



UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Nr. 20/1997

**Mobilität und Bioverfügbarkeit
luftgetragener Schadstoffe
in emittentennahen Agrarböden
Sachsen-Anhalts**

Michael Manz

UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH
Sektion Chemische Ökotoxikologie

ISSN 0948-9452

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben (FKZ: 1600A/0024)

*Mobilität und Bioverfügbarkeit luftgetragener
Schadstoffe in emittentennahen Agrarböden
Sachsen-Anhalts*

Archiv

Autor:

Michael Manz

Sektion Chemische Ökotoxikologie
UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH
Permoserstraße 15
D - 04318 Leipzig

Leipzig, den 30.06.1997

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Landes Sachsen-Anhalt gefördert (Kultusministerium Sachsen-Anhalt). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einführung und Zielsetzung	1
2 Geographischer und geologischer Rahmen	2
2.1 Vorstellung der Untersuchungsgebiete	2
2.2 Lage der Probenahmestellen	4
2.3 Bodencharakteristik des Untersuchungsgebietes	5
3 Untersuchungsprogramm	5
4 Probenahme, Aufbereitung und Analytik	6
4.1 Methodische Vorgehensweise bei der Probenahme	6
4.2 Transport und mechanische Aufbereitung des Probenmaterials	7
4.3 Bodenphysikalische Untersuchungen	7
4.4 Bestimmung relevanter bodenchemischer Parameter	8
4.5 Analytische Verfahren für anorganische Substanzen	9
4.5.1 Gesamtgehalte im Boden	10
4.5.2 Maximal lösliche Metallanteile (S7-Test)	10
4.5.3 Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung (DIN 19730)	10
4.5.4 Sequentielle Extraktion von Schwermetallen	11
4.5.5 Arsen und Metallgehalte in der Pflanze	12
4.6 Analytische Verfahren zur Ermittlung organischer Xenobiotika in Böden.....	13
4.6.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs)	13
4.6.2 Polychlorierte Biphenyle (PCBs)	14
4.6.3 Phenole	14
4.6.4 Dioxine und Furane	15
4.6.5 Ausgewählte zusätzliche Chlororganika (HCHs, DDTs, HCB)	15
4.6.6 Adsorption ausgewählter Organika im Boden (OECDs 106 und 117)	16
4.6.7 Organische Xenobiotika in der Pflanze	17
5 Ergebnisse	18
5.1 Beschreibung der Immissionssituation	18
5.2 Auswertung der bodenphysikalisch-bodenchemischen Untersuchungen	19
5.3 Belastung mit anorganischen Schadstoffen	25
5.3.1 Darstellung der Gesamtbelastung	26
5.3.2 Mobilität und Bindungsform	30
5.3.3 Schwermetallgehalte in der Pflanze und Betrachtung des Schadstoff- transfers Boden-Pflanze	34
5.4 Belastung mit organischen Schadstoffen	39
5.4.1 Darstellung der Gesamtbelastung	41
5.4.2 Mobilität im Boden	44
5.4.3 Organische Schadstoffe in der Pflanze und Betrachtung des Schad- stofftransfers Boden-Pflanze	47

	Seite
6 Theoretische Methoden	49
6.1 Regionales Expositionsmodell	49
6.2 Interpretation der Ergebnisse mittels statistischer Methoden	51
7 Zusammenfassung	54
8 Literaturverzeichnis	56
9 Anhang	

Abbildungsverzeichnis

	Seite
2-1 Lage der Probenahmelokalitäten	4
5-1 Kornsummenkurven der Oberböden (A_p -Horizonte der Mischproben)	20
5-2 pH-Verteilung in den einzelnen Bodenhorizonten der Schurfe	22
5-3 Organischer- und anorganischer Kohlenstoffgehalt in den einzelnen Boden- horizonten der Schurfe	23
5-4 Kationenaustauschkapazität CEC (Summe der austauschbaren Kationen) der Oberböden (A_p -Horizonte der Mischproben)	24
5-5 Zinkgehalte in den A_p -Horizonten der Rasterproben	27
5-6 Bleigehalte in den A_p -Horizonten der Rasterproben	28
5-7 Bariumgehalte in den A_p -Horizonten der Rasterproben	29
5-8 Prozentualer Anteil der einzelnen Fraktionen am Gesamtgehalt zweier Oberböden (Etzdorf: pH-Wert 7,7 und Hettstedt: pH-Wert 6,5)	33
5-9 Prozentualer Anteil der einzelnen Fraktionen am Gesamtgehalt in Abhängig- keit von der Bodenprofilltiefe zweier Schurfe der Agrarstandorte Hettstedt und Meuschau	34
5-10 Ca-, Fe-, Cu- und Zn- Gehalte im Weizen	37
5-11 Korrelationen zwischen Bodengesamtgehalten mit Gehalten in den einzel- nen Kompartimenten des Weizen am Beispiel der Elemente Cu und Zn	38
5-12 PAK-Gehalte ($\sum$ 15 PAKs nach EPA 610, aber ohne Acenaphtylen) in den A_p -Horizonten der Rasterproben	42
5-13 DDT-Gehalte ($\sum$ DDT, DDD und DDE) in den A_p -Horizonten der Raster- proben sowie bei Spergau, Schkopau und Etzdorf in den Weizenböden	43
5-14 HCHs und DDTs im Weizen	48
5-15 HCHs, DDTs, PCBs und PAKs im Blatt und Stengel des Weizens	48
6-1 Input-Output Gegenüberstellung für γ -HCH für das Szenario minimaler Nie- derschlag und wenig C_{org} (z.B. Spergau mit $C_{org} = 2 \%$ und 460 mm Niederschlag) bei konstanter Emission in das Kompartiment Luft	50
6-2 Input-Output Gegenüberstellung für γ -HCH für das Szenario maximaler Nie- derschlag und viel C_{org} (z.B. Zschornowitz mit $C_{org} = 4 \%$ und 550 mm Niederschlag) bei konstanter Emission in das Kompartiment Luft	50

Tabellenverzeichnis

	Seite
2-1 Probenahmestandorte mit Angaben von R- und H-Werten (Gauß-Krüger-Koordinaten) sowie zugehörige Emittenten	5
4-1 Sequentielle Extraktionsreihe in Anlehnung an Zeien & Brümmer (1989)	12
5-1 Zukünftige zu erwartende, atmogene Emissionsquellen im Untersuchungsgebiet	19
5-2 Bodentyp sowie wichtige bodenphysikalische Parameter der 14 Oberböden (A _p -Horizonte der Mischproben)	21
5-3 N-Gehalt sowie C/N-Verhältnis der Oberböden (A _p -Horizonte der Mischproben)	22
5-4 Richt- und Grenzwerte sowie Hintergrundwerte für Metalle in Böden	25
5-5 Durchschnittliche Konzentrationen aller gemessenen Elemente in den A _p -Horizonten (Rasterproben) der Standorte	26
5-6 Relative Oberbodenanreicherung (RTE) ausgewählter Spurenelemente unter Verwendung der Rasterproben nach Zanini & Bonifacio	28
5-7 Ergebnisse der Ammoniumnitratextraktion in den acht untersuchten Weizenböden	30
5-8 Bindungsanteile ausgewählter Schwermetalle in Oberböden von Agrarstandorten (A _p -Horizonte der Rasterbeprobungen)	31
5-9 Prozentualer Anteil aus der Summe der ersten beiden Fraktionen (mobil und leicht nachlieferbar nach Zeien & Brümmer) sowie Absolutgehalte in mg/kg (bez. auf das Trockengewicht) einiger Metalle in den Oberböden des Untersuchungsgebietes (A _p -Horizonte der Rasterproben)	32
5-10 Transferkoeffizient Boden-Pflanze (TF) und kritische Konzentrationen von Schwermetallen im Pflanzenmaterial	35
5-11 Durchschnittliche Konzentrationen der Elemente im Weizen der acht Standorte	36
5-12 Richt- und Grenzwerte sowie Hintergrundwerte für organische Schadstoffe in Böden	40
5-13 Durchschnittliche Gehalte an organischen Schadstoffen in den A _p -Horizonten (Rasterproben) der Standorte	41
5-14 Prozentuale Anteile einzelner organischer Substanzen innerhalb einer Stoffgruppe	44
5-15 Prozentuale Ad- und Desorptionsraten von γ -HCH, Phenanthren und PCB 28 der drei Versuchsböden (Gräfenhainichen, Eisleben, Wüsteneutzsch)	45
5-16 Vergleich von Literaturwerten (zitiert in Sabljic et al. 1995) und experimentell ermittelten log K _{OC} -Werten (nach OECD 106)	46
5-17 Durchschnittliche Gehalte an organischen Schadstoffen (Summenparameter) in der Weizenpflanze	47

1 Einführung und Zielsetzung

Bis in die neunziger Jahre hinein zählte der Industrieraum Leipzig-Halle-Bitterfeld zu den Zentren der chemischen Großindustrie in der ehemaligen DDR (Leuna- und Buna-Werke, Chemiekombinat Bitterfeld, Filmfabrik Wolfen u.a.). Neben der chemischen Industrie waren hier Energie- und Brennstoffindustrie, Maschinen- und Fahrzeugbau, Leicht- und Textilindustrie angesiedelt [1]. Die Energiegewinnung erfolgte überwiegend auf Braunkohlebasis, die in unmittelbarer Nachbarschaft in riesigen Tagebauen gewonnen wurde. Den großen Stellenwert, den die Braunkohle in den neuen Bundesländern inne hatte, läßt sich aus ihrer jeweiligen Nutzung ableiten. Die Braunkohle hatte zu etwa 70 % Anteil am Primärenergieverbrauch, 80% Anteil an der Stromerzeugung und nahezu 100 % Anteil am Grundstoffeinsatz der chemischen Industrie [2]. Damit verbunden nahmen die Flugstäube aus der Braunkohlenverbrennung mengenmäßig den größten Anteil an den Emissionen in diesem Raum ein. Die Ursachen für den hohen Eintrag basischer Flugstäube in dieser Region sind in der langjährigen Nutzung dieser Kohle als Energieträger in meist veralteten Kraftwerks- und Industrieanlagen sowie in der bis zum heutigen Zeitpunkt zu einem hohen Prozentsatz betriebenen Hausfeuerung zu suchen [3]. Hauptsächlich die mit Braunkohle betriebenen Großkraftwerke sind für den Staub- und Schwefeldioxideintrag verantwortlich. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wurden beispielsweise allein im Raum Bitterfeld-Gräfenhainichen durch die Verbrennung dieser Kohle etwa 12 Mio t Flugasche emittiert [4]. Zusätzlich waren diese Stäube im Bereich industrieller Standorte und chemischer Großbetriebe häufig mit anorganischen und organischen Schadstoffen angereichert, die sich dann im umgebenden Ökosystem niederschlugen [5-7].

Nachweisen lassen sich diese atmosphärischen Belastungen in der Vegetation. Hier spiegeln die Belastungen jedoch meist die aktuelle Immissionssituation der betreffenden Region wider oder aber Belastungen, die über relativ kurze Zeiträume (Wochen-wenige Jahre) in der Pflanze akkumuliert werden können. Dafür eignen sich ausgewählte Biomonitoringsysteme wie beispielsweise Moose, Kiefern- und Fichtennadeln [8-13]. In den Böden im Lee dieser Emittenten kam es langsam aber kontinuierlich zu einer Anreicherung dieser Schadstoffe in der obersten Bodenschicht. Besonders deutlich ist dies in unveränderten Waldböden, untergeordnet auch in landwirtschaftlich genutzten Flächen zu erkennen [14,15].

Erst in den vergangenen sechs Jahren führte die Stilllegung und Modernisierung der Großkraftwerke und Industriebetriebe sowie die Umstellung der Kraftwerke von Kohle auf Öl bzw. Gas zu einem drastischen Rückgang des Eintrages basischer Flugstäube und anthropogener Fremdstoffe. Das Ausbleiben kalkhaltiger Stäube führt in den betreffenden Böden langfristig zu einer Veränderung des gegenwärtigen Gleichgewichtszustandes. So konnte bereits an einigen Standorten mit Waldnutzung eine beginnende Versauerung der Böden und dadurch eine Mobilisierung anorganischer Schadstoffe beobachtet werden [7,16]. In den Agrarstandorten wird dieser Prozeß durch Düngungs-, Kalkungs- und Meliorationsmaßnahmen verzögert. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, daß dieser Vorgang in den nächsten Jahren auch hier verstärkt einsetzt.

Ein Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Erfassung von Schadstoffgehalten in Agrarstandorten im Lee ehemaliger Braunkohlegroßkraftwerke und chemischer Betriebe sowie deren Verteilung und Verhalten innerhalb des Bodensystems. Darüber hinaus ist durch den Rückgang des Flugstaubeintrages in den Boden mit einer Mobilisierung verschiedener Stoffe durch einsetzende Versauerungsprozesse zu rechnen. Umfangreiche chemische Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen und organischen Schadstoffen zeigen die Bindungsformen im Boden auf und versuchen eine Einschätzung der Mobilisierbarkeit dieser Stoffe zu geben. Durch die Einbeziehung verschiedener Bewertungsverfahren wird eine Gefährdungsabschätzung durchgeführt, wobei national wie international gültige Richt- und

Grenzwerte herangezogen werden und der Transferpfad Boden-Pflanze mit berücksichtigt wird.

Entgegen der ursprünglich im Projektantrag 1994 angegebenen Standorte mußte auf einige Testflächen verzichtet und alternative Meßstandorte waren auszuwählen. Dies war aus Gründen zwischenzeitlicher Umstrukturierung (Wohngebiet, Waldnutzung, Wegfall wegen Braunkohleabbau) notwendig geworden. Dadurch war ein direkter Vergleich mit archiviertem Probenmaterial sowie eine Bilanzierung des Schadstoffeintrages kaum noch möglich. Aus wissenschaftlichen Gründen wurden zusätzlich zwei Vergleichsstandorte in die Untersuchungen mit einbezogen, um Vergleiche mit Flächen unterschiedlichen Belastungsmusters durchführen zu können. Ein weiterer Aspekt, der mit berücksichtigt wurde, ist die Standortauswahl in Abhängigkeit von der Entfernung zum Emittenten sowie die Miteinbeziehung der Nutzpflanze Weizen in das Untersuchungsprogramm. Aus umweltrelevanten wie naturwissenschaftlichen Gründen hielt ich an einigen Standorten eine Einbeziehung ausgewählter weiterer chlororganischer Schadstoffe (DDT und Metabolite, HCH-Isomere, HCB) in das beantragte Meßprogramm für notwendig.

2 Geographischer und geologischer Rahmen

In dem etwa 3700 km² umfassenden Untersuchungsgebiet wurden an insgesamt 14 Standorten projektspezifische Arbeiten durchgeführt. Das Areal hat eine Ost-West-Ausdehnung von etwa 75 km und eine Nord-Süd-Erstreckung von ca. 50 km. Begrenzt wird es durch die Städte Hettstedt (W), Bad-Dürrenberg (S), Leipzig-Taucha (E) und Gräfenhainichen (N). Klimatologisch gehört der Untersuchungsbereich zum mitteldeutschen Trockengebiet, welches durch mittlere Jahresniederschlagswerte von 460-550 mm charakterisiert werden kann [17]. Durch die hohe reale Verdunstung von durchschnittlich 450-460 mm sowie den hohen Feldkapazitäten der Böden in diesen Gebieten ist dadurch kaum mit einer Grundwasserneubildung zu rechnen. Die Normalwerte der Jahresmitteltemperatur schwanken im Trockengebiet zwischen 8,1°C (Mansfeld) und 9,8°C (Bitterfeld) [18]. Die Hauptwindrichtungen sind WSW-ENE sowie untergeordnet NNW-SSE orientiert [1].

Das Untersuchungsgebiet wird im Osten durch den Harz und das südlich angrenzende Thüringer Becken begrenzt und ist zum Halle-Leipziger Plattenland zu zählen, welches am östlichen Harzrand aus mit Tertiär- und Quartärsedimenten bedeckten permokarbonischen Gesteinen aufgebaut ist. Der Nordostteil ist in noch stärkerem Maße durch quartäre Formungsprozesse geprägt worden, in die sich durch fluviatile Formung bereits vom Altpleistozän beginnend und bis ins Holozän reichend, die Flußsysteme der Saale, Mulde, Elster und Pleiße gebildet haben. Die spätquartär gebildeten äolischen Löss und Sande nehmen im Arbeitsgebiet flächenmäßig den größten Raum ein. An das Lößgebiet, dessen nördliche Grenze von Magdeburg, dem Elbtal folgend, über Köthen, Halle-Ost, der Saale folgend und nach Nordsachsen verläuft, schließen sich in östlicher Richtung der Sandlößgürtel und die Geschiebedecksande an. Auf ihnen haben sich in den letzten ca. 12 000 Jahren die heutigen Böden entwickelt [1,19,20].

2.1 Vorstellung der Untersuchungsgebiete

Innerhalb des Arbeitsgebietes befinden sich bedeutende Lagerstätten, in denen über viele Jahre hinweg u.a. Kupfer (Mansfelder Kupferschiefer), Salze (Zechsteinsalze) und Braunkohleflöze tertiären Alters gefördert wurden. Die Bedeutung dieser Braunkohle-Lagerstätten läßt sich am besten aus den bisher meist Übertage geförderten Mengen veranschaulichen. Ins-

gesamt umfaßt das mitteldeutsche Braunkohlerevier vier Kernzonen (Leipzig-Borna-Altenburg, Zeitz-Weißenfels-Hohenmölsen, Bitterfeld einschließlich Gräfenhainichen und Delitzsch sowie Halle-Merseburg), in denen Kohle gewonnen wurde. Die beiden zuletzt genannten Zonen liegen innerhalb des Untersuchungsgebietes. Seit 1837 wurden etwa 8 Mrd. t Braunkohle gefördert, wofür 20 Mrd. m³ Abraum bewegt werden mußten. Die Förderung der Kohle nahm eine Fläche von etwa 61 000 ha ein, 100 Ortschaften fielen der Überbaggerung zum Opfer [1,21].

Nach und nach ließen sich im mitteldeutschen Raum verschiedene Industriezweige nieder, wobei die chemische Industrie (seit 1893) in den folgenden Jahren den größten Stellenwert einnahm (z.B. Chemiekombinat Bitterfeld, Buna-Werke Schkopau, Leuna-Werke). Für die Energiegewinnung und als Rohstoffbasis wurde die in unmittelbarer Nachbarschaft geförderte Braunkohle eingesetzt.

Die Standorte innerhalb des Untersuchungsgebietes liegen in den drei industriellen Schwerpunktregionen des mitteldeutschen Raumes (*Bitterfeld-Wolfen*, *Halle-Schkopau*, *Merseburg-Leuna*) sowie nordöstlich von Bitterfeld im Raum *Zschornowitz-Gräfenhainichen* und orientierten sich an Orte ehemaliger Braunkohlegroßkraftwerke und der chemischen Industrie [22]. Als Vergleichsstandorte wurden zusätzlich zwei Meßpunkte am Rande des Mansfelder Bergbauggebietes bei *Eisleben* und *Hettstedt* in die Untersuchungen mit einbezogen.

Die in Klammern hinter den fünf Bereichen aufgeführten Lokalitäten entsprechen den 14 Probenahmestandorten im Untersuchungsgebiet. In den Karten, Abbildungen, Graphiken und Tabellen sind diese Probenahmeflächen generell mit den ersten drei Buchstaben abgekürzt angegeben.

Bitterfeld-Wolfen (Altjeßnitz, Burgkernitz)

Im Bitterfeld-Wolfener Raum existierten einige auf Braunkohlenbasis betriebene Großkraftwerke. Hier war bis vor wenigen Jahren auch das Zentrum der chemischen Industrie in der ehemaligen DDR. Im Chemiekombinat Bitterfeld wurden unter anderem zahlreiche chemische Grundstoffe, Schädlingsbekämpfungsmittel, Kunststoffe, zahlreiche Farbstoffe und -lösungen, Holzschutzmittel, Arzneimitteln und Waschmittelrohstoffe hergestellt. Die Stadt Wolfen war und ist auch noch heute Sitz der photochemischen Industrie (Filmfabrik Wolfen). Zusätzlich wurden/werden Schwermaschinen, Leichtmetallurgische Erzeugnisse, Plast- und Elasterzeugnisse produziert. Im Bereich von Raguhn, einige Kilometer nördlich gelegen, wurden Metallwaren hergestellt.

Bereich Halle-Schkopau (Schkopau, Döllnitz, Eitzdorf)

Die Buna-Werke Schkopau, in denen zahlreiche chemische Grundstoffe (anorganische und organische Chemikalien), Katalysatoren, Kunststoffe, Düngekalk, Reinigungs-, Imprägnier- und Lösungsmittel, Konservierungsmittel und chemisch-pharmazeutische Grundstoffe produziert wurden, liegen etwa 7 km südlich von Halle.

Merseburg-Leuna (Leuna, Spergau, Meuscha, Wüsteneutzsch, Günthersdorf)

Die Leuna-Werke, etwa 5 km südlich von Merseburg gelegen, gehören zu den größten Industriebetrieben in diesem Raum. Bis 1989 wurde hier in bis zu sieben Kraftwerken, zumeist auf Braunkohlebasis betrieben, Energie erzeugt. Hergestellt wurden und werden z.T. auch heute noch verschiedene chemische Grundstoffe, Kunststoffe, Lösungsmittel und Desinfektionsmittel. Zusätzlich gab es eine bedeutende Erdöl- und erdölverarbeitende Industrie sowie Braunkohlebrikettfabriken. In Merseburg war der Sitz der Schwermaschinenindustrie.

Zschornewitz-Gräfenhainichen (Gräfenhainichen, Zschornewitz)

Das Gebiet befindet sich etwa 30 km nordöstlich von Halle. Hier wurde in der Vergangenheit ein sehr großes Braunkohlegroßkraftwerk (Zschornewitz) zur Wärmeenergiegewinnung betrieben.

Bereich Hettstedt-Eisleben (Hettstedt, Eisleben)

Eine Ausnahme stellen die beiden Standorte Eisleben und Hettstedt am Rande des ehemaligen Mansfelder Kupferbergbaubereiches dar, die neben Emissionen aus der Braunkohlenverbrennung zusätzlich in den Einflußbereich ehemaliger Kupferverhüttungs- und Buntmetallrecyclingsanlagen sowie Schlacken- und Bergbauhalden fallen.

2.2 Lage der Probenahmestellen

Die Auswahl der Testflächen orientierte sich dabei nach Möglichkeit an ehemalige Braunkohlegroßkraftwerke, z.T. kombiniert mit Zentren der chemischen Industrie (Abb. 2-1, Tab. 2-1). Zusätzlich konnten in einigen Fällen auch boden- und nutzungsspezifische Gesichtspunkte mit einbezogen werden. Darüber hinaus wurden die Testflächen so angelegt, daß sie keinen weiteren Schadstoffquellen ausgesetzt waren (KfZ-Verkehr, unmittelbare Nähe einer Mülldeponie).

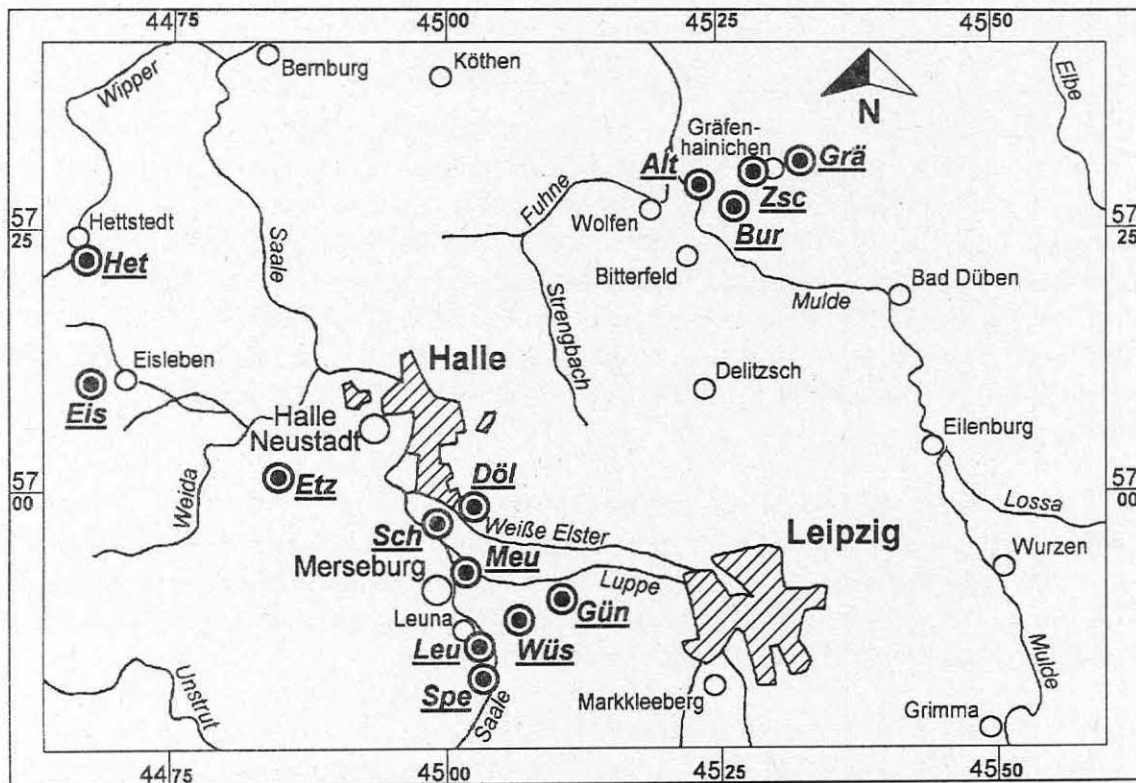


Abb. 2-1: Lage der Probenahmelokalitäten (Leuna, Spergau, Schkopau, Eitzdorf, Altjeßnitz, Günthersdorf, Gräfenhainichen, Zschornewitz, Eisleben, Hettstedt, Wüstenneuttsch, Döllnitz, Meuschau, Burgkennitz)

Die exakte Lokalitätenbeschreibung geht aus den im Anhang 2a-2n aufgelisteten Standortprotokollen hervor. In ihnen sind Angaben zur Bezeichnung, Lage, Größe und Umfeld der Probenahme-Fläche aufgeführt.

Tab. 2-1: Probenahmestandorte mit Angabe von R- und H-Werten (Gauß-Krüger-Koordinaten) sowie zugehörige Emittenten
 ● = emittentennah (1-2km) ○ = emittentenfern (3-5km, Günthersdorf 10 km)

Standort	Lage	R-Wert	H-Wert	Be	Emittent	E
Leuna	●	450170	568675	K	BK+Chem.Industrie (Leuna-Werke)	1,0
Spergau	●	450170	568365	K	BK+Chem.Industrie (Leuna-Werke)	2,0
Schkopau	●	449865	569670	K	BK+Chem.Industrie (Buna-Werke)	1,0
Etzdorf	○	448500	570055	K	BK+Kalisalzaufbereitung und -grube	2,5
Altjeßnitz	○	452260	572865	K	BK+Chem.Industrie (Wolfen, Bitterfeld)	4-6
Günthersdorf	○	451195	569005	K	BK+Chem.Industrie (Leuna-Werke)	10
Gräfenhainichen	○	453275	573325	K	BK	4,0
Zschornowitz	●	452890	573265	K	BK	1,5
Eisleben	○	267065	571228	B	BK+Cu-Verhüttung (Sangerhausen)	16
Hettstedt	●	267456	572386	B	BK+Metallverhüttung und -verarbeitung	1,0
Wüsteneutzsch	○	329602	569250	B	BK+Chem.Industrie (Leuna-Werke)	4,0
Döllnitz	○	329337	570292	B	BK+Chem.Industrie (Buna-Werke)	3,5
Meuschau	○	329328	569671	B	BK+Chem.Industrie (Buna-Werke)	5,0
Burgkernitz	○	331920	573072	B	BK/Chem.Industrie (Bitterfeld, Wolfen)	3/8

Be=Bezugsellipsoid, K=Krassowski, B=Bessel, E=Entfernung in km, BK=Braunkohlekraftwerke

2.3 Bodencharakteristik des Untersuchungsgebietes

Ein Großteil der untersuchten Meßstandorte befindet sich innerhalb der Schwarzerdezone oder in deren Randbereich, der sich nordöstlich des Harzes bis zur Elbe und östlich bis etwa Schkeuditz erstreckt. Hier überwiegen Löß-Schwarzerde bis Braunschwarzerdeböden. Desweiteren wurden Aueböden, Rosterden und Parabraunerden angetroffen. Die Schwarzerdeböden zeigen in einigen Punkten bereits Degradationserscheinungen. Hauptsächlich macht sich dies in einer Aufhellung des Ah-Horizontes und beginnenden Entkalkungserscheinungen bemerkbar. Die pH-Werte der untersuchten Böden liegen im schwach alkalischen und schwach bis mäßig sauren Bereich. In einzelnen Bodenhorizonten sind bereits stark saure Bedingungen vorhanden (Eisleben). Korngrößenbestimmungen einzelner Bodenprofile ergaben hohe Schluff- und Tonanteile an den Standorten Leu, Spe, Sch, Etz und Wüs, Döl, Mei, Bur. Der Humusgehalt der Oberböden liegt mit Ausnahme der Standorte Altjeßnitz und Zschornowitz in den Oberböden unter 5 Gew.% (siehe auch Abschnitt 5.2).

3 Untersuchungsprogramm

Gegenstand des Projektes waren Untersuchungen zur Belastungssituation durch Ermittlung relevanter anorganischer und organischer Schadstoffe in emittentennahen Agrarböden, deren Charakterisierung hinsichtlich Mobilität und Bioverfügbarkeit, die Bestimmung des Sorptionsverhaltens und der Bindungsformen dieser Stoffe sowie des sich daraus ergebenden ökotoxikologischen Risikos. Innerhalb des Vorhabens wurden dabei unter Einbeziehung der aufgeführten analytischen Methoden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Entnahme von Bodenproben zur Klärung unterschiedlicher Fragestellungen (Einzel- oder Schurfbeprobung, Flächen- oder Rasterbeprobung sowie an Weizenstandorten die zugehörigen Weizenböden);
- Bestimmung der Exposition von Schwermetallen, Nährelementen sowie organischen Schadstoffen;
- Durchführung verschiedener Bodenparameteruntersuchungen (pH-Wert, Humusgehalt, Korngrößenverteilung, Austauschkapazitäten, Wassergehalt u.a.);
- Messungen zur Magnetischen Suszeptibilität;
- Anwendung ausgewählter chemischer Methoden zur Charakterisierung der Bindungsformen und Mobilität von Schadstoffen im Boden an Hand von Batch-Experimenten mit verschiedenen Extraktionsverfahren;
- Abschätzung des pflanzenverfügbaren Anteiles unter Hinzuziehung verschiedener Pflanzenuntersuchungen (Weizen);
- Einsatz von uni- und multivariaten statistischen Verfahren;
- Anwendung thermodynamischer Mackay-Rechnungen [23];
- Auswertung, Interpretation und Gesamteinschätzung des standortspezifischen ökotoxikologischen Gefährdungspotentials.

Der Umfang unserer physikalisch-chemischen Arbeiten ist im Anhang aus der Tabelle A-1 ersichtlich.

4 Probenahme, Aufbereitung und Analytik

4.1 Methodische Vorgehensweise bei der Probenahme (Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Nach Klärung der Betretungsrechte im Frühjahr 1995 und 1996 erfolgte die Beprobung der ausgewählten Agrarböden in den Monaten Mai-Juli in den gleichen Jahren. Dabei wurde die genaue Lage der Testflächen nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewählt:

- Lage des Emittenten (Braunkohlegroßkraftwerk, Braunkohleverarbeitung, Chemische Industrie, Metallverarbeitende Industrie und Metallverhüttung)
- Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen
- Gewährung zur Durchführung der Probenahme durch die jeweiligen Besitzer und Pächter

Durch die bereits oben erwähnte Umstrukturierung an einigen Standorten war eine Untersuchung an den beantragten Lokalitäten nicht immer möglich.

Zunächst erfolgte an den ausgewählten Testflächen eine in gleichmäßigen Punktabständen angelegte Rasterbeprobung auf einer Fläche von durchschnittlich einem Hektar mittels eines Pürckhauer-Bohrstockes bis zu einer maximalen Tiefe von 70 cm (A_p -Horizont und tieferer Bereich) zur Charakterisierung der Flächenbelastung. Die Gesamtzahl des nach der Beprobung zu einer Mischprobe vereinigten und vorort bereits erstmals homogenisierten Bodens lag bei durchschnittlich 30 Einzeleinstichen. Zusätzlich wurde an jedem Standort eine Schurfgrube mit einer Gesamttiefe von etwa einem Meter angelegt, an dem entsprechend der Bodenkundlichen Kartieranleitung eine Horizontbeprobung und -beschreibung (Aufnahme wichtiger Bodenparameter) durchgeführt wurde [24-27]. Zur Dokumentation wurden die Profile sowie ihre Beschreibung in Text und Bild festgehalten (Anhang 2).

Im August der beiden Jahre konnte an mit Weizen bestellten Ackerböden eine Entnahme erntereifer Pflanzen erfolgen. Dabei wurden etwa 5-10 einzelne Weizenpflanzen nach Abschütteln des Bodens in Wurzel und oberirdische Pflanzenteile aufgetrennt. Die Beprobung des zugehörigen Wurzelbodens erfolgte in unmittelbarer Umgebung der Weizenpflanze in maximal 3-5 cm Abstand.

4.2 Transport und mechanische Aufbereitung des Probenmaterials (Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Etwa 1-2 kg des jeweiligen Bodens wurde zur Verhinderung von photochemisch bedingten Zersetzungsprozessen in braune Glasflaschen abgefüllt, der Weizen in Aluminiumfolie eingewickelt und für die weiteren Untersuchungen ins Labor transportiert. Das Pflanzenmaterial wurde für spätere analytische Arbeiten noch am gleichen Tag tiefgefroren. Am Bodenmaterial erfolgte nach Lufttrocknung und weiterer Vermischung des Probenmaterials eine Abtrennung der Korngrößenfraktion unter 2 mm und Auftrennung des Bodens in zwei Teile, wobei ein Teil für organische analytische Arbeiten in Duranglasflaschen eingefüllt und bei -80°C tiefgefroren, der andere Teil für anstehende bodenphysikalische und bodenchemische Untersuchungen ebenfalls in braune Duranglasflaschen abgefüllt und bei -18°C zwischengelagert wurde. Für die analytische Bestimmung der Schadstoffgehalte wurde der Boden in Zirkoniumoxidgefäßen in einer Planetenmühle des Typs Pulverisette 5 der Fa. Retsch analysenfein aufgemahlen.

Der Weizen wurde unmittelbar vor der analytischen Untersuchung in seine Einzelteile (Wurzel, Stengel, Blatt, Ähre) aufgetrennt, mit Pinsel und Bürste gereinigt, mittels einer Spezialmühle (MM 2000 der Fa. Retsch) aufgemahlen und der anorganischen und organischen Analytik zugeführt.

4.3 Bodenphysikalische Untersuchungen

Korngrößenbestimmung

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung wurde an allen Proben der 14 Standorte (Misch- bzw. Rasterbeprobung sowie in Einzel- bzw. Horizontbeprobung an den Schurfen) mit Ausnahme der Wurzelböden des Weizens entsprechend der Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau nach DIN 19683, B2 durchgeführt [28]. Eine Siebung entsprechend DIN 19683, B1 wurde nur an den Oberböden sowie an Material mit über 10 % Sandanteil angewandt [29]. Die Darstellung der Ergebnisse (Feinboden, Grobbodenskelett) erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung [25] (Standortprotokoll im Anhang 2).

Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes k

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

In der Regel wird die Durchlässigkeit von Lockergesteinen in Freilandexperimenten beispielsweise aus Pumpversuchen errechnet. Er läßt sich jedoch in erster Näherung auch aus der Korngrößenverteilung (Kornsummenkurve) über verschiedene mathematische Berechnungen ermitteln. Hier wurde die am häufigsten verwendete Ableitung von Hazen (1893), modifiziert nach Beyer (1963), zur Errechnung herangezogen. Streng genommen gilt die Methode nach Hazen nur für Sande mit einer Ungleichförmigkeitszahl $U=5$, Beyer jedoch wandelte die Formel für verschiedene Ungleichförmigkeitsgrade ab [30-33]. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß diese Werte mit erheblichen Fehlern belastet sein können, was auf

mögliche Fehlerquellen bei der Probenahme wie Unregelmäßigkeiten im Untergrund oder Fehler bei der Versuchsdurchführung zurückzuführen ist.

Wassergehalt

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Der Wassergehalt aller Böden erfolgte gemäß DIN 19683, B4 durch Einwaage von 10 g Boden und Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz [34].

Magnetische Suszeptibilität

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Zur Charakterisierung des langjährigen Einflusses der Braunkohlengroßkraftwerke auf das Umland konnten die magnetischen Suszeptibilitäten der Oberböden herangezogen werden. Flugaschen enthalten Eisenverbindungen, die infolge der hohen Verbrennungstemperaturen der Kohle (über 800°C) magnetische Eigenschaften angenommen haben. Die Methode basiert auf der Messung von ferromagnetischen Bestandteilen, die mit den Aschen der Kraftwerke in die Böden gelangen. Sie wird schon seit einigen Jahren erfolgreich zur Erfassung und Kartierung von Flugascheeinträgen in Waldökosysteme angewandt [35-39]. Eingeschränkt läßt sie sich auch auf landwirtschaftlich genutzte Standorte übertragen, obwohl hierbei durch regelmäßige Bodenbearbeitungsmaßnahmen und pedogenetische Prozesse, verbunden mit fehlenden Neueinträgen, die Ergebnisse deutlich geringer ausfallen.

Bestimmt wurde die Größe mit Hilfe des Ferromagnetischen Analysators (FMA 5000) der Firma Forgenta. Das Meßprinzip beruht darauf, daß die Induktivität einer Spule unter anderem auch von den magnetischen Stoffeigenschaften des Spulenkerne abhängt. Ist die Spule Bestandteil einer elektronischen Oszillatorschaltung, bewirkt das Einbringen einer ferromagnetischen Probe in die Spule eine Frequenzänderung des Oszillators. Diese von einem digitalen Frequenzgerät erfaßte Änderung ist direkt proportional der Konzentration ferromagnetischer Partikel in der Probe und kann somit als Meßgröße dienen.

Die Bestimmung des Wertes wurde an allen Bodenproben (Misch- und Einzelproben) mehrmals durchgeführt und der arithmetische Mittelwert als Ergebnis im Meßprotokoll (siehe Anhang 2) festgehalten.

4.4 Bestimmung relevanter bodenchemischer Parameter

Bestimmung des Boden-pH-Wertes

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Der pH-Wert wurde an der gesiebten und luftgetrockneten Fraktion unter 2 mm nach DIN-Norm 19684, T1 ermittelt. Dabei wird 10 g eines Bodens in 25 ml einer 0,01 M CaCl_2 -Lösung aufgeschlämmt und nach etwa einer Stunde mit einer AgCl-Elektrode der pH-Wert mit dem WTW Microprocessor pH Meter (pH 537) bestimmt [40].

Glühverlust

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Die Bestimmung des Glühverlustes erfolgte nach DIN 19684, T3 durch Einwaage von 10 g luftgetrockneten Bodens in eine Porzellanschale und anschließender Veraschung im Muffelofen bei 550°C [41].

Humusgehalt, C_{org} , C_{anorg}

(Dr. habil. Schulz, Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Der Humusgehalt wurde im Anschluß an die Ermittlung des organischen Kohlenstoffgehalts durch Umrechnung mit dem Faktor 1,72 bestimmt [42]. Dabei wird die Bodenprobe im Sauerstoffstrom verbrannt und das gebildete CO_2 bestimmt. Die Messung wurde an einer Ströhleinapparatur auf der Basis der Infrarotgasanalyse durchgeführt. Nach der Messung des Gesamtkohlenstoffgehaltes erfolgte die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes, indem zuvor der Karbonat-Kohlenstoff durch Zugabe einer Säure aus dem Boden ausgetrieben wurde. Die Bodenproben wurden z.T. mehrmals gemessen, wobei in den Ergebnissen im Anhang der arithmetische Mittelwert angegeben wurde.

Gesamtstickstoff N_{ges}

(PD Dr. Jung, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Der Gesamtstickstoffgehalt des Bodens nach Kjeldahl erfaßt den im Boden als Ammonium vorliegenden Stickstoff sowie den organisch gebundenen Stickstoff des Bodens. Letzterer wird durch Reaktion mit heißer konzentrierter Schwefelsäure in Ammonium überführt. Die Bestimmung erfolgt durch alkalische Destillation und Titration. Da es sich bei den untersuchten Böden um Überböden handelt, in denen der Anteil des organischen Stickstoffs am Gesamtstickstoff über 90 % beträgt, wurde auf eine zusätzliche Bestimmung des Nitrats verzichtet.

Potentielle Kationenaustauschkapazität (CEC)

(Dr. Manz, Dr. Weißflog, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

(Dr. Wennrich, UFZ-Sektion Analytik)

Die potentielle Kationenaustauschkapazität (CEC) wird hauptsächlich durch die Art und den Gehalt an Tonmineralen und Huminstoffen geprägt. Für sämtliche Misch- und Einzelbodenproben (ohne Weizenböden) wurde nach DIN 19684, T8 verfahren und die gewonnenen Perkolationslösungen nach Matrixkalibrierung mit der ICP-AES vom Typ JY24 (Fa. Instruments S.A.) bzw. der Optima 3000 (Fa. Perkin Elmer) auf die Kationen Ca, Mg, Na, K, Al und Ba hin analysiert [43]. In einigen Fällen kam bei sehr hohen Elementkonzentrationen die Flammen-AAS (Na) PE 4100 der Fa. Perkin-Elmer zum Einsatz. Mit diesem Verfahren werden im Boden sorbierte Kationen gegen Bariumionen eingetauscht, die dann später mittels $MgCl_2$ rückgetauscht werden können. Im Laufe dieser Untersuchungen wurde allerdings $CaCl_2$ für den Rücktausch verwendet, da dies bei humusreichen Böden zu besseren Ergebnissen führen soll [44]. Die Ergebnisse sind in Anhang A-8 aufgeführt.

Elektrische Leitfähigkeit von Bodensättigungsextrakten

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Der Salzgehalt des Bodens wird häufig durch die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Bodenlösung charakterisiert [42]. Ermitteln läßt sich die Leitfähigkeit durch Gewinnung eines Bodensättigungsextraktes und anschließender Messung mit einem Leitfähigkeitsmeßgerät (WTW Microprocessor Conductivity Meter LF 196) gemäß DIN 19684, T11 [45].

4.5 Analytische Verfahren für anorganische Substanzen

Durch den großen Umfang der Bodenuntersuchungen innerhalb dieses Vorhabens und dem vielseitigen Einsatz verschiedenster analytischer und chemischer Methoden werden die einzelnen Methoden im folgenden kurz vorgestellt.

4.5.1 Gesamtgehalte im Boden

(Dr. Morgenstern, UFZ-Sektion Analytik)

(Dr. Manz, Dr. Weißflog, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Um einen Überblick über die Gesamtgehalte an Schwermetallen und verschiedenen Hauptelementen zu erhalten, wurden an den entnommenen Bodenproben (Raster- und Schurfproben) Messungen mit der wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse (WDXRF des Typs SRS 3000, Firma Siemens) durchgeführt. Für die quantitative Auswertung der Röntgenspektren wurde die Gerätesoftware „Spectra 3000“ benutzt. Zur Kontrolle und Absicherung der Meßergebnisse wurden internationale Boden-, Sediment- und Gesteinsstandards mitgemessen. Da jedoch einige der ebenfalls ermittelten Elementgehalte bei der hier angewandten Meßmethodik unter der Nachweisgrenze lagen (Br, Cd, Sb und Hg), sind diese Ergebnisse im Anhang nicht mit aufgeführt worden. Bestimmt wurden unter anderem die Hauptelemente CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, TiO₂, P₂O₅ und S sowie die Spurenelemente V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Ba, Rb, Sr, Zr und Pb. Eine Auswahl der Ergebnisse sind im Anhang A-3a aufgelistet.

Die Gesamtgehalte an Schwermetallen in den Böden der Weizenstandorte (Wurzelboden) wurden mit einem offenen Aufschluß in Teflongefäßen unter Verwendung von HF, HNO₃ und HClO₄ nach Heinrichs & Herrmann (1986) durchgeführt. Die Bestimmung der Elementgehalte in der Aufschlußlösung erfolgte mittels der ICP-AES vom Typ JY24 (Fa. Instruments S.A.). Nachweisgrenzen und Konzentrationen sind im Anhang A-3b aufgeführt [46].

4.5.2 Maximal lösliche Metallanteile (S7-Test nach DIN 38414)

(Dr. Manz, Dr. Weißflog, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

(Dr. Wennrich, UFZ-Sektion Analytik)

Der Aufschluß wird in der Analytik zur Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen eingesetzt. Zum Einsatz kam eine Aufschlußapparatur der Fa. Behr (Behrotest SMA 12 mit der Steuereinheit TRS 200). Hierbei wird 3 g analysenfein aufgemahlenes und bei 105°C getrocknetes Probengut eingewogen, mit 21 ml HCl und 7 ml HNO₃ versetzt und zwei Stunden unter Rückfluß am Sieden gehalten. Anschließend wird über einen Membranfilter der Maschenweite 0,45 µm filtriert und das Filtrat zur Analyse mit bidest. Wasser auf 50 ml aufgefüllt [47]. Die Elementgehalte der Lösungen wurden im Anschluß daran mittels der ICP-AES vom Typ JY24 (Fa. Instruments S.A.) bzw. der Optima 3000 (Fa. Perkin Elmer) ermittelt. Es wurden Kalibrierungen auf der Basis von salpetersauren Multielementlösungen der Fa. Merck durchgeführt. Alle Bodenproben (80 Einzelbestimmungen) wurden dieser Methode unterzogen. Die Bestimmung ausgewählter Proben auf Hg erfolgte mittels Hydrid-Kaltdampf-AAS (FIMS, Fa. Perkin-Elmer). B wurde an der ICP-AES (Spectroflame M/P der Fa. Spectro A.I., Kleve) auf der Linie 249,67 nm gemessen. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden einige Proben wiederholt extrahiert und gemessen. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang A-5a-c aufgelistet.

4.5.3 Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung (DIN 19730)

(Dr. Manz, Dr. Weißflog, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Im Boden liegen Schwermetalle in unterschiedlichen Bindungsformen vor, die die Mobilität und Verfügbarkeit dieser Elemente bestimmen. Sie können fest gebunden (eingebunden im Gitter silikatischer Minerale oder in Form gefällter definierter schwerlöslicher Verbindungen),

gelöst (ionar in der Bodenlösung oder als ungeladene anorganische und organische Komplexe) sowie sorbiert (an der Oberfläche von Bodenkomponenten) vorliegen. Letztlich entscheidend sind jedoch die ökotoxikologisch relevanten, *verfügbaren* Anteile an diesen Schadstoffen im Bodensystem, deren Konzentrationen von den verschiedensten Faktoren (Bodenazidität, Art und Menge an organischer Substanz, Tonmineralen und Fe-, Mn-, Al-oxiden und -hydroxiden, Redoxpotential, Konzentration anwesender Salze und Komplexbildner, den Gesamtgehalten an Kationen und Anionen in der Bodenlösung u.v.m.) abhängig sind.

Um pflanzenverfügbare, austauschbare Schwermetall- und Arsenmengen im Boden feststellen zu können, wurden in den letzten Jahren verschiedene Extraktionsverfahren zu deren Abschätzung entwickelt [48]. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich dabei stark in der Wahl der Extraktionsmittel. Zur Bestimmung der leicht löslichen sowie schwach gebundenen, austauschbaren Schwermetalle kamen Neutralsalzlösungen, Komplexbildner oder verdünnte Säuren zum Einsatz [49-53]. Zur Charakterisierung des mobilen und pflanzenverfügbaren Anteiles von Schwermetallen haben sich am ehesten Neutralsalzlösungen geeignet, wobei häufig die Extraktion mit Ammoniumnitrat der Vorzug gegeben wird [54-56].

Bei diesem Verfahren werden 20 g luftgetrockneten Bodens mit 50 ml 1 M Ammoniumnitratlösung extrahiert. Die Extraktion erfolgte zwei Stunden in einer Überkopfschüttelapparatur vom Typ 214/6-Kz PM1 (Fa. Guwina-Hofmann GmbH) [57]. Angewandt wurde diese Methode auf die Böden der Weizenstandorte, um evtl. Aussagen zum Boden-Pflanze-Transfer geben zu können. Die Elementgehalte wurden mit der ICP-AES vom Typ JY24 (Fa. Instruments S.A.) gemessen.

4.5.4 Sequentielle Extraktion von Schwermetallen

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

(Dr. Wennrich, UFZ-Sektion Analytik)

Seit einigen Jahren werden zur Bestimmung von Schwermetallbindungsanteilen in Böden sequentielle Extraktionsverfahren eingesetzt [58-61]. Sie unterscheiden sich durch ihre Anwendung unterschiedlicher Reagenzien, in der Wahl der Elutionszeiten oder im Feststoff/Lösungsverhältnis. Daher sind die Ergebnisse häufig nur schwer miteinander zu vergleichen. Im Prinzip werden dabei die Bodenproben stufenweise in einer Sequenz von immer aggressiver werdenden Extraktionslösungen ausgelaugt [62]. Zunächst erhält man die leicht verfügbaren, dann die adsorbierten und zuletzt die fester gebundenen Metallanteile. Es gibt jedoch auch viele Aspekte, die man bei der Anwendung dieser Verfahren bedenken sollte. Die angewandten Extraktionsmittel arbeiten nicht unbedingt selektiv, d.h. sie reagieren nicht nur mit einer bestimmten Festphase im Boden. Die Extraktionsmenge einer Substanz ist auch abhängig von der Versuchsdauer, d.h. der Reaktionszeit, der Partikelgröße, dem Feststoff/Lösungsverhältnis, der Temperatur sowie vom eingesetzten Probenotyp.

Die in diesem Projekt eingesetzte Methode nach Zeien & Brümmer [61] arbeitet mit einem Feststoff/Lösungsverhältnis von 1 : 25 und sieben einzelnen Extraktionsschritten und kann auf Böden mit einem CaCO_3 -Gehalt von unter 5 % angewandt werden. In diesem Fall wurde jedoch auf den 7. Schritt (Aufschluß mit konz. HClO_4 und konz. HNO_3 bzw. mit konz. HF und konz. HClO_4) verzichtet. Die Residualfraktion entspricht den WDXRF-Meßergebnissen (Gesamtgehalte) abzüglich der Ergebnisse aus den Extraktionsschritten I-VI (siehe Tab 4-1). Die Lösungen aus den einzelnen Extraktionsschritten wurden mit unterschiedlichen analytischen Verfahren bestimmt. Zum einen kamen die ICP-AES Geräte Optima 3000 (Fa. Perkin Elmer) sowie Spectroflame M/P (Fa. Spectro A.I. Kleve) zum Einsatz. Zur Analyse dieser Extrakte erfolgte eine Kalibrierung gegen dotierte Extraktionsmittellösungen. In stark matrix-

belasteten Proben wurde mit Standardadditionstechnik gearbeitet. Die Nachweisgrenzen wurden durch 30-malige Messung der belasteten Blank-Lösungen errechnet. Im Anhang A-7 sind die prozentualen Anteile am Gesamtgehalt aufgelistet.

Tab. 4-1: Sequentielle Extraktionsreihe in Anlehnung an Zeien & Brümmer (1989) [61]

Schritt	Extraktionsmittel	Bezeichnung und Bindungsform
I	1 M NH_4NO_3	mobile Fraktion: Wasserlösliche und austauschbare (=unspezifisch adsorbierte) Schwermetalle sowie leicht lösliche metallorganische Komplexe
II	1 M NH_4 -Acetat	leicht nachlieferbare Fraktion: Spezifisch adsorbierte, oberflächennah okkludierte und an CaCO_3 gebundene Formen, sowie metallorganische Komplexe geringer Bindungsstärke
III	0,1 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ + 1 M NH_4 -Acetat	an Mn-Oxide gebundene Fraktion
IV	0,025 M NH_4 -EDTA	organisch gebundene Fraktion
V	0,2 M NH_4 -Oxalat	an schlecht kristalline Fe-Oxide gebundene Fraktion
VI	0,1 M Ascorbinsäure in 0,2 M Oxalatpuffer	an kristalline Fe-Oxide gebundene Fraktion
VII	WDXRF - Extr. I-VI	Restsubstanz

Bei der Anwendung der sequentiellen Extraktion müssen aus oben genannten Gründen (Selektivität, Vergleichbarkeit der Methode, analytische Schwierigkeiten durch hohen Matrixeffekt) die Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden, denn sie stellen nur *eine* Möglichkeit dar, Schwermetallgesamtgehalte in Böden besser differenzieren und mobile, pflanzenverfügbare Anteile besser abschätzen zu können.

4.5.5 Metallgehalte in der Pflanze

(Dr. Manz, Dr. Weißflog, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Die zuvor aufgemahlenen Pflanzenteile (siehe Abschnitt 4.2) wurden mittels des Mikrowellendruckaufschlußsystems CEM in Lösung gebracht. Als Aufschlußgefäße dienten Gefäße, in die 500 mg gemahlenes Pflanzenmaterial eingewogen wurde. Nach dem Aufschluß (5 ml konz. HNO_3 , 0,5 ml H_2O_2) wurden die Lösungen in 25 ml Meßkolben überführt und mit einprozentiger HNO_3 aufgefüllt. Für die Lagerung bis zur analytischen Bestimmung sind die Meßlösungen in Nalgenfläschchen aufbewahrt worden. Analysiert wurden die Aufschlüsse mit einer ICP-AES des Typs JY24 (Fa. Instruments S.A.), einer ICP-MS für die Elemente V, Cr und Ni und einer Graphitrohrföfen-AAS für die Elemente Cu, Cd und Pb. Die Absicherung der Ergebnisse erfolgte durch Aufschluß und Messung eines Kiefernadel-Standards (NBS 1575).

4.6 Analytische Verfahren zur Ermittlung organischer Xenobiotika in Böden

Das Spektrum der organischen Analytik innerhalb dieses Vorhabens umfaßte die Ermittlung polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAKs) entsprechend der EPA-Vorschrift 610 [63], Chlorphenole, Polychlorierte Biphenyle (PCBs) sowie Dioxine und Furane (PCDD und PCDF). Aus wissenschaftlichen Gründen wurden zusätzlich die Oberböden einiger Standorte auf DDT sowie Metabolite, HCH-Isomere und HCB untersucht.

4.6.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs)

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

(Dr. Popp, UFZ-Sektion Analytik)

Für die Bestimmung dieser Schadstoffgruppe aus Böden existieren zahlreiche Verfahren, die sich in der Wahl der Extraktionsmittel (z.B. Toluol, Methanol, Acetonitril) und Extraktionsart (z.B. Soxhlet, Ultraschall, SFE) aber auch in der analytischen Meßmethode (HPLC, GC) unterscheiden. Die innerhalb dieses Projektes an der Sektion Chemische Ökotoxikologie im Labor Bodenchemie angewandte Methode soll kurz näher vorgestellt werden.

Etwa 10 g luftgetrockneten Bodens werden 24 Stunden mit 150 ml Toluol in einer Soxhlet-Apparatur (Typ DET 5, Fa. Behr) extrahiert. 5 ml des Extraktes werden bis zur Trockne an einem Rotationsverdampfer (Typ 461 und B-480, Fa. Büchi) eingeeengt, mit 1 ml Acetonitril aufgenommen und zur Bestimmung der PAH-Konzentration mit der HPLC-Methode nach EPA 610 verwendet [63,64]. Von den 16 PAKs nach EPA 610 konnten in den Böden außer Acenaphtylen alle quantitativ bestimmt werden.

Meßbedingungen:	HPLC-Meßplatz (Fa. Kontron)
Software:	DAD MT 2
Säule:	Li Chr. CART 250-4 (Fa. Merck)
Mobile Phase:	Acetonitril-Wasser-Gradient (0 min 50 % Acetonitril, 26 min 90 % Acetonitril)
Flußrate:	1 ml/min
Detektion:	Fluoreszenzdetektor Typ Linear LC 304 (Fa. Spectra-Physics); programmiertes Wellenlängenprogramm
Injektionsvolumen:	20 µl
Säulentemperatur:	25°C

Die Böden der ersten acht Standorte wurden in der Sektion Analytik auf die PAKs hin untersucht. Die Probenaufbereitung entnehme man der obigen Beschreibung dieses Abschnittes, die analytische Bestimmung erfolgte unter geringfügig veränderten Bedingungen:

Meßbedingungen:	System Gold (Fa. Beckmann)
Säule:	Baker-Bond PAH 16-plus (250 x 3 mm)
Mobile Phase:	Gradientenelution Wasser-Acetonitril (0-5 min 50 % Acetonitril-isokratisch, 5-35 min 50-100 % Acetonitril-linear, 35-45 min 100 % Acetonitril-isokratisch)
Flußrate:	0,5 ml/min
Detektion:	Fluoreszenzdetektor Typ RF 551 (Fa. Shimadzu); Fluoreszenz-Wellenlängenprogramm
Säulentemperatur:	25°C
Druck:	85 bar

Sämtliche Ergebnisse sind im Anhang A-9 aufgeführt. Die Nachweisgrenzen lagen je nach Substanz zwischen 0,2 und 25 µg/kg bezogen auf das Trockengewicht.

4.6.2 Polychlorierte Biphenyle (PCBs)

(Dr. Manz, Dr. Wenzel, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

(Dr. Popp, UFZ-Sektion Analytik)

An ausgewählten Bodenproben (alle Oberböden der Rasterbeprobung, ausgewählte Einzelproben aus Schurfen) erfolgte eine Bestimmung der PCB-Einzelkomponenten nach der Ballschmieder-Nomenklatur [65] in der Sektion Analytik mittels der GC-MSD. Die Probenvorbereitung (Extraktion, Einengen) entnehmen man Abschnitt 4.6.1. Die folgenden Analysebedingungen herrschten vor:

Trennsäule:	CP-SIL 5CB
Temperaturprogramm:	80°C (8 min) ⇒ 6°C/min ⇒ 250°C (8,67 min)
Injektortemperatur:	250°C
MSD-transfer-line:	280°C
Betriebsart MSD:	Single Ion Mode (SIM)

Die Nachweisgrenzen für PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153 und PCB 180 lagen bei 0,1 µg/kg.

Die Böden der Weizenstandorte wurden in der Sektion Chemische Ökotoxikologie nach einem anderen routinemäßig auch für die Substanzen HCH, DDT und HCB betriebenen Verfahren bestimmt:

Extraktion und Einengung entnehmen man ebenfalls Abschnitt 4.6.1. Der Rückstand wird mit 20 ml Methylenchlorid / n-Hexan im Verhältnis 1 : 1 aufgenommen, über eine mit Florisil (60-100 mesh) gefüllte Säule gegeben und mit 130 ml des gleichen Lösungsmittelgemisches nachgewaschen. Das Eluat wird anschließend am Rotationsverdampfer bis zur Trockne eingengt, mit Diethylether vorsichtig in das Probenvial (2 ml) überführt. Der Diethylether wird im Stickstoffstrom ausgetrieben. Danach wird der Rückstand mit 100 µl Toluol aufgenommen und an der GC-MSD (HP 5890 - GC und HP 5971 - MSD) auf die Inhaltsstoffe analysiert. Die folgenden Analysebedingungen existierten:

Säulentyp:	Kapillarsäule HP Ultra 2
Temperaturprogramm:	60°C (1 min isotherm) ⇒ 30°C/min bis 150°C ⇒ 6°C/min bis 186°C ⇒ 4°C/min bis 280°C ⇒ 6 min isotherm
Trärgas:	Helium, Fluß 1 ml/min
Betriebsart MSD:	Single Ion Mode (SIM)

Ermittelt wurden auch hier von den Polychlorbiphenylen PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153 sowie PCB 180. Die Nachweisgrenzen liegen bei 0,1 µg/kg.

4.6.3 Phenole

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

(Dr. Möder, Dr. Popp, UFZ-Sektion Analytik)

Die Chlorphenole in ausgewählten Oberböden der Rasterbeprobung wurden im Rahmen der Phenolbestimmung nach EPA 604 erfaßt [66].

Eine Extraktion erfolgte über 24 Stunden an der Soxhlet-Apparatur (Typ DET 5, Fa. Behr) mit 300 ml Toluol als Extraktionsmittel und 50 g Bodeneinwage. Nach dem Einengen der Extraktionslösungen wurden die Eluate auf ihre Phenolgehalte mit dem Meßgerät (HP-MSD) bestimmt. Folgende Meßbedingungen existierten:

Kapillare:	HP5 30 m x 0,25 mm I.D., 0,25 µm Filmdicke
Vordruck:	10 psi
Temperaturprogramm:	50°C (3 min) ⇒ 5K/min ⇒ 250°C (10 min)
Injektor Temperatur:	280°C
transfer line:	250°C
Elektronenstoßionisation:	70 eV
SIM Analyse, full scan	
IQ-Temperatur:	200°C

4.6.4 Dioxine und Furane

(Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

(Dr. Möder, Dr. Popp, UFZ-Sektion Analytik)

An vier Standorten wurde in den Oberböden der Mischproben PCDD/DF bestimmt. Extrahiert mit 300 ml Toluol wurden 50 g luftgetrockneter Boden über 24 Stunden in der Soxhlet-Apparatur (Typ DET 5, Fa. Behr). Nach Zugabe eines internen Standards und Einengen der Toluolextrakte auf 1 ml erfolgte zunächst das Erhitzen mit saurem Kieselgel und dann die clean-up Prozedur durch säulenchromatographische Reinigung an Aktivkohle und anschließend an einer gemischten Chromatographiesäule [67]. Die Proben wurden danach auf ein Endvolumen von 5 µl eingengt, mit einem halbseitig C¹³-markierten internen Wiederfindungsstandard versetzt und untersucht. Folgende Meßbedingungen existierten:

Gerätetyp:	GC-MS am Finnigan MAT 95
Kapillare:	DB-XLB 60 m x 0,25 mm I.D., 0,25 µm Filmdicke
Vordruck:	25 psi Helium
Temperaturprogramm:	90°C (3 min) ⇒ 20K/min ⇒ 200°C (15 min) ⇒ 4K/min ⇒ 250°C (6 min) ⇒ 2K/min ⇒ 280°C
Injektor Temperatur:	290°C
transfer line:	280°C
Elektronenstoßionisation:	70 eV
MID Analyse	
IQ-Temperatur:	260°C
Auflösung:	10000

Die Ergebnisse wurden im Anhang als Konzentrationen und zusätzlich in internationalen Toxizitätsequivalenzen angegeben, um die Toxizität der Bodenprobe besser einschätzen zu können.

4.6.5 Ausgewählte zusätzliche Chlororganika (HCHs, PCBs, DDTs, HCB)

(Dr. Manz, Dr. Wenzel, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Für die Bestimmung dieser Substanzen in den acht Weizenböden und 11 Oberböden der Rasterbeprobungen wurden 10 g Boden mit 150 ml Toluol im Soxhlet extrahiert. Das weitere

Aufbereitungsverfahren sowie die analytische Bestimmung entnehme man Abschnitt 4.6.2. Die Nachweisgrenzen für die HCH-Isomere (α , β , γ und δ) liegen zwischen 0,1 $\mu\text{g/kg}$ und 0,3 $\mu\text{g/kg}$, für DDT, DDD und DDE zwischen 0,07 $\mu\text{g/kg}$ und 0,2 $\mu\text{g/kg}$, für die PCBs bei 0,04-0,15 $\mu\text{g/kg}$ und für HCB bei 0,05 $\mu\text{g/kg}$. Die Ergebnisse der acht untersuchten Böden sind im Anhang A-12 aufgelistet.

4.6.6 Adsorption ausgewählter Organika im Boden (OECDs 106 und 117)

(Dr. Manz, Dr. Paschke, Dr. Wenzel, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Die Adsorption von organischen Chemikalien an Böden wird durch den Adsorptionskoeffizienten K beschrieben, der durch das Verhältnis zwischen der Konzentration der adsorbierten Chemikalie in der festen Phase und der Konzentration in wässriger Lösung im Gleichgewichtszustand charakterisiert wird. Sie kann durch zweierlei Gleichungen (Langmuirsche und Freundlichsche Adsorptionsgleichung) beschrieben werden. Durch Berücksichtigung des organischen Kohlenstoffgehaltes kann der Adsorptionskoeffizient K_{OC} errechnet werden. Da für viele organische Chemikalien keine Adsorptionskoeffizienten existieren, versucht man diese durch bekannte Korrelationen von Adsorptionskoeffizienten mit den n-Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten der Chemikalien zu errechnen [68].

Innerhalb dieses Vorhabens wurde an zahlreichen Xenobiotika die OECD-Richtlinie 117 [69], an drei Substanzen (jeweils ein Vertreter einer organischen Schadstoffgruppe) die OECD-Richtlinie 106 angewandt [70]. Die indirekten K_{OW} -Messungen nach der OECD-Richtlinie 117 wurden mit einer HPLC-Pumpe L-7100 und einem Diodenarray-Detektor L-4500 (Fa. Merck-Hitachi) unter Verwendung einer HPLC-Säule LiChroCART 75-4 mit LiChrosphere 100 RP-18 (5 μm) und einer Vorsäule LiChroCART 4-4 (mit gleichem Material gefüllt) durchgeführt. Es wurde mit einem Eluenten aus 80 Vol. % Methanol und 20 Vol. % Wasser bei einem Fluß von 1 mL/min (Säulenvordruck = 51 bar) und einer Temperatur von 25 °C gearbeitet. Detektiert wurde über einen Wellenlängenbereich von 190 bis 285 nm. Die Bestimmung der Retentionszeiten erfolgte substanzspezifisch beim Absorptionsmaximum. Als Referenzsubstanzen dienten Verbindungen mit gesicherten K_{OW} -Werten (bewertete Literaturdaten aus Leo (1996) oder neue Meßwerte aus dem eigenen Hause mit einer unabhängigen Methode nach Pasche et al. (1997) [71,72]. Zur Totzeitbestimmung wurde Formamid benutzt, das Einspritzvolumen lag bei 20 μl .

Für die sehr zeitintensiven Bestimmungen des Adsorption-Desorptionsverhaltens an drei charakteristischen Böden des Untersuchungsgebietes nach OECD 106 [69] wurden die Substanzen (γ -HCH, Phenanthren, PCB 28) ausgewählt. Schwierigkeiten brachten vor allem die geringen Löslichkeiten der gewählten Substanzen. Durch eine im Rahmen dieser Versuche gekoppelte neue methodische Entwicklung der chemischen Aufbereitung und analytischen Bestimmung dieser Substanzen mit dem GC-MSD, des damit verbundenen hohen Zeitbedarfes sowie der hohen Kosten konnten nur diese drei Substanzen untersucht werden. Die aus den Versuchen erhaltenen Extraktionslösungen wurden zunächst mit der gleichen Menge eines 4 : 1 Gemisches Methylenchlorid-Hexan im Scheidetrichter vermischt. Nach Abtrennung des Methylenchlorid-Hexan-Gemisches und Einengens am Rotationsverdampfer wurden die Spitzkölbchen 3 mal mit Diethylether gespült, in Mikrovials überführt, der Diethylether unter Stickstoffstrom eingengt und mit 100 μl Toluol aufgenommen. Die Messung erfolgte mit dem GC-MSD (HP 5890 - GC und HP 5971 - MSD) unter den gleichen Bedingungen wie in Abschnitt 4.6.2, Teil 2 beschrieben.

4.6.7 Organische Xenobiotika in der Pflanze

(Dr. Manz, Dr. Wenzel, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

An 8 der 14 untersuchten Standorte konnten in den Jahren 1995/1996 in der Erntezeit Weizenpflanzen (*Triticum aestivum* L.) entnommen und auf die Schadstoffe DDT und Metabolite, HCH-Isomere, einzelne PAK-Vertreter, PCBs sowie HCB untersucht werden. Im Anschluß an die mechanische Aufbereitung (Trennung in Wurzel, Stengel, Blatt und Ähre) begann die chemische Aufbereitung des Materiales für die analytische Bestimmung mit der GC-MSD.

Eingesetzt wurde dabei das SFE-Extraktionsverfahren (Super Fluid Extraction), welches erst seit einigen Jahren im Einsatz ist [73-75]. Die Extraktion des Probengutes wird dabei mit überkritischem Kohlendioxid bei höheren Temperaturen und Drücken durchgeführt. Durch Zusatz von bis zu 10 % eines Modifiers (z.B. Methanol) kann die Polarität des Extraktionsmittels erhöht werden. Die mit dem CO₂-Strom ausgetriebenen Schadstoffanteile werden in einer Vorlage in ein Lösungsmittel eingeleitet, wobei sich ein Gemisch aus Dichlormethan und n-Hexan (Verhältnis 2 : 1) am besten eignete. Für die Extraktion mit der SFE-Apparatur wurden 10 g frisches, aufgemahlenes Pflanzenmaterial unter Zugabe der internen Standardlösung (je 5 ng Hexachlorbiphenyl, PAK- und Chlorbenzol-Mix) in eine Kartusche gefüllt. Zusätzlich erfolgte eine Zugabe von Seesand, um das Totvolumen so gering wie möglich zu halten. Die Extraktion lief unter den folgenden Bedingungen ab:

Gerätespezifikation:	SFX 2-10
Matrix:	jeweilige Weizenfraktion
Probeneinwage:	5 g Trockengewicht
Kartuschengröße:	10 ml
Vorlage:	Dichlormethan / n-Hexan (2 : 1)
Druck- und Temperaturparameter:	1.Stufe 4300 psi bei 80°C (10 min) statische Extraktion 2.Stufe 4300 psi bei 80°C (35 min) dynam. Extraktion 3.Stufe 5800 psi bei 120°C (35 min) dynam. Extraktion

Die Extraktion wurde stufenweise durchgeführt, um zunächst die leichtflüchtigen Chlororganika zu erfassen (statische Extraktion). Bei der sich anschließenden dynamischen Extraktion erhöht man kontinuierlich Druck und Temperatur zur Erfassung der schwerer flüchtigen Chlororganika sowie PAKs.

Das Extrakt wurde im Anschluß daran den clean-up Schritten unterzogen [7,11]. Dabei wurde der Extrakt im Rotationsverdampfer auf 2 ml eingengt und nacheinander über 2 Florisil-Säulen gegeben:

Säule 1:	17 cm Länge, 1 cm Innendurchmesser mit deaktiviertem Florisil, Wassergehalte 4 %
Säule 2:	15 cm Länge, 0,5 cm Innendurchmesser mit vollaktiviertem Florisil

Im Anschluß daran werden die Kolben 5 mal mit je 10 ml n-Hexan gespült und die Lösungen auf die Säule 1 aufgetragen. Dann erfolgt eine Elution mit 100 ml n-Hexan/Dichlormethan (4 : 1). Die ersten 60 ml vom Eluat werden auf die 2.Säule gegeben (doppelte Reinigung der Hauptmenge der Schadstoffe) und dort mit 50 ml n-Hexan/Dichlormethan (4 : 1) eluiert. Nach Vereinigung der beiden Eluate und Einengung am Rotationsverdampfer werden die Kolben mit 2-3 ml Diethylether ausgespült, in Mikrovials überführt und unter Stickstoff wiederum bis zur Trockne eingengt. Nach Aufnahme in 200 µl Toluol werden die

Lösungen zur GC-MSD-Messung bereitgestellt (siehe Abschnitt 4.6.2).

Die Ergebnisse sind in Anhang A-13 aufgelistet. Die Nachweisgrenzen für die Xenobiotika lagen bei den HCH-Isomeren zwischen 0,1-0,3 µg/kg, den DDTs zwischen 0,05 und 0,2 µg/kg, für HCB bei 0,05 µg/kg, den PCBs bei 0,04-0,15 µg/kg und den PAKs bei 0,2-0,5 µg/kg.

5 Ergebnisse

5.1 Beschreibung der Immissionssituation

Der Raum Leipzig-Halle-Bitterfeld gehörte über viele Jahrzehnte hinweg zu den industriellen Zentren Deutschlands, wobei hauptsächlich die chemische Industrie sowie die Kraftwerke durch die Verwendung von fossilen Brennstoffen zur Belastung der Umwelt beitrugen. Einer der Hauptschadstoffe dabei war das SO₂, welches durch Verbrennung von Braunkohle und Heizöl in Feuerungsanlagen zur Erzeugung von Wärme, Dampf und elektrischer Energie z.T. in beträchtlichen Mengen entstanden ist. Um einen Eindruck der ökotoxikologischen Relevanz zu bekommen, sollte man sich vor Augen halten, daß bereits eine SO₂-Konzentration von 0,2 mg/m³ Luft bei kurzzeitiger Einwirkung schwere Störungen in den Assimilationsorganen von Nadelgehölzen und nekrotische Veränderungen auslösen kann [76]. Hinzu kommt das in der Atmosphäre durch Oxidation entstandene SO₃, welches mit feuchter Luft zu Schwefelsäure umgesetzt werden kann. Diese Säure wirkt ätzend auf Haut und Schleimhäute und kann auch in der Vegetation und an Mauerwerken Schädigungen hervorrufen. Einen nicht unerheblichen Anteil an den Luftbelastungen hatten und haben die nitrosen Gase (NO_x), die als Nebenprodukte chemischer Prozesse und bei der Erzeugung von Nitratdüngemitteln aber auch beim KfZ-Verkehr anfallen. Gerade diese letztgenannten Belastungen haben in den Jahren nach der Wiedervereinigung durch die Zunahme des KfZ-Verkehrs und die Einführung neuer Heiztechniken zu einer leichten Erhöhung der NO_x-Konzentration in der Atmosphäre geführt [85].

Eine der Hauptkontaminationen stellte jedoch die Emission der aus Braunkohlekraftwerken entstandenen Flugaschen dar. Sie sind sehr heterogen zusammengesetzte und außerordentlich feinkörnige Lockerprodukte. Je nach Braunkohlentyp und angewandter Verbrennungstechnik variieren sie in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung. Die Partikel besitzen selten idiomorphe Kornformen. Hauptausbildungen sind kugelige, inhomogen aufgebaute, d.h. von Sekundärkristalliten durchsetzte Kristallformen. Hauptkomponenten sind in den Flugaschen SiO₂, CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃, SO₃ und MgO sowie je nach Braunkohlentyp verschiedene Spurenelemente wie V, Sr, Mn, As, B, Ba und Pb [76,77]. Ihre nachteilige und schädigende Wirkung beruhen neben einer Verunreinigung von Gemüse- und Futterkulturen auf einer Störung des Nährstoffhaushaltes land- und forstwirtschaftlich genutzter Böden (hoher Salzeintrag durch Verwendung salzhaltiger Braunkohle, hohe Konzentrationen an Ca, Mg und Al). Ursachen hierfür waren auch der hohe Eintrag von Fluorverbindungen und ökotoxikologisch relevanten Spurenelementen (z.B. As, Pb). Mit der Emission basischer Flugaschen gekoppelt war häufig der mit der industriellen Tätigkeit verbundene Eintrag anorganischer und organischer Schadstoffe, die sich in der umgebenden unmittelbaren und weiteren Entfernung der Emittenten in der Vegetation niederschlugen und im Boden akkumulieren konnten. Zahlreiche Arbeiten berichten darüber [1,4,8,10-12,14,38,78-80].

Verbunden mit dem industriellen Umbruch (Auflösung und Modernisierung von Industrieanlagen und Kraftwerken) kam es seit etwa 1990 zu einer drastischen Veränderung dieser Verhältnisse. Regelmäßige Luft- und Depositionsmessungen des Landesamtes für Umwelt-

schutz Sachsen-Anhalt (LAU) weisen in den letzten Jahren bereits auf einen deutlichen Rückgang der SO_2 -Belastung in der Atmosphäre sowie auf einen fast vollständigen Stopp der Flugaschenemissionen durch Stilllegung der Braunkohlekraftwerke hin [81]. Darüber hinaus ist auch eine deutliche Verringerung der Emissionen aus den Industrieanlagen und aus den privaten sowie kleingewerblichen Nutzungsanlagen erkennbar [82,83]. Bereits 1994 wurden keine Überschreitungen der Grenzwerte der TA Luft in Bezug auf SO_2 , CO und NO_2 in den Meßstellen des LAU mehr festgestellt, was sich auch bereits in einer langsam beginnenden Verbesserung und Gesundung des Waldes (insbesondere Kiefer, und Fichte) bemerkbar macht [81].

Da die SO_2 -, SO_3 -, NO_x - sowie CO-Emissionen nicht alleinig für die Waldschäden verantwortlich gemacht werden konnten, versucht man in den letzten Jahren einen Zusammenhang mit diesen Emissionen durch an Rußpartikel gebundene Schwermetalle und der Emission mittel- und leichtflüchtiger organischer Schadstoffe herzustellen [84]. In diesen z.T. sehr aufwendigen analytischen Untersuchungen konnte auch in diesem Bereich in Bezug auf die Schwermetalle ein Rückgang der Konzentrationen in der Atmosphäre verzeichnet werden [85]. Außer direkten Luftuntersuchungen setzt man dabei Kiefern- oder Fichtennadeln als Bioakkumulatorsystem ein, um auf diese Weise längerfristige Aussagen zu zeitlichen Trends machen zu können.

Dennoch ist trotz des Rückgangs bzw. der Modernisierung der Industrieanlagen mit einigen atmosphärischen Schadstoffquellen auch weiterhin im Untersuchungsgebiet zu rechnen [86]:

Tab. 5-1: Zukünftig zu erwartende atmogene Emissionsquellen im Untersuchungsgebiet

Emissionsquelle	Schadstoffe
zunehmender KfZ-Verkehr	CO, NO_x , ungesättigte Kohlenwasserstoffe und deren photochemische Reaktionsprodukte, PAKs, Ruß sowie Schwermetalle (Pb, Cd u.a.)
Industrie (z.B. chem. Industrie, metallverarbeitende Industrie)	anorganische wie organische Schadstoffe je nach Prozeß
Deponiestandorte	Austrag flüchtiger organischer Substanzen sowie Staub über den Luftpfad, Schwermetalle (z.B. Hg)
Hausbrand	SO_2 , NO_x , Staub, PAKs, Schwermetalle
Landschaft (z.B. landwirtschaftliche Nutzung)	NO_x , Verflüchtigung organischer Substanzen aus der Bodenoberfläche

Es ist jedoch sicherlich eine Verbesserung der Immissionssituation zu erwarten, da strenge gesetzliche Vorgaben die Industrie zu weiteren Umstrukturierungs- und Modernisierungsmaßnahmen zwingt. Die Sanierung hochgradig belasteter Deponiestandorte sowie der langfristige Verzicht auf die Nutzung der Braunkohle als Feuerungsmittel im Hausbrand wird darüber hinaus zu einer Verbesserung der Umweltsituation führen.

5.2 Auswertung der bodenphysikalisch-bodenchemischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der Korngrößenuntersuchungen sind in Abb. 5-1 für die Oberböden (A_p -Horizonte) der Rasterbeprobungen dargestellt. Die Böden der 14 Standorte sind durch sehr unterschiedliche Korngrößenverteilungen charakterisiert. Den flachsten Verlauf zeigen die Ton/Schluffböden (ca. 35 % Ton, 55% Schluffanteil) der Schkopauer und Meuschauer Testflächen, welche in den Auebereichen der Saale angelegt wurden.

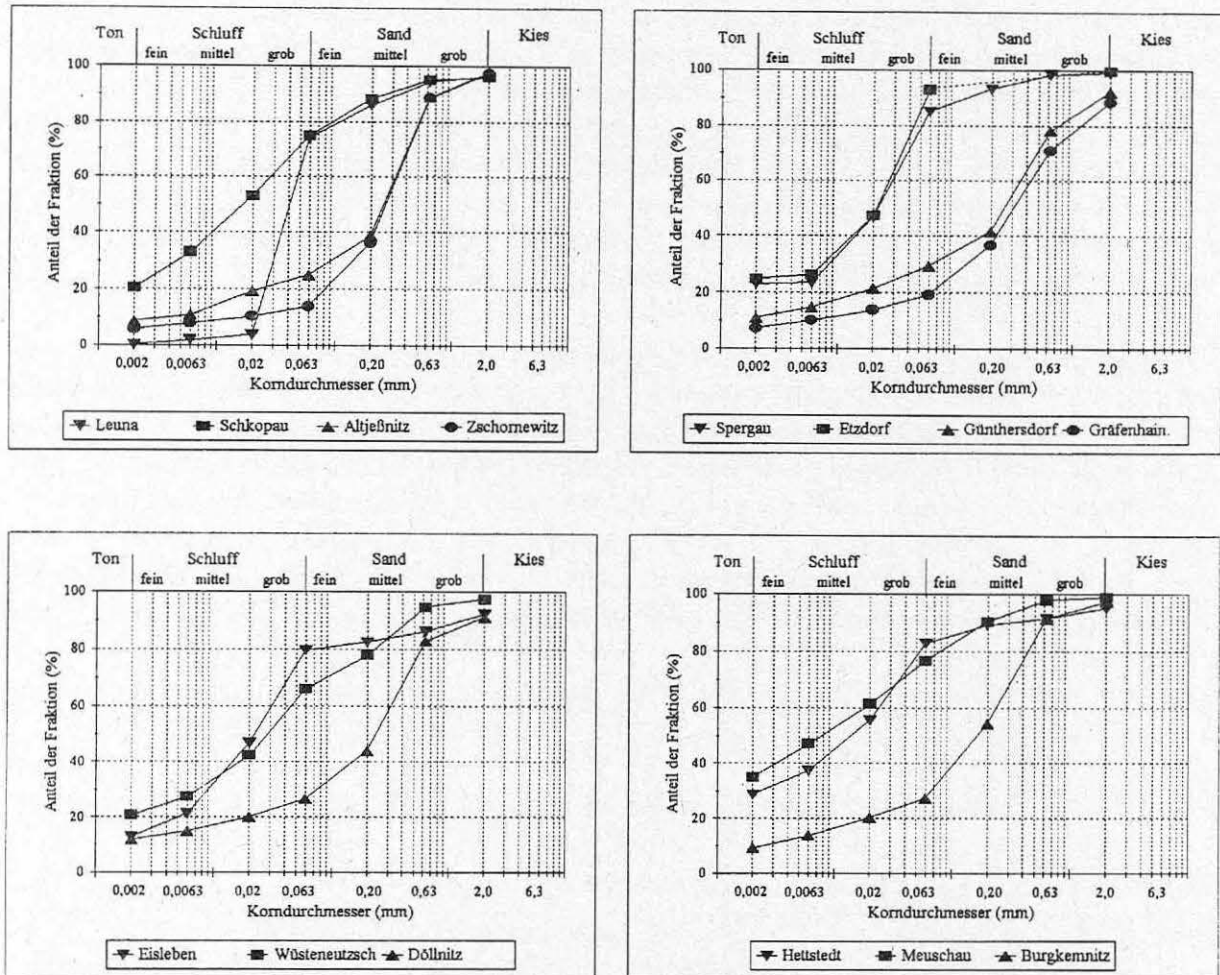


Abb. 5-1: Kornsummenkurven der Oberböden (A_p -Horizonte der Mischproben)

Böden mit einem deutlich höheren Sandanteil sind bei Altjeßnitz, Günthersdorf, Gräfenhainichen, Zschornewitz, Döllnitz und Burgkernitz aufzufinden. Sie zeigen auch vergleichbare Kurvenverläufe. Beim Betrachten der Graphiken lassen sich je nach Bodentyp unterschiedliche Kornformmuster erkennen (Braunerden-Parabraunerden von Eisleben und Hettstedt; Auenlehm-Vega Böden von Schkopau und Meuschau).

Eine rechnerische Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte k (entspricht der hydraulischen Leitfähigkeit und wird aus der Wassermenge ermittelt, die in der Zeiteinheit mit einem bestimmten hydraulischen Gefälle durch eine Erdstoffprobe fließt) aus der Kornsummenkurve sind über den

$$\text{Ungleichförmigkeitsgrad } U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad d_{60}/d_{10} = \text{Korngrößen, bei denen die Summenkurve die 60 \% bzw. 10 \% -Linie schneidet}$$

und die Gleichungen von Hazen und Beyer möglich [32,33]. Die Körnungslinie gibt die Gleichförmigkeit bzw. Ungleichförmigkeit eines Bodens an, die für verschiedene Bodeneigenschaften, z.B. die Verdichtbarkeit, von Bedeutung sind.

$$\text{Hazen} \quad k = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \quad (\text{in m/s})$$

$$\text{Beyer} \quad k = C \cdot d_{10}^2 \quad (\text{in m/s}) \quad C = \text{Faktor n. Beyer (ergibt sich aus } U)$$

Bei den errechneten Werten kann es sich streng genommen jedoch nur um Annäherungswerte handeln, da unter natürlichen Bedingungen Variationen zwischen den verschiedenen Bodentypen und Inhomogenitäten im Bodensystem sowie beispielsweise schichtige Ablagerungen mit berücksichtigt werden können. Eine Abschätzung der k -Werte in den A_p -Horizonten der einzelnen Standorte zeigte erhebliche Unterschiede, die in einer Größenordnung von 10^{-6} m/s bis 10^{-10} m/s oder noch darunter schwankten. In Tab. 5-2 sind die Ergebnisse zusammen mit weiteren wichtigen bodenphysikalischen Eigenschaften für die A_p -Horizonte der Mischproben (Rasterbeprobung) aufgeführt.

Tab. 5-2: Bodentyp sowie wichtige bodenphysikalische Parameter der 14 Oberböden (A_p -Horizonte der Mischproben)

Standorte	Bodentyp (bestimmt am Schurf)	Bodenart (Feinboden) siehe [26]	Korngröße (> 2 mm)	Durchlässigkeit (k) (m/s)	Magnetische Suszeptibilität (10^{-8} m ³ /kg)
Leuna	Löß-Braunschwarzerde	Us	4,60	$\sim 10^{-6}$	87
Spergau	Löß-Schwarzerde	Lu	0,89	$\sim \leq 10^{-10}$	66
Schkopau	Auenlehm-Vega	Lu	3,95	$\sim 10^{-9}$	47
Etzdorf	Löß-Schwarzerde	Ut4	0,29	$\sim \leq 10^{-10}$	63
Altjeßnitz	Sand-Rostgley	Sl3	2,25	$\sim 10^{-8}$	83
Günthersdorf	Decksandlöß-Schwarzerde	Sl4	7,82	$\sim 10^{-9}$	57
Gräfenhainichen	Salmtief-Braunerde	Sl3	11,5	$\sim 10^{-7}$	54
Zschornowitz	Sand-Braunpodsol-Rosterde	St2	2,40	$\sim 10^{-6}$	149
Eisleben	Braunerde-Parabraunerde	Ut3	7,72	$\sim 10^{-9}$	27
Hettstedt	Löß-Parabraunerde	Tu3	4,81	$\sim 10^{-10}$	39
Wüsteneutzsch	Decksandlöß-Schwarzerde	Ls2	2,39	$\sim 10^{-9}$	37
Döllnitz	Decksandlöß-Braunschwarzerde	Sl4	8,75	$\sim 10^{-8}$	46
Meuschau	Auenlehm-Vega	Lt3	1,10	$\sim 10^{-10}$	37
Burgkernitz	Sand-Braunpodsol-Rosterde	Sl3	2,53	$\sim 10^{-8}$	74

Betrachtet man die in Tab. 5-2 aufgelisteten Ergebnisse zur magnetischen Suszeptibilität an den 14 Lokaltäten, so erkennt man trotz vorliegender agrarischer Nutzung deutliche Unterschiede. Sie sind auf die mit unterschiedlicher Intensität betriebenen Braunkohlegroßkraftwerke (BKW) als Emittent zurückzuführen. Durch die regelmäßigen Pflugarbeiten an diesen Flächen sind diese Werte im Gegensatz zu den oberen Waldbodenhorizonten um ein Vielfaches niedriger [36,37]. Die Ergebnisse zeigen an allen Standorten eine starke Abnahme der magnetischen Suszeptibilität mit zunehmender Tiefe. Die höchsten Werte liegen in Leuna (BKW's im Chemiestandort Leuna), Altjeßnitz (BKW Wolfen), Zschornowitz (BKW Zschornowitz) und Burgkernitz (BKW Muldenstein) vor. Die Oberbodenanreicherungen sind auf den über Jahrzehnte andauernden Flugascheeintrag durch diese Großkraftwerke zurückzuführen.

Die pH-Werte der untersuchten Böden liegen meist im schwach alkalischen und schwach bis mäßig sauren Bereich. In einzelnen Bodenhorizonten sind bereits stark saure Bedingungen vorhanden (Eisleben). In Abb. 5-2 sind die pH-Werte der einzelnen Standorte (Horizonte innerhalb des Schurfes) mit zunehmender Tiefe dargestellt. Nur in den Schurfen der Meß-

punkte Altjeßnitz und Zschornewitz ist mit zunehmender Profiltiefe keine Veränderung der Bodenacidität erkennbar. In den meisten Standorten nimmt der pH-Wert aufgrund des im Untergrund vorhandenen kalkhaltigen Lösses mit zunehmender Tiefe zu.

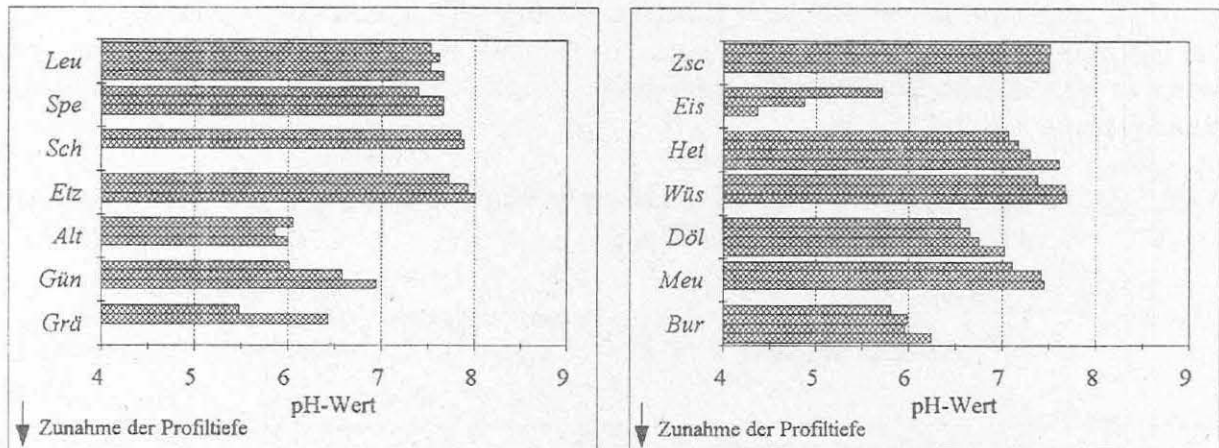


Abb. 5-2: pH-Verteilung in den einzelnen Bodenhorizonten der Schurfe

Auch die Oberböden der meisten Standorte sind durch pH-Werte um 7 oder noch darüber gekennzeichnet. Dies ist auf den Eintrag kalkhaltiger Flugstäube in der Vergangenheit sowie Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen zurückzuführen.

Der Stickstoffgehalt des Ausgangsgesteins und dadurch auch der Böden ist im allgemeinen sehr gering, dagegen ist der Stickstoffbedarf der Pflanzen im Vergleich zu anderen Nährstoffen am höchsten. Er unterliegt im Bodensystem vielfachen Umwandlungen (Mineralisierungen, Immobilisierung durch Umwandlung anorganischer Stickstoffanteile in organische Verbindungen).

Tab. 5-3: N- Gehalt sowie C/N- Verhältnis der Oberböden (A_p -Horizonte der Mischproben)

Standorte	N _{ges} (%)	C/N	Standorte	N _{ges} (%)	C/N
Leuna	0,16	18,2	Zschornewitz	0,22	23,1
Spergau	0,13	15,3	Eisleben	0,08	16,2
Schkopau	0,13	25,9	Hettstedt	0,11	13,1
Etzdorf	0,14	18,9	Wüsteneutzsch	0,16	13,6
Altjeßnitz	0,20	16,1	Döllnitz	0,13	14,8
Günthersdorf	0,11	17,5	Meuschau	0,17	12,5
Gräfenhainichen	0,15	12,9	Burgkernitz	0,11	15,4

Der überwiegende Teil des Stickstoffes in Oberböden liegt in organischer Bindung vor (meist > 95%), z.B. in Form von Huminstoffen, Vegetationsrückständen und abgestorbenen Organismen [25,42]. Die normalen Gehalte in Böden, wie auch in den untersuchten Standorten, liegen im Bereich von 0,02-0,4%. Haupteinflußnehmer auf den N-Gehalt der Böden ist die jeweilige Nutzung, d.h. die Vegetation sowie das Klima und die Bodeneigenschaften.

Die C_{org} -Gehalte der Oberböden (Abb. 5-3) liegen mit Ausnahme der Standorte Altjeßnitz

und Zschornewitz unter 3 Gew.%. Die C_{anorg} -Gehalte nehmen aufgrund der Löß-Unterlage zur Tiefe hin auf bis über 1,6 Gew.% (Etzdorf) zu, eine geringe Anreicherung in den Oberböden durch die ehemaligen Flugstaubeinträge ist jedoch noch sichtbar (z.B. Leuna, Zschornewitz).

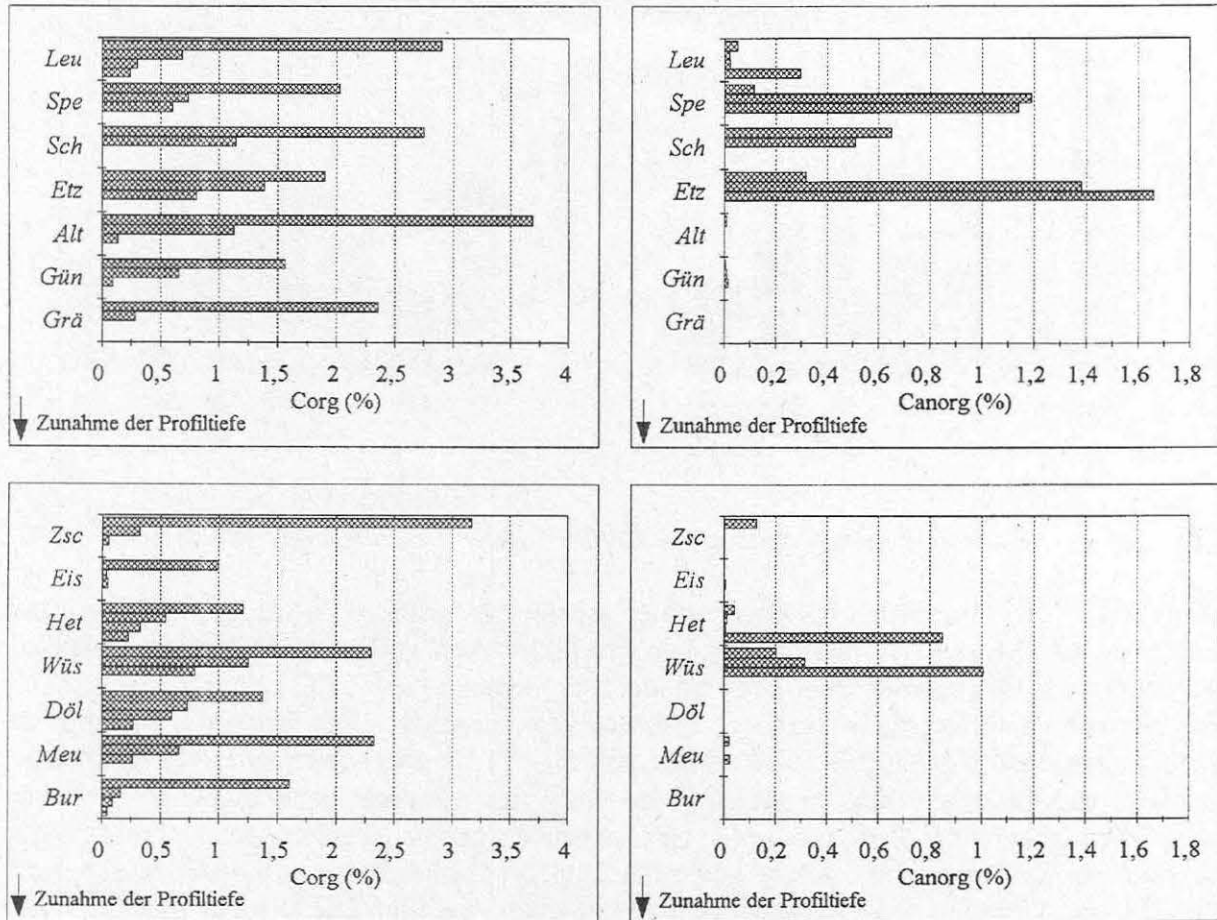


Abb. 5-3: Organischer- und anorganischer Kohlenstoffgehalt in den einzelnen Bodenhorizonten der Schurfe

Zur besseren Charakterisierung der Oberböden wurde aus den Untersuchungsergebnissen das C/N-Verhältnis errechnet (Tab. 5-3). Dieser Parameter kann für eine Beurteilung der Humusqualität herangezogen werden. Je enger das C/N-Verhältnis liegt, desto größer ist der Huminsäureanteil der organischen Substanz, der wiederum eine höhere Kationenaustauschkapazität (CEC) bewirkt. In Mineralböden allerdings entspricht das C/N-Verhältnis nicht genau dem der organischen Substanz, da bei der N-Bestimmung (nach Kjeldahl) fixiertes NH_4^+ mit erfasst wird. Dies wirkt sich besonders bei Böden mit geringeren Gehalten der Böden an organischer Substanz und hohem Tongehalt aus [41,75]. Die Oberböden des Arbeitsgebietes zeichnen sich durch eine mittlere bis sehr hohe Humusqualität aus. Vor allem die Löß-Schwarzerden (Böden mit hoher biologischer Aktivität) sind hierbei hervorzuheben, da sie auch zu den fruchtbarsten Böden überhaupt zählen. Sie werden häufig als Weizenanbaufläche, untergeordnet auch für andere Getreidesorten genutzt. Die C/N-Verhältnisse der hier untersuchten Schwarzerde- und Braunschwarzerdeböden liegen meist im typischen Bereich zwischen 10 und 15 gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung [25].

Ein weiterer Parameter ist die potentielle Kationenaustauschkapazität. Sie beschreibt das unspezifische Adsorptionsvermögen der Böden, das hauptsächlich bestimmt wird durch den Gehalt an Huminstoffen und Ton. Die Ergebnisse hierzu sind in Abb. 5-4 aufgezeigt.

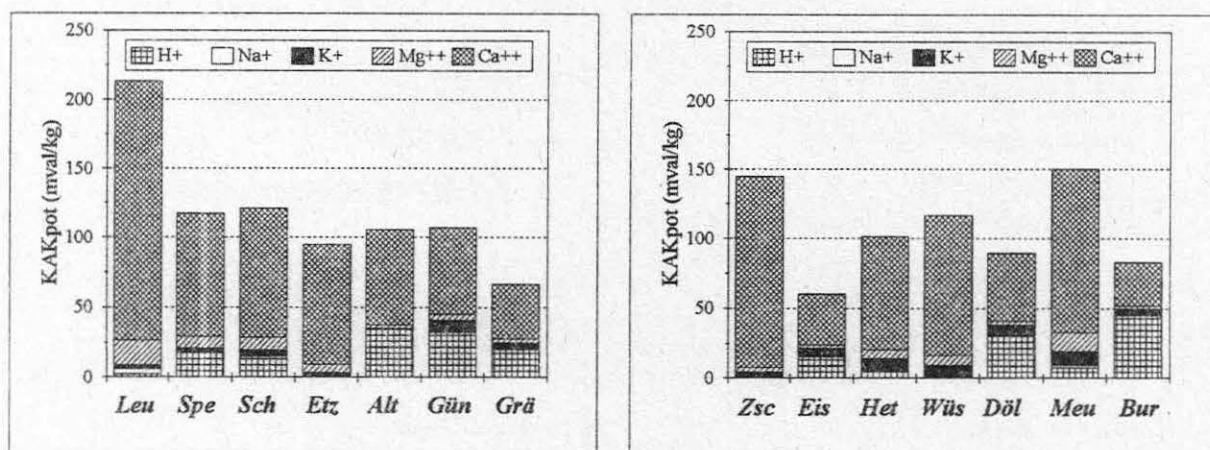


Abb. 5-4: Kationenaustauschkapazität der Oberböden (A_p-Horizonte der Mischproben)

Die CEC in den Oberböden der Standorte schwanken zwischen 60 mval/kg (Eisleben) und 217 mval/kg (Leuna). Geringfügig sind in den Schwarzerdeböden (CEC > 100 mval/kg) gegenüber den Rosterden, Parabraunerden und Braunerden höhere CEC erkennbar, was durch den höheren Humusgehalt bedingt ist (Ausnahme: Zschornowitz). Die Werte liegen damit im Bereich von Sandböden mit 2-3 % Humusanteil (50-100 mval/kg) und sandigen Lehm Böden, Lehmen und tonigen Schluffen (100-250 mval/kg) des gemäßigt-humiden Klimabereiches [42]. Mit zunehmender Tiefe nimmt die CEC entsprechend der Abnahme des Humusgehaltes deutlich ab. Eine Ausnahme hierbei stellt der Standort Hettstedt dar, in dessen Bodenprofil die CEC zur Tiefe hin von 99 mval/kg auf 127 mval/kg zunimmt. Die Ursache hierfür ist der sehr hohe CaCO₃-Gehalt im C-Horizont.

Ca nimmt an allen untersuchten Punkten den größten Anteil des Kationenbelages ein, Na hingegen beteiligt sich kaum am Kationenbelag. Der hohe Ca-Anteil an diesen Standorten ist sicherlich auf den in der Vergangenheit hohen Eintrag basischer Flugstäube aus den BKW oder auf Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen zurückzuführen.

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit aus Bodensättigungsextrakten nach DIN 19684 [46] zeigt stark unterschiedliche Konzentrationen zwischen < 100 μ S/cm und > 2000 μ S/cm (Leuna). Sie charakterisiert den Versalzungsgrad des Bodens (Gehalt an löslichen Salzen). Nach Kuntze et al. (1994) [87] ist bei einer Leitfähigkeit von 0-2000 μ S/cm die Auswirkung der Versalzung auf den Ertrag zu vernachlässigen. Dieser Wert wird ausschließlich von dem Boden des Standortes Leuna erreicht.

5.3 Belastung mit anorganischen Schadstoffen

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse geben zusammengefaßt die Belastungssituation mit anorganischen Stoffen (insbes. Schwermetalle) der Standorte des Arbeitsgebietes wider. Dabei wurden für einige Elemente, deren Gehalte mit der Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt wurden, Konzentrationskarten für die Oberböden der Rasterbeprobungen (A_p -Horizont der Mischproben) erstellt. Für die Darstellung und Interpretation der Gehalte sind national wie international gültige Richt- und Grenzwerte herangezogen worden (Tab. 5-4).

Tab. 5-4: Richt- und Grenzwerte sowie Hintergrundwerte für Metalle in Böden [7,88-91]

Elemente	Kloke-BO ⁸⁸	R ⁷	HL-BO ⁸⁹		KVO ⁹⁰		Eikmann & Kloke ⁹¹		
			S-Wert	I-Wert	pH > 6	pH 5-6	BW I	BW II (P)	BW III (P)
B	5 - 30	----	----	----	----	----	----	----	----
V	10 - 100	----	----	----	----	----	50	100	400
Cr	2 - 50	----	100	380	100	100	50	200	500
Ni	2 - 50	----	35	210	----	----	40	100	200
Cu	1 - 20	12,0	36	190	60	60	50	50	200
Zn	3 - 50	35,4	140	720	200	150	150	300	600
As	2 - 20	----	29	55	----	----	20	40	50
Zr	< 10 - 300	----	----	----	----	----	300	500	2000
Cd	0,1 - 1	0,37	0,8	12	1,5	1	1	2	5
Ba	----	----	200	625	----	----	100	300	1500
Hg	0,1 - 1	----	0,3	10	1	1	0,5	10	50
Pb	0,1 - 20	28,4	85	530	100	100	100	500	1000

Kloke-BO = Kloke-Liste; hier dargestellt häufig in Böden vorkommende Gesamtgehalte [88]

R = Referenzwerte, d.h. durchschnittliche Schwermetallgehalte in Böden des Raumes Leipzig [7]

HL-BO = Interventions- (I) und Referenzwerte (S) der Niederlande (Holländische Liste) [89]

KVO-BO = Klärschlammverordnung - AbfKlärV mit pH-abhängigen Grenzwerten für Schwermetalle in Böden [90]

BWI-III = Schutzgutbezogene Orientierungswerte für Schadstoffe in Böden, z.T. abgeleitet aus Meßblatten [91]. BW stellen Bodenwerte dar; BWI gilt für alle Schutzgüter; die Endung (P) gilt für landwirtschaftliche Nutzflächen

Im Anhang 3a, 3b und 5 sind für Überschreitungen der BWI und BWII-Werte (Schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)stoffe in Böden) der Eikmann & Kloke - Liste die Ergebnisse graphisch hervorgehoben [91]. Weitere Einstufungen der Belastungen in den Böden sind über eine Umrechnung der gemessenen Gehalte in Effektiv-Gehalte unter Berücksichtigung des Tongehaltes und Gehaltes an organischer Substanz im Boden möglich, wie es in der Holländischen Liste (1988) noch angegeben wurde [89]. In verschiedenen Bundesländern Deutschlands werden ebenfalls Bodenparameter bei der Erstellung von Orientierungswerten, Richtwerten oder Grenzwerten zur Beurteilung der Schwermetallkontaminationen verwendet [92,93].

Als Alternative zu den Röntgenfluoreszenzmessungen und offenen Aufschlüssen mit darauf folgender Messung an der ICP-AES wurden für die Gesamtgehalte auch Königswasseraufschlüsse nach DIN 38414 [47] herangezogen.

5.3.1 Darstellung der Gesamtbelastung

Die untersuchten Agrarstandorte in der Region Leipzig-Halle-Bitterfeld zeichnen sich in Folge des früheren Flugstaubeintrages in einigen Fällen durch hohe Metallgehalte aus, die über den normal in Böden vorkommenden Konzentrationen liegen (Tab. 5-5 und Anhang 3). Ursachen für derartige Metallanreicherungen im Bodensystem können aber auch Düngemittelzugaben, Klärschlammaufgaben oder Kalkungsmaßnahmen sein, die auf den Standorten sicherlich auch eine bestimmte Rolle gespielt haben dürften.

Tab. 5-5: Durchschnittliche Konzentrationen der Elemente in den A_p-Horizonten (Rasterproben) der Standorte

Elemente	n	MIN	MAX	MW	MED	S	Elemente	n	MIN	MAX	MW	MED	S
B (S7)	6	13,6	39,7	27,0	26,5	7,70	Mn (RFA)	14	337	1350	588	507	281
Cges (I)	14	1,23	5,01	2,37	2,09	0,93	Fe (RFA)	14	0,92	3,36	1,77	1,56	0,71
Nges (K)	14	0,08	0,22	0,14	0,13	0,04	Co (RFA)	14	< 2	13	-----	-----	-----
Na (RFA)	14	0,13	0,47	0,30	0,31	0,08	Ni (RFA)	14	9	46	20,9	19,0	10,9
Mg (RFA)	14	0,16	1,11	0,50	0,36	0,33	Cu (RFA)	14	10	140	27,9	18,5	32,5
Al (RFA)	14	2,69	7,43	4,42	4,25	1,53	Zn (RFA)	14	30	269	75,0	55,5	57,9
Si (RFA)	14	15,2	36,7	25,8	25,7	5,3	As (RFA)	14	2	14	6,93	6,50	3,03
Pges (RFA)	14	471	1820	834	738	333	Rb (RFA)	14	27	129	72,5	69,0	27,5
Sges (RFA)	14	772	9540	1790	1130	2170	Sr (RFA)	14	47	170	98,9	93,0	34,3
K (RFA)	14	0,60	2,41	1,51	1,47	0,50	Zr (RFA)	14	105	1915	536	382	478
Ca (RFA)	14	0,36	3,37	1,21	0,75	0,98	Cd (S7)	14	< 0,10	2,05	-----	-----	-----
Ti (RFA)	14	0,19	0,41	0,29	0,31	0,08	Ba (RFA)	14	189	573	357	354	103
V (RFA)	14	26	89	47,4	47,0	18,2	Hg (S7)	6	0,15	1,01	0,35	0,21	0,30
Cr (RFA)	14	36	79	52,4	52,5	13,7	Pb (RFA)	14	22	152	40,0	28,0	33,4

n = Anzahl der Proben

MAX = Maximum-Gehalt im Boden

MED = Median

Cges, Nges, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti und Fe in %

B, P, S, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr, Cd, Ba, Hg und Pb in mg/kg (bez. auf das Trockengew.)

Hinter den Elementen steht jeweils die Bestimmungsart:

RFA = Röntgenfluoreszenzanalyse

K = Kjeldahl

MIN = Minimum-Gehalt im Boden

MW = arithmetischer Mittelwert

S = absolute Standardabweichung

S7 = S7-Aufschluß und ICP-Analytik

I = Infrarotgasanalyse

Bedeutend höhere Belastungen lassen sich in Böden finden, die wie am Beispiel der beiden Standorte Hettstedt und Eisleben anderen Schadstoffquellen (Hüttenindustrie, metallverarbeitende Betriebe) ausgesetzt sind. Zusätzlich ist an Standorten im näheren Umkreis des Straßenverkehrs der Eintrag einiger Schwermetalle nicht außer Acht zu lassen. Innerhalb dieses Vorhabens jedoch wurden die Untersuchungspunkte so gewählt, daß der Abstand Probenpunkt / Straße nie weniger als 150-200 m lag. Neben diesen zuletzt genannten atmosphärischen Quellen können auch Bodenbelastungen durch bereits im Boden vorhandene Altlasten existieren (Deponien, Erz- und Schlackenhalde in Bergbaugebieten, belastete Flächen durch Industriealtstandorte). Diese Kontaminationsquellen waren an den ausgewählten Standorten auszuschließen.

Diese anthropogenen Prozesse überlagern häufig jedoch Metallanreicherungen in Böden mit geogenen Ursprungs. So können beispielsweise hohe Ca- und Mg-Gehalte durch kalkhaltigen Löß oder kalkhaltige Gesteine im Untergrund (Dolomit-, Gipsgesteine) verursacht werden. In

Auenböden ist immer mit einer Akkumulation verschiedener Elemente in den Ablagerungen zu rechnen, die ursprünglich aus anderen geologischen Einheiten im Hinterland erodiert und im Laufe der Zeit talabwärts transportiert wurden. Unterschiedliche Verteilungsmuster, verbunden mit An- und Abreicherungen von Elementen innerhalb eines Bodenprofils, lassen auf pedogenetische Prozesse schließen. So ist eine relative Zunahme an Schwermetallen in Oberböden entweder durch laterale (Grundwasser-/Stauwassereinflußbereich und dadurch bedingte Korngrößenklassifizierungen) oder vertikale Verlagerungsprozesse (z.B.: "Vegetationspumpe") im Bodensystem möglich. Zu einer Abreicherung kann es beispielsweise durch Tonverlagerungs- oder Bodenversauerungsprozesse kommen [93].

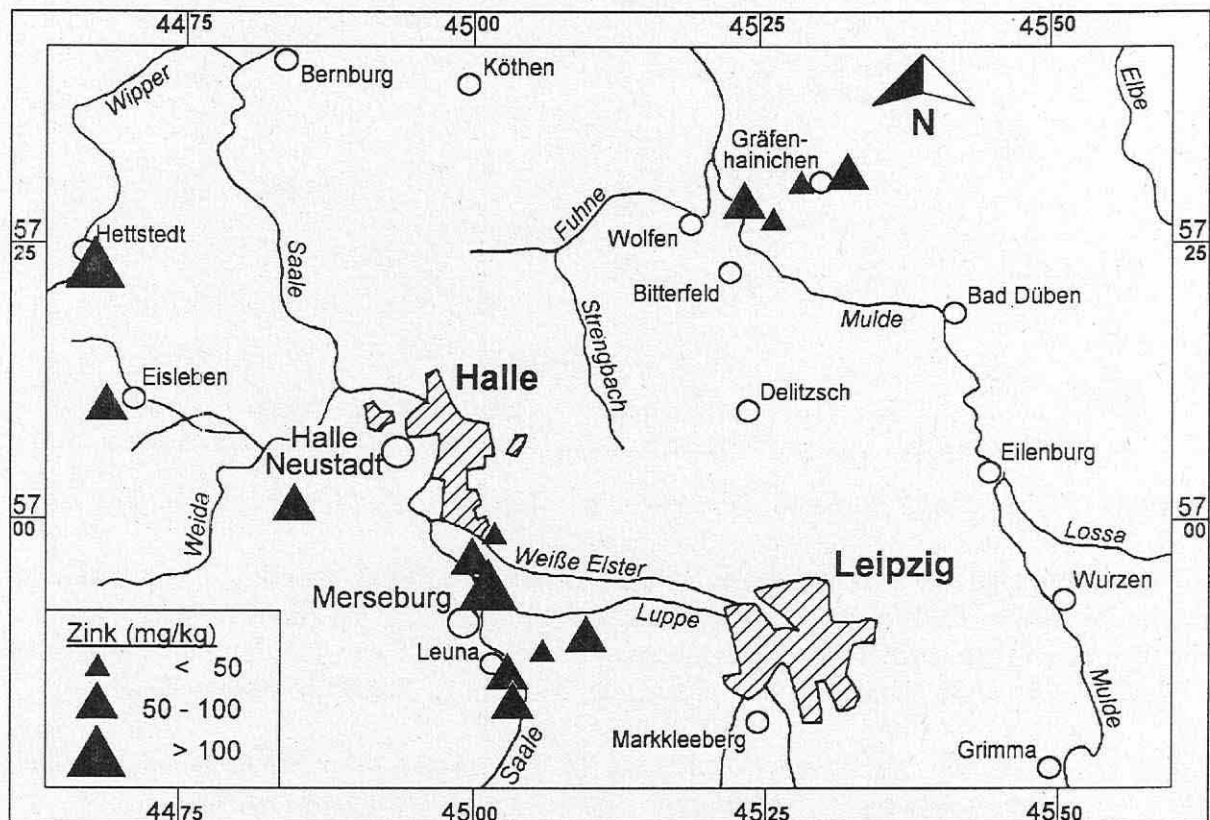


Abb. 5-5: Zinkgehalte in den A_p-Horizonten der Rasterproben (Angaben in mg/kg)

Die Schwermetallkonzentrationen in den Agrarböden des Untersuchungsgebietes liegen heute in stark unterschiedlichen, meist aber unbedenklichen Konzentrationen benachbarter Großkraftwerke vor. Nur die Elemente Zn und teilweise auch Pb und Cd liegen jedoch in den untersuchten Oberböden etwas über den für den Raum Leipzig angegebenen Referenzgehalten. Die chemische Industrie als zweiter Hauptemittent spielt in Bezug auf die Gesamtgehalten an anorganischen Schadstoffen nur eine untergeordnete Rolle. In Abb. 5-5 und 5-6 sind die Gehalte an Zn und Pb in den A_p-Horizonten der Standorte (Mischproben der Rasteruntersuchungen) dargestellt. Nur an wenigen Punkten werden bei Zn Gehalte über 100 mg/kg (Hettstedt, Meuschau) und bei Pb Konzentrationen über 60 mg/kg (Eisleben, Hettstedt) gefunden. Überhaupt findet man an den beiden Standorten Eisleben und Hettstedt am Rande des ehemaligen Mansfelder Kupferbergbaugebietes die höchsten Schwermetallkonzentrationen (besonders Cu, Zn, Pb). Neben Emissionen aus der Braunkohlenverbrennung fallen die Standorte zusätzlich in den Einflußbereich ehemaliger Kupferverhüttungs- und Buntmetallrecyclingsanlagen sowie Schlacken- und Bergbauhalden.

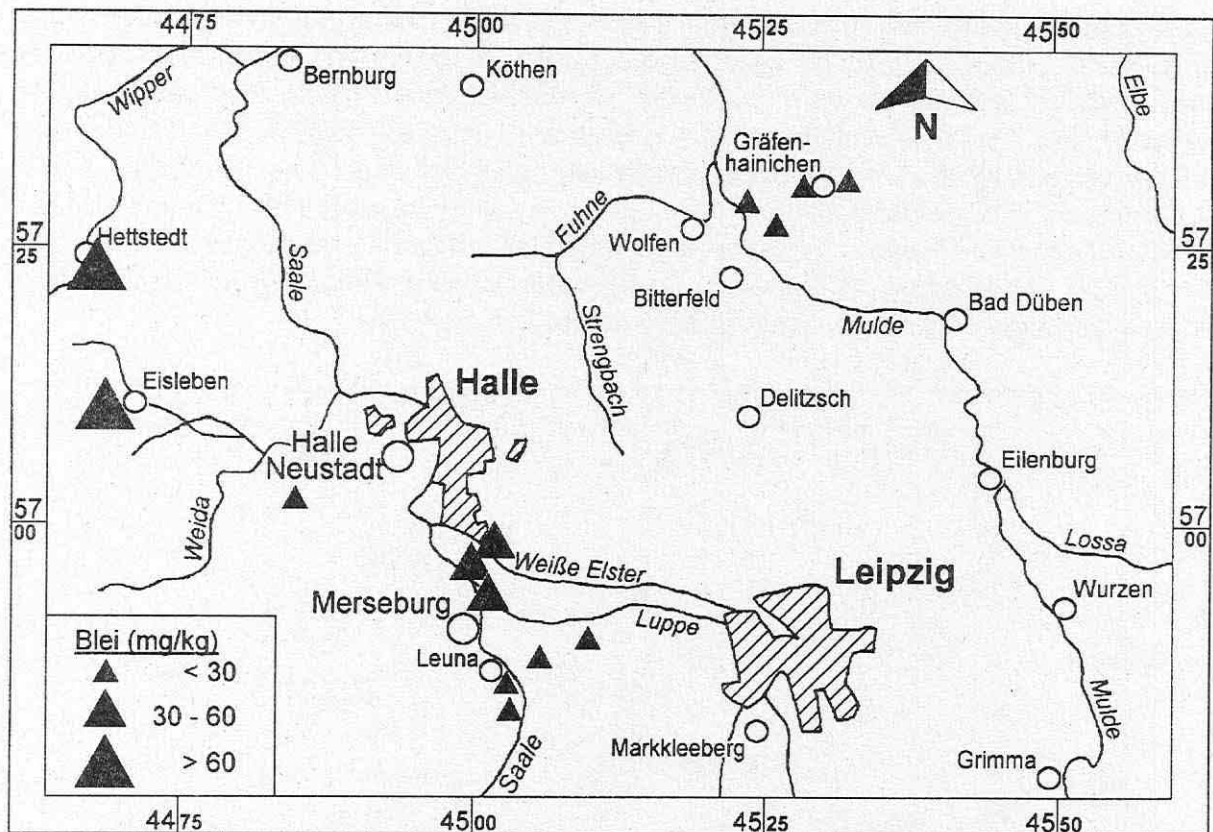


Abb. 5-6: Bleigehalte in den A_p -Horizonten der Rasterproben (Angaben in mg/kg)

Die Schwermetallgehalte in den Böden nehmen deutlich zur Tiefe hin ab. Die Akkumulationen in den oberen Bodenschichten weisen auf den atmosphärischen Eintrag dieser Elemente hin. Am deutlichsten findet man diese Abnahme bei Zn, Pb und Cu bei Betrachtung der RTE-Werte (Relative Topsoil Enhancement) nach Zanini & Bonifacio [94] in Tab. 5-6.

Tab. 5-6: Relative Oberbodenanreicherung (RTE*) ausgewählter Spurenelemente unter Verwendung der Rasterproben nach Zanini & Bonifacio [94]

Standorte	Mg	Al	Ca	Fe	S	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb
Leu	-14,0	-6,76	41,7	-1,04	83,4	7,69	10,7	19,4	0	58,3	22,9	-1,03	55,6
Spe	-4,23	7,31	-55,1	-2,06	-19,1	9,30	-5,66	11,7	-10,0	5,88	32,5	-2,3	60,0
Sch	27,8	24,7	34,2	13,0	37,6	3,45	14,5	9,11	0	29,2	33,9	20,5	39,1
Etz	-24,2	13,6	-45,1	11,1	3,42	27,3	3,77	25,7	17,6	37,5	62,9	3,60	78,6
Alt	-6,90	-19,0	38,6	34,9	12,6	43,5	-10,0	64,5	33,3	25,0	26,8	-22,5	8,70
Gün	-3,70	0,15	-6,67	-7,26	29,4	3,70	2,78	-4,32	-7,14	-4,35	10,4	-9,82	35,3
Grä	-5,00	15,6	48,9	-4,26	75,9	28,0	-2,63	71,5	-9,09	60,0	74,2	-6,10	133
Zsc	44,4	21,2	204	121	47,2	145	57,1	246	22,2	150	87,5	13,0	100
Eis	-7,41	0,11	19,6	-13,8	46,1	4,44	0	33,5	5,00	79,2	57,9	7,60	89,5
Het	29,7	32,9	-29,5	13,9	39,9	8,30	6,25	39,8	-45,3	141	85,5	16,4	126,9
Wüs	2,15	3,72	-23,7	0,37	-17,2	0	11,8	-8,08	-15,4	0	-6,38	-1,40	26,1
Döl	-17,0	-14,1	25,0	-7,39	24,2	-15,6	-12,2	0	33,3	42,9	18,2	-5,00	77,8
Meu	16,6	12,1	14,1	2,78	34,8	5,95	9,72	-5,19	-6,12	7,41	29,4	10,6	41,4
Bur	-57,7	-34,8	30,8	-42,6	39,1	-39,5	-14,0	-13,2	-47,1	0	-14,3	-11,9	58,8

* = Positive Werte zeigen die prozentuale Anreicherung des Elementes im Oberboden an

Aus den Meßergebnissen der 14 Standorte wird ersichtlich, daß insbesondere die Elemente Pb, Cd und Ba und an zwei Standorten auch Zn und Cu in erhöhten Konzentrationen in den Oberböden, die teilweise deutlich über den S-Werten der Holländischen Liste liegen, vorhanden sind. Die Werte der Holländischen Liste beziehen sich dabei auf einen Standardboden mit 25 % Ton und 10 % organischem Material. Die hier untersuchten Böden sind jedoch häufig durch wesentlich geringere Tongehalte und Gehalte an organischem Material gekennzeichnet, wodurch entscheidende Festlegungsmöglichkeiten für die Schwermetalle im Boden fehlen. Dadurch können die Böden empfindlicher gegenüber äußeren Einflüssen reagieren. Im Falle der Elemente Ba (Abb. 5-7), Cu und Zr liegen einige Oberböden auch deutlich über den Prüfwerten (Bodenwerte II: Ba 300 mg/kg; Zr 500 mg/kg; Cu 50 mg/kg) der nutzungs- und schutzgutbezogenen Orientierungswerte für landwirtschaftliche Nutzflächen nach Eikmann & Klope [91]. Für das Element Cu wurde am Standort Hettstedt eine Konzentration von 140 mg/kg (bez. auf das Trockengewicht) ermittelt.

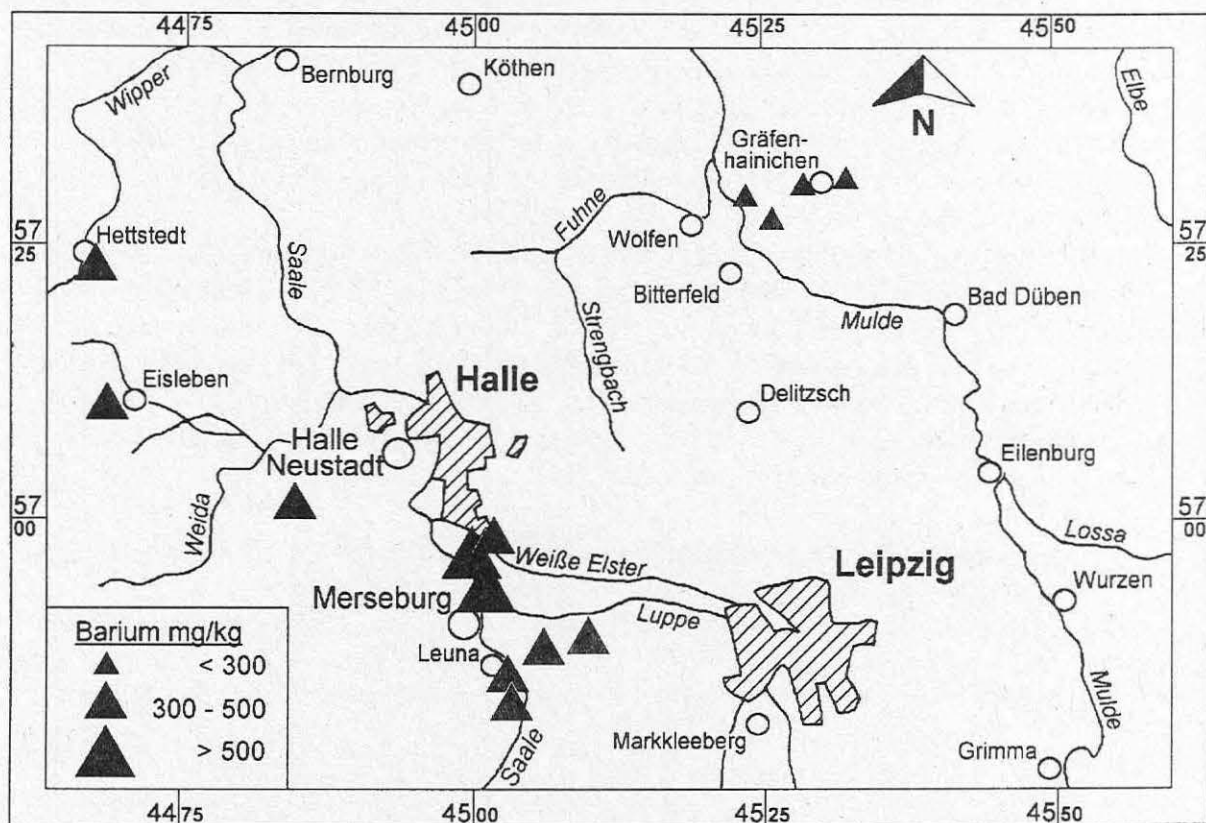


Abb. 5-7: Bariumgehalte in den A_p-Horizonten der Rasterproben (Angaben in mg/kg)

Für die Bestimmung der maximal löslichen Metallfraktion wurde die Extraktion mit Königswasser ausgewählt [47]. Die Ergebnisse dieser Aufschlüsse weisen bei einigen Elementen deutlich geringere Konzentrationen als die Ergebnisse mit der Röntgenfluoreszenzanalyse auf, was vor allem auf schwer lösliche Oxide und Silikate zurückzuführen ist. Die Cd-Gehalte liegen generell unter 2 mg/kg (bez. auf die Trockensubstanz). Die Böden der Standorte Altjeßnitz und Zschornowitz überschreiten geringfügig den von Eikmann & Klope (1993) vorgeschlagenen Orientierungswert für Cd von 1 mg/kg (BW I) in Böden multifunktionaler Nutzungsmöglichkeit [91]. Bei den Hg-Untersuchungen, die in Oberböden ausgewählter Standorte ermittelt wurden, fällt vor allem Schkopau im Lee der ehemaligen Buna-Werke ins Auge. Hier liegen die Konzentrationen im Oberboden bei etwas über 1 mg/kg bezogen auf das Trockengewicht und damit auch über den vorgeschriebenen 1 mg/kg der KVO [90].

5.3.2 Mobilität und Bindungsform

Die As- und Schwermetallgesamtgehalte in Böden lassen zwar eine erste Abschätzung des Risikos für die Umwelt zu. Eine Bewertung ist jedoch meist nur unzureichend möglich. Viel wichtiger ist die Ermittlung der Bindungsformen der Elemente in den Böden sowie zahlreicher Bodenparameter, um Aussagen zur Schwermetallmobilität und der möglichen Pflanzenverfügbarkeit geben zu können. Erst dadurch ist eine Beurteilung der analytisch nachgewiesenen Stoffkonzentrationen und eine Einschätzung des Gefährdungspotentials möglich.

Schwermetalle und Arsen treten in Böden in unterschiedlichen Bindungsformen auf. Sie können fest gebunden, gelöst sowie sorbiert vorliegen (vgl. Abschnitt 4.5.3). Fest gebundene Metalle sind nur schwer für die Pflanze erreichbar. Viel entscheidender sind die gelösten oder adsorptiv gebundenen Anteile. In welchem Ausmaß und in welcher Form letztlich die Schwermetalle sorptiv oder gelöst im Boden enthalten sind, ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Wichtigste Einflußfaktoren sind die Bodenazidität, der Gehalt und Ordnungsgrad der organischen Substanz, Fe-, Mn- und Al-Oxide und -Hydroxide, die Art und Menge vorhandener Tonminerale sowie das Redoxpotential. Zusätzlich können auch die Konzentration und Art anwesender Salze und anorganischer Komplexbildner, Gesamtgehalte an Kationen und Anionen in der Bodenlösung, der Bodenwassergehalt, die Aktivität der Mikroorganismen, der Bereich der Rhizosphäre bei Pflanzen und vieles mehr einen Einfluß auf die Sorption dieser Elemente nehmen [48,53,55,95-97].

Zur Charakterisierung der mobilen Metallanteile wurde ein Extraktionsverfahren ausgewählt, welches von Zeien & Brümmer und Prüß entwickelt und seit 1995 als Norm (DIN 19730) vorliegt [54-55,61]. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Ammoniumnitratextraktionen in Tab. 5-7 fällt auf, daß alle gemessenen Werte unterhalb der Prüfwerte Pmob für Nahrungs- und Futterpflanzen sowie Mikroorganismen und Bodensickerwasser, die in der VwV Anorganische Schadstoffe in Baden-Württemberg zur Einstufung anorganischer Schadstoffe in Böden eingeführt wurde, zu liegen kommen [92].

Tab. 5-7: Ergebnisse der Ammoniumnitratextraktionen in den acht untersuchten Weizenböden

Standort	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Spergau (Spe-W)	74	nn	33	25	nn	nn
Schkopau (Sch-W)	34	nn	74	nn	nn	nn
Etzdorf (Etz-W)	117	nn	58	nn	nn	nn
Hettstedt (Het-W)	214	nn	306	319	20	nn
Wüsteneutzsch (Wüs-W)	149	nn	69	nn	nn	nn
Döllnitz (Döl-W)	544	nn	58	49	nn	nn
Meuschau (Meu-W)	91	nn	49	nn	nn	nn
Burgkernitz (Bur-W)	374	nn	29	52	nn	nn

Gründe hierfür sind die an allen Standorten vorherrschenden optimalen pH-Bedingungen (pH-Werte zwischen 5,4 und 7,8). Sie liegen im Bereich der geringsten Löslichkeit für Schwermetalle im Boden. Mit einer starken Zunahme der Schwermetallmobilität ist erst mit fallenden pH-Werten zu rechnen. Dies ist auf die dann beginnende steigende Löslichkeit definierter Verbindungen und vor allem auf fehlende Adsorptionswirkungen der Fe- und Al-Oxide und -Hydroxide zurückzuführen, deren Anteil an variabler Ladung bei pH-Werten unter 5,5-6 stark zurückgeht. Dadurch kommt es zu Desorptionen größerer Schwermetallmengen. Bei

noch tieferen pH-Werten beginnen sich dann die Al-Oxide aufzulösen. Die dann noch vorhandenen Möglichkeiten, Schwermetalle adsorptiv zu binden, sind Tonminerale, die sich erst bei pH-Werten unter 4,5 aufzulösen beginnen, sowie Reste an organischer Substanz (Huminstoffe). Der optimale pH-Bereich für gute Sorptionseigenschaften von Schwermetallen liegt demnach bei etwa 5,5-7,5. Die Löslichkeit für das Element Pb beispielsweise steigt erst bei pH-Werten unter 4,5 deutlich an, da es von allen Schwermetallen am stärksten durch spezifische Adsorptionsprozesse gebunden ist [42].

Die an verschiedene Bodenkomponenten sorbierten Metallanteile können durch fraktionierte oder sequentielle Extraktionsmethoden erfaßt werden (vgl. Abschnitt 4.5.4). In diesem Zusammenhang wurden an allen Misch- und Einzelproben (Rasterbeprobungen und Schurfe) sequentielle Extraktionen nach Zeien & Brümmer (1989,1991) durchgeführt, um somit Aussagen zu den prozentualen Bindungsanteilen der Schwermetalle im Boden geben zu können [61,98]. Durch diese Untersuchungen in den einzelnen Horizonten der Bodenprofile waren darüber hinaus Angaben zu Veränderungen der Bindungsverhältnisse aufgrund pedogenetischer Prozesse innerhalb des Bodenprofils möglich. In Tab. 5-8 sind die Ergebnisse aus allen 14 Testflächen für die Oberböden der Rasterbeprobungen zusammenfassend dargestellt.

Tab. 5-8: Bindungsanteile ausgewählter Schwermetalle in Oberböden von Agrarstandorten (A_p -Horizonte der Rasterbeprobungen)

- ① sehr gering (<1%); sowie unter der Nachweisgrenze ② gering (1-5%)
③ mäßig (5-10%) ④ hoch (10-20%) ⑤ sehr hoch (>20%)

Element	I. Fraktion	II. Fraktion	III. Fraktion	IV. Fraktion	V. Fraktion	VI. Fraktion	VII. Fraktion
Cr	①	①	①	①	① - ③	① - ④	⑤
Mn	① - ②	① - ②	⑤	② - ⑤	③ - ⑤	② - ③	② - ⑤
Fe	①	①	①	① - ③	② - ⑤	④ - ⑤	⑤
Ni	①	①	①	①, ④ - ⑤	① - ⑤	①, ③ - ⑤	⑤
Cu	① - ③	① - ⑤	① - ②	⑤	④ - ⑤	①, ③ - ④	①, ④ - ⑤
Zn	① - ②	① - ④	① - ④	② - ④	② - ⑤	③ - ⑤	⑤
Ba	③ - ⑤	② - ③	② - ④	① - ②	① - ②	① - ②	⑤
Pb	①	①, ④	①, ④	①, ⑤	①, ③ - ⑤	① - ②, ④	⑤

Auffällig ist der relativ hohe Anteil an Metallen, die erst im 7. Extraktionsschritt in größeren Mengen freigesetzt werden können (Ni, Cr, Fe). Dabei handelt es sich um schwer lösliche, meist silikatische Verbindungen. Allen Untersuchungen gemeinsam ist auch die Tatsache, daß unabhängig vom Bodentyp die Elemente Cu und Pb hauptsächlich in organisch gebundener Form (IV) vorliegen. Dies belegen auch vergleichbare Untersuchungen von Brümmer et al. [96]. Aus der Mn-Oxid/Hydroxid- Fraktion (III) der Agrarböden können neben Mn vor allem die spezifisch gebundenen Elemente Pb und Zn, aus der Fe-Oxid/Hydroxid- Fraktion (V+VI) vorwiegend die Schwermetalle Pb, Zn, Cu, Ni und Mn, freigesetzt werden.

Die Böden emittentennaher Gebiete sind mit Ausnahme des Standortes Hettstedt durch pH-Werte von 6,5-7 und darüber gekennzeichnet. In diesem Bereich ist die Mobilität von Schwermetallen stark herabgesetzt. Erst unter mäßig bis stark sauren Bedingungen setzt eine deutliche Erhöhung der Schwermetallmobilität ein. Nur Cu ist sowohl unter sauren als auch alkalischen Bedingungen in Böden verfügbar. Dies erklärt die teilweise recht hohen "mobilen" und "leicht nachlieferbaren" Anteile in den untersuchten Agrarböden von Leuna und

Zschornewitz (Tab. 5-9). Unter diesen neutralen bis schwach alkalischen Bedingungen existieren im Boden höhere Anteile organisch komplexierten Kupfers (lösliche metallorganische Komplexe), welches mittels des I. und II. Extraktionsschrittes freigesetzt werden kann [96,99].

Tab. 5-9: *Prozentualer Anteil aus der Summe der ersten beiden Fraktionen (mobil und leicht nachlieferbar nach Zeien & Brümmer) sowie Absolutgehalte in mg/kg (bez. auf das Trockengewicht) einiger Metalle in den Oberböden des Untersuchungsgebietes (A_p -Horizonte der Rasterproben)*

Standort Einheit	Mn %	Mn ppm	Cu %	Cu ppm	Zn %	Zn ppm	Pb %	Pb ppm
<i>Industriegebiet Leuna mit mehreren Braunkohlekraftwerken</i>								
Leuna ●	2,08	11,4	13,1	2,48	nn	nn	nn	nn
Spergau ●	3,18	14,3	3,32	0,60	3,53	1,87	nn	nn
Wüsteneutzsch ○	3,24	15,5	nn	nn	nn	nn	nn	nn
Günthersdorf ○	6,48	33,0	9,44	2,08	4,34	3,21	nn	nn
<i>Industriegebiet um Buna mit Braunkohlekraftwerken</i>								
Schkopau ●	1,25	8,71	1,95	0,61	1,75	1,45	nn	nn
Döllnitz ○	4,76	16,0	nn	nn	6,05	2,36	nn	nn
Meuschau ○	1,31	14,4	nn	nn	0,39	0,43	nn	nn
<i>Filmfabrik Wolfen mit Kraftwerk</i>								
Altjeßnitz ○	2,55	9,12	nn	nn	nn	nn	nn	nn
<i>Braunkohlekraftwerk Zschornewitz</i>								
Zschornewitz ●	2,85	11,2	23,7	2,37	nn	nn	nn	nn
Gräfenhainichen ○	1,43	7,61	nn	nn	5,06	2,73	nn	nn
<i>Braunkohlekraftwerk Muldenstein</i>								
Burgkernitz ○	1,85	6,74	nn	nn	4,01	1,45	nn	nn
<i>Kupferverhüttung und Buntmetallrecycling sowie Schlacken-/Bergbauhalden</i>								
Hettstedt ●	3,91	24,3	7,84	11,0	13,8	37,2	9,88	15,0
Eisleben ○	0,59	8,02	3,39	1,46	8,42	7,57	nn	nn
<i>ehemalige Kaligrube</i>								
Etzdorf ○	3,74	18,9	3,18	0,70	3,94	2,25	nn	nn

● = emittentennah

○ = emittentenfern

nn = Gehalte liegen unter der matrixspezifischen Nachweisgrenze

Den größten Einfluß auf die Mobilisierung von Schwermetallen hat die Bodenazidität. In Abb. 5-8 sind zwei Oberböden unterschiedlichen pH-Wertes und differierender Gesamtbelastung dargestellt. Es ist jedoch bei Betrachtung der Grafik zu bedenken, daß im Falle von Etzdorf, in dessen Boden viele Elemente in nur geringen Konzentrationen enthalten sind, in einigen Extraktionsschritten eine Bestimmung der geringen Gehalte im Eluat nicht möglich war, da sie unter der matrixspezifischen Nachweisgrenze lagen und somit als Nullwert bei der Erstellung der Grafik eingingen. Da die Nachweisgrenzen in den einzelnen Schritten jedoch sehr niedrig lagen, ist davon auszugehen, daß sie beim Endergebnis auch nur eine

sekundäre Rolle gespielt hätten. Dies trifft vor allem auf die Elemente Ni und Cu zu, die an sich schon sehr niedrige Gesamtgehalte im Boden aufweisen. Eine qualitative Aussage für das jeweilige Element und dessen bevorzugte Bindungsform ist trotzdem möglich.

Etzdorf, eine Löß-Schwarzerde und Hettstedt, eine Löß-Parabraunerde weisen vergleichbare Tongehalte (25 und 28 %) und C_{org} -Gehalte von 1,9 % und 1,3 % auf. Bei direktem Vergleich der beiden Oberböden erkennt man die deutlich höheren "mobilen" und "leicht nachlieferbaren" Anteile an den Schwermetallen Cu, Zn, Ba und Pb im schwach sauren Boden des Standortes Hettstedt (pH 6,5). Der höchste "mobile" Metallanteil fällt auf das Ba mit etwa 20% (bezogen auf den Gesamtgehalt im Boden), gefolgt von Cu. Zn zeigt den höchsten extrahierbaren "leicht nachlieferbaren" Metallanteil mit 13,4 %, gefolgt von Pb, Cu und Mn.

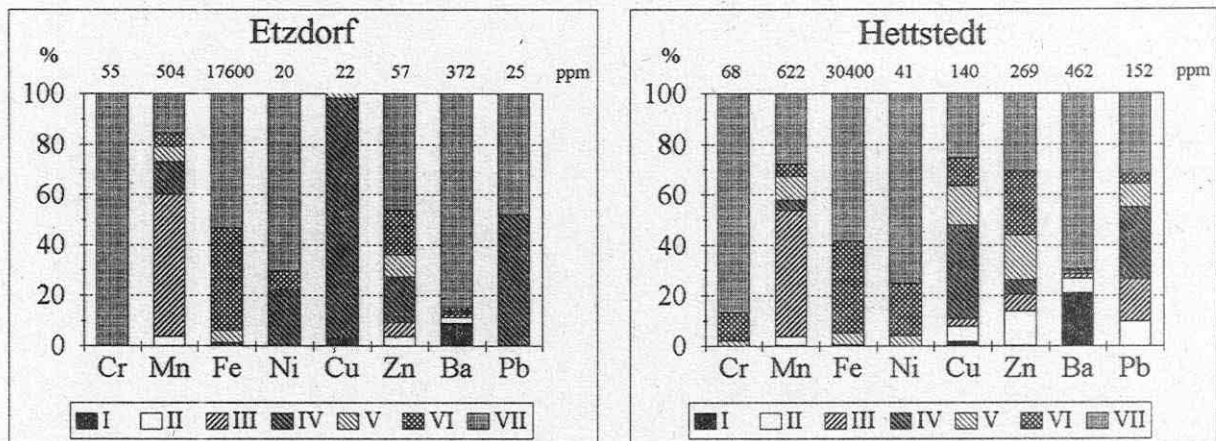


Abb. 5-8: Prozentualer Anteil der einzelnen Fraktionen am Gesamtgehalt zweier Oberböden (Etzdorf: pH-Wert 7,7; Hettstedt: pH-Wert 6,5)

Sowohl Pb als auch Cu sind in beiden Oberböden mit über 30 % bzw. 40 % an die organische Substanz gebunden. Der größte Anteil des Cr und Ni in den Böden der beiden Standorte liegt in sehr schwer löslichen Mineralphasen (Restsubstanz = VII. Schritt) vor. Recht hohe Anteile des Zn, Cu (Hettstedt) und Ni sind in den Fe-Oxiden (V.+VI. Extraktionsschritt) gebunden. Die Mn-Oxidfraktion spielt als Bindungsmöglichkeit für Schwermetalle nur eine untergeordnete Rolle (Ausnahme: Hettstedt mit etwa 15 %).

Die sequentiellen Untersuchungen haben auch gezeigt, daß die Erdalkalimetalle Ca und Mg (hier nicht dargestellt) in sehr hohen "mobilen Anteilen" (I. Extraktionsschritt) in den A_p -Horizonten der Standorte vorliegen. Am Standort Hettstedt werden 76 % des gesamten im Boden befindlichen Ca und 1,3 % des Mg, im Agrarboden aus Etzdorf 27,5 % Ca und 3,3 % Mg freigesetzt. Die hohe Mobilisierbarkeit des Ca durch Ammoniumnitrat (pH-Wert ca. 5,4) zeigt auch sehr deutlich wie schnell aus kalkreichen Böden (durch Flugascheeintrag oder Löß) der Kalk bei schwach sauren Niederschlägen ausgewaschen werden kann, die Pufferwirkung nachläßt und der pH-Wert der Böden dadurch langfristig nicht mehr auf diesem hohen Niveau gehalten werden kann und zu fallen beginnt. Dies würde allerdings auch zu einer Freisetzung von Schwermetallen führen.

In Abb. 5-9 sind für die Elemente Ni, Cu, Zn und Pb an zwei Agrarstandorten des Arbeitsgebietes die Bindungsformen mit zunehmender Bodenprofiltiefe dargestellt. Die Angaben über den Säulen in der Graphik geben die Gesamtgehalte des betreffenden Elementes in der jeweiligen Tiefe an.

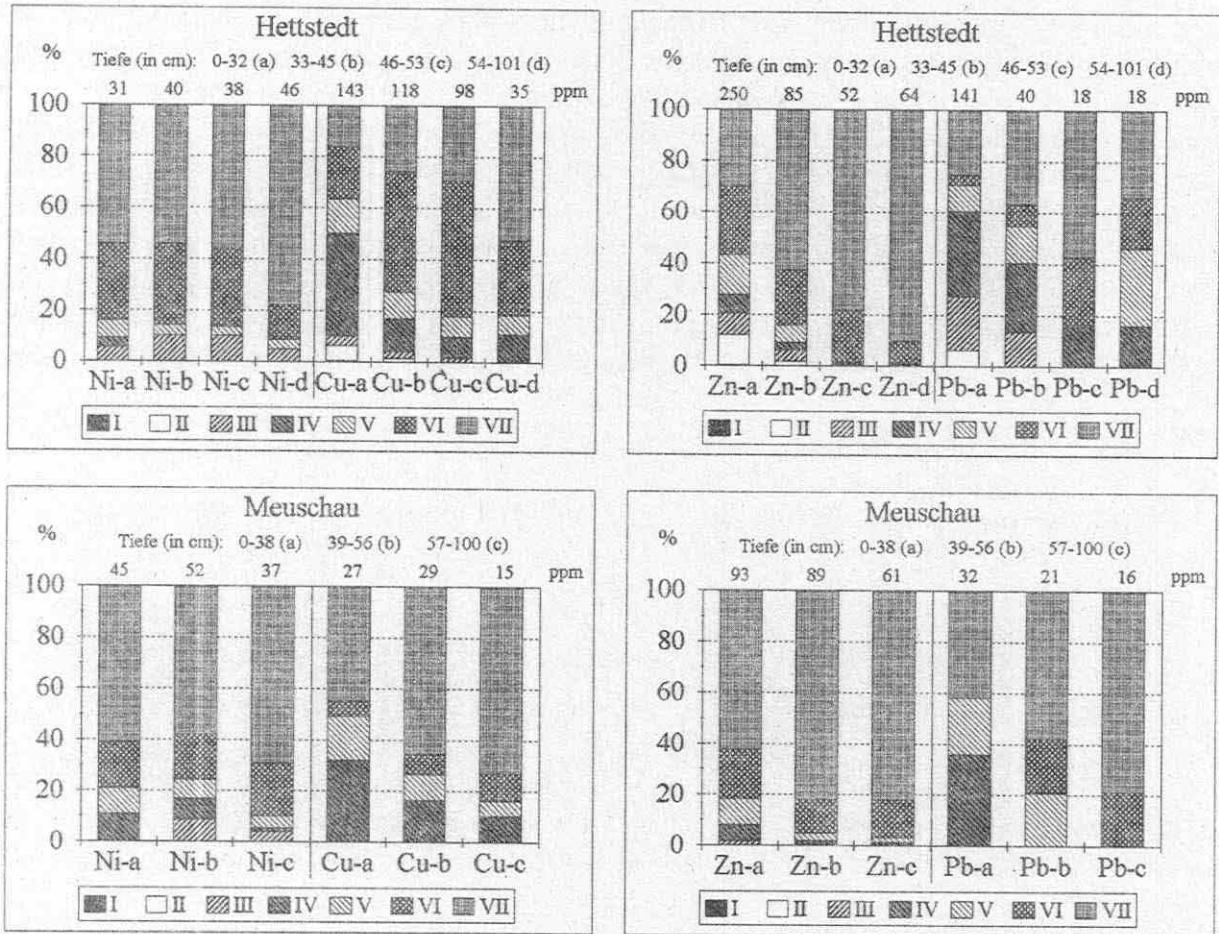


Abb. 5-9: Prozentsualer Anteil der einzelnen Fraktionen am Gesamtgehalt in Abhängigkeit von der Bodenprofiltiefe zweier Schurfe der Agrarstandorte Hettstedt und Meuschau

In beiden Bodenprofilen ist mit zunehmender Tiefe für die Elemente Cu, Zn und Pb ein Rückgang der "mobilen" und "leicht nachlieferbaren" Anteile zu erkennen (Extraktionsschritte I-II). Die an Mn-Oxid gebundenen und organisch gebundenen Anteile (Extraktionsschritte III-IV) gehen ebenfalls zurück zu Gunsten der eisenoxidisch und silikatisch gebundenen Anteile (Extraktionsschritte V-VII). Dies kann durch den ehemaligen Flugstaubeintrag (u.a. Mn) sowie den abnehmenden Gehalt organischen Kohlenstoffes mit zunehmender Tiefe erklärt werden. Ganz unterschiedlich dagegen verhält sich das Element Ni, welches sowohl im Oberboden als auch in größerer Tiefe an beiden Standorten vergleichbare Bindungsformen im Boden aufweist.

5.3.3 Schwermetallgehalte in der Pflanze und Betrachtung des Transferpfades Boden-Pflanze

Die Aufnahme von Schwermetallen durch die Pflanze ist weniger vom Gesamtgehalt der Elemente im Boden als vielmehr von dem pflanzenverfügbaren Anteil abhängig. Um diesen abschätzen zu können, bedarf es der Kenntnis möglicher Bindungsformen der Schwermetalle im Boden. Entscheidend für die Schwermetallaufnahme durch die Pflanze ist die Spezies und die Konzentration, in der das Element in der Bodenlösung vorliegt (ionar, als Chelatkom-

plex), da die Pflanzenwurzeln das Molekül nur bis zu einer bestimmten Teilchengröße aufnehmen können. Hydratisierte Schwermetallkationen haben beispielsweise einen wesentlich kleineren Durchmesser (ca. 1 nm) als Schwermetallchelate (ca. 6 nm), die für eine Aufnahme erst gespalten werden müßten [100]. Weiteren Einfluß auf die Mineralstoffaufnahme durch die Wurzel haben der pH-Wert, der sich infolge von Wurzelausscheidungen und mikrobielle Aktivitäten ändern kann sowie die Temperatur, der Wassergehalt des Bodens und das Bodengefüge [101,102]. Auch pflanzenspezifische Parameter wie Pflanzenart und -sorte, Alter und Wachstumsdauer sind zu beachten. Ein Maß für die Pflanzenverfügbarkeit der Metalle im Boden stellt der von Sauerbeck (1989) errechnete Boden-Pflanze-Transferfaktor dar. Er schwankt jedoch je nach Pflanzen- und Bodenart in einem recht breiten Bereich. Die Berechnung erfolgt aus dem Quotient Gesamtmetallkonzentration der Pflanze zu Gesamtgehalt des Bodens [103]:

$$\text{Transferfaktor (TF)} = \frac{\text{Metallgehalt in der Pflanze (mg/kg TS)}}{\text{Metallgehalt im Boden (mg/kg TS)}}$$

Sind die Schwermetalle einmal in die Pflanze gelangt, unterliegen sie verschiedenen Transportvorgängen (Phloem, Xylem) innerhalb der Pflanze. Hierbei kommt es zu unterschiedlichen Anreicherungen in den einzelnen Pflanzenteilen.

Aus einer Vielzahl von Literaturangaben gibt Sauerbeck (1989) einen zusammenfassenden Überblick über normal in Pflanzen auftretende Gehalte und Konzentrationen, bei denen Wachstumsbeeinträchtigungen der Pflanze einsetzen (Tab. 5-10).

Tab. 5-10: Transferkoeffizient Boden-Pflanze (TF) und kritische Konzentrationen von Schwermetallen im Pflanzenmaterial [103]

Element	Transferkoeffizient (TF) Boden-Pflanze	normal in Pflanzen	kritisch für Pflanzenwuchs	kritisch als Tierfutter
Cr	0,01 - > 0,1	< 0,1 - 1,0	2,0 - 20	50 - 3000
Pb	0,01 - > 0,1	< 0,1 - 5,0	10 - 20	10 - 30
Cu	< 0,1 - > 1	3,0 - 20	15 - 40	10 - 300
Ni	< 0,1 - > 1	< 0,1 - 5,0	20 - 100	50 - 250
Cd	< 1 - > 10	< 0,1 - 1,0	5,0 - 10	0,5 - 1,0
Zn	< 1 - > 10	25 - 150	150 - 500	300 - 1000
V	0,1 - 1	< 0,1 - 2,0	> 10	> 10

Dabei muß allerdings bedacht werden, daß die Angaben für normale Gehalte in Pflanzen stark abhängig vom jeweiligen Bodentyp, der Pflanzenart, dem Pflanzenalter und vom betrachteten Pflanzenorgan sind. Die für den Pflanzenwuchs kritischen Werte stellen nur einen Schwellenwert dar, bei denen die Wachstumshemmung von besonders sensiblen Pflanzenarten beginnt [103-105]. Die Untersuchungen innerhalb dieses Projektes beschränkten sich auf den Weizen (*Triticum aestivum* L.) als Vertreter der Nutzpflanzen. Er gehört im Arbeitsgebiet auf den fruchtbaren Schwarzerdeböden zu den Pflanzen, die am häufigsten angebaut werden. Zu den weiteren wichtigen Nutzpflanzen zählen Rüben, Mais und Gerste. Bestimmt wurden die Schwermetalle in Wurzeln, Blättern, Stengeln und Ähren von Weizenpflanzen an 8 der 14 Standorte (Angaben zu Aufbereitung und Messung siehe Abschnitt 4.2 und 4.5.5).

Tab. 5-11: Durchschnittliche Konzentrationen ausgewählter Metalle im Weizen der 8 Standorte

Elemente	n	MIN	MAX	MW	MED	S	Elemente	n	MIN	MAX	MW	MED	S
<i>Ahre</i>							<i>Stengel</i>						
V	7	< 0,18	< 0,18	----	----	----	V	8	< 0,18	< 0,18	----	----	----
Cr	7	< 0,11	1,20	----	----	----	Cr	8	< 0,11	0,80	----	----	----
Mn	8	16,3	38,5	26,8	25,8	6,20	Mn	8	3,73	50,5	15,2	10,4	14,3
Ni	7	0,30	1,60	0,63	0,45	0,42	Ni	8	< 0,30	3,50	----	----	----
Cu	8	2,44	4,06	3,41	3,50	0,57	Cu	8	1,63	4,13	2,40	2,06	0,82
Zn	8	15,5	40,1	26,0	24,1	7,76	Zn	8	6,40	66,9	20,6	9,89	19,8
Cd	7	< 0,03	0,14	----	----	----	Cd	8	< 0,03	0,52	----	----	----
Ba	8	2,52	10,8	4,57	3,20	2,83	Ba	8	10,9	121	42,7	29,5	35,1
Pb	7	0,17	5,80	1,12	0,30	1,92	Pb	8	0,12	0,50	0,24	0,17	0,13
<i>Blatt</i>							<i>Wurzel</i>						
V	8	< 0,18	1,00	----	----	----	V	7	6,90	24,8	15,2	13,4	6,45
Cr	8	0,50	2,40	1,28	1,25	0,56	Cr	7	12,9	29,0	21,2	22,6	5,05
Mn	8	7,36	100	49,6	40,4	30,7	Mn	7	77,4	159	106	95,0	25,2
Ni	8	1,10	6,60	2,26	1,80	1,69	Ni	7	8,00	18,8	11,2	9,50	3,56
Cu	8	1,88	28,2	6,12	2,87	8,37	Cu	7	5,95	52,9	16,4	8,48	15,6
Zn	8	4,48	67,9	16,5	9,23	19,8	Zn	7	18,2	149	40,7	23,0	44,4
Cd	8	0,04	0,54	0,15	0,07	0,16	Cd	7	< 0,03	1,44	----	----	----
Ba	8	26,3	93,2	51,7	44,5	23,2	Ba	7	33,6	175	102	112	55,8
Pb	8	0,33	5,57	1,66	1,10	1,59	Pb	7	4,13	36,4	10,3	6,27	10,7

n = Anzahl der Proben

MAX = Maximum-Gehalt im Weizen

MED = Median

MIN = Minimum-Gehalt im Weizen

MW = arithmetischer Mittelwert

S = absolute Standardabweichung

V, Cr, Mn Ni, Cu, Zn, Cd, Ba und Pb in mg/kg (bez. auf das Trockengewicht) und bestimmt mit der ICP-AES (Mn, Zn, Ba), ICP-MS (V, Cr, Ni) und flammenlose AAS (Cu, Cd, Pb)

Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Pflanzenuntersuchungen zeigte in einigen Weizenproben für das Korn eine Überschreitung der Richtwerte für Schadstoffe in Lebensmitteln, herausgegeben vom Bundesgesundheitsamt BGA (1993) für die Elemente Pb (BGA-Wert: 0,30 mg/kg bez. auf das Frischgewicht) und Cd (BGA-Wert: 0,10 mg/kg bez. auf das Frischgewicht) [106]. Dies entspricht auf der Basis des Trockengewichtes (Umrechnung durch Ermittlung eines Faktors durch Bestimmung des Wassergehaltes) in etwa einem Wert für Pb von 0,36 mg/kg und für Cd 0,12 mg/kg. Vergleichbare Umrechnungsfaktoren wurden auch von Sauerbeck (1989) ermittelt [103]. Besonders deutlich ist eine Überschreitung der Pb-Richtwerte für die Weizenkörner an den Standorten Etzdorf (5,80 mg/kg) und Hettstedt (0,68 mg/kg) zu sehen. Im Falle des Elementes Cd ist ein nur leicht erhöhter Gehalt im Weizenkorn am Standort Hettstedt zu finden (0,14 mg/kg).

Schwermetalle können auf unterschiedliche Art und Weise durch die Pflanze aufgenommen werden. So unterliegen mobile Spurenelemente, die höhere pflanzenverfügbare Konzentrationen in der Bödenlösung aufweisen (z.B. Zn, Cd), einer stärkeren Aufnahme durch die Pflanzenwurzel. Wenn diese wiederum durch die Wurzelmembran gelangt sind, besteht die Möglichkeit des Transportes in die oberirdischen Pflanzenteile [103]. Andere Elemente können durch atmosphärischen Eintrag über das Blattsystem der Pflanze stärker aufgenommen werden (z.B. Pb, Hg, As). Anhand der umfangreichen analytischen Untersuchungen

konnten für die betrachteten Elemente z.T. charakteristische Elementverteilungen innerhalb der Weizenpflanze erkannt werden (Abb. 5-10).

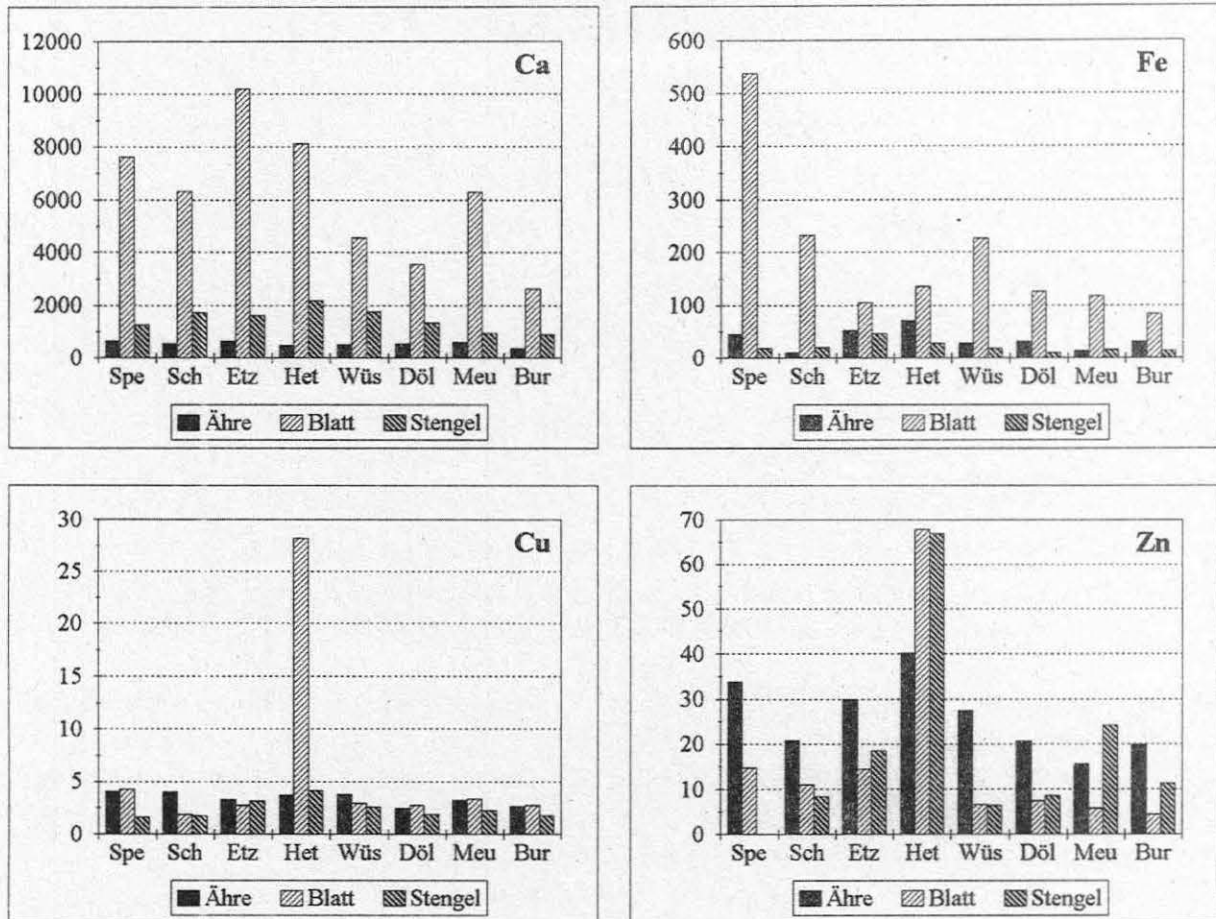


Abb. 5-10: Ca-, Fe-, Cu- und Zn-Gehalte im Weizen (Angaben in mg/kg, bez. auf die Trockensubstanz)

Die höchsten Gehalte des Elementes Zn fanden sich in der Ähre des Weizens wieder (Ausnahme: Hettstedt). Die Elemente Fe, Ca und Mg liegen an praktisch allen Standorten in sehr hohen Konzentrationen im Blatt vor, entsprechend ihren Funktionen innerhalb der Pflanze als Bestandteil der Cytochrome, Protopektine und Chlorophylle [107]. Das Element Cu zeigt im Weizenblatt des Standortes Hettstedt im Vergleich zu den anderen untersuchten Weizenstandorten 5-fach höhere Konzentrationen, was auf den deutlich höheren verfügbaren Cu-Gehalt im Boden (vgl. Abschnitt 5.3.2) zurückzuführen ist. Ausschließlich atmosphärischer Herkunft sind die hohen Pb-Konzentrationen im Blatt aus der Hüttenindustrie in etwa 1 km Entfernung vom Emittent (Hettstedt). Auch Mn, welches in der Pflanze vor allem eine wesentliche Rolle in der Sauerstoffentwicklung bei der Photosynthese spielt, findet man an allen Standorten in überwiegend höheren Gehalten im Blatt, gefolgt von der Ähre und dem Stengel.

Eine Vergleich der Metallgehalte in den jeweiligen Kompartimenten des Weizen mit den Gehalten in Bodenextrakten (I.+II. Extraktionsschritt der sequentiellen Extraktion nach Zeien & Brümmer) bzw. den Bodengesamtgehalten (WDXRF-Messungen sowie S7-Aufschlüsse) zeigten für einige Metalle deutliche Abhängigkeiten. Am ehesten aussagekräftig waren die Korrelationen mit den Bodengesamtgehalten der S7-Aufschlüsse (Abb. 5-11, vgl. auch Abschnitt 6.2). Für die Schwermetalle Zn und Cu ist eine Abhängigkeit zwischen den

Gesamtgehalten in verschiedenen Pflanzenkompartimenten und den Gesamtgehalten im Boden erkennbar. Auch für die Elemente Fe, Mg und Ba korrelieren die Bodengesamtgehalte mit den Gehalten aller Pflanzenkompartimente recht gut. Keine Abhängigkeiten ließen sich für Al und Cr erkennen. Weitere Erläuterungen hierzu entnehme man Abschnitt 6.2.

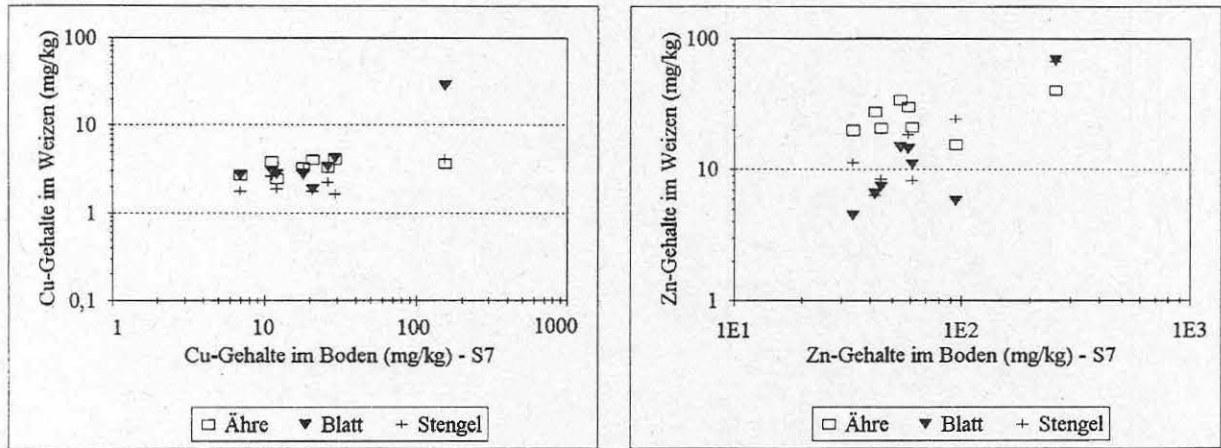


Abb. 5-11: Korrelationen zwischen Bodengesamtgehalten mit Gehalten in den einzelnen Kompartimenten des Weizen am Beispiel der Elemente Cu und Zn

Verbesserte Abhängigkeiten konnten z.T. unter Verwendung der verfügbaren Schwermetallgehalte anstelle der Bodengesamtgehalte festgestellt werden. Es ist jedoch zu bedenken, daß die geringe Gesamtzahl an Weizenpflanzen (8), die für eine Korrelation herangezogen wurden, keine eindeutigen Aussagen getroffen werden konnten. Für eine sinnvolle statistische Auswertung müßten wesentlich mehr Proben berücksichtigt werden.

5.4 Belastung mit organischen Schadstoffen

Die Analyse organischer Spurenstoffe ist, verglichen mit der Messung anorganischer Komponente sehr aufwendig und kostenintensiv. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der wesentlich umfangreicheren Existenz organischer Stoffe in der Umwelt, wobei allein in der Atmosphäre bis heute etwa 2000-3000 organische Spezies identifiziert werden konnten [83]. Zusätzlich ist bei der Untersuchung organischer Schadstoffe eine Betrachtung der Um- und Abbauprodukte nach Möglichkeit mit einzubeziehen.

Aus der Vielzahl existierender umweltrelevanter organischer Substanzen wurde eine Reduzierung und Auswahl auf wenige wichtige Leitschadstoffe und ökotoxikologisch relevante Substanzen aus unterschiedlichen Stoffgruppen vorgenommen. Im einzelnen sind dabei die folgenden Schadstoffe in die Untersuchungen einbezogen worden:

- * *Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, PAH)*
Diese Gruppe umfaßt etwa 40 ökotoxikologisch bedeutsame Verbindungen [108]. Hier wurden die 16 in der Umwelt am häufigsten vorkommenden Vertreter nach EPA 610 ausgewählt. Sie entstehen als Nebenprodukte bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material, in Kokereien oder bei Pyrolyseprozessen [109].
- * *Polychlorierte Biphenyle (PCB)*
Eine Gruppe von insgesamt 209 organischen Verbindungen ähnlicher Struktur [108]. Innerhalb dieses Vorhabens erfolgte eine Bestimmung der PCB-Kongenere nach der Ballschmiter-Nomenklatur [65]. Seit 1972 dürfen sie nur noch in geschlossenen Systemen wie beispielsweise in Transformatoren und Kondensatoren verwendet werden [110]. Außerdem sind sie in Kunststoffolien, Farben, Kleber, Harzen u.a. enthalten.
- * *Chlorphenole*
Diese Gruppe umfaßt 19 Verbindungen, die als Herbizide, Bakterizide, Fungizide, Insektizide und als chemische Zwischenprodukte verwendet werden [108]. Innerhalb dieses Vorhabens wurden an ausgewählten Oberböden die Chlorphenole (2-Chlorphenol, 2,4-Dichlorphenol, 2,4,6-Trichlorphenol und Pentachlorphenol) im Zuge der Phenolbestimmung nach EPA 604 [66] ermittelt.
- * *Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD, PCDF)*
Dabei handelt es sich um diejenigen Chlordibenzo-p-dioxine bzw Chlordibenzofurane, die mehrere Chloratome pro Molekül enthalten. Einige Isomere des PCDD sind besonders toxisch (z.B. 2,3,7,8-Isomer). Sie sind Neben- und Abfallprodukte in der chemischen Industrie, die bei der Herstellung und Verarbeitung chlororganischer Verbindungen entstehen. Zusätzlich können sie auch bei der Verbrennung von Haus- und Sondermüll wie auch in Hochtemperaturprozessen freigesetzt werden [108,110].
- * *1,1-Bis-(4-chlorphenyl)-2,2,2-trichlorethan (p,p'-DDT, im Text zukünftig ausschließlich mit DDT bezeichnet) sowie dessen Metabolite 1,1-Bis-(4-chlorphenyl)-2,2-dichlorethan (p,p'-DDD) und 1,1-Bis-(4-chlorphenyl)-2,2-dichlorethen (p,p'-DDE)*
Das DDT wurde in Deutschland über viele Jahre als Insektizid eingesetzt, ist jedoch seit den siebziger Jahren in Deutschland verboten. In der ehemaligen DDR wurde die Substanz 1983/84 nochmals in einigen Gebieten eingesetzt. Leider wird es auch heute noch in vielen Staaten (meist Drittländer) als Insektizid verwendet.
- * *Hexachlorcyclohexan-Isomere α -, β -, γ - und δ -HCH*
Zu dieser Gruppe der cyclischen Kohlenwasserstoffe gehören acht Stereoisomere, wobei das bekannteste das Insektizid Lindan (γ -HCH) ist. Es wurde großtechnisch in Magdeburg und Bitterfeld über viele Jahre hinweg produziert. Bis in die siebziger Jahre wurde technisches HCH (65-70 % α -HCH, 7-10 % β -HCH, 14-15 % γ -HCH, etwa 7 % δ -HCH und 1-2 % ϵ -HCH) in der BRD eingesetzt. Die Rückstände aus der

Lindanproduktion lagern heute in riesigen z.T. ungesicherten Sondermülldeponien im Landkreis Bitterfeld und stellen dadurch ein enormes ökotoxikologisches Problem dar (z.B. Deponie Antonie).

* *Hexachlorbenzol (HCB)*

Diese Substanz, die als Fungizid bei der Saatgutbehandlung sowie als Holzschutzmittel verwendet wird, ist ein Vertreter der Chlorbenzole. Daneben wird es als Zusatzstoff für pyrotechnische Erzeugnisse, bei der PVC-Herstellung sowie bei der Herstellung von Gummi eingesetzt [108].

Für die Interpretation der Belastung mit organischen Schadstoffen in den Agrarböden wurden wie schon bei den anorganischen Stoffen nationale wie internationale Richt- und Grenzwerte herangezogen (Tab. 5-12).

Tab. 5-12: Richt- und Grenzwerte sowie Hintergrundwerte für organische Schadstoffe in Böden (Angaben in µg/kg Boden) [89,111]

Substanz	VwV Organische Schadstoffe ¹¹¹		HL-BO ⁸⁹	
	Hintergrundwert	Belastungswert	Referenzwert S	Interventionswert I
PAK (Σ)	*1000	*10000	**1000	**40000
Benzo(a)pyren	100	1000	-----	-----
PCB (Σ)	***13	***300	****20	****1000
PCB 28	1	50	-----	-----
PCB 52	1	50	-----	-----
PCB 101	2	50	-----	-----
PCB 138	3	50	-----	-----
PCB 153	3	50	-----	-----
PCB 180	3	50	-----	-----
PCDD/PCDF	2 ng TE/kg Boden	40 ng TE/kg Boden	-----	-----
DDT/DDD/DDE	15	100	2,5	4000
HCH (Σ)	4	150	-----	2000
α-HCH	1	50	2,5	-----
β-HCH	1	50	1	-----
γ-HCH (Lindan)	2	50	0,05	-----
HCB	2	50	2,5	-----
Chlorphenole	-----	-----	-----	10000

Der Belastungswert der VwV Organische Schadstoffe [111] entspricht dem Belastungswert für Böden zum Schutz von Nahrungs- und Futterpflanzen sowie von Tieren (Aufnahme von Bodenmaterial).

* = Summe der 16 PAKs nach EPA 610 [63]

** = Summe von 10 PAKs (Anthracen, Benz[a]anthracen, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[a]pyren, Chrysen, Phenanthren, Fluoranthren, Ideno[1,2,3-cd]pyren, Naphthalin, Benzo[ghi]perylene [89])

*** = Summe der 6 PCBs nach Ballschmiter (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) [65]

**** = Summe der 7 PCBs (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) nach der HL-BO [89]

Im Anhang A-9 bis A-12 sind die Gehalte vollständig aufgelistet. Auf die VwV Organische Schadstoffe wurde deshalb zurückgegriffen, da die Prüf- und Belastungswerte in dieser

Vorschrift erst nach Berücksichtigung bestimmter Gesichtspunkte (Bodentyp: Gehalt an organischer Substanz, Tongehalt; Nutzungs- und schutzgutorientierte Werte; ökotoxikologisch-toxikologische Aspekte) festgelegt wurden.

5.4.1 Darstellung der Gesamtbelastung

In den 14 untersuchten Agrarstandorten des Arbeitsgebietes sind verschiedene organische Schadstoffgruppen nach wie vor in leicht erhöhten Konzentrationen in den Oberböden feststellbar (Tab. 5-13). Sie sind auf die mehrere Jahrzehnte umfassende Verwendung sowie industrielle Aktivitäten in den Räumen Bitterfeld, Leuna und Schkopau zurückzuführen. Durch die z.T. hohe Persistenz einiger Substanzen sind die Stoffe oder deren Metabolite auch heute noch im Boden nachweisbar. Weitere Einflüsse auf die Gehalte in den Böden hatten die Emissionen aus Mülldeponien und der Metallverarbeitenden Industrie. Es ist nicht auszuschließen, daß für die erhöhten organischen Schadstoffgehalte teilweise auch die Pestizidausbringung in der Vergangenheit und Klärschlammgaben verantwortlich sind.

Tab. 5-13: Durchschnittliche Gehalte an organischen Schadstoffen in den A_p-Horizonten (Rasterproben) der Standorte (Angaben der Gehalte in µg/kg)

Stoffgruppe / Substanz	n	MIN	MAX	MW	MED	S
Σ PAK (10 nach HL-BO)*	14	214	1706	519	329	427
Σ PAK (EPA 610, aber ohne Acenaphtylen)	14	292	2595	732	438	638
Benzo[b]fluoranthen	14	4,09	198	58,0	58,4	46,9
Benzo[a]pyren	14	11,9	193	41,4	22,8	49,8
Σ PCB (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180)	13	0,90	10,5	3,05	2,00	2,43
Σ p,p'-DDT, p,p'-DDD, p,p'-DDE	11	23,7	173	72,0	64,2	47,2
p,p'-DDT	11	13,7	87,1	39,4	38,1	24,0
Σ HCH (α-, β-, γ- und δ-HCH)	11	4,64	11,5	7,53	6,79	2,39
γ-HCH (Lindan)	11	1,54	5,60	3,16	2,70	1,21
HCB	11	0,57	3,75	1,58	1,16	0,96
Σ Phenole (nach EPA 604)	8	1,84	587	98,3	33,3	186
Phenol	8	1,70	39,0	21,1	24,9	69,8
2-Chlorphenol	8	0,01	1,96	-----	-----	-----
2,4-Dichlorphenol	8	0,02	9,32	1,85	0,16	87,0
2,4,6-Trichlorphenol	8	0,38	26,1	-----	-----	-----
Pentachlorphenol	8	2,9	447	-----	-----	-----

n = Anzahl der Proben

MAX = Maximum-Gehalt im Boden

MED = Median

MIN = Minimum-Gehalt im Boden

MW = arithmetischer Mittelwert

S = absolute Standardabweichung

* entsprechend der Holl.Liste gehören dazu die PAKs Naphthalin, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthen, Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Benzo[ghi]perylen und Ideno[1,2,3-cd]pyren [89]

Ein Vergleich der Richtwerte, die in der Holländischen Liste für ausgewählte organische Schadstoffe angegeben sind, zeigt für die Standorte des Untersuchungsgebietes eine geringe Überschreitung der Referenzwerte (S) für PAKs und HCB, eine stärkere für die DDT-Gruppe

und die HCH-Isomere. Die Interventionswerte werden jedoch in keinem Fall überschritten. In Abb. 5-12 und 5-13 sind die Ergebnisse der Gehalte in den A_p -Horizonten der Rasterproben an PAKs (Σ aus 15) und der Σ DDT, DDD und DDE in Karten dargestellt.

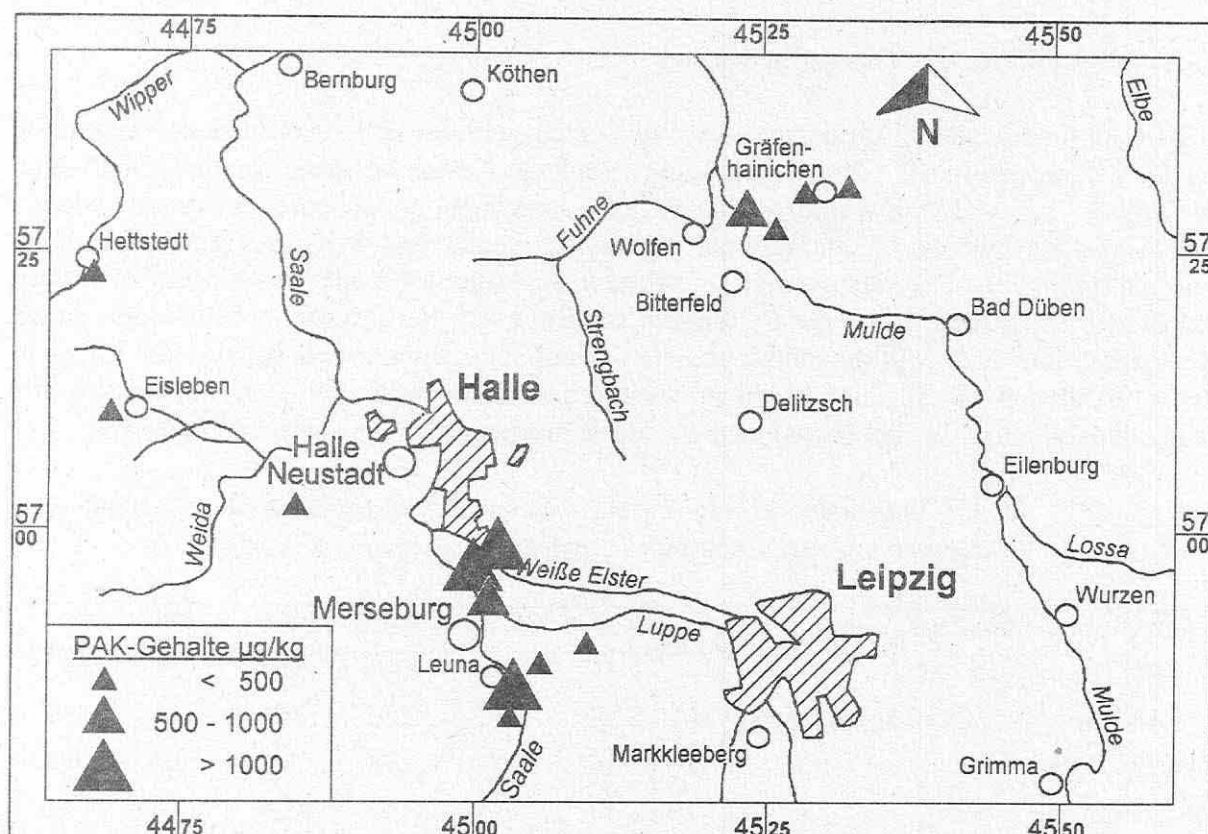


Abb. 5-12: PAK-Gehalte (Σ 15 PAKs, nach EPA 610 aber ohne Acenaphthylen) in den A_p -Horizonten der Rasterproben (Angaben in $\mu\text{g/kg}$)

Erhöhte PAK-Konzentrationen lassen sich vor allem an den Standorten Leuna (1212 $\mu\text{g/kg}$), Schkopau (2595 $\mu\text{g/kg}$) und Döllnitz (1669 $\mu\text{g/kg}$) nachweisen. Die Standorte Leuna und Schkopau befinden sich in Emittentennähe. Durch den anteilmäßig höheren partikelgebundenen Transport der PAKs findet eine Deposition dieser Stoffgruppe in näherer Umgebung der Quelle statt. Die erhöhten Gehalte, die in dieser Größenordnung ausschließlich in den Oberböden wiederzufinden sind, können auf die ehemaligen Kraftwerke und die chemische Industrie zurückgeführt werden. Bei dem Standort Döllnitz sind die Hauptquellen vermutlich in einer Mülldeponie (etwa 2 km ENE gelegen, damit eigentlich der windabgewandten Seite) und in der Düngung zu suchen.

Ein natürliches Vorkommen der Substanz p,p'-DDT ist nicht bekannt. Die Konzentrationen, die infolge der Persistenz (Halbwertszeiten im Boden zwischen 3 und 20 Jahren) auch heute noch in den Böden gefunden werden können, sind anthropogenen Ursprungs [112]. Dies betrifft und führt natürlich auch zu erhöhten Gehalten an Metaboliten dieser Stoffe im Bodensystem. Die Bodengehalte aller 14 Standorte liegen deutlich über den Hintergrundwerten, teilweise (Günthersdorf, Zschornowitz) sogar über den Belastungswerten für Böden zum Schutz von Nahrungs- und Futterpflanzen sowie von Tieren (Aufnahme von Bodenmaterial) entsprechend der VwV Organische Schadstoffe Baden-Württemberg [111].

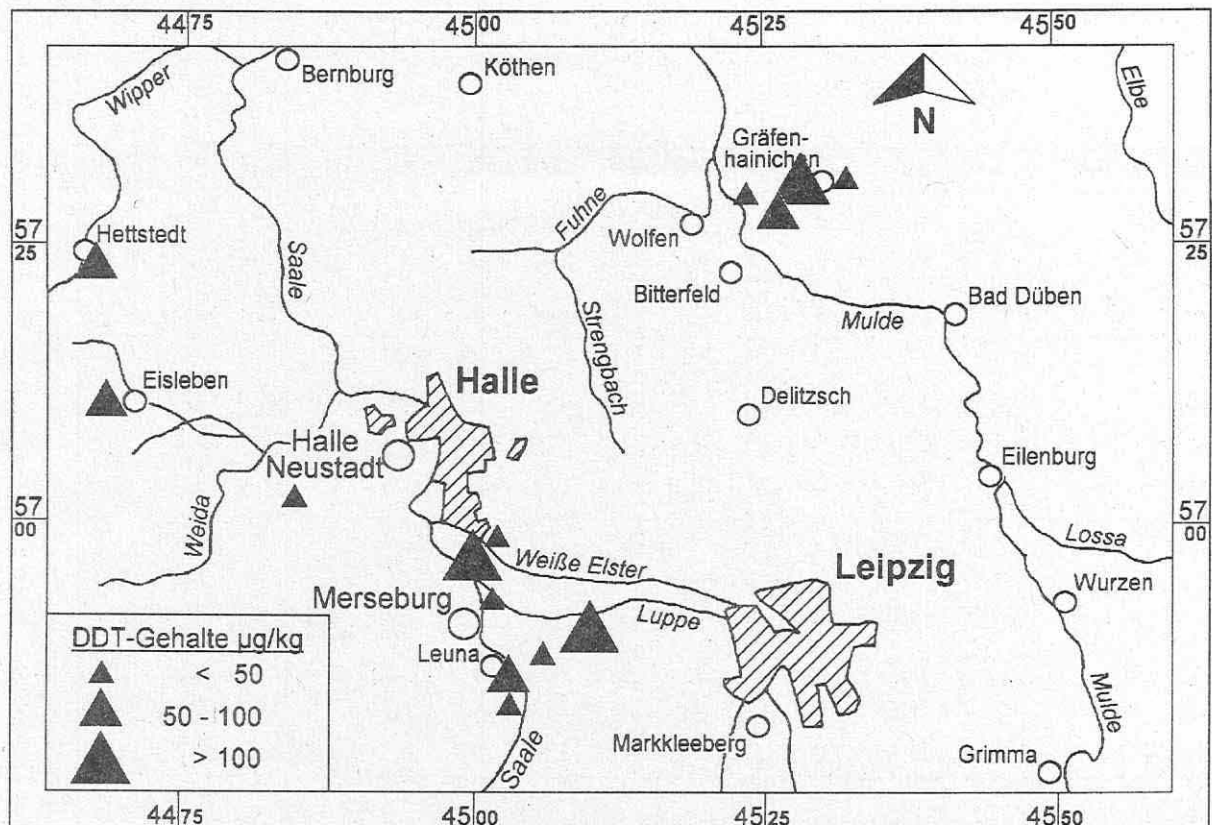


Abb. 5-13: DDT-Gehalte (Σ aus DDT, DDD und DDE) in den A_p-Horizonten der Rasterproben sowie bei Spergau, Schkopau und Etzdorf in den Weizenböden (Angaben in µg/kg)

Die anderen Xenobiotika wie die HCH-Isomere und HCB haben nur eine geringfügige Erhöhung der Referenzwerte bzw. Hintergrundwerte erkennen lassen. Dioxin und Furanuntersuchungen in den Oberböden der Standorte Leuna, Spergau, Wüsteneutzsch und Burgkennitz erbrachten für den Boden Konzentrationen, die im normalen Bereich liegen (0,063-0,45 ng iTE/kg Boden).

Anhand der prozentualen Verteilung der einzelnen Substanzen innerhalb der jeweiligen Stoffgruppen konnten für einige Standorte Beziehungen zu den Emittenten hergestellt werden (Tab. 5-14).

Tab. 5-14: Prozentuale Anteile einzelner organischer Substanzen innerhalb einer Stoffgruppe ($\sum \text{DDT} / \text{DDE} / \text{DDD} = 100 \%$, $\sum \text{HCH-Isomere} = 100 \%$ und $\sum \text{PCBs} = 100 \%$)

Xenobiotika	Leu	Spe	Sch	Etz	Alt	Gün	Grä	Zsc	Eis	Het	Wüs	Döl	Meu	Bur
p,p'-DDT	<u>67,5</u>	<u>28,8</u>	<u>36,9</u>	<u>34,1</u>	<u>52,5</u>	<u>37,9</u>	<u>56,5</u>	<u>54,6</u>	<u>57,5</u>	<u>94,8</u>	<u>34,3</u>	<u>44,4</u>	<u>57,6</u>	<u>58,3</u>
p,p'-DDE	3,74	19,1	0,99	11,0	9,63	3,23	6,35	9,94	16,5	1,37	3,44	3,33	6,11	3,31
p,p'-DDD	<u>28,7</u>	<u>52,1</u>	<u>62,1</u>	<u>54,9</u>	<u>37,9</u>	<u>58,9</u>	<u>37,2</u>	<u>35,5</u>	<u>26,0</u>	<u>3,80</u>	<u>62,3</u>	<u>52,3</u>	<u>36,3</u>	<u>38,4</u>
α -HCH	1,65	3,75	-----	4,21	2,91	6,48	6,48	2,86	0,86	6,51	-----	4,18	4,60	26,9
β -HCH	<u>49,9</u>	<u>42,2</u>	-----	<u>49,5</u>	<u>52,9</u>	<u>46,2</u>	<u>49,3</u>	<u>31,5</u>	<u>19,6</u>	<u>36,4</u>	<u>44,7</u>	<u>32,3</u>	<u>30,5</u>	<u>38,9</u>
γ -HCH	<u>38,4</u>	<u>42,5</u>	-----	<u>41,6</u>	<u>31,4</u>	<u>35,8</u>	<u>29,3</u>	<u>48,5</u>	<u>77,4</u>	<u>45,4</u>	<u>38,4</u>	<u>51,3</u>	<u>52,3</u>	26,6
δ -HCH	10,0	11,6	-----	4,67	12,8	11,5	14,9	17,1	2,16	11,7	16,9	12,2	12,6	7,69
PCB 28	4,17	5,01	0,62	16,7	17,0	5,16	16,8	8,93	7,37	4,09	9,47	8,27	3,66	<u>32,6</u>
PCB 52	3,39	6,26	8,02	10,7	6,60	11,3	11,9	15,2	9,47	7,02	10,1	8,27	7,33	11,4
PCB 101	20,1	11,5	15,4	13,1	13,7	13,6	12,9	11,2	12,6	<u>44,4</u>	<u>39,1</u>	20,3	<u>53,4</u>	9,74
PCB 138	<u>34,1</u>	<u>36,7</u>	<u>30,9</u>	<u>26,2</u>	<u>30,2</u>	<u>31,0</u>	<u>30,7</u>	<u>28,6</u>	<u>34,7</u>	<u>18,7</u>	<u>17,8</u>	<u>27,1</u>	<u>15,2</u>	<u>21,4</u>
PCB 153	<u>26,8</u>	<u>28,6</u>	<u>27,8</u>	<u>23,8</u>	<u>24,1</u>	<u>26,3</u>	<u>23,8</u>	<u>25,9</u>	<u>25,3</u>	17,5	17,2	<u>26,3</u>	14,1	17,5
PCB 180	11,5	11,9	17,3	9,52	8,49	12,7	3,96	10,3	10,5	8,19	6,51	9,77	6,28	7,31

XX = größter prozentualer Anteil innerhalb der Schadstoffgruppe

XX = zweitgrößter Anteil innerhalb der Schadstoffgruppe

Am deutlichsten ist dies an den hohen prozentualen Anteilen des p,p'-DDT und γ -HCH in den Agrarböden der Standorte Hettstedt und Eisleben zu sehen. Sie sind auf Neueinträge dieser Substanzen aufgrund der Kupferkabelverschrottung und -verbrennung in Hettstedt zurückzuführen. Die Kupferkabel wurden in der Vergangenheit mit einer Schutzhülle beschichtet, die den Nagerfraß an den Kabeln weitgehend verhindern sollte. Sie enthält eine Kombination aus den Substanzen DDT und Lindan. Bestätigt wurden diese Untersuchungsergebnisse durch Bestimmung der Konzentrationen im Weizen (Het-W) sowie durch Messungen in weiteren Vegetationsvertretern (Kiefer, Birke und Eiche) im näheren Umfeld des Standortes [85]. Auffällig sind auch die hohen prozentualen Anteile an DDTs in den Oberböden Leunas. Der Standort Burgkernitz ist durch wesentlich höhere α -HCH-Anteile im Oberboden sowie PCB 28 gekennzeichnet. Die Ursache hierfür liegt in möglichen Neueinträgen durch die Verflüchtigung dieser Substanzen aus den Sondermülldeponien um Bitterfeld (z.B. Antonie), da sich der Standort Burgkernitz in der weiteren Abwindfahne dieser Deponien befindet.

5.4.2 Mobilität im Boden

Die Adsorption organischer Schadstoffe am organischen Kohlenstoff des Bodens ist ein wesentlicher Parameter, um Aussagen über die Mobilität / Festlegung einer bestimmten Substanz treffen zu können. Für die Abschätzung des Adsorptionskoeffizienten (K_{oc}) am organischen Kohlenstoff des Bodens gibt es zahlreiche Korrelationen [113,114], die hierfür herangezogen werden können. Der Octanol-Wasser-Verteilungskoeffizient (K_{ow}) als Schlüsselparameter für diese Abhängigkeiten ist allerdings für sehr hydrophobe Substanzen mit relativ großen Unsicherheiten behaftet [71].

Aus diesem Grunde wurde für ausgewählte Substanzen (Vertreter der PAKs, PCBs) mit relativ unsicheren K_{ow} -Werten eine indirekte Bestimmung entsprechend der OECD-Richtlinie 117 vorgenommen [69]. Die eingesetzten Referenzsubstanzen mit abgesicherten K_{ow} -Werten sowie die Ergebnisse für die einzelnen Testsubstanzen sind im Anhang A-14 aufgeführt. Unter Benutzung der Kalibriergeraden wurde das Vertrauensintervall der ermittelten K_{ow} -Werte nach Draper & Smith (1981) berechnet [115]. Der relative Fehler liegt bei durchschnittlich etwa 5 % (letzte Spalte in A-14).

Die Untersuchungen zur K_{oc} -Wertermittlung wurden an drei Böden aus dem Untersuchungsgebiet durchgeführt, die nach Möglichkeit unterschiedliche, entsprechend der OECD 106 charakteristische Gehalte organischen Kohlenstoffes und Tones sowie einen bestimmten pH-Wert aufwiesen. Die folgenden Böden aus dem Untersuchungsgebiet wurden hierfür eingesetzt:

- * Oberboden des Standortes Gräfenhainichen (*M-Grä-a*)
($C_{org} = 1,94$ %; Tongehalt = 7,36 %; pH-Wert = 5,40)
- * Oberboden des Standortes Eisleben (*M-Eis-a*)
($C_{org} = 1,22$ %; Tongehalt = 13,0 %; pH-Wert = 6,42)
- * Oberboden des Standortes Wüsteneutzsch (*M-Wüs-a*)
($C_{org} = 2,05$ %; Tongehalt = 20,8 %; pH-Wert = 7,33)

Als Organika wurden die für das Arbeitsgebiet interessanten ^{13}C -markierten und unmarkierten Substanzen γ -HCH, Phenanthren und PCB 28 eingesetzt. Die Substanzen weisen mit Ausnahme von HCH sehr geringe Wasserlöslichkeiten auf. Dadurch war die Anzahl der für die Erstellung von Adsorptionsisothermen notwendigen Versuche mit unterschiedlichen Konzentrationen begrenzt. Die hier aufgeführten ersten Ergebnisse geben einen Eindruck über das Sorptionsverhalten der drei ausgewählten Substanzen an den drei Versuchsböden. Durch die geringen Eingangskonzentrationen bei Phenanthren und PCB 28 schwankten die Ergebnisse in größerem Maße als bei γ -HCH. Folgende Ergebnisse konnten aus den Versuchen gewonnen werden:

- * Die Ergebnisse der Ad- und Desorptionsversuche (je 24 Stunden Schüttelzeit) bestätigte die hohen Adsorptionsraten und niederen Desorptionsraten aller drei Substanzen in den drei unterschiedlichen Böden (Tab. 5-15). Die eingesetzte Konzentration entsprach etwa der halben Löslichkeit der betreffenden Substanz (γ -HCH 3,9 $\mu g/l$, Phenanthren 0,45 $\mu g/l$ und PCB 28 0,13 $\mu g/l$).

Tab. 5-15: Prozentuale Ad- und Desorptionsraten von γ -HCH, Phenanthren und PCB 28 der drei Versuchsböden (Gräfenhainichen, Eisleben und Wüsteneutzsch)

Versuchsböden	Gräfenhainichen				Eisleben				Wüsteneutzsch			
	Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
	M	UM	M	UM	M	UM	M	UM	M	UM	M	UM
γ -HCH	98,2	97,2	9,0	11,8	79,9	79,6	5,2	7,7	83,0	81,3	6,5	9,7
Phenanthren	98,0	98,7	3,3	1,9	97,9	98,3	7,5	9,1	98,7	98,2	-----	0,1
PCB 28	92,9	99,5	-----	1,0	96,2	98,7	-----	1,3	96,8	99,0	-----	0,9

Versuchsbedingungen: Siehe OECD-Richtlinie 106 (Preliminary Test); Schüttelzeit 24 Stunden; Zugabe der Substanzen zu den Böden in 0,01 M $CaCl_2$ -Lösung; eingesetzte Konzentration entsprach der $\frac{1}{2}$ Löslichkeit der jeweiligen Substanz; die Ergebnisse der Versuche sind arithmetische Mittelwerte aus 3 Versuchen; zur Kontrolle wurde markierte Substanz des jeweiligen Stoffes zugesetzt; M = markiert; UM = unmarkiert

Die größten Unterschiede zeigt die Substanz γ -HCH im Adsorptionsverhalten an den drei Versuchsböden. Die höchste Adsorption und Desorption findet man an der Braunerde aus Gräfenhainichen, gefolgt von der Schwarzerde aus Wüsteneutzsch und der Braunerde-Parabraunerde von Eisleben. Im Falle von Phenanthren und PCB 28 findet man bei der Adsorption kaum Unterschiede. Sie liegen in allen Fällen deutlich über 90 %. Betrachtet man dagegen die Desorptionsraten, so fällt auf, dass bei diesen beiden Substanzen die größten Desorptionsraten im Boden aus Eisleben auftreten, dem Boden mit dem geringsten organischen Kohlenstoffgehalt.

- * Durch den Einsatz verschiedener Schüttelzeiten (0,5, 1, 5, 24 und 72 Stunden) wurden die Unterschiede im Adsorptionsverhalten der betreffenden Substanzen noch deutlicher. Während das Sorptionsmaximum bei γ -HCH im allgemeinen erst nach fünf oder mehr Stunden Schütteldauer erreicht war, reichte bei Phenanthren und PCB 28 bereits eine Stunde aus.
- * Ein ähnliches Verhalten wurde auch bei den konzentrationsabhängigen Versuchen beobachtet (einsetzen 1/5 der vorherigen Konzentrationen). Das γ -HCH zeigte die höchste Adsorption allerdings erst nach mindestens 24 Stunden Schütteldauer, für Phenanthren und PCB 28 war diese zwischen einer und fünf Stunden erreicht.
- * Eine Errechnung des K_{OC} -Wertes aus den Adsorptionsisothermen war aufgrund zu weniger Eingangskonzentrationen noch nicht möglich, jedoch eine Abschätzung aus den Adsorptions-/Desorptionsversuchen mit Eingangskonzentrationen in der halben Löslichkeit der Substanzen und 24 Stunden Schütteldauer.

Aus den Versuchen ließen sich für die einzelnen Substanzen die folgenden $\log K_{OC}$ -Werte ermitteln, indem der erhaltene Adsorptionskoeffizient auf den Gehalt des Bodens an organischen Kohlenstoff bezogen wurde (Tab. 5-16):

Tab. 5-16: Vergleich von Literaturwerten (zitiert in Sabljic et al. 1995) und experimentell ermittelten $\log K_{OC}$ -Werten (OECD 106) [114]*

	Literatur	**Mittelwert		Gräfenhainichen		Eisleben		Wüsteneutzsch	
	[115]	M	UM	M	UM	M	UM	M	UM
γ -HCH	3,00	3,48	3,40	4,15	3,95	3,21	3,21	3,08	3,03
Phenanthren	4,28	4,21	4,49	4,12	4,58	4,23	4,48	4,28	4,42
PCB 28	4,62	-----	4,55	-----	4,74	-----	4,51	-----	4,41

* Es wurden nur Werte verwendet, wenn mindestens zwei experimentelle Ergebnisse vorlagen

** Mittelwert = arithmetischer Mittelwert aus den Untersuchungen an den drei Versuchsböden

M = markierte Substanz

UM = unmarkierte Substanz

Trotz der geringen Löslichkeit der Substanzen und der damit verbundenen analytischen Schwierigkeit, die geringen Gehalte an diesen Substanzen im Eluat nachzuweisen, sind noch weitere Versuche in Planung. Es werden die Untersuchungen zum Adsorptionsverhaltens an den Versuchsböden noch mit 1-2 weiteren Eingangskonzentrationen (bezüglich des eher wasserlöslichen γ -HCHs) fortgeführt.

5.4.3 Organische Schadstoffe in der Pflanze und Betrachtung des Schadstofftransfers Boden-Pflanze

An 5 der 14 Agrarstandorte (Schkopau, Hettstedt, Wüsteneutzsch, Döllnitz und Burgkernitz) konnten die Gehalte ausgewählter Xenobiotika (DDTs, PCBs, HCHs, HCB und 5 PAK) in der Pflanze ermittelt werden. Durch diese Untersuchungen waren auch Vergleiche mit anderen Vegetationsvertretern in belasteten Gebieten wie beispielsweise Hettstedt möglich [85]. Bisher existieren jedoch für Pflanzen und insbesondere dem Weizen wenig Richt- und Grenzwerte, die für eine Bewertung der Stoffkonzentrationen herangezogen werden können (z.B. Futtermittelverordnung 1988) [116]. Somit wurde auf eine ausführliche Bewertung der Belastung diesbezüglich verzichtet. In Tab. 5-17 sind die durchschnittlichen Gehalte sowie einige statistische Parameter aufgelistet.

Tab. 5-17: Durchschnittliche Gehalte an organischen Schadstoffen (Summenparameter) in der Weizenpflanze (Angaben in $\mu\text{g/kg}$, bezogen auf die Trockensubstanz)

	n	MIN	MAX	MW	MED	S		n	MIN	MAX	MW	MED	S
<i>Ähre</i>							<i>Stengel</i>						
DDTs	4	0,08	11,3	2,95	0,18	4,85	DDTs	5	0,18	37,9	9,57	1,07	14,5
HCHs	4	nn	1,24	----	----	----	HCHs	5	4,14	53,2	25,2	16,2	17,6
PCBs	4	0,88	10,6	4,72	3,70	3,85	PCBs	5	4,35	6,94	5,51	5,86	0,97
PAKs	4	2,60	16,7	8,15	6,64	5,67	PAKs	5	12,9	70,3	46,7	44,8	21,8
HCB	4	nn	nn	----	----	----	HCB	5	nn	0,41	----	----	----
<i>Blatt</i>							<i>Wurzel</i>						
DDTs	5	0,11	8,73	3,75	3,44	3,01	DDTs	5	16,2	247	70,7	28,9	88,1
HCHs	5	nn	17,2	----	----	----	HCHs	5	7,59	104	30,4	12,3	36,9
PCBs	5	nn	19,7	----	----	----	PCBs	5	1,85	11,9	6,13	6,19	3,42
PAKs	5	4,93	84,1	39,2	36,1	25,6	PAKs	5	20,3	118	77,2	83,6	32,6
HCB	5	nn	0,33	----	----	----	HCB	5	0,26	2,50	0,85	0,46	0,83

n = Anzahl der Proben

MAX = Maximum-Gehalt im Weizen

MED = Median

DDTs = p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD

PCBs = PCB 28, 52, 101, 138, 153 und 180

MIN = Minimum-Gehalt im Weizen

MW = arithmetischer Mittelwert

S = absolute Standardabweichung

HCHs = α -HCH + β -HCH + γ -HCH + δ -HCH

PAKs = Phenanthren, Anthracen, Fluoranthen, Pyren und Benzo[a]pyren

Die PAK-Gehalte in den Pflanzenkompartimenten Blatt und Stengel überschreiten an allen Standorten die für Pflanzen angegebenen normalen durchschnittlichen PAK-Konzentrationen von 10-20 $\mu\text{g/kg}$ (bez. auf das Trockengewicht) [108]. Die Futtermittelgrenzwerte [116, zitiert in 112] für die Substanzen HCB (10 $\mu\text{g/kg}$), α -HCH (20 $\mu\text{g/kg}$), β -HCH (10 $\mu\text{g/kg}$), γ -HCH (200 $\mu\text{g/kg}$), p,p'-DDT (50 $\mu\text{g/kg}$) und für die Σ PCBs (50 $\mu\text{g/kg}$) werden an keinem der untersuchten Standorte mit Ausnahme Hettstedts (α -HCH in Wurzel und β -HCH in Stengel und Wurzel) erreicht. Auffällig sind auch die etwas hohen Gehalte an p,p'-DDT und besonders p,p'-DDE in der Wurzel des Weizens in Schkopau. Es ist jedoch bei den Wurzeluntersuchungen nicht ganz auszuschließen, daß kleinere noch anhaftende Bodenpartikel die Ergebnisse verfälschen können.

Untersuchungen zur Stoffverteilung innerhalb der Pflanze zeigten nahezu an allen Standorten bei den PAKs, HCHs und DDTs die geringsten Gehalte in der Ähre. Der atmosphärische Eintrag von DDT sowie HCH in Hettstedt wird auch an den Ergebnissen der Pflanzenuntersuchungen ersichtlich (Abb. 5-14, vgl. auch Abschnitt 5.4.1).

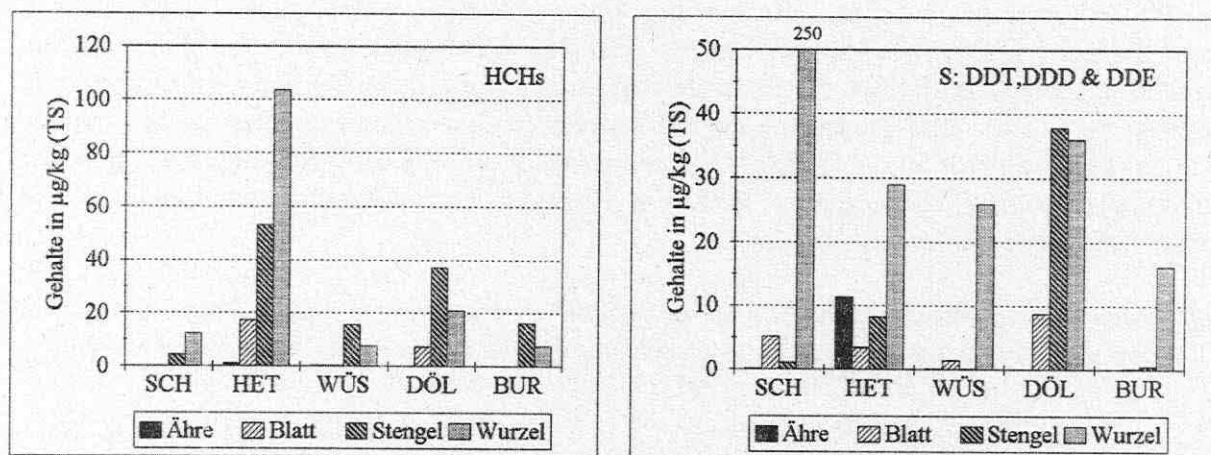


Abb. 5-14: HCHs- und DDTs im Weizen

Dies wird auch aus den wesentlich höheren PCB-Gehalten im Blatt des Weizens (Hettstedt) deutlich (Abb. 5-15). Desweiteren fielen die sehr hohen DDT-Gehalte in der Wurzel am Standort Schkopau (250 µg/kg) auf. Im Vergleich zu den Weizengehalten der anderen Standorte weist der Döllnitzer Weizen wesentlich höhere Konzentrationen an DDT, PCB und HCH im Stengel sowie höhere DDT und HCH-Gehalte in den Blättern auf.

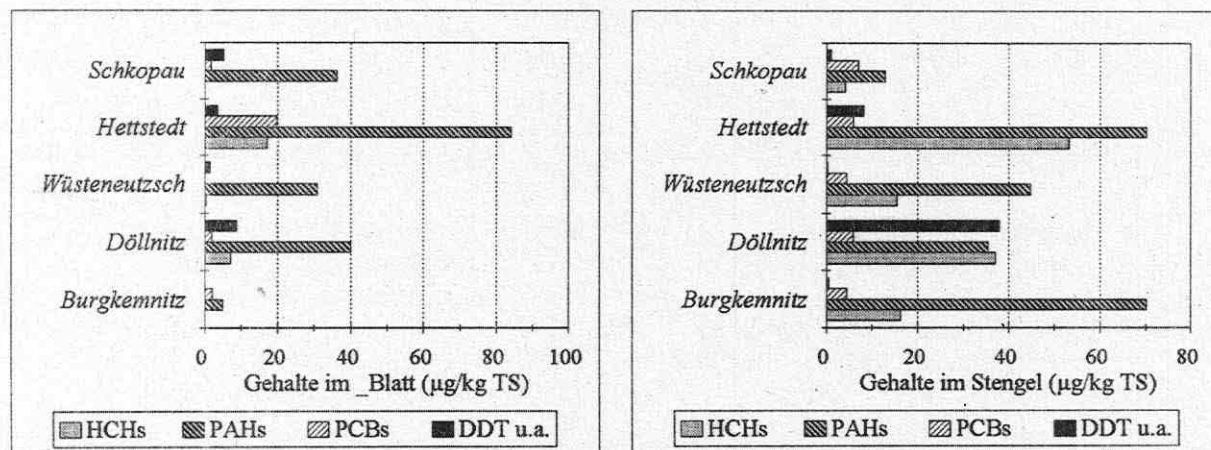


Abb. 5-15: HCHs, DDTs, PCBs und PAKs im Blatt und Stengel des Weizens

Die Ursachen könnten in der in etwa 1-2 km Luftlinie in östlicher Richtung gelegenen Mülldeponie bei Lochau zu suchen sein. Über die Abhängigkeit der Bodengesamtgehalte zu den Weizengehalten wird ausführlich in Abschnitt 6.2 eingegangen.

6. Anwendung theoretischer Methoden

6.1 Regionales Expositionsmodell

(Dr. Breitkopf, Dr. Manz, UFZ-Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Die Langzeitverteilung ausgewählter Organika wurde mit Hilfe des Fugazitätskonzeptes nach Mackay abgeschätzt [23]. Über die Einführung regionalspezifischer Parameter ist ein globales Mackay-Modell an das Untersuchungsgebiet angepaßt worden. Das vorliegende Modell besteht aus vier Haupt- (Luft, Wasser, Boden, Sediment) und drei Nebenkompartmenten (Partikel-Luft, Partikel-Wasser, Fisch) und berücksichtigt sowohl Reaktionen als auch Transportprozesse in den Kompartimenten. Unter Annahme eines stationären Fließgleichgewichts wird für die vier Hauptkompartimente eine Massenbilanz formuliert und das resultierende lineare Gleichungssystem zur Berechnung der Fugazitäten gelöst. Als Ergebnis erhält man steady-state Konzentrationen, die die Verteilung zwischen den Kompartimenten wieder spiegeln. Zusätzlich können Austauschraten für den Transport zwischen den Kompartimenten abgeschätzt werden [23,117].

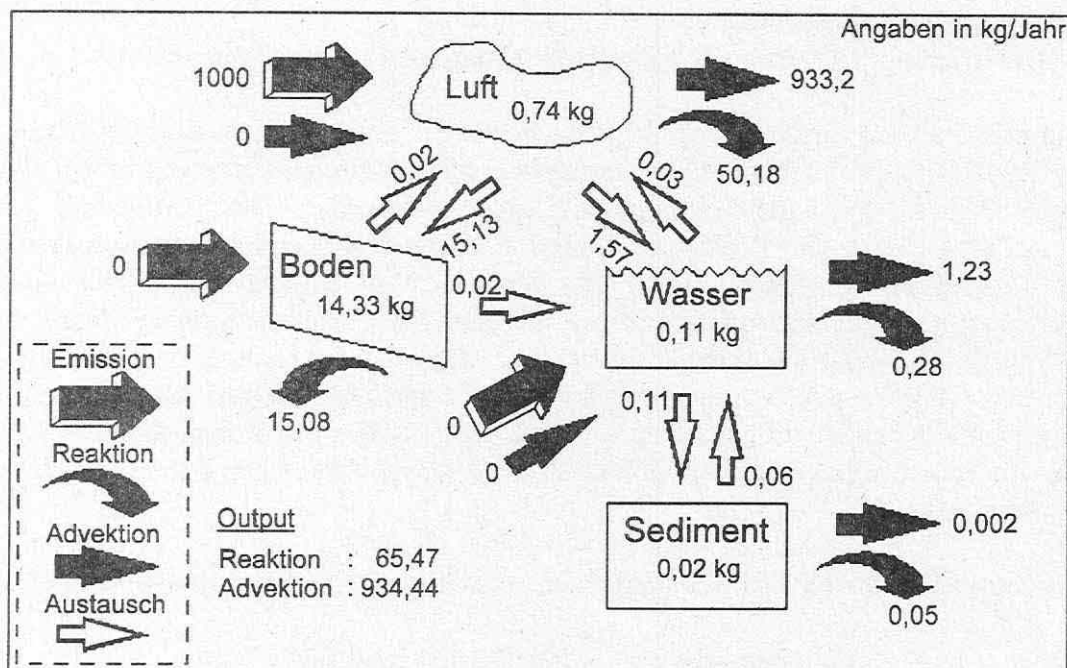
Als Eingangsparameter für das Regionalmodell wurden folgende Werte verwendet :

*	Volumen [m ³]	Mächtigkeit bzw. Höhe [m]
	Luft: $1,85 \cdot 10^{12}$	500
	Wasser: $5,55 \cdot 10^8$	5
	Boden: $1,07 \cdot 10^9$	0,3
	Sediment: $3,33 \cdot 10^6$	0,03
*	Verweilzeit der Substanz:	7 Stunden
*	meteorologische Parameter:	Windgeschwindigkeit 3 m/s
		Durchschnittliche Lufttemperatur 9°C
	Nach Auswertung der Klimadaten [118] für das Gebiet wurde mit einem minimalen Niederschlag (Westteil des Gebietes) und einem maximalen Niederschlag (Ost-Nordostteil des Gebietes) sowie einer etwa konstanten Verdunstungshöhe modelliert.	
	Niederschlag:	460 / 550 mm
	Verdunstung:	450 mm
	Unter der Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte resultierten daraus die Werte für den Oberflächenabfluß und Evaporationsanteil.	
*	Gehalt an organischer Bodensubstanz	1-4%
*	Transportparameter für den Transfer zwischen den Kompartimenten [23]	
*	berechnete physikochemische Daten (P, H) für die durchschnittliche Jahrestemperatur von 9°C	

Da für das vorliegende Gebiet keine Emissionsdaten für die Chlororganika vorlagen, wurde als erste Näherung mit einer konstanten Emissionsrate von 1000 kg/Jahr gerechnet. Aus der Kombination von Emission (je in Luft und Boden), meteorologischen Bedingungen (Regenmenge) und Gehalt an organischem Kohlenstoff ergaben sich verschiedene Szenarien, die den Ausgangspunkt für die Berechnungen darstellten.

- * maximaler Regen (550 mm) mit für das Gebiet typischen C_{org} -Gehalten von 1-4 %
- * minimaler Regen (460 mm) mit für das Gebiet typischen C_{org} -Gehalten von 1-4 %
- * Emission der Substanz: in Luft mit 1000 kg/Jahr oder in Boden mit 1000 kg/Jahr

Die folgenden Abbildungen stellen anhand des γ -HCH repräsentativ die berechneten steady-state Verteilungen schematisch dar.



* Schema entnommen aus Mackay et al. 1991 [119]

Abb. 6-1: Input-Output Gegenüberstellung für γ -HCH für das Szenario minimaler Niederschlag und wenig C_{org} (z.B. Spargau mit $C_{org} = 2\%$ und 460 mm Niederschlag) bei konstanter Emission in das Kompartiment Luft

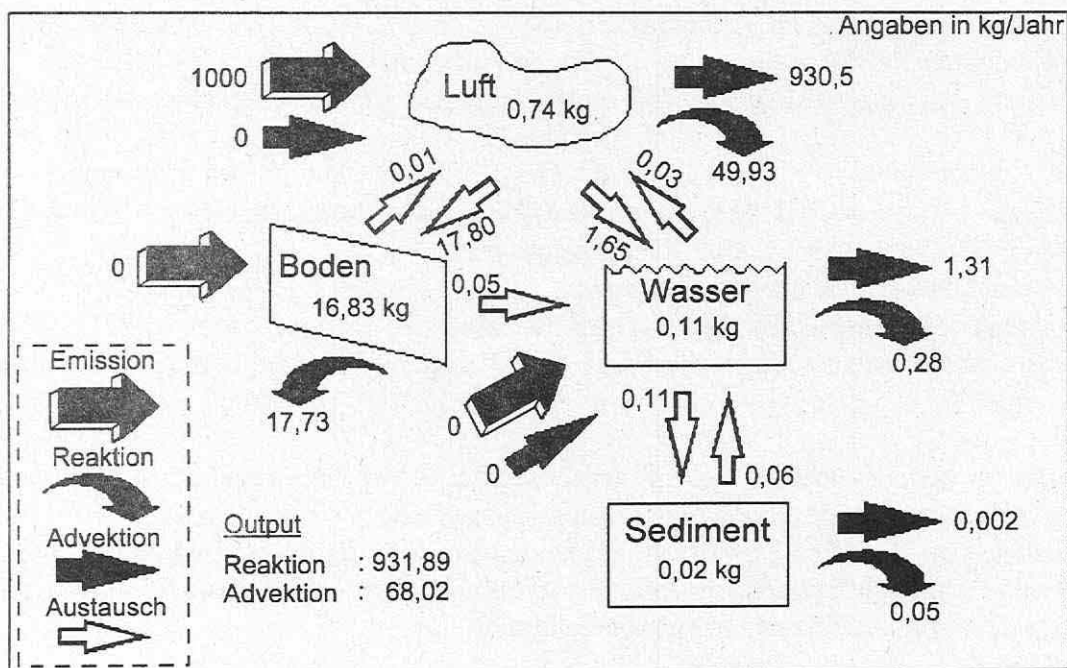


Abb. 6-2: Input-Output Gegenüberstellung für γ -HCH für das Szenario maximaler Niederschlag und viel C_{org} (z.B. Zschornowitz mit $C_{org} = 4\%$ und 550 mm Niederschlag) bei konstanter Emission in das Kompartiment Luft

Bei einem Vergleich der beiden Standorte, die sich in ihrem Gehalt an C_{org} im Boden und dem klimatologischen Parameter "Regen" unterscheiden (bei gleichen Emissionen von 1000 kg/Jahr), werden im Kompartiment Luft gleiche steady-state Mengen in Höhe von 0,74 kg γ -HCHs erreicht, wobei die berechneten Konzentrationen bei $c_{spe} = 397 \text{ pg/m}^3$ und $c_{zsc} = 396 \text{ pg/m}^3$ liegen. Der Hauptanteil des emittierten HCH wird aus beiden Gebieten über advective Prozesse abtransportiert (>900 kg/Jahr). Das Szenario Spergau zeigt dabei gegenüber dem Szenario Zschornowitz eine höhere Belastung für benachbarte Gebiete (3 kg bei einer auf 1000 kg bezogenen Emission). Hier kommt im wesentlichen der Einfluß der verschiedenen jährlichen Regenmengen zum Ausdruck. Neben der Advektion spielen jedoch auch der Abbau durch Reaktion in der Luft (50 kg/Jahr) und der Transfer Luft-Boden (15 kg) eine Rolle für die resultierende Gesamtverteilung.

Das Kompartiment Boden stellt in den Modellrechnungen für beide Standorte das am meisten belastete Kompartiment dar. Der Vergleich der berechneten steady-state Mengen im Boden zeigt hier für Spergau eine um 2,5 kg geringere Belastung des Bodens. Insgesamt läßt sich anhand der Modellierungen ein Trend feststellen, der mit den gemessenen Werten korreliert, d.h. Spergau weist niedrigere Konzentrationen auf als Zschornowitz:

	C_{Boden} berechnet	C_{Boden} gemessen
Spergau	$2,66 \cdot 10^{-5} \text{ g/m}^3$	2,83 ng/g
Zschornowitz	$3,14 \cdot 10^{-5} \text{ g/m}^3$	5,60 ng/g

Neben dem Einfluß des Gehaltes an C_{org} kann für den Standort Zschornowitz zusätzlich eine höhere Emissionsbelastung als Ursache für die höheren gemessenen Werte diskutiert werden (Einflußbereich der Deponiestandorte um Bitterfeld).

Die hier aufgezeigten Ergebnisse der Modellierung für zwei Standorte stellen eine erste Näherung dar, mit der wesentliche Transportprozesse aufgezeigt und im Vergleich gegenübergestellt werden können. Dabei sind nur relative Aussagen von Belang. Wesentlich für eine realistischere Auswertung, d.h. für einen direkten Vergleich von berechneten und gemessenen Konzentrationswerten, sind Emissionsdaten.

6.2 Interpretation der Ergebnisse mittels statistischer Methoden

(Dr. Kühne, Dr. Manz, Sektion Chemische Ökotoxikologie)

Die bodenspezifischen Parameter sowie die Boden- und Pflanzengesamtgehalte anorganischer und organischer Schadstoffe wurden mittels multivariater statistischer Verfahren ausgewertet. Hierbei wurde die Hauptkomponentenanalyse (PCA, *Principal Component Analysis*) und die PLS-Regression (*Partial Least Squares*) eingesetzt. Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wird eine vieldimensionale Matrix durch Linearkombination auf einige wenige Parameter reduziert. Durch Auftragen dieser Linearkombinationen (Hauptkomponenten) wird versucht, eine Klassifizierung der Untersuchungsobjekte durchzuführen. In der PLS-Analyse werden dagegen neue Hauptkomponenten gebildet, die eine optimale Zuordnung zu einer Zielfunktion ermöglichen. Die Zielfunktion kann wiederum aus mehreren Variablen bestehen, wobei diese dann ebenfalls in Hauptkomponenten transformiert werden. Damit ist die PLS-Regression im Gegensatz zur multiplen linearen Regression in der Lage, auch bei gegenseitigen Abhängigkeiten von Eingabeparametern Informationen über den Zusammenhang von Eingabe- und Zielwerten zu liefern. Mit Hilfe dieser Methode sollen Aussagen zu möglichen Aufnahmewegen der Schadstoffe und zur Relevanz der gemessenen Bodenparameter bezüglich der Schadstoffgehalte in der Pflanze getroffen werden.

In die statistische Auswertung gingen die folgenden Parameter ein:

- * Gesamtgehalte an anorganischen und organischen Schadstoffen im Boden
- * Gesamtgehalte an anorganischen und organischen Schadstoffen in der Pflanze (Stengel, Blatt und Ähre)
- * Boden-pH-Wert
- * Humusgehalt ($C_{org} \cdot 1,72$)
- * Tongehalt
- * Wassergehalt
- * Gehalt an anorganischen Kohlenstoff (C_{anorg})
- * Gesamtstickstoffgehalt (N_{ges})
- * potentielle Kationenaustauschkapazität (CEC)
- * Interpolierte Emissionsdaten für Schwermetalle des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt [81]

Aufgrund der im Sinne der Statistik kleinen Anzahl an Standorten erschien eine *quantitative* Auswertung nicht sinnvoll. Deshalb werden im folgenden mit Hilfe der multivariaten Verfahren abgeleitete *qualitative* Aussagen vorgestellt.

Mittels der *Hauptkomponentenanalyse* konnten folgende Klassifizierungen festgestellt werden:

- A. In erster Linie sind die Standorte an Hand der Bodenparameter in drei Gruppen aufzuteilen.
1. Gruppe: Spe, Sch, Etz, Het, Wüs und Meu
 2. Gruppe: Gün, Grä, Eis, Döl, Bur
 3. Gruppe: Leu, Alt, Zsc
- Die Unterscheidung wird vorwiegend durch den Tongehalt, Humusgehalt und pH-Wert hervorgerufen. Gruppe 1 weist einen hohen Ton- und Schluffgehalt, einen mittleren Humusgehalt und mit Ausnahme von Hettstedt einen hohen pH-Wert auf. Dies wird auch aus den Kornsummenkurven (Abb. 5-1, Kap.5-2) deutlich. Gruppe 2 und 3 sind durch tiefere pH-Werte und Tongehalte gekennzeichnet. Gruppe 2 weist einen geringen und Gruppe 3 einen sehr hohen Humusgehalt auf.
- B. Die vom Landesamt für Umweltschutz 1995 ermittelten Emissionsdaten [81] für Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Ni, As, Cu und Zn) ergeben folgendes Immissionsmuster: Standort Hettstedt und bedingt auch Standort Eisleben nehmen eine deutliche Sonderstellung ein, die in ihrer noch teilweise aktiven Hüttenindustrie begründet zu sein scheint. Die übrigen Standorte lassen sich einer gemeinsamen Gruppe zuordnen, wobei sich allerdings eine systematische lineare Aufreihung ergibt:
Gün - Meu - Leu/Spe - Etz - Grä - Sch/Döl - Bur/Alt - Zsc
- Diese Reihe wird wesentlich durch steigende Cr-Gehalte charakterisiert. Das Cr nimmt eine Sonderstellung ein, die vermutlich durch frühere Chromat-Herstellung im Bitterfelder Raum begründet werden kann.
- C. Die untersuchten Oberböden des Arbeitsgebietes sind aufgrund ihrer Bodenbelastungen (anorganische Stoffe) in 2 Gruppen einzuteilen, wobei die 1. Gruppe (Leu, Spe, Sch, Etz, Wüs, Meu) nahezu der 1. Gruppe der Bodenparameter (A) entspricht. In die 2. Gruppe ordnen sich im wesentlichen die Standorte der Bodengruppe 2+3 (A) ein (Alt, Gün, Grä, Zsch, Döl, Bur) ein. Hettstedt und Eisleben fallen aufgrund der hohen Emissionen (B) völlig aus der Zuordnung heraus. Im Unterboden sind keine eindeutigen Gruppierungen mehr erkennbar, was wiederum vermutlich auf die in den vergangenen Jahren überwiegend atmosphärisch bedingten Einträge im Oberboden

zurückzuführen ist. Nur Hettstedt zeigt ein deutlich anderes Belastungsmuster im Unterboden.

Die Schadstoffgehalte in den Weizenkompartimenten wurden an acht Standorten (Spe, Sch, Etz, Het, Wüs, Döl, Meu, Bur) mit den Bodenparametern (pH-Wert, Ton- und Humusgehalt, Wassergehalt, C_{anorg} , N_{ges} und CEC) und den Metallgehalten im Boden mit Hilfe der PLS-Analyse korreliert. Für die organischen Schadstoffe standen zur jetzigen Zeit nur Pflanzkonzentrationen von fünf Standorten zur Verfügung (Sch, Het, Wüs, Döl, Bur). Im einzelnen erbrachte die *PLS-Analyse* mit den Weizenstandorten folgende Ergebnisse:

A. *Metalle:*

Die Auswertungen wurden mit den Gesamtgehalten in den Oberböden der Rasteruntersuchungen durchgeführt, da sie eine flächenhafte Belastung der Standorte repräsentieren und vergleichbar mit den Ergebnissen der Wurzelböden waren. Hierbei kamen neben den Bodenparametern die Gehalte aus den Röntgenfluoreszenzanalysen (WDXRF), die Gehalte aus den S7-Aufschlüssen nach DIN 38414 sowie die effektiven Schwermetallgehalte (umgerechnet nach der Holländischen Liste [89] unter Berücksichtigung der Ton- und Humusgehalte) als Eingangsdaten zur Anwendung. Dabei erwiesen sich die S7-Metallgehalte als am aussagekräftigsten. Die folgende Diskussion bezieht sich deshalb auf die Korrelation dieser Gehalte und der Bodenparameter mit den Gehalten in den jeweiligen Kompartimenten der Pflanze. Die Wurzel wurde in die Betrachtung nicht mit einbezogen wegen der relativ großen Unsicherheiten bezüglich beispielsweise anhaftenden Bodenmaterials, welches von der Wurzel nur schwer zu entfernen ist.

- * Die deutlichsten Zusammenhänge zwischen der Eingabematrix (insgesamt) und den Pflanzengehalten ließen sich für Zn nachweisen (vgl. Abschnitt 5.3.3), gefolgt von Fe, Cd und Mg. Weniger starke Korrelationen ergaben sich für Ba, Cu, Al und Pb, nur sehr schwache Zusammenhänge für Ca, Na, K und Cr.
- * Starke Korrelationen zwischen Bodengesamtgehalten und Pflanzengehalten wurden für Zn, Cd, Cu und Pb gefunden, was mit der mit Ausnahme von Pb hohen Verfügbarkeit der Elemente zu erklären ist. Das überraschende Ergebnis für das Element Pb könnte an den hohen Pb-Gehalten im Boden Hettstedts und den dort relativ hohen verfügbaren Anteilen liegen (vgl. Abschnitt 5.3.2). Darüber hinaus erwiesen sich der organische Kohlenstoffgehalt (Humus), N_{ges} und etwas weniger deutlich der pH-Wert als wesentlich. Diese Abhängigkeiten sind generell bezüglich des Blattes und des Stengels im Weizen festzustellen, was auf eine Aufnahme über die Wurzel hindeutet. Für die Ähre wurden diese Abhängigkeiten bedingt für Cd und Zn festgestellt.
- * Mittelstarke Abhängigkeiten zwischen den Gesamtgehalten im Boden und in der Pflanze zeigten die Elemente Fe, Mg und Ba für alle Kompartimente gleichermaßen (Ähre, Blatt, Stengel). Als weitere signifikante Parameter sind der anorganische Kohlenstoffgehalt, der Wassergehalt und bedingt auch der Tongehalt zu nennen.
- * Für die Elemente Al und K wurde festgestellt, daß kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Bodengesamtgehalten und Pflanzengehalten besteht. Die Daten für die Elemente Cr, Na und Ca ließen keine statistisch sichere Auswertung zu.
- * V wurde überhaupt nur im Blatt in Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze gefunden. Verantwortlich dafür könnte das Emissionsgeschehen sein.

B. Organische Schadstoffe

Für die organischen Schadstoffe sind die Korrelationen allgemein weniger deutlich als für die Metalle ausgefallen. Dies liegt zum einen an der geringen Probenzahl. Außerdem gingen in die statistische Auswertung die Konzentrationen der Wurzelböden ein, da aus Kostengründen eine zusätzliche Bestimmung der Oberböden aus den Rasteruntersuchungen nicht möglich war. Dafür wurden die Bodenparameter der Rasterproben verwendet. Zusätzlich sind bei organischen Schadstoffen Störungen der Korrelationen durch Prozesse wie beispielsweise Bioabbau möglich. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse dieser Auswertung statistisch etwas weniger abgesichert.

- * Die Gruppe der PCBs und DDTs zeigte eine starke Korrelation zwischen Schadstoffgehalten im Boden und im Stengel des Weizen. Das deutet auf eine Aufnahme durch den Boden-Wurzel-Pfad hin. Für die Ähre und das Blatt wurde eine deutlich schwächere (PCBs) bzw. keine (DDTs) Korrelation gefunden. Ursachen könnten beispielsweise im zusätzlichen Aufnahmepfad Luft-Pflanze liegen.
- * Für die anderen zwei Stoffgruppen (HCHs, PAKs) wurde keine (HCHs) bzw. nur eine schwache (PAKs) Korrelation festgestellt.
- * Als wesentliche Bodenparameter erwiesen sich für das Blatt der Ton- und der organische Kohlenstoffgehalt (Humus), sowie N_{ges} für den Stengel.

7 Zusammenfassung

Hauptziel dieses Vorhabens war eine Untersuchung mobiler und bioverfügbarer Schadstoffe in agrarisch genutzten Böden emittentennaher Standorte Sachsen-Anhalts. An den Böden erfolgte neben einer Bestimmung bodenspezifischer Parameter zur Charakterisierung des Bodentyps die Ermittlung der anorganischen und organischen Belastungssituation sowie die Untersuchungen des Mobilisierungsverhaltens von Schwermetallen aus den Agrarböden an Hand verschiedener Extraktionsverfahren. Durch Einbeziehung des Weizens in das Untersuchungsprogramm wurde versucht, eine Abschätzung des möglichen Boden-Pflanze Transfers anorganischer und organischer Substanzen zu geben. Verschiedene multivariate statistische Verfahren wurden angewandt, um Abhängigkeiten und Aufnahmewege besser identifizieren und beschreiben zu können.

Die ermittelten anorganischen und organischen Schadstoffgehalte in den Böden des Arbeitsgebietes weisen Konzentrationen auf, die meist über den für Böden angegebenen Hintergrundwerten liegen. Durch den starken Rückgang der industriell bedingten Schwermetalleinträge, der kalkhaltigen Flugstäube sowie der organischen Schadstoffeinträge aus der chemischen Industrie ist auch zukünftig von diesen Emittenten her kaum mit einem Anstieg dieser Substanzen zu rechnen. Neueinträge sind jedoch über andere Quellen auch zukünftig noch möglich (Emissionen aus dem KfZ-Verkehr, Deponien u.a.).

In einigen Standorten des Untersuchungsgebietes sind erhöhte Bodengehalte vor allem bezüglich der umweltrelevanten Elemente Pb, Zn, Cu, Cd und Cr sowie der Metalle Ba und Zr anzutreffen. Hauptbelastungspunkte sind hierbei Hettstedt und Eisleben (Cu, Zn, Pb, Cd) sowie Altjeßnitz und Zschornewitz (Cd). Sie sind jedoch durch eine meist geringe Mobilität und Verfügbarkeit in den Böden gekennzeichnet. Gründe hierfür sind die optimalen pH-Bedingungen (pH 5,4-7,8), die organischen Kohlenstoffgehalte sowie die häufig hohen Tongehalte, die für eine stärkere Sorption der Schadstoffe verantwortlich sind. Auch im Falle der organischen Schadstoffe (PAKs, HCB, wesentlich deutlicher DDTs und HCHs) werden die für Böden angegebenen Referenzwerte [89] an einigen Standorten überschritten. Die Interventionswerte (I) werden jedoch wie auch bei den Schwermetallen in keinem Fall

erreicht. Für den Weizen liegen die Pb- und Cd-Gehalte im Korn an den Standorten Hettstedt und Etzdorf z.T. deutlich über den Richtwerten für Pb und Cd des Bundesgesundheitsamtes (1993) [106]. Die Ergebnisse der organischen Schadstoffuntersuchungen im Weizen erbrachten PAK-Konzentrationen über den normal für Pflanzen angegebenen Werten [108], jedoch keine Überschreitung der Grenzwerte, die in der Futtermittelverordnung für einige Substanzen angegeben sind [117].

An den Böden wurden sequentielle Extraktionen nach Zeien & Brümmer (1989) zur Charakterisierung der Bindungsformen von Schwermetallen durchgeführt. Erwartungsgemäß lagen die Elemente Cr, Ni, Ba, und Fe in hohen Anteilen schwer löslicher Verbindungen vor. Cu und Pb sind unabhängig vom Bodentyp in großen Anteilen an die organische Substanz gekoppelt (> 20 %). Das Element Pb findet sich allerdings zusammen mit Zn auch an der Mn-Oxid-Fraktion und zusammen mit Zn, Cu und Ni in der Fe-Oxid/Hydroxid-Fraktion wieder. Die mobilen, verfügbaren und leicht nachlieferbaren Metallanteile (I.+II. Extraktionsschritt) liegen in den schwach basischen Böden Leunas, Schkopaus und Etzdorfs für das Element Cu bei 2-13 %. Erhöhte mobile Gehalte sind auch in den Standorten Eisleben und Hettstedt für Pb, Cu und Zn anzutreffen.

Ein Boden-Pflanze-Transfer ließ sich aufgrund der nur geringen Standortanzahl von 5 (organische Schadstoffe) bzw. 8 (anorganische Schadstoffe) für alle Stoffe nur schwer nachweisen. Für Zn, Cu und Pb, bedingt auch für Fe, Mg und Ba konnte mittels statistischer Verfahren (PLS-Analyse) eine Abhängigkeit der Bodengesamtgehalte (Ergebnisse aus den S7-Untersuchungen) mit den Gehalten in der Pflanze festgestellt werden. Eine recht gute Korrelation konnte auch für die Gruppe der PCBs und DDTs jedoch nur bezüglich der Schadstoffaufnahme in den Stengel nachgewiesen werden.

Durch die Anwendung eines Expositionsmodelles (Level III) nach Mackay auf das 3700 km² umfassende Untersuchungsgebiet war eine Bestimmung der Schadstoffverteilung, hier am Beispiel für γ -HCH berechnet, auf die unterschiedlichen Kompartimente innerhalb des Ökosystems (Luft, Wasser, Boden, Sediment) durch variierende Eingangsparameter (Niederschlag, Gehalt an organischem Kohlenstoff im Oberboden) möglich.

In dieser Arbeit wurde der Einfluß der über viele Jahre bestanden schadstoffgeprägten Immissionssituation auf agrarisch genutzte Standorte emittentennaher und emittentenferner Testflächen dargestellt und deren Gefährdungspotential aufgezeigt. Durch die Umstrukturierung, Modernisierung und Stilllegung vieler Industriebetriebe sowie der auf Braunkohlenbasis betriebenen Großkraftwerke kam es zu einem drastischen Rückgang des Eintrages kalkhaltiger Flugstäube und zu einer Verminderung der Schadstoffeinträge ins Ökosystem. Heute überwiegen in diesem Industrieraum säurebildende Emissionen, die langfristig die kalkhaltigen Oberböden neutralisieren und zu einer Freisetzung und Verlagerung der Schwermetalle führen können. Unterstützt wird dieser Vorgang durch das Fehlen von Sorbenten (organische Substanz, Ton u.a.) in den Böden. Durch eine regelmäßige Kalkung landwirtschaftlich genutzter Flächen kann einer Mobilisierung der Schwermetalle entgegengewirkt werden.

Auf alle Fälle sollten durch regelmäßige Kontrolluntersuchungen und Gegenmaßnahmen mögliche Verlagerungen von Schwermetallen in tiefere Bodenbereiche vorgebeugt werden.

Danksagung

Für die Mitarbeit bei der Durchführung der Feldarbeiten danke ich Herrn K.-U. Seyfarth, Frau J. Krüger und Frau Dipl.-Ing. A. Sperreuter. Für die Durchführung der bodenphysikalischen, bodenchemischen sowie analytischen Untersuchungen in der Sektion Chemische Ökotoxikologie gilt mein Dank Frau J. Krüger, Frau Dipl.-Ing. A. Sperreuter, Frau Dipl.-Ing. A. Pfennigsdorff, Frau Dipl.-Ing. M. Heinrich, Frau B. Mothes und Frau M. Petre.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Institut für Umweltschutz und Energietechnik, TÜV Rheinland, Köln 1991. Ökologisches Sanierungs- und Entwicklungskonzept Leipzig / Bitterfeld / Halle / Merseburg. In: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg], Band A: Umweltbereiche. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln.
- [2] SRU 1995. Altlasten II. Sondergutachten Februar 1995. Stuttgart, Metzler-Poeschel, 285 S.
- [3] Engewald W, Knobloch T, Efer J 1993. Flüchtige organische Verbindungen in Emissionen aus dem Hausbrand von Braunkohle. *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 5:303-308.
- [4] Neumeister H, Franke Ch, Nagel Ch, Peklo G, Zierath R, Peklo P 1991. Immissionsbedingte Stoffeinträge aus der Luft als geomorphologischer Faktor - 100 Jahre atmosphärische Deposition im Raum Bitterfeld (Sachsen-Anhalt). *Geoökodynamik* 12:1-40.
- [5] Umlauf G, Reischl A, Reissinger M, Richartz H, Hutzinger O, Weißflog L, Wenzel K-D, Martinetz D 1990. Atmosphärische Belastung in Nordbayern und im Ballungsraum Halle-Leipzig.- *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 2:193-194.
- [6] Schädlich G, Schüürmann G 1994. Die Belastung landwirtschaftlich genutzter Böden der Industrieregion Leipzig-Halle mit Schwermetallen.- Abschlußbericht zu BMFT-Projekt FKZ 339419F und 39419K.
- [7] Haase G, Händel L, Nagel C, Opp C, Zierath R 1990. Environmental Impacts by Input of Substances in Landscapes of the District (Bezirk) of Leipzig, Germany. *Geo Journal* 22.2:153-165.
- [8] Wenzel K-D, Paladini E, Gantuz M, Guerreiro P, Puliafito C, Weißflog L, Schüürmann G 1997. Immission pattern of airborne pollutants in Argentina and Germany. II. Results of a biomonitoring of semivolatile organochlorine compounds, polychlorinated biphenyls (PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Chemosphere* 34:2505-2518.
- [9] Jensen S, Eriksson G, Kylin H, Strachan WMJ 1992. Atmospheric Pollution by Persistent Organic Compounds: Monitoring with Pine Needles.- *Chemosphere* 24:229-245.
- [10] Weißflog L, Paladini E, Gantuz M, Puliafito JL, Puliafito S, Wenzel K-D, Schüürmann G 1994. Immission patterns of airborne pollutants in Argentina and Germany. I. First results of a heavy metal biomonitoring. *Fresenius Envir. Bull.* 3:728-733.
- [11] Weißflog L, Wienhold K, Wenzel K-D, Schüürmann G 1994b. Ökologische Situation der Region Leipzig-Halle. I. Immissionsmuster luftgetragener Schwermetalle und Bioelemente. *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 6:75-80.
- [12] Wenzel K-D, Mothes B, Weißflog L, Schüürmann G 1994. Bioavailability of airborne organochlorine xenobiotics to conifers. *Fresenius Envir. Bull.* 3:734-739.
- [13] Kaatzsch S, Mleinek A, Discher HJ 1992. Umweltmonitoring in der ehemaligen DDR.- *Staub - Reinhaltung der Luft* 52:215-219.
- [14] Schüürmann G, Schädlich G, Kühne R 1994. Ökotoxikologische Risikoanalyse der Cadmium-Belastung im Ackerboden der Industrieregion Leipzig-Halle.- *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 6:3-4.
- [15] Zierath R, Nagel C, Niehus B, Haase G 1988. Zur Wirkung von Immissionsfeldern auf die Kontamination von Böden und Pflanzen. *Peterm. Geogr. Mitt.* 13:34-49.

- [16] Konopatzky A 1995. Untersuchungen zum langjährigen Oberbodenzustandswandel in den Waldökosystemen der Dübener Heide.- In: Hüttl RF [Hrsg]. Atmosphärensanierung und Waldökosysteme. SANA: Wissenschaftliches Begleitprogramm zur Sanierung der Atmosphäre über den neuen Bundesländern - Wirkung auf Kiefernbestände.- *Blottner Umweltwissenschaften* 4:210-227; Taunusstein.
- [17] Malyska G 1996. Probleme der Trinkwasserversorgung im Mitteldeutschen Trockengebiet. In: Ahrens H, Meinicke K-P, Wycisk P [Hrsg]. Entwicklung von Landnutzung und Umweltqualität in Mitteldeutschland. Tagungsband, Universitätszentrum für Umweltwissenschaften, S.200-217.
- [18] Schumann A, Müller J 1995. Klimatologische Kennzeichnung des mitteldeutschen Trockengebietes. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 77:43-48.
- [19] Kugler H, Villwock G 1995. Geomorphologie des mitteldeutschen Raumes. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 77:23-26.
- [20] Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt 1993. Erläuterungen zu Inhalt und Aussage der Geologischen Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt 1 : 400 000. Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung, Land Sachsen-Anhalt.
- [21] Hildmann E, Wünsche M 1995. Braunkohleförderung und Bergbaufolgelandschaften im mitteldeutschen Raum. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 77:61-66.
- [22] Akademie der Wissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik 1981. Atlas DDR. VEB Hermann Haack, Geographisch-Kartographische Anstalt Gotha/Leipzig.
- [23] Mackay D 1991. Multimedia Environmental Models - The Fugacity Approach. Lewis Publishers, Chelsea (USA).
- [24] Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 1996. Anleitung zur Entnahme von Bodenproben. *Geol. Jb.* G1:3-34.
- [25] Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 1994. Bodenkundliche Kartieranleitung. 392 S., Hannover.
- [26] Carter MR [ed] 1993. Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, Florida (USA).
- [27] Hildenbrand E, Turian G, Heinrichsmeier K, Mayer E, Monn L, Ziegler R 1996. Bodenprobenentnahme und Bewertung von Bodenkontaminationen. Bd. 507, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim.
- [28] DIN 19683, B2 1973. Physikalische Laboruntersuchungen. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin.
- [29] DIN 19683, B1 1973. Physikalische Laboruntersuchungen. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Siebung. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin.
- [30] Prinz H 1982. Abriß der Ingenieurgeologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [31] Hölting B 1980. Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [32] Hazen A 1893. Some physical properties of sand and gravel with special reference to their use in filtration. *Ann. Rep. Mass. State, Bd. Health* 24:541-556.
- [33] Beyer W 1964. Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung. *Wasserwirtschaft-Wassertechnik*:165-169.
- [34] DIN 19683, B4 1973. Physikalische Laboruntersuchungen. Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin.
- [35] Strzyszczyk Z, Tölle R, Katzur J 1988. Zur Anwendung eines hochfrequenten Meßverfahrens für den Nachweis von ferromagnetischem Eisen in der Umwelt. *Achivum Ochrony Srodowiska* 3-4:137-143.

- [36] Strzyszczyk Z 1989. Anwesenheit des ferromagnetischen Eisens in ober-schlesischen Waldböden und deren Ursachen. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 59:1197-1202.
- [37] Heinsdorf D, Tölle R 1993. Eine rationelle Methode zur Abgrenzung und Kartierung von Flugascheneinträgen in Forstbeständen.- *Beitr. Forstwirtschaft u. Landschafts-ökol.* 27:161-164.
- [38] Schädlich G, Weißflog L, Schüürmann G 1995. Magnetic susceptibility in conifer needles as indicator of fly ash deposition.- *Fresenius Envir. Bull.* 4:7-12.
- [39] Tölle R, Raasch H 1989. Zur Anwendung eines hochfrequenten Meßverfahrens für den Nachweis von ferromagnetischem Eisen in der Umwelt. *Wiss. Z. d. Humb.-Univ. zu Berlin* 38:45-47.
- [40] DIN 19684, T1 1977. Chemische Laboruntersuchungen. Bestimmung des pH-Wertes des Bodens. Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- [41] DIN 19684, T3 1977. Chemische Laboruntersuchungen. Bestimmung des Glühverlustes und des Glührückstandes. Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- [42] Scheffer F, Schachtschabel P, Blume HP, Brümmer G, Hartge KH, Schwertmann U 1989. Lehrbuch der Bodenkunde. 481 S., Enke-Verlag, Stuttgart.
- [43] DIN 19684, T8 1977. Chemische Laboruntersuchungen. Bestimmung der Austauschkapazität des Bodens und der austauschbaren Kationen. Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- [44] Kuderna M, Blum WEH 1992. Zur Bestimmung der Kationenaustauschkapazität von Böden mittels Barium. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155:25-27.
- [45] DIN 19684, T11 1977. Chemische Laboruntersuchungen. Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Wasser und Bodensättigungsextrakten. Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- [46] Heinrichs H, Herrmann AG 1990. Praktikum der Analytischen Geochemie. Springer-Verlag, Berlin.
- [47] DIN 38414, T7 1983. Schlamm und Sedimente (Gruppe S): Aufschluß mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen (S7). Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- [48] Manz M 1995. Umweltbelastungen durch Arsen und Schwermetalle in Böden, Hal-den, Pflanzen und Schlacken ehemaliger Bergbaugebiete des Mittleren- und Südlichen Schwarzwaldes. *Karlsruher Geochemische Hefte* 7:227 S.
- [49] Alloway BJ, Morgan H 1986. The behaviour and availability of Cd, Ni and Pb in polluted soils. In: Assink JW, Van den Brink WJ [eds] Contaminated soil. First International TNO Conference on Contaminated Soil. pp. 101-103.
- [50] Shuman LM 1985. Fractionation method for soil microelements. *Soil Science* 140:11-22.
- [51] Lindsay WL, Noevell WA 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428.
- [52] Jahiruddin M, Chambers BJ, Cresser MS, Livesey NT 1992. Effects of soil properties on the extraction of zinc. *Geoderma* 52:199-208.
- [53] Köster W, Merkel D 1982. Beziehungen zwischen den Gehalten an Zink, Cadmium, Blei und Kupfer in Böden und Pflanzen bei Anwendung unterschiedlicher Bodenuntersuchungsmethoden. *Landw. Forsch. Sonderheft* 39:245-254.
- [54] Prüß A, Turian G, Schweikle V 1991. Ableitung kritischer Gehalte an NH_4NO_3 -extrahierbaren ökotoxikologisch relevanten Spurenelementen in Böden SW-Deutschlands. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 66:385-388.
- [55] Prüß A 1992. Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile und mobilisierbare, potentiell ökotoxische Spurenelemente in Böden. Dissertation, Univ. Karlsruhe, 145 S., Karlsruhe.

- [56] Hornburg V, Welp G, Brümmer GW 1995. Verhalten von Schwermetallen in Böden. 2. Extraktion mobiler Schwermetalle mittels CaCl_2 und NH_4NO_3 . *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 158:137-145.
- [57] DIN 19730 1995. Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung. Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- [58] Tessier A, Campbell PGC, Bisson M 1979. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry* 51:844-850.
- [59] Förstner U, Sellhorn C 1986. Schwermetalle im Untergrund von Infiltrationsbecken - Untersuchungen der Bindungsformen von Fe, Mn, Zn, Cd, Cu und Pb im Feinkornanteil von Vertikalprofilen im Wasserwerk Haltern. *Vom Wasser* 67:154-174.
- [60] Ure AM, Davidson CM, Thomas RP 1995. Single and sequential extraction schemes for trace metal speciation in soil and sediment. In: Quevauviller PH, Maier EA, Griepink B [eds] *Quality assurance for environmental analysis*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 505-523.
- [61] Zeien H, Brümmer GW 1989. Chemische Extraktionen zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden. *Mitt. Dtsch. Bodenkd. Ges.* 59:505-510.
- [62] Dües G 1989. Bindungsformen von Schwermetallen im Boden, dargestellt auf der Basis fraktionierter Extraktion. In: Behrens D, Wiesner J [Hrsg] *Beurteilung von Schwermetallkontaminationen im Boden*. DECHEMA, Dt. Ges. für Chem. Apparatewesen, Chem. Technik u. Biotechnologie e.V., Frankfurt a. M., S. 143-167.
- [63] United States Environmental Protection Agency [ed] 1982. EPA-Test Method 610. Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Environmental Monitoring and Support Laboratory, Cincinnati OH 45268.
- [64] Sturm K, Ecknig W 1991. Quantitative Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mittels HPLC nach EPA 610. *GIT Fachz. Lab.* 2:979-984.
- [65] Ballschmiter K, Zell HJ 1980. Analysis of polychlorinated Biphenyls (PCB) by Glass Capillary Chromatography. *Fres. Z. Anal. Chem.* 302:20ff.
- [66] United States Environmental Protection Agency [ed]. Controlled Laboratory Programm Quick Turnaround Methods 604: Analytical Method for Phenols, US EPA.
- [67] Feist B, Niehus B, Peklo G, Popp P, Thuß U 1995. Vorkommen und Transfer von Dioxinen und Schwermetallen im Raum Merseburg, Lützen, Naumburg, Zeitz. *UFZ-Bericht* 1,95:95S.+Anhang.
- [68] Korte F [Hrsg] 1992. Lehrbuch der Ökologischen Chemie. Thieme-Verlag, Stuttgart, New York.
- [69] OECD Guideline for Testing of Chemicals 1989. Partition Coefficient (n-Octanol/water), High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Method: OECD 117. 11p., Paris.
- [70] OECD Guideline for Testing of Chemicals 1981. Adsorption / Desorption: OECD 106. 23p., Paris.
- [71] Leo, DA 1996. MedChem 96 database, Daylight Chemical Information Systems. Irvine, CA/USA.
- [72] Paschke A, Popp P, Schüürmann G 1997. Water solubility and octanol/water-partitioning of hydrophobic chlorinated organic substances determined by using SPME/GC. *Fresenius J Anal Chem*, in press.
- [73] Isco [ed] 1991. A comparison of SFE and Soxhlet methods for extraction of organic analytes. *Isco Application Bulletin* 71:10p.

- [74] Langenfeld JJ, Hawthorne SB, Miller DJ, Pawliszyn J 1993. Effects of Temperature and Pressure on Supercritical Fluid Extraction Efficiencies of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorinated Biphenyls. *Anal. Chem.* 65:338-344.
- [75] Wenclawiak B, Hoffmann A, Bodusz M 1992. Supercritical fluid extraction of biological materials. *Fresenius J. Anal. Chem.* 343:116-117.
- [76] Däßler HG [Hrsg] 1991. Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Vegetation. Ursachen-Wirkung-Gegenmaßnahmen. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- [77] Schreiter P, Bambauer HU, Werner M, Pöhl K 1995. Chemisch-mineralogische Zusammensetzung von Braunkohlenflugaschen. In: RWE-Gesellschaft für Forschung und Entwicklung [Hrsg]. Handbuch der Verwertung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland. S.87-118, RWE Aktiengesellschaft, Zentralbereich Forschung und Entwicklung, Essen.
- [78] Schüürmann G, Wenzel K-D, Weißflog L, Wienhold K, Müller E 1994. Ökologische Situation der Region Leipzig-Halle. III. Ökotoxikologische Charakterisierung der Schwermetall-Immissionsmuster. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.* 6:265-270.
- [79] Schüürmann G, Wenzel K-D, Weißflog L 1994. Exposition und Bioverfügbarkeit mittelflüchtiger Organika in der Umgebung von Leipzig. In: Alef K, Fiedler H, Hutzinger O [Hrsg]. ECOINFORMA '94, Bd. 5 Umweltbundesamt Wien (Österreich), S.183-200.
- [80] Huhn G, Schulz H, Stärk H-J, Tölle R, Schüürmann G 1995. Evaluation of regional heavy metal deposition by multivariate analysis of element contents in pine tree barks. *Water, Air and Soil Pollution* 84:367-383.
- [81] Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 1996. Immissionsschutzbericht 1995. *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt* 19:163S., Sachsen-Anhalt.
- [82] Engewald W, Knobloch T, Efer J 1993. Flüchtige organische Verbindungen in Emissionen aus dem Hausbrand von Braunkohle. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.* 5:303-308.
- [83] Reischl A, Reissinger M, Hutzinger O 1989. Organische Luftschadstoffe. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.* 2:32-41.
- [84] Weißflog L 1994. Auswirkungen des Einsatzes von bleifreiem Benzin und der Reduktion des Flugstaubes aus der Braunkohlenverbrennung auf die Biosphäre der Region Leipzig-Halle. Tagung "Energie und Umwelt '94", Technische Universität Bergakademie Freiberg, 23.-25.03.1994. In: Energie und Umwelt '94, Tagungsband, S.101-104, TU Freiberg.
- [85] Weißflog L, Wenzel K-D 1997. Die Vegetation als Senke und biochemischer Reaktor für luftgetragene Schadstoffe. Abschlußbericht des Förderprojektes FKZ 1601 A / 0024, Sachsen-Anhalt.
- [86] Gisi U 1990. Bodenökologie. 304 S., Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- [87] Kuntze H, Roeschmann G, Schwerdtfeger G 1994. Bodenkunde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- [88] Kloke A 1980. Richtwerte '80 - Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden. *Mitt. VDLUFA* 1-3:9-11.
- [89] Niederländisches Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und Umwelt 1994. Interventions- und Referenzwerte der Niederlande ("Holländische Liste"). In: Hein H, Schwedt G 1995. Richt- und Grenzwerte. Wasser-Boden-Abfall-Chemikalien-Luft. Ein Arbeitsmittel von Umweltmagazin. Vogel Verlag, Würzburg.
- [90] Bundesminister des Innern, BMI 1992. Klärschlammverordnung vom 15.04.1992 (AbfKlärV). *Bundesgesetzblatt, Teil I*:912-934. Bonn.

- [91] Eikmann T, Kloke A 1993. Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-) stoffe in Böden. In: Rosenkranz D, Einsele G, Harress H-M [Hrsg] Bodenschutz: Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. 3590:1-26; Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- [92] Innenministerium des Landes Baden-Württemberg [Hrsg] 1993. Ermittlung und Einstufung von Gehalten anorganischer Schadstoffe im Boden (VwV Anorganische Schadstoffe). Gemeinsames Amtsblatt der Ministerien sowie der Regierungspräsidien des Landes Baden-Württemberg vom 29.09.1993. S. 1029-1036, Stuttgart.
- [93] Lichtfuss R 1989. Geogene, pedogene und anthropogene Schwermetallgehalte in Böden.- In: Behrens D, Wiesner J [Hrsg] Beurteilung von Schwermetallkontaminationen im Boden.- DECHEMA, Dt. Ges. für Chem. Apparatewesen, Chem. Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt a. M., S. 119-135.
- [94] Zanini E, Bonifacio E 1991. Lead Pollution of soils from a continuous point source: a case study in Italy. *J. Environ. Sci. Health* A26:777-796.
- [95] Merian E 1991. Metals and Their Compounds in the Environment. Occurrence, Analysis, and Biological Relevance. VCH, Weinheim, New York, Basel.
- [96] Brümmer GW, Gerth J, Herms U 1986. Heavy Metal Species, Mobility, and Availability in Soils. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149:382-398.
- [97] Alloway BJ [ed] 1990. Heavy metals in soils. Blackie & Son Ltd, London.
- [98] Zeien H, Brümmer GW 1991. Ermittlung der Mobilität und Bindungsformen von Schwermetallen in Böden mittels sequentieller Extraktionen. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 66:439-442.
- [99] Adriano DC 1986. Trace elements in the terrestrial environment. New York, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag.
- [100] Maisenbacher P, Puchelt H 1992. Schwermetallaufnahme durch Ackerpflanzen in verschiedenen höher belasteten Gebieten Baden-Württembergs auf neutralen bis schwach alkalischen Böden. *KfK-PWAB-Berichte* 10:188S.
- [101] Berrow ML, Burridge JC 1991. Uptake, distribution, and effects of metal compounds on plants. In: Merian E [ed]. Metals and their compounds in the environment. VCH Verlagsgesellschaft GmbH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, pp.399-410.
- [102] Kabata-Pendias A, Pendias H 1985. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- [103] Sauerbeck D 1989. Der Transfer von Schwermetallen in die Pflanze. In: Behrens D, Wiesner J [Hrsg]. Beurteilung von Schwermetallkontaminationen im Boden.- DECHEMA, Dt. Ges. für Chem. Apparatewesen, Chem. Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt a. M., S. 281-316.
- [104] Sauerbeck DR 1991. Plant, element and soil properties governing uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge. *Water, Air and Soil Pollution* 57-58:227-237.
- [105] Kloke A, Sauerbeck D, Vetter H 1984. The contamination of plants and soils with heavy metals and the transport of metals in terrestrial food chains. In: Nriagu JO [ed]. Changing Metal Cycles and Human Health. Dahlem Conferences, Springer Verlag, Berlin, pp.113-141.
- [106] Bundesgesundheitsamt (BGA) 1993. Richtwerte für Schadstoffe in Lebensmitteln. *Bundesgesundheitsblatt* 5:210-211, Köln, Berlin, Bonn, München.
- [107] Nultsch W 1991. Allgemeine Botanik. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- [108] Streit B 1994. Lexikon Ökotoxikologie. VCH-Verlag, Weinheim, New York, Cambridge, Basel, Tokyo.

- [109] Debus R, Dittrich B, Volmer J, Schröder P 1989. Biomonitoring organischer Luftschadstoffe. Aufnahme und Wirkung in Pflanzen. In: Handbuch des Umweltschutzes. Ecomed-Verlag, Landsberg-Lech.
- [110] Drescher-Kaden U, Brüggemann R, Matthies M, Matthes B 1990. Organische Schadstoffe im Klärschlamm. Ecomed-Verlag, Landsberg-Lech.
- [111] Innenministerium des Landes Baden-Württemberg [Hrsg] 1995. Ermittlung und Einstufung von Gehalten organischer Schadstoffe im Boden (VwV Organische Schadstoffe). 4. Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zum Bodenschutzgesetz vom 10.12.1995, Az.: 44-8810.30-1/85, Stuttgart.
- [112] Rippen G 1996. Handbuch Umweltchemikalien. Stoffdaten-Prüfverfahren-Vorschriften. Ecomed-Verlag, Landsberg-Lech.
- [113] Lyman WJ, Reehl WF, Rosenblatt OH [eds] 1990. Handbook of Chemical Property Estimation Methods - Environmental Behaviour of Organic Compounds. American Chemical Society ACS, Washington, DC.
- [114] Sabljic A, Güsten H, Verhaar H, Hermens J 1995. QSAR Modelling of Soil Sorption. Improvements and systematics of log K_{OC} vs. log K_{OW} correlations. *Chemosphere* 31:4489-4514.
- [115] Draper NR, Smith H 1981. Applied Regression Analysis (2nd Edn), Wiley, New York, pp.47-51.
- [116] Bundesminister des Innern, BMI 1988. Futtermittelverordnung. *Bundesgesetzblatt* I:869-910, Bonn.
- [117] Kühne R, Breitkopf C, Schüürmann G 1997. Error Propagation in Fugacity Level-III Models in the Case of Uncertain Physicochemical Compound Properties. *Environmental Toxicology and Chemistry* 16, in press.
- [118] Veit U, Petzold B, Piehl H-D [Hrsg] 1987. Klimadaten der Deutschen demokratischen Republik - Ein Handbuch für die Praxis. Reihe B, Band 14: Klimatologische Normalwerte 1951-80, Potsdam.
- [119] Mackay D, Paterson S, Tam DD 1991. Assessments of Chemical Fate in Canada: Continued Development of a Fugacity Model. A report for Health and Welfare Canada. Institute of Environmental Studies, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4.

Verzeichnis des Anhangs

	Seite
A-1 Umfang der im Projekt durchgeführten Untersuchungen.....	I
A-2a Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Leuna Beschreibung der Bodenproben des Standortes Leuna Lage der Probenahmefläche.....	II
A-2b Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Spergau Beschreibung der Bodenproben des Standortes Spergau Lage der Probenahmefläche.....	V
A-2c Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Schkopau Beschreibung der Bodenproben des Standortes Schkopau Lage der Probenahmefläche.....	VIII
A-2d Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Etzdorf/Teutschenthal Beschreibung der Bodenproben des Standortes Etzdorf/Teutschenthal Lage der Probenahmefläche.....	XI
A-2e Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Altjeßnitz Beschreibung der Bodenproben des Standortes Altjeßnitz Lage der Probenahmefläche.....	XIV
A-2f Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Günthersdorf Beschreibung der Bodenproben des Standortes Günthersdorf Lage der Probenahmefläche.....	XVII
A-2g Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Gräfenhainichen Beschreibung der Bodenproben des Standortes Gräfenhainichen Lage der Probenahmefläche.....	XX
A-2h Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Zschornewitz Beschreibung der Bodenproben des Standortes Zschornewitz Lage der Probenahmefläche.....	XXIII
A-2i Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Eisleben Beschreibung der Bodenproben des Standortes Eisleben Lage der Probenahmefläche.....	XXVI
A-2j Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Hettstedt Beschreibung der Bodenproben des Standortes Hettstedt Lage der Probenahmefläche.....	XXIX
A-2k Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Wüsteneutzsch Beschreibung der Bodenproben des Standortes Wüsteneutzsch	

	Seite
Lage der Probenahmefläche.....	XXXII
A-2l Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Döllnitz Beschreibung der Bodenproben des Standortes Döllnitz Lage der Probenahmefläche.....	XXXV
A-2m Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Meuschau Beschreibung der Bodenproben des Standortes Meuschau Lage der Probenahmefläche.....	XXXVIII
A-2n Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Burgkernitz Beschreibung der Bodenproben des Standortes Burgkernitz Lage der Probenahmefläche.....	XLI
A-3a Gesamtgehalte von Haupt- und Spurenelementen im Boden.....	XLIV
A-3b Gesamtgehalte verschiedener Spurenelemente in den Weizenböden der Standorte.....	XLVI
A-4 Gesamtgehalte von ausgewählten Spurenelementen in der Pflanze.....	XLVII
A-5a Maximal säurelöslicher Anteil von Metallen aus dem Boden.....	XLVIII
A-5b Maximal säurelöslicher Anteil von Metallen aus den Weizenböden der Standorte.....	L
A-5c Maximal säurelöslicher Anteil von B und Hg aus dem Boden.....	L
A-6 Ergebnisse aus den Ammoniumnitratextraktionen zur Bestimmung mobiler Spurenelemente in Mineralböden.....	LI
A-7 Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion	LII
A-8 Potentielle Kationenaustauschkapazität der Böden.....	LXI
A-9 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) im Boden nach EPA 610 (ohne Acenaphtylen).....	LXIII
A-10 Polychlorierte Biphenyle (PCBs) im Boden.....	LXVI
A-11 Phenole nach EPA 604, sowie Dioxine und Furane in den Böden.....	LXVII
A-12 Ergebnisse der HCH, DDT, PCB und HCB Messungen an den Oberböden der Rasterbeprobungen und an den Weizenböden.....	LXVIII
A-13 Organische Schadstoffe im Weizen (HCHs, DDTs, PCBs, HCB, und PAKs).....	LXIX
A-14 Ergebnisse der K_{ow} -Untersuchungen.....	LXXI

A-I: Umfang der im Projekt durchgeführten Untersuchungen

Art der Untersuchung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Bodenphysikalische Untersuchungen														
• Korngrößenverteilung	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■
• Wassergehalt	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■
• Durchlässigkeit (k)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
• Magnetische Suszeptibilität	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆
Bodenchemische Untersuchungen														
• pH-Werte	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆
• Glühverl., Humusgehalt, N_{ges} , C_{org}/C_{anorg}	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■
• elektrische Leitfähigkeit	●■	●■	●■	●■◆	●■	●■	●■	●■	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆
• pot. Kationenaustauschkapazität (CEC)	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■
Analyt. Untersuchungen anorganischer Substanzen im Boden														
• Hauptelemente-Gesamt	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■	●■	●■	●■	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆
• Schwermetalle-Gesamt	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■	●■	●■	●■	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆
• S7-Aufschluß	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■	●■	●■	●■	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆
• Ammoniumnitratextraktion		◆	◆	◆						◆	◆	◆	◆	◆
• Sequentielle Extraktion	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■
Metallgehalte im Weizen														
		◆	◆	◆						◆	◆	◆	◆	◆
Analyt. Untersuchungen organischer Schadstoffe im Boden														
• PAKs	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆	●■◆
• PCBs	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	●■	○	○◆	○◆	○◆	○◆	○◆
• Phenole	○		○						○	○	○	○	○	○
• Dioxine und Furane	○	○								○	○	○	○	○
• HCH-Isomere	○	◆	◆	◆	○	○	○	○	○	○◆	○◆	○◆	○◆	○◆
• p,p'-DDT, p,p'-DDE und p,p'-DDD	○	◆	◆	◆	○	○	○	○	○	○◆	○◆	○◆	○◆	○◆
• HCB	○	◆	◆	◆	○	○	○	○	○	○◆	○◆	○◆	○◆	○◆
• Adsorption org. Substanzen K_{ow}/K_{oc}							○		○		○			
Organische Schadstoffe im Weizen														
		◆	◆	◆						◆	◆	◆	◆	◆

● = Rasterbeprobung (Mischprobe) ■ = Schurfbeprobung (Einzelprobe) ◆ = Boden der Weizenstandorte ○ = nur Oberboden (Ap) der Mischprobe

II

A-2a: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Leuna

Probennahme:

04.05.1995

Rechtswert:

450170 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:

568675 (Besell-Ellipsoid)

Flurstücks/Str.:

Spergauer Str.

Kartenblatt:

TK50 (1206-1, Leuna)

TK25 (M-33-25-A-a, Leuna)

TK10 (1206-111, Leuna)

Besitzer:

verschiedene, z.T. chem. Treuhand

Pächter:

AG Spergau

Ackerbau- und Rinder GmbH

Franklebener Str. 14a

06237 Spergau

Tel.: 034446 / 20404

**Lagebeschreibung und Anfahrt:**

- etwa 15 km SSE von Halle, 1 km E der Leuna-Werke, 400 m E der Spergauer Straße und etwa 1 km E von Daspig, A9 bis Ausfahrt Merseburg, in Merseburg Abzweigung nach links in Richtung Spergau

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- bewölkt, kein Niederschlag, trocken
- 200 m westlich des Standortes befindet sich eine kleinere Siedlung, die Leuna-Werke (LW) liegen 1 km westlich davon; zu erwähnen ist zusätzlich eine Kläranlage 500 m SW.
- Auf dem Gelände der Leuna-Werke befanden sich bis 1989 bis zu 7 auf Braunkohlebasis betriebene Kraftwerke. Bis heute sind die LW Sitz der Chemischen Industrie (Grundstoffe, Kraftstoffe, Kunststoffe, Lösungsmittel, Desinfektionsmittel).

Nutzung des Geländes:

- 1994 mit Roggen bestellt, 1995 mit Grassamen, 1996 Ödland

A-2a: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Leuna

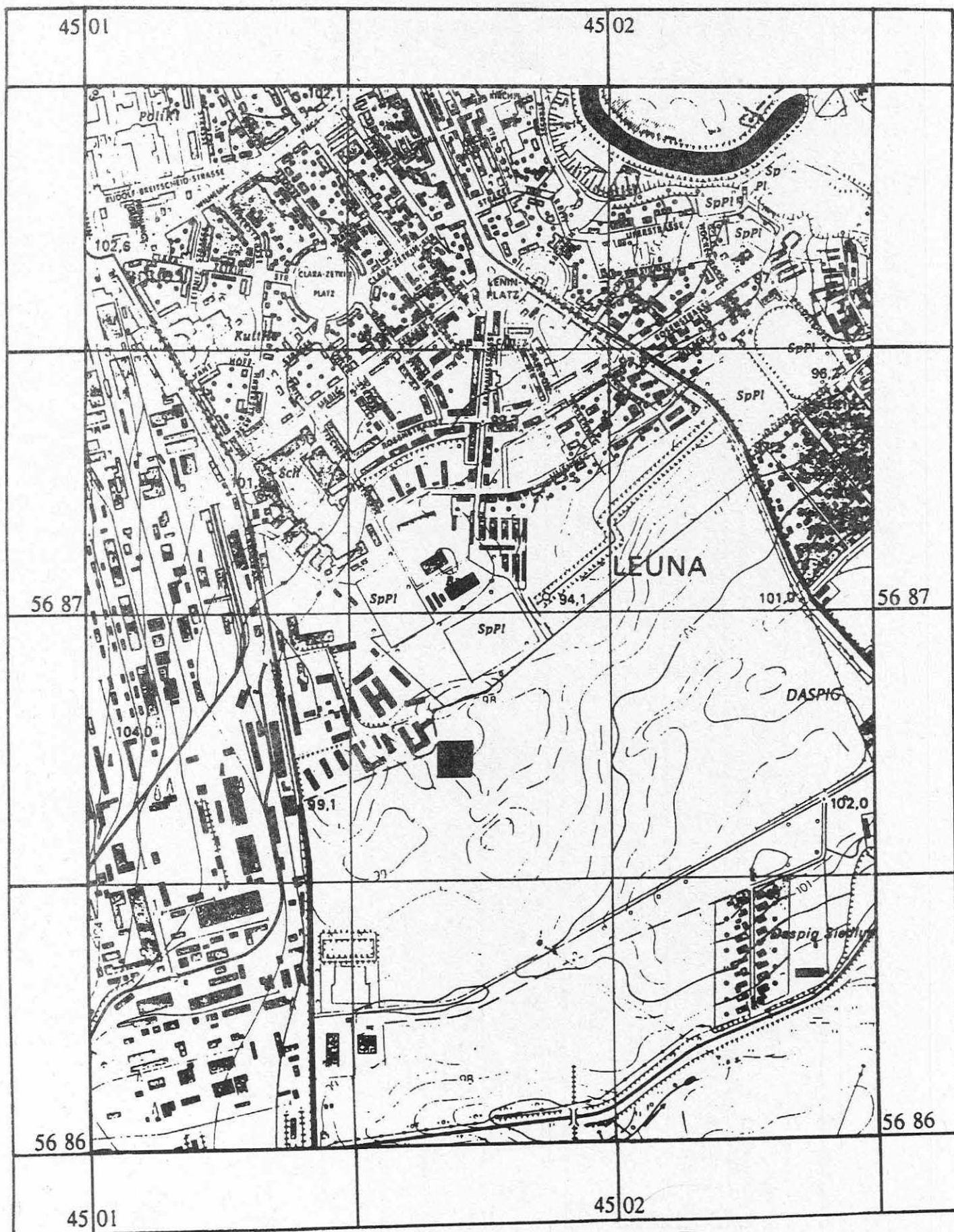
Bodentyp: Löß-Braunschwarzerde

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Leu-a (42)	1	0-35 (Ø)	Ap	HUE 10YR 3/1	Us	4,60	2	0,32
M-Leu-b (42)	2	36-70		HUE 10YR 3/3	Lu	1,80	1	22,3
E-Leu-a	3	0-31	Ap	HUE 10YR 3/1	Us	n.b.	1	n.b.
E-Leu-b	4	32-50	Ah	HUE 10YR 3/3	Lu	n.b.	1	n.b.
E-Leu-c	5	51-74	Bv	HUE 10YR 4/3	Ls2	n.b.	1	n.b.
E-Leu-d	6	75-110	Cc	HUE 10YR 5/4	Si4	n.b.	1	n.b.

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
1	4,76	0,23	213*	0,16	18,2	7,47	87	2120
2	2,42	0,39	135	0,09	16,0	7,57	43	2010
3	4,99	0,26	188	0,18	16,6	7,52	101	1980
4	1,18	0,10	106	0,09	7,6	7,61	38	1920
5	0,52	0,11	86,6	0,03	9,5	7,52	38	1918
6	0,42	1,48	83,2	0,03	15,8	7,66	15	1965

bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2a: Lage der Probenahme­fläche (TK10: 1206-111, Leuna)

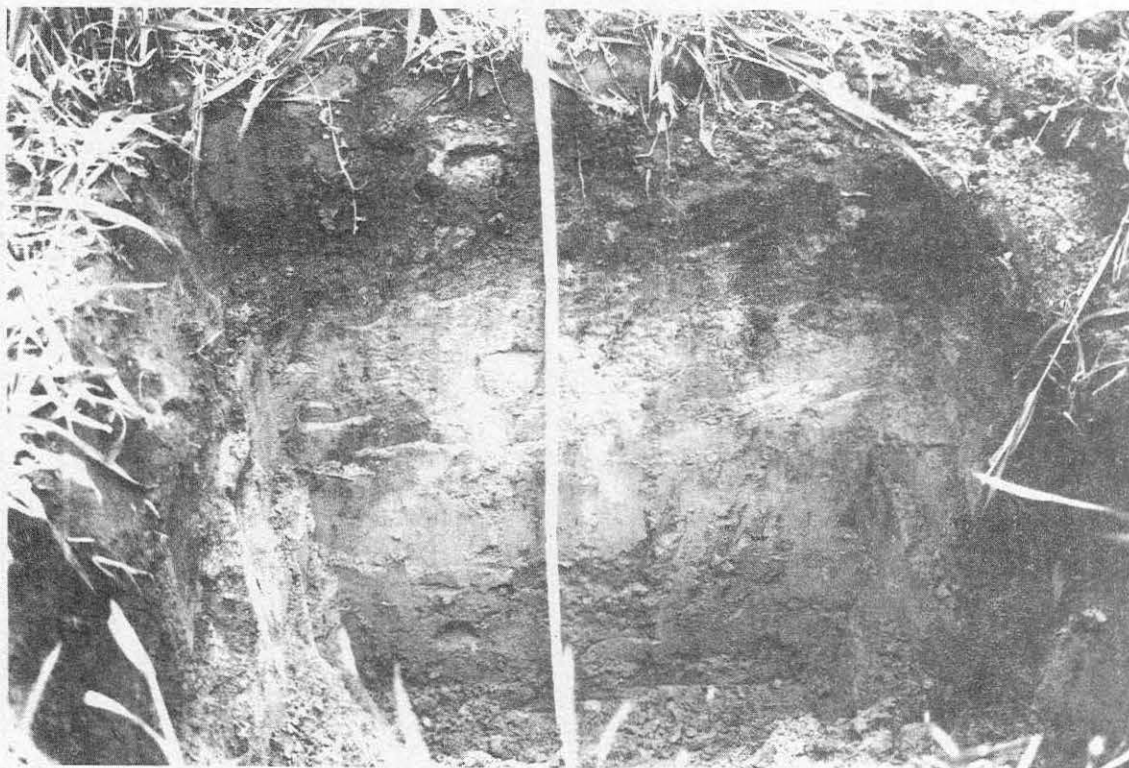


A-2b: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Spergau

Probennahme:
09.05.1995

Rechtswert:
450170 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:
568365 (Besell-Ellipsoid)



Flurstücks/Str.:
Korbethaerstr. 34
Flur 1249/566, Bl. 448

Kartenblatt:
TK50 (1206-1, Leuna)
TK25 (M-33-25-A-a, Leuna)
TK10 (1206-113, Großkorbetha)

Besitzer:
Herr K. Pauli
angrenzende Grundstücke:
K. Fleischer und E. Lucke (H-Nr. 32)

Pächter:
AG Spergau Ackerbau- und Rinder GmbH
Franklebener Str. 14a
06237 Spergau, Tel.: 034446 / 20404

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 17 km SSE von Halle, ca. 1 km SE der Leuna-Werke; am südlichen Ortsausgang von Spergau, hinter der Abzweigung nach Großkorbetha
- A9 bis Ausfahrt Merseburg, in Merseburg Abzweigung nach links auf der B91 in Richtung Spergau

Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahmefläche, Art der Kontaminationsquelle):

- bewölkt, bei MP-Entnahme leichter Niederschlag
- 2 km östlich des Standortes befindet sich die Saale, die Leuna-Werke (LW) mit ihren Kraftstofflagern liegen 1 km nordöstlich; 1,5 km südöstlich des Ortes Wengelsdorf
- Auf dem Gelände der Leuna-Werke befanden sich bis 1989 bis zu 7 auf Braunkohlebasis betriebene Kraftwerke. Bis heute sind die LW Sitz der Chemischen Industrie. Im Südtail des Industriekomplexes werden die Kraftstoffe gelagert.

Nutzung des Geländes:

- 1994 mit Roggen bestellt, 1995 mit Weizen, 1996 mit Grünkohl

A-2b: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Spergau

Bodentyp: Löß-Schwarzerde

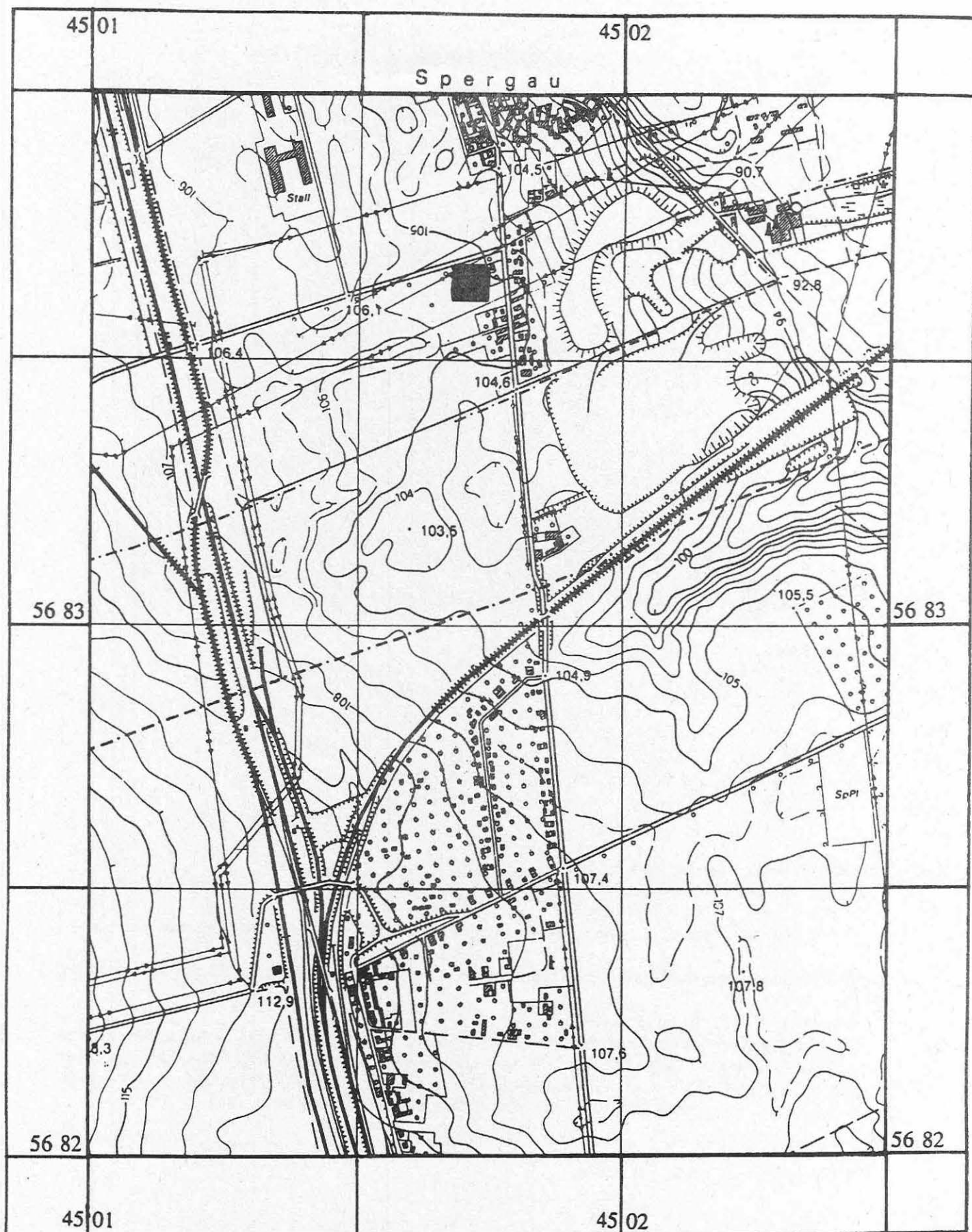
Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Spe-a (32)	7	0-35 (Ø)	Ap	HUE 10YR 2/2	Lu	0,89	1	23,0
M-Spe-b (32)	8	36-70		HUE 10YR 6/4-6/6	Lu	0,78	1	28,6
E-Spe-a	9	0-25	Ap	HUE 10YR 2/2	Ut4	0,80	1	18,0
E-Spe-b	10	26-68	1C ₁	HUE 10YR 6/6	Uls	0,04	1	13,5
E-Spe-c	11	69-110	1C ₂	HUE 10YR 6/4	Us	0,14	1	7,47

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻³ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
7	3,38	0,20	117*	0,13	15,3	7,13	66	230
8	1,88	1,09	82,2	0,11	12,1	7,47	47	791
9	3,48	0,57	126	0,17	12,6	7,39	69	315
10	1,27	5,93	66,4	0,04	43,8	7,66	22	625
11	1,03	5,70	60,4	0,02	109	7,66	19	1078

- # bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

VII

A-2b: Lage der Probenahme-fläche (TK10: 1206-113, Großkorbetha)



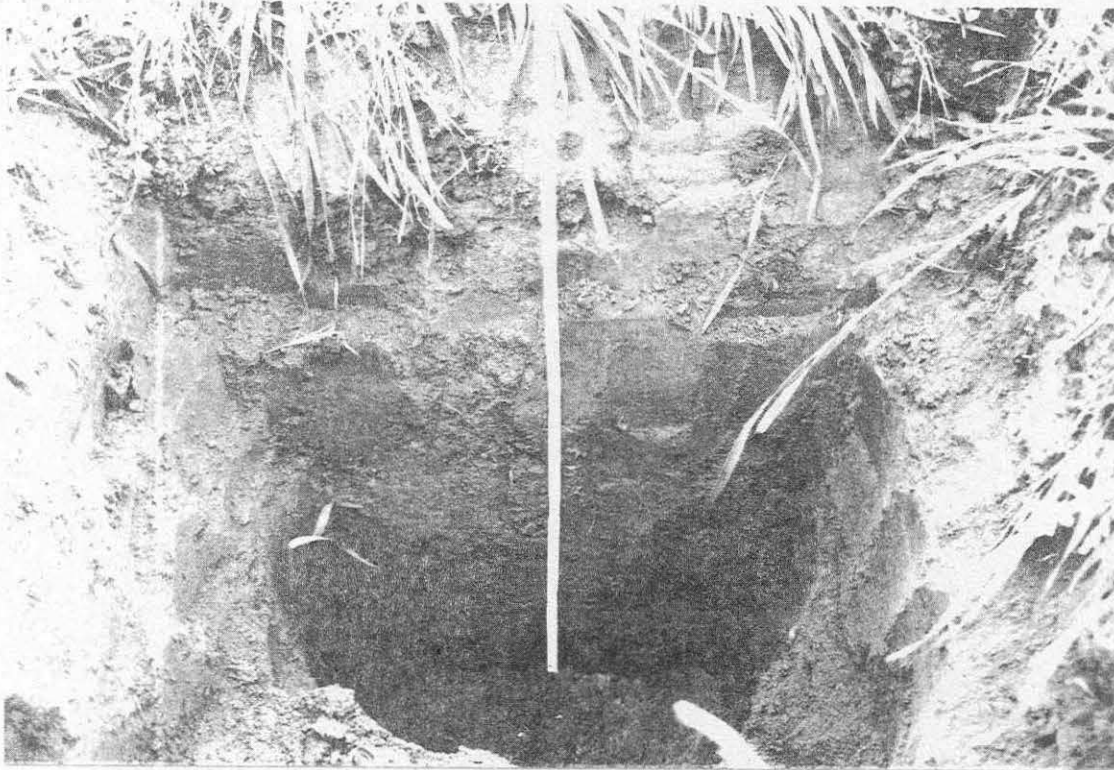
VIII

A-2c: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Schkopau

Probennahme:
10.05.1995

Rechtswert:
449865 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:
569670 (Besell-Ellipsoid)



Flurstücks/Str.:
Straße nach Kollenbey

Kartenblatt:
TK50 (1105-4, Halle/Saale)
TK25 (M-32-24-D-d, Merseburg)
TK10 (1105-442, Schkopau)

Besitzer:
Herr R. Kleszcz

Pächter:
Herr R. Kleszcz
Bahnhofstr. 5
06258 Schkopau, Tel.: 03461 / 217647

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 7 km SE von Halle, ca. 0,5-1 km NE der Buna-Werke; 1,5 km nördlich von Schkopau, an der Straße nach Kollenbey, 150 m westlich der B91
- A9 bis Ausfahrt Merseburg, in Merseburg Abzweigung nach rechts auf der B91 in Richtung Halle

Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahmefläche, Art der Kontaminationsquelle):

- bewölkt, kein Niederschlag, etwa 20°C
- Lage des Standortes im Überflutungsbereich durch die Saale, die sich in etwa 100 m vom Standort befindet
- Auf dem Gelände des Kombinats Chemische Werke Buna wurden chemische Grundstoffe (anorganische und organische Chemikalien), Katalysatoren, Kunststoffe, Düngekalk, Reinigungs-, Imprägnier- und Lösungsmittel, Konservierungsmittel und chemisch-pharmazeutische Grundstoffe hergestellt.

Nutzung des Geländes:

- 1995 mit Weizen bestellt, 1996 Mais

A-2c: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Schkopau

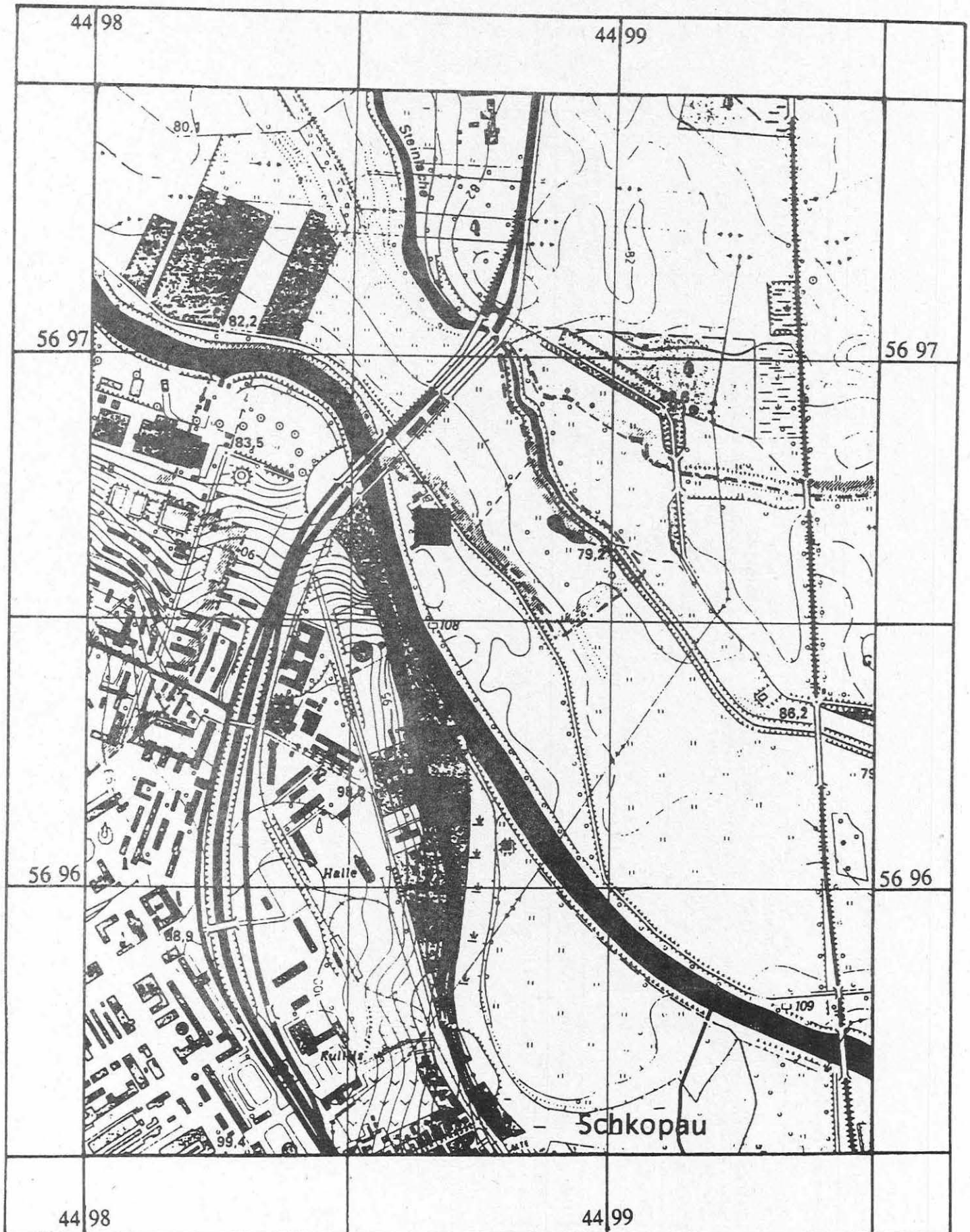
Bodentyp: Auenlehm-Vega

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt# (%)
M-Sch-a (36)	12	0-35 (Ø)	Ap	HUE 10YR 2/3	Lu	3,95	2	20,5
M-Sch-b (36)	13	36-70		HUE 10YR 3/3	Lu	0,71	1	25,1
E-Sch-a	14	0-35	Ap	HUE 10YR 2/3	Lu	0,60	1	26,0
E-Sch-b	15	36-110	aM - GoM	HUE 10YR 3/3	Ut4	0,14	1	18,7

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
12	4,50	3,22	121*	0,13	25,9	7,83	47	331
13	2,90	2,70	97,2	0,10	21,6	7,92	31	277
14	4,73	3,24	102	0,16	21,6	7,85	45	297
15	1,97	2,54	98,6	0,10	16,5	7,88	23	437

bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2c: Lage der Probenahme-fläche (TK10: 1105-442, Schkopau)

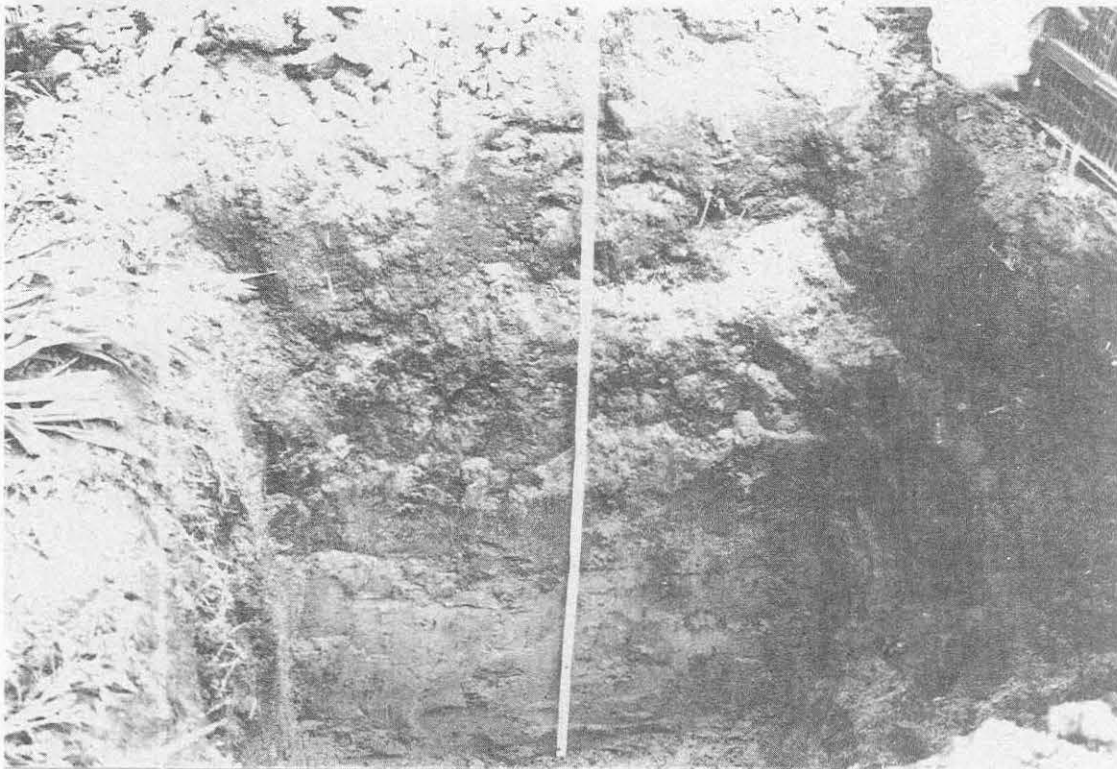


A-2d: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Etzdorf/Teutschenthal

Probennahme:
15.05.1995

Rechtswert:
448500 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:
570055 (Besell-Ellipsoid)



Flurstücks/Str.:
südlich der L164

Kartenblatt:
TK50 (1105-4, Halle/Saale)
TK25 (M-32-24-D-a, Teutschenthal)
TK10 (1105-413, Teutschenthal)

Besitzer:
nicht bekannt

Pächter:
u.a. Herr Drilling
Bahnhofstr.
06246 Großgräfendorf
Tel.: 034636 / 446 priv.: 40656 / 4365

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 15 km WSW von Halle, am Ortsausgang von Teutschenthal in Richtung Etzdorf an der L164
- bis Halle-Neustadt, dann die B80 in Richtung Eisleben bis Abzweigung nach Teutschenthal, im Ort rechts

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- Sonnenschein, leicht bewölkt
- etwa 2 km westlich des Standortes befand sich der ehemalige Braunkohletagebau Amsdorf; etwa 2,5 km WSW befindet sich eine Kaligrube (größere Firmen in der nächsten Nähe sind die Kalimag GmbH und die Alufin GmbH (Tabularoxid)).
- der Standort befindet sich im weiteren Emittentenbereich der Kaligrube
- Probenahme erfolgte auf Anbaugrenze (Schurf) und im Gerstenfeld (Mischprobe)

Nutzung des Geländes:

- 1995 Maisanbau und Gerstenanbau, 1996 Senf und Weizen

A-2d: Beschreibung der Bodenproben des Standortes *Etzdorf/Teutschenthal*

Bodentyp: Löß-Schwarzerde

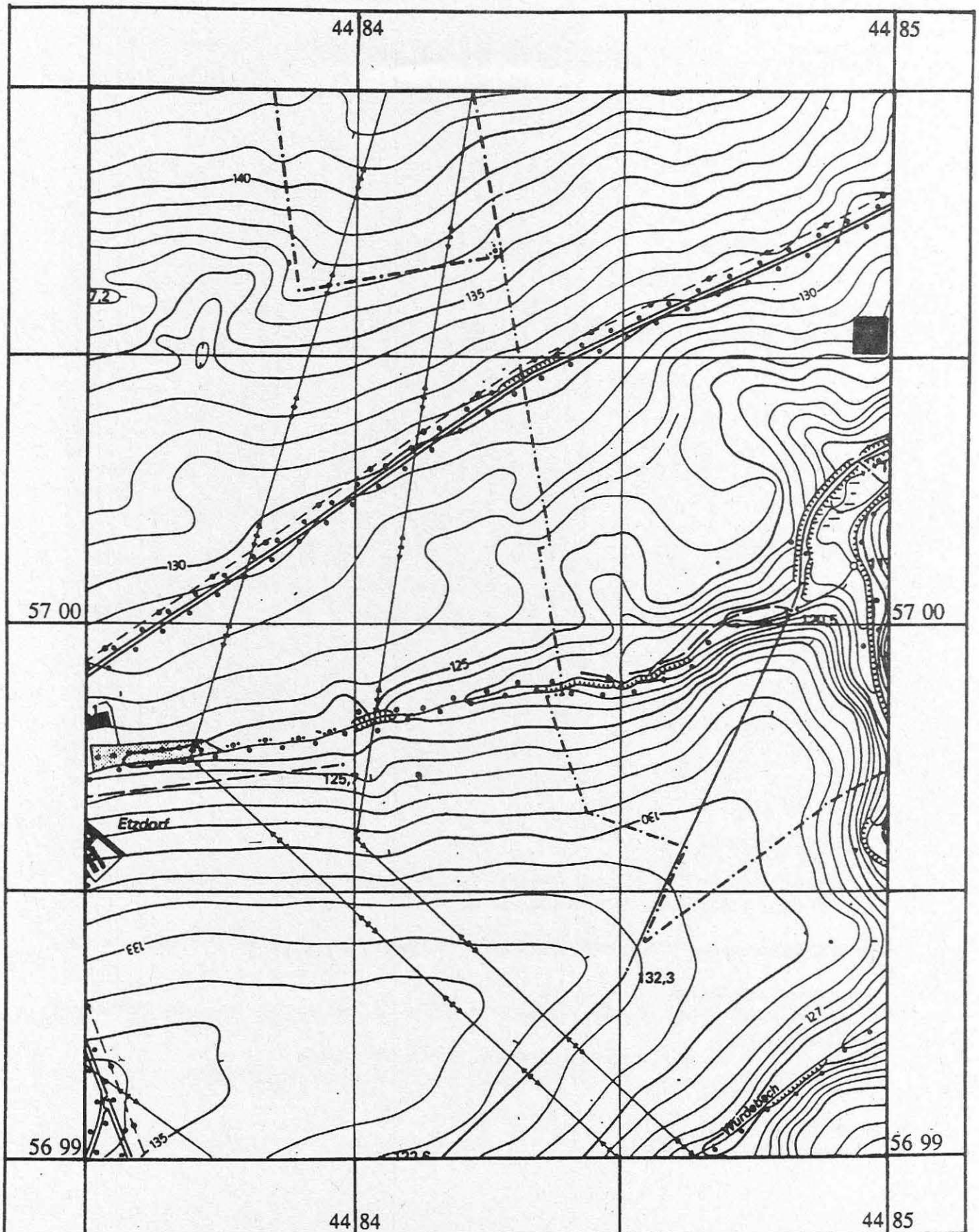
Proben- bezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeich- nung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Etz-a (40)	16	0-35 (Ø)	Ap	HUE 10YR 3/3	Ut4	0,29	1	24,8
M-Etz-b (40)	17	36-70		HUE 10YR 5/6	Ut3	0,25	1	16,7
E-Etz-a	18	0-40	Ap	HUE 10YR 3/3	Ut4	0,29	1	18,4
E-Etz-b	19	41-72	Ah	HUE 10YR 4/4	Ut4	0,06	1	21,0
E-Etz-c	20	73-110	IC	HUE 10YR 5/8	Ut3	n.n.	1	12,1

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
16	3,22	3,38	94,9	0,14	18,9	7,65	63	222
17	2,23	6,11	69,2	0,07	36,5	7,91	36	471
18	3,27	1,59	127	0,14	16,1	7,72	69	221
19	2,38	6,89	99,6	0,11	26,1	7,93	36	222
20	1,39	8,29	74,6	0,03	98,6	8,01	19	1129

bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

XIII

A-2d: Lage der Probenahme-fläche (TK10: 1105-413, Teutschenthal)



A-2e: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Altjeßnitz

Probennahme:

22.05.1995

Rechtswert:

452260 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:

572865 (Besell-Ellipsoid)

Flurstücks/Str.:

Die Angerwiesenbreite

Kartenblatt:

TK50 (1006-4, Dessau-SO)

TK25 (M-33-1-D-c, Wolfen N)

TK10 (1006-434, Muldenstein)

Besitzer:

u.a. EDV (Treuhand)

Pächter:

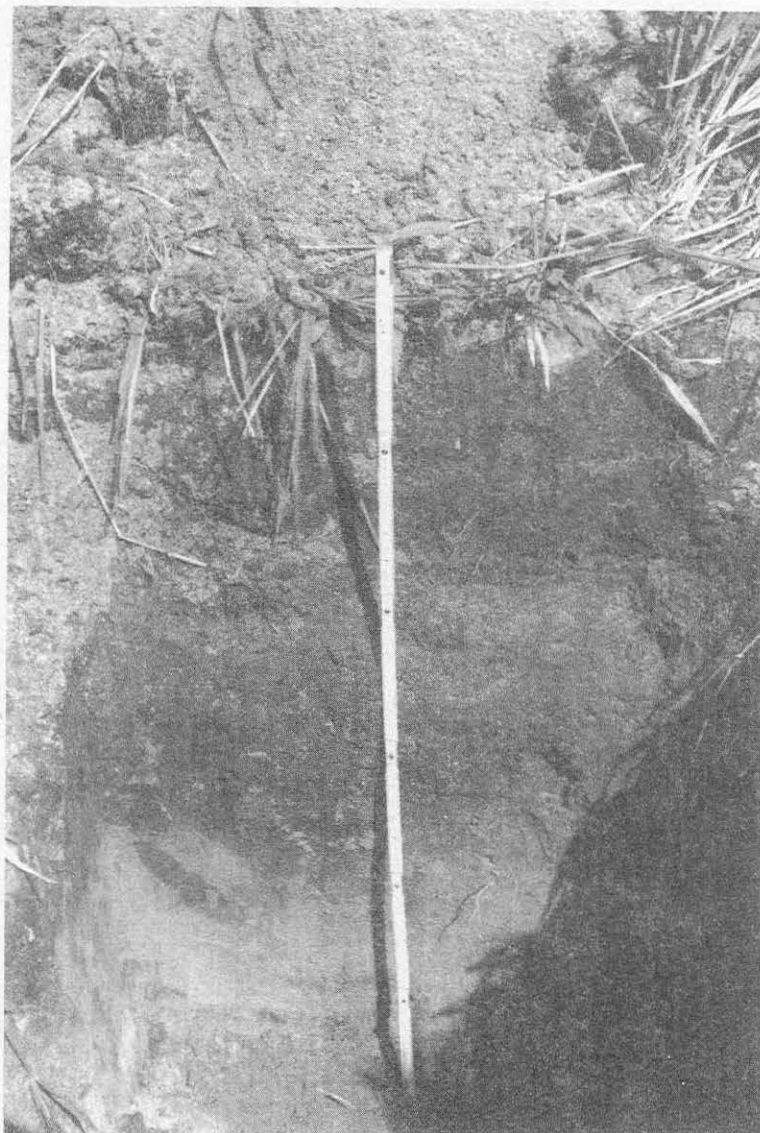
Agrargenossenschaft

Altjeßnitz e.V.

Teichstraße 24

06800 Altjeßnitz

Tel.: 03494 / 27270



Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 1,5 km NE von Jeßnitz, östlich der L135
- A14 in Richtung Halle; A9 in Richtung Dessau bis Ausfahrt Dessau-Süd, die B184 in Richtung Bitterfeld, Abzweigung nach Raguhn, durch Raguhn hindurch rechts auf die L135 bis Altjeßnitz

Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahmefläche, Art der Kontaminationsquelle)

- wechselhaft, leicht bewölkt
- etwa 4 km WSW befand sich die Filmfabrik Wolfen, in der auch ein mit Braunkohle betriebenes Großkraftwerk stand
- Wolfen war bis in die 90er Jahre hinein Sitz der photochemischen Industrie
- der Standort liegt ca. 800 m WNW der Mulde südlich eines kleinen Wald-/Parkgeländes

Nutzung des Geländes:

- 1995 Gerstenanbau, 1996 Maisanbau

A-2e: Beschreibung der Bodenproben des Standortes *Altjeßnitz*

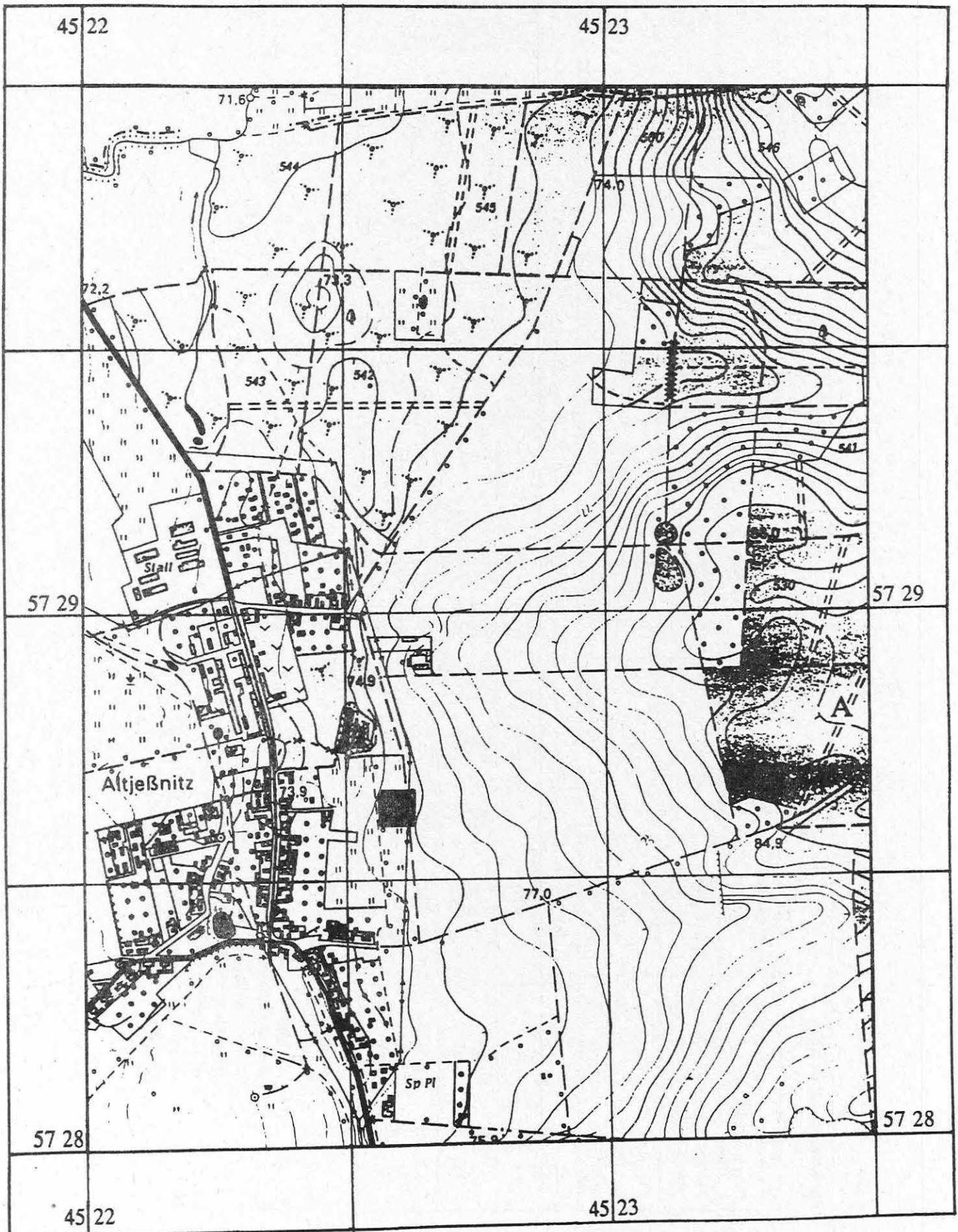
Bodentyp: Sand-Rostgley

Proben- bezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeich- nung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Alt-a (36)	21	0-25 (Ø)	Ap	HUE 10YR 2/2	SI3	2,25	1	8,70
M-Alt-B (36)	22	26-70		HUE 10YR 5/4	SI2	2,64	1	7,55
E-Alt-a	23	0-27	Ap	HUE 10YR 2/2	SI3	0,93	1	10,1
E-Alt-b	24	28-54	Ah	HUE 10YR 4/3	SI2	1,92	1	5,51
E-Alt-c	25	55-110	Go	HUE 10YR 5/4-7/2	Ss	3,64	2	2,07

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
21	5,45	0,04	105	0,20	16,1	6,34	83	120
22	2,95	n.n.	52,9	0,13	13,6	6,65	43	88,8
23	6,34	0,04	124	0,26	14,5	6,05	93	82,0
24	1,93	n.n.	54,3	0,09	12,8	5,86	8	47,8
25	0,23	n.n.	5,54	0,01	12,4	6,00	1	33,5

bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2e: Lage der Probenahme-fläche (TK10: 1006-434, Muldenstein)



XVII

A-2f: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Günthersdorf

Probennahme:

02.06.1995

Rechtswert:

451195 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:

569005 (Besell-Ellipsoid)

Flurstücks/Str.:

Am Schrägweg

Kartenblatt:

TK50 (1106-3, Halle/Saale-O)

TK25 (M-33-13-C-d, Schkeuditz)

TK10 (1106-343, Kötschlitz)

Besitzer:

Fam. Matheis

wohnhaft in Günthersdorf, Straße gegenüber (im S) H-Nr. 15;

Fam. Krupa

Günthersdorf, H-Nr. 49

Tel.: 034638 / 20719

Pächter:

siehe oben

Agrarstandorte in der Nachbarschaft gepachtet durch Agrargenossenschaft AG Kötschlitz

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 11 km E von Merseburg, an der Bundesstraße 181 Leipzig-Merseburg
- A14 in Richtung Halle; A9 in Richtung S bis Ausfahrt Günthersdorf; an der Ortseinfahrt 1. Straße links, nach der scharfen Rechtskurve geradeaus; vor dem letzten Haus auf der rechten Seite befindet sich der Standort.

Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahmefläche, Art der Kontaminationsquelle):

- stark bewölkt und Regen
- etwa 10 km WSW befinden sich die Leuna-Werke, in der auch bis in 90er Jahre mehrere mit Braunkohle betriebenen Großkraftwerke standen und chemische Produkte erzeugt wurden (Erläuterung siehe Standort Leuna).
- der Standort liegt ca. 1,5 km westlich der A9 und 500 m südlich des Mulde südlich des Saale-Elster-Kanals.

Nutzung des Geländes:

- bis 1994 ackerbaulich genutzt; bisheriger Anbau von Gerste, Weizen, Kartoffeln, Rüben; 1996 Brache

A-2f: Beschreibung der Bodenproben des Standortes *Günthersdorf*

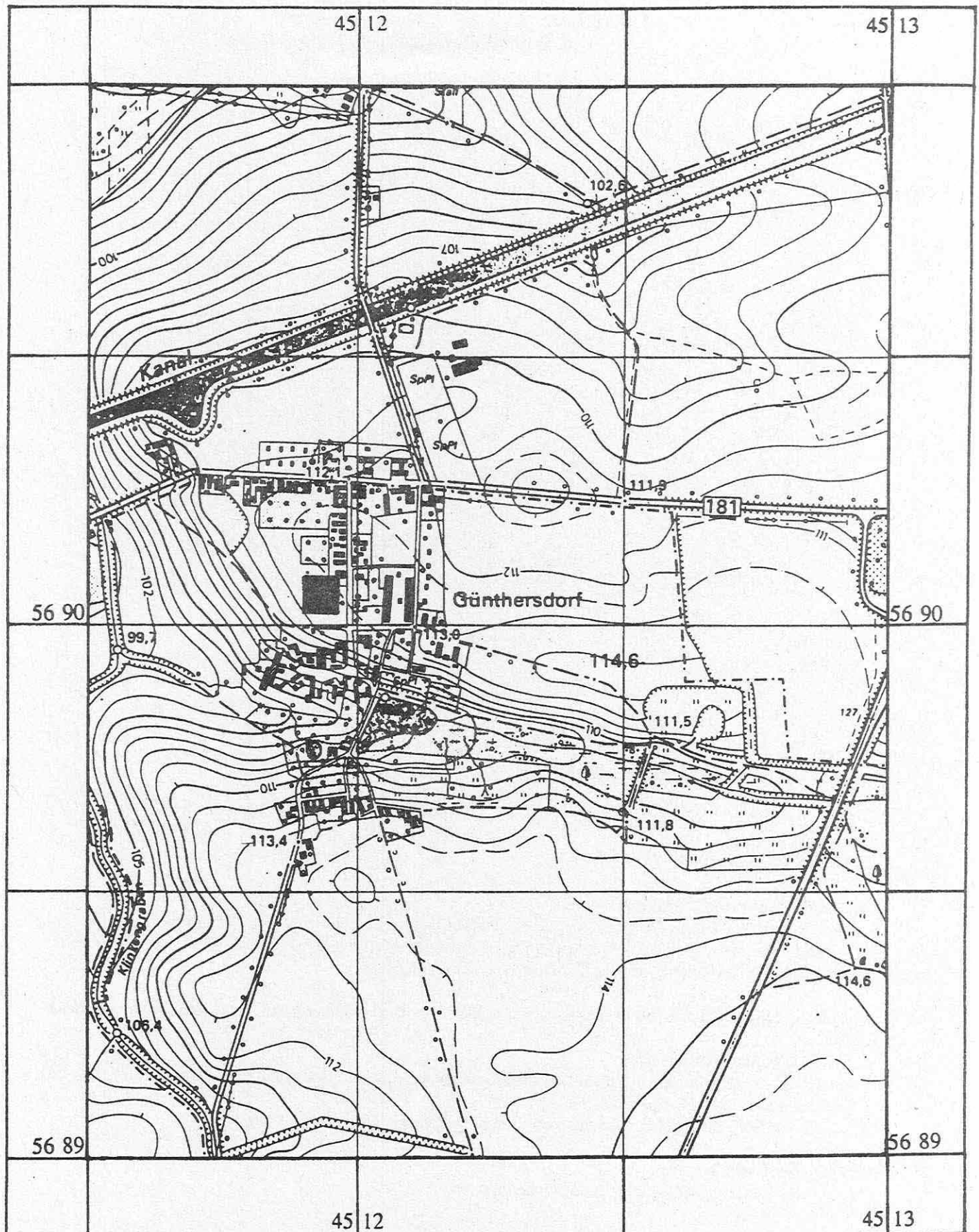
Bodentyp: Decksandlöß-Schwarzerde

Proben- bezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeich- nung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Gün-a (24)	26	0-25 (Ø)	Ap	HUE 10YR 2/1	SI4	7,82	2	11,1
M-Gün-b (24)	27	26-70		HUE 10YR 2/2	SI4	10,8	2	11,2
E-Gün-a	28	0-28	Ap	HUE 10YR 2/1	SI3	9,29	2	8,59
E-Gün-b	29	29-65	Ah	HUE 10YR 2/1-2/2	SI4	23,7	3	9,52
E-Gün-c	30	66-110	IC	HUE 10YR 4/4	Ss	22,6	3	2,75

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
26	3,14	0,07	107	0,11	17,5	6,15	57	159
27	2,18	0,04	108	0,08	15,2	6,25	45	123
28	2,68	0,03	100	0,09	17,2	6,01	50	98,6
29	1,12	0,04	62,3	0,04	15,7	6,58	32	80,6
30	0,15	0,07	17,8	0,02	6,1	6,94	7	46,1

#	bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr.	laufende Nummer
M	Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E	Einzelprobe (Schurf)
n.b.	nicht bestimmt
*	ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n.	nicht nachweisbar
BK	Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC	potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2f: Lage der Probenahme­fläche (TK10: 1106-343, Köttsch­litz)

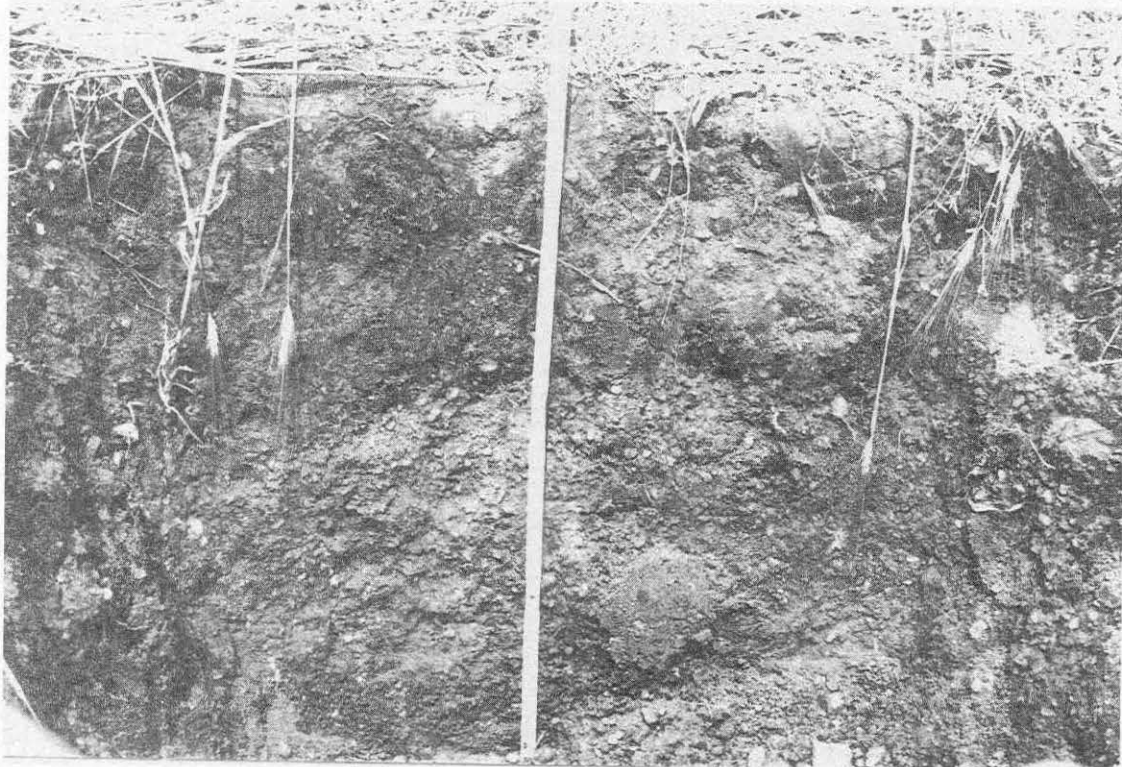


A-2g: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Gräfenhainichen

Probennahme:
06.06.1995

Rechtswert:
453275 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:
573325 (Besell-Ellipsoid)



Flurstücks/Str.:
Flurkarte G1/8
449/1, 438/1, 437/1

Kartenblatt:
TK50 (1006-4, Dessau SO)
TK25 (M-33-1-D-d, Gräfenhainichen)
TK10 (1006-442, Gräfenhainichen)

Besitzer:
Flurstücke 449/1 und 438/1 Treuhand;
Flurstück 437/1
Herr Kurt Pannier
Strohweiler Straße
06773 Gräfenhainichen

Pächter:
Agrar-GbR-Gräfenhainichen
Frau Stengel oder Herr Kluge
Berliner Straße 100
06773 Gräfenhainichen
Tel.: 034953 / 22851

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 1 km E der Kirche Gräfenhainichen, ca. 1,5 km W von Buchholz nahe der Bahnlinie
- B2 nach Bad Dübau; in Bad Dübau auf die B107 in Richtung Gräfenhainichen; vor Gräfenhainichen rechts in Richtung Hainmühle/Buchholz (Umfahrung Gräfenhainichen)

Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-Fläche, Art der Kontaminationsquelle):

- bewölkt, mittags Niederschlag
- der Standort befindet sich in einem Mindestabstand von 10 m von der Bahnlinie, etwa 2 km südlich des ehemaligen Braunkohletagebaues "Golpa-Nord".
- etwa 2 km ENE des Probenahmestandortes befindet sich ein Reperaturwerk (?).

Nutzung des Geländes:

- 1995 mit Wintergerste bestellt, 1996 Sonnenblumen

A-2g: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Gräfenhainichen

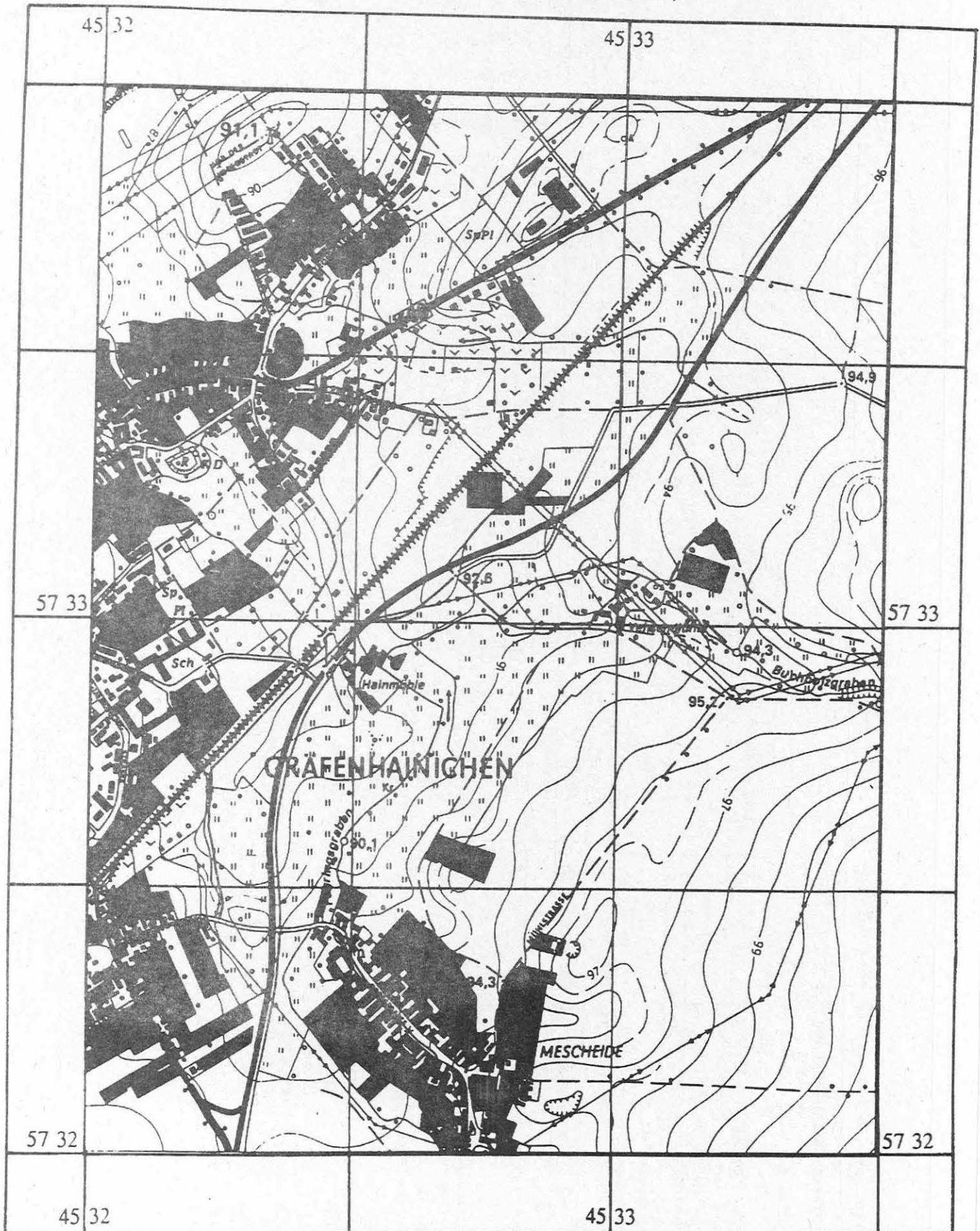
Bodentyp: Salmtief-Braunerde

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Grä-a (36)	31	0-30 (Ø)	Ap	HUE 10YR 3/1	SI3	11,5	2	7,36
M-Grä-b (36)	32	31-70		HUE 10YR 4/6	SI2	19,8	3	5,88
E-Grä-a	33	0-28	Ap	HUE 10YR 3/1	SI3	28,1	3	7,81
E-Grä-b	34	29-75	Bv + IIC	HUE 10YR 4/6	SI4	68,5	5	4,83

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
31	3,33	n.n.	66,4	0,15	12,9	5,40	54	55,4
32	0,90	n.n.	42,1	0,04	13,8	5,95	19	44,7
33	4,04	n.n.	86,6	0,16	14,4	5,48	57	69,3
34	0,49	n.n.	56,2	0,04	7,0	6,43	44	59,2

bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2g: Lage der Probenahme­fläche (TK10: 1006-442, Gräfenhainichen)



A-2h: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Zschornewitz

Probennahme:
08.06.1995

Rechtswert:
452890 (Besell-Ellipsoid)

Hochwert:
573265 (Besell-Ellipsoid)



Flurstücks/Str.:
Rosa-Luxenburg-Str.
Flurstück 365-367

Kartenblatt:
TK50 (1006-4, Dessau SO)
TK25 (M-33-1-D-d, Gräfenhainichen)
TK10 (1006-441, Zschornewitz)

Besitzer:
Flurstücke "Hackwiese" u. "Hinterste Achruchten" Z1/1, Feldstück-Nr. 125, Nr. 359-383
Probennahme auf 367, evang. Kirche, Zschornewitz

Pächter:
Agrar-GbR-Gräfenhainichen
Frau Stengel oder Herr Kluge
Berliner Straße 100
06773 Gräfenhainichen
Tel.: 034953 / 22851

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- hinter der Siedlung Zschornewitz am nordöstlichen Ortsausgang, nördl. der L136, gegenüber des Sportpl.
- B2 nach Bad Döben; in Bad Döben auf die B107 in Richtung Gräfenhainichen; in Gräfenhainichen links auf die B100 in Richtung Bitterfeld, nach etwa 2 km rechts auf die L136 in Richtung Zschornewitz; am Ortseingang 1. Straße (Rosa-Luxemburg-Str.) rechts

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- sonnig, kein Niederschlag
- Lage des Standortes 250 m südlich einer Bahnlinie und 250 m westlich einer ehemaligen Müllkippe
- in etwa 1-1,5 km Entfernung, WSW des Standortes, befand sich das große auf Braunkohlebasis betriebene Heizkraftwerk Zschornewitz

Nutzung des Geländes:

- 1995 mit Raps bestellt; 1996 Brache

A-2h: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Zschornewitz

Bodentyp: Sand-Braunpodsol

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Zsc-a (39)	35	0-30 (Ø)	Ap	HUE 10YR 1.7/1	St2	2,40	1	5,88
M-Zsc-b (39)	36	31-70		HUE 10YR 6/4-7/4	Ss	3,82	2	3,77
E-Zsc-a	37	0-26	Ap	HUE 10YR 1.7/1	St2	5,13	2	4,89
E-Zsc-b	38	27-53	Bh	HUE 10YR 5/6	Su2	6,74	2	2,81
E-Zsc-c	39	54-118	IIC	HUE 10YR 7/4-8/4	Ss	2,82	1	1,83

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
35	8,37	0,73	145	0,22	23,1	7,55	149	226
36	2,68	0,15	58,2	0,08	20,7	7,44	55	428
37	5,45	0,63	143	0,08	39,7	7,51	172	172
38	0,55	n.n.	33,3	0,04	8,7	7,50	17	103
39	0,09	n.n.	6,68	0,02	2,4	7,50	4	55,9

bezogen auf Gesamtboden

lfd. Nr. laufende Nummer

M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche

(Ø) = durchschnittliche Tiefe

E Einzelprobe (Schurf)

n.b. nicht bestimmt

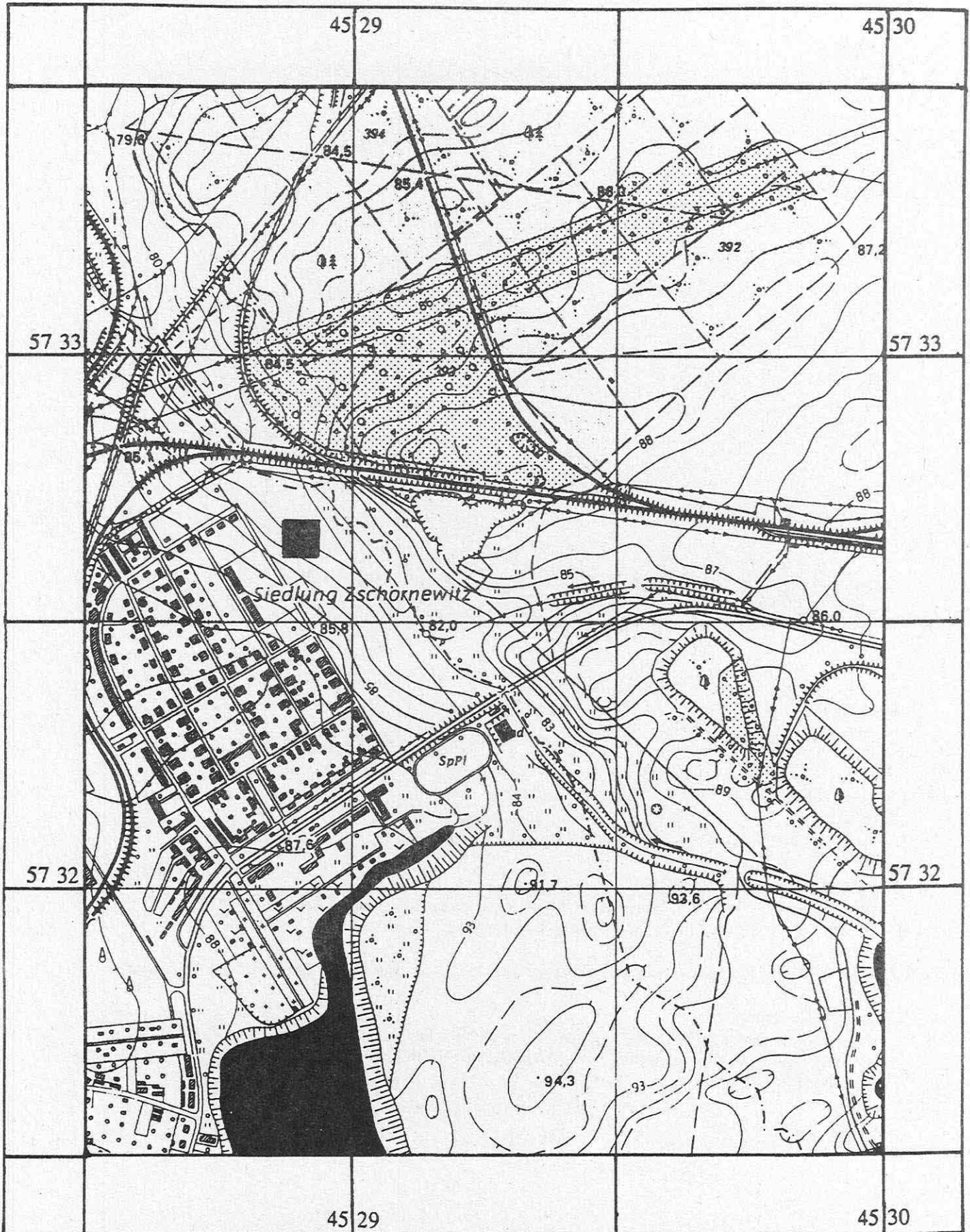
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)

n.n. nicht nachweisbar

BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)

CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2h: Lage der Probenahme-fläche (TK10: 1006-441, Zschornewitz)



A-2i: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Eisleben

Probennahme:

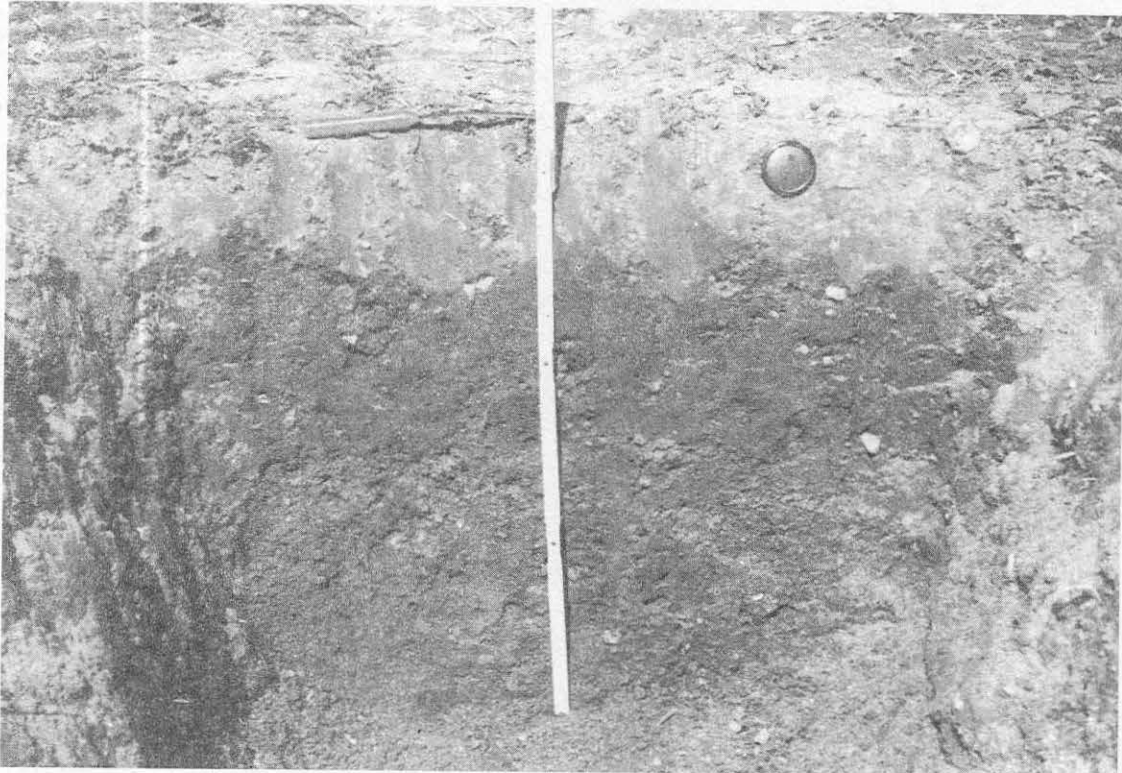
22.04.1996

Rechtswert:

267065 (Krassowski-Ellipsoid)

Hochwert:

571228 (Krassowski-Ellipsoid)



Flurstücks/Str.:

Eisleben-Sangerhausen

Kartenblatt:

TK50 (1104-2, Mansfeld)

TK25 (M-32-23-B-d, Helbra)

TK10 (M-32-23-B-d-4, Herigsdorf)

Besitzer:

nicht bekannt

Pächter:

nicht bekannt

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 7 km WSW von Eisleben an der B80 nach Sangerhausen hinter Wimmelburg
- an der B80 rechts zur ehemaligen Birkenschäferei in der 2. Rechtskurve

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- sonnig, trocken, etwa 25°C
- Abwindfahne ehemaliger Verhüttungsanlagen im Bereich Sangerhausen im SW
- Auswehung der großen Schlacken- und Bergbauhalden im Bereich Eisleben-Hettstedt im NE (Entfernung Luftlinie etwa 10 km)

Nutzung des Geländes:

- 1995 mit Ackersenf bestellt

A-2i: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Eisleben

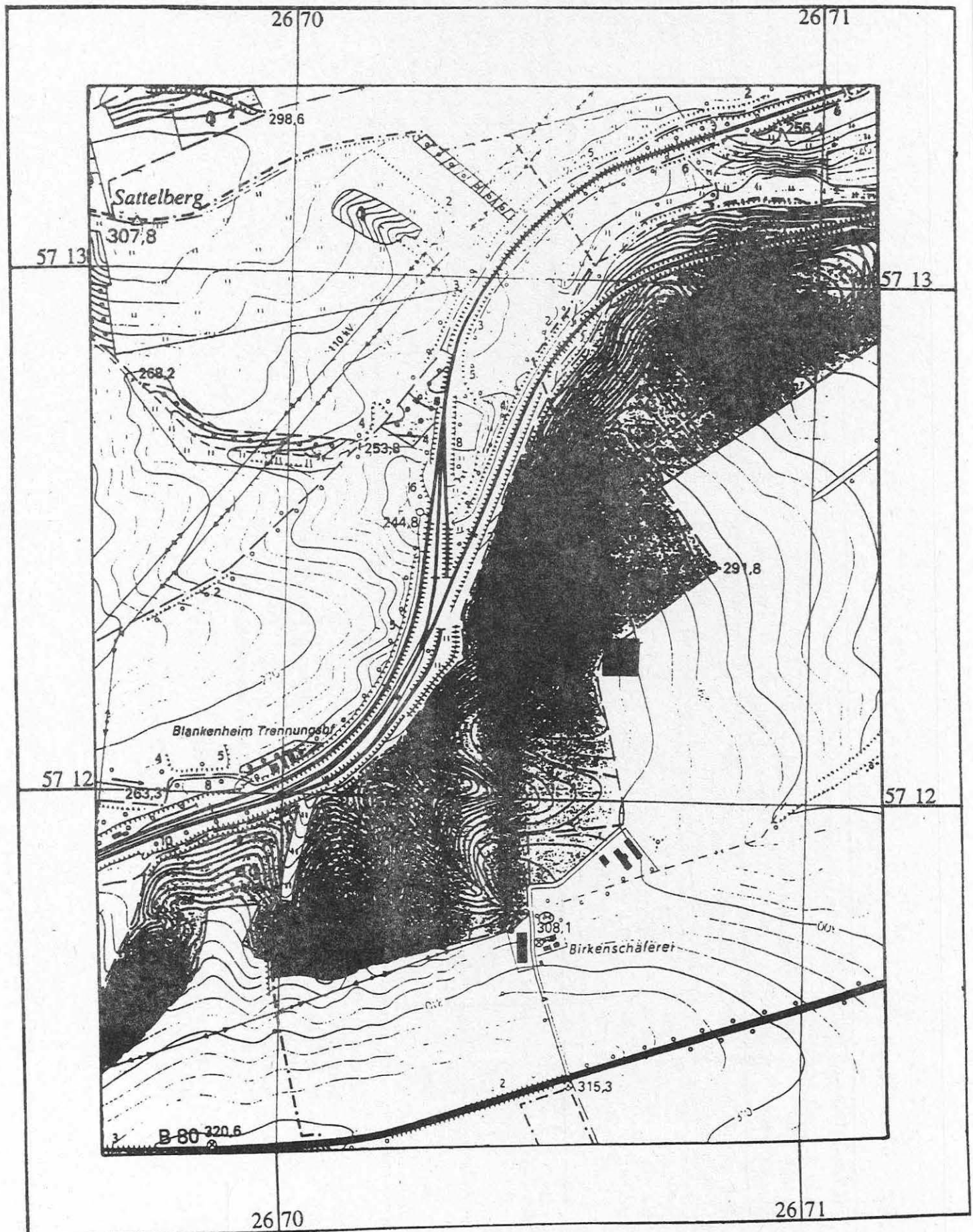
Bodentyp: Braunerde-Parabraunerde

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Eis-a (24)	40	0-30 (Ø)	Ap	HUE 10YR 3/4	Ut3	7,72	2	13,0
M-Eis-b (24)	41	31-60		HUE 10YR 4/6-5/6	Lu	26,8	3	14,1
E-Eis-a	42	0-31	Ap	HUE 10YR 3/4	Uls	20,4	3	10,4
E-Eis-b	43	32-50	Bv	HUE 5YR 3/6	St2	33,6	3	8,87 (?)
E-Eis-c	44	51-62	C	HUE 5YR 3/6	Sl4	45,9	4	11,6

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
40	2,10	0,04	60,0	0,08	16,2	6,42	27	172
41	0,93	0,03	58,7	0,03	18,3	6,44	28	187
42	1,69	n.n.	79,9	0,08	13,2	5,71	44	87
43	0,06	n.n.	57,0	0,01	4,9	4,87	11	67
44	0,09	0,03	22,2	0,04	1,7	4,37	10	100

- # bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität
(?) hoher Unsicherheitsfaktor durch hohe Kiesanteile, aber geringe Probemenge

A-2i: Lage der Probenahme-fläche (TK10: M-32-23-B-d-4, Herigsdorf)



A-2j: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Hettstedt

Probennahme:

29.04.1996

Rechtswert:

267456 (Krassowski-Ellipsoid)

Hochwert:

572386 (Krassowski-Ellipsoid)

Flurstücks/Str.:

an der B180

Kartenblatt:

TK50 (1105-1, Eisleben)

TK25 (M-32-24-A-a, Hettstedt)

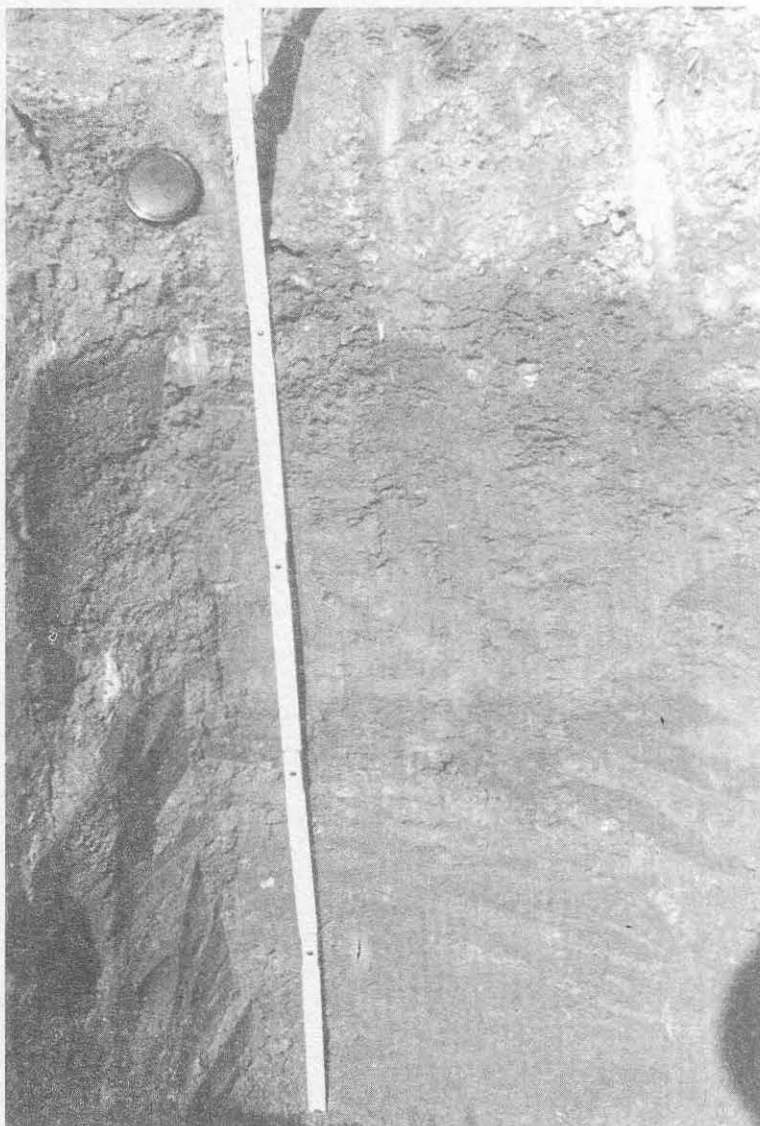
TK10 (M-32-24-A-a-3, Siersleben)

Besitzer:

DU PONT DE NEMOURS
(Deutschland) GmbH
Bereich Pflanzenschutz

Pächter:

DU PONT DE NEMOURS
(Deutschland) GmbH
DU PONT Straße 1
61343 Bad Homburg
Ansprechpartner: Herr Hoßbach
Tel.: 0347 /813500



Lagebeschreibung und Anfahrt:

- von Eisleben die B180 in Richtung Hettstedt
- unmittelbar hinter Bahnhof Siersleben links unterer Feldweg bis Wegkreuzung, dann rechts noch etwa 1 km bis Abhang

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- sonnig, trocken
- Abwindfahne der Verhüttungs- und Industriebetriebe Mansfeld bei Hettstedt, Luftlinie ca. 1 km

Nutzung des Geländes:

- 1996 mit Weizen bestellt

A-2j: Beschreibung der Bodenproben des Standortes *Hettstedt*

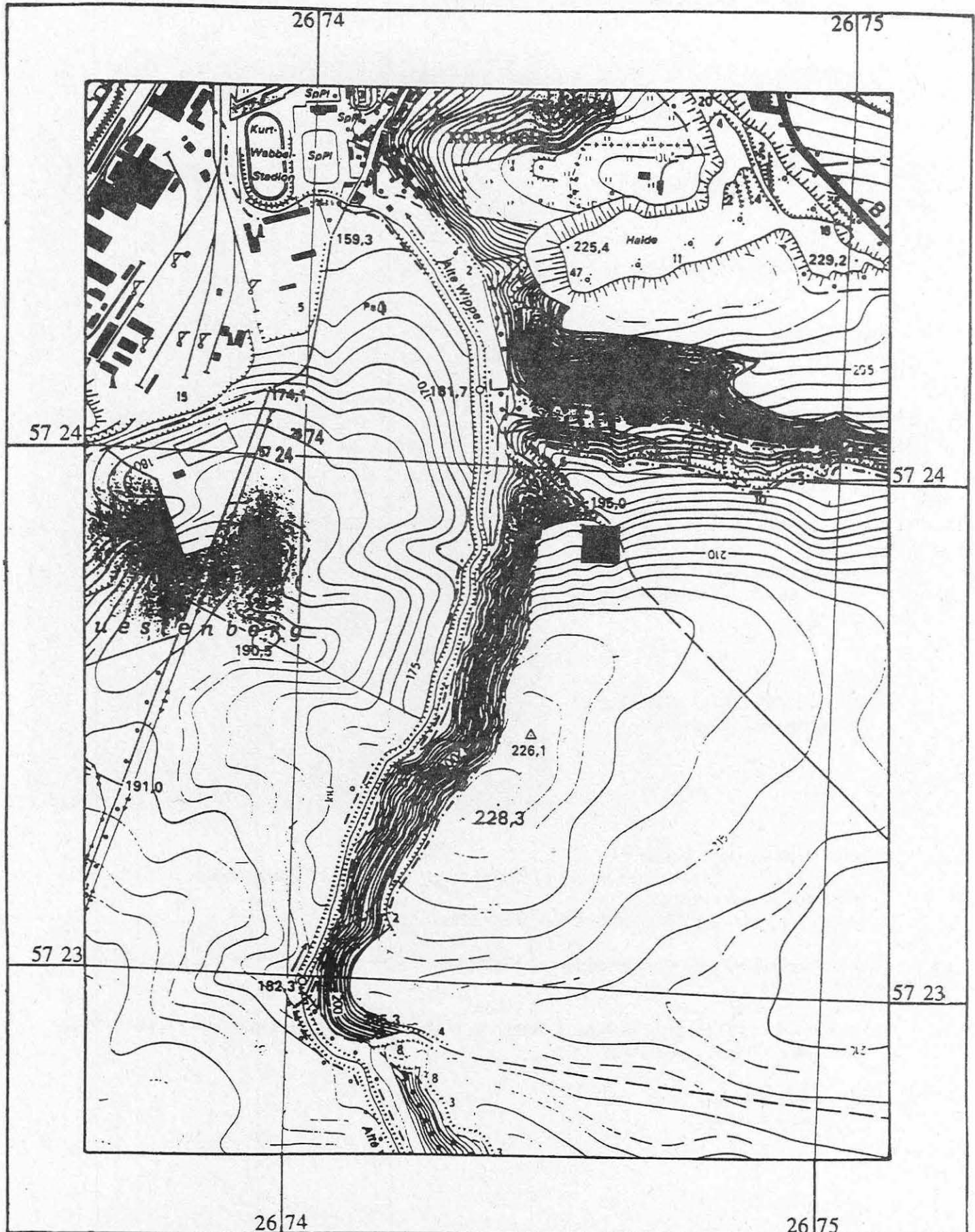
Bodentyp: Löß-Parabraunerde

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Het-a (24)	45	0-32 (Ø)	Ap	HUE 7.5YR 3/4	Tu3	4,81	2	28,8
M-Het-b (24)	46	33-70		HUE 10YR 5/3	Lu	23,2	3	23,2
E-Het-a	47	0-32	Ap (inkl Al)	HUE 7.5YR 3/4	Tu3	7,35	2	29,3
E-Het-b	48	33-45	Bt	HUE 7.5YR 4/3-4/4	Tu3	3,88	2	34,0
E-Het-c	49	46-53	Btv - Bv	HUE 10YR 5/3-5/4	Tu3	2,42	1	32,6
E-Het-d	50	54-101	IC	HUE 5YR 3/4	Ls2	41,5	4	14,3

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
45	2,24	0,56	101	0,11	13,1	6,53	39	392
46	1,24	1,04	108	0,05	18,2	7,18	27	452
47	2,08	0,20	99,3	0,09	14,7	7,07	45	214
48	0,94	0,05	110	0,06	9,0	7,17	34	306
49	0,57	0,03	119	0,06	5,4	7,30	28	317
50	0,39	4,24	127	0,07	15,6	7,61	15	278

- # bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2j: Lage der Probenahme-fläche (TK10: M-32-24-A-a-3, Siersleben)



A-2k: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Wüsteneutzsch

Probennahme:

06.05.1996

Rechtswert:

329602 (Krassowski-Ellipsoid)

Hochwert:

569250 (Krassowski-Ellipsoid)

Flurstücks/Str.:

nicht bekannt

Kartenblatt:

TK50 (1206-1, Leuna)

TK25 (M-33-25-A-a, Leuna)

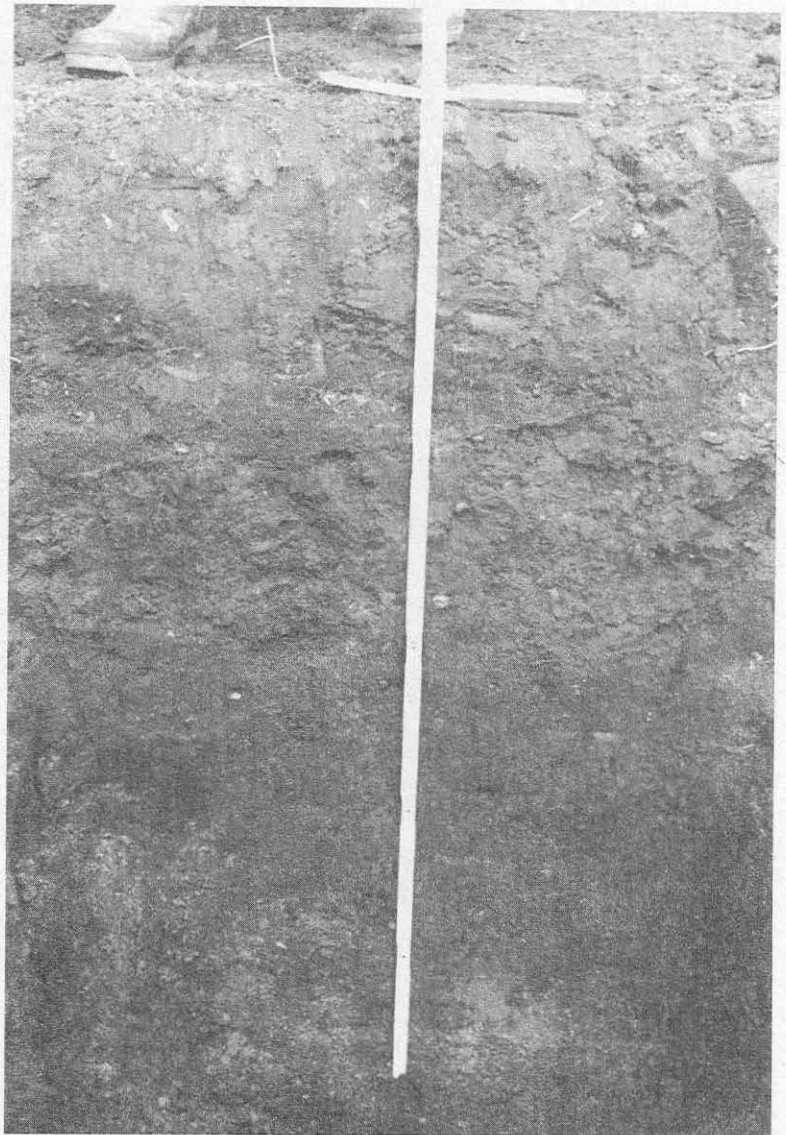
TK10 (M-33-25-A-a-2, Bad Dürrenberg)

Besitzer:

Agrargenossenschaft Bad Dürrenberg
(ehemalige Pflanzenaufwuchsversuchs-
anstalt)

Pächter:

Agrargenossenschaft Bad Dürrenberg
Ansprechpartner: Herr Hesse



Lagebeschreibung und Anfahrt:

- an der B181 von Leipzig nach Merseburg; hinter Wallendorf links in Richtung Kötzschau; rechts nach Wüsteneutzsch bis Ortsausgang
- etwa 80 m östlich der Straße nach Wölkau wurde Schurf angelegt

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- schwach bewölkt, feucht
- weitere Abwindfahne der Leuna-Werke (Luftlinie ca. 4 km entlang der Hauptwindrichtung WSW -> ENE)
- 1 km NE befindet sich Kiesabbau

Nutzung des Geländes:

- 1996 mit Mais bestellt

A-2k: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Wüsteneutzsch

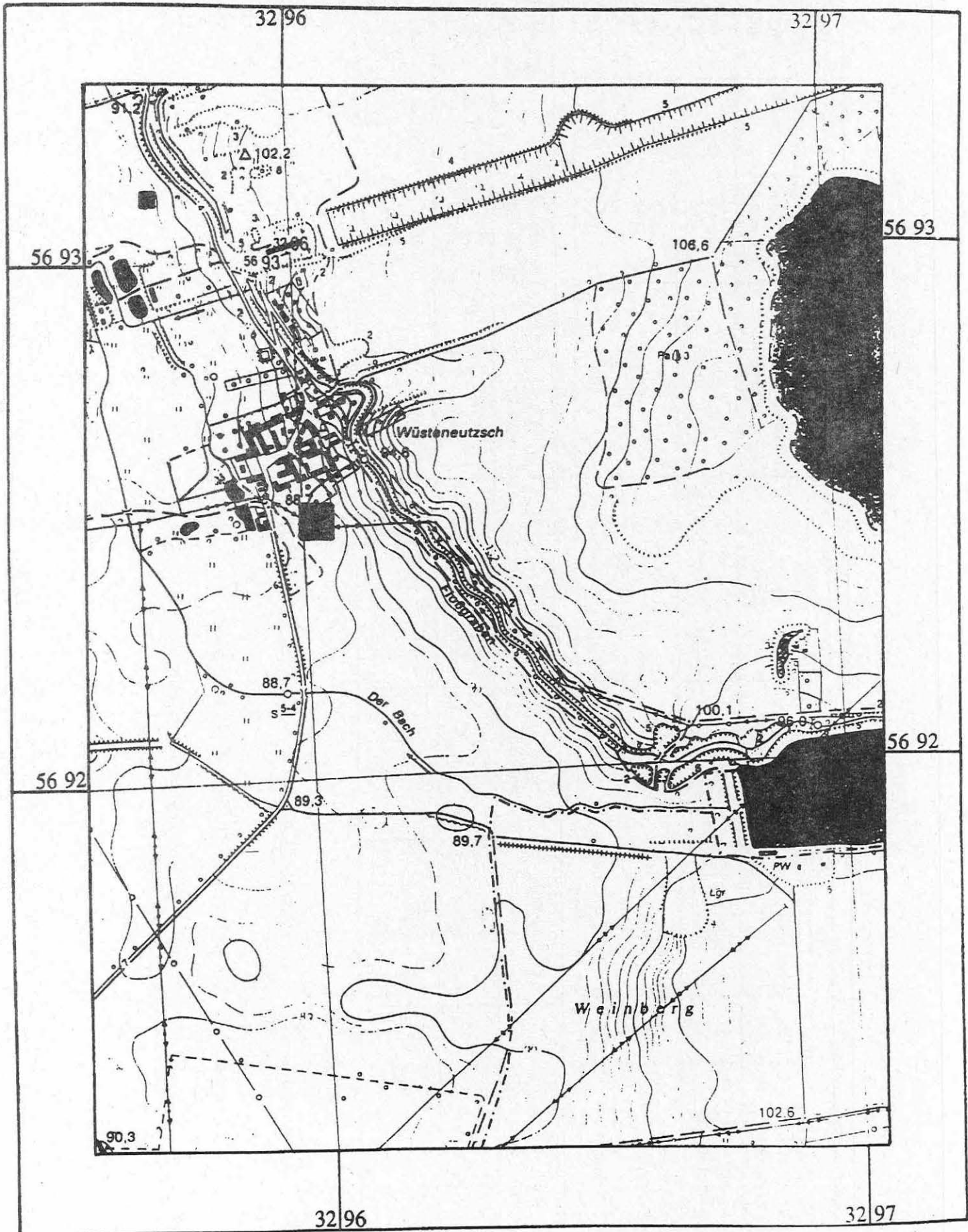
Bodentyp: Decksandlöß-Schwarzerde

Proben- bezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeich- nung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Wüs-a (30)	51	0-30 (Ø)	Ap	HUE 10YR 3/1	Ls2	2,39	1	20,8
M-Wüs-b (30)	52	31-70		HUE 10YR 2/1-3/1	Us	4,66	2	6,12
E-Wüs-a	53	0-31	Ap	HUE 10YR 3/1	Lu	5,88	2	16,4
E-Wüs-b	54	32-78	Axh	HUE 10YR 3/1	Uls	2,98	1	11,0
E-Wüs-c	55	79-102	1C	HUE 7.5YR 3/1 HUE 10YR 4/3-5/4	Uls	17,2	3	7,53

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
51	3,52	0,66	117	0,16	13,6	7,33	37	392
52	2,87	1,15	116	0,14	13,4	7,52	26	759
53	3,96	1,02	125	0,17	14,6	7,38	28	344
54	2,15	1,56	113	0,10	16,3	7,67	13	287
55	1,36	5,03	97,1	0,04	43,9	7,69	5	361

bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2k: Lage der Probenahme­fläche (TK10: M-33-25-A-a-2, Bad Dürrenberg)

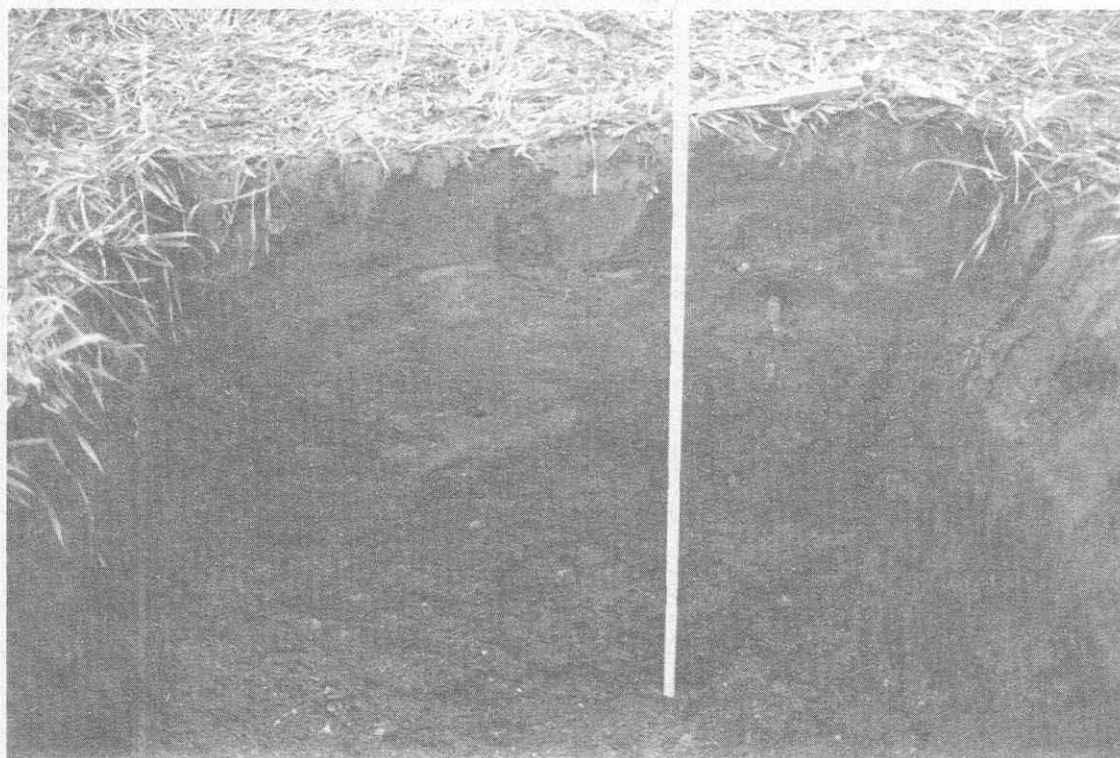


A-21: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Döllnitz

Probennahme:
13.05.1996

Rechtswert:
329337 (Krassowski-Ellipsoid)

Hochwert:
570292 (Krassowski-Ellipsoid)



Flurstücks/Str.:
708

Kartenblatt:
TK50 (1106-3, Halle/Saale O)
TK25 (M-33-13-C-a, Halle/Saale O)
TK10 (M-33-12-C-a-3, Halle SO)

Besitzer:
Adolf Goedecke
biolog.-dynamische Landwirtschaft / Gutshof
06184 Döllnitz
Tel.: 0345 / 780832

Pächter:
Adolf Goedecke
biolog.-dynamische Landwirtschaft / Gutshof
06184 Döllnitz
Tel.: 0345 / 780832

Lagebeschreibung und Anfahrt:

- B6 von Leipzig nach Schkeuditz, in Schkeuditz links nach Raßnitz-Döllnitz bis Ortsausgang Döllnitz an letzter Verkehrsinsel rechts in Sackgasse und in Fortsetzung auf Weg ca. 300 m (einschließlich Überquerung Straße).

Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahmefläche, Art der Kontaminationsquelle):

- stark bewölkt, kein Niederschlag, ca. 15°C
- weiter Abwindfahne der Buna-Werke in Schkopau (Luftlinie etwa 3-4 km NE)
- 1 km NE des Standortes befindet sich Hausmülldeponie, östlich der Straße Döllnitz-Dieskau

Nutzung des Geländes:

- 1996 mit Weizen bestellt

A-2l: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Döllnitz

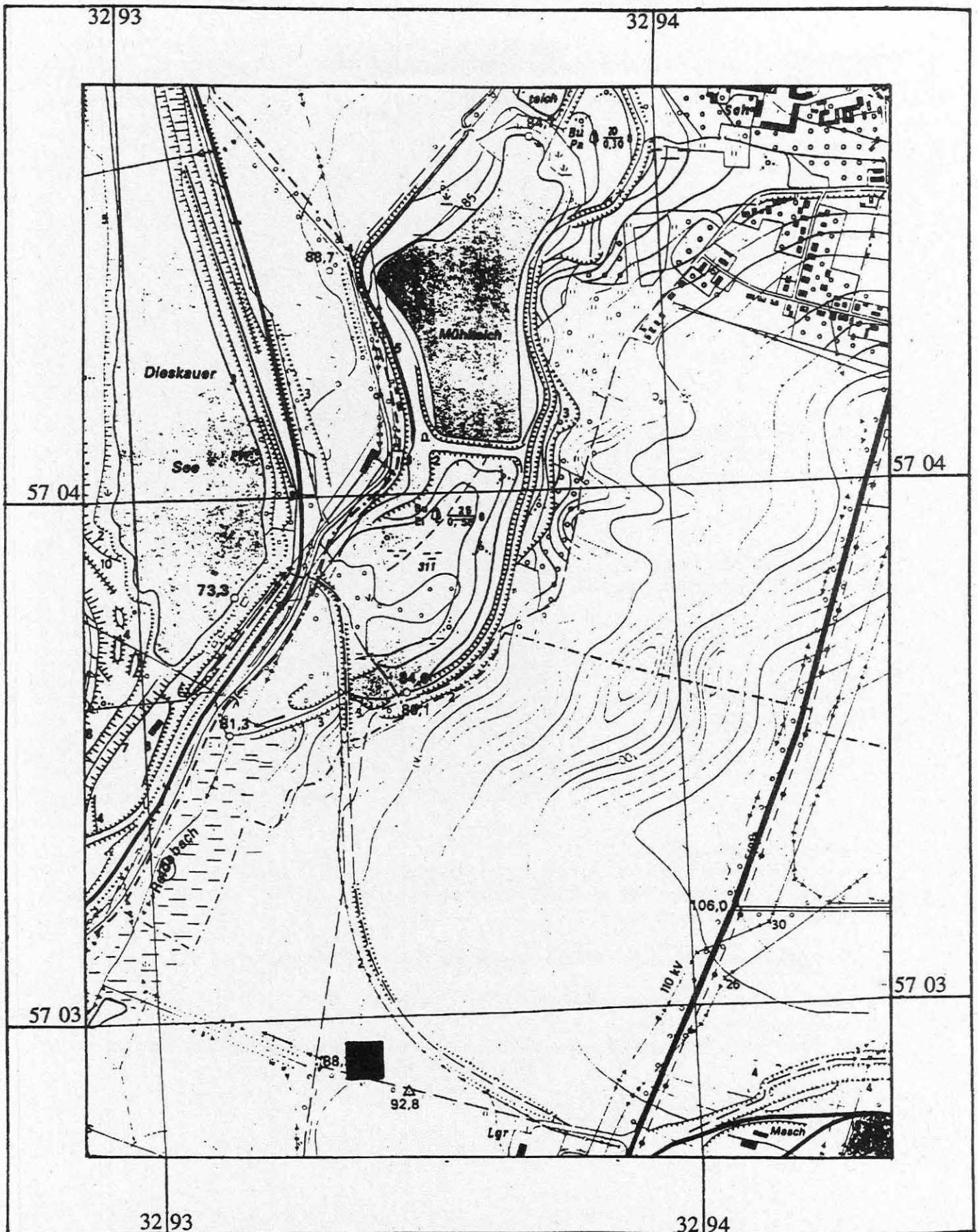
Bodentyp: Decksandlöß-Braunschwarzerde

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Döl-a (36)	56	0-30 (Ø)	Ap	HUE 10YR 1.7/1-2/1	SI4	8,75	2	12,1
M-Döl-b (36)	57	31-70		HUE 10YR 2/3	SI4	7,86	2	12,2
E-Döl-a	58	0-27	Ap	HUE 10YR 1.7/1	SI3	3,24	2	9,82
E-Döl-b	59	28-42	Bv ₁	HUE 10YR2/3-3/3	SI4	2,19	1	12,5
E-Döl-c	60	43-65	Bv ₂	HUE 10YR 2/2-3/2	SI3	12,9	2	10,2
E-Döl-d	61	66-93	C	HUE 10YR 4/3-4/4	St2	62,8	5	7,29

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
56	3,24	n.n.	89,1	0,13	14,8	6,74	46	165
57	1,73	n.n.	49,0	0,09	11,3	7,00	41	155
58	2,36	n.n.	48,7	0,11	12,5	6,55	50	155
59	1,26	n.n.	42,8	0,09	8,50	6,65	42	88
60	1,03	n.n.	41,0	0,07	8,20	6,75	37	76
61	0,46	n.n.	50,3	0,03	9,90	7,03	34	122

- # bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-21: Lage der Probenahme-fläche (TK10: M-33-12-C-a-3, Halle SO)



A-2m: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Meuschau

Probennahme:

20.05.1996

Rechtswert:

329328 (Krassowski-Ellipsoid)

Hochwert:

569671 (Krassowski-Ellipsoid)

Flurstücks/Str.:

nicht bekannt

Kartenblatt:

TK50 (1106-3, Halle/Saale O)

TK25 (M-33-13-C-c, Merseburg O)

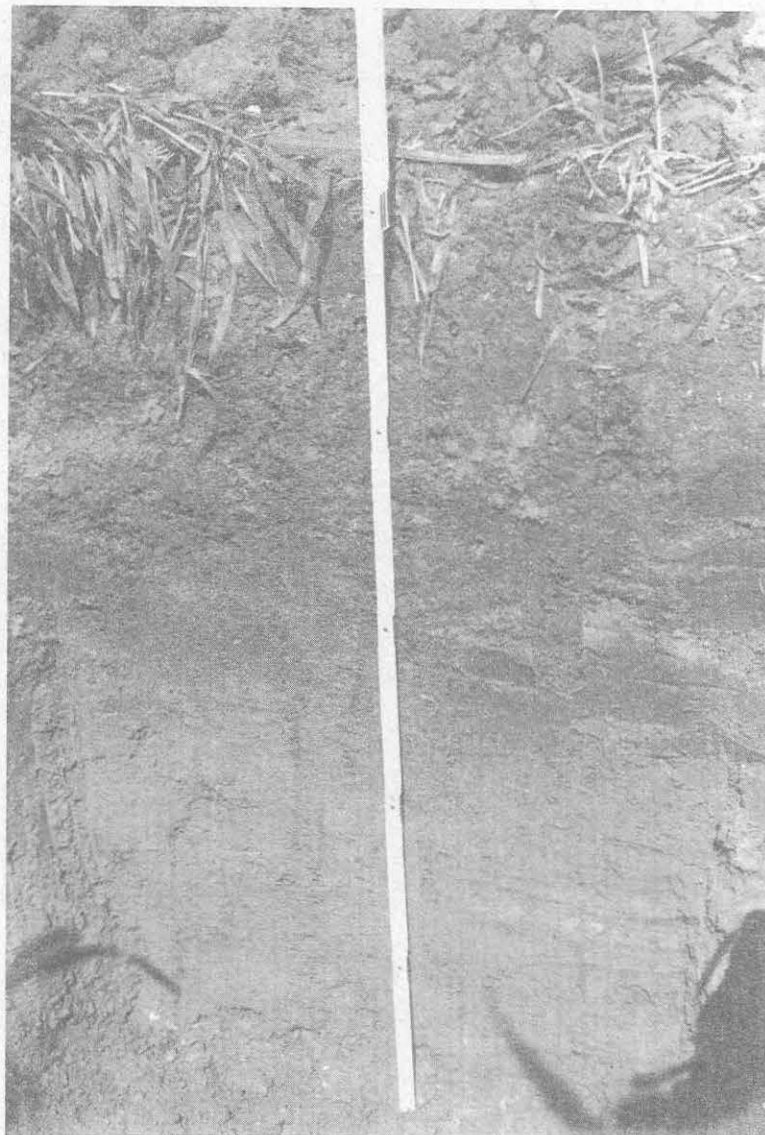
TK10 (M-33-13-C-c-3, Merseburg O)

Besitzer:

Agrargenossenschaft Bad Dürrenberg
(ehemalige Pflanzenaufwuchsversuchs-
anstalt)

Pächter:

Agrargenossenschaft Bad Dürrenberg
Ansprechpartner: Herr Hesse



Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 1,5 km ENE von Merseburg, ca. 5 km SE von Schkopau und 5 km N von Leuna
- B 181 von Leipzig bis hinter Wallendorf; dann letzte Abzweigung rechts vor Saale nach Lochau, nach etwa 500 m rechts in Feldweg

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- stark bewölkt, kein Niederschlag, ca. 15°C
- Abwindfahne der Stadt Merseburg
- Abwindfahne entlang der 2. Hauptwindrichtung (NW-SE) von Schkopau (Buna-Werke), Luftlinie etwa 5 km

Nutzung des Geländes:

- 1996 mit Weizen bestellt

A-2m: Beschreibung der Bodenproben des Standortes Meuschau

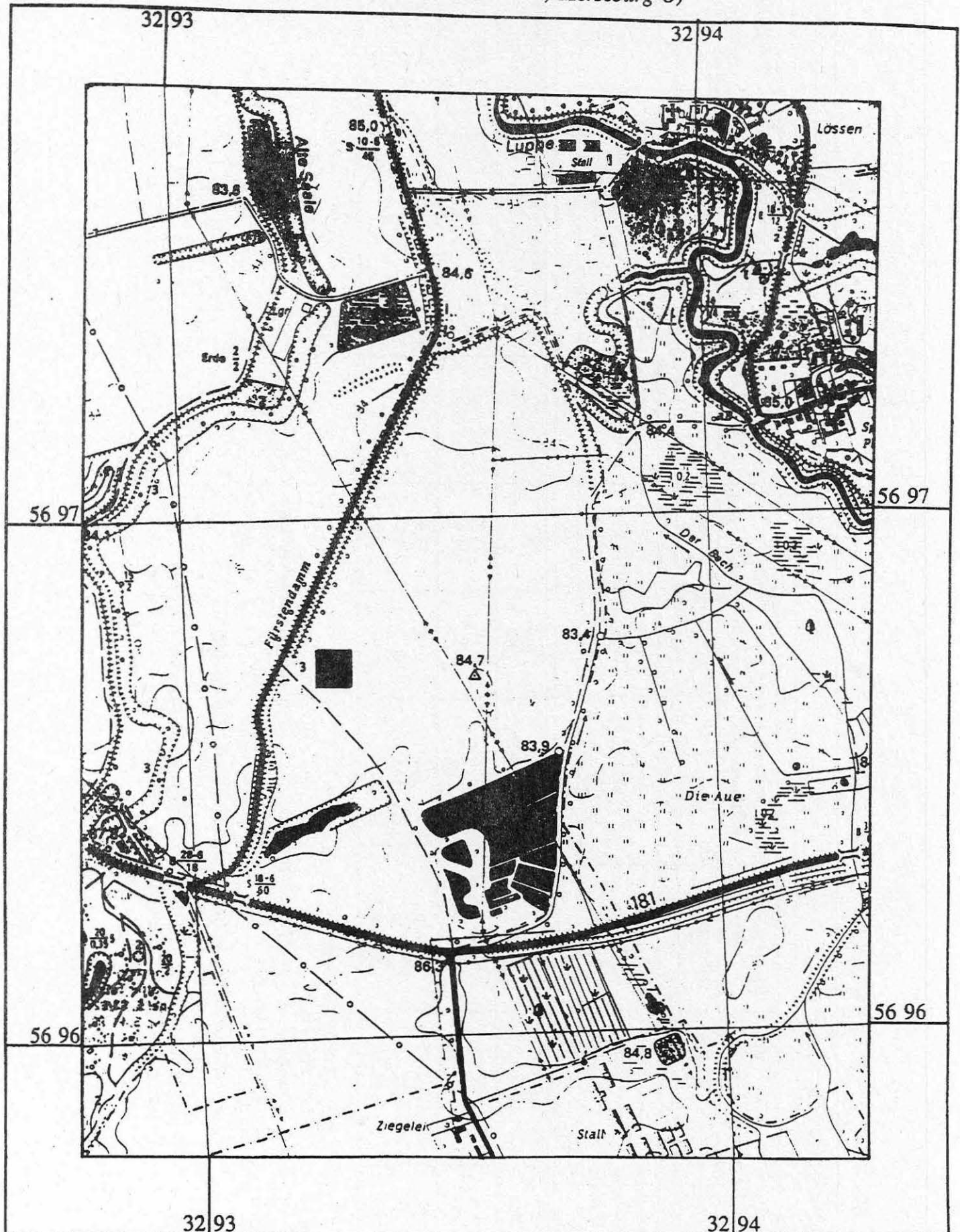
Bodentyp: Auenlehm-Vega

Proben- bezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeich- nung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Meu-a (32)	62	0-35 (Ø)	Ap	HUE 10YR 1.7/1-2/1	Lt3	1,10	1	35,1
M-Meu-b (32)	63	36-70		HUE 10YR 2/3-3/3	Lt3	0,43	1	36,3
E-Meu-a	64	0-38	Ap	HUE 10YR 1.7/1	Lt3	1,84	1	35,9
E-Meu-b	65	39-56	aM	HUE 10YR 2/3-4/3	Lt3		1	36,1
E-Meu-c	66	57-100	aM	HUE 10YR 4/3	Ls3	0,65	1	23,3

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt * (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
62	3,70	0,09	150	0,17	12,5	7,08	37	274
63	2,52	0,09	133	0,13	11,9	7,26	27	300
64	4,00	0,10	144	0,07	32,6	7,11	33	261
65	1,13	n.n.	148	0,07	9,6	7,42	13	314
66	0,45	0,12	88,7	0,04	7,7	7,45	9	465

bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2m: Lage der Probenahme-fläche (TK10: M-33-13-C-c-3, Merseburg O)



A-2n: Standortprotokoll und Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen am Standort Burgkernitz

Probennahme:

28.05.1996

Rechtswert:

331920 (Krassowski-Ellipsoid)

Hochwert:

573072 (Krassowski-Ellipsoid)

Flurstücks/Str.:

nicht bekannt

Kartenblatt:

TK50 (1006-4, Dessau SO)

TK25 (M-33-1-D-d, Gräfenhainichen)

TK10 (M-33-1-D-d-3, Burgkernitz)

Besitzer:

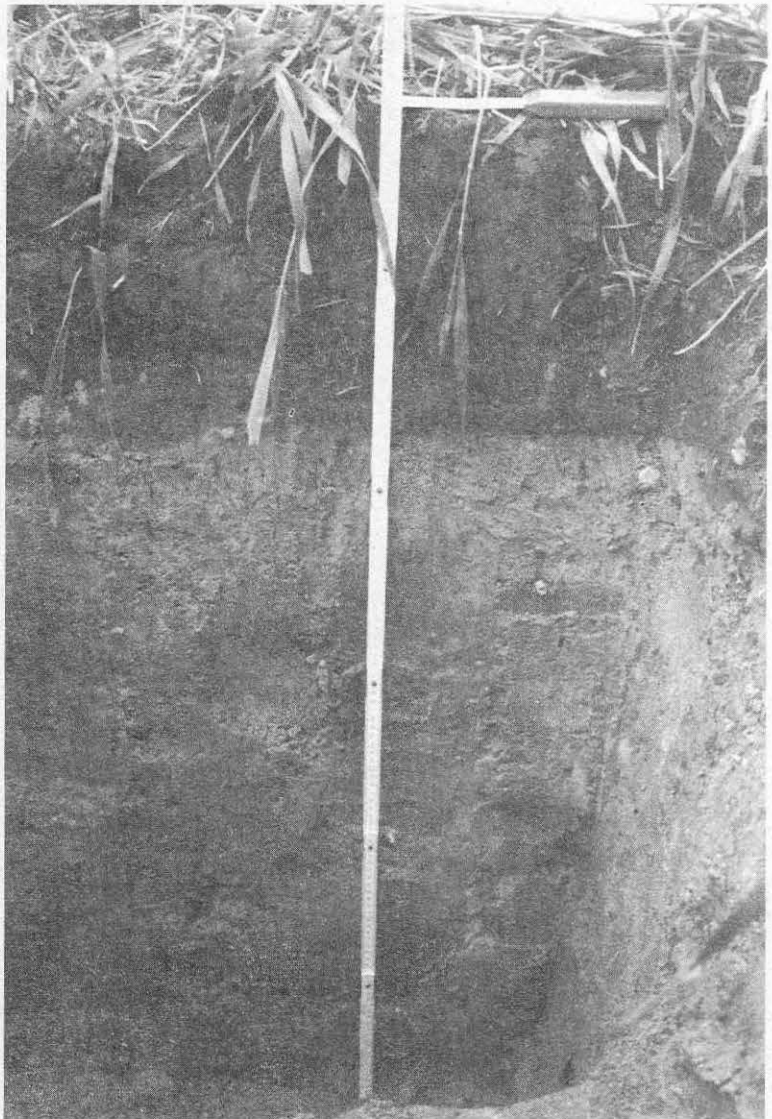
nicht bekannt

Pächter:

Agrarunion Schlaitz e.G.

Ansprechpartner: Herr Bernd Forje

Tel.: 0349 / 55473



Lagebeschreibung und Anfahrt:

- etwa 8-10 km NE von Bitterfeld und etwa 2 km ENE von Muldenstein
- von Bitterfeld die B183 in Richtung Schwemsal/Bad Döben; kurz nach dem Muldestausee links (B100) in Richtung Gräfenhainichen bis Schlaitz; in Schlaitz links in Richtung Burgkernitz; am Bahnübergang links zum Badese

**Zusätzliche Anmerkungen (Wetterverhältnisse, Umfeld der Probennahme-
fläche, Art der Kontaminations-
quelle):**

- leicht bewölkt, ca. 10-12°C
- weitere Abwindfahne des ehemaligen Muldenkraftwerkes "Muldenstein", (Luftlinie etwa 2-3 km)

Nutzung des Geländes:

- 1996 mit Weizen bestellt

A-2n: Beschreibung der Bodenproben des Standortes *Burgkernitz*

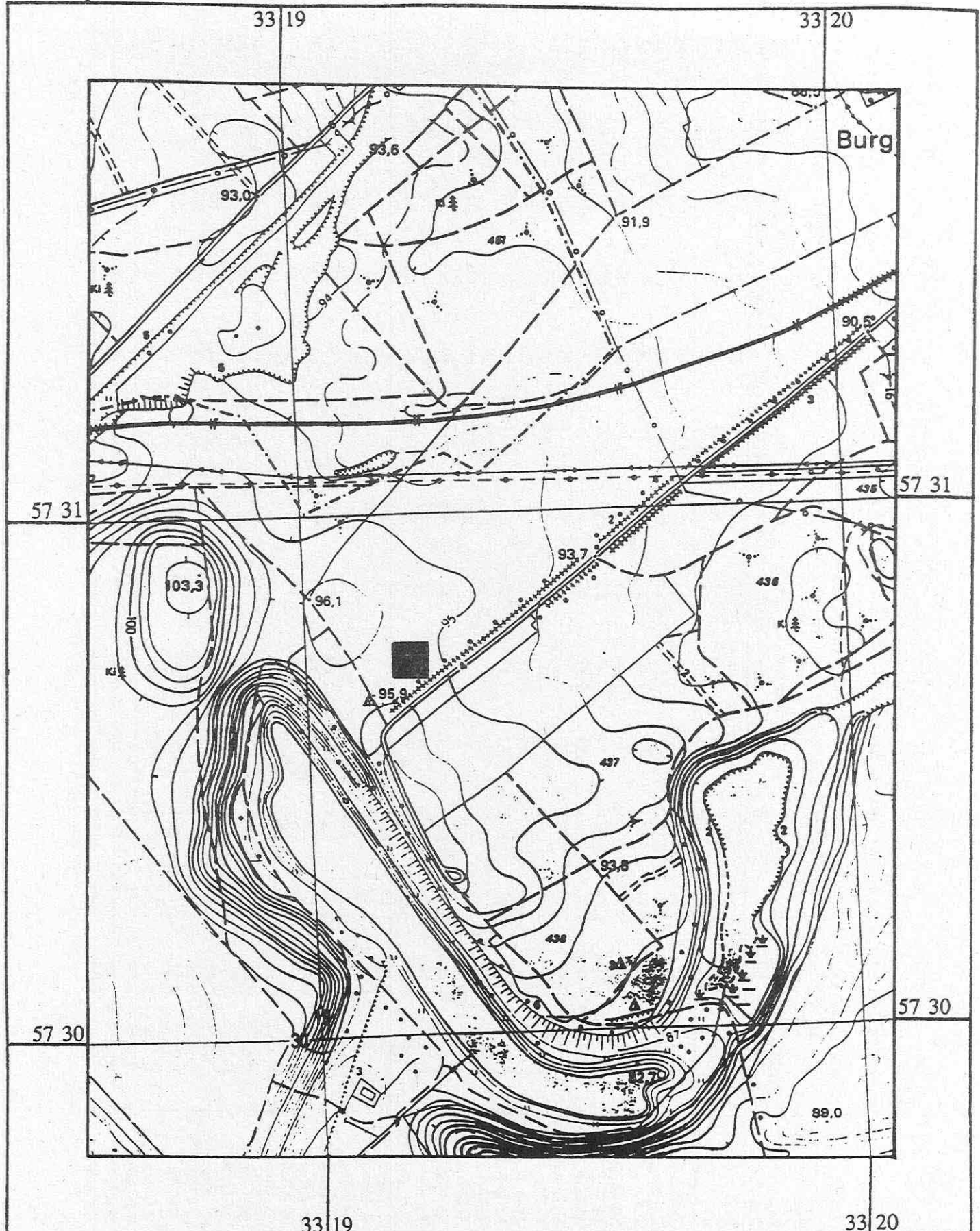
Bodentyp: Sand-Braunpodsol-Rosterde

Probenbezeichnung	lfd. Nr.	Entnahmetiefe (cm)	Horizontbezeichnung nach BK	Farbe (Munsell)	Bodenart nach BK (Feinboden)	Korngröße > 2 mm (%)	BK	Tongehalt [#] (%)
M-Bur-a (36)	67	0-30 (Ø)	Ap	HUE 10YR 2/1-3/1	SI3	2,53	1	9,49
M-Bur-b (36)	68	31-70		HUE 10YR 4/3	SI3	5,58	2	10,0
E-Bur-a	69	0-29	Ap	HUE 10YR 2/1-3/1	SI2	5,52	2	7,51
E-Bur-b	70	30-51	Bhv	HUE 7.5YR 4/4 HUE 10YR 4/4	SI3	3,91	2	11,1
E-Bur-c	71	52-83	Bv	HUE 7.5YR 4/4	Ls4	10,1	2	18,0
E-Bur-d	72	84-115	C	HUE 7.5YR 4/4-4/6	Ls4	1,62	1	19,6

lfd. Nr.	Humusgehalt * (%)	Carbonatgehalt (%)	CEC (mval/kg)	N _{ges.} * (%)	C/N	pH-Wert * (CaCl ₂)	Magn. Suszeptibilität * (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Leitfähigkeit (µs/cm)
67	2,93	n.n.	82,8	0,11	15,4	5,92	74	89
68	0,71	n.n.	41,9	0,05	8,80	6,29	14	100
69	2,76	n.n.	60,8	0,12	13,3	5,81	82	86
70	0,27	n.n.	60,2	0,03	6,20	5,99	9	64
71	0,15	n.n.	61,5	0,02	5,10	5,96	13	96
72	0,07	n.n.	57,2	0,04	1,30	6,25	12	87

- # bezogen auf Gesamtboden
lfd. Nr. laufende Nummer
M Mischprobe (x) = Zahl der Einstiche (Ø) = durchschnittliche Tiefe
E Einzelprobe (Schurf)
n.b. nicht bestimmt
* ermittelt aus Mehrfachbestimmungen (aus neuem Probenmaterial)
n.n. nicht nachweisbar
BK Angaben nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ausgabe 1994)
CEC potentielle Kationenaustauschkapazität

A-2n: Lage der Probenahme-fläche (TK10: M-33-1-D-d-3, Burgkennitz)



A-3a: Gesamtgehalte von Haupt- und Spurenelementen im Boden (bestimmt mit der WDXRF)

= Werte die über dem BW I (Hintergrundwerte, Referenzwerte) nach Eikmann und Klocke liegen

= Werte die über dem BW II (Prüfwerte, Toleranzwerte) nach Eikmann und Klocke liegen; BW III - Werte (Eingreifwerte) werden nicht erreicht

Standorte Einheit	Na ₂ O %	MgO %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O %	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	V mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Zr mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
M-Leu-a	0,40	0,86	8,96	1,83	2,31	2,86	56	62	548	23	19	59	374	384	28
M-Leu-b	0,46	1,00	9,61	2,00	1,63	2,89	52	56	459	23	12	48	403	388	18
E-Leu-a	0,38	0,83	8,52	1,83	2,15	2,56	49	57	467	23	15	51	362	389	26
E-Leu-b	0,36	0,83	8,23	1,78	1,13	2,81	45	57	429	22	8	35	346	338	13
E-Leu-c	0,45	1,10	9,49	2,00	1,01	2,67	53	64	331	25	12	33	338	344	13
E-Leu-d	0,51	1,02	8,31	1,89	2,62	2,40	37	55	287	22	13	32	325	368	14
M-Spe-a	0,34	0,68	7,34	1,70	0,96	2,38	47	50	449	18	18	53	331	335	24
M-Spe-b	0,35	0,71	6,84	1,64	2,14	2,43	43	53	402	20	17	40	364	343	15
E-Spe-a	0,49	1,04	9,88	2,17	1,92	2,92	47	62	538	21	24	70	435	424	28
E-Spe-b	0,54	1,34	7,64	1,93	7,50	2,12	29	46	324	18	12	29	414	397	14
E-Spe-c	0,62	1,89	7,65	1,90	7,55	2,22	35	55	364	18	12	30	475	397	13
M-Sch-a	0,46	1,84	11,2	2,52	4,71	3,56	60	71	695	30	31	83	331	505	32
M-Sch-b	0,36	1,44	8,95	2,08	3,51	3,15	58	62	637	30	24	62	274	419	23
E-Sch-a	0,43	1,74	10,6	2,38	4,44	3,54	61	73	696	37	30	72	322	453	27
E-Sch-b	0,45	1,74	10,3	2,42	3,69	3,34	62	66	697	31	25	63	345	463	23
M-Etz-a	0,42	1,16	8,76	1,94	4,34	2,51	42	55	504	20	22	57	439	372	25
M-Etz-b	0,50	1,53	7,71	1,80	7,91	2,26	33	53	401	17	16	35	445	359	14
E-Etz-a	0,49	0,98	8,69	2,01	2,57	2,56	46	54	525	19	18	54	466	374	27
E-Etz-b	0,41	1,13	6,97	1,68	7,77	2,07	38	51	358	20	17	32	416	345	11
E-Etz-c	0,59	1,82	7,41	1,76	10,0	2,11	35	54	306	17	14	27	473	379	10
M-Alt-a	0,21	0,27	5,36	1,05	0,79	2,01	33	36	357	12	10	52	105	189	25
M-Alt-b	0,37	0,29	6,62	1,25	0,57	1,49	23	40	217	9	8	41	117	244	23
E-Alt-a	0,28	0,32	6,07	1,13	0,67	1,88	35	38	370	13	12	63	140	259	36
E-Alt-b	0,38	0,19	5,15	1,12	0,25	0,79	14	34	92	9	5	27	101	224	16
E-Alt-c	0,41	0,12	3,86	1,18	0,19	0,33	5	25	26	6	3	9	50	228	7
M-Gün-a	0,46	0,52	6,53	1,56	0,98	1,66	28	37	510	13	22	74	188	306	23
M-Gün-b	0,48	0,54	6,52	1,54	1,05	1,79	27	36	533	14	23	67	212	339	17
E-Gün-a	0,55	0,49	6,42	1,57	0,77	1,53	23	39	482	12	19	62	179	295	23
E-Gün-b	0,48	0,54	6,92	1,57	0,75	1,79	26	42	429	15	15	43	209	322	10
E-Gün-c	0,43	0,31	4,16	1,04	0,54	0,89	14	25	157	9	9	17	73	221	6
M-Grä-a	0,41	0,41	6,51	1,32	0,67	1,80	32	37	530	10	16	54	206	260	28
M-Grä-b	0,44	0,43	5,63	1,24	0,45	1,88	25	38	309	11	10	31	196	277	12
E-Grä-a	0,41	0,47	6,47	1,32	0,71	2,09	44	41	577	18	8	52	199	259	26
E-Grä-b	0,95	0,95	9,46	1,90	1,07	4,58	43	41	660	15	15	46	113	435	22

A-3a: Gesamtgehalt von Haupt- und Spurenelementen im Boden (bestimmt mit der WDXRF)

Standorte Einheit	Na ₂ O %	MgO %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O %	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	V mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Zr mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
M-Zsc-a	0,18	0,26	5,08	0,72	3,22	1,81	49	44	391	11	10	30	112	226	22
M-Zsc-b	0,25	0,18	4,19	0,83	1,06	0,82	20	28	113	9	4	16	124	200	11
E-Zsc-a	0,21	0,32	5,73	0,78	3,11	1,42	37	39	288	12	7	31	144	253	17
E-Zsc-b	0,32	0,15	3,89	1,00	0,31	0,71	15	29	99	3	5	18	212	237	9
E-Zsc-c	0,28	0,14	3,08	0,94	0,16	0,44	4	24	53	5	2	9	193	191	5
M-Eis-a	0,63	0,50	8,72	2,09	0,55	2,07	47	58	1350	21	43	90	1090	381	72
M-Eis-b	0,54	0,54	8,71	2,08	0,46	2,40	45	58	1010	20	24	57	636	354	38
E-Eis-a	0,64	0,50	9,14	2,17	0,44	2,07	46	56	1840	16	41	88	1050	379	63
E-Eis-b	0,52	0,48	9,72	2,28	0,16	2,25	40	43	2140	19	17	31	820	315	12
E-Eis-c	0,48	0,64	11,5	2,51	0,17	3,23	53	47	2300	26	18	36	655	310	13
M-Het-a	0,49	1,79	14,0	2,72	1,17	4,35	78	68	622	41	140	269	428	462	152
M-Het-b	0,34	1,38	10,6	2,25	1,66	3,82	72	64	445	75	58	145	334	397	67
E-Het-a	0,45	1,38	11,7	2,42	0,89	3,80	73	69	633	31	143	250	451	403	141
E-Het-b	0,47	1,57	13,3	2,40	0,87	4,36	80	74	835	40	118	85	526	437	40
E-Het-c	0,53	1,85	14,6	2,66	0,88	4,52	86	76	619	38	98	52	504	485	18
E-Het-d	0,58	2,38	16,3	3,22	5,20	5,93	96	80	614	46	35	64	243	513	18
M-Wüs-a	0,42	0,95	9,19	2,13	1,64	2,74	49	57	478	22	11	44	534	413	29
M-Wüs-b	0,40	0,93	8,86	2,07	2,15	2,73	49	51	520	26	11	47	605	419	23
E-Wüs-a	0,33	0,77	7,37	1,93	1,92	2,48	45	52	349	21	13	46	577	370	22
E-Wüs-b	0,41	0,93	8,44	2,01	2,25	2,69	44	53	352	21	13	38	633	407	20
E-Wüs-c	0,51	1,28	9,32	2,13	6,57	2,73	51	58	294	22	12	34	716	446	15
M-Döl-a	0,32	0,39	5,62	1,61	0,65	1,63	27	36	337	16	10	39	1040	305	32
M-Döl-b	0,35	0,47	6,54	1,70	0,52	1,76	32	41	337	12	7	33	1170	321	18
E-Döl-a	0,41	0,55	7,90	1,96	0,60	1,82	34	44	393	15	10	47	802	341	24
E-Döl-b	0,33	0,42	6,41	1,71	0,40	1,76	29	43	351	17	7	31	1210	320	14
E-Döl-c	0,37	0,52	7,02	1,77	0,39	1,87	32	37	321	18	3	26	1330	322	11
E-Döl-d	0,45	0,68	7,58	1,67	0,44	1,98	30	40	333	19	10	28	1320	289	12
M-Meu-a	0,42	1,69	14,0	2,90	1,13	4,80	89	79	1100	46	29	110	389	573	41
M-Meu-b	0,36	1,45	12,5	2,48	0,99	4,67	84	72	1160	49	27	85	342	518	29
E-Meu-a	0,31	1,30	10,9	2,43	0,92	4,25	80	65	964	45	27	93	438	466	32
E-Meu-b	0,42	1,78	15,3	2,70	0,91	5,68	101	81	1030	52	29	89	343	554	21
E-Meu-c	0,48	1,47	12,8	2,70	0,90	4,04	64	67	287	37	15	61	498	533	16
M-Bur-a	0,47	0,33	5,51	1,41	0,51	1,32	26	43	363	9	10	36	1920	290	27
M-Bur-b	0,44	0,78	8,45	1,87	0,39	2,30	43	50	418	17	10	42	959	329	17
E-Bur-a	0,41	0,29	4,94	1,35	0,48	1,31	26	39	420	11	5	37	1940	282	24
E-Bur-b	0,46	0,79	8,68	2,00	0,34	2,05	45	49	457	18	8	42	563	321	12
E-Bur-c	0,40	0,86	8,51	1,82	0,34	2,35	41	49	215	20	11	37	934	301	10
E-Bur-d	0,32	0,93	8,55	1,70	0,32	2,09	42	45	166	16	9	28	515	256	9

A-3b: Gesamtgehalte verschiedener Spurenelemente in den Weizenböden der Standorte (offener Säureaufschluß, gemessen mit ICP-AES)

= Werte die über dem BW I (Hintergrundwerte, Referenzwerte) nach Eikmann und Klope liegen

= Werte die über dem BW II (Prüfwerte, Toleranzwerte) nach Eikmann und Klope liegen; BW III - Werte (Eingreifwerte) werden nicht erreicht

Standorte Einheit	Na mg/kg	Mg mg/kg	Al mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	V mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
NG	1	0,6	11,4	76,2	5,7	0,2	1,2	0,2	6,6	0,6	0,3	0,4	1,2	2,1
Spe-W	6210	3850	43100	18400	11700	70,7	40,7	503	22800	17,2	81,6	< 0,40	438	27,7
Sch-W	6060	8620	53300	23200	34600	90,7	69,3	697	28200	25,6	71,9	< 0,40	499	25,3
Etz-W	6700	4300	44800	18500	11200	66,3	37,5	588	22100	13,2	53,4	< 0,40	411	26,7
Het-W	2360	7130	64800	30900	6850	118	58,7	677	32600	164	275	1,94	461	140
Wüs-W	1500	4140	40900	26400	10000	80,1	36,9	473	21000	17,4	57,9	< 0,40	433	19,5
Döl-W	1030	1880	29000	20800	4230	< 0,20	22,9	367	13400	10,1	45,2	< 0,40	366	20,7
Meu-W	1640	7710	66300	29300	7280	122	67,7	1060	37000	30,0	113	< 0,40	541	29,1
Bur-W	994	1220	21700	16200	3480	49,8	14,5	486	8710	4,35	31,7	< 0,40	281	18,0

A-4: Gesamtgehalte von ausgewählten Spurenelementen in der Pflanze (Mikrowellenaufschluß: 5 ml HNO₃ + 0,5 ml H₂O₂)

< = unter der Nachweisgrenze; n.b. = nicht bestimmt; für nicht aufgeführte Werte bei den Standards ist kein zertifizierter Wert vorhanden
gemessen wurden: Na, Mg, Al, K, Ca, Mn, Fe, Zn und Ba mit ICP-AES; V, Cr und Ni mit ICP-MS; Cu, Cd und Pb mit GR-AAS

Standorte Einheit	Na mg/kg	Mg mg/kg	Al mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	V mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
Wheat straw B214					1860				88,7	3,14				
Messung	n.b.	n.b.	35,1	n.b.	1930	< 0,18	< 0,11	n.b.	90,2	3,54	n.b.	0,56	n.b.	0,77
Pine needles CRM 1575				3700			2,60	675						10,8
Messung	200	1050	n.b.	3340	n.b.	< 0,18	2,20	668	n.b.	3,54	61,4	0,22	11,2	7,95
Spe-Ähre	202	985	26,8	3740	659	< 0,18	0,20	38,5	44,5	4,06	33,8	< 0,03	10,8	0,42
Spe-Blatt	301	1350	532	5070	7610	1,00	1,70	100	537	4,26	14,7	0,07	85,9	0,38
Spe-Stengel	246	395	18,9	9250	1270	< 0,18	0,60	16,7	18,3	1,63	< 3,76	< 0,03	37,8	0,16
Sch-Ähre	113	1000	21,8	4070	548	< 0,18	1,20	24,7	9,70	4,01	20,8	0,05	3,13	0,32
Sch-Blatt	230	1510	132	8860	6330	0,27	1,40	32,9	233	1,88	11,0	0,06	33,2	0,33
Sch-Stengel	422	639	15,8	13700	1740	< 0,18	0,40	4,01	19,2	1,78	8,28	0,07	22,9	0,32
Sch-Wurzel	1300	2000	41300	7410	15600	13,4	16,5	108	11100	8,48	31,9	0,23	112	4,51
Etz-Ähre	142	826	26,5	4840	646	< 0,18	0,30	32,9	53,0	3,30	29,9	0,04	< 1,78	5,80
Etz-Blatt	341	2520	83,0	16100	10200	0,23	1,20	95,8	106	2,75	14,4	0,19	34,1	2,25
Etz-Stengel	739	416	30,6	15400	1620	< 0,18	0,40	10,9	47,1	3,18	18,4	0,07	10,9	0,36
Etz-Wurzel	4920	2950	11400	13900	3080	17,0	29,0	77,4	2570	7,33	19,1	< 0,03	144	4,13
Het-Ähre	109	794	13,3	4670	479	< 0,18	0,20	26,8	72,1	3,70	40,1	0,14	< 1,78	0,68
Het-Blatt	251	1740	108	13500	8110	0,21	0,70	47,8	136	28,2	67,9	0,54	93,2	5,57
Het-Stengel	107	780	18,5	7970	2200	< 0,18	0,30	19,3	27,7	4,13	66,9	0,52	76,0	0,50
Het-Wurzel	1784	2490	15400	17300	4660	23,8	22,6	159	8750	52,9	149	1,44	158	36,4
Wüs-Ähre	119	944	30,1	5160	507	n.b.	n.b.	27,2	27,8	3,82	27,4	n.b.	4,29	n.b.
Wüs-Blatt	244	1450	220	13400	4570	0,39	1,30	52,6	227	2,98	6,51	0,07	52,1	1,65
Wüs-Stengel	211	720	20,8	13800	1780	< 0,18	0,80	9,89	18,5	2,61	6,40	0,07	30,9	0,18
Wüs-Wurzel	182	825	7510	4740	4530	11,9	18,8	93,9	4070	5,95	18,2	0,15	33,6	5,41
Döl-Ähre	134	945	20,0	5420	533	< 0,18	< 0,11	16,3	31,4	2,44	20,6	< 0,03	3,26	0,27
Döl-Blatt	183	841	114	8120	3560	0,27	2,40	7,36	127	2,77	7,46	0,04	42,0	1,23
Döl-Stengel	243	607	12,4	11600	1360	< 0,18	0,20	3,73	10,5	1,90	8,48	0,05	28,1	0,12
Döl-Wurzel	2810	1760	5500	10400	6310	8,70	12,9	86,4	3230	20,9	18,5	0,29	42,1	8,95
Meu-Ähre	150	826	11,4	4950	576	< 0,18	< 0,11	24,1	14,5	3,26	15,5	0,05	3,44	0,17
Meu-Blatt	269	1440	97,2	20900	6300	< 0,18	0,50	32,7	118	3,38	5,79	0,17	47,0	0,98
Meu-Stengel	6310	2030	15,9	19900	969	< 0,18	< 0,11	50,5	15,9	2,23	24,2	0,09	121	0,15
Meu-Wurzel	3340	2290	16300	24300	4480	24,8	25,0	95,0	5500	11,4	23,0	0,21	175	6,27
Bur-Ähre	177	983	12,7	4360	359	< 0,18	0,40	23,5	31,4	2,67	19,8	< 0,03	2,52	0,20
Bur-Blatt	386	1110	74,0	15000	2640	< 0,18	1,00	27,4	84,6	2,70	4,48	0,05	26,3	0,87
Bur-Stengel	327	392	16,4	18000	894	< 0,18	0,40	6,57	14,2	1,77	11,3	0,05	13,6	0,16
Bur-Wurzel	819	964	3640	15400	1500	6,90	23,4	119	2490	7,86	25,5	0,21	46,0	6,50

A-5a: Maximal säurelöslicher Anteil von Metallen aus dem Boden (DIN 38414, Teil 7)

= Werte die über dem BW I (Hintergrundwerte, Referenzwerte) nach Eikmann und Klocke liegen

= Werte die über dem BW II (Prüfwerte, Toleranzwerte) nach Eikmann und Klocke liegen; BW III - Werte (Eingreifwerte) werden nicht erreicht

n.b. = nicht bestimmt; < = unter der Nachweisgrenze

Standorte Einheit	Na mg/kg	Mg mg/kg	Al mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	V mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
M-Leu-a	n.b.	n.b.	19600	n.b.	12100	38,1	23,2	448	18400	14,7	51,7	0,11	133	17,6
M-Leu-b	n.b.	n.b.	20500	n.b.	8750	34,6	25,8	401	19600	10,3	42,7	< 0,10	101	9,44
E-Leu-a	n.b.	n.b.	19400	n.b.	12200	37,2	22,1	402	17600	14,2	46,9	< 0,10	131	16,0
E-Leu-b	n.b.	n.b.	20000	n.b.	6840	33,2	24,7	365	19400	7,85	34,1	< 0,10	89,0	6,72
E-Leu-c	n.b.	n.b.	16600	n.b.	4330	29,2	20,8	254	16600	7,05	27,1	< 0,10	65,7	5,94
E-Leu-d	n.b.	n.b.	13900	n.b.	12900	24,6	18,3	214	13900	7,32	23,0	0,10	60,6	5,15
M-Spe-a	n.b.	n.b.	18300	n.b.	5290	34,2	23,0	451	20200	29,0	54,3	< 0,10	119	18,7
M-Spe-b	n.b.	n.b.	18200	n.b.	13200	30,7	21,3	382	18000	17,1	41,3	< 0,10	92,9	11,4
E-Spe-a	n.b.	n.b.	17900	n.b.	8810	33,1	23,4	442	18100	19,7	60,3	0,10	122	20,0
E-Spe-b	n.b.	n.b.	11700	n.b.	48100	22,8	14,6	253	12700	6,56	23,0	< 0,10	58,6	5,95
E-Spe-c	n.b.	n.b.	11400	n.b.	49500	23,6	16,6	271	13400	6,98	23,5	< 0,10	54,9	5,97
M-Sch-a	226	7900	17900	4110	22700	30,6	25,2	541	18400	20,6	61,2	< 0,10	121	15,7
M-Sch-b	276	9660	22300	4590	27700	33,9	28,3	594	21300	21,3	62,5	< 0,10	130	15,5
E-Sch-a	343	9970	20600	5360	24000	37,0	30,0	642	22400	27,6	87,1	0,23	141	21,8
E-Sch-b	301	10600	21400	4760	23100	33,7	27,7	614	21700	24,1	57,4	< 0,10	117	14,5
M-Etz-a	223	6010	17700	3560	27700	31,7	20,0	435	16700	17,9	58,9	< 0,10	87,5	22,2
M-Etz-b	247	9020	13100	2620	50200	25,7	16,9	319	13500	9,35	28,4	< 0,10	63,4	9,16
E-Etz-a	191	4590	17300	3670	15000	31,8	20,5	463	16300	16,7	54,9	< 0,10	87,6	22,1
E-Etz-b	263	6890	14200	2910	53700	26,1	16,2	310	13600	11,4	27,0	< 0,10	64,5	6,75
E-Etz-c	360	10600	11900	2560	67700	25,7	15,7	254	12900	7,23	29,8	< 0,10	56,0	10,9
M-Alt-a	61,3	1100	11000	898	2840	18,1	12,3	285	10900	9,81	61,9	1,27	91,8	34,2
M-Alt-b	49,0	506	8160	622	1280	12,7	8,02	135	6220	4,42	40,8	0,13	56,9	12,4
E-Alt-a	65,0	752	7660	589	2090	13,2	8,55	202	8930	6,65	44,0	0,27	68,3	18,2
E-Alt-b	78,7	231	6960	651	570	10,0	5,76	62,8	4150	2,66	25,4	0,19	37,2	10,3
E-Alt-c	61,1	84,6	3260	451	329	4,40	2,03	23,4	1230	0,57	8,48	< 0,10	18,2	< 5,00
M-Gün-a	112	1680	9690	2350	3560	20,1	13,2	457	10600	18,4	70,8	0,21	113	16,9
M-Gün-b	165	1590	10000	2370	4570	18,9	12,5	429	10500	16,2	60,5	0,37	107	8,89
E-Gün-a	116	1580	8810	2110	2830	18,9	12,5	419	9640	15,3	62,5	0,25	97,2	17,7
E-Gün-b	170	1380	11800	2380	2940	19,8	12,3	371	11400	11,1	41,6	< 0,10	91,2	< 5,00
E-Gün-c	88,9	476	4910	1070	1750	9,91	5,50	135	5140	2,77	14,4	< 0,10	24,2	< 5,00
M-Grä-a	53,5	987	8410	1230	1840	20,2	11,5	344	9420	11,8	44,2	0,24	76,2	22,5
M-Grä-b	36,4	1240	7650	1130	1050	17,2	9,23	263	11000	5,77	27,4	< 0,10	48,7	6,46
E-Grä-a	70,4	1340	10900	1670	2420	27,7	15,4	506	15800	10,0	54,4	0,20	90,0	20,6
E-Grä-b	377	2920	15600	2660	2900	30,2	14,8	536	32000	8,58	47,3	< 0,10	77,6	5,10

A-5a: Maximal säurelöslicher Anteil von Metallen aus dem Boden (DIN 38414, Teil 7)

Standorte Einheit	Na mg/kg	Mg mg/kg	Al mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	V mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
M-Zsc-a	193	821	10700	767	14000	32,9	14,5	271	11000	7,51	32,4	1,41	121	108
M-Zsc-b	112	435	5970	508	3970	13,6	6,62	91,7	4610	2,22	27,9	0,32	45,0	26,2
E-Zsc-a	200	876	10100	692	14100	30,3	17,3	245	10300	8,04	37,8	0,21	116	25,6
E-Zsc-b	103	390	4930	517	349	9,59	3,69	71,8	3470	0,55	11,8	0,80	28,3	43,9
E-Zsc-c	80,2	321	2740	530	429	8,57	< 1,50	42,6	1760	< 0,50	3,96	< 0,10	14,6	< 5,00
M-Eis-a	253	1650	16700	3270	2160	35,8	19,4	1350	13800	48,1	84,3	1,03	95,4	162
M-Eis-b	175	1790	17000	3110	1280	33,3	19,5	976	15500	21,2	46,8	< 0,10	80,7	61,4
E-Eis-a	200	1460	15800	3330	1390	32,6	16,4	1720	12800	38,8	73,0	0,23	101	98,8
E-Eis-b	218	1170	17200	4950	356	28,4	14,1	1990	14300	8,16	20,2	< 0,10	107	16,4
E-Eis-c	240	1700	24400	7000	420	39,3	19,7	2050	19700	20,7	33,4	0,20	94,6	16,8
M-Het-a	359	6500	36300	8890	8420	56,6	35,5	584	31500	154	258	2,05	186	259
M-Het-b	484	7290	38500	9930	12200	57,5	40,1	467	32000	77,3	149	0,92	207	135
E-Het-a	352	5990	35000	8840	5542	57,0	35,7	630	28300	174	234	1,96	167	229
E-Het-b	451	6160	39100	8500	4752	60,4	39,7	760	29700	119	69,5	0,13	178	52,3
E-Het-c	455	6470	38000	8300	4559	57,3	38,9	535	30200	102	42,6	< 0,10	173	20,2
E-Het-d	696	8930	44600	12800	36100	59,8	40,9	479	36800	28,5	43,2	< 0,10	180	22,0
M-Wüs-a	260	3600	20100	4490	9875	38,0	23,9	418	20100	11,2	42,0	0,24	124	76,4
M-Wüs-b	292	3730	19600	4350	12800	38,2	23,8	464	18700	10,0	37,0	< 0,10	129	57,3
E-Wüs-a	274	3680	17700	4960	11500	35,9	23,0	326	17200	12,5	40,3	< 0,10	118	56,3
E-Wüs-b	320	3980	18700	4780	13600	36,4	24,5	318	17800	11,2	35,4	< 0,10	119	49,1
E-Wüs-c	395	4470	17900	4170	39300	35,5	22,1	224	16900	5,56	25,1	< 0,10	106	27,0
M-Döl-a	152	1520	10400	2320	2970	24,2	14,5	317	12700	12,0	44,5	0,29	71,6	95,7
M-Döl-b	155	1700	11500	2470	2270	24,9	15,2	331	12800	7,24	31,9	< 0,10	70,9	60,7
E-Döl-a	161	1540	10600	2330	2220	24,5	15,1	345	12000	9,70	43,0	0,13	77,1	76,0
E-Döl-b	180	1650	11900	2470	1640	26,2	15,8	347	12800	6,61	29,9	< 0,10	80,3	41,2
E-Döl-c	184	1880	11700	2440	1550	27,0	16,4	320	13400	4,63	23,6	< 0,10	63,7	27,8
E-Döl-d	203	2040	12400	2640	1560	26,5	16,1	298	13500	4,43	21,9	< 0,10	48,8	28,0
M-Meu-a	363	6390	32500	7060	6400	52,6	41,6	958	34100	26,0	95,0	< 0,10	186	38,8
M-Meu-b	427	6350	33200	6840	5740	54,1	43,1	1140	33900	23,9	85,8	< 0,10	199	9,80
E-Meu-a	373	6370	31200	7520	5820	48,8	40,0	985	32900	24,5	95,3	< 0,10	186	64,7
E-Meu-b	362	7170	37300	6150	5000	55,5	47,5	928	39700	23,5	78,9	< 0,10	181	5,20
E-Meu-c	336	5630	26400	4530	4700	44,3	37,5	250	28500	13,4	53,8	< 0,10	135	< 5,00
M-Bur-a	113	985	7560	1440	2050	23,2	11,5	332	9200	6,96	33,6	< 0,10	52,2	68,7
M-Bur-b	194	1550	10400	2530	1160	25,5	14,3	395	10300	5,24	27,7	< 0,10	54,4	< 5,00
E-Bur-a	152	1010	7780	1680	1930	24,4	11,9	377	8840	7,46	39,0	< 0,10	58,7	38,9
E-Bur-b	156	2300	13700	3540	896	30,6	19,4	399	13500	4,73	37,9	< 0,10	50,9	< 5,00
E-Bur-c	195	2560	16400	4200	948	33,0	21,9	197	14700	5,22	31,4	< 0,10	54,9	< 5,00
E-Bur-d	142	2490	14400	3690	841	31,2	19,8	146	13200	5,22	26,5	< 0,10	42,9	< 5,00

A-5b: *Maximal säurelöslicher Anteil von Metallen aus den Weizenböden der Standorte (DIN 38414, Teil 7)*

Spe-W = Werte die über dem BW I (Hintergrundwerte, Referenzwerte) nach Eikmann und Kloke liegen

Sch-W = Werte die über dem BW II (Prüfwerte, Toleranzwerte) nach Eikmann und Kloke liegen; BW III - Werte (Eingreifwerte) werden nicht erreicht
Etz-W < = unter der Nachweisgrenze

Standorte Einheit	Na mg/kg	Mg mg/kg	Al mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	V mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
Spe-W	179	3090	16900	3620	8570	30,8	20,4	411	17300	15,9	77,0	< 0,10	113	< 5,00
Sch-W	368	7460	22900	5420	31500	37,0	32,0	624	23200	23,8	66,8	0,54	139	19,9
Etz-W	353	3300	21200	4600	8670	39,8	26,1	518	16300	16,6	59,5	0,33	231	28,1
Het-W	384	5310	37000	9630	5100	59,7	41,1	607	24100	181	254	2,01	433	134
Wüs-W	244	3240	17200	4640	8570	33,4	23,5	386	15200	19,5	58,3	< 0,10	254	20,6
Döl-W	182	1430	10400	2970	3540	22,7	16,0	312	10100	11,7	45,5	< 0,10	85,0	20,4
Meu-W	312	5900	33000	8440	5710	55,1	46,0	888	27200	33,9	108	0,33	439	34,8
Bur-W	104	836	6230	2050	2310	16,5	9,00	392	6550	5,78	29,7	< 0,10	265	24,3

A-5c: *Maximal säurelöslicher Anteil von B und Hg aus dem Boden*

Standorte Einheit	B mg/kg	Hg mg/kg
M-Leu-a	39,7	0,40
M-Leu-b	36,2	0,14
M-Spe-a	25,2	0,15
M-Sch-a	30,4	1,01
M-Het-a	26,0	0,19
M-Wüs-a	26,9	0,15
M-Döl-a	13,6	0,23

A-6: *Ergebnisse aus den Ammoniumnitratextraktionen zur Bestimmung mobiler Spurenelemente in Mineralböden (DIN 19730)*

< = unter der Nachweisgrenze

Standorte Einheit	Na mg/kg	Mg mg/kg	Al mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Ba mg/kg
Spe-W	10,4	10,6	1,75	286	2370	0,07	0,84	0,03	0,03	< 0,02	26,6
Sch-W	16,0	11,3	1,05	399	2430	0,03	0,41	0,07	< 0,03	< 0,02	37,0
Etz-W	7,27	9,35	2,22	369	2670	0,12	0,95	0,06	< 0,03	< 0,02	22,8
Het-W	23,3	9,45	3,46	392	2710	0,21	1,82	0,31	0,32	0,02	88,5
Wüs-W	10,1	8,08	1,29	444	1940	0,15	0,56	0,07	< 0,03	< 0,02	24,3
Döl-W	6,71	6,85	9,58	499	1090	0,54	4,74	0,06	0,05	< 0,02	15,3
Meu-W	12,7	22,0	1,50	768	2460	0,09	0,65	0,05	< 0,03	< 0,02	51,5
Bur-W	3,54	5,95	10,1	596	696	0,37	4,69	0,03	0,05	< 0,02	9,78

A-7: *Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer*

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Leu-a	I	0,00	0,04	0,008	0,00	5,22	0,00	0,00	11,2
M-Leu-b	I	0,00	0,00	0,003	0,00	5,51	0,00	0,00	11,2
E-Leu-a	I	0,00	0,00	0,006	0,00	4,31	0,00	0,00	12,2
E-Leu-b	I	0,00	0,05	0,005	0,00	5,85	0,00	0,00	27,4
E-Leu-c	I	0,00	0,00	0,004	0,00	3,53	0,00	0,00	11,9
E-Leu-d	I	0,00	0,00	0,005	0,00	8,16	0,00	0,00	10,7
M-Spe-a	I	0,00	0,10	0,009	0,00	3,32	0,00	0,00	17,8
M-Spe-b	I	0,00	0,08	0,003	0,00	3,51	0,00	0,00	13,0
E-Spe-a	I	0,00	0,06	0,010	0,00	2,13	0,00	0,00	13,1
E-Spe-b	I	0,00	0,05	0,007	0,00	2,07	0,00	0,00	6,25
E-Spe-c	I	0,00	0,14	0,008	0,00	2,48	0,00	0,00	6,69
M-Sch-a	I	0,00	0,00	0,003	0,00	1,95	0,00	0,00	12,1
M-Sch-b	I	0,00	0,00	0,003	0,00	1,87	0,00	0,00	13,2
E-Sch-a	I	0,00	0,00	0,004	0,00	3,05	0,00	0,00	14,2
E-Sch-b	I	0,00	0,00	0,005	0,00	3,49	0,00	0,00	12,7
M-Etz-a	I	0,00	0,10	0,004	0,00	3,18	0,00	0,00	8,98
M-Etz-b	I	0,00	0,04	0,006	0,00	1,54	0,00	0,00	6,42
E-Etz-a	I	0,00	0,03	0,004	0,00	1,75	0,00	0,00	9,06
E-Etz-b	I	0,00	0,00	0,003	0,00	2,04	0,00	0,00	5,53
E-Etz-c	I	0,00	0,09	0,007	0,00	3,56	7,28	0,00	4,75
M-Alt-a	I	0,00	0,58	0,033	0,00	0,00	0,00	0,00	23,0
M-Alt-b	I	0,00	1,19	0,043	0,00	0,00	0,00	0,00	16,9
E-Alt-a	I	0,00	0,44	0,040	0,00	11,5	0,00	0,00	19,7
E-Alt-b	I	0,00	1,06	0,025	0,00	18,0	0,00	0,00	7,69
E-Alt-c	I	0,00	1,68	0,021	0,00	18,6	0,00	0,00	2,74
M-Gün-a	I	0,00	1,93	0,000	0,00	4,52	0,00	0,00	16,0
M-Gün-b	I	0,00	0,37	0,000	0,00	4,01	0,00	0,00	14,1
E-Gün-a	I	0,00	1,19	0,005	0,00	3,38	0,00	0,00	15,0
E-Gün-b	I	0,00	0,08	0,018	0,00	3,40	0,00	0,00	13,7
E-Gün-c	I	0,00	0,51	0,111	0,00	0,00	0,00	0,00	4,75
M-Grä-a	I	0,00	0,69	0,003	0,00	0,00	1,89	0,00	14,8
M-Grä-b	I	0,00	1,85	0,000	0,00	0,00	1,80	0,00	9,54
E-Grä-a	I	0,00	0,72	0,001	0,00	0,00	1,99	0,00	17,3
E-Grä-b	I	0,00	0,16	0,009	0,00	3,47	0,00	0,00	9,35
M-Zsc-a	I	0,00	0,24	0,055	0,00	0,00	0,00	0,00	19,6
M-Zsc-b	I	0,00	0,85	0,050	0,00	0,00	0,00	0,00	11,0
E-Zsc-a	I	0,00	0,44	0,119	0,00	0,00	0,00	0,00	17,1
E-Zsc-b	I	0,00	0,38	0,096	0,00	0,00	0,00	0,00	6,75
E-Zsc-c	I	0,00	0,64	0,129	0,00	0,00	0,00	0,00	2,21
M-Eis-a	I	0,00	0,07	0,003	0,00	0,00	1,23	0,00	8,46
M-Eis-b	I	0,00	0,42	0,000	0,00	0,00	3,07	0,00	9,47
E-Eis-a	I	0,00	0,09	0,002	0,00	0,00	3,62	0,00	8,82
E-Eis-b	I	0,00	0,32	0,031	0,00	0,00	3,20	0,00	6,28
E-Eis-c	I	0,00	0,54	0,025	0,00	0,00	3,50	0,00	6,98
M-Het-a	I	0,00	0,42	0,000	0,00	1,75	0,45	0,00	21,1
M-Het-b	I	0,00	0,49	0,000	0,00	2,85	0,28	0,00	26,1
E-Het-a	I	0,00	0,00	0,000	0,00	0,73	0,29	0,00	20,3
E-Het-b	I	0,00	0,00	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00	20,3
E-Het-c	I	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	18,1
E-Het-d	I	0,00	0,00	0,007	0,00	0,00	0,00	0,00	19,1
M-Wüs-a	I	0,00	0,03	0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	12,3
M-Wüs-b	I	0,00	0,00	0,010	0,00	0,00	0,00	0,00	12,4
E-Wüs-a	I	0,00	0,00	0,018	0,00	0,00	0,00	0,00	13,4
E-Wüs-b	I	0,00	0,00	0,004	0,00	0,00	0,00	0,00	13,0
E-Wüs-c	I	0,00	0,19	0,009	0,00	0,00	0,00	0,00	10,6
M-Döl-a	I	0,00	0,79	0,045	0,00	0,00	0,00	0,00	7,65
M-Döl-b	I	0,00	0,28	0,038	0,00	0,00	0,00	0,00	7,58
E-Döl-a	I	0,00	0,34	0,022	0,00	0,00	0,00	0,00	7,23
E-Döl-b	I	0,00	0,24	0,045	0,00	0,00	0,00	0,00	9,34
E-Döl-c	I	0,00	0,11	0,018	0,00	0,00	0,00	0,00	7,13
E-Döl-d	I	0,00	0,26	0,079	0,00	0,00	0,00	0,00	4,99

A-7: *Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer*

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Meu-a	I	0,00	0,04	0,004	0,00	0,00	0,00	0,00	12,1
M-Meu-b	I	0,00	0,00	0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	13,8
E-Meu-a	I	0,00	0,00	0,003	0,00	0,00	0,00	0,00	14,5
E-Meu-b	I	0,00	0,00	0,007	0,00	0,00	0,00	0,00	15,5
E-Meu-c	I	0,00	0,00	0,006	0,00	0,00	0,00	0,00	12,7
M-Bur-a	I	0,00	0,73	0,065	0,00	0,00	0,80	0,00	7,53
M-Bur-b	I	0,00	0,85	0,016	0,00	0,00	0,00	0,00	5,60
E-Bur-a	I	0,00	0,55	0,077	0,00	0,00	1,09	0,00	7,63
E-Bur-b	I	0,00	0,56	0,044	0,00	0,00	0,80	0,00	6,99
E-Bur-c	I	0,00	1,00	0,031	0,00	0,00	1,33	0,00	10,1
E-Bur-d	I	0,00	0,64	0,047	0,00	0,00	0,00	0,00	7,23
M-Leu-a	II	0,00	2,04	0,000	0,00	7,83	0,00	0,00	6,87
M-Leu-b	II	0,00	1,12	0,000	0,00	6,12	2,29	0,00	3,88
E-Leu-a	II	0,00	1,76	0,000	0,00	4,97	1,46	0,00	7,48
E-Leu-b	II	0,00	0,34	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	3,39
E-Leu-c	II	0,00	0,45	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Leu-d	II	0,00	3,20	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Spe-a	II	0,00	3,08	0,004	0,00	0,00	3,53	0,00	3,79
M-Spe-b	II	0,00	3,94	0,006	0,00	0,00	4,30	0,00	2,21
E-Spe-a	II	0,00	3,66	0,000	0,00	0,00	4,17	0,00	3,27
E-Spe-b	II	0,00	5,06	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Spe-c	II	0,00	13,8	0,012	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Sch-a	II	0,00	1,25	0,000	0,00	0,00	1,75	0,00	3,59
M-Sch-b	II	0,00	2,64	0,000	0,00	0,00	1,81	0,00	2,94
E-Sch-a	II	0,00	1,12	0,003	0,00	0,00	2,57	0,00	3,85
E-Sch-b	II	0,00	2,47	0,000	0,00	0,00	4,75	0,00	2,18
M-Etz-a	II	0,00	3,64	0,004	0,00	0,00	3,94	0,00	2,21
M-Etz-b	II	0,00	3,59	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44
E-Etz-a	II	0,00	2,91	0,008	0,00	0,00	2,02	0,00	1,94
E-Etz-b	II	0,00	1,66	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Etz-c	II	0,00	5,37	0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18
M-Alt-a	II	0,00	1,97	0,029	0,00	0,00	0,00	0,00	4,31
M-Alt-b	II	0,00	2,71	0,025	0,00	0,00	0,00	0,00	3,16
E-Alt-a	II	0,00	1,47	0,032	0,00	0,00	0,00	0,00	4,54
E-Alt-b	II	0,00	1,23	0,024	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Alt-c	II	0,00	0,98	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Gün-a	II	0,00	4,55	0,000	0,00	4,92	4,34	0,00	5,16
M-Gün-b	II	0,00	1,61	0,000	0,00	3,96	1,69	0,00	4,58
E-Gün-a	II	0,00	2,68	0,000	0,00	2,34	4,13	0,00	3,95
E-Gün-b	II	0,00	0,41	0,000	0,00	3,40	0,00	0,00	3,45
E-Gün-c	II	0,00	1,33	0,016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Grä-a	II	0,00	0,74	0,009	0,00	0,00	3,17	0,00	2,72
M-Grä-b	II	0,00	1,31	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Grä-a	II	0,00	1,16	0,007	0,00	0,00	4,19	0,00	3,36
E-Grä-b	II	0,00	0,44	0,000	0,00	10,4	0,00	0,00	1,03
M-Zsc-a	II	0,00	2,61	0,037	0,00	23,7	0,00	0,00	9,32
M-Zsc-b	II	0,00	5,44	0,039	0,00	47,0	0,00	0,00	3,89
E-Zsc-a	II	0,00	2,99	0,042	0,00	31,5	0,00	0,00	7,94
E-Zsc-b	II	0,00	2,26	0,020	0,00	32,8	0,00	0,00	0,00
E-Zsc-c	II	0,00	1,31	0,039	0,00	72,9	0,00	0,00	0,00
M-Eis-a	II	0,00	0,52	0,010	0,00	3,39	7,19	0,00	2,25
M-Eis-b	II	0,00	0,56	0,000	0,00	4,02	4,48	0,00	3,12
E-Eis-a	II	0,00	0,20	0,005	0,00	3,14	5,61	0,00	1,91
E-Eis-b	II	0,00	0,12	0,026	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30
E-Eis-c	II	0,00	0,15	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80
M-Het-a	II	0,00	3,49	0,006	0,00	6,09	13,4	9,88	5,89
M-Het-b	II	0,00	6,61	0,005	0,00	8,26	11,4	10,8	8,80
E-Het-a	II	0,00	1,14	0,004	0,00	5,63	11,7	6,42	4,82
E-Het-b	II	0,00	0,28	0,005	0,00	1,51	1,74	0,00	3,02
E-Het-c	II	0,00	0,19	0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	2,45
E-Het-d	II	0,00	13,9	0,004	0,00	0,00	0,00	0,00	5,34

A-7: Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Wüs-a	II	0,00	3,21	0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	4,16
M-Wüs-b	II	0,00	2,14	0,004	0,00	0,00	0,00	0,00	4,10
E-Wüs-a	II	0,00	3,01	0,005	0,00	0,00	0,86	0,00	4,91
E-Wüs-b	II	0,00	1,61	0,005	0,00	0,00	1,01	0,00	3,37
E-Wüs-c	II	0,00	8,87	0,008	0,00	0,00	0,00	0,00	3,49
M-Döl-a	II	0,00	3,97	0,019	0,00	0,00	6,05	0,00	3,08
M-Döl-b	II	0,00	1,88	0,014	0,00	0,00	0,00	0,00	2,16
E-Döl-a	II	0,00	1,67	0,034	0,00	0,00	3,76	0,00	2,55
E-Döl-b	II	0,00	0,60	0,020	0,00	0,00	0,00	0,00	1,90
E-Döl-c	II	0,00	0,36	0,034	0,00	0,00	0,00	0,00	1,38
E-Döl-d	II	0,00	0,68	0,061	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69
M-Meu-a	II	0,00	1,27	0,006	0,00	0,00	0,39	0,00	3,99
M-Meu-b	II	0,00	0,40	0,006	0,00	0,00	0,00	0,00	3,98
E-Meu-a	II	0,00	0,73	0,007	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97
E-Meu-b	II	0,00	0,15	0,009	0,00	0,00	0,00	0,00	2,83
E-Meu-c	II	0,00	0,57	0,081	0,00	0,00	0,00	0,00	1,58
M-Bur-a	II	0,00	1,12	0,047	0,00	0,00	3,21	0,00	1,82
M-Bur-b	II	0,00	0,88	0,043	0,00	0,00	1,50	0,00	0,90
E-Bur-a	II	0,00	0,81	0,067	0,00	0,00	4,06	0,00	1,89
E-Bur-b	II	0,00	0,36	0,039	0,00	0,00	0,00	0,00	1,03
E-Bur-c	II	0,00	0,39	0,058	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82
E-Bur-d	II	0,00	0,27	0,042	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
M-Leu-a	III	0,00	47,5	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	3,49
M-Leu-b	III	0,00	59,4	0,09	0,00	0,00	7,14	0,00	1,64
E-Leu-a	III	0,00	52,0	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	3,45
E-Leu-b	III	0,00	63,5	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	2,19
E-Leu-c	III	0,00	58,3	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58
E-Leu-d	III	0,00	52,7	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40
M-Spe-a	III	0,00	65,1	0,08	0,00	0,00	7,52	0,00	2,68
M-Spe-b	III	0,00	64,5	0,13	0,00	0,00	6,88	0,00	1,61
E-Spe-a	III	0,00	50,4	0,04	0,00	0,00	6,95	0,00	1,95
E-Spe-b	III	0,00	52,1	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
E-Spe-c	III	0,00	39,9	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87
M-Sch-a	III	0,00	73,1	0,08	0,00	0,00	5,83	0,00	1,63
M-Sch-b	III	0,00	72,5	0,14	0,00	0,00	5,63	0,00	1,31
E-Sch-a	III	0,00	75,3	0,07	0,00	0,00	7,55	0,00	1,75
E-Sch-b	III	0,00	79,1	0,14	0,00	0,00	7,13	0,00	1,51
M-Etz-a	III	0,00	56,3	0,03	0,00	0,00	5,25	0,00	1,34
M-Etz-b	III	0,00	51,7	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	1,51
E-Etz-a	III	0,00	55,4	0,02	0,00	0,00	51,2	0,00	1,30
E-Etz-b	III	0,00	60,5	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	1,86
E-Etz-c	III	0,00	42,1	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	1,71
M-Alt-a	III	0,00	38,5	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31
M-Alt-b	III	0,00	41,8	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60
E-Alt-a	III	0,00	44,6	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	1,77
E-Alt-b	III	0,00	23,2	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Alt-c	III	0,00	5,05	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Gün-a	III	0,00	63,8	0,15	0,00	0,00	7,40	0,00	3,50
M-Gün-b	III	0,00	63,3	0,09	0,00	0,00	5,80	0,00	3,63
E-Gün-a	III	0,00	60,6	0,17	0,00	0,00	7,49	0,00	2,95
E-Gün-b	III	0,00	68,1	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	2,69
E-Gün-c	III	0,00	68,4	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,79
M-Grä-a	III	0,00	28,6	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	1,55
M-Grä-b	III	0,00	44,7	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81
E-Grä-a	III	0,00	46,0	0,26	0,00	0,00	101	0,00	2,57
E-Grä-b	III	0,00	56,7	0,17	12,5	0,00	0,00	0,00	1,83
M-Zsc-a	III	0,00	22,1	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	3,08
M-Zsc-b	III	0,00	30,8	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74
E-Zsc-a	III	0,00	22,1	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	2,56
E-Zsc-b	III	0,00	21,4	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Zsc-c	III	0,00	11,6	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A-7: *Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer*

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Eis-a	III	0,00	53,6	0,42	0,00	2,35	10,7	14,7	2,64
M-Eis-b	III	0,00	62,8	0,51	0,00	0,00	5,75	16,9	2,78
E-Eis-a	III	0,00	50,8	0,57	0,00	3,59	10,1	16,2	4,06
E-Eis-b	III	0,00	0,00	1,49	8,12	4,90	0,00	0,00	16,4
E-Eis-c	III	0,00	0,00	1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	8,35
M-Het-a	III	0,00	50,0	0,06	0,00	3,01	6,62	16,8	1,65
M-Het-b	III	0,00	51,8	0,09	0,00	3,90	5,57	18,9	1,77
E-Het-a	III	0,00	62,7	0,07	5,43	3,81	8,51	20,6	1,94
E-Het-b	III	0,00	55,1	0,19	9,97	2,61	4,32	13,6	1,60
E-Het-c	III	0,00	52,4	0,17	10,0	1,84	0,00	0,00	1,39
E-Het-d	III	0,00	42,5	0,07	4,95	0,00	0,00	0,00	2,02
M-Wüs-a	III	0,00	41,2	0,03	0,00	0,00	1,88	0,00	1,22
M-Wüs-b	III	0,00	52,0	0,04	0,00	0,00	1,22	0,00	1,89
E-Wüs-a	III	0,00	40,1	0,02	0,00	0,00	1,99	0,00	1,04
E-Wüs-b	III	0,00	32,8	0,02	0,00	0,00	1,66	0,00	0,62
E-Wüs-c	III	0,00	13,5	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
M-Döl-a	III	0,00	30,9	0,16	0,00	0,00	6,69	0,00	1,31
M-Döl-b	III	0,00	32,3	0,12	0,00	0,00	4,20	0,00	1,04
E-Döl-a	III	0,00	26,5	0,13	0,00	0,00	5,38	0,00	1,22
E-Döl-b	III	0,00	30,3	0,12	0,00	0,00	2,59	0,00	0,86
E-Döl-c	III	0,00	28,9	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64
E-Döl-d	III	0,00	34,5	0,19	0,00	0,00	1,77	0,00	0,52
M-Meu-a	III	0,00	46,5	0,05	0,00	0,00	1,89	0,00	2,33
M-Meu-b	III	0,00	54,9	0,07	3,80	0,00	1,41	0,00	2,97
E-Meu-a	III	0,00	52,0	0,05	0,00	0,00	1,83	0,00	2,89
E-Meu-b	III	0,00	60,9	0,07	8,66	0,00	0,56	0,00	1,91
E-Meu-c	III	0,00	28,4	0,02	3,93	0,00	0,00	0,00	0,11
M-Bur-a	III	0,00	25,9	0,30	0,00	0,00	2,76	0,00	0,78
M-Bur-b	III	0,00	35,8	0,27	0,00	0,00	1,61	0,00	0,41
E-Bur-a	III	0,00	19,8	0,30	0,00	0,00	3,37	0,00	0,72
E-Bur-b	III	0,00	42,7	0,41	0,00	0,00	1,30	0,00	0,31
E-Bur-c	III	0,00	32,6	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
E-Bur-d	III	0,00	28,6	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
M-Leu-a	IV	0,00	21,8	2,43	21,0	56,7	17,0	49,1	2,13
M-Leu-b	IV	0,00	14,7	1,41	16,0	39,8	16,8	0,00	0,47
E-Leu-a	IV	0,00	26,7	2,64	21,1	67,1	21,2	47,3	4,70
E-Leu-b	IV	0,00	13,5	1,34	13,4	36,9	7,39	0,00	0,66
E-Leu-c	IV	0,00	3,73	0,52	0,00	12,5	0,00	0,00	0,00
E-Leu-d	IV	0,00	5,88	0,52	0,00	30,6	0,00	0,00	0,00
M-Spe-a	IV	0,00	17,5	2,57	24,9	93,5	19,8	56,1	1,12
M-Spe-b	IV	0,00	12,8	1,70	15,5	72,9	11,2	0,00	0,50
E-Spe-a	IV	0,00	14,7	1,84	22,6	66,9	21,4	46,9	1,03
E-Spe-b	IV	0,00	8,05	1,23	35,2	18,6	0,00	0,00	0,19
E-Spe-c	IV	0,00	9,18	1,45	0,00	9,29	0,00	0,00	0,00
M-Sch-a	IV	0,00	9,61	2,39	15,7	48,0	10,9	43,1	0,72
M-Sch-b	IV	0,00	7,10	2,58	12,5	53,0	8,44	43,9	0,45
E-Sch-a	IV	0,00	9,16	2,08	13,0	67,9	12,9	41,2	0,74
E-Sch-b	IV	0,00	7,68	2,61	12,1	86,9	9,51	45,6	0,57
M-Etz-a	IV	0,00	13,1	1,43	22,5	95,3	18,4	52,4	0,81
M-Etz-b	IV	0,00	8,85	1,52	13,0	41,6	8,45	0,00	0,31
E-Etz-a	IV	0,00	16,6	1,07	24,9	68,7	18,2	53,9	0,88
E-Etz-b	IV	0,00	8,18	1,24	14,8	54,5	11,6	0,00	0,32
E-Etz-c	IV	0,00	10,1	1,31	0,00	13,3	0,00	0,00	0,00
M-Alt-a	IV	0,00	8,62	5,42	0,00	44,5	7,13	0,00	1,37
M-Alt-b	IV	0,00	8,63	6,29	0,00	45,9	7,17	0,00	0,75
E-Alt-a	IV	0,00	7,68	4,42	0,00	33,3	4,29	40,6	1,03
E-Alt-b	IV	0,00	2,33	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36
E-Alt-c	IV	0,00	0,56	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37

A-7: *Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer*

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Gün-a	IV	0,00	11,7	4,23	21,5	44,4	17,7	61,5	2,59
M-Gün-b	IV	0,00	13,0	3,33	23,7	45,3	16,9	53,8	2,17
E-Gün-a	IV	0,00	8,91	3,49	18,8	39,6	15,4	67,9	1,78
E-Gün-b	IV	0,00	11,5	2,15	16,3	44,2	9,66	0,00	1,12
E-Gün-c	IV	0,00	2,75	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45
M-Grä-a	IV	0,00	6,31	3,60	0,00	30,3	5,33	39,1	1,26
M-Grä-b	IV	0,00	3,90	2,28	0,00	23,3	0,00	0,00	0,42
E-Grä-a	IV	0,00	7,28	3,42	0,00	55,8	8,88	47,9	1,37
E-Grä-b	IV	0,00	3,93	0,48	0,00	0,00	4,12	0,00	0,43
M-Zsc-a	IV	0,00	16,0	3,75	13,1	31,1	19,7	0,00	2,93
M-Zsc-b	IV	0,00	13,2	5,09	0,00	28,6	18,9	0,00	2,52
E-Zsc-a	IV	0,00	19,6	3,10	12,5	54,5	19,1	47,8	1,82
E-Zsc-b	IV	0,00	1,24	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41
E-Zsc-c	IV	0,00	5,98	1,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40
M-Eis-a	IV	0,00	6,07	2,62	0,00	44,9	6,06	31,4	0,42
M-Eis-b	IV	0,00	6,69	2,01	0,00	29,9	3,56	24,1	0,36
E-Eis-a	IV	0,00	5,53	2,86	0,00	37,6	4,29	28,5	0,54
E-Eis-b	IV	0,00	2,80	2,35	0,00	5,78	1,36	0,00	0,64
E-Eis-c	IV	0,00	1,64	1,71	0,00	5,04	1,21	0,00	0,19
M-Het-a	IV	0,00	3,90	0,66	0,00	37,1	6,03	28,3	0,21
M-Het-b	IV	0,00	4,39	0,59	0,00	40,4	6,09	33,3	0,25
E-Het-a	IV	0,00	3,95	0,73	3,78	40,1	7,34	33,6	0,19
E-Het-b	IV	0,00	2,69	0,54	0,00	13,1	3,18	26,9	0,10
E-Het-c	IV	0,00	1,90	0,34	0,00	7,99	1,30	16,0	0,10
E-Het-d	IV	0,00	3,08	0,18	0,00	11,1	0,82	16,2	0,28
M-Wüs-a	IV	0,00	11,2	1,11	14,8	65,1	9,81	29,7	0,40
M-Wüs-b	IV	0,00	11,5	1,01	13,5	46,6	6,29	29,4	0,40
E-Wüs-a	IV	0,00	14,0	1,09	14,7	51,4	10,1	37,0	0,24
E-Wüs-b	IV	0,00	11,0	0,70	13,6	60,4	9,06	28,5	0,10
E-Wüs-c	IV	0,00	4,27	0,34	5,36	24,7	4,34	14,2	0,08
M-Döl-a	IV	0,00	7,64	2,39	10,3	52,5	11,6	22,1	0,66
M-Döl-b	IV	0,00	7,98	1,58	12,4	37,2	7,63	27,2	0,36
E-Döl-a	IV	0,00	6,58	1,74	8,14	36,5	8,48	23,7	0,55
E-Döl-b	IV	0,00	9,63	1,31	8,44	35,1	5,94	0,00	0,26
E-Döl-c	IV	0,00	8,44	0,89	5,71	47,4	3,86	0,00	0,21
E-Döl-d	IV	0,00	3,62	0,56	0,00	10,1	2,06	0,00	0,16
M-Meu-a	IV	0,00	9,17	0,96	12,7	33,1	5,14	30,7	0,66
M-Meu-b	IV	0,00	8,39	0,90	11,7	29,9	3,99	31,0	0,48
E-Meu-a	IV	0,00	10,5	1,17	10,9	32,1	6,22	35,8	0,60
E-Meu-b	IV	0,00	7,88	0,44	7,99	16,6	1,48	0,00	0,31
E-Meu-c	IV	0,00	3,07	0,14	1,44	10,5	1,27	0,00	0,00
M-Bur-a	IV	0,00	6,06	2,16	0,00	21,6	4,59	20,4	0,44
M-Bur-b	IV	0,00	4,24	0,83	0,00	18,7	1,50	0,00	0,13
E-Bur-a	IV	0,00	5,19	1,80	0,00	38,6	3,86	21,0	0,47
E-Bur-b	IV	0,00	3,65	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Bur-c	IV	0,00	1,75	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Bur-d	IV	0,00	1,53	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Leu-a	V	4,80	12,8	6,75	0,00	15,7	8,82	0,00	2,23
M-Leu-b	V	0,00	11,4	5,18	0,00	18,4	6,88	0,00	0,95
E-Leu-a	V	5,24	13,0	7,25	0,00	17,4	11,0	0,00	2,01
E-Leu-b	V	0,00	11,4	5,28	0,00	23,1	0,00	0,00	0,87
E-Leu-c	V	0,00	5,53	3,42	0,00	6,23	0,00	0,00	0,65
E-Leu-d	V	0,00	4,35	2,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
M-Spe-a	V	5,23	12,6	6,32	0,00	18,7	12,0	0,00	1,67
M-Spe-b	V	0,00	11,2	5,39	0,00	16,2	8,60	0,00	1,10
E-Spe-a	V	4,71	9,23	5,16	0,00	15,2	10,4	0,00	1,21
E-Spe-b	V	0,00	5,63	3,71	0,00	6,21	0,00	0,00	0,28
E-Spe-c	V	0,00	3,88	3,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A-7: *Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer*

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Sch-a	V	5,11	7,15	9,11	0,00	14,0	9,62	0,00	0,57
M-Sch-b	V	4,82	5,57	8,74	0,00	15,6	8,44	0,00	0,45
E-Sch-a	V	4,57	6,98	8,76	0,00	16,1	9,78	0,00	0,82
E-Sch-b	V	3,97	10,3	8,64	0,00	15,0	7,13	0,00	0,57
M-Etz-a	V	0,00	6,24	4,47	0,00	15,3	8,54	0,00	0,70
M-Etz-b	V	0,00	5,16	3,91	0,00	9,24	0,00	0,00	0,00
E-Etz-a	V	0,00	7,41	4,28	0,00	14,1	22,9	0,00	1,17
E-Etz-b	V	0,00	4,14	3,85	0,00	10,9	0,00	0,00	0,32
E-Etz-c	V	0,00	4,15	3,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Alt-a	V	8,24	18,1	22,0	0,00	22,2	20,7	0,00	1,96
M-Alt-b	V	0,00	18,5	24,0	0,00	23,0	8,06	0,00	1,20
E-Alt-a	V	8,28	23,3	28,1	11,7	21,0	10,1	24,6	1,56
E-Alt-b	V	0,00	18,2	25,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37
E-Alt-c	V	0,00	1,82	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Gün-a	V	6,76	7,00	7,64	0,00	15,3	11,2	0,00	2,48
M-Gün-b	V	0,00	5,38	6,03	0,00	11,2	8,43	0,00	1,63
E-Gün-a	V	0,00	0,90	6,48	0,00	0,00	6,40	0,00	0,40
E-Gün-b	V	0,00	6,02	6,11	0,00	10,9	6,78	0,00	0,93
E-Gün-c	V	0,00	3,32	4,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Grä-a	V	6,80	20,9	16,6	0,00	12,3	5,94	0,00	1,37
M-Grä-b	V	0,00	14,8	11,9	0,00	7,66	0,00	0,00	0,36
E-Grä-a	V	7,74	19,2	17,7	0,00	24,5	8,73	0,00	1,57
E-Grä-b	V	6,98	11,2	5,63	0,00	0,00	7,02	0,00	0,57
M-Zsc-a	V	17,6	19,1	44,4	29,6	20,0	23,7	0,00	3,93
M-Zsc-b	V	12,0	11,1	16,9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,12
E-Zsc-a	V	18,8	25,7	39,6	27,1	25,1	22,8	0,00	3,42
E-Zsc-b	V	9,38	9,48	12,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
E-Zsc-c	V	10,6	2,75	6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40
M-Eis-a	V	3,75	18,5	19,5	4,61	17,2	7,82	14,5	0,83
M-Eis-b	V	2,98	27,9	20,6	4,95	14,7	5,79	20,2	1,50
E-Eis-a	V	2,78	17,4	13,5	6,79	16,1	5,07	18,1	1,11
E-Eis-b	V	2,16	6,29	3,15	0,00	6,13	0,00	0,00	1,30
E-Eis-c	V	0,00	6,76	8,09	4,14	6,23	0,00	29,0	0,54
M-Het-a	V	2,20	9,48	4,37	3,95	15,3	17,4	9,11	0,81
M-Het-b	V	2,10	9,09	4,75	2,15	17,9	19,1	12,1	0,85
E-Het-a	V	2,39	8,04	5,31	6,59	13,4	15,5	10,0	0,66
E-Het-b	V	2,42	5,34	4,82	4,27	10,2	6,70	14,3	0,48
E-Het-c	V	1,75	3,15	4,05	3,68	7,94	0,00	0,00	0,35
E-Het-d	V	0,00	3,19	1,29	3,67	7,48	0,00	30,0	0,29
M-Wüs-a	V	2,37	5,14	5,18	8,11	21,1	4,13	13,5	0,99
M-Wüs-b	V	1,82	4,56	5,10	8,94	16,4	1,79	17,8	1,05
E-Wüs-a	V	1,95	3,64	4,68	8,93	17,5	3,47	0,00	0,94
E-Wüs-b	V	0,00	2,73	3,91	6,26	14,1	0,00	0,00	0,54
E-Wüs-c	V	0,00	1,72	2,24	0,00	8,47	0,00	0,00	0,16
M-Döl-a	V	2,61	23,2	12,7	12,0	19,4	2,95	12,3	1,33
M-Döl-b	V	4,48	26,2	9,52	14,6	23,0	0,00	0,00	1,20
E-Döl-a	V	2,67	25,5	10,7	0,00	22,4	8,37	13,6	1,36
E-Döl-b	V	3,10	32,8	10,5	8,26	26,9	6,74	0,00	1,19
E-Döl-c	V	0,00	26,8	8,22	0,00	0,00	3,88	0,00	0,75
E-Döl-d	V	0,00	10,3	4,64	0,00	0,00	3,03	0,00	0,37
M-Meu-a	V	1,44	10,8	9,08	8,57	12,5	7,05	18,5	1,17
M-Meu-b	V	2,34	19,5	10,8	7,58	14,7	7,53	23,4	2,41
E-Meu-a	V	3,17	19,7	10,2	10,0	17,2	10,2	22,5	2,61
E-Meu-b	V	1,85	21,6	7,75	7,65	10,1	2,77	20,8	1,40
E-Meu-c	V	0,00	2,82	2,42	4,81	5,72	1,91	0,00	0,10
M-Bur-a	V	3,17	29,3	22,2	19,6	17,8	10,1	23,6	1,27
M-Bur-b	V	2,37	20,1	9,17	8,10	10,5	4,80	0,00	0,42
E-Bur-a	V	4,99	35,8	20,8	16,3	37,5	11,2	21,3	1,71
E-Bur-b	V	0,00	16,1	7,82	6,50	0,00	4,18	0,00	0,15
E-Bur-c	V	0,00	18,9	5,13	0,00	0,00	4,50	0,00	0,12
E-Bur-d	V	0,00	15,3	5,13	7,12	0,00	4,82	0,00	0,17

A-7: Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Leu-a	VI	4,80	5,29	38,2	9,70	0,00	17,6	0,00	1,26
M-Leu-b	VI	5,24	5,52	39,5	11,2	0,00	14,5	0,00	0,76
E-Leu-a	VI	5,24	5,83	42,0	9,73	0,00	18,3	0,00	1,25
E-Leu-b	VI	5,18	7,23	49,4	11,8	23,1	21,1	0,00	0,87
E-Leu-c	VI	4,09	7,57	45,1	10,5	28,0	18,1	0,00	0,54
E-Leu-d	VI	0,00	7,29	41,6	8,34	61,2	17,2	0,00	0,30
M-Spe-a	VI	5,98	5,41	38,9	10,4	0,00	19,8	0,00	1,23
M-Spe-b	VI	5,19	5,91	50,4	12,0	0,00	21,5	0,00	1,20
E-Spe-a	VI	5,30	4,89	35,9	10,4	0,00	17,7	0,00	0,95
E-Spe-b	VI	0,00	4,83	35,3	0,00	0,00	16,7	0,00	0,38
E-Spe-c	VI	0,00	5,51	43,2	10,3	21,7	19,8	0,00	0,47
M-Sch-a	VI	5,62	3,97	31,8	9,68	0,00	20,5	0,00	0,79
M-Sch-b	VI	4,82	3,64	32,6	7,48	0,00	20,5	0,00	0,71
E-Sch-a	VI	4,57	4,90	30,4	7,01	0,00	19,6	0,00	0,82
E-Sch-b	VI	3,97	3,65	34,2	9,66	5,99	19,0	0,00	0,73
M-Etz-a	VI	0,00	5,20	40,8	7,49	0,00	17,7	0,00	1,11
M-Etz-b	VI	0,00	4,42	35,0	0,00	0,00	14,8	0,00	0,72
E-Etz-a	VI	0,00	4,85	34,9	7,66	0,00	16,8	0,00	0,97
E-Etz-b	VI	0,00	4,97	41,4	0,00	0,00	16,2	0,00	0,64
E-Etz-c	VI	0,00	5,37	36,3	0,00	0,00	15,2	0,00	0,39
M-Alt-a	VI	0,00	4,26	26,2	0,00	0,00	14,3	0,00	1,37
M-Alt-b	VI	0,00	4,74	23,2	0,00	0,00	11,6	0,00	0,90
E-Alt-a	VI	5,94	3,35	16,2	9,96	0,00	11,0	0,00	0,89
E-Alt-b	VI	0,00	2,65	8,41	0,00	0,00	10,8	0,00	0,37
E-Alt-c	VI	0,00	0,56	1,00	0,00	63,2	79,1	0,00	0,00
M-Gün-a	VI	0,00	2,15	15,3	10,9	5,60	15,4	0,00	0,85
M-Gün-b	VI	6,48	2,04	18,0	9,89	4,28	14,6	0,00	0,69
E-Gün-a	VI	0,00	8,23	7,46	0,00	14,6	10,8	0,00	1,86
E-Gün-b	VI	6,77	3,88	29,3	14,1	13,8	27,9	0,00	1,00
E-Gün-c	VI	0,00	4,29	27,9	16,1	11,6	28,0	0,00	0,35
M-Grä-a	VI	0,00	2,08	13,2	0,00	0,00	9,93	0,00	0,60
M-Grä-b	VI	0,00	2,54	9,04	0,00	0,00	6,83	0,00	0,00
E-Grä-a	VI	0,00	2,18	12,2	8,41	0,00	18,8	0,00	0,70
E-Grä-b	VI	9,60	6,81	68,1	38,9	26,7	22,0	0,00	0,73
M-Zsc-a	VI	5,97	3,23	14,7	11,8	0,00	7,77	0,00	3,62
M-Zsc-b	VI	0,00	2,09	7,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59
E-Zsc-a	VI	7,29	4,03	21,5	14,7	0,00	8,69	0,00	3,53
E-Zsc-b	VI	0,00	2,45	10,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E-Zsc-c	VI	0,00	0,89	5,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M-Eis-a	VI	6,19	2,89	26,7	22,1	7,88	20,4	0,00	0,48
M-Eis-b	VI	6,74	4,06	33,5	26,6	10,8	20,6	0,00	0,51
E-Eis-a	VI	6,22	2,31	37,4	29,9	14,9	18,6	0,00	0,61
E-Eis-b	VI	5,87	2,21	38,9	22,0	15,1	19,1	0,00	0,89
E-Eis-c	VI	7,35	2,68	36,7	15,7	16,6	18,8	0,00	0,43
M-Het-a	VI	11,2	5,06	36,7	21,1	11,4	25,6	4,26	0,92
M-Het-b	VI	13,2	6,29	46,1	11,2	21,0	25,0	6,46	1,05
E-Het-a	VI	11,4	5,33	42,2	30,1	20,2	26,6	4,60	0,99
E-Het-b	VI	10,4	4,58	36,9	31,6	47,0	21,3	8,38	1,26
E-Het-c	VI	9,33	5,65	37,6	30,1	53,0	20,6	26,8	1,26
E-Het-d	VI	10,7	4,12	32,3	13,8	29,1	9,02	19,9	0,55
M-Wüs-a	VI	7,52	5,65	29,6	30,3	9,03	25,0	0,00	1,08
M-Wüs-b	VI	8,98	5,62	31,3	27,2	8,86	21,8	15,2	1,14
E-Wüs-a	VI	7,79	6,37	26,4	29,6	0,00	20,8	0,00	1,02
E-Wüs-b	VI	7,91	6,50	27,7	34,1	7,11	22,5	0,00	1,01
E-Wüs-c	VI	7,03	8,21	30,1	31,1	0,00	15,1	0,00	0,53
M-Döl-a	VI	8,86	6,18	33,8	23,2	12,9	27,3	0,00	0,96
M-Döl-b	VI	8,27	6,41	35,8	39,8	26,8	26,4	0,00	0,84
E-Döl-a	VI	6,45	4,96	31,6	26,3	8,79	23,3	0,00	0,79
E-Döl-b	VI	7,53	6,12	36,3	25,9	25,3	27,5	0,00	0,83
E-Döl-c	VI	6,77	6,59	38,3	23,2	71,1	25,8	0,00	0,70
E-Döl-d	VI	6,16	5,17	36,8	24,4	27,9	22,5	0,00	0,58

A-7: *Ergebnisse der sequentiellen Schwermetall-extraktion nach Zeien & Brümmer*

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Meu-a	VI	7,32	4,29	23,9	20,1	5,36	18,1	10,8	0,92
M-Meu-b	VI	7,70	4,62	25,1	17,5	7,29	19,4	0,00	1,25
E-Meu-a	VI	8,11	5,52	26,0	18,4	6,15	19,3	0,00	1,27
E-Meu-b	VI	8,06	3,90	25,4	17,8	7,65	13,0	21,4	0,82
E-Meu-c	VI	8,15	4,95	28,7	20,8	10,7	14,9	21,4	0,27
M-Bur-a	VI	2,74	3,44	19,8	16,6	8,54	15,0	0,00	0,45
M-Bur-b	VI	2,29	4,24	14,0	11,0	8,26	11,9	0,00	0,22
E-Bur-a	VI	3,28	3,21	22,1	15,9	16,6	19,7	0,00	0,54
E-Bur-b	VI	4,89	4,05	27,5	19,4	29,8	19,5	0,00	0,13
E-Bur-c	VI	5,32	9,15	27,4	21,4	26,2	18,0	0,00	0,16
E-Bur-d	VI	5,23	10,6	28,7	27,3	34,8	22,9	33,9	0,25
M-Leu-a	VII	90,4	10,5	52,5	69,3	14,6	56,5	50,9	72,8
M-Leu-b	VII	94,8	7,81	53,8	72,9	30,3	52,3	100	81,1
E-Leu-a	VII	89,5	0,74	48,1	69,2	6,17	48,1	52,7	68,9
E-Leu-b	VII	94,8	4,03	43,9	74,8	11,1	71,5	100	64,7
E-Leu-c	VII	95,9	24,4	50,7	89,5	49,7	81,9	100	86,3
E-Leu-d	VII	100	26,6	54,9	91,7	0,00	82,8	100	88,3
M-Spe-a	VII	88,8	0,00	52,1	64,7	0,00	37,4	43,9	71,7
M-Spe-b	VII	94,8	1,63	42,4	72,5	7,43	47,5	100	80,4
E-Spe-a	VII	90,0	17,0	57,0	67,0	15,7	39,3	53,1	78,5
E-Spe-b	VII	100	24,3	59,4	64,8	73,1	83,3	100	91,9
E-Spe-c	VII	100	27,7	51,0	89,7	66,6	80,2	100	92,0
M-Sch-a	VII	89,3	4,91	56,6	74,6	36,0	51,3	56,9	80,6
M-Sch-b	VII	90,4	8,52	56,0	80,1	29,6	55,2	56,1	80,9
E-Sch-a	VII	90,9	2,53	58,7	80,0	12,9	47,7	58,8	77,8
E-Sch-b	VII	92,1	0,00	54,4	78,3	0,00	52,5	54,4	81,7
M-Etz-a	VII	100	15,5	53,2	70,0	0,00	46,1	47,6	84,8
M-Etz-b	VII	100	26,2	59,4	87,0	47,6	76,8	100	89,6
E-Etz-a	VII	100	12,8	59,8	67,5	15,4	0,00	46,1	84,7
E-Etz-b	VII	100	20,6	53,4	85,2	32,5	72,2	100	91,3
E-Etz-c	VII	100	32,8	58,9	100	83,1	77,5	100	92,0
M-Alt-a	VII	91,8	28,0	46,0	100	33,3	58,0	100	66,7
M-Alt-b	VII	100	22,5	46,0	100	31,1	73,1	100	76,5
E-Alt-a	VII	85,8	19,2	50,9	78,4	34,2	74,6	34,8	70,5
E-Alt-b	VII	100	51,3	63,9	100	82,0	89,2	100	91,2
E-Alt-c	VII	100	89,3	97,7	100	18,1	20,9	100	96,9
M-Gün-a	VII	93,2	8,85	72,6	67,6	25,2	44,0	38,5	69,4
M-Gün-b	VII	93,5	14,3	72,6	66,4	31,2	52,6	46,2	73,2
E-Gün-a	VII	100	17,5	82,4	81,2	40,0	55,8	32,1	74,1
E-Gün-b	VII	93,2	10,0	62,3	69,6	24,2	55,7	100	77,2
E-Gün-c	VII	100	19,4	65,7	83,9	88,4	72,0	100	93,7
M-Grä-a	VII	93,2	40,7	66,3	100	57,4	73,7	60,9	77,7
M-Grä-b	VII	100	30,9	76,4	100	69,0	91,4	100	88,9
E-Grä-a	VII	92,3	23,4	66,5	91,6	19,7	0,00	52,1	73,2
E-Grä-b	VII	83,4	20,7	25,6	48,6	59,4	66,8	100	86,1
M-Zsc-a	VII	76,4	36,7	36,9	45,5	25,2	48,8	100	57,5
M-Zsc-b	VII	88,0	36,5	70,0	100	24,5	81,1	100	80,1
E-Zsc-a	VII	73,9	25,2	35,5	45,7	0,00	49,4	52,2	63,6
E-Zsc-b	VII	90,6	62,8	76,1	100	67,2	100	100	92,5
E-Zsc-c	VII	89,4	76,8	86,2	100	27,1	100	100	97,0
M-Eis-a	VII	90,1	18,4	50,7	73,3	24,2	46,6	39,3	84,9
M-Eis-b	VII	90,3	0,00	43,3	68,5	40,6	56,7	38,9	82,3
E-Eis-a	VII	91,0	23,7	45,7	63,3	24,7	52,7	37,1	82,9
E-Eis-b	VII	92,0	88,3	54,1	69,9	68,1	76,3	100	73,2
E-Eis-c	VII	92,6	88,2	52,1	80,1	72,1	76,5	71,0	81,7
M-Het-a	VII	86,6	27,7	58,2	75,0	25,3	30,5	31,7	69,4
M-Het-b	VII	84,7	21,3	48,4	86,6	5,64	32,5	18,5	61,2
E-Het-a	VII	86,2	18,8	51,7	54,1	16,1	29,9	24,7	71,1
E-Het-b	VII	87,2	32,0	57,5	54,2	25,7	62,8	36,8	73,3
E-Het-c	VII	88,9	36,7	57,8	56,2	29,2	78,1	57,2	76,4
E-Het-d	VII	89,3	33,2	66,1	77,6	52,4	90,2	33,9	72,4

A-7: Ergebnisse der sequentiellen Schwermetallextraktion nach Zeien & Brümmer

Standorte Einheit	Fraktion	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Ba %
M-Wüs-a	VII	90,1	33,5	64,1	46,7	0,00	59,2	56,8	79,9
M-Wüs-b	VII	89,2	24,1	62,6	50,3	28,2	68,9	37,6	79,1
E-Wüs-a	VII	90,3	32,9	67,7	46,8	31,1	62,8	63,0	78,4
E-Wüs-b	VII	92,1	45,3	67,6	46,1	18,4	65,8	71,5	81,4
E-Wüs-c	VII	93,0	63,2	67,3	63,5	66,8	80,6	85,8	84,8
M-Döl-a	VII	88,5	27,3	50,9	54,4	15,1	45,5	65,6	85,0
M-Döl-b	VII	87,2	25,0	52,9	33,2	0,00	61,7	72,8	86,8
E-Döl-a	VII	90,9	34,4	55,8	65,5	32,3	50,8	62,7	86,3
E-Döl-b	VII	89,4	20,3	51,7	57,4	0,00	57,2	100	85,6
E-Döl-c	VII	93,2	28,8	52,5	71,1	0,00	66,4	100	89,2
E-Döl-d	VII	93,8	45,5	57,6	75,6	62,0	70,6	100	92,7
M-Meu-a	VII	91,2	27,9	66,0	58,6	49,0	67,4	40,0	78,8
M-Meu-b	VII	90,0	12,2	63,1	59,5	48,1	67,7	45,6	75,1
E-Meu-a	VII	88,7	11,6	62,6	60,7	44,5	62,4	41,6	73,1
E-Meu-b	VII	90,1	5,56	66,3	57,9	65,7	82,2	57,8	77,3
E-Meu-c	VII	91,8	60,2	68,6	69,0	73,0	81,9	78,6	85,2
M-Bur-a	VII	94,1	33,5	55,4	63,8	52,1	63,6	56,0	87,7
M-Bur-b	VII	95,3	34,0	75,7	80,9	62,5	78,7	100	92,3
E-Bur-a	VII	91,7	34,7	54,9	67,8	0,00	56,8	57,7	87,0
E-Bur-b	VII	95,1	32,6	63,5	74,1	70,2	74,2	100	91,4
E-Bur-c	VII	94,7	36,2	66,9	78,6	73,8	76,2	100	88,7
E-Bur-d	VII	94,8	43,0	65,6	65,6	65,2	72,2	66,1	91,8

A-8: *Potentielle Kationenaustauschkapazität der Böden*

Standorte Einheit	pH-Wert (CaCl ₂)	H mval/kg	Na mval/kg	Mg mval/kg	K mval/kg	Ca mval/kg	Ba mval/kg	KAKpot mval/kg
M-Leu-a	7,47	2,47	3,45	17,4	2,95	187		214
M-Leu-b	7,57	2,48	6,34	22,6		106	81,5	138
E-Leu-a	7,52	12,5	4,52	18,5	2,70	162	122	200
E-Leu-b	7,61	12,5	9,02	23,2		73,3	84,8	118
E-Leu-c	7,52		8,28	20,5		57,8	61,2	86,6
E-Leu-d	7,66		7,51	17,1		58,6	52,4	83,2
M-Spe-a	7,13	17,4		7,52	3,89	88,3		117
M-Spe-b	7,47			6,52		75,7	68,5	82,2
E-Spe-a	7,39	12,3		8,02	8,69	97,2	105	126
E-Spe-b	7,66			9,13		57,3	41,7	66,4
E-Spe-c	7,66			3,62		56,8	38,0	60,4
M-Sch-a	7,83	14,9		8,93	4,66	92,2		121
M-Sch-b	7,92	7,44		8,69	2,79	78,2	94,6	97,2
E-Sch-a	7,85			8,47	5,12	88,7	101	102
E-Sch-b	7,88	12,5	2,63	9,00		74,5	85,5	98,6
M-Etz-a	7,65			5,99	3,12	85,8	93,2	94,9
M-Etz-b	7,91			5,92		63,3	60,1	69,2
E-Etz-a	7,72	29,6		5,10	2,98	88,8	95,6	127
E-Etz-b	7,93			4,95		94,6	73,2	99,6
E-Etz-c	8,01			9,01		65,6	41,4	74,6
M-Alt-a	6,34	34,8		2,91		67,6	77,0	105
M-Alt-b	6,65	4,93		2,05		46,0	51,2	52,9
E-Alt-a	6,05	54,4		3,18		66,1	82,6	124
E-Alt-b	5,86	34,8		1,04		18,4	36,0	54,3
E-Alt-c	6,00			0,42		5,12	9,55	5,54
M-Gün-a	6,15	32,2		4,06	8,52	61,9	80,2	107
M-Gün-b	6,25	27,4		4,64	7,63	68,5	78,4	108
E-Gün-a	6,01	39,4		3,55	4,78	52,3	57,7	100
E-Gün-b	6,58			4,12	3,30	54,9	53,9	62,3
E-Gün-c	6,94			1,73		16,0	13,5	17,8
M-Grä-a	5,40	19,8		2,38	5,14	39,1	53,4	66,4
M-Grä-b	5,95	11,3		1,87	2,29	26,6	30,1	42,1
E-Grä-a	5,48	22,4		3,82	5,15	55,2	68,2	86,6
E-Grä-b	6,43			4,12		52,1	51,3	56,2
M-Zsc-a	7,55			3,29	4,35	137	127	145
M-Zsc-b	7,44			1,57		56,6	52,2	58,2
E-Zsc-a	7,51	9,87		2,59	4,17	127	111	143
E-Zsc-b	7,50	9,94		0,78	2,15	20,5	20,4	33,3
E-Zsc-c	7,50			0,30		6,38	7,08	6,68
M-Eis-a	6,42	15,0		1,84	6,77	36,4	87,5	60,0
M-Eis-b	6,44	20,0	0,41	2,20	6,03	30,0	82,2	58,7
E-Eis-a	5,71	45,0		1,16	6,69	27,0	77,5	79,9
E-Eis-b	4,87	30,0		2,01	6,93	18,0	71,7	57,0
E-Eis-c	4,37			1,46	5,85	14,9	42,3	22,2
M-Het-a	6,53	5,00	0,41	6,29	8,56	80,5	171	101
M-Het-b	7,18			7,18	4,52	95,8	162	108
E-Het-a	7,07		0,33	4,48	7,67	86,8	164	99,3
E-Het-b	7,17	5,00	0,85	5,54	2,18	96,8	159	110
E-Het-c	7,30	7,50	1,17	6,19	2,90	101	191	119
E-Het-d	7,61		1,48	7,39	2,95	116	168	127

A-8: *Potentielle Kationenaustauschkapazität der Böden*

Standorte Einheit	pH-Wert (CaCl ₂)	H mval/kg	Na mval/kg	Mg mval/kg	K mval/kg	Ca mval/kg	Ba mval/kg	KAKpot mval/kg
M-Wüs-a	7,33		0,72	6,58	8,74	101	179	117
M-Wüs-b	7,52		1,59	7,11	5,87	102	166	116
E-Wüs-a	7,38		0,39	6,59	17,4	100	181	125
E-Wüs-b	7,67		1,85	8,19	5,41	97,2	158	113
E-Wüs-c	7,69		1,50	7,49	2,46	85,6	106	97,1
M-Döl-a	6,74	30,0		2,89	7,91	48,3	105	89,1
M-Döl-b	7,00			2,34	5,79	40,9	70,8	49,0
E-Döl-a	6,55		0,43	2,40	7,07	38,8	74,7	48,7
E-Döl-b	6,65			1,97	5,62	35,2	74,8	42,8
E-Döl-c	6,75			2,03	5,03	34,0	59,1	41,0
E-Döl-d	7,03	15,0		2,51	3,07	29,7	45,6	50,2
M-Meu-a	7,08	7,50	1,85	13,0	10,4	118	222	150
M-Meu-b	7,26		2,67	13,4	4,41	112	214	133
E-Meu-a	7,11	5,00	2,09	13,8	16,7	107	213	144
E-Meu-b	7,42	22,5	3,21	14,5	1,30	106	145	148
E-Meu-c	7,45	5,00	2,30	11,9	1,16	68,3	127	88,7
M-Bur-a	5,92	45,0		1,74	5,08	30,9	76,8	82,8
M-Bur-b	6,29	15,0		1,71	4,56	20,7	41,4	41,9
E-Bur-a	5,81	25,0		1,44	6,90	27,5	80,2	60,8
E-Bur-b	5,99	32,5		1,90	6,57	19,3	45,2	60,2
E-Bur-c	5,96	25,0		3,61	5,78	27,1	67,9	61,5
E-Bur-d	6,25	25,0		3,54	4,54	24,2	54,8	57,2

A-9: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) im Boden nach EPA 610 (ohne Acenaphthylen)

PAK 1 = Naphthalin, PAK 2 = Acenaphthen, PAK 3 = Fluoren, PAK 4 = Phenanthren, PAK 5 = Anthracen, PAK 6 = Fluoranthren, PAK 7 = Pyren, PAK 8 = Benzo(a)anthracen, PAK 9 = Chrysen, PAK 10 = Benzo(b)fluoranthren, PAK 11 = Benzo(k)fluoranthren, PAK 12 = Benzo(a)pyren, PAK 13 = Dibenz(a,h)anthracen, PAK 14 = Benzo(g,h,i)perylene, PAK 15 = Indeno(1,2,3-cd)pyren
n.n. = nicht nachweisbar; n.b. = nicht bestimmt; n.q. = nicht quantifizierbar

Standorte Einheit	PAK 1 µg/kg	PAK 2 µg/kg	PAK 3 µg/kg	PAK 4 µg/kg	PAK 5 µg/kg	PAK 6 µg/kg	PAK 7 µg/kg	PAK 8 µg/kg	PAK 9 µg/kg	PAK 10 µg/kg	PAK 11 µg/kg	PAK 12 µg/kg	PAK 13 µg/kg	PAK 14 µg/kg	PAK 15 µg/kg
M-Leu-a	n.n.	47,9	4,70	8,20	9,90	209	238	18,4	120	114	44,8	42,0	4,20	270	81,5
M-Leu-b	n.n.	33,8	n.n.	77,4	2,30	220	146	15,4	91,8	88,1	28,8	39,8	16,6	142	58,5
E-Leu-a	n.n.	34,5	0,90	n.n.	4,20	192	156	14,3	101	95,1	30,5	32,3	5,00	197	67,2
E-Leu-b	n.q.	n.q.	n.q.	10,6	0,30	9,30	2,40	0,70	12,1	2,50	3,20	2,60	3,60	1,30	6,20
E-Leu-c	n.n.	n.q.	1,10	2,30	n.n.	5,50	n.n.	n.n.	n.n.	2,60	3,30	n.n.	n.n.	n.n.	7,30
E-Leu-d	n.n.	n.n.	n.n.	6,40	n.n.	7,00	4,10	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
M-Spe-a	n.q.	18,1	2,10	17,3	1,90	95,9	31,5	25,4	56,7	59,1	21,0	20,0	10,6	44,4	46,3
M-Spe-b	n.n.	3,80	n.n.	n.n.	5,50	24,8	6,90	9,50	18,3	22,4	9,70	6,50	2,50	18,6	21,6
E-Spe-a	n.n.	31,0	n.n.	11,7	136	73,4	44,0	n.q.	84,2	30,9	32,2	7,20	56,3	61,0	7,40
E-Spe-b	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	9,60	4,80	1,70	6,50	6,70	4,60	4,40	1,90	3,20	7,60
E-Spe-c	n.n.	0,60	n.n.	33,0	0,80	12,8	4,40	0,20	2,30	1,20	0,70	5,00	5,00	n.n.	1,30
M-Sch-a	18,8	302	6,50	360	25,6	490	365	184	222	198	83,7	122	17,0	87,7	114
M-Sch-b	19,1	76,1	5,20	162	10,7	164	117	53,5	73,3	61,5	25,1	36,2	10,8	27,0	38,0
E-Sch-a	1,30	52,3	n.q.	158	9,80	246	136	55,6	92,2	74,7	29,5	40,7	4,50	6,70	49,2
E-Sch-b	n.q.	6,40	n.n.	25,1	1,10	23,6	14,6	4,80	8,50	8,00	3,00	9,20	2,60	6,50	6,00
M-Etz-a	n.q.	18,6	n.q.	54,4	2,80	52,3	30,8	13,8	22,6	26,1	9,80	13,5	2,60	20,2	24,7
M-Etz-b	n.n.	4,20	n.n.	58,6	n.q.	20,0	6,90	2,00	6,10	7,30	2,80	5,80	0,90	7,50	5,70
E-Etz-a	n.q.	81,0	n.q.	71,5	6,70	81,3	51,8	45,2	52,9	55,0	20,5	33,0	10,4	30,5	39,3
E-Etz-b	n.n.	n.n.	n.n.	48,9	n.q.	10,5	n.n.	n.n.	1,80	1,90	0,60	2,80	0,50	4,50	n.q.
E-Etz-c	n.n.	n.n.	n.n.	14,2	0,60	8,60	n.n.	n.n.	n.n.	0,60	0,50	3,40	n.n.	n.n.	0,50
M-Alt-a	33,5	25,7	n.n.	131	6,40	160	56,8	32,5	64,3	59,6	20,6	28,7	6,00	33,8	40,8
M-Alt-b	1,10	17,9	2,20	76,3	4,40	98,5	19,4	21,7	41,9	38,1	13,6	20,7	2,60	25,8	26,6
E-Alt-a	107	27,0	n.n.	155	7,40	195	39,7	38,1	79,2	72,8	25,1	33,1	6,50	42,7	44,2
E-Alt-b	41,0	n.n.	n.n.	29,5	2,20	21,0	55,7	n.n.	4,50	7,80	2,20	4,60	2,00	3,90	4,80
E-Alt-c	26,7	n.q.	n.n.	20,0	0,60	6,60	n.n.	n.n.	1,10	0,50	0,40	3,60	1,10	2,90	0,50
M-Gün-a	n.q.	11,8	n.n.	41,8	5,00	80,0	35,3	20,6	38,1	41,6	15,6	17,8	8,50	24,3	30,6
M-Gün-b	n.q.	n.q.	n.q.	36,9	2,70	41,9	20,3	10,2	17,4	21,3	8,10	7,90	5,00	13,5	15,8
E-Gün-a	n.n.	16,7	n.n.	48,5	5,30	104	69,8	35,1	52,8	52,5	21,7	26,6	13,3	34,7	42,8
E-Gün-b	n.n.	n.n.	n.n.	12,0	0,40	8,60	2,00	n.n.	n.n.	1,40	0,70	3,70	0,50	3,60	0,90
E-Gün-c	n.n.	n.n.	n.n.	4,60	n.q.	4,90	0,70	n.n.	n.n.	0,40	0,40	3,50	n.n.	n.n.	n.n.
M-Grä-a	n.q.	29,8	n.q.	10,3	11,0	79,0	14,2	29,7	61,7	62,6	22,2	27,2	6,60	31,6	40,1
M-Grä-b	n.q.	n.q.	n.q.	n.q.	1,20	8,80	7,60	6,30	6,60	9,00	3,20	9,20	2,30	12,3	6,60
E-Grä-a	n.q.	26,7	1,90	2,50	13,5	73,9	9,80	23,0	63,2	59,6	19,8	23,8	5,80	28,4	32,9
E-Grä-b	n.q.	n.q.	n.q.	n.q.	0,30	2,40	n.q.	n.q.	n.q.	0,90	0,50	2,70	n.q.	n.q.	n.q.

A-9:

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) im Boden nach EPA 610 (ohne Acenaphthylen)

Standorte Einheit	PAK 1 µg/kg	PAK 2 µg/kg	PAK 3 µg/kg	PAK 4 µg/kg	PAK 5 µg/kg	PAK 6 µg/kg	PAK 7 µg/kg	PAK 8 µg/kg	PAK 9 µg/kg	PAK 10 µg/kg	PAK 11 µg/kg	PAK 12 µg/kg	PAK 13 µg/kg	PAK 14 µg/kg	PAK 15 µg/kg
M-Zsc-a	n.q.	22,6	n.q.	23,5	7,20	125	12,2	29,6	65,9	57,6	19,4	23,3	11,3	29,5	33,7
M-Zsc-b	n.q.	3,90	n.q.	22,6	1,90	42,6	3,50	7,10	18,3	18,8	5,90	8,00	5,30	9,90	11,4
E-Zsc-a	n.q.	16,3	n.q.	15,4	7,80	80,7	5,90	25,7	58,6	54,7	19,2	21,0	4,70	28,9	36,2
E-Zsc-b	n.q.	2,40	n.q.	3,90	0,20	2,80	6,60	0,90	2,80	1,20	0,70	3,20	n.q.	n.q.	n.q.
E-Zsc-c	n.q.	n.q.	n.q.	1,40	n.q.	0,90	n.q.	n.q.	2,10	0,40	0,30	2,60	0,70	28,4	n.q.
M-Eis-a	n.n.	53,1	n.n.	52,1	n.n.	93,6	23,7	31,5	20,6	8,07	12,7	11,9	1,73	18,4	2,01
M-Eis-b	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	22,2	3,25	10,4	3,28	23,0	4,69	2,92	n.n.	5,75	2,01
E-Eis-a	7,27	n.n.	n.n.	72,0	n.n.	58,7	10,2	25,0	9,48	35,0	12,5	9,10	28,0	48,8	18,1
E-Eis-b	12,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	5,37	6,47	30,4	n.n.	n.n.	n.n.	3,95	5,03
E-Eis-c	7,00	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	3,66	1,63	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	7,05
M-Het-a	15,9	49,1	n.n.	46,2	8,96	90,5	26,5	36,9	21,6	33,2	15,0	17,4	4,22	25,7	n.n.
M-Het-b	8,78	n.q.	n.n.	57,4	n.n.	56,4	9,87	16,5	8,28	22,2	6,71	8,04	3,14	15,5	8,56
E-Het-a	16,0	n.q.	17,0	158	5,35	111	23,4	37,9	15,2	26,1	13,7	6,65	3,52	24,3	n.n.
E-Het-b	12,7	n.q.	n.n.	25,7	n.n.	20,8	3,21	2,66	2,41	13,7	2,05	1,49	n.n.	2,46	5,54
E-Het-c	12,4	n.q.	n.n.	n.n.	n.n.	3,13	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,39	0,23	n.n.	n.n.	n.n.
E-Het-d	8,48	n.q.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2,86	9,08	n.n.	n.n.	n.n.	0,40	n.n.	1,01
M-Wüs-a	21,0	n.n.	13,0	101	3,88	110	63,9	37,9	13,9	4,09	1,49	12,7	3,52	22,2	6,04
M-Wüs-b	11,1	n.n.	19,5	60,1	5,65	103	63,8	35,5	12,6	41,2	12,7	11,5	12,6	37,9	52,9
E-Wüs-a	12,3	n.n.	14,6	49,6	3,26	144	107	51,0	20,3	45,3	15,6	11,7	0,14	25,3	35,2
E-Wüs-b	11,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	25,2	10,2	15,6	4,98	15,1	4,47	6,84	0,60	6,38	1,01
E-Wüs-c	10,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	7,30	2,40	0,84	n.n.	n.n.	0,49	0,27	n.n.	n.n.	1,51
M-Döl-a	63,6	n.n.	n.n.	n.n.	58,8	518	364	72,2	82,1	40,7	91,5	193	12,7	161	11,1
M-Döl-b	17,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2,28	128	47,8	33,7	49,0	20,6	84,6	6,48	33,8	1,50
E-Döl-a	24,8	n.n.	n.n.	n.n.	6,73	338	13,6	133	93,7	148	74,7	141	15,9	123	n.n.
E-Döl-b	32,0	6,44	11,8	n.n.	29,8	426	53,1	291	237	298	155	344	41,5	265	n.n.
E-Döl-c	11,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2,11	51,4	2,09	n.n.	1,62	0,81	75,2	n.n.	n.n.	n.n.
E-Döl-d	11,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	36,2	2,99	1,61	2,17	0,37	0,10	0,13	n.n.	2,00
M-Meu-a	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	181	161	63,0	31,8	65,2	23,9	27,6	5,43	38,8	1,51
M-Meu-b	15,9	n.n.	n.n.	135	8,18	124	95,5	42,6	19,8	45,7	16,0	17,1	1,05	24,7	9,06
E-Meu-a	10,2	n.n.	n.n.	864	22,0	237	319	74,8	39,5	80,4	29,6	51,6	7,77	44,2	15,6
E-Meu-b	11,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,21	2,01	4,40	1,86	13,8	0,13	n.n.	1,01
E-Meu-c	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,35	n.n.	0,11	n.n.	4,03
M-Bur-a	n.n.	6,50	n.n.	n.n.	n.n.	119	42,3	41,7	19,2	41,6	16,2	22,4	0,39	22,0	2,52
M-Bur-b	63,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	30,8	19,8	14,6	6,45	16,4	5,97	11,2	n.n.	8,34	1,01
E-Bur-a	14,3	7,30	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	4,28	n.n.	1,66	79,4	28,8	32,2	5,58	38,1	5,03
E-Bur-b	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	18,5	14,7	31,7	n.n.	3,23	1,20	9,09	n.n.	n.n.	2,01
E-Bur-c	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,49	n.n.	1,01
E-Bur-d	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	4,14	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2,01

A-9: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) im Boden nach EPA 610 (ohne Acenaphtylen)

Standorte Einheit	PAK 1 µg/kg	PAK 2 µg/kg	PAK 3 µg/kg	PAK 4 µg/kg	PAK 5 µg/kg	PAK 6 µg/kg	PAK 7 µg/kg	PAK 8 µg/kg	PAK 9 µg/kg	PAK 10 µg/kg	PAK 11 µg/kg	PAK 12 µg/kg	PAK 13 µg/kg	PAK 14 µg/kg	PAK 15 µg/kg
Spe-W	12,8	130	15,7	81,3	40,4	222	179	94,8	72,4	97,3	41,7	82,1	11,5	69,0	6,54
Sch-W	n.n.	53,3	n.q.	63,6	5,50	218	128	54,0	114,4	82,0	29,8	38,0	6,60	36,8	39,0
Etz-W	n.n.	44,5	n.n.	43,0	4,88	63,0	41,8	31,7	15,4	30,5	11,1	11,9	n.n.	18,0	1,01
Het-W	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wüs-W	8,53	71,0	16,2	106	12,9	141	116	50,8	28,3	54,4	21,4	26,2	0,18	32,2	1,01
Döl-W	n.n.	607	61,4	778	253	1440	2180	452	409	510	230	543	23,8	567	0,50
Meu-W	9,75	58,5	n.n.	28,1	n.n.	147	112	59,6	33,7	78,8	26,7	24,6	50,7	49,2	2,01
Bur-W	n.n.	n.n.	n.n.	78,9	3,92	115	66,4	36,7	14,2	40,9	13,6	3,00	n.n.	24,1	2,52

A-10: Polychlorierte Biphenyle (PCBs) im Boden

< = unter der Nachweisgrenze; n.b. = nicht bestimmt; n.q. = nicht quantifizierbar

Standorte Einheit	PCB28 µg/kg	PCB52 µg/kg	PCB101 µg/kg	PCB138 µg/kg	PCB153 µg/kg	PCB180 µg/kg
M-Leu-a	3,20	< 0,1	< 0,1	4,60	2,70	< 0,1
M-Leu-b	0,20	< 0,1	0,50	1,60	1,10	0,60
E-Leu-a	0,30	0,20	0,60	1,60	1,60	0,60
E-Leu-b	0,20	0,10	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
E-Leu-c	0,30	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
E-Leu-d	0,40	0,40	0,50	0,50	0,40	< 0,1
M-Spe-a	0,30	0,30	0,60	1,00	1,20	0,80
M-Spe-b	0,40	0,20	0,30	0,90	0,80	< 0,1
E-Spe-a	< 0,1	< 0,1	0,30	0,70	1,20	< 0,1
E-Spe-b	0,30	0,30	0,50	1,10	0,60	1,60
E-Spe-c	0,30	3,00	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
M-Sch-a	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
M-Sch-b	2,10	< 0,1	0,60	1,10	0,90	0,70
E-Sch-a	0,70	0,20	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
E-Sch-b	0,30	0,50	0,50	1,00	1,10	0,70
M-Etz-a	0,40	0,20	< 0,1	0,70	0,80	< 0,1
M-Etz-b	1,50	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
E-Etz-a	1,70	1,00	< 0,1	0,60	0,50	< 0,1
E-Etz-b	0,70	< 0,1	0,10	< 0,1	< 0,1	< 0,1
E-Etz-c	1,00	0,50	0,90	1,70	2,10	1,90
M-Alt-a	1,00	0,20	0,50	< 0,1	< 0,1	< 0,1
M-Alt-b	1,10	10,7	0,30	< 0,1	< 0,1	< 0,1
E-Alt-a	0,90	0,20	0,40	0,60	0,50	< 0,1
E-Alt-b	0,20	0,20	< 0,1	0,30	0,30	4,90
E-Alt-c	0,30	0,40	< 0,1	0,40	0,40	< 0,1
M-Gün-a	0,80	0,30	0,50	0,80	0,70	< 0,1
M-Gün-b	0,20	0,20	0,40	0,70	0,70	0,70
E-Gün-a	0,20	0,30	0,40	0,60	0,50	< 0,1
E-Gün-b	0,50	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40
E-Gün-c	0,30	0,20	0,20	0,40	0,10	< 0,1
M-Grä-a	0,40	0,30	0,20	0,20	0,30	0,40
M-Grä-b	0,70	0,20	0,20	0,30	0,40	0,20
E-Grä-a	0,30	0,40	0,50	1,00	0,90	0,90
E-Grä-b	0,60	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40
M-Zsc-a	0,90	0,50	0,60	1,20	0,80	1,40
M-Zsc-b	1,40	0,20	0,50	1,00	0,80	1,00
E-Zsc-a	1,40	0,20	0,40	0,70	0,70	0,30
E-Zsc-b	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50	0,70
E-Zsc-c	0,40	0,30	0,40	0,70	0,40	1,40
M-Eis-a	0,30	< 0,1	0,70	0,60	0,70	n.q.
M-Het-a	0,10	< 0,1	1,10	0,40	0,40	< 0,1
M-Wüs-a	0,20	< 0,1	1,10	0,40	0,30	< 0,1
M-Döl-a	< 0,1	< 0,1	0,80	0,60	0,50	< 0,1
M-Meu-a	< 0,1	< 0,1	1,00	0,40	0,40	< 0,1
M-Bur-a	n.q.	< 0,1	n.q.	0,50	0,40	< 0,1
Spe-W	0,80	0,20	0,70	1,80	1,60	1,60
Sch-W	1,30	0,50	1,00	2,20	2,10	2,10
Etz-W	1,20	0,30	0,50	0,80	1,20	1,10

A-11: Phenole nach EPA 604, sowie Dioxine und Furane in den Böden

n.n. = nicht nachweisbar

Standorte Einheit	M-Leu-a ng/g	M-Sch-a ng/g	M-Eis-a ng/g	M-Het-a ng/g	M-Wüs-a ng/g	M-Döl-a ng/g	M-Meu-a ng/g	M-Bur-a ng/g
Phenol	28,1	4,25	21,8	1,70	31,2	32,3	10,2	39,0
2-Chlorphenol	1,96	n.n.	n.n.	0,01	n.n.	n.n.	n.n.	0,88
2-Nitrophenol	2,87	n.n.	n.n.	n.n.	1,27	n.n.	n.n.	n.n.
2,4-Dimethylphenol	68,0	n.n.	n.n.	n.n.	0,23	n.n.	n.n.	n.n.
2,4-Dichlorphenol	9,32	0,15	0,15	0,02	3,01	0,17	0,09	1,86
4-Chlor-3-methylphenol	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
2,4,6-Trichlorphenol	26,1	n.n.	n.n.	n.n.	1,72	n.n.	n.n.	0,38
2,4-Dinitrophenol	3,78	1,07	4,39	0,06	1,64	7,74	0,42	3,25
4-Nitrophenol	n.n.	2,67	n.n.	0,05	0,46	n.n.	n.n.	n.n.
2-Methyl-4,6-dinitrophenol	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Pentachlorphenol	447	n.n.	n.n.	n.n.	24,5	n.n.	n.n.	2,98

Standorte Einheit	M-Leu-a ng/kg	M-Leu-a ngiTE/kg	M-Sch-a ng/kg	M-Sch-a ngiTE/kg	M-Wüs-a ng/kg	M-Wüs-a ngiTE/kg	M-Bur-a ng/kg	M-Bur-a ngiTE/kg
Σ PCDD/PCDF	4,10	0,06	54,3	0,16	4,10	0,08	44,5	0,45

A-12: Ergebnisse der HCH, DDT, PCB und HCB Messungen an den Oberböden der Rasterbeprobungen und an den Weizenböden

n.n. = nicht nachweisbar

Standorte Einheit	M-Alt-a µg/kg	M-Gün-a µg/kg	M-Grä-a µg/kg	M-Zsc-a µg/kg	M-Eis-a µg/kg	M-Het-a µg/kg	M-Wüs-a µg/kg	M-Döl-a µg/kg	M-Meu-a µg/kg	M-Bur-a µg/kg
α- HCH	0,29	0,44	0,34	0,33	n.n.	0,34	n.n.	0,22	0,46	2,55
β- HCH	5,28	3,14	2,59	3,64	0,91	1,90	2,49	1,70	3,05	3,69
γ- HCH	3,13	2,43	1,54	5,60	3,59	2,37	2,14	2,70	5,23	2,52
δ- HCH	1,28	0,78	0,78	1,97	0,10	0,61	0,94	0,64	1,26	0,73
Summe	9,98	6,79	5,25	11,5	4,60	5,22	5,57	5,26	10,0	9,49
PCB-28	0,36	0,11	0,17	0,20	0,07	0,07	0,16	0,11	0,07	0,67
PCB-52	0,14	0,24	0,12	0,34	0,09	0,12	0,17	0,11	0,14	0,23
PCB-101	0,29	0,29	0,13	0,25	0,12	0,76	0,66	0,27	1,02	0,20
PCB-138	0,64	0,66	0,31	0,64	0,33	0,32	0,30	0,36	0,29	0,44
PCB-153	0,51	0,56	0,24	0,58	0,24	0,30	0,29	0,35	0,27	0,36
PCB-180	0,18	0,27	n.n.	0,23	0,10	0,14	0,11	0,13	0,12	0,15
Summe	2,12	2,13	0,97	2,24	0,95	1,71	1,69	1,33	1,91	2,05
p,p'-DDT	14,7	65,6	25,9	87,1	40,6	69,8	14,0	20,9	13,7	38,1
p,p'-DDE	10,6	n.n.	17,0	56,7	18,4	2,80	25,4	24,6	8,62	25,1
p,p'-DDD	2,69	5,59	2,91	15,9	11,7	1,01	1,41	1,57	1,45	2,16
Summe	27,9	71,1	45,8	160	70,6	73,7	40,8	47,1	23,7	65,3
HCB	1,04	0,57	0,76	2,40	0,85	0,70	3,75	1,16	2,31	2,46

Standorte Einheit	Spe-W µg/kg	Sch-W µg/kg	Etz-W µg/kg	Het-W µg/kg	Wüs-W µg/kg	Döl-W µg/kg	Meu-W µg/kg	Bur-W µg/kg
α- HCH	0,25	n.n.	n.n.	0,22	0,20	0,40	1,26	3,62
β- HCH	2,81	1,58	1,06	1,56	0,51	7,82	0,99	4,82
γ- HCH	2,83	n.n.	0,89	1,71	3,52	4,20	1,31	2,67
δ- HCH	0,77	n.n.	0,10	0,63	1,32	1,70	0,43	n.n.
Summe	6,66	1,58	2,05	4,12	5,55	14,1	3,99	11,1
PCB-28	0,24	n.n.	0,14	0,10	0,24	0,14	0,09	0,11
PCB-52	0,30	0,13	0,09	0,12	0,28	0,18	0,06	0,09
PCB-101	0,55	0,25	0,11	0,21	1,29	2,95	0,18	0,17
PCB-138	1,76	0,50	0,22	0,36	2,75	7,55	0,27	0,26
PCB-153	1,37	0,45	0,20	0,29	2,17	9,09	0,22	0,22
PCB-180	0,57	0,28	n.n.	0,14	1,37	5,17	0,11	0,11
Summe	4,79	1,61	0,76	1,22	8,10	25,1	0,93	0,96
p,p'-DDT	9,21	78,6	7,71	4,39	48,0	8,70	8,32	14,4
p,p'-DDE	16,7	132	12,4	2,86	116	6,69	4,87	15,0
p,p'-DDD	6,13	2,10	2,50	0,29	10,4	1,17	2,42	12,0
Summe	32,0	213	22,6	7,54	174	16,6	15,6	41,3
HCB	1,12	3,50	0,43	0,83	1,48	0,91	0,48	2,39

A-13: *Organische Schadstoffe im Weizen (HCHs, DDTs, PCBs, HCB und PAKs)*

n.n. = nicht nachweisbar; n.b. = nicht bestimmt

Standorte Einheit	Sch-Ähre µg/kg	Sch-Blatt µg/kg	Sch-Stengel µg/kg	Sch-Wurzel µg/kg	Het-Ähre µg/kg	Het-Blatt µg/kg	Het-Stengel µg/kg	Het-Wurzel µg/kg	Wüs-Ähre µg/kg	Wüs-Blatt µg/kg
α- HCH	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	10,6	8,06	29,5	n.n.	n.n.
β- HCH	n.n.	n.n.	n.n.	2,20	1,24	6,54	14,5	13,0	n.n.	0,45
γ- HCH	n.n.	n.n.	n.n.	10,1	n.n.	n.n.	18,0	49,7	n.n.	n.n.
δ- HCH	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	12,6	11,3	0,29	n.n.
Summe				12,3	1,24	17,2	53,2	104	0,29	0,45
Phenanthren	1,10	16,5	7,12	29,6	13,1	49,0	46,9	51,3	2,51	17,3
Anthracen	0,13	0,43	0,24	2,44	0,61	5,41	1,40	5,83	0,05	0,20
Fluoranthren	0,86	15,2	4,08	39,3	1,97	21,1	16,2	26,0	0,59	8,23
Pyren	0,39	4,02	1,46	12,3	1,02	8,59	5,60	9,17	0,30	5,20
Benzo(a)pyren	0,12	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1,55	n.n.	n.n.
Summe	2,60	36,1	12,9	83,6	16,7	84,1	70,2	93,9	3,45	31,0
PCB-28	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,31	0,59	1,93	n.n.	n.n.
PCB-52	0,24	0,69	0,37	1,35	2,20	12,5	0,95	0,67	n.n.	n.n.
PCB-101	5,22	0,95	6,57	10,5	8,30	4,87	0,36	0,33	1,71	n.n.
PCB-138	0,23	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	3,47	0,25	n.n.	n.n.
PCB-153	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,09	n.n.	0,49	0,47	n.n.	n.n.
PCB-180	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2,01	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	5,69	1,64	6,94	11,9	10,6	19,7	5,86	3,65	1,71	
p,p'-DDT	n.n.	n.n.	0,72	56,6	1,01	2,27	3,24	15,5	n.n.	n.n.
p,p'-DDE	0,19	3,84	0,35	175	0,20	1,17	n.n.	3,50	n.n.	1,40
p,p'-DDD	n.n.	1,24	n.n.	15,2	10,1	n.n.	4,95	9,93	0,17	n.n.
Summe	0,19	5,08	1,07	247	11,3	3,44	8,19	28,9	0,17	1,40
HCB	n.n.	n.n.	0,30	0,55	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

A-13: *Organische Schadstoffe im Weizen (HCHs, DDTs, PCBs, HCB und PAKs)*

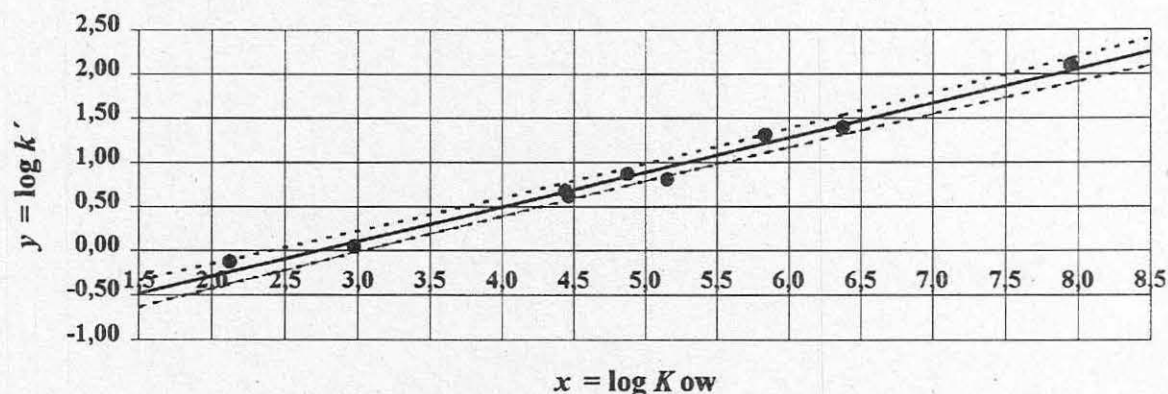
n.n. = nicht nachweisbar; n.b. = nicht bestimmt

Standorte Einheit	Wüs-Stengel µg/kg	Wüs-Wurzel µg/kg	Döl-Ähre µg/kg	Döl-Blatt µg/kg	Döl-Stengel µg/kg	Döl-Wurzel µg/kg	Bur-Ähre µg/kg	Bur-Blatt µg/kg	Bur-Stengel µg/kg	Bur-Wurzel µg/kg
α- HCH	n.n.	0,67	n.b.	2,06	22,7	2,25	n.n.	n.n.	1,25	n.n.
β- HCH	2,73	2,31	n.b.	5,17	6,96	4,58	n.n.	n.n.	4,81	7,59
γ- HCH	11,6	3,91	n.b.	n.n.	5,90	6,64	n.n.	n.n.	4,89	n.n.
δ- HCH	1,23	0,74	n.b.	n.n.	1,63	7,27	n.n.	n.n.	3,29	n.n.
Summe	15,5	7,63		7,23	37,1	20,7			14,2	7,59
Phenanthren	13,9	11,1	n.b.	27,0	25,6	29,4	7,68	1,21	47,8	37,9
Anthracen	0,41	0,65	n.b.	0,19	1,04	0,53	n.n.	0,74	4,48	0,57
Fluoranthen	27,9	6,30	n.b.	8,19	4,02	46,3	1,61	2,09	13,7	26,7
Pyren	2,26	2,25	n.b.	4,59	4,89	24,7	0,54	0,89	4,30	4,92
Benzo(a)pyren	0,42	n.n.	n.b.	n.n.	n.n.	17,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	44,8	20,3		40,0	35,5	118	9,83	4,93	70,3	70,1
PCB-28	n.n.	0,16	n.b.	0,40	0,82	0,77	n.n.	n.n.	0,73	n.n.
PCB-52	1,71	n.n.	n.b.	n.n.	2,65	0,60	0,58	0,99	0,82	0,84
PCB-101	2,79	1,69	n.b.	n.n.	n.n.	3,38	0,09	n.n.	1,32	0,37
PCB-138	n.n.	n.n.	n.b.	1,36	1,26	0,98	0,21	n.n.	0,52	0,39
PCB-153	n.n.	n.n.	n.b.	n.n.	1,17	0,51	n.n.	1,16	0,96	4,59
PCB-180	n.n.	n.n.	n.b.	n.n.	n.n.	0,85	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	4,50	1,85		1,76	5,90	7,09	0,88	2,15	4,35	6,19
p,p'-DDT	n.n.	7,63	n.b.	8,17	1,30	3,88	0,08	0,11	0,51	5,51
p,p'-DDE	0,18	15,4	n.b.	0,56	3,43	2,84	n.n.	n.n.	n.n.	6,87
p,p'-DDD	n.n.	2,94	n.b.	n.n.	33,2	29,3	n.n.	n.n.	n.n.	3,78
Summe	0,18	26,0		8,73	37,9	36,0	0,08	0,11	0,51	16,2
HCB	n.n.	0,26	n.b.	n.n.	n.n.	0,46	n.n.	0,33	0,41	2,50

A-14: Ergebnisse der K_{ow} -Untersuchungen

Vertrauensintervall (bei $\alpha = 0,05$) um die
Kalibriergerade

$$y = 0,3909 x - 1,0679 \text{ (mit } r = 0,993 ; s_R = 0,079)$$



Tabellarische Zusammenstellung der Retentionsdaten und der K_{ow} -Werte von Referenz- und Testsubstanzen

Referenzsubstanzen	MW (t_R)**/[min]	MW ($\log k'$)**	$\log K_{ow}$	K_{ow} -Referenz
Formamid*	0,77			
Benzol	1,34	-0,128	2,13	MedChem 96 database
Chlorbenzol	1,63	0,048	2,98	Paschke et al. (1997)
Phenanthren	3,97	0,619	4,47	MedChem 96 database
Anthracen	4,43	0,677	4,45	MedChem 96 database
Fluoranthen	5,68	0,805	5,16	Paschke et al. (1997)
Pyren	6,44	0,867	4,88	MedChem 96 database
Hexachlorbenzol	16,26	1,304	5,84	Paschke et al. (1997)
TCBT 25	19,63	1,389	6,38	Paschke et al. (1997)
PCB 209	97,99	2,101	7,95	Paschke et al. (1997)
Testsubstanzen	MW (t_R)**/[min]	MW ($\log k'$)**	$\log K_{ow}$	$D \log K_{ow}$ in %***
Naphthalin	2,13	0,246	3,36	8,5
Acenaphthen	3,50	0,549	4,14	6,3
Benzo(a)anthracen	9,99	1,078	5,49	4,7
Chrysen	9,98	1,078	5,49	4,7
Benzo(e)pyren	15,27	1,275	5,99	4,5
Benzo(a)pyren	18,99	1,374	6,25	4,4
Benzo(a,h)anthracen	27,16	1,535	6,66	4,4
Benzo(g,h,i)perylene	29,85	1,577	6,77	4,4
PCB 52	6,63	0,881	4,99	5,1
PCB 101	11,94	1,162	5,70	4,6
PCB 138	16,49	1,31	6,08	4,5
PCB 153	20,22	1,402	6,32	4,4
p,p'-DDT	6,81	0,895	5,02	5,1

* t_R (Formamid) = t_0 ; benötigt für die Berechnung von $k' = (t_R - t_0)/t_0$

** Mittelwert aus 3 Messungen

*** Vertrauensintervall (bei Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha=0,05$) nach N.R.Draper and H.Smith: Applied Regression Analysis (2nd Edn.), pp.47-51, Wiley, New York/USA, 1981.

Sektion Chemische Okotoxikologie
UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
Telefon 0341/235-2309
Telefax 0341/235-2401