Teil 2: Auswertung der Labordaten.- *altlasten spektrum*, 5/2010: 228-236.
- Buczko, U., Kuchenbuch, R.O., Übelhör, W., Nätscher, L. (2010): Assessment of sampling and analytical uncertainty of trace element contents in arable field soils.- Submitted to *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Bunge, R., Bunge, B. (1999): Probennahme auf Altlasten: Minimal notwendige Probenmasse.- *altlasten spektrum* 3/1999: 174-179.
- Cameron, D.R., Mybert, M., Toogood, J.A., Lavery, D.H. (1971): Accuracy of field sampling for soil tests.- *Can. J. Soil Sci.*, 51: 165-175.
- Cline, M.G. (1944): Principles of soil sampling. *Soil Sci.*, 58: 275-288.
- de Gruijter, J.J. (2002): Sampling. In J.H. Dane and G.C. Topp, Eds. *Methods of Soil Analysis, Part 4—Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, pp. 45–79.
- Desaules, A., Dahinden, R. (1994): Die Vergleichbarkeit von Schwermetallanalysen in Bodenproben von Dauerbeobachtungsflächen - Ergebnisse eines Probennahmeringversuches. Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC), 3097 Liebefeld. 25 pp
- Desaules, A., Sprengart, J., Wagner, G., Muntau, H., Theocharopoulos, S. (2001): Description of the test area and reference sampling at Dornach.- *The Science of the Total Environment*, 264(1-2): 17-26.
- de Zorzi, P., Belli, M., Barbizzi, S., Menegon, S., Deluisa, A. (2002): A practical approach to assessment of sampling uncertainty.- *Accredit. Qual. Assur.*, 7 (5): 182–188.
- De Zorzi, P., Barbizzi, S., Belli, M., Mufato, R., Sartori, G., Stocchero, G. (2008): Soil sampling strategies: Evaluation of different approaches.- *Applied Radiation and Isotopes*, 66(11): 1691-1694.
- DIN ISO 10381-1 (2003): Bodenbeschaffenheit - Probennahme - Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probennahmeprogrammen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN ISO 10381-2 (2003): Bodenbeschaffenheit: Probennahme – Teil 2: Anleitung für Probennahmeverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 18123 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 19683 (1997): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Physikalische Laboruntersuchungen, Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Siebung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

- E DIN 11074-2 (1998): Bodenbeschaffenheit - Wörterbuch - Teil 2: Begriffe und Definitionen zur Probennahme. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Gy, P.M. (1992): Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: Theories of heterogeneity, sampling and homogenizing, Elsevier Science Ltd., Amsterdam,
- IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY) (2009): Soil sampling intercomparison exercise by selected laboratories of the ALMERA network.- IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications No. IAEA/AQ/1, Wien 2009, 101 S.
- Jacob, W.C., Klute, A. (1956): Sampling soils for physical and chemical properties.- Soil Science Society of America Proceedings, 20: 170-172.
- Kerschberger, M., Richter, D. (1992): Untersuchungen zur Streuung der Bodenuntersuchungsergebnisse von pH, P, K, Mg auf grossen Feldschlägen des Ackerlandes. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 36: 163-170.
- Kleimeier, C. (2009): Einflussgrößen auf die Messunsicherheit die anteilig auf die Bodenprobennahme entfällt.- Masterarbeit, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock.
- Kuchenbuch, R.O., Buczko, U., Kleimeier, C., Kurfürst, U., Schaaf, H., Munzert, M. (2010): Uncertainty of soil sampling using simple sampling schemes.- Submitted to J. Environ. Management.
- Kurfürst, U., Desaulles, A., Rehnert, A., Muntau, H. (2004): Estimation of measurement uncertainty by the budget approach for heavy metal content in soils under different land use.- Accreditation Qual. Assurance, 9: 64-75.
- Kurfürst, U., et al. (2005): Repräsentanz von Probennahmeverfahren auf Ackerflächen (PronAck) - eine Fallstudie für Cadmium und Phosphor zur Ermittlung der Messunsicherheit [Endbericht].- Fachhochschule Fulda, Fachbereich Oecotrophologie.
- Kurfürst, U., Buczko, U., Kleimeier, C., Kuchenbuch, R.O. (2011): Soil sampling uncertainty on arable fields estimated from reference sampling and a collaborative trial.- Accreditation and Quality Assurance, 16: 73-81
- Lischer, P., Dahinden, R., Desaulles, A. (2001): Quantifying uncertainty of the reference sampling procedure used at Dornach under different soil conditions.- Sci. Total Environ., 264: 119-126.
- Munch, J.C., Bidwell, G.L. (1928): What constitutes an adequate sample?- J. Assoc. Off. Agr. Chem., 11: 220-222.
- Nestler, A. (2007): Bestimmung der Messunsicherheit für die Verfahren und Methoden zur Bodenanalytik des Anhangs 1 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Dissertation FU Berlin.

- Oberauf, S., Seeboldt, M. (1986): Zur Methodik der Bodenprobennahme für die Erfassung von Bodenfruchtbarkeitskennziffern auf Produktionsschlägen der BG 1.- Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 30(3): 123-129.
- Peil, B. (2010): Vergleichende Untersuchungen der Probennahmeunsicherheit von Böden nach Baule und Benedetti-Pichler unter Berücksichtigung der Messunsicherheit atomspektrometrischer Messungen. Dissertation FU Berlin.
- Ramsey, M.H. (1998): Sampling as a source of measurement uncertainty: techniques for quantification and comparison with analytical sources.- Journal of Atomic Spectrometry, 13: 97–104.
- Ramsey M.H., Argyraki, A. (1997): Estimation of measurement uncertainty from field sampling: implications for the classification of contaminated land. The Science of the Total Environment, 198: 243-257.
- Ramsey, M.H., Ellison, S.L.R. (eds.) (2007): Eurachem/EUROLAB/ CITAC/Nordtest/AMC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches. pp. 102. http://www.eurachem.org/guides/UfS_2007.pdf.
- Ramsey, M.H., Thompson, M. (2007): Uncertainty from sampling, in the context of fitness for purpose.- Accreditation and Quality Assurance, 12: 503–513.
- Robinson, G.W. & Lloyd, W.E (1915): On the probable error of sampling in soil surveys.- Jour. Agr. Sci., 7: 144-153.
- Seeboldt, M. (1985): Die lokale Variabilität von ausgewählten Bodenmerkmalen auf sandigen Böden.- Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 29(2): 69-75.
- Squire, S., Ramsey, M.H., Gardner, M.J. (2000a): Collaborative trial in sampling for the spatial delineation of contamination and the estimation of uncertainty.- Analyst, 125 (1): 139-145.
- Squire, S., Ramsey, M.H., Gardner, M.J., Lister, D (2000b): Sampling proficiency test for the estimation of uncertainty in the spatial delineation of contamination.- Analyst, 125 (11): 2026-2031.
- Swenson, L.J., Dahnke, W.C., Patterson, D.D. (1984): Sampling for soil testing. North Dakota State Univ., Dept. of Soil Sci., Res. Rep. No. 8.
- Taylor, P.D., Ramsey, M.H., Potts, P.J. (2005): Spatial contaminant heterogeneity: quantification with scale of measurement at contrasting sites.- J. Environ. Monit., 7: 1364–1370.
- Thompson, M., Maguire, M. (1993): Estimating and using sampling precision in surveys of trace constituents of soils.- Analyst, 118: 1107-1110.
- Thompson, M., Ramsey, M.H. (1995): Quality Concepts and Practices Applied to Sampling- An Exploratory Study.- Analyst, 120: 261-270

- Van der Perk, M., de Zorzi, P., Barbizzi, S., Belli, M., Fajgelj, A., Sansone, U., Jeran, Z., Jacimovic, R. (2008): The effect of short-range spatial variability on soil sampling uncertainty.- *Applied Rad. Isotopes*, 66(11): 1582-1587.
- VIM (1994): Internationales Wörterbuch der Metrologie. Deutsche Übersetzung des "International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM), Second Edition. ISO International Organization for Standardization, Genf". Beuth Verlag, Berlin.
- Wagner, G., Mohr, M.-E., Sprengart, J., Desaulles, A., Muntau, H., Theocharopoulos, S. & Quevauviller, Ph. (2001a): Objectives, concept and design of the CEEM soil project.- *The Science of the Total Environment*, 264: 3-15.
- Wagner, G., Lischer, P., Theocharopoulos, S., Muntau, H., Desaulles, A., Quevauviller, Ph. (2001b): Quantitative evaluation of the CEEM soil sampling intercomparison.- *The Science of the Total Environment*, 264: 73-101.