

**Untersuchung und Bewertung  
geogener und anthropogener Bodenschwermetallanreicherungen  
als Basis einer geökologischen Umweltanalyse  
im Raum Eisleben-Hettstedt**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
(mathematisch-naturwissenschaftlicher Bereich)  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Herrn Thomas Oertel  
geb. am: 04. Juni 1969 in Lutherstadt Eisleben

Gutachter:

1. Prof. Dr. M. Frühauf (Universität Halle)
2. Prof. Dr. H. Neumeister (Universität Leipzig)
3. Prof. Dr. H.-P. Harres (PD Darmstadt)

Tag der Verteidigung: 30.01.2003

**urn:nbn:de:gbv:3-000005752**

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000005752>]

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit zum Thema: „Untersuchung und Bewertung geogener und anthropogener Bodenschwermetallanreicherungen als Basis einer geoökologischen Umweltanalyse im Raum Eisleben-Hettstedt“ wurde im Zeitraum vom 01.10.1996-31.03.1999 durch ein Graduiertenstipendium des Landes Sachsen-Anhalt unterstützt. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Besonders danken möchte ich dem Initiator und Betreuer meiner Arbeit, Herrn Prof. Dr. M. Frühauf, für seine fachlichen Hinweise und Ideen zur Themenstellung sowie für Geduld und Verständnis hinsichtlich der Fertigstellung der Dissertation.

Danken möchte ich auch den halleschen Kollegen Dr. Martin Sauerwein, Dr. Gerd Schmidt, Dr. Ulrike Hardenbicker, Dr. Michael Zierdt und Heike Püttmann für anregende Diskussionen und sachdienliche Hinweise bei der Lösung organisatorischer und technischer Probleme.

Für die Messungen am AAS danke ich Frau Kurze und für Arbeiten im geoökologischen Labor Frau Schulz. Besonders herzlich bedanken möchte ich mich beim Piloten Herrn Kroßner, der mich immer wieder sicher zum Boden zurückbrachte und bei Frau Meise, die wesentlich zum Gelingen der zahlreichen Luftbilder beigetragen hat.

Für geschichtliche und geologische Fragestellungen war Herr Dr. Jankowski stets ein sachkundiger Gesprächspartner. Herrn Gutteck, Herrn Bergmann, Herrn Albrecht und Herrn Thiede vom Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt danke ich für einen unkomplizierten Zugang zu Kartengrundlagen und Daten.

Den Arbeitskollegen in Gera, vor allem Herrn Kepke, danke ich für freie Stunden, die es mir ermöglichten, die Arbeit zu vollenden.

Meinen Eltern und meinem Bruder Frank möchte ich für Rat und Tat sowie für materielle und maschinelle Unterstützung bei der Durchführung der Feldversuche danken. Den größten Dank schulde ich meiner Frau Yvonne, die sehr viel Verständnis für die zeitaufwendigen Feld-, Labor- und Computertätigkeiten aufbrachte und mich stets aufmunternd unterstützte.

Gera, im Oktober 2002

Thomas Oertel

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Kartenverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>1 Problemstellung und Zielsetzungen</b>	<b>1</b>
<b>2 Umweltveränderungen in Bergbauregionen</b>	<b>2</b>
2.1 Veränderungen der Landschaftsmorphologie	4
2.2 Änderungen des Wasserhaushaltes	5
2.3 Veränderungen des Stoffhaushaltes durch die Bergbautätigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetalle	5
2.3.1 Schwermetalle und Böden	6
2.3.2 Schwermetalle im System Boden - Pflanze	8
2.3.3 Gesundheitsschäden durch Schwermetalle, Grenzwerte, Sanierungsvorschläge	11
<b>3 Einführung in die Untersuchungsgebiete</b>	<b>14</b>
3.1 Lage und naturräumliche Ausstattung	14
3.1.1 Geomorphologie und Geologie	15
3.1.2 Böden	19
3.1.3 Klimatologie und Geohydrologie	21
3.1.4 Vegetation und Flächennutzung	22
3.2 Die Kupferschiefergewinnung im Mansfelder Land und daraus resultierende Umweltfolgen	24
3.2.1 Entwicklungsgeschichte des Bergbaus	24
3.2.2 Direkte und indirekte Umweltfolgen der Kupfergewinnung	26
3.3 Kenntnisstand über Boden- und Pflanzenbelastungen durch Schwermetalle infolge der Erzgewinnung und -verarbeitung im Mansfelder Land	27
3.3.1 Ausgewählte Ergebnisse von nach 1990 erstellten Umweltgutachten	27
3.3.2 Ergebnisse weiterer Untersuchungen zur Schwermetallproblematik der Böden	28
<b>4 Untersuchungsmethoden</b>	<b>30</b>
4.1 Auswahl der Untersuchungsstandorte	30
4.1.1 Datenauswertung zu Bodenschwermetallbelastungen in den Untersuchungsgebieten	30
4.1.2 Kartenauswertung und Fernerkundung	32
4.2 Lage der Beprobungs- und Versuchsstandorte in den Untersuchungsgebieten	32
4.3 Geländemethoden	35
4.3.1 Bodenuntersuchungen	35
4.3.1.1 Beprobungen der Oberböden	35
4.3.1.2 Aufnahme von Bodenprofilen	36
4.3.1.3 Anlage einer Bodencatena	36
4.3.2 Pflanzen- und Feldversuche	36
4.3.2.1 Wachstumsversuche auf Böden mit unterschiedlicher Schwermetallkonzentration	36
4.3.2.2 Feldversuch der Vergrabung verschiedener Materialien	38
4.3.2.3 Teilsanierung eines Bodenstandortes mit Vegetationsschäden	38

<b>4.4</b>	<b>Labormethoden</b>	<b>38</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Schwermetallanalyse</b>	<b>38</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Analyse der Bodenparameter</b>	<b>39</b>
<b>4.5</b>	<b>Fehlerdiskussion</b>	<b>39</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Methodische Fehler und Spezifika bei der Probenahme</b>	<b>39</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Analysefehler</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisdiskussion</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Ursachen der Schwermetallbelastung der Böden</b>	<b>41</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Der Kupferschieferausstrich als geogene Quelle</b>	<b>41</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Haldenvergrabungen als anthropogene Quelle</b>	<b>50</b>
<b>5.1.2.1</b>	<b>Schwermetalle im Oberboden von Standorten mit und ohne Vegetationsschäden</b>	<b>52</b>
<b>5.1.2.2</b>	<b>Abschätzung der flächenhaften Verbreitung von Vergrabungsstrukturen</b>	<b>54</b>
<b>5.1.2.3</b>	<b>Schwermetallgehalte von Profilstandorten in der Flur Hergisdorf</b>	<b>59</b>
<b>5.1.2.4</b>	<b>Schwermetallgehalte von Profilstandorten in der Flur Ahlsdorf</b>	<b>61</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Schwermetallbelastungen durch Kupferschiefer- und Schlackehalden</b>	<b>64</b>
<b>5.1.3.1</b>	<b>Schwermetallgehalte von Profilstandorten in der Flur Hettstedt</b>	<b>66</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Boden- und Pflanzenschwermetallbelastungen durch die Verhüttung</b>	<b>67</b>
<b>5.2</b>	<b>Schwermetallbelastungen von Oberbodenproben verschiedener Probenotypen</b>	<b>69</b>
<b>5.3</b>	<b>Einfluss der Schwermetallgehalte der Böden auf Kulturpflanzen</b>	<b>71</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Vergleich von Schwermetallgehalten in Böden mit denen in Pflanzen</b>	<b>71</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Vegetationsmuster über einer Haldenvergrabung und einem Vergleichsstandort</b>	<b>74</b>
<b>5.3.2.1</b>	<b>Schwermetalle in Nutzpflanzen auf Ackerstandorten</b>	<b>75</b>
<b>5.3.2.2</b>	<b>Schwermetallgehalte von Getreidekörnern ausgewählter Sorten</b>	<b>76</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Wachstumsversuche mit Gemüsepflanzen auf unterschiedlich belasteten Böden des Untersuchungsgebietes 1</b>	<b>76</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Wachstumsversuche Gemüsepflanzen auf schwermetallhaltigen und unbelasteten Substraten</b>	<b>78</b>
<b>5.3.5</b>	<b>Wachstum und Schwermetallgehalte von Winterweizen auf Substraten mit und ohne Schwermetallbelastung (Vergrabungsversuche)</b>	<b>79</b>
<b>5.3.6</b>	<b>Pflanzenverhalten nach der Teilsanierung eines Bodenstandortes mit Vegetationsschäden</b>	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>Abschätzung zukünftiger Gefahren für die Böden im Mansfelder Land</b>	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>Handlungsbezug zur Bodenschätzung</b>	<b>84</b>
<b>7.1</b>	<b>Grundlagen der Reichsbodenschätzung</b>	<b>84</b>
<b>7.2</b>	<b>Abweichungen von der Reichsbodenschätzung im Untersuchungsgebiet 1</b>	<b>84</b>
<b>7.3</b>	<b>Ermittlung der aktuellen Erträge im UG 1 auf Ackerflächen bei Benndorf sowie Lösungsvorschläge für eine Neubewertung der Bodenstandorte</b>	<b>86</b>
<b>8</b>	<b>Anforderungen des Bundesbodenschutzgesetzes sowie Vorschläge für künftige standortgerechte Bodennutzungen</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>91</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>93</b>
<b>11</b>	<b>Quellen</b>	<b>103</b>
<b>12</b>	<b>Karten und Luftbilder</b>	<b>103</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b>	<b>104</b>

## Kartenverzeichnis

Karte 1: Lage der Untersuchungsgebiete .....	14
Karte 2: Geologisch-montanhistorische Karte der Untersuchungsgebiete .....	18
Karte 3: Bodenverhältnisse der Untersuchungsgebiete nach der MMK.....	20
Karte 4: Flächennutzung der Untersuchungsgebiete .....	23
Karte 5: Blei-, Kupfer- und Zinkbelastung von Oberböden im UG 1 .....	31
Karte 6: Proben- und Untersuchungsstandorte im südlichen Teil des UG 1 und im UG 2 .....	33
Karte 7: Probenstandorte im nordwestlichen Teil (bei Mansfeld) und im nordöstlichen Teil (bei Hettstedt und Sandersleben) des UG 1.....	34
Karte 8: CIR-Luftbild westlich Ahlsdorf mit Verlauf des Kupferschieferausstrichs .....	41
Karte 9: Standorte der Oberbodenmischproben am Kupferschieferausstrich westlich von Kreisfeld .....	42
Karte 10: Kleinhaldenverbreitung nach den Gemarkungskarten von Benndorf (1856) und Klostermansfeld (1853) sowie nach der aktuellen Topographischen Karte TK 1:10.000.....	55
Karte 11: Verbreitungsareale der Kleinhalden und vergrabener Halden am Westrand der Mansfelder Mulde .....	58

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bergbau und Landnutzung (SENGUPTA 1993).....	3
Abb. 2: Einfluss von pH-Wert und organischen Komplexbildnern auf die Löslichkeit von Kupfer und Zink in einem belasteten Sandboden ( $\text{Cu}_t$ : $115 \text{ mg kg}^{-1}$ , $\text{Zn}_t$ : $123 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998) .....	9
Abb. 3: Schadstoffe im System Boden - Pflanze (ALLOWAY et AYRES 1996).....	10
Abb. 4: Geologisches Blockbild der Mansfelder und Sangerhäuser Mulde (WAGENBRETH et STEINER 1990, geändert FRÜHAUF 1999).....	15
Abb. 5: Kupferschieferausstrich am Schafberg in Ahlsdorf.....	16
Abb. 6: Förderung des Kupferschiefers im Tiefbau (JANKOWSKI 1995).....	24
Abb. 7: Kleinhaldenlandschaft bei Hergisdorf (Foto: Oertel 1997).....	25
Abb. 8: Spitzkegelhalde des Otto-Brosowski-Schachtes bei Gerbstedt (Foto: Oertel 1997) .....	25
Abb. 9: Profilschnitt durch die Mansfelder Mulde bei Ahlsdorf (nach VON HOYNINGEN in NEUß et ZÜHLKE 1982, geändert).....	35
Abb. 10: Profilschnitt durch den Nordrand der Halle-Hettstedter-Gebirgsbrücke bei Sandersleben .....	36
Abb. 11: Pflanzenversuch „Gartenpavillon“ .....	37
Abb. 12: Pflanzenversuch „Frühbeet Kleingarten“ .....	37
Abb. 13: Pflanzenversuch „Halde Ackergarten“.....	37
Abb. 14: Pflanzenversuch „geogene/atmogene Belastung“ .....	37
Abb. 15: Idealisertes geologisch-bodenkundliches Geländeprofil im Bereich des Zechsteinausstrichs am östlichen Harzrand (nach FRÜHAUF in LORENZ 1996).....	42
Abb. 16: Schwermetallgesamtgehalte von Oberbodenproben im Bereich des Kupferschieferausstrichs und Hintergrundstandorte in mg/kg Boden (nach Königswasseraufschluss).....	43
Abb. 17: Schwermetallgehalte von Oberbodenproben im Bereich des Kupferschieferausstrichs und der Standorte der Hintergrundwerte in mg/kg Boden (nach Ammoniumnitrat-aufschluss) .....	44
Abb. 18: Schiefermaterial im Oberboden und Vegetationsschäden bei Sandersleben (Foto: Oertel 1997) .....	45
Abb. 19: Bodencatena am Kupferschieferausstrich bei Sandersleben .....	46
Abb. 20: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile) .....	47
Abb. 21: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile) .....	48
Abb. 22: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile) .....	49
Abb. 23: Vegetationsdepressionen bei Benndorf (Foto: Oertel 1997).....	50
Abb. 24: Vegetationsausfall bei Benndorf (Foto: Oertel 1998).....	51
Abb. 25: Vegetationsschädigungen westlich von Hergisdorf und Kreisfeld (CIR-Luftbild 1993).....	51

Abb. 26: Technologie der Haldenvergrabungen und der späteren Exhumierung .....	54
Abb. 27: Flächenausmaß der Bodenschädigungen über einer Haldenvergrabung bei Benndorf.....	57
Abb. 28: Vegetationsdepressionen zur Ernte 2001 am „Haldenstück“ westlich von Hergisdorf.....	59
Abb. 29: Vergrabenes Schiefermaterial am Standort P-Hg_2.....	59
Abb. 30: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	59
Abb. 31: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	61
Abb. 32: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	61
Abb. 33: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	62
Abb. 34: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	63
Abb. 35: Kleinsthaldenlandschaft bei Hettstedt mit typischen Vegetationsschäden (Chlorosen) im Umfeld der Pingen .....	64
Abb. 36: Bodenprofil P-He_1 .....	65
Abb. 37: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	65
Abb. 38: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	66
Abb. 39: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	66
Abb. 40: Emissionsfahne der August-Bebel-Hütte Helbra, die sich über die Kleinhaldenlandschaft westlich von Benndorf und Klostermansfeld ausbreitet (panchromatisches Luftbild 1955) .....	67
Abb. 41: Schwermetallbelastung des Bodenprofils P-He_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	68
Abb. 42: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-LE_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile).....	69
Abb. 43: Mittelwerte der Schwermetallbelastung von Oberbodenproben verschiedener Probentypen.....	69
Abb. 44: Mittelwerte der Schwermetallbelastung von Oberbodenproben verschiedener Probentypen.....	70
Abb. 45: Einordnung von Quellen der Bodenschwermetallbelastung nach stofflicher Herkunft und anthropogenem Einfluss .....	70
Abb. 46: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Kl_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile) .....	72
Abb. 47: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Pö_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile) .....	73
Abb. 48: Papaver rhoeas-Vegetation über ehemaligen Haldenstandorten bei Ahlsdorf.....	74
Abb. 49: Ackerunkräuter über einer vergrabenen Halde .....	74
Abb. 50: Schwermetallgesamtgehalte in Gemüsepflanzen nach Versuchen auf unterschiedlich belasteten Böden des UG 1 (in mg/kg Trockensubstanz).....	77
Abb. 51: Schwermetallgesamtgehalte in Gemüsepflanzen nach Versuchen auf schwermetallhaltigen und unbelasteten Substraten (in mg/kg Trockensubstanz) .....	78
Abb. 52: Vegetationsentwicklung auf dem Versuchsstandort V-Hg_2.....	80
Abb. 53: Gesamtschwermetallbelastung und Bodenparameter des Bodenprofils P-Ad_6.....	81
Abb. 54: Halde des „Freieslebenschachtes“ bei Großörner (Foto: Oertel 1997).....	83
Abb. 55: Ausschnitt aus der aktuellen Flurkarte Flur 2 Hergisdorf mit Angaben zur Bodenschätzung .....	86

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Umweltauswirkungen durch Bergbau (nach YOUNG 1992) .....	2
Tab. 2: Mittlere geogene Grundgehalte (mg/kg) einiger Mikronährelemente und potentiell toxischer Elemente in Gesteinen und Hintergrundgehalte von Böden (A-Horizonte) aus unterschiedlichem Ausgangsgestein (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998) .....	7
Tab. 3: Schadstoffgehalte in landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden im Vergleich zu Böden mit spezifischer Stoffanreicherung (Angaben in mg/kg Boden) (KÖNIG 1990).....	8
Tab. 4: pH-Werte für die beginnende Mobilisierung verschiedener Metalle in Böden sowie häufige Bereiche für Transferfaktoren (BLUME 1992; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998) .....	10
Tab. 5: Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden (nach EIKMANN et KLOKE 1993) .....	12
Tab. 6: Vorsorgewerte für Metalle nach BBODSCHV (1999) in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Königswasseraufschluss .....	12
Tab. 7: Prüf- und Maßnahmenwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 und 2 des BBODSCHG (1998) für den Schadstoffübergang Boden – Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgärten im Hinblick auf die Pflanzenqualität in mg/kg Trockenmasse, Feinboden (BBODSCHV 1999) .....	13
Tab. 8: Metallisationsgürtel in der Mansfelder Mulde.....	17
Tab. 9: Quantitative Angaben zu Hauptmetallen und Spurenmetallen im Kupferschiefer (Auswahl) (nach JANKOWSKI 1995).....	17
Tab. 10: Substrattypen nach der MMK im Verlauf des Kupferschieferausstrichs im UG 1 (in km) .....	19
Tab. 11: Schwermetallgehalte von Oberbodenmischproben der Standorte mit Vegetationsschäden nach verschiedenen Aufschlüssen (in mg/kg Boden) .....	52
Tab. 12: Schwermetallgehalte von Oberbodenmischproben der Standorte ohne Vegetationsschäden nach verschiedenen Aufschlüssen (in mg/kg Boden) .....	52
Tab. 13: Gegenüberstellung der Schwermetallgehalte des Königswasseraufschlusses mit denen des Ammoniumnitraufschlusses eines anthropogen und eines geogen belasteten Bodens.....	68
Tab. 14: Vergleich von Königswasser- und Ammoniumnitraufschluss von Böden neben und auf vergrabenen Halden mit Schwermetallgehalten der darauf wachsenden Vegetation. ....	71
Tab. 15: Elementgehalte von Oberboden- und Pflanzenproben über einer vergrabenen Halde westlich von Klostermansfeld (P-Kl_1).....	72
Tab. 16: Elementgehalte von Boden- und Pflanzenproben über einer vergrabenen Halde bei Pölsfeld (nach verschiedenen Aufschlüssen).....	72
Tab. 17: Ackerunkräuter auf Standorten vergrabener Halden.....	74
Tab. 18: Schwermetalle in Nutzpflanzen auf Ackerstandorten.....	75
Tab. 19: Schwermetallgehalte von Getreidekörnern ausgewählter Sorten .....	76
Tab. 20: Wachstumsversuche mit Gemüsepflanzen auf unterschiedlich belasteten Böden des UG 1.....	76
Tab. 21: Wachstumsversuche Gemüsepflanzen auf schwermetallhaltigen und unbelasteten Substraten.....	78
Tab. 22: Wachstumsversuche von Winterweizen auf Substraten mit und ohne Schwermetallbelastung (Vergrabungsversuche).....	79
Tab. 23: Aufnahmevermögen von Obst und Gemüse aus dem Boden gegenüber Cadmium (LRA LUTHERSTADT EISLEBEN 1990) .....	82
Tab. 24: Standortspezifische Ertragsmittelwerte des Winterweizens in durch Haldenmaterial unbeeinflussten Ackerbereichen (Quelle: HERBERG 2001) .....	86
Tab. 25: Standortspezifische Ertragsmittelwerte und Flächenanteile in beeinflussten Ackerbereichen (Quelle: HERBERG 2001) .....	87
Tab. 26: Pachtdifferenzen infolge Neubewertung der Böden (HERBERG 2001) .....	87
Tab. 27: Kennzeichnung und Bewertung der Schadensklassen (HERBERG 2001) .....	87
Tab. 28: Abrechnungen von der Bodenzahl je Schadensklasse (OBERFINANZDIREKTION MAGDEBURG 2001) .....	88

## Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atomadsorptionsspektrometer	LAU	Landesamt für Umweltschutz
Abb.	Abbildung	LÖLF	Landesanstalt für Ökologie, Landschafts- entwicklung und Forstwirtschaft
Abb. A	Abbildung Anhang	LRA	Landratsamt
ACUB	Agrochemischer Untersuchungs- und Bera- tungsdienst der DDR	MMK	Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortkartierung
Arge	Arbeitsgemeinschaft	n. b.	nicht bestimmt
ATKIS	Amtliches topographisches Karten- informationssystem	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Ammoniumnitrat
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz	n. n.	nicht nachweisbar
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung	NN	Normal Null
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung	NO	Nordost
CIR	Color-Infrarot	o. S.	organische Substanz
DOC	dissolved organic carbon	RSA	relative Standardabweichung
EOF	Erdoberfläche	RW	Rechtswert
GFE	Geologische Forschung und Erkundung	Skel.	Skelettanteil
GIS	Geographisches Informationssystem	SW	Südwest
GPS	Global Positioning System	Tab.	Tabelle
HW	Hochwert	Tab. A	Tabelle Anhang
IPE JENA	Institut für Pflanzenernährung und Ökotoxikologie	Tr. S.	Trockensubstanz
KatBo	Kataster großräumiger Bodenkontamination	UG	Untersuchungsgebiet
Karte A	Karte Anhang	ZEBS	Zentrale Erfassungs- und Bewertungs- stelle des Bundesgesundheitsamtes
KW	Königswasser		

### Abkürzungen für Proben- und Untersuchungsstandorte

A	Standorte mit atmogener Belastung
H1	Standort 1 Hintergrundwert laut Sondergutachten LAU
H2	Standort 2 Hintergrundwert laut Sondergutachten LAU
HG	Standorte der Hintergrundwerte
K	Standorte am Kupferschieferausstrich
P	Standorte der Bodenprofile
V	Standorte von Versuchen
VoS	Standorte Vegetation ohne Schäden
VS	Standorte Vegetation mit Schäden

### Abkürzungen für Städte, Gemeinden und Ortsteile in den Untersuchungsgebieten

Ad	Gemeinde Ahlsdorf	Kl	Gemeinde Klostermansfeld
Be	Gemeinde Benndorf	Kr	Ortsteil Kreisfeld
Bl	Gemeinde Blankenheim	Pö	Gemeinde Pölsfeld
LE	Lutherstadt Eisleben	Sa	Stadt Sandersleben
Gö	Gemeinde Großömer	Wi	Gemeinde Wimmelburg
Hb	Gemeinde Helbra	Wo	Gemeinde Wolferode
He	Stadt Hettstedt	Zg	Ortsteil Ziegelrode
Hg	Gemeinde Hergisdorf		

## 1 Problemstellung und Zielsetzungen

Die Erschließung und Ausbeutung von Rohstoffen durch den Bergbau zählen zu den ältesten Wirtschaftsformen der Menschheit (HOHL et al. 1981). Der Rohstoffabbau hat grundlegende ökonomische Bedeutung und zieht negative Folgen, wie Veränderungen der Landschaft, des Stoff- sowie Wasserhaushaltes und hierbei insbesondere Belastungen der umgebenden Böden nach sich.

Im Mansfelder Land hinterließ, der seit dem Ende des 12. Jahrhunderts betriebene Abbau von Kupferschiefer und dessen Verhüttung, eine Vielzahl von Umweltproblemen (FRÜHAUF 1999). Neben der Ablagerung von Abraum- und Schlackehalden verschiedener Art, Größe und Zusammensetzung kam es bis 1990 besonders durch schwermetallhaltige Emissionen aus der industriellen Verhüttung und Verarbeitung des Kupfers zu einer starken Belastung der Böden und Pflanzen im Umfeld der Hüttenstandorte.

Diese waren nach der Wende Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991; IPE JENA 1991; Noell 1993 etc.). Trotz der dabei erzielten umfangreichen Ergebnisse zu den Ursachen und Formen der Bodenbelastung am östlichen Harzrand, an denen auch der Lehrstuhl Geoökologie des Instituts für Geographie an der Martin-Luther-Universität durch mehrere Diplomarbeiten (u. a. CÖSTER 1993; KLINGER 1996; LORENZ 1996; SCHWABE 1995) und zwei Dissertationen (SCHMIDT 1997; ZIERDT 1991) beteiligt war, zeigen sich sowohl hinsichtlich der Ursachen als auch bezüglich des realen Gefährdungspotentials teilweise beträchtliche Meinungsunterschiede.

Dies betrifft u. a. das Problemfeld des „geogenen background“ der Schwermetallbelastung der Böden. So wird in mehreren der angefertigten Gutachten bzw. Expertisen diese Problematik entweder völlig negiert oder es wird von einem überaus starken Einfluss geogener Ursachen für die vorgefundenen Belastungszustände ausgegangen. So wird im Bericht zur Umweltsanierung des Großraumes Mansfeld der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991, S. 154) den „großflächig an der Tagesoberfläche anstehenden Gesteinen des Zechsteins“ im Untersuchungsgebiet eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Weiterhin wird dort behauptet, dass die Metallführung des übertägig austreichenden Kupferschieferflözes einen geogen erhöhten Ausgangswert an Schwermetallen in diesen Böden bedingt. Im „Zusammenfassenden Endbericht zum Umweltschutz-Pilotprojekt Mansfeld AG“ der NOELL UMWELTDIENSTE GMBH (1993, S. 15) wird ebenfalls auf eine „starke(n) Anreicherung von Schwermetallen, die in Bereichen des austreichenden Kupferflözes auch in oberflächennahen Bodenbereichen auftritt“, hingewiesen.

Weitere Informationsdefizite zeigen sich auch bei der Beurteilung des sich aus der Schwermetallkontamination der Böden ergebenden Gefährdungspotentials für die hier angebauten Kulturpflanzen bzw. hinsichtlich eines möglichen Schwermetallaustrags in den Grundwasseraquifer. So werden bei mehreren Untersuchungen kaum Angaben zu den die Schwermetallmobilität bzw. -immobilität bestimmenden pedologischen „Steuergrößen“ gemacht oder nur die im Königswasserauszug ermittelten Gesamtgehalte diskutiert.

Hieraus ableitend wurden für die vorliegende Untersuchung folgende Zielsetzungen formuliert:

1. Erfassung und Bewertung geogener und anthropogener Ursachen der Boden- und Pflanzenbelastung mit Schwermetallen im Bereich des Kupferschieferausstrichs (auch als das „Ausgehende“ bezeichnet) und im sich hieran (östlich) anschließenden Verbreitungsgebiet der Kleinst- und Kleinhaldenfelder,
2. Untersuchungen zur räumlichen Differenzierung des Belastungsausmaßes und deren Bedeutung für die aktuellen Nutzungsprozesse,
3. Analyse der Schwermetallmobilität (Pflanzenverfügbarkeit) unterschiedlicher Boden- und Belastungsverhältnisse,
4. Untersuchungen zum Schwermetalltransfer unterschiedlich kontaminierter Böden sowie verschiedener Kulturpflanzen,
5. Erarbeitung von Lösungsvorschlägen für eine künftige standortgerechte Bodennutzung.

## 2 Umweltveränderungen in Bergbauregionen

Etwa seit dem Neolithikum hat es der Mensch verstanden, die von ihm entdeckten natürlichen Rohstoffe, insbesondere Metalle, technologisch zu nutzen (BLUME 1992; HOHL et al. 1981).

Unter Zuhilfenahme fossiler Brennstoffe erfolgte mit der Zeit eine ständig wachsende Verarbeitung und Verwertung der abgebauten natürlichen Metallressourcen bis in die heutigen Jahre. So ist beispielsweise die Förderung von Kupfer heute 570mal größer als im Jahre 1800 (YOUNG 1993).

Im Rahmen der Bergbautätigkeit tritt der Mensch u. a. als Gestalter der Geomorphologie auf, indem er Hohlformen schafft (Tagebaue, unterirdische Stollen, Schachtröhren) und andererseits Vollformen in Gestalt von Halden entstehen lässt (HILLER 1997b; LAMPING 1985; MEYER et WIGGERING 1991; NEWTON 1976; RATCLIFFE 1974; STRAHLER et STRAHLER 1973; WAGENBRETH 1996).

Der Bergbau hinterlässt in vielen Gebieten neben dem veränderten Landschaftsbild auch Veränderungen der stofflichen Zusammensetzung von Böden, Gewässern und Pflanzen, die auch heute noch, trotz z. T. eingestellter Bergbautätigkeit und Verwertung, relevant für Organismen und ihre Umwelt sein können (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991; BAXMANN 1996; BENNETT et DOYLE 1999; FRÜHAUF 1999; IPE JENA 1991; NOELL 1993; PRÜß 1994; SCHMIDT 1997; SCHMIDT et FRÜHAUF 1996; SCHRECK 1996; WOHLRAB et al. 1995). BENNETT et DOYLE (1999) stellen fest, dass 90% der Metallerze in Form von Abfall in großen Halden oder in Teichen nahe der Bergwerke gelagert werden.

Umweltbelastungen, die durch den Abbau von mineralischen Rohstoffen entstehen, sind nach YOUNG (1993) abhängig von verschiedenen Faktoren: den ökologischen Bedingungen des Abbaugebietes, der Abraummenge, der Tiefe der Lagerstätte, der chemischen Beschaffenheit der Erze, der die Erze umgebenden Gesteinsschichten und Böden und dem Erzgewinnungsverfahren. Die Auswirkungen des Bergbaus betreffen ebenso die Prozesse der Anreicherung von Erzen und deren Verhüttung (Tab. 1).

**Tab. 1: Umweltauswirkungen durch Bergbau (nach YOUNG 1992)**

Gewinnungsstadium	mögliche Auswirkungen
Ausgrabung und Förderung des Erzes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zerstörung von Habitaten, menschlichen Siedlungen und anderen Landschaftselementen (Tagebau)</li> <li>• Absenkungsphänomene (Untertagebau)</li> <li>• Zunahme der Erosion; Verschlammung von Seen und Fließgewässern</li> <li>• Erzeugung von Abraum</li> <li>• Versauerung von Seen, Fließgewässern und Grundwasser (wenn Erz oder Abraum Schwefelverbindungen enthält) sowie Kontaminationen durch Metall</li> </ul>
Erzanreicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erzeugung von Abraum (Erzabfällen)</li> <li>• Kontaminationen mit organischen Stoffen (Erzabfälle enthalten oft Rückstände der zur Anreicherung verwendeten Chemikalien)</li> <li>• Versauerung von Seen, Fließgewässern und Grundwasser (wenn Erz Schwefelverbindungen enthält) sowie Kontaminationen durch Metall</li> </ul>
Verhüttung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftverschmutzung (die Emissionen können Schwefeldioxid, Arsen, Blei, Cadmium und andere toxische Stoffe enthalten)</li> <li>• Erzeugung von Abraum (Schlacken)</li> <li>• Auswirkungen auf die Energieerzeugung (die meiste von der Bergbauindustrie verbrauchte Energie geht in die Verhüttung)</li> </ul>

Die Folgen der Deponierung von Erzabfällen der Panguna-Kupfermine auf Bougainville (Papua Neu Guinea) sind nach YOUNG (1993) ein besonders gravierendes Beispiel für Umweltbelastungen. Pro Tag wurden dort ca. 130 000 t metallischer Rückstände (600 Mio. t bis zur Stilllegung der Mine) in den Fluss Kawerong gekippt. Die Auswirkungen ziehen sich bis in das 30 km entfernte, 700 ha große Mündungsdelta, wo insgesamt 1 800 ha des Flusssystemes Kawerong/Jaba mit diesen Abfällen kontaminiert sind. Weiterhin führt YOUNG (1993) an, dass durch das Schmelzen von Kupfer und anderer Nichteisen-Metalle weltweit jährlich ca. 6 Mio. t Schwefeldioxid freigesetzt werden. Dadurch entstand z. B. um die Copper-Hill-Hütte

in Tennessee (USA) ein Gebiet („dead zone“) von 7000 ha, in dem nur wenig bzw. keine Vegetation überleben kann.

Die Auswirkungen des Abbaugeländes („mine site“) rufen nach SENGUPTA (1993) Konflikte und Einschränkungen gegenüber anderen Formen ökonomischer Tätigkeiten des Menschen hervor (Abb. 1).

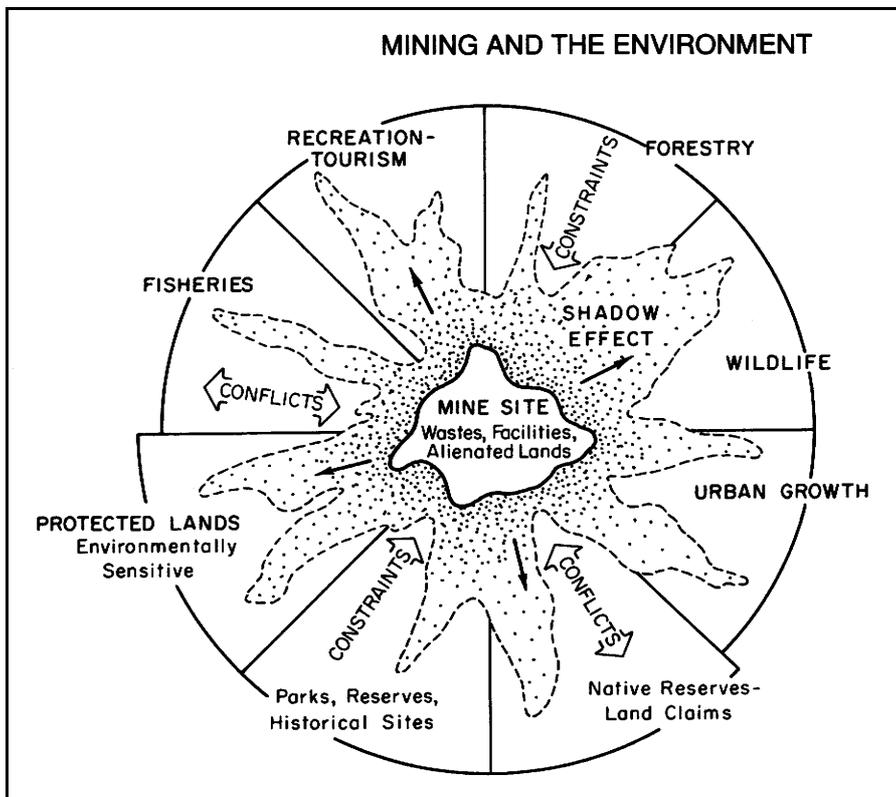


Abb. 1: Bergbau und Landnutzung (SENGUPTA 1993)

Die Abb. 1 beschreibt die Wechselwirkung des Bergbaus mit den anderen Landnutzungen sowie Beeinträchtigungen durch diesen. Die direkten, nicht unbedeutenden Auswirkungen der Bergbautätigkeit innerhalb des Minengeländes („mine site“) sind räumlich kleiner als die indirekten Wirkungen des Bergbaus („shadow effect“), die mit anderen Formen menschlicher ökonomischer Aktivität wie z. B. Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Besiedlung in Konflikt stehen. Der Bereich der Interaktion zwischen Bergbau und anderen Landnutzungen ist in jüngerer Zeit zunehmend komplexer geworden. Auch die Verantwortung von Bergbaugesellschaften für Umweltschutzmaßnahmen ist im letzten Jahrzehnt drastisch über die Betriebsgrenzen hinaus ausgedehnt worden SENGUPTA (1993), da der unvermeidliche Schatteneffekt von Bergbautätigkeit in seiner räumlichen, zeitlichen und stofflichen Dimension nun weitreichender als zuvor eingeschätzt wurde.

Im Rahmen von Wechselwirkungen des Bergbaus mit anderen Nutzungsformen wird ferner die Meinung vertreten, dass es neben der völligen Zerstörung der Bodendecke (FIEDLER 1990) und der in Tab. 1 aufgeführten Schädigungen der Umwelt auch zu Veränderungen kommen kann, die abwechslungsreichere Landschaften zur Folge haben (RATCLIFFE 1974). Nach HILDMANN (1996) und WAGENBRETH (1996) können Bergbaufolgelandschaften auf lange Sicht umweltpolitisch deshalb durchaus positiv beurteilt werden, was die Veränderungen des Reliefs, die Verteilung von Land und Wasser sowie die veränderte Flora und Fauna betrifft und dies auch ohne menschliches Zutun. Diese Meinungen sind jedoch nicht uneingeschränkt zu akzeptieren, vor allem dann nicht, wenn mit der Bergbautätigkeit eine erhebliche Verbreitung von Schadstoffen in die Umwelt einhergeht.

## 2.1 Veränderungen der Landschaftsmorphologie

In industriell hochentwickelten Ländern sind an vielen Stellen die vom Menschen verursachten Veränderungen des Landschaftsbildes größer als die naturbedingten (WAGENBRETH et STEINER 1990).

Die Rohstoffgewinnung durch den Bergbau führt zu Schäden in der Landschaft (HEINRICH et HERGT 1991), zu einer veränderten Wasser-Land-Verteilung, Nutzungsbeschränkungen und Eingriffen in den Lebensraum von Pflanzen- und Tiergesellschaften (HILDMANN 1996). Der Tagebau als massivste Form der Landschaftszerstörung (HEINRICH et HERGT 1991; STRAHLER et STRAHLER 1973) kollidiert mit der die Böden nutzenden Landwirtschaft, mit der Besiedlung des Raumes und dessen Verkehrsnetz (FIEDLER 1990; GOUDIE 1994; HILLER 1997a; SENGUPTA 1993). Tagebaue bzw. Tagebaurestlöcher sind beispielsweise in Braunkohlengebieten zwischen Bitterfeld und Zeitz (OHSE 1996), in der Niederlausitz (BAXMANN 1996), bei Köln, in den US-Bundesstaaten Pennsylvania, Ohio, West Virginia, Kentucky, Illinois (GOUDIE 1994) lokalisiert. Dass die Nutzung von Bodenschätzen beträchtliche Umweltschäden nach sich ziehen kann, wird u. a. an folgenden Beispielen deutlich. Beim Abbau einer Kupfermine in Utah (USA) wurde siebenmal soviel Erde bewegt, wie beim Bau des Panama-Kanals, Minen und Schmelzhütten beanspruchen bis zu einem Zehntel des gesamten jährlichen Energieverbrauchs, der Bergbau hinterlässt Milliarden Tonnen Abfall und ist ursächlich dafür, dass von der Oberfläche mehr Erde abgetragen wird als durch alle Flüsse der Welt infolge natürlicher Erosion (YOUNG 1993).

Der untertägige Abbau der Rohstoffe kann mit weiträumigen Bergsenkungen einhergehen, welche die Absenkung des Grundwassers (Sümpfung - z. B. im Ruhrgebiet) nach sich ziehen können. Polderlandschaften entstehen (HEINRICH et HERGT 1991; HILLER 1997a). Durch den Bergbau kann es in Verbreitungsgebieten wasserlöslicher Gesteine (Salze, Gipse, Kalkgebiete) infolge subrosiver Prozesse verstärkt zu Senkungen mit Erdfällen oder Senkungsmulden kommen (BENNETT et DOYLE 1999; HOHL et al. 1981; NEWTON 1976).

In Far West Rand (Südafrika) kam es durch das Ableiten des Wassers in einem Goldbergwerk zu einer massiven Senkung des Grundwasserspiegels um mehr als 300 m, welche das Austrocknen und Schrumpfen von Tonen und anderen Materialien, die die Decken großer Höhlen auskleideten, bewirkte. Der dadurch initiierte Einsturz des Deckengewölbes brachte 29 Menschen den Tod (GOUDIE 1994). Nach WALLWORK (1974) ist die Bedeutung des Bergbaus für Senkschäden jedoch abhängig von der geologischen Struktur, der Dicke des entfernten Flözes, seiner Tiefe, der Arbeitsbreite, der angewandten Arbeitsmethode und von dem Ausmaß der Auffüllung mit Abraummateriale nach der Abtragung.

Die bergbauliche Tätigkeit des Menschen bedingt also primär den Flächenverbrauch durch die mit der Rohstoffgewinnung einhergehende Massenverlagerung, Veränderungen des natürlichen Reliefs und die Einbringung technogener Reliefelemente wie Abraumhalden (MEYER et WIGGERING 1991; SCHULZ et WIGGERING 1991). Die Rohstoffaufbereitung und -verarbeitung, der Transport von Rohstoffen und Produkten sowie die Deponierung der Produktionsrückstände beeinflussen als sekundäre Faktoren das Erscheinungsbild der Landschaften in Form von Industrieanlagen, Verkehrswegen und Schlackehalden.

Weitere Einflüsse entstehen durch die Ansiedlung von Arbeitskräften, wodurch erhöhter Flächenverbrauch für Siedlungsräume, Straßenverkehr, Hausmülldeponien etc. für diese Gebiete charakteristisch werden. Durch die mit der stärkeren Besiedlung meist einhergehende intensivierete Landwirtschaft ergeben sich zusätzlich zu landschaftsmorphologischen Veränderungen weitere ökologische Konflikte (LAMPING 1985).

## 2.2 Änderungen des Wasserhaushaltes

Durch die im Rahmen der Bergbautätigkeit betriebene Wasserhaltung kommt es im allgemeinen zu großflächigen Grundwasserabsenkungen, speziell zu Zerstörungen von Grundwasserleitern und massiven Eingriffen in den Verlauf und die Wasserführung von Oberflächengewässern (BAXMANN 1996; GILBERT 1971). Außerdem kann der Bergbau eine Steigerung der Wassererosion bewirken, was wiederum eine beschleunigte Sedimentation zur Folge hat (GOUDIE 1994). Wie bereits GILBERT (1971) in einer Studie zeigte, wurden durch die Ableitung von Druckwasser aus dem Bergbau in der Sierra Nevada (Kalifornien) große Mengen zusätzlicher Sedimente in die den Gebirgszug entwässernden Flusstäler gespült, was zu einer Anhebung der Flussbett-niveaus, zu veränderten Flussläufen und zu Überflutungen von bisher hochwassergeschützten Landstrichen führte. Ein weiteres nicht zu unterschätzendes Resultat war beispielsweise das Einspülen von großen Mengen Schutt in die Meeresbuchten bei San Francisco und die dadurch hervorgerufene schnelle Verlandung.

Spätestens mit dem Einsatz der Dampfmaschine im Bergbau wurde der Mensch in die Lage versetzt, gewaltige Wassermengen aus dem Untergrund zu fördern, um somit die Gewinnung von Rohstoffen zu maximieren. Nach FRÜHAUF (1999), GOUDIE (1994), HOHL et al. (1981), NEUß et ZÜHLKE (1982), NEWTON (1976), SCHRECK (1996), WEDEPOL (1984) kommt es infolge der modernen Wasserhebung besonders in Gebieten mit löslichen Gesteinen durch die Intensivierung von Subrosions- und Lösungsprozessen zu bedeutenden Materialdefiziten im Untergrund. Die durch Subrosionsprozesse geschaffenen unterirdischen Hohlräume führten an der Erdoberfläche zu verschiedenen „Geländeformationen“. Die entstandenen Klüfte und Sedimentstörungen beschleunigten wiederum das Versickern der Niederschläge bzw. der Oberflächenwässer und intensivierten die Auslaugungsprozesse weiter. Senkungs- und Sackungs- bzw. Erdfallerscheinungen, die oftmals beträchtliche Bauschäden nach sich zogen, waren häufig die Folge.

Die Absenkung des Grundwassers durch den Bergbau bewirkte z. B. die Oxidation von Pyrit und Markasit (Eisensulfid, eine Modifikation von Pyrit) in den Flözen und homogenen Tonen in den Kohlegebirgen von Großbritannien, wodurch Schwefelsäure entstand (GOUDIE 1994). Aus diesem Grund weist das Dränagewasser von Minen fallweise pH-Werte von 2 und 3 auf. So auch in der Dexing-Kupfermine im Südosten Chinas, die mit 60 000 t täglich abgebauten Gesteins zu den größten Kupferminen der Welt gehört. (YAHYA et MÜLLER 1994).

Mit den Massenverlagerungen von Wasser und Salzen gehen auch der Transport von Schwermetallen in gelöster Form oder in Suspension einher. Speziell im Mansfelder Land hat nach SCHRECK (1996; 1997) der Wasserpfad (Auslaugung durch Niederschlagswasser) bei der Freisetzung von Schwermetallen aus den Bergbauhalden die größte Bedeutung. Die Akkumulation von suspendierten Schwermetallen erfolgt in Gewässerläufen in Abhängigkeit von der Partikelgröße zumeist in Gewässerabschnitten mit geringen Fließgeschwindigkeiten (WEDEPOL 1984).

## 2.3 Veränderungen des Stoffhaushaltes durch die Bergbautätigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetalle

In Anlehnung an SCHMIDT (2000) werden die Ursachen der Veränderungen des Stoffhaushaltes durch den Bergbau nach primären, sekundären und tertiären Stoffemissionen unterschieden.

- Primäre Stoffemissionen entstehen unmittelbar durch die Bergbautätigkeit als Folge der Herauslösung von Rohstoffen und Nebengestein aus dem Gesteinsverbund sowie durch Sprengungen.
- Sekundäre Stoffbelastungen resultieren aus Verhüttungs- und Verarbeitungsprozessen der gewonnenen Rohstoffe und aus Emissionen abgelagerter Rückstände der Produktion (z. B. Haldenmaterial).
- Weitere Stoffausträge (sog. tertiäre) sind auf die Ansiedlungen infolge der örtlich vorherrschenden Bergbautätigkeit, den Verkehr, andere Industriezweige, Handwerk und Landwirtschaft zurückzuführen.

ren (Abwässer aus Industrie und Kommunen, Hausbrand, Staub, Rauchgase, Klärschlamm, Düngung, Erosion, Fahrzeugabgase etc.).

Der Verlagerung verschiedener Stoffe (Nährstoffe, Sedimente, Schwermetalle) durch die Bergbautätigkeit folgt zumeist eine Ablagerung bzw. Anreicherung in Senken (Seen, Kolluvien etc.). Bei erhöhten Konzentrationen kommt es dort oftmals zu Einschränkungen der ökologischen Funktionalität (Eutrophierung, extreme pH-Werte, Veränderungen der Flora und Fauna), die mit Nutzungsbeschränkungen für den Menschen einhergehen können (FIEDLER 1990).

In der vorliegenden Arbeit soll der Fragestellung nachgegangen werden, inwieweit Böden durch andere Schwermetallquellen außer durch Schädigungen infolge direkter Bergbautätigkeit bzw. Verhüttung und Verarbeitung von Kupferschiefer, belastet wurden. Zunächst sollen einige grundlegende Eigenschaften von Schwermetallen und Böden sowie die Auswirkungen von Schwermetallbelastungen auf Pflanzen aufgeführt werden.

### 2.3.1 Schwermetalle und Böden

Als Schwermetalle werden Metalle und Halbmetalle bezeichnet, die eine Dichte  $> 6 \text{ g/cm}^3$  aufweisen. Dazu gehören u. a. Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink, deren überdurchschnittliche Anreicherungen in Boden, Wasser, Luft, Mensch, Tier und Pflanze i. d. R. mit Verschmutzungs- bzw. Toxizitätsproblematiken im Zusammenhang stehen (ALLOWAY et AYRES 1996; BLIEFERT 1994; BLUME 1992; WALLNÖFER et ENGELHARDT 1995; WILD 1995b). Schwermetalle sind als mineralische Bestandteile bereits im Ausgangsgestein und somit im Boden enthalten. In einem bestimmten Konzentrations- oder Dosisbereich haben einige der Schwermetalle essentielle Bedeutung als Mikronährstoffe, die erst bei Über- oder Unterschreitung kritischer Werte toxisch wirken. (HAPKE 1984; KUNTZE et al. 1991). In niedrigen Konzentrationen stellen u.a. die Schwermetalle Co, Cu, Fe, Mn, Mo und Zn für Pflanzen sowie zusätzlich Cr und Sn für Tiere solche lebensnotwendigen Mikronährstoffe dar. Zu den potentiellen Schadstoffen zählen Cd, Hg, Ni und Pb (FIEDLER et RÖSLER 1987; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998). Die Schwermetallgehalte in den Böden sind sowohl von natürlich verursachten (geogenen) als auch von durch menschliche Aktivität hervorgerufenen (anthropogenen) Einträgen abhängig.

Der geogene Grundgehalt umfasst den Stoffbestand eines Bodens, der sich aus dem Ausgangsgestein (lithogener Anteil), gegebenenfalls Vererzungen (chalkogener Anteil) und der durch pedogenetische Prozesse beeinflussten Verteilung von Stoffen im Boden ergibt. Mit dem Wechsel von lithogener (silikatisch, oxidisch, sulfidisch, karbonatisch) zu pedogener Bindung (sorption, austauschbar, oxidisch) erhöht sich die Mobilität der Schwermetalle in den Böden (EIKMANN et KLOKE 1993; FILIPINSKI et al. 1991; FLEIGE et HINDEL 1991; KUNTZE et al. 1991). Die Umverteilung der pedogenen Schwermetallgehalte erfolgt z. B. durch Verwitterung, Tonmineralneubildung, Humifizierung, Lessivierung, Podsolierung und Vergleyung (BEUGE et SCHULZE 1976; KÖNIG et KRAMER 1985).

Ursachen für die unterschiedlichen natürlichen Metallgehalte der Böden können in den vielfältigen Ausgangssubstraten liegen. So lassen sich z. B. über oberflächlich anstehenden erzhaltigen Gesteinen natürlich stark schwermetallbelastete Böden finden (FIEDLER et RÖSLER 1987). Dazu zählen beispielsweise olivinreiche Vulkanitgesteine im Frankenwald mit hohen Cu-, Ni- und Co-Gehalten und Tongesteine im Rheinischen Schiefergebirge (erhöhte Ni-Gehalte). Häufig sind jedoch nicht die tiefer im Untergrund anstehenden Gesteine, sondern überlagerndes Lockergestein (Schuttdecken, Löß, Schotter, Auelehme, Geschiebemergel u.s.w.) das bodenbildende Substrat. Somit wird der Grundgehalt von Schwermetallen in Böden durch dessen Stoffzusammensetzung geprägt (ZIERDT 1991). Tab. 2 liefert Aussagen über mittlere geogene Grundgehalte einiger Elemente in Gesteinen und Hintergrundgehalte von Böden (A-Horizonte) aus unterschiedlichem Ausgangsgestein.

**Tab. 2: Mittlere geogene Grundgehalte (mg/kg) einiger Mikronährelemente und potentiell toxischer Elemente in Gesteinen und Hintergrundgehalte von Böden (A-Horizonte) aus unterschiedlichem Ausgangsgestein (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998)**

	Mn	Cu	Zn	B	Mo	Co	V	Cr	Ni	As	Cd	Sn	Sb	Hg	Tl	Pb
<b>Kontinentale Kruste</b>	800	35	70	10	1,5	18	109	88	45	3,5	0,1	2,5	0,3	0,02	0,5	15
<b>Ultrabastische Gesteine</b>	1600	10	50	2	0,3	150	40	1600	2000	1	0,05	0,5	0,1	0,02	0,06	1
<b>Basalt/Gabbro</b>	1400	90	100	5	1	50	200	170	130	1,5	0,15	1,5	1	0,02	0,08	4
<b>Glimmerschiefer, Phyllit</b>	700	25	80	50	(1,5)	13	100	75	25	4,3	0,15	5	(0,5)	0,02	0,65	20
<b>Granit</b>	325	15	50	15	1,8	4	30	12	7	1,5	0,09	3	0,2	0,03	1,1	30
<b>Tonstein</b>	850	45	95	100	1,3	20	130	90	70	10	0,3	10	2	0,45	0,7	22
<b>Sandstein</b>	50	5	15	35	0,2	0,3	20	35	2	1	0,05	0,5	0,05	0,03	0,8	7
<b>Kalkstein</b>	700	4	25	20	0,4	2	20	11	15	2,5	0,16	0,5	0,2	0,03	0,05	5
<b>Löß</b>	500	13	45	(60)	1,2	8	45	35	20	7	0,3	4,5	0,5	0,05	0,1	25
<b>Geschiebemergel, -lehm</b>	500	11	40	(50)	1	6	40	30	18	5	0,3	4,5	0,5	0,04	0,03	20
<b>Böden aus:</b>																
<b>Sand</b>	80	3	15	(12)	(0,4)	2	10	5	6	2	0,2	0,5	0,2	0,03	0,02	10
<b>Geschiebemergel</b>	500	11	50	(45)	(1)	5	40	25	12	6	0,3	4,5	0,5	0,08	0,04	25
<b>Löß</b>	500	15	55	(55)	(1,5)	5	40	30	20	7	0,3	4,5	0,5	0,08	0,1	35
<b>Basalt</b>	1000	45	135			(60)	(200)	(180)	150	3	0,3	(1)-	0,4	0,06		42
<b>häufiger Bereich in Böden</b>	40...	2...	10...	5...	0,2...	1...	8...	5...	3...	1...	0,1...	0,3...	0,1...	0,02...	0,02...	2...
<b>Böden</b>	1000	40	80	80	5	40	60	100	50	20	0,6	10	3	0,2	0,4	80

( ) = Einzelwerte

Schwermetalle gelangen auf natürlichem Wege u. a. durch Gesteinsverwitterung, Vulkanismus, Brände und Staubtransport in unsere Umwelt (BLUME 1992; FREDE et BACH 1996; HARRES 1998; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998). Dabei dienen Wasser und Luft als Transportmittel, wobei diese beiden Medien auch hauptsächlich für die anthropogenen Schwermetalleinträge charakteristisch sind. So gelangen beispielsweise durch die stofflichen Einwirkungen von Klärschlamm, Siedlungsabfall, Pestiziden, Dünger, Deponien, Verkehr, Verbrennungen fossiler Brennstoffe und Müll, Stahl-, Eisen- und Zementproduktion, sowie durch die Gewinnung und Verarbeitung von Metallen Schwermetalle auf direktem Weg in Böden, Gewässer und Pflanzen (ALLOWAY et AYRES 1996; BLIEFERT 1994; BLUME 1994; BREDER 1994; CÖSTER 1993; EIKMANN 1994; FENT 1998; HARRES 1998; MIEHLICH et al. 1994; NOE 1990; PRÜEB 1994; REBER 1994; RÖSLER 1976; WILD 1995a; ZIERDT 1991).

Von Bedeutung sind auch Schadstoffe (Schwermetalle), die bei der Erz- und Kohleverarbeitung auf Industrie- und Zechengeländen durch folgende Prozesse in den Boden gelangen:

- Deponierung von eigenen und fremden Produktionsrückständen auf dem Betriebsgelände während des Betriebes und danach,
- Verunreinigungen durch Leckagen oder Handhabungsverluste während des Betriebes,
- zurückgelassenes Material in den Anlagen nach der Stilllegung und
- Verlagerung bzw. Ausbreitung kontaminierter Substanzen durch Abriss und Planierungsarbeiten (HILLER 1997b).

Die Konzentrationen von Schwermetallen im Boden, ausgehend von Emittenten (z. B. Schornsteine, Deponien) wie auch von diffusen Quellen (z. B. Automobilabgase), nehmen mit zunehmender Entfernung von der Verursacherquelle ab, bis sie sich in sog. „ländlichen Gebieten“ (Regionen in denen stärkere Belastungen infolge geringer Industrie-, Bevölkerungs- und Verkehrsdichte durch Schwermetalle noch nicht stattgefunden haben) immer mehr denen der natürlichen Ausgangskonzentrationen annähern. (BLUME 1992; FIEDLER et RÖSLER 1987). Bei Acker- und Gartenböden wird dieser Ausgleich der Konzentrationsunterschiede zusätzlich durch Ernteentzug sowie durch die Vermischung des Bodens infolge Bodenbearbeitung verstärkt. Gleichzeitig sind diese Böden jedoch auch häufig von Düngemaßnahmen betroffen, d. h. Schwermetalle wie Cu, Mn und Zn gewinnen in solchen Regionen mit ausgeprägter Landwirtschaft an Bedeutung (FIEDLER et RÖSLER 1987, ZIERDT 1991). Tab. 3 gibt einen Überblick über Schwermetallkonzentrationen in Böden, die aufgrund ihrer Lage verschiedenen Belastungseinflüssen ausgesetzt sind.

**Tab. 3: Schadstoffgehalte in landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden im Vergleich zu Böden mit spezifischer Stoffanreicherung (Angaben in mg/kg Boden) (KÖNIG 1990)**

Schadstoffart	Allgemein verbreitete Gehalte		Gehalte in Böden mit Schadstoffanreicherung aus spezifischer Ursache
	in Böden landwirtschaftlicher Flächen in überwiegend ländlichen Gebieten	vorrangig in Gartenböden großstädtischer Verdichtungsgebiete	
Zink	20-120	80-300	800->3000
Blei	10-60	50-150	500-> 2000
Kupfer	5-25	20-40	> 200
Cadmium	0,2-1,0	0,5-1,5	4-> 30

Die sekundären, anthropogenen Schwermetalle, welche sich vorwiegend im Oberboden durch Immissionen anreichern, nähern sich mit zunehmender Bodentiefe natürlichen Gehalten, den sogenannten geogenen Ausgangsgehalten an. Die primären, geogenen Schwermetallanreicherungen sind dazu im Gegensatz relativ gleichmäßig über das gesamte Bodenprofil verteilt. (ALTERMANN et al. 1995; HILLER 1997b; SCHULTE et BLUM 1997). In verschiedenen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass sich anthropogen zugeführte Schwermetalle gegenüber den geogenen durch erhöhte Mobilität auszeichnen (FILIPINSKI et GRUPE 1990, KÖNIG et KRAMER 1985). Veränderte Elementverteilungen in den Humusaufgaben infolge anthropogener Kontamination lassen sich insbesondere in ungestörten Waldböden nachweisen.

Durch Erosion werden die ökologisch bedeutsamen Bodenfunktionen durch das abnehmende Bodenvolumen, welches für die Speicherung, Pufferung, Filterung, als Standort für Pflanzen und als Lebensraum für Mikroorganismen und Bodentiere essentiell wichtig ist, eingeschränkt (BUCHWALD et ENGELHARDT 1999). Der Abtrag von Feinanteilen und Humusstoffen beeinflusst die Bodeneigenschaften auf Standorten mit gering durchwurzelbarem Raum auf negative Weise (FRIELINGHAUS et al. 1993). Erosierte vom Wasser in gelöster Form transportierte oder an feine Partikel gebundene Schwermetalle werden in Flusssedimenten am Gewässerboden, im Mündungsbereich oder in Überschwemmungsgebieten akkumuliert. Dies bewirkt beispielsweise die vergleichsweise hohe Schwermetallkonzentration von Auenböden (HARRES 1998; WINDE 1997). Bei Untersuchungen von Auenböden, die durch Erzbergbaumaterialien mit Schwermetallen belastet sind, wurden zum Teil erhebliche Überschreitungen der LÖLF-Richtwerte für Blei, Cadmium, Kupfer etc. erreicht (ZUMBROICH et al. 1994).

### 2.3.2 Schwermetalle im System Boden - Pflanze

Böden können im Stoffhaushalt von Ökosystemen eine Senke für Schwermetalle darstellen, indem sie der Ökosphäre Stoffe entziehen. Adsorptions-, Desorptions- und Lösungsfällungsprozesse bestimmen je nach Menge und elementspezifischer Eigenschaft und in Abhängigkeit von verschiedenen Bodencharakteristika die Schwermetallverteilung zwischen in der Feststoffphase gebundenen und gelösten Anteilen. Durch Mikroorganismen und Pflanzen werden diese gelösten Anteile aufgenommen und gelangen in die Nahrungskette oder durch Auswaschung in das Grundwasser (BLUME 1992).

Aufgrund der Bedeutung der Böden als Schadstoffsink und -quelle sollen an dieser Stelle einige wichtige Bodeneigenschaften kurz aufgegriffen werden: Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Böden beeinflussen Art und Bioverfügbarkeit von Metallen, wobei diese Bodeneigenschaften auch durch die Wurzeln der Pflanzen modifiziert werden (ALLOWAY 1999; BLIEFERT 1994; BLUME 1992; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998). Ein wesentlicher Faktor sind die Säure-Base-Eigenschaften der Böden (Bodenreaktion). Schwermetalle besitzen unter sauren Bedingungen eine hohe Mobilität, wird der pH-Wert durch Kalken des Bodens erhöht, verringert sich die Bioverfügbarkeit (ALLOWAY 1999; DVWK 1988). Humus ist einer der wichtigsten Bodenbestandteile. Er regelt den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt des Bodens und stellt die bedeutendste natürliche Stickstoffquelle dar (BLIEFERT 1994; BLUME 1992).

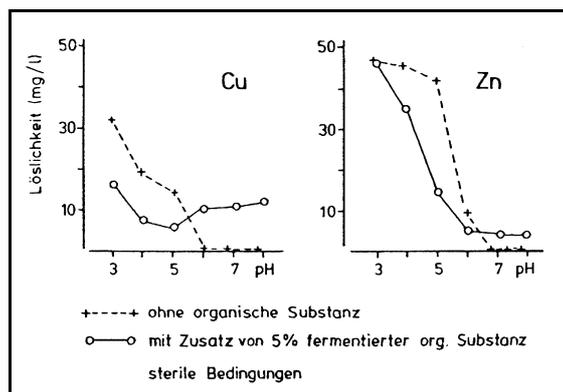
Durch anthropogenen Eintrag gelangen zunächst relativ leicht lösliche Schwermetalle in das Boden-Wasser-Pflanze-System, die langfristig gesehen jedoch auch der pedogenen Immobilisation (Bindung an

Kolloidoberflächen, Fixierung durch Tonminerale, insbesondere bei Zink, Inkorporation in organische Bodensubstanz, Okklusion in Metalloxiden) unterliegen können (BLUME 1992; BRÜMMER et al. 1986; KUNTZE et al. 1991). Abhängig von den Charakteristika der Metalle und Komplexbildner und deren jeweiligen Konzentrationen sowie der Bodenreaktionen entstehen positiv oder negativ geladene bzw. ungeladene lösliche metallorganische Komplexe sehr unterschiedlicher Art und Stabilität. In der Bodenlösung liegen die Schwermetalle vorwiegend als anionische Komplexe mit Chelat-Strukturen vor (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998).

Bei der pH-abhängigen Adsorption durch organische Substanzen, vor allem durch organisch-komplexe Bindungsformen durch Carboxyl- und phenolische OH-Gruppen, nimmt die Stabilität der metallorganischen Bindungen in der Reihenfolge  $Zn < Cd < Ni \ll Pb \ll Cu$  zu (KERNDORF et SCHNITZER 1980).

„Bei neutraler bis alkalischer Reaktion der Bodenlösung findet im allgemeinen nur eine geringe Verlagerung der mit hoher Bindungsenergie durch anorganische und organische Bodenkomponenten gebundenen Schwermetalle statt. Mit abnehmendem pH steigen die Lösungsgehalte in Böden bei Cd bereits unterhalb 6.5 stark an, von Blei hingegen erst unter pH 5...“ (BLUME 1992, S. 298).

Eisen und Aluminium können mit Dicarbon- und Hydroxycarbonsäuren wie beispielsweise Citronensäure und Salicylsäure sowie Hydroxybenzolen negativ geladene Komplexe bilden, was verglichen mit anorganischen Lösungsgleichgewichten die Löslichkeit der Metalle hauptsächlich bei pH-Werten über 5 ... 6 entscheidend erhöht (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998). Abb. 2 stellt die unterschiedliche Löslichkeit von Kupfer und Zink in einem belasteten Sandboden mit und ohne den Zusatz natürlicher organischer Komplexbildner dar.



**Abb. 2:** Einfluss von pH-Wert und organischen Komplexbildnern auf die Löslichkeit von Kupfer und Zink in einem belasteten Sandboden ( $Cu_t$ :  $115 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $Zn_t$ :  $123 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998)

Makro- und Mikronährstoffe können durch Wurzelexsudate und mikrobielle Syntheseprodukte mobilisiert und verfügbar gemacht werden. Pflanzen können so z. B. bei Eisenmangel durch erhöhte Protonenausscheidung und Ausscheidung von komplexierend und z. T. reduzierend wirkenden organischen Substanzen durch Säureangriff und teilweise durch Komplexbildung aus Eisen(III)-Oxiden sowie durch Reduktion Eisen freisetzen und in verfügbare Eisen(II)- und Eisen(III)-Komplexe umwandeln.

Auf diese Weise können anionische Nährstoffe, wie z. B. Phosphate und auch essentielle Schwermetalle, wie Mangan, Zink und Kupfer, mobilisiert werden. Durch die Adsorption der negativ geladenen metallorganischen Komplexe an positive Aluminium- und Eisenoxide verringert sich die Metalllöslichkeit bei pH-Werten unter 5 ... 6. Liegen die pH-Werte unter 3 ... 4, erfolgt die Aufspaltung schwächerer Komplexe, wie z. B. von Zink, durch eine erhöhte Protonenkonzentration. Die gebundenen Metallionen werden freigesetzt (Abb. 2). Bei einem hohen Metallangebot können neben Chelaten zwischen Metallen (M) und Carboxylgruppen auch einfache Komplexe, z. B. des Typs  $-COOM(OH)$ , entstehen. Mit zunehmendem pH-Wert steigt das Mol-Verhältnis von Komplexbildner zu Metall, wodurch gleichzeitig Stabilität und Löslichkeit der metallorganischen Komplexe zunehmen. In Bodenlösungen mit höheren DOC (dissolved

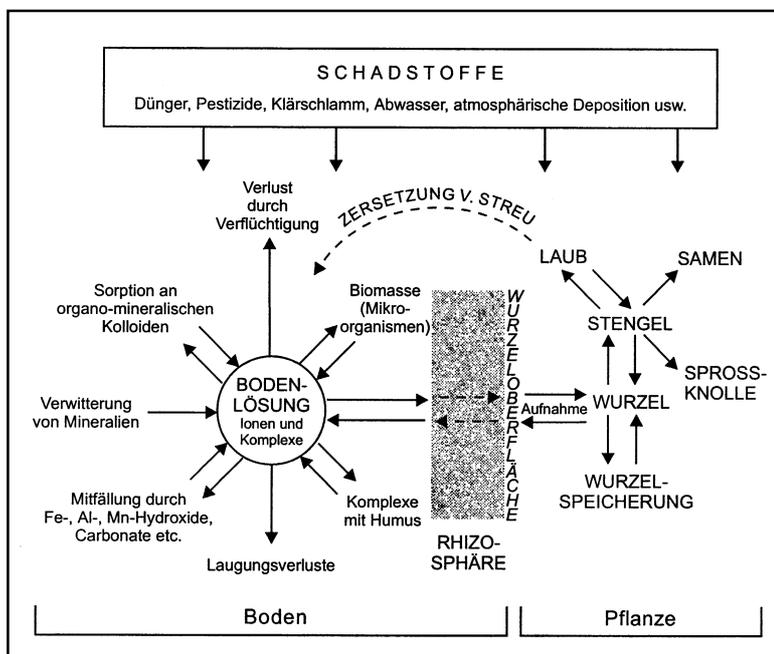
organic carbon) Gehalten steigt der komplexierte Anteil bei Kupfer meist oberhalb pH-Wert 5,5, bei Zink meist oberhalb pH-Wert 6.5 stark an (Abb. 2). Liegt der pH-Wert um oder über 7, liegen in der Bodenlösung die meisten Schwermetalle in komplexierter Form vor. Das Maß für die Stabilität metallorganischer Komplexe sind die Stabilitätskonstanten (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998).

Die Schwermetallbelastung der Pflanzen wird hauptsächlich durch zwei Mechanismen bestimmt. Die Pflanzen nehmen in der Bodenlösung enthaltene Schwermetalle über die Pflanzenwurzeln auf (systematischer Aufnahmepfad) und erfahren durch äußeres Anhaften von kontaminiertem Bodenmaterial eine Schwermetallbelastung, die bei Nahrungspflanzen auch durch Waschen und küchentechnische Aufbereitung nicht vollständig entfernt werden kann (Verschmutzungspfad). Weiterhin können volatile Schwermetalle auch vom Boden über die Luft (Ausgasung) in die Pflanzen gelangen. Der Transferfaktor (F) als Quotient aus Metallkonzentration in der Pflanze und der Metallkonzentration im Boden gibt eine zahlenmäßige Auskunft über den Übergang der Schwermetalle aus dem Boden in Pflanzen (BLIEFERT 1994). Dieser Übergang ist u. a. vom entsprechenden Element abhängig. So gelten Zn und Cd beispielsweise als gut beweglich, im Gegensatz zu Pb, Cu und Hg (FENT 1998).

**Tab. 4: pH-Werte für die beginnende Mobilisierung verschiedener Metalle in Böden sowie häufige Bereiche für Transferfaktoren (BLUME 1992; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998)**

Element	Cd	Zn	Ni	Co	Al	Cu	As	Cr(III)	Pb	Hg
pH-Grenze	6.5	6- 5.5	5.5	5.5	5.5	4.5	4.5- 4	4.5- 4	4	4
Transferfaktor	0,03-10	0,03-10	0,01-2			0,01-2	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Nach MENGEL (1984) hemmen beispielsweise überhöhte Zinkgehalte im Boden das Pflanzenwachstum beachtlich. Kalkung und z. T. auch die Düngung von organischem Material mindern die Zinkaufnahme der Pflanze aus dem Boden. Während Zn für die Pflanze unentbehrlich ist und auch erst bei höheren Konzentrationen toxisch wirkt, ist Cd schon in niedrigen Konzentrationen toxisch. Im Gegensatz zu Pb wird Cd von der Pflanze relativ gut aufgenommen und in die oberen Pflanzenteile verlagert.



Den Austausch von Schadstoffen zwischen Pflanzen und Boden, der überwiegend über die Wurzeloberfläche und die Rhizosphäre erfolgt, beschreibt Abb. 3.

Mit steigenden Schwermetallgehalten im Boden nehmen in der Regel auch die entsprechenden Gehalte in den Pflanzen zu (WILD 1995b).

**Abb. 3: Schadstoffe im System Boden - Pflanze (ALLOWAY et AYRES 1996)**

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Resorption der Schwermetalle direkt von der an der Wurzel verfügbaren Konzentration abhängig ist (GRILL et ZENK 1989). Ursächlich für das unterschiedliche Schwermetallaufnahmevermögen der Pflanzen sind Differenzen bezüglich der Selektivität, der Wasseraufnahmerate sowie der Wurzelreichweite. Weitere Unterschiede ergeben sich auch bezüglich des Entwicklungsstadiums und des Ertrages, da durch Verdünnung bei erhöhter Grünmasse- bzw. Trockensub-

stanzbildung sowie durch sinkende Aufnahme bei Durchwurzelung tieferer, unbelasteter Bodenschichten der Schwermetallgehalt im Verlaufe des Wachstums abnimmt (KNOCHE 1996).

Bei dem wachsenden Schadstoffvolumen in Böden ist die Toleranz der Pflanzen gegenüber Schwermetallen ein wichtiger Aspekt. Manche Pflanzen wachsen auf schwermetallhaltigen Plätzen gut, andere, nicht-tolerante Pflanzen, wiederum vertragen die erhöhten Metallkonzentrationen nicht und werden in ihrem Wachstum beschränkt bzw. gehen ein (WILD 1995b). Eine Besonderheit ist jedoch, dass die toleranten Pflanzen gewöhnlich langsamer wachsen als die nichttoleranten, selbst wenn für tolerante Exemplare die Konzentration der Metalle im Boden optimal ist. Dieser Wachstumsunterschied ist, vorsichtig ausgedrückt, der Preis für den Toleranz-Mechanismus (ERNST 1983). Nach VERKLEIJ (1993) werden die schwermetallempfindlichen Spezien durch die zunehmende Schwermetallkonzentration in der Umwelt möglicherweise aussterben. Bezüglich des Akkumulationsverhaltens von Pflanzen hinsichtlich der Verteilung der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn zeigten sich höhere Konzentrationen und weniger biologische Dispersion in älteren Pflanzenteilen als in jungen Keimspitzen (SIEBERT et al. 1995).

Nach BERGMANN (2001) werden Schwermetalle, die die Pflanzen über den Boden aufnehmen, im Organismus der Pflanzen grundsätzlich verkapselt deponiert. Sie bleiben in den Pflanzenzellen gespeichert und gelangen so in die Nahrungskette des Menschen. In den Pflanzen umschließen Phytochelatine und Aminosäuren wie N-Trimethylglycin die Schwermetall-Ionen, so dass diese ihre zerstörerische Rolle nicht entfalten können. Amine wie Putrescin und Spermin verhindern, dass Schäden an der Zellmembran und den Chromosomen durch Schwermetalle entstehen. „Das bedeutet aber, dass die für diesen Stressstoffwechsel benutzten Aminosäuren als Grundbausteine des Lebens nicht mehr zur Verfügung stehen...“ (BERGMANN 2001). Die Folge: das Wachstum der Pflanzen ist erheblich gebremst. Trockenheit, Bodenversauerung und -versalzung, z. B. durch Fehler in der Landbewirtschaftung, verstärken diese Effekte zusätzlich. Als Nahrungsmittel sind nach BERGMANN (2001) derart geschädigte Pflanzen nicht nur wegen der im Übermaß gespeicherten Schwermetalle weniger empfehlenswert, sondern auch aufgrund der veränderten Zusammensetzung an Stoffwechselprodukten.

### **2.3.3 Gesundheitsschäden durch Schwermetalle, Grenzwerte, Sanierungsvorschläge**

Aus dem Boden werden die Schadstoffe direkt durch die Pflanze aufgenommen und gelangen zu Menschen und Tieren und von dort wiederum in den Boden, wo sie den Pflanzen erneut zugeführt werden. Nicht abbaubare Schwermetalle können diesen Kreislauf nach WALLNÖFER et ENGELHARDT (1995) nie wieder verlassen. Die Konzentration und Art der eingetragenen Schwermetalle spielen dabei eine entscheidende Rolle (HAPKE 1984; KUNTZE et al. 1991; PRÜß 1992). Da die Böden als offene Systeme, Trinkwasserspeicher und als Lebensraum für viele Pflanzen und Tiere dem Ein- und Austrag von Stoffen aus geogenen wie auch anthropogenen Quellen unterliegen, kann eine Veränderung des Stoffhaushaltes direkte oder indirekte Auswirkungen auch auf die Gesundheit des Menschen haben (ALLOWAY et AYRES 1996; BLIEFERT 1994; WILD 1995a).

Schwermetalle werden von Mensch und Tier nur langsam wieder ausgeschieden. Über Jahre akkumuliert können sie zu chronischen Erkrankungen (z. B. Itai-Itai-Krankheit durch Cadmiumvergiftung, Krebserkrankungen der Atemwege durch Arsen und Chrom, Minamata-Krankheit durch Quecksilbervergiftungen, Hirnödeme und Nierenschäden durch Bleivergiftungen) führen (ALLOWAY et AYRES 1996; BLIEFERT 1994; GRILL et ZENK 1989; WILD 1995a). Weiterhin sind durch eine Anreicherung der toxisch wirkenden, nicht essentiellen Schwermetalle in stoffwechselphysiologisch wichtigen menschlichen Organen nach KUNTZE et al. (1991) gesundheitliche Schädigungen der Leber, des Blutes bzw. des Knochenmarkes bekannt.

Zur Bewertung der Schwermetallkonzentration in den Böden liegen u. a. deshalb bestimmte Rahmenwerte vor. Eine Auswahl von Orientierungswerten für unbedenkliche, tolerierbare und toxische Schwer-

metallgehalte in Böden sind Tab. 5 zu entnehmen. Die Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte (Königswasseraufschluss) einiger Elemente in Kulturböden sind bei der Ausbringung von Klärschlämmen und Komposten auf Acker- und Gartenböden zu berücksichtigen und sollen so einen weiteren Anstieg der Schadstoffkonzentrationen im Boden verhindern helfen (KLOKE 1993).

**Tab. 5: Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden (nach EIKMANN et KLOKE 1993)**

Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden		Pb	Cd	Cu	Zn
Gefährdungsbereich	BW	in mg/kg			
unbedenklich	I	< 100	< 1	< 50	< 150
tolerierbar	II	100-< 500	1-< 2	< 50	150-< 300
	III	500-< 1000	2-< 5	50-< 200	300-< 600
toxisch	> III	> 1000	> 5	> 200	> 600

Der Bodenwert (BW) I ist ein Basiswert (Hintergrundwert), der als oberer, geogen und pedogen bedingter Istwert natürlicher Böden ohne wesentliche, anthropogen bedingte Einträge festgelegt ist. Hintergrundwerte für Böden im allgemeinen beruhen auf den ermittelten Hintergrundgehalten und bezeichnen unter Angabe der statistischen Kenngrößen und der Differenzierung hinsichtlich der Bodeneigenschaften und Standortverhältnisse sowie der Bezugsgrößen Nutzung und Gebietstyp die repräsentativen Stoffkonzentrationen in Böden. Der Hintergrundgehalt eines Bodens setzt sich zusammen aus dem geogenen Grundgehalt eines Bodens und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden (EIKMANN et KLOKE 1993). Der als Toleranzwert oder spezieller Nutzungswert bezeichnete BW II wird auch als Prüfwert oder Sanierungszielwert bezeichnet und charakterisiert den „schutzgut- und nutzungsbezogene(n) Gehalt in Böden, der trotz dauernder Einwirkung auf die jeweiligen Schutzgüter, deren „normale“ Lebens- und Leistungsqualität auch langfristig nicht negativ beeinträchtigt. Der Bodenwert III (Eingreifwert bzw. Interventionswert) legt Metallgehalte im Boden fest, bei dem Schäden an Schutzgütern wie Pflanze, Tier und Mensch, sowie an Nutzungen und Ökosystemen erkennbar werden“ (EIKMANN et KLOKE 1993, Kennzahl 9305, S. 1)

Grenz- und Richtwert können jedoch nicht losgelöst von den Bodenparametern, die eine spezifische Region charakterisieren, betrachtet werden. Vielmehr sind, wie oben beschrieben, bei der Einschätzung des ökotoxikologischen Verhaltens der im Boden akkumulierten Schwermetalle die Parameter pH-Wert, Ton- und Humusgehalt, Karbonatgehalt, Sesquioxide und Kationenaustauschkapazität in eine gesamtheitliche Betrachtung mit einzubeziehen (ANDREAE 1994; FRIELINGHAUS et al. 1999b; HARRES 1992). Nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 BBODSCHG (1998) gelten Vorsorgewerte für Metalle in Böden, die nach Bodenart Ton, Lehm/Schluff und Sand unterschieden werden (Tab. 6).

**Tab. 6: Vorsorgewerte für Metalle nach BBODSCHV (1999) in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Königswasseraufschluss**

Böden	Cd	Pb	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn
Bodenart Ton	1,5	100	100	60	1	70	200
Bodenart Lehm/Schluff	1	70	60	40	0,5	50	150
Bodenart Sand	0,4	40	30	20	0,1	15	60
Böden mit naturbedingt und großflächig siedlungsbedingt erhöhten Hintergrundgehalten	unbedenklich, soweit eine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge nach § 8 Abs. 2 und 3 dieser Verordnung keine nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen erwarten lassen						

Neben den Vorsorgewerten für Böden legt die BBODSCHV (1999) Prüfwerte und Maßnahmenwerte für Böden unter Ackerbau und Gartenbau (Tab. 7) sowie Maßnahmenwerte für Grünland fest, die den Wirkungspfad Boden - Nutzpflanze repräsentieren.

**Tab. 7: Prüf- und Maßnahmenwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 und 2 des BBODSCHG (1998) für den Schadstoffübergang Boden – Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgärten im Hinblick auf die Pflanzenqualität in mg/kg Trockenmasse, Feinboden (BBODSCHV 1999)**

Stoff	Ackerbau, Nutzgarten		
	Methode <sup>1)</sup>	Prüfwert	Maßnahmenwert
Arsen	Königswasser	200 <sup>2)</sup>	-
Cadmium	Ammoniumnitrat	-	0,04/0,1 <sup>3)</sup>
Blei	Ammoniumnitrat	0,1	-
Quecksilber	Königswasser	5	-
Thallium	Ammoniumnitrat	0,1	-
Benzo(a)pyren	-	1	-
Arsen <sup>4)</sup>	Ammoniumnitrat	0,4 <sup>4)</sup>	-
Kupfer <sup>4)</sup>	Ammoniumnitrat	1 <sup>4)</sup>	-
Nickel <sup>4)</sup>	Ammoniumnitrat	1,5 <sup>4)</sup>	-
Zink <sup>4)</sup>	Ammoniumnitrat	2 <sup>4)</sup>	-

1) Extraktionsverfahren für Arsen und Schwermetalle.

2) Bei Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt ein Prüfwert von 50 mg/kg Trockenmasse.

3) Auf Flächen mit Brotweizenanbau oder Anbau stark Cadmium-anreichernder Gemüsearten gilt als Maßnahmenwert 0,04 mg/kg Trockenmasse; ansonsten gilt als Maßnahmenwert 0,1 mg/kg Trockenmasse.

4) Prüfwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des BBODSCHG (1998) für den Schadstoffübergang Boden - Pflanze nur auf Ackerbauflächen.

Um Schadstoffe aus Luft, Wasser und Boden zu entfernen, sind aufwendige Sanierungsmaßnahmen nötig. Durch Reinigungsverfahren bezüglich Luft und Wasser entstehen in der Regel Rückstände, die als Düngemittel (Klärschlamm) eingesetzt oder im Boden deponiert werden (FRIELINGHAUS et al. 1999a). Im Gegensatz zu Luft und Wasser akkumulieren die Böden die langzeitigen anthropogenen Belastungen (VIERECK-GÖTTE et EWERS 1997).

BENNETT et DOYLE (1999) zeigen verschiedene Dekontaminations- und Vorsichtsmaßnahmen für schwermetallverseuchte Grundstücke auf. Dazu gehören u. a. das Abtragen der kontaminierten Böden (WILLE 1993), die Immobilisation (Umwandlung der Schadstoffe durch Zugabe von Chemikalien auf die Böden), die Vitrifikation (das Überdecken der verunreinigten Böden mit reiner Erde), die Einkapselung (hier wird der geschädigte Boden in den tieferen Schichten mit Folien überzogen und so gegen Ausfällungen und Entgasung im Oberbodenbereich geschützt) (NEUMAIER et WEBER 1993; WILLE 1993), das Waschen, die Extraktion (die Böden werden mit organischen Lösungen behandelt), die Dampfreinigung (NEUMAIER et WEBER 1993; WILLE 1993), die Elektromigration und Elektroosmose (Elektroden erzeugen im Boden ein Spannungsfeld) (WILLE 1993), die Phytoremediation (Dekontamination mittels hyperakkumulativer Pflanzen) (ALEF 1994; BROOKS et al. 1998) und Bioleaching (Freisetzung von Schwermetallen in das Wasser durch Mikroorganismen) (HADDADIN et al. 1995; KAPOOR et al. 1995).

Nach GRILL et ZENK (1989) kann zur Problemlösung der Anbau gentechnisch veränderter Nutzpflanzen in Betracht gezogen werden, die in den essbaren Pflanzenteilen besonders wenig Schwermetalle akkumulieren. Dieses Ziel könnte durch die gesteuerte Bildung von schwermetallbindenden Molekülen, den Phytochelatinen, in bestimmten Pflanzenorganen (Wurzelsystemen) erreicht werden.

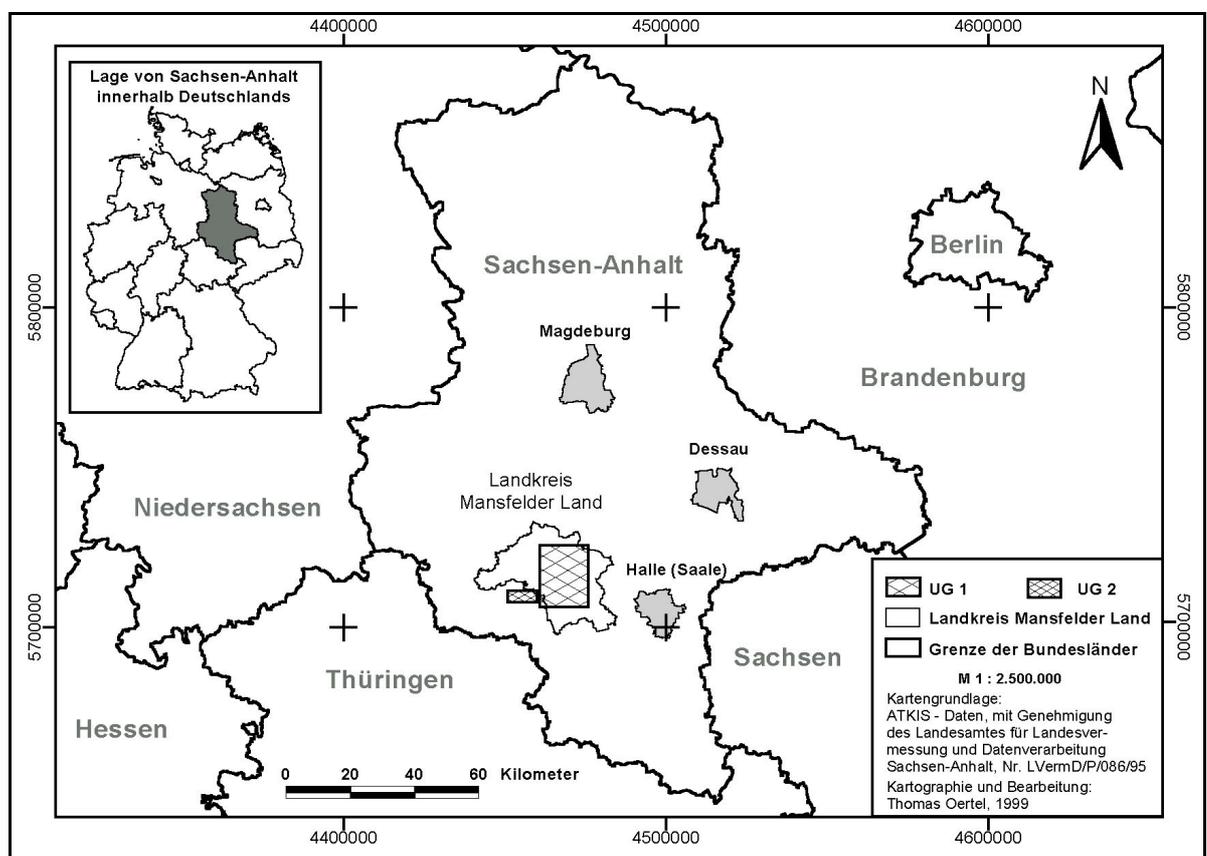
Auch eine Entgiftung der bereits mit Schwermetallen kontaminierten Böden durch effizient metallakkumulierende Pflanzen ist nach ZENK (1996) in Zukunft möglich.

### 3 Einführung in die Untersuchungsgebiete

#### 3.1 Lage und naturräumliche Ausstattung

Für die Bearbeitung der Problemstellung wurde das Untersuchungsgebiet 1 (UG 1) im Raum Eisleben-Hettstedt am Westrand der Mansfelder Mulde gewählt. (Karte 1, Karte 2). In diesem UG im Mansfelder Land wurden aufgrund der geologischen Ausgangsbedingungen und der ehemaligen Hauptproduktionsstätten der Kupferverarbeitung starke Überlagerungen von geogenen und anthropogenen Bodenschwermetallbelastungen erwartet. Um den überwiegenden Einfluss von geogenen Schwermetallanreicherungen im Boden zu analysieren, wurde deshalb zusätzlich das Untersuchungsgebiet 2 bei Pölsfeld (UG 2) beprobt, das im Landkreis Sangerhausen liegt. Eine große Anzahl der Boden- und Pflanzenproben im UG 1 wurde am Kupferschieferausstrich selbst sowie im Bereich der vorgelagerten Klein- und Kleinsthalden entnommen, um den geoökologischen Kenntnisstand zu vertiefen.

Karte 1: Lage der Untersuchungsgebiete



Das UG 1 ist, wie der größte Teil der Mansfelder Mulde, nach MEYNEN et SCHMITTHÜSEN (1962) hauptsächlich dem „Östlichen Harzvorland“ zuzuordnen. Das Landschaftsbild wird überwiegend durch die gehobene pliozäne Rumpffläche gestaltet, die mit Geschiebemergel und Löß verkleidet, im westlichen Bereich im Durchschnitt bei 150 bis 200 m über NN liegt. Westlich der Linie Hergisdorf – Ahlsdorf - Klostermansfeld tangiert das UG 1 das „Mansfelder Bergland“. Das UG 2 liegt, naturräumlich betrachtet, vollständig im Bereich der „Unteren Unstrutplatten“ (FULDA et HÜLSEMANN 1930).

Im Westen wird das UG 1 durch den natürlichen Ausstrich des Kupferschieferflözes am östlichen Harzrand begrenzt. Östlich davon haben die hangenden Gesteine der Zechsteinformation ihr Hauptverbreitungsgebiet (Karte A 1). Sie streichen infolge flacher Lagerung in einem bis zu 1 km breiten Bande aus und sind zumeist von Löß überdeckt (SCHRÖDER et FISCHER 1934). In diesen Bereichen wurden u. a. von CÖSTER et FRÜHAUF (1998), dem IPE JENA (1991) und LORENZ (1996) das Auftreten erhöhter Schwermetallbelastungen in Oberböden beschrieben.

### 3.1.1 Geomorphologie und Geologie

Die Mansfelder Mulde (Abb. 4) ist zumeist durch flachwellige Relieferungen gekennzeichnet, nur im östlich angelagerten Gebiet um die Mansfelder Seen treten größere Reliefenergien auf. Die Ursache dafür ist überwiegend in der Salztektonik der hier besonders oberflächennah anstehenden Zechsteinablagerungen (Salze, Gipse und Anhydrit) des Teutschenthaler Sattels und daraus resultierender erhöhter Subrosion zu suchen (FRÜHAUF 1999; WAGENBRETH et STEINER 1990).

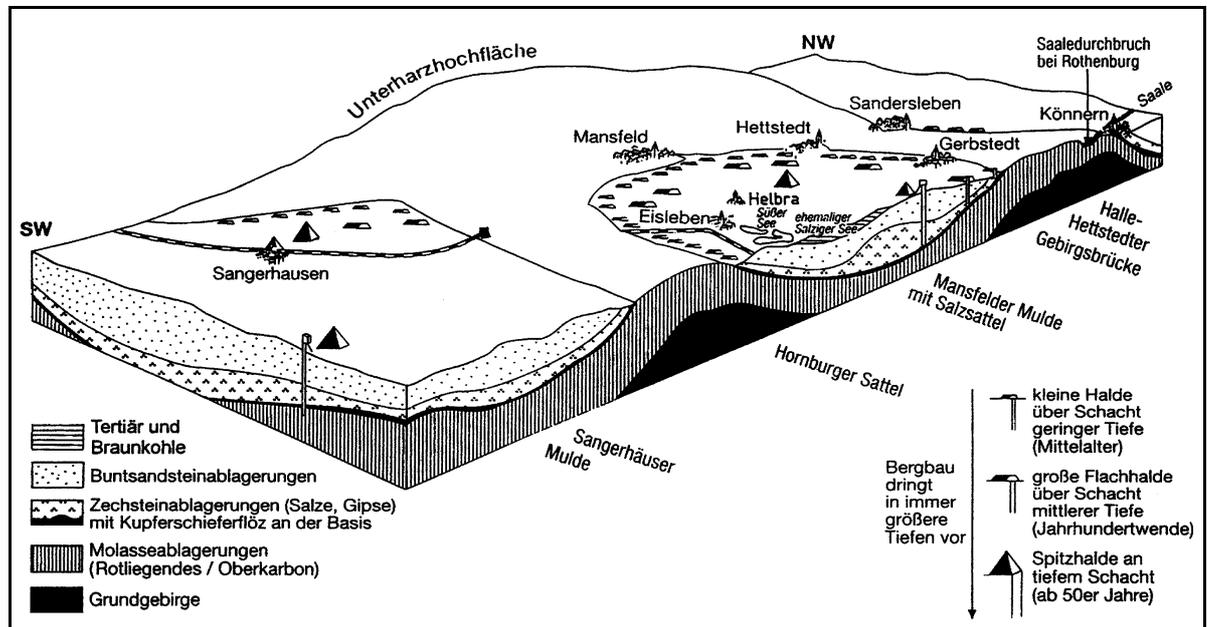


Abb. 4: Geologisches Blockbild der Mansfelder und Sangerhäuser Mulde (WAGENBRETH et STEINER 1990, geändert FRÜHAUF 1999)

Betrachtet man das Relief weiter westlich bei Ahlsdorf und Hergisdorf, so fällt die starke Zerfurchung dieses Gebietes durch die Bäche der Bösen Sieben, den Viets-, den Dippels- und den Kliebigbach mit stark ausgeprägten Kerbtälern auf (THOMAS 1980). Im Raum westlich des Kupferschieferausstrichs (Mansfelder Bergland) treten Gesteine des Rotliegenden auf, die kaum noch großen Einfluss auf das morphologische Bild ausüben (AURADA 1982).

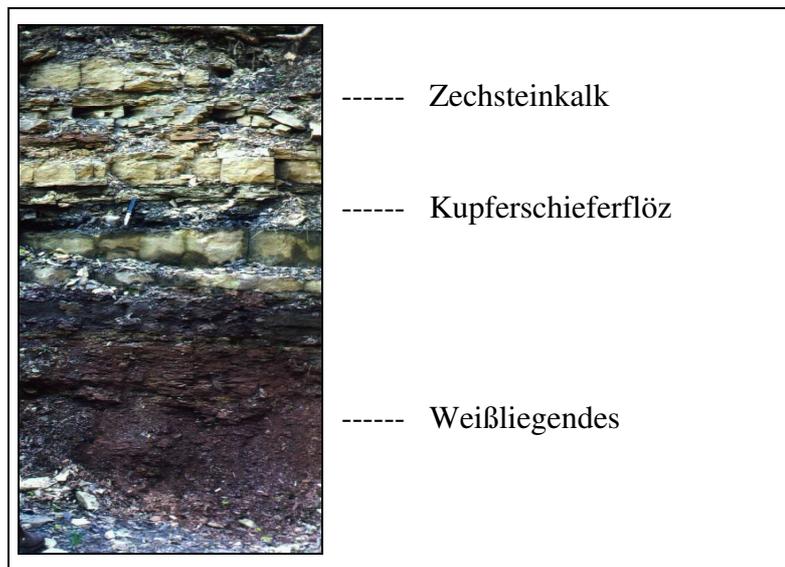
Die Mansfelder Mulde wird im Süd-Osten geologisch durch den Hornburger Sattel (ein Ausläufer des Harzes) und im Norden durch die Halle-Hettstedter-Gebirgsbrücke begrenzt. Außer im UG 1 am Westrand der Mansfelder Mulde tritt das Kupferschieferflöz u. a. im UG 2 bei Pölsfeld in der Sangerhäuser Mulde in der Nähe der Erdoberfläche auf. In den Mulden treten drei verschiedene Haldengenerationen auf, die ein Maß für die zunehmende Tiefenlage des Kupferschieferflözes sind.

„Mit der Wende zum Oberkarbon wurde durch die sudetische Orogenese das variszische Gebirge gefaltet.“ (JANKOWSKI 1995, S. 4) Es war in Schwellen und Tröge gegliedert. Die Verwitterungsprodukte des Gebirges, rote Sandsteine, Schiefertone und Konglomerate, wurden in den Trögen des Gebirges bis in die Rotliegendeszeit abgelagert. Mit dem Vordringen des Zechsteinmeeres nach Süden vor ca. 260 Mio. Jahren begann die marine Sedimentation, als deren Folge der spätere Kupferschiefer entstand (EISENHUTH et KAUTZSCH 1954; JANKOWSKI 1995; KRUMBIEGEL et SCHWAB 1982).

Die darüber lagernden, überwiegend grau gefärbten Kalksteine und Dolomite, Anhydrite und Gipse, Stein- und Kalisalze entstanden aus im Meerwasser gelösten Substanzen (KRUMBIEGEL et SCHWAB 1974). Die Zechsteinformation wird im Muldeninneren durch Sand-, Ton- und Kalksteine der Trias sowie Sande und Schotter des Tertiärs und Quartärs überlagert. Durch die stark variierende Mächtigkeit der Salze innerhalb des Zechsteins, die einerseits faziell, andererseits in Subrosionsvorgängen begründet ist, schwankt die Mächtigkeit der Zechsteinsedimente stark (VEREIN MANSFELDER BERG- UND HÜTTENLEUTE E.V. 1999).

Im Untersuchungsgebiet westlich von Ahlsdorf (ehemaliges Ahlsdorfer Revier oder Revier XVII), lagern die Zechsteinschichten dem auftauchenden Permokarbon des Harzostrandes auf. In Richtung Lagerstätten-tiefstes fallen sie entsprechend dem generellen Schichtaufbau der Mansfelder Mulde mit einem Winkel von ca. 5-10° ein (JANKOWSKI 1995).

Der Kupferschiefer ist ein feinkörniger, feinschichtiger Tonmergel bis Mergelstein von tiefschwarzer Färbung, der kohlige Bestandteile und eine Reihe sulfidischer Erzminerale, hauptsächlich Kupfererze, führt (EISENHUTH et KAUTSCH 1954; JANKOWSKI 1995; KNITZSCHKE 1995; KRUMBIEGEL et SCHWAB 1982; VEREIN MANSFELDER BERG- UND HÜTTENLEUTE E.V. 1999). Das durchschnittlich 30-40 cm mächtige Kupferschieferflöz ist dem Weißliegenden aufgelagert und wird vom Zechsteinkalk (3-6 m mächtig) bedeckt. Über dem Zechsteinkalk lagern infolge Subrosion Rückstände von ausgelaugten Gipslagern, sogenannte Asche, Rauchstein und Rauchwacke. Der darauf folgende Stinkschiefer ist in seiner Beschaffenheit dem Kupferschiefer ähnlich, enthält jedoch kein Erz (Abb. 5).



**Abb. 5: Kupferschieferausstrich am Schafberg in Ahlsdorf**

Darüber liegen weitere Schichten: Grenzanhydrit, Oberes jüngeres Steinsalz, Pegmatithydrit, Roter Salztou, Unteres jüngeres Steinsalz, Hauptanhydrit, Grauer Salztou, Kalilager, Kieseritische Übergangsschichten, Älteres Steinsalz, Basalanhydrit. Die Zechsteinformation wird von der Schichtenfolge des Buntsandsteins überlagert (JANKOWSKI 1995; KNITZSCHKE 1995). Für das Auffinden abbauwürdiger Kupferschiefergebiete im gesamten Verbreitungsraum des Kupferschiefersediments führt EISENHUTH et KAUTSCH (1954, S. 99-100) an: „Die Erfahrung, daß am Rande der Roten Fäule immer besondere Kupfererzanreicherungen im normalen Kupferschiefer auftreten, führte zu der Anschauung, daß anscheinend, entgegen der Meinung von Richter, doch nennenswerte Kupfersalze in löslicher Form in das sehr salzreiche und mit Verwesungsprodukten reichlich geschwängerte Meereswasser von Inseln und Festlandresten hereingeflossen sind. An den Vermischungszonen (Rote-Fäule-Rand) zwischen Salzwasser und Süßwasser fand eine besondere Ausfällung der Metalle Kupfer, Silber, Blei, Zink u. a. statt, welche zu den abbauwürdigen Metallanreicherungen im sonst verhältnismäßig metallarmen Kupferschiefer geführt haben.“

Nach neueren Erkenntnissen (JANKOWSKI 1995) sind die Erzanreicherungen an der Zechsteinbasis auf Metallzufuhr nach der Ablagerung des Kupferschiefers zurückzuführen. Dabei wirkte der erst schwach verfestigte und wasserreiche Faulschlamm als Barriere und Falle für aufsteigende metallreiche Tiefenwässer. Die Sulfidmineralisation erfolgte in vier Stadien (Syngeneese, Frühdiagenese, Spätdiagenese, Epigeneese) (GEOLOGISCHES LANDESAMT SACHSEN-ANHALT 2000).

Nach JANKOWSKI (1995) lässt sich in der Gesamtlagerstätte immer folgende horizontale metallogenetische Faziesabfolge nachweisen:

- Oxidationsvertaubung: Rote Fäule-Kupfer-Blei-Zink-Vererzung
- Kupfergürtel: bauwürdige Kupfervererzung im Kupferschiefer und/oder unmittelbar Hangendes
- Blei-Zink-Gürtel: kupferunbauwürdige Blei-Zink-Vererzung im Kupferschiefer.

Die vorliegenden Metallfaziesgürtel sind das Ergebnis eines mehrphasigen Metallogeneseprozesses. Zu den wichtigsten Phasen der Bildung der Lagerstätten gehören:

- die synsedimentäre schwache Buntmetallsulfidvererzung im reduzierenden sapropelitischen Fällungsmilieu während der Sedimentation des Kupferschiefers,
- die Herausbildung eines paläohydrologischen Zirkulationssystems, das oxydierende, metallhaltige Lösungen aus dem Liegenden des Kupferschiefers mobilisierte, die dann in Schwellenbereiche des Kupferschieferbeckens aufstiegen; bei ihrer Reaktion mit dem Kupferschiefersediment wurden die vorhandenen primären Metallsulfide durch Oxidation zerstört,
- die seitliche und vertikale Ausbreitung der Lösung führte durch anorganische und sulfidische Bestandteile des Kupferschiefers zur Reduktion, wobei sich an den Aufstiegszonen der oxidierenden Lösungen ein Redoxpotentialgefälle ausbildete. Dabei nimmt der Gehalt an Fällungsagentien (Sulfid-schwefel, organischer Kohlenstoff) mit zunehmender Entfernung von den Oxidationsgebieten zu.

Eine Übersicht der so entstandenen spezifischen Fällungsbedingungen im Umgebungsbereich der Roten Fäule beschreibt Tab. 8. Entsprechend der Unterschiedlichkeit der löslichen Metallsulfide gibt es regional differenzierte zementative Fällungen in Form der Metallisationsgürtel mit der bekannten horizontalen und vertikalen Abfolge  $Fe^{3+}$ - $Cu^{1+}$ - $Pb^{2+}$ - $Zn^{2+}$ - $Fe^{2+}$  (JANKOWSKI 1995).

**Tab. 8: Metallisationsgürtel in der Mansfelder Mulde**

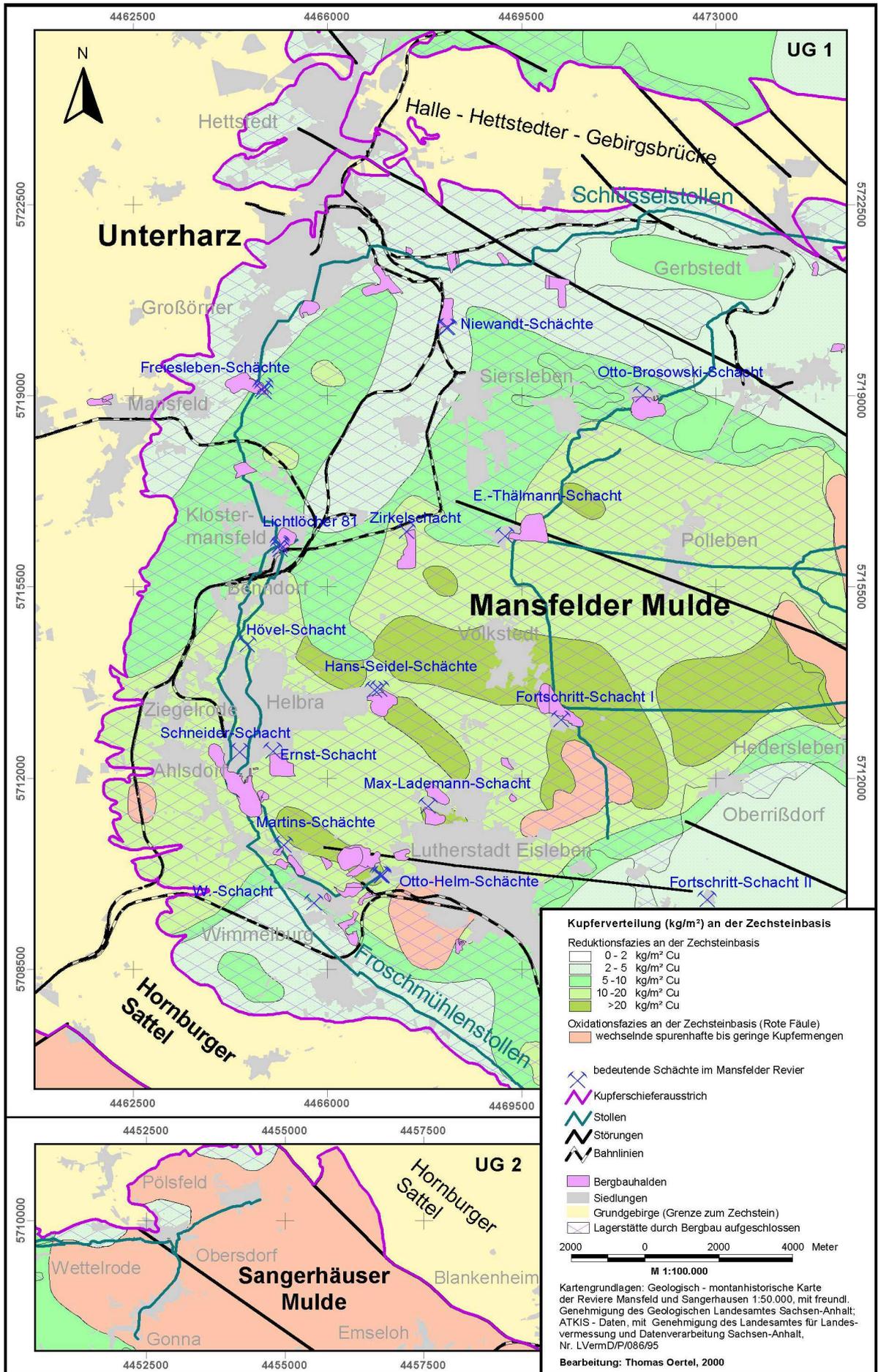
Fe <sup>3+</sup>	Se	Cu	Cu	Pb	Zn	Fe <sup>2+</sup>
	Au	Ag	Fe <sup>2+</sup>	Tl	Cd	
	U		Ni	As		
			Co	Sb		
				V		
				Mo		

**Tab. 9: Quantitative Angaben zu Hauptmetallen und Spurenmetallen im Kupferschiefer (Auswahl) (nach JANKOWSKI 1995)**

Flözlagen	Hauptmetalle (%)			Spurenmetalle (ppm)				
	Cu	Pb	Zn	Cd	Ag	Ni	Tl	As
Schwarze Berge	0,23	0,4	0,5	8	14	61	6	74
Schieferkopf	0,69	0,57	1,25	20	36	78	7	877
Kammschale	1,79	0,76	1,67	29	107	111	15	146
Grobe Lette	2,90	0,86	1,85	34	191	140	13	327
Feine Lette	2,57	0,61	0,96	18	183	147	20	855

Nach JANKOWSKI (1995) unterscheidet man entsprechend der Verteilung der Kupferminerale im Kupferschiefer: Fäule (Cu-Gehalt 0,4-0,7 %), Dachklotz (Cu-Gehalt 0,6-2,0 %), Kupferschiefererz (Haupterz; Cu-Gehalt 2-5 %) und Sanderz (Cu-Gehalt ca. 5 %). In den ersten Jahren der Bergbautätigkeit nutzte man lediglich die unteren 20 cm des Kupferschiefers, erst später begann man mit dem Abbau von Hangenderz (Fäule und Dachklotz). Die Abbau- und Schmelzwürdigkeit der Kupferkonzentrationen beschränkt sich auf ein von NO nach SW verlaufendes Kerngebiet, das von kupferführendem Blei- und Zinkschiefer flankiert wird. Dieses Kerngebiet stellte die Grundlage der Bergbautätigkeit im Mansfelder Land dar (KNITZSCHKE 1995). Karte 2 beschreibt die geologisch-montanhistorischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten.

Karte 2: Geologisch-montanhistorische Karte der Untersuchungsgebiete



### 3.1.2 Böden

Die Grundlage der Bodenbildung im UG 1 stellen fast flächendeckend der in der Weichselzeit abgelagerte Löß oder Lößderivate dar. Die durchschnittlichen Mächtigkeiten der Lößdecke betragen zwischen 0,8-3 m; lokal können bis zu ca. 10 m erreicht werden (HAASE et al. 1970).

Die unter semiariden Bedingungen entstandenen humusreichen, fruchtbaren Schwarz- und gekappten Parabraunerden sind heute infolge des Klimawandels und der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung fast ausschließlich in degradierter Form (verbraunte Schwarzerden, Pararendzina) anzutreffen (THOMAS 1980). Charakteristisch in den Schwarzerdeböden sind die vergleichsweise hohen Anteile an Grobschluff (40-65 %) und Ton (18-25 %), die ein gutes Wasserhaltevermögen und gute Perkulationsbedingungen ermöglichen (THOMAS 1983). Die Standortregionaltypen in den UG nach der MMK zeigt die Karte 3.

Am Westrand der Mansfelder Mulde im UG 1 bei Wimmelburg dominieren vernässungsfreie Löß-Fahlerden/Parabraunerden (Lö3a3) sowie Bergton- u. Berglehm-Rendzina-Standorte (V3a3). Westlich von Hergisdorf und Ahlsdorf herrschen Decklöß-Fahlerden/Parabraunerden (Lö4c1), Löß-Braunstaugleye über Gestein und Berglehm-Braunerden der Hangkomplexe (Lö6c8) vor. In den Zuflusstälern der Bösen Sieben (Goldgrundbachtal, Kliebigbachtal, Dippelsbachtal) trifft man überwiegend auf Schuttlehm und Löß-Rendzinen der Hänge mit vernässten Böden der Tälchen (V3c5).

Um Helbra, Benndorf, Klostermansfeld und Großörner dominieren wieder Löß-Fahlerden/Parabraunerden (Lö3a3) vor verschiedenen Lö6c- und V2c-Standorten. Östlich von Hettstedt, um Siersleben und östlich von Oberrißdorf existieren ertragreiche Löß-Schwarzerden (Lö1a1). Besonders auffällig ist im UG 1 ein bedeutender Anteil von Kippstandorten, die im Bereich der Bergbaurelikte lokalisiert sind.

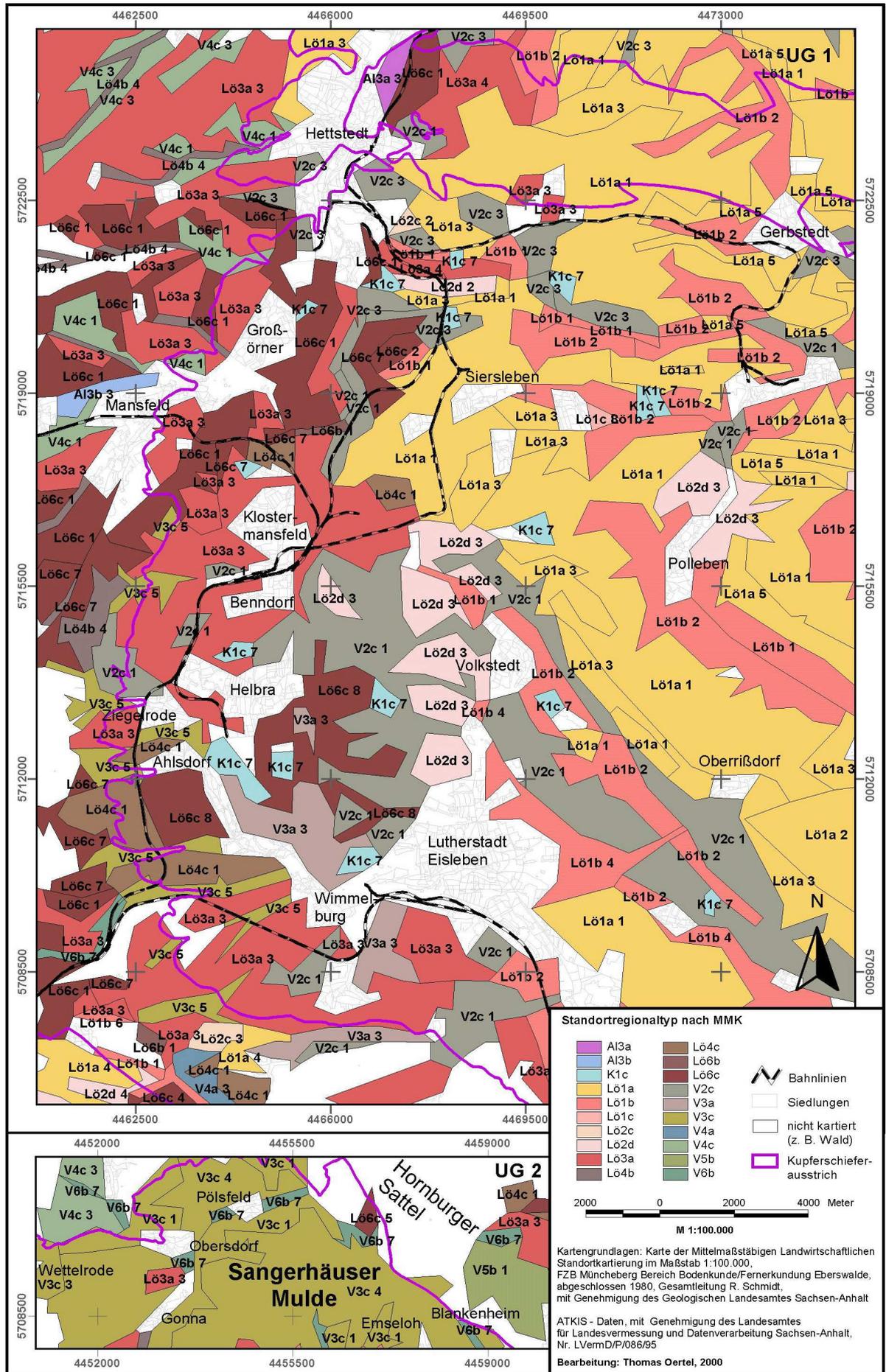
In Kenntnis der Schwermetallbelastungen der Böden im Mansfelder Land nach den Ergebnissen von (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991; IPE JENA 1991; NOELL 1993) muss für eine objektive Interpretation der zum Teil hohen Konzentrationen beachtet werden, dass die im Mansfelder Land vorkommenden Lößlehm-Parabraunerden gegenüber Schwermetallen günstige Speicherpotentiale (hohe Qualität und Quantität der Humus-/Tonteilchen sowie pedogener Oxide) besitzen (FRÜHAUF 1999). Die von ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) und SCHMIDT (2000) ermittelten zumeist neutralen bzw. alkalischen Bodenreaktionen der Ackerböden im Mansfelder Land sind nach FRÜHAUF (1999) weitere bodenökologische Gunstfaktoren, da die Desorption von sensiblen Metallen wie z. B. Cadmium kaum ermöglicht wird (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998). Die relativ hohen Gehalte der Ap-Horizonte der Ackerböden an organischer Substanz liegen zwischen 1-3 %, bei Waldböden betragen sie zwischen 5-10 % (THOMAS 1980). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Böden im UG 1 überwiegend eine hohe natürliche Leistungsfähigkeit aufweisen. Im UG 2 in der Sangerhäuser Mulde findet man Schuttlehm-Rendzinen und Löß-Rendzinen bis Parabraunerden der Plateaus und der Hänge (V3c4) bzw. Schuttlehm- und Fels-Rendzinen der Hänge (V3c1) vor. Berglöß- und Berglehm-Amphigleye der Talanfangsmulden (V6b7) und Löß-Fahlerden/Parabraunerden (Lö3a3) treten nur vereinzelt im UG 2 auf.

**Tab. 10: Substrattypen nach der MMK im Verlauf des Kupferschieferausstrichs im UG 1 (in km)**

Lö1a 1	Lö1a 3	Lö1a 5	Lö1b 1	Lö1b 2	Lö3a 3	Lö3a 4	Lö4b 4	Lö4c 1	<b>Lö gesamt</b>
9,6	4,3	1,1	1,0	3,6	14,2	0,4	0,5	3,7	<b>38,5</b>
V2c 1	V2c 3	V3a 3	V3c 5	V4c 1	V6c 1	<b>V gesamt</b>			<b>Siedlungen/Wald</b>
3,9	2,4	0,4	6,2	3,6	3,3	<b>19,8</b>			<b>19,6</b>

Der Kupferschieferausstrich im UG nimmt nach Berechnungen im Maßstab 1:50.000 im Bereich der Lößböden (Lö gesamt) eine Länge von ca. 38,5 km ein (Tab. 10). Weiterhin verlaufen nach der Karte 3 im UG 1 ca. 19,8 km des Kupferschieferausstrichs im Bereich der Verwitterungsböden (V gesamt). 19,6 km kommen im Bereich von Siedlungen und Wald vor.

Karte 3: Bodenverhältnisse der Untersuchungsgebiete nach der MMK



Im UG 2 streicht das Kupferschieferflöz überwiegend im Bereich von Verwitterungsböden aus (V3c 1 ca. 4 km, V3c 4 ca. 2,6 km). Waldbereiche am Hornburger Sattel und Siedlungsbereiche in Obersdorf repräsentieren einen Längenabschnitt von ca. 5,6 km am Kupferschieferausstrich. Nur ein sehr geringer Streckenanteil (214 m) verläuft im UG 2 im Bereich von Lößböden (Lö6c 5).

Die mittelalterlichen Waldrodungen mit ihrem Holzbedarf für Schmelzhütten und der Schaffung von landwirtschaftlichen Nutzflächen entzogen nach RADKAU (2000) die schützende Vegetationsdecke des Bodens, wodurch sich für Wind und Wasser großräumige Angriffsflächen boten. Infolge der Intensivierung der Landwirtschaft kam es zu einer erheblichen Verdichtung des Bodens, wodurch sich die Oberflächenabflussbildung verstärkte. Vergrößerungen der Schläge sowie Veränderung der Hangneigungs- und Hanglängenverhältnisse infolge von Flurbereinigungen sind weitere negative Folgen für die Böden durch die großflächige landwirtschaftliche Nutzung.

Ein nicht zu unterschätzendes Problem stellt die Bodenerosion dar (SCHMIDT 1993; THOMAS 1980). Nach Untersuchungen im Einzugsgebiet des Süßen Sees stellt THOMAS (1980) fest: „Am stärksten erosionsgefährdet sind die Flächen westlich Hergisdorf, und zwar da, wo die Ackerflächen auf einer Strecke von 2 km mit einer Hangneigung von 4-11°, auf kleineren Flächen auch bis 15°, zur Ortslage hin abfallen. Sowohl hier als auch an den übrigen erosionsdisponierten Stellen im Bereich der drei Quellbäche“ (Vietsbach, Dippelsbach und Kliebigbach) „ist die Lößdecke bereits abgetragen. Es stehen oberflächlich Rotliegend-Konglomerate und -Sandsteine an.“ Aufgrund der Leelage des Untersuchungsgebietes ergeben sich bei sommerlichen Starkniederschlägen weitere erosionsbegünstigende Verhältnisse.

### 3.1.3 Klimatologie und Geohydrologie

Das Gebiet der Mansfelder Mulde liegt im Regenschatten des Harzes und des Thüringer Waldes und damit im Zentrum des Mitteldeutschen Trockengebietes. Der Ort Aseleben am Süßen See, der sich nur wenige Kilometer östlich des UG 1 befindet, hat mit 429 mm/a (Messreihe von 1901-1950) bzw. 466 mm/a (Messreihe von 1961-1990) (METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR 1961; PFÜTZNER et al. 1994) die geringste Niederschlagssumme innerhalb des o. g. Trockengebietes. Nach Westen bis hin zum UG 2 bei Pölsfeld nehmen die Niederschlagsmengen aufgrund der Höhenlage zu. Der Juli ist der regenreichste, der Februar der niederschlagsärmste Monat. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei ca. 8,6°C, wobei der Juli mit 15-17° C die höchste, der Januar mit 0 bis -2° C die niedrigste Monatsmitteltemperatur aufweist (MÜCKE 1982). Durch hohe reale Verdunstung (450-460 mm) und hohe Feldkapazität der Böden ist in den Untersuchungsgebieten kaum mit Grundwasserneubildung zu rechnen (MANZ 1997).

Die Hauptentwässerung des UG 1 erfolgt nach Osten durch die Böse Sieben und z. T. durch die Schlenze bis zur Saale. Im Nordwesten entwässert die Wipper das UG 1. Im UG 2 entwässert die Gonna, die südlich von Sangerhausen in die Helme mündet (Karte 4).

Das Mansfelder Land zeichnet sich durch modifizierende Subrosionserscheinungen aus, was sich auf Hydrographie, Hydrogeologie, Hydrologie und wasserwirtschaftliche Verhältnisse auswirkt (VEREIN MANSFELDER BERG- UND HÜTTENLEUTE E.V. 1999).

Den wichtigsten Grundwasserträger der Mansfelder Mulde bildet der Mittlere Buntsandstein (AURADA 1982). Hydrogeologisch gefährdete Bereiche des Kupferschieferbergbaus hinsichtlich deren Gewinnung sind Bereiche zwischen dem Ausgehenden des Kupferschiefers und dem subterranean Ausstrich des Staßfurtsteinsalzes. Diese Bereiche sind extrem verkarstet. Die unterirdischen Wasserbewegungen erfolgen hauptsächlich vom Ausgehenden in Richtung der fallenden Schichten zum Muldeninneren hin. Durch tektonische Störungen kommt es jedoch im Untergrund besonders an den Steinsalzverbreitungsgrenzen immer wieder zu streichenden Wasserbewegungen. Wassersysteme, die mit der Tagesoberfläche in Verbindung stehen (offene Systeme), bargen für den Bergbau die Gefahr von Wassereinbrüchen (VEREIN MANSFELDER BERG- UND HÜTTENLEUTE E.V. 1999).

### 3.1.4 Vegetation und Flächennutzung

Zwischen den Vorbergen des östlichen Unterharzes (Mansfelder Bergland) und dem Östlichen Harzvorland kann nach der pflanzengeographischen Gliederung ein west-östliches Florengefälle festgestellt werden. Ozeanisch-subozeanischen Waldpflanzen der unteren und mittleren Bergstufe des Harzes (Buchen-, Eichen-Buchen- und Eichen-Hainbuchen-Wälder), die im Bereich des Mansfelder Lößackerhügellandes ihre östliche Verbreitungsgrenze erreichen, stehen im Osten kontinentale und subkontinentale Steppen-, Waldsteppen-, Salzpflanzen sowie Schuttpflanzen in Siedlungsnähe gegenüber. Im Bereich des Mansfelder Hügellandes sind nur noch in Resten winterlindenreiche Traubeneichen-Hainbuchen-Wälder erhalten (WEINERT 1982). Der Saum der Mansfelder Mulde ist durch angrenzende Halbtrocken- und Trockenrasenpflanzen und Sträucher gekennzeichnet (SCHUBERT 1954).

Als Besonderheiten im Untersuchungsgebiet sind die an schwermetallhaltige Böden angepassten Pflanzenarten anzusehen, die im Ausstrichbereich des Kupferschieferflözes bzw. auf verschiedenen Halden des ehemaligen Kupferschieferbergbaus anzutreffen sind und die in Konkurrenz zu den Halbtrocken- und Trockenrasenpflanzen stehen. Dazu gehören die Gemeine Lichtnelke (*Silene vulgaris* var. *Humilis*), die Frühlingsmiere oder das Kupferblümchen (*Minuartia verna* subsp. *hercynica*) und verschiedene Formen der Grasnelken (*Armeria maritima* subsp. *halleri* und subsp. *hornburgeris*) (MAHN et al. 1986; SCHUBERT 1953/54).

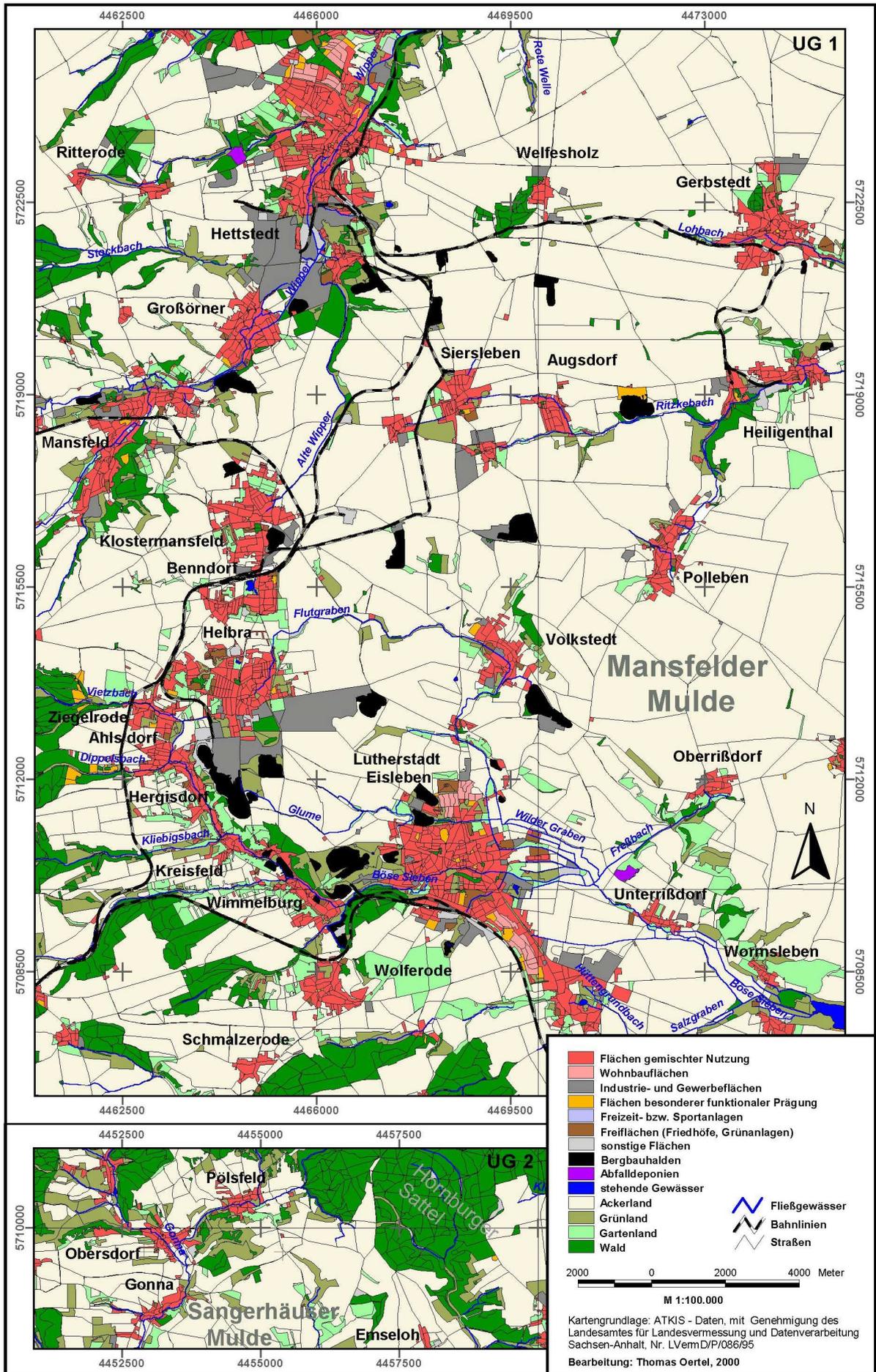
Aufgrund der klimatischen, pedologischen und geologischen Bedingungen ist das Mansfelder Land seit je her durch intensive Landwirtschaft wie auch durch den Kupferschieferbergbau gekennzeichnet, was jedoch Nutzungskonflikte mit sich bringt und die Landschaft nachhaltig stark beeinflusst hat.

Den größten Flächenanteil in der Mansfelder Mulde nehmen landwirtschaftliche Nutzflächen ein, die vorrangig durch den Anbau von Getreide, Raps, Erbsen, Zuckerrüben, Kartoffeln und der Futterpflanze Luzerne bestimmt sind. Der Grünlandanteil ist sehr gering, bedingt durch die geringe Grundwassernähe und die Niederschlagsarmut der Region. Nur da, wo sich heute kein mechanischer Ackerbau betreiben lässt (z. B. in Bereichen starker Hänge), findet man noch Grünland vor, das überwiegend extensiv bewirtschaftet wird.

Durch eine für den ländlichen Raum ehemals relativ hohe Bevölkerungsdichte von 232 Einwohner/km<sup>2</sup> (NEUB et ZÜHLKE 1982), die u. a. aufgrund des Arbeitskräftepotentials für den Bergbau und die Weiterverarbeitung des Kupfererzes entstand, war und ist der Anteil der Siedlungsflächen am Westrand der Mansfelder Mulde vergleichsweise hoch. Heute ist die Lutherstadt Eisleben mit 22.348 Einwohnern und einer Bevölkerungsdichte von 560 Einwohner/km<sup>2</sup> das kulturelle, administrative und wirtschaftliche Zentrum für den Landkreis Mansfelder Land, der 112.453 Einwohner zählt. Als besondere Art der Flächennutzung im Mansfelder Land müssen die zahlreichen Halden, Deponie- bzw. Gewerbe- und Industrieflächen erwähnt werden. Gewerbliche und industrielle Schwerpunkte finden sich um Eisleben und Hettstedt sowie bei Helbra. Im Umfeld des Süßen Sees sowie östlich von Wolferode existieren größere zusammenhängende Gartenlandflächen, die vorrangig durch den Anbau von Obst (Äpfel, Kirschen etc.) geprägt sind.

Große Teile des UG 1 liegen im ehemaligen Landkreis Eisleben, dessen Waldanteil mit ca. 6% (1994) weit unter bundesdeutschem Durchschnitt von ca. 29 % (1997) liegt. Das UG 2 um Pölsfeld wird ebenso wie das UG 1 von der Ackernutzung dominiert. Durch die Ausläufer des Südharzes und des Hornburger Sattels ist der Waldanteil im UG 2 jedoch sehr viel größer als im UG 1. Auch der Anteil des Grünlandes an der Flächennutzung ist hier größer, Gewerbe- und Industrieflächen sind jedoch selten. Weitere Informationen zur Flächennutzung sind der Karte 4 zu entnehmen.

Karte 4: Flächennutzung der Untersuchungsgebiete



## 3.2 Die Kupferschiefergewinnung im Mansfelder Land und daraus resultierende Umweltfolgen

### 3.2.1 Entwicklungsgeschichte des Bergbaus

Der ehemalige Mansfelder Kupferschieferbergbau lässt auf eine über tausendjährige Tradition zurückblicken und gehört somit zu den bedeutendsten und ältesten Montanindustrien der Welt. Er erfolgte sowohl in der Mansfelder als auch in der Sangerhäuser Mulde, jedoch zu unterschiedlichen Zeiten und unter verschiedenen Hoheiten. Im Wesentlichen soll die Geschichte des Kupferbergbaus in der Mansfelder Mulde behandelt werden, die bis 1969 reicht (JANKOWSKI 1995; VEREIN MANSFELDER BERG- UND HÜTTENLEUTE E.V. 1999). Am Ausstrichsbereich der Zechsteinablagerungen setzte im Mansfelder Land ab ca. 1199 zielgerichtet der Kupferschieferbergbau an und ein. Die Abbautätigkeit begann bei Hettstedt und erweiterte sich in kurzer Zeit auf fast den gesamten Bereich des Kupferschieferausstrichs über Mansfeld, Benndorf, Hergisdorf, Wimmelburg bis Wolferode (AGRICOLA 1980; JANKOWSKI 1995; JANKOWSKI 1999).

Natürlich haben damals die ersten Bergleute die Standorte genutzt, an denen das Erz an der Oberfläche lag, so z. B. in den Tälern der Bachzuflüsse der Bösen Sieben (JANKOWSKI 1995; OERTEL et FRÜHAUF 2000). „Tiefbauarbeiten westlich Ahlsdorf/Helbra in den 1980er und industriearchäologische Arbeiten Anfang der 1990er Jahre bei Wettelrode legten Spuren der Gewinnung des Kupferschiefers von seinem Tagesaustritt bis ca. 2 m Teufe in offenen Gruben, die mit dem Abraum des benachbarten Schurfes verhüllt wurden, frei“ (VEREIN MANSFELDER BERG- UND HÜTTENLEUTE E.V. 1999, S. 48).

Danach ging man zum „Duckelbergbau“ über, was bedeutete, dass „die Lagerstätte ... durch viele kurze, eng nebeneinander liegende Schächte abgebaut und damit ein weitläufiges Streckensystem unter Tage vermieden wurde“ (GRUNOW 1995, S. 305).

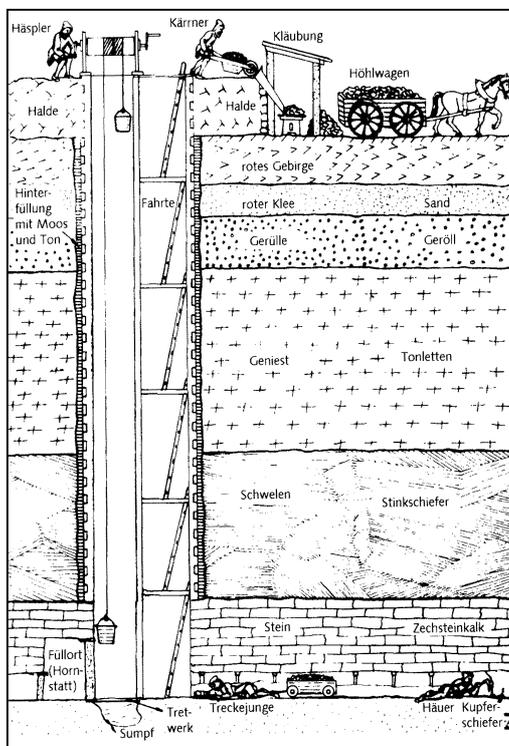


Abb. 6: Förderung des Kupferschiefers im Tiefbau (JANKOWSKI 1995)

Die frühmittelalterlichen Bergleute, die Teile dieser Kupferschieferabbaubereiche überprägten, wussten zudem recht gut zwischen den reicheren und ärmeren Flözabschnitten (Rote Fäule) zu unterscheiden. Durch anthropogene Tätigkeiten am Ausstrichsbereich entstanden in diesen Gebieten so eine Vielzahl von Gruben (weit über 1000) und sehr flache Halden, die nach Aussagen des ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) einen geringen Abstand zueinander aufwiesen und durch die Landwirtschaft später beseitigt wurden. Erst nachdem diese Gunstbereiche weitestgehend erschlossen waren, begannen die Bergleute durch unterirdische Stollen dem abtauchenden Flöz zu folgen. Das mit den damaligen Verhüttungstechnologien nicht nutzbare Material schüttete man um die Gruben oder Luftschächte zu Kleinsthalden auf. Der ständig wachsende Kupferbedarf, u. a. initiiert durch die Waffenproduktion, führte dazu, dass immer größere Bergbaufelder erschlossen wurden und sich der Tiefbau (Abb. 6) zunehmend durchsetzte (BODE 1996; JANKOWSKI 1999).

Die Grafschaft Mansfeld produzierte zwischen 1450 und 1470 jährlich 20.000 Zentner und 1550 bereits 40.000 Zentner Garkupfer. Mitte des 17. Jahrhunderts, während des 30jährigen Krieges, kam der Kupfer-

schieferbergbau kurzzeitig zum Erliegen und setzte erst im Jahr 1771 mit der vom sächsischen Kurfürsten verkündeten Freilassung des Mansfelder Bergbaus wieder ein (HOFFMANN 1925; WESTERMANN 1971).

Die erste deutsche, im Bergbau eingesetzte Dampfmaschine wurde 1785 im Mansfelder Revier für die Wasserhaltung genutzt, aber erst nach 1820 kamen mehrere dieser Maschinen zum Einsatz. In den Verhüttungseinrichtungen ging man immer mehr zur Koksfeuerung über und durch einen neuartigen Röst- und Laugeprozess - den Ziervogelprozess - erhöhte sich die Produktion sprunghaft auf 997,5 t im Jahre 1850 (EIGENDORF 1982). Den Kleinhalden folgten Ende des 19. Jahrhunderts die Flachhalden, die durch die erhöhte Materialförderung aus dem Untergrund infolge zunehmender Abbautiefe ein sehr viel größeres Haldenvolumen aufweisen (FIEDLER 1990).



Die spätmittelalterlichen, aus zahlreichen Ausschlägen bestehenden, zum größten Teil mit Vegetation bestandenen und stark verwitterten Kleinhalden prägen das Kulturlandschaftsbild entlang des gesamten Ostharrandes (Abb. 7). Diese Halden weisen heute ein sehr viel höheres Schwermetallpotential als die wesentlich jüngeren Flach- oder gar Spitzkegelhalden auf (CÖSTER 1993; FRÜHAUF 1995; SCHMIDT 2000).

**Abb. 7: Kleinhaldenlandschaft bei Hergisdorf (Foto: Oertel 1997)**

Kupfergehalte von 800-9000 mg/kg Feinboden, die hier häufig anzutreffen sind, kommen bei den anderen Haldentypen kaum vor. Auf detaillierte Ursachen hierfür wird bei FRÜHAUF et SCHMIDT (1997) eingegangen.

Die Materialdefizite, die aufgrund der Volumina der Spitzkegelhalden und des verhütteten Erzes im Untergrund entstanden und heute überwiegend mit Wasser verfüllt sind, bieten nun mehr zahlreiche Angriffspunkte für eine sich verstärkende Subrosion (Abb. 8).



**Abb. 8: Spitzkegelhalde des Otto-Brosowski-Schachtes bei Gerbstedt (Foto: Oertel 1997)**

### 3.2.2 Direkte und indirekte Umweltfolgen der Kupfergewinnung

Eine direkte Auswirkung der Bergbautätigkeit im Mansfelder Land ist die Überdeckung von wertvollen Kultur- und Waldböden (mit Bodenwertzahlen bis zu 90) durch Abraum- und Schlackehalden. Neben den oberirdisch abgelagerten Halden verschiedenster Größe sind direkte Umweltschädigungen des Kupferschieferbergbaues vor allem in der Schaffung von unterirdischen Hohlräumen durch den Abbau des Erzes und von taubem Gestein zu sehen. Diese Materialdefizite im Untergrund bewirken zum Teil massive geologische Instabilitäten, die sich in zahlreichen Erdfällen (Rollsdorf, Gerbstedt) und Senkungen der Erdoberfläche (Eisleben, Hettstedt, Grunddörfer) und damit Straßen- und Gebäudeschäden bemerkbar machen.

Die Ursachen für unterirdische Hohlräume resultieren auch aus großflächigen Salzablaugungen, die durch die Wasserhaushaltung der Bergbautätigkeit initiiert wurden. So wurden im Mansfelder Land nach NEUB et ZÜHLKE (1982) in einem Zeitraum von 84 Jahren 226 Mio. t Steinsalz, die einem (theoretischen) Volumen von 98 Mio. m<sup>3</sup> entsprechen würden, gelöst und durch die Grubenwasserhaltung entfernt. Über den zur Wasserhaushaltung in der Mansfelder Mulde errichteten „Schlüsselstollen“ gelangten zwischen 1884 und 1968 ca. 1,55 Milliarden m<sup>3</sup> Salzwasser mit einem durchschnittlichen Gehalt von 170g/NaCl in die Schlenze und damit in die Saale (NEUB et ZÜHLKE 1982; FRÜHAUF 1999).

Nach JANKOWSKI (1996) besteht eine Umweltgefährdung durch die Mansfelder Kupferschieferbergbauhalden „bestenfalls durch den mureähnlichen Transport des zerborstenen Haldenmaterials bzw. durch Unachtsamkeit entstandene Haldenbrände der Schieferhalden ... . Die kombinierten Halden der Kali-Kupferschächte Wolf (Fortschritt I) und Dittrich-Wachler (Fortschritt II) können Versalzungen der Umwelt hervorrufen, ebenso wie die Sangerhäuser Halden. Das größte Übel jedoch für die Umwelt entsteht, wenn die zum Abtrag freigegebenen Halden ... durch das Abtragen der Halden in einem Zustand trotz Rekultivierungsverpflichtung hinterlassen werden, der landschaftsschädigend ist.“ (JANKOWSKI 1996, S. 92).

KLETTE (1996, S. 100) benennt folgende Quellen und Gründe der Umweltbelastungen durch die Kupferproduktion im Mansfelder Land:

- „Verzettelung von feinkörnigen und staubförmigen Bestandteilen der Vorlaufmaterialien, Zwischenprodukte, Endprodukte bei Transport und Lagerung (Feinerz, Kupferkonzentrate, Rücklaufmaterialien, Flugstäube etc.).
- Fehlende oder nichtausreichende Gasabreinigungskapazitäten.
- Produktionsstörungen an den Gasabreinigungsanlagen und Öfen.
- Ineffiziente Abgasreinigungstechnik“.

Die in den ausgelagerten Schlacken der Verhüttungsprozesse enthaltenen Schwermetalle sind aufgrund des hohen Kieselsäuregehaltes relativ stark gebunden und sind somit auch durch Verwitterung nicht zu mobilisieren (KLETTE 1996). Nach SCHRECK (1996; 1997) hat der Wasserpfad (Auslaugung durch Niederschlagswasser) bei der Freisetzung von Schwermetallen aus den Bergbauhalden die größte Bedeutung. Jedoch konnte eine Belastung des Sicker- und Grundwassers durch schwermetallkontaminierte Böden nur im unmittelbaren Umfeld der Betriebsanlagen festgestellt werden (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991).

In der Kupfergewinnung im Mansfelder Land spielten neben den gasförmigen Luftschadstoffen im allgemeinen überwiegend schwermetallhaltige Stäube eine bedeutende Rolle, die während des Verhüttungsprozesses aufgrund ungenügender Reinigungs-, Entstaubungs- und Filteranlagen über den Luftpfad abgegeben wurden und zu beträchtlichen Kontaminationen insbesondere der Böden und Pflanzen führten (FRÜHAUF 1999). Da die Böden im Untersuchungsgebiet ein sehr gutes Sorptionsvermögen besitzen, sind in ihnen auch heute noch, 10 Jahre nach der Einstellung der industriellen Verarbeitung des Kupfers, erheblich hohe Gehalte an Schwermetallen nachzuweisen (SCHMIDT 2000).

### 3.3 Kenntnisstand über Boden- und Pflanzenbelastungen durch Schwermetalle infolge der Erzgewinnung und -verarbeitung im Mansfelder Land

#### 3.3.1 Ausgewählte Ergebnisse von nach 1990 erstellten Umweltgutachten

Infolge der Bergbautätigkeit und der Verarbeitung des Kupferschiefers im Mansfelder Land wurden vor allem die Oberböden in der Umgebung der Hütten mit Schwermetallen belastet. Um die Auswirkungen der Kupferproduktion im Mansfelder Land nach der Einstellung der Bergbautätigkeit 1990 erfassen zu können, wurde die ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) mit dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Umweltsanierung des Großraumes Mansfeld“ beauftragt.

Hierbei wurde eine große Menge von Oberbodenmischproben um die ehemaligen Zentren der Verarbeitung des Kupferschiefers August-Bebel-Hütte Helbra, Kupfer-Silber-Hütte Hettstedt, Karl-Liebknecht-Hütte Eisleben u. a. auf die Schwermetalle Cu, Pb, Cd, Zn und Hg analysiert, wobei Konzentrationen ermittelt wurden, welche die tolerierbaren Richtwerte für Schadstoffe nach KLOKE bzw. die Vorsorgewerte für Metalle nach BBODSCHG (1998) im Boden teilweise mehrfach überschreiten (Tab. A 2).

Die zuletzt betriebenen Großanlagen der Verhüttung verursachten durch Schadstoffausstöße, überwiegend in Form schwermetallhaltiger Stäube und bei Prozessen anfallende schwermetallhaltige Reststoffe, lokal begrenzt erhebliche Kontaminationen (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991).

„Die im Zuge dieser Studie großflächig und rasterförmig angelegten Beprobungen der Böden des Mansfelder Landes führen zu dem Ergebnis, dass Belastungen oberhalb der üblicherweise beobachteten geogen und anthropogen verursachten Hintergrundbelastung nur im unmittelbaren Umfeld der Hüttenstandorte Eisleben, Helbra, Hettstedt und Mansfeld bestehen. Je nach Geländemorphologie und Windverhältnissen beträgt die Ausdehnung der belasteten Flächen 1-7 km und äußert sich in erster Linie in den erhöhten Gehalten der Schwermetalle Pb, As, Cd, Cu und Zn“ (Kurzfassung ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991, S. 5). Als unerwartet gering erweisen sich nach Angaben der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) die großflächigen Belastungen der Böden, die außerhalb des oben genannten Einflussbereiches der Hüttenstandorte liegen.

Da die Studie der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) stark auf die Erfassung der zweifelsohne bedeutenden Auswirkungen atmogener Schwermetallquellen ausgerichtet war, wurden spezifische Untersuchungen zu lithogenen Schwermetallquellen (z. B. zu Kupferschieferhalden), die ebenso Ursachen für Bodenbelastungen darstellen, vernachlässigt. Zur Problematik der Bergbaustandorte wird in der Zusammenfassung der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) lediglich über „die Gefahren der Salzauslaugung und daraus resultierende Ereignisse (Versalzung von Grund- und Oberflächengewässern, Erdfallexposition)“ berichtet.

Die Ergebnisse der Studie der NOELL-UMWELTDIENSTE GMBH (1993) stellen die Umweltsituation insbesondere auf den Betriebsgeländen der kupferverarbeitenden Betriebe dar. Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben untersuchte dabei eine Gesamtfläche von ca. 626 ha, bei dem die chemische Bodenbelastung, die radioaktive Belastung und Bodengasmessungen auf Deponien Untersuchungsschwerpunkte darstellten. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die oberflächennahen Bodenschichten auf den Geländen der Hütten hohe Schwermetallgehalte wie beispielsweise Cu, Pb, Zn und teilweise auch As, Cd und Ni aufweisen, die mit zunehmender Bodentiefe abschwächen. Der Austrag dieser Schadstoffe erfolgte zum einen hauptsächlich durch Emission über die Schornsteine und zum anderen durch unsachgemäße Abfüllung, den Transport und die Zwischenlagerung von Ab- und Nebenprodukten der Verhüttungsprozesse. Die Böden im Umfeld der Schächte sind durch die Ablagerung von Flugstäuben aus Kläuberställen und durch Bergematerial mäßig bis deutlich durch Cu, Pb und Zn belastet. Lokal treten erhöhte As- und Cd-Werte auf. Im Rahmen der radiologischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass im Bereich des ausstreichenden Kupferschieferflözes ein geogen bedingt geringfügig erhöhtes Radioakti-

vitätpotential auftritt, in den Hüttengeländen jedoch erhöhte bis hohe Werte aufgrund der Verhüttung des Kupferschiefers und der damit verbundenen Anreicherungsprozesse vorherrschen (NOELL-UMWELT-DIENSTE GMBH 1993).

Die Studie des INSTITUTES FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND ÖKOTOXIKOLOGIE JENA (1991), unter Leitung von Prof. Grün, zu Untersuchungen zum Schwermetalleintrag in die Nahrungskette im Mansfelder Land sollte u. a. Gefahrenpotentiale von landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden im Mansfelder Land aufzeigen, die neben der geogenen Grundlast bis in die jüngste Gegenwart einem verstärkten Schwermetalleintrag anthropogenen Ursprungs ausgesetzt waren. Schwerpunkte der Bodenprobenahme waren die Hüttenbetriebe in Hettstedt (Kupfer-Silber-Hütte), Helbra (August-Bebel-Hütte, 1990 stillgelegt) und Eisleben (Karl-Liebnecht-Hütte, 1970 stillgelegt). Von den Emittenten aus wurden strahlenförmig (acht Strahlen je Zentrum) Bodenproben bis 10 km Entfernung (Eisleben 5 km) entnommen. Im Ergebnis dieser Studie wiesen insbesondere die Böden in der näheren Umgebung der August-Bebel-Hütte aber auch die Böden in den Orten Ahlsdorf und Hergisdorf erhebliche Schwermetallkontaminationen auf. Mit zunehmender Entfernung von den Emittenten nahmen die Schwermetallgehalte zumeist deutlich ab (IPE JENA 1991).

Weiterhin wurde festgestellt, dass die Böden in Kleingartenanlagen und Hausgärten im Mansfelder Land oftmals stärker als die landwirtschaftlichen Flächen mit Schwermetallen kontaminiert sind. Als besonders gravierend sind dabei die toxikologisch relevanten Cadmiumbelastungen von Böden aus Kleingartenanlagen, Hausgärten, Gartenbaubetrieben und Kindereinrichtungen der Stadt Hettstedt zu nennen. Außerhalb der Ortslagen waren die für die landwirtschaftliche Produktion genutzten Böden der Pflanzenbaubetriebe in weit geringerem Umfang mit Schwermetallen kontaminiert, obwohl auch auf diesen Flächen die Gehalte oftmals über den „Normalgehalten“ der Gebiete lagen.

Das IPE JENA (1991) stellt fest, dass Blattgemüse (Salat, Spinat, Grünkohl), Küchenkräuter (Petersilie, Sellerieblatt) und bestimmte Wurzelgemüsearten (Knollensellerie, Schwarzwurzel, z. T. Möhren) aus den Gärten in den Ortslagen teilweise erheblich mit den toxikologisch bedenklichen Schwermetallen Cadmium und Blei belastet sind. Die damals zulässigen Schwermetallhöchstwerte für Futterpflanzen und Futtergetreide werden in der Regel nicht überschritten. Dies wurde auch durch Schwermetallanalysen im Kot von Milchkühen bestätigt. Weiterhin können nach IPE JENA (1991) oftmals die Lebensmittelrichtwerte für Cd und Pb bei der Erzeugung von Nahrungsweizen und -roggen nicht eingehalten werden. Abschließend werden Grundregeln zum Umgang mit den Böden und Erntegut im Untersuchungsgebiet formuliert:

- Aufkalkung schwermetallbelasteter Flächen mit niedrigem pH-Wert,
- Vermeidung übermäßiger Verschmutzung der Pflanzen durch Bodenpartikel bei der Ernte,
- gründliches Waschen und Säubern von Gemüse und Obst vor der Verarbeitung bzw. dem Verzehr,
- Ernte der Pflanzen im reifen Zustand. (IPE JENA 1991).

### **3.3.2 Ergebnisse weiterer Untersuchungen zur Schwermetallproblematik der Böden**

Als Grundlage der Abschätzung, ob eine Schwermetallbelastung in einem Boden vorliegt oder nicht, dienen Kenntnisse über die jeweiligen Schwermetall-Hintergrundwerte der Region. Hintergrundwerte für sachsen-anhaltische Böden sind nach FELDHAUS et al. (1996) in drei bodenkundlich begründete Flächen gegliedert: mit Lößbetonung (Lö), aus Moränenmaterial (D) sowie mit Schluff und Tongesteinsbetonung (V). Nach ALTERMANN et al. (1997) gelten einige Gebiete des Mansfelder Berglandes und des Hettstedt-Eislebener Bergbaugesbietes als mit Schwermetallen belastet. FRÜHAUF (1992) stellte fest, dass die am östlichen Harzrand vorkommenden Schwarz- und Griserden im Raum Volkstedt bzw. Benndorf schon geogene Grundgehalte erreichen, die die Oberbodenwerte der bei Halle untersuchten Schwarzerden deutlich übertreffen.

Bereits 1978 untersuchte STOYE in der Umgebung der Rohhütte Helbra die Auswirkungen des Wirkungskomplexes Schwermetallmetabolismus – landwirtschaftliche Ertragslage. Eine durch das Bezirkshygieneinstitut Halle in Auftrag gegebene Belastungsstudie, die im Zeitraum von 1986-1988 durchgeführt wurde, sollte Klarheit darüber verschaffen, inwieweit die Schwermetalle am Standort Hettstedt das Bodenleben ackerbaulich genutzter Flächen beeinflussen (SCHRÖDTER et al. 1990). Spezielle Gruppen von Mikroben, die in der Hauptwindrichtung des Emittenten lagen und erhöhten Schwermetallgehalten ausgesetzt waren, zeigten dort eine verminderte Leistungsfähigkeit. Es konnten jedoch keine zu verallgemeinernden negativen Wirkungen der Schwermetalle beispielsweise auf die Anzahl der Bodenorganismen festgestellt werden.

Klein-, Flach- und Spitzkegelhalden, sowie Schlackehalden und das Umfeld von Standorten der Kupferschieferverschüttung im Mansfelder Land waren nach 1990 mehrfach Untersuchungsobjekte hinsichtlich einer möglichen Schadstoffbelastung der Umwelt durch Schwermetalle und Radioaktivität (CÖSTER 1993, FRÜHAUF 1995, KLINGER 1996, SCHMIDT 2000, SCHRECK 1996).

Bezüglich der Eigenschaften des Haldenmaterials von untersuchten Spitzkegelhalden ermittelte CÖSTER (1993), dass diese zwar ein Schwermetallpotential, jedoch einen geringen Feinkornanteil und somit ein niedriges äolisches Emissionspotential aufweisen. Eine Mobilisierung der Metalle wird aufgrund der relativ festen Bindung im Gesteinsverband des Haldenmaterials erst nach einer intensiven Verwitterung erfolgen.

Nach CÖSTER (1993) liegen die Schwermetallgehalte der von ihm untersuchten Böden im Umfeld der Spitzhalden (Thälmann-Schacht-Halde und Zirkel-Schacht-Halde) unter den Schwellenwerten vom „Mindestuntersuchungsprogramm Kulturboden“ (LÖLF NRW), so dass eine landwirtschaftliche Nutzung somit uneingeschränkt möglich ist. Die höchsten Schwermetallgehalte im Oberboden, welche die Schwellenwerte nach KLOKE (1993) übersteigen, traten in den Untersuchungen von CÖSTER (1993) nicht wie erwartet im Lee der ehemaligen Hauptemissionsquellen, sondern im Untersuchungsgebiet der mittelalterlichen Kleinsthalden bei Wimmelburg auf. Nach ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) werden als dessen Ursache zum einen hohe geogene Grundgehalte im Bereich des Ausstrichs des Kupferschieferflözes, zum anderen der mittelalterliche Bergbau angegeben. Für CÖSTER et FRÜHAUF (1998 S. 72 f.), „scheint für den hohen Schwermetallgehalt der Oberböden der Eintrag von (ehemaligen) Haldenmaterial in den Oberboden durch Abtragung („Schleifung“) der Halden von Bedeutung zu sein.“ Sie gehen davon aus, dass feinstes Haldenmaterial im Feinboden den Schwermetallgehalt wesentlich bestimmt und somit in den angebauten Kulturen Chloroseschädigungen hervorruft.

Untersuchungen zu Schwermetallausträgen aus zwei Kleinhalden wurden 1996 von KLINGER durchgeführt. Er stellte fest, dass der Feinbodenanteil im Bergematerial einer Kleinalde mit ca. 40 % Vegetationsbedeckung (Waldhalde) um das dreifache höher ist als in der ebenfalls untersuchten fast vegetationsfreien Kleinalde (Ackerhalde). In Sickerwässern der vegetationsbedeckten Waldhalde wurden zudem signifikante Metallanreicherungen, die bei Kupfer um den Faktor 10, bei Zink um Faktor 7 und bei Blei um Faktor 2 höher sind als in der Ackerhalde, gemessen.

SCHOLZ (1996) untersuchte an 2 Bodenprofilen in der Umgebung der Kupferhütten von Hettstedt und Helbra die Mobilisierbarkeit von Schwermetallen in Böden, die in der Vergangenheit über den atmosphärischen Pfad in diese eingebracht wurden. Durch vergleichende Betrachtung schätzte er anthropogen und geogen bedingte Elementgehalte ab, nachdem entlang der Tiefenprofile jeweils die Metallgesamtgehalte ermittelt wurden. Danach sind mit den experimentell einfach zu handhabenden Methoden mit Wasser und Neutralsalzen ( $\text{CaCl}_2$  und  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) im allgemeinen nur wenige Prozente der Metallgehalte innerhalb der gewählten Bodenprofile zu mobilisieren.

## 4 Untersuchungsmethoden

### 4.1 Auswahl der Untersuchungsstandorte

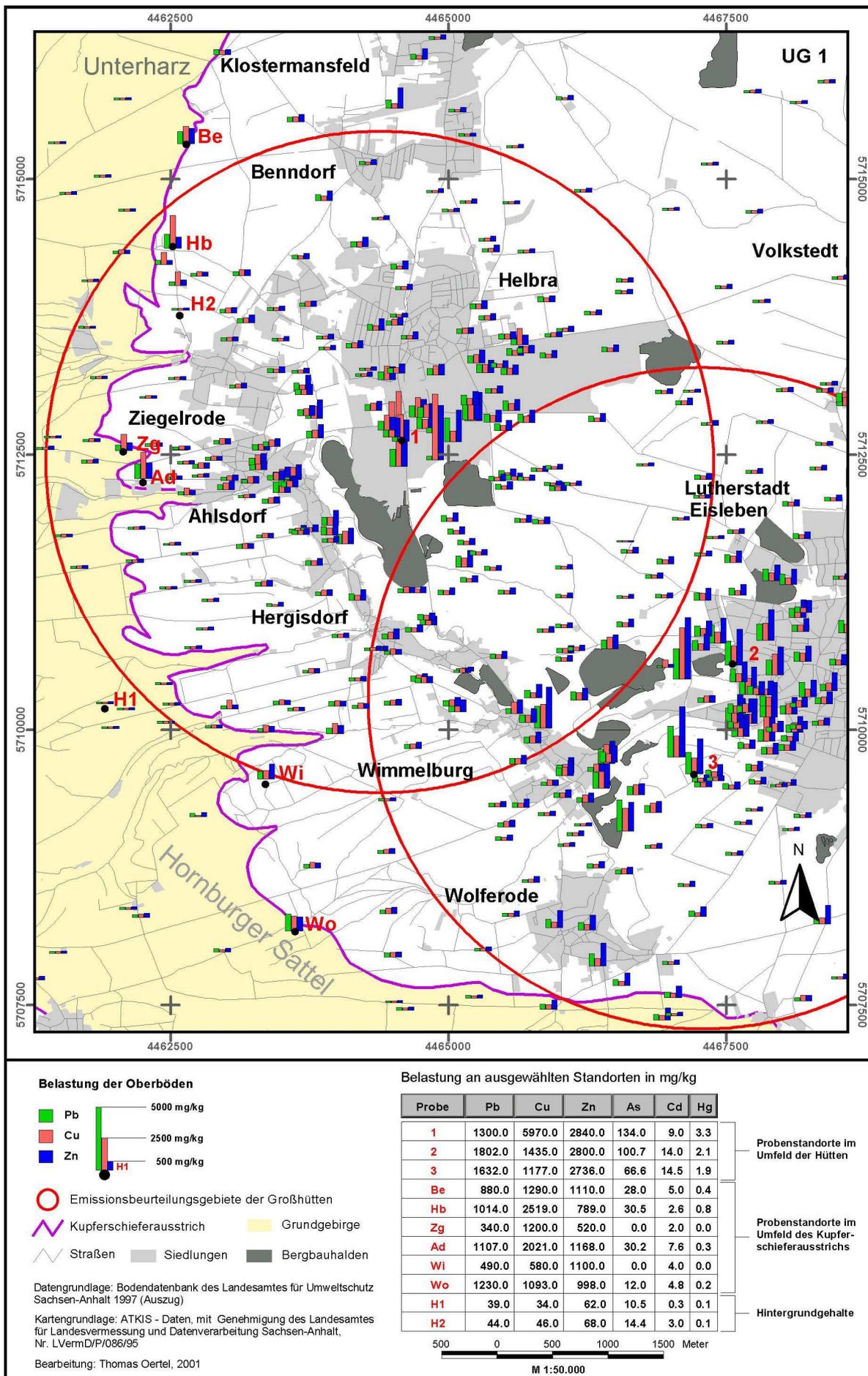
Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit sollten in den Gebieten der historischen Bergbaureviere zwischen Mansfeld und Klostermansfeld sowie bei Benndorf, Ahlsdorf, Hergisdorf und Wimmelburg die Ursachen der auf den Böden zwischen den Kleinhalden des Kupferschieferbergbaus (mittelalterlicher Entstehung) auftretenden Schäden der Kulturvegetation analysieren, um u. a. die in Umweltgutachten (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991 und NOELL UMWELTDIENSTE GMBH 1993) getroffenen Aussagen, zur Bedeutung des Kupferschieferausstrichs hinsichtlich geogener Schwermetallbelastungen der Böden zu präzisieren.

#### 4.1.1 Datenauswertung zu Bodenschwermetallbelastungen in den Untersuchungsgebieten

Einen bedeutenden Datenbestand mit Koordinatenangaben zu Schwermetallbelastungen in den Oberböden der UG stellt die vom Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) erstellte Bodendatenbank (LAU 1997) dar, die insbesondere Ergebnisse von Sondergutachten z. B. der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991), des IPE JENA (1991), des GFE Halle sowie Schwermetalldaten der Systematischen Bodenuntersuchung des Agrochemischen Untersuchungs- und Beratungsdienstes der DDR aus dem Zeitraum 1985-1989 enthält. Die Analyseergebnisse dieser Datenquellen sind neben verschiedenen Untersuchungsschwerpunkten insoweit miteinander vergleichbar, da sie alle Oberbodenmischproben darstellen, die zu meist auf Königswasseraufschlüssen basieren. Die Proben des IPE JENA (1991) und die der Systematischen Bodenuntersuchung des ACUB aus dem Zeitraum 1985-1989 wurden mit 1,5 n HNO<sub>3</sub> extrahiert. Der so extrahierte Anteil spiegelt den Schwermetallgesamtgehalt in bestimmten, weitgehend konstanten Relationen folgendermaßen wider (nach GRÜN et al. 1993): Cd = 100 %, Cu und Pb = 90 %, Zn = 80 % (vgl. ALTERMANN et al. 1997). Innerhalb dieser Arbeit wurden die Originaldaten laut 1,5 n HNO<sub>3</sub> Aufschluss verwendet, obwohl die Werte aus den genannten Quellen dadurch mit etwas zu geringen Gehalten in die Auswertung eingehen. Auf der Grundlage dieser Daten wurden kartographische Darstellungen der Blei-, Kupfer-, Zink- und Cadmiumbelastung innerhalb des UG 1 und UG 2 erstellt (Karten A 2 bis A 5).

Die Klassifizierung der Belastung für das jeweilige Element erfolgte dabei nach den Bodenwerten I, II und III für landwirtschaftliche Nutzflächen nach EIKMANN et KLOKE (1993), vgl. dazu Tab. 5. Zur Verdeutlichung der atmogenen Schwermetallbelastungen der Großhütten (Kupfer-Silber-Hütte Hettstedt, Sekundärkupferanlage Hettstedt, August-Bebel-Hütte Helbra und Karl-Liebknecht-Hütte Eisleben) im UG 1, wurden in diesen Karten um die Großschornsteine (ehemalige Hauptemissionsanlagen) Beurteilungsgebiete mit einem Radius von jeweils 3 km dargestellt. Bei allen Elementen (Pb, Cu, Zn, Cd) sind erhöhte Konzentrationen im Umfeld dieser Hütten auffällig. Insbesondere in und um die Stadt Hettstedt sind viele Probenpunkte in die höchste Klassifizierungsstufe nach EIKMANN et KLOKE (1993) eingeordnet. Ursachen hierfür sind u. a. Bodenbelastungen, die durch Emissionen der Bleihütte Hettstedt und des Walzwerkes Hettstedt (Beurteilungsgebiete nicht in den Karten dargestellt) verursacht wurden. Weitere erhöhte Schwermetallbelastungen in den Untersuchungsgebieten, die in den Böden heute noch vorhanden sind, haben überwiegend ihre Ursache in Emissionen aus historischen Hütten, Kraftwerken sowie anderen Nebenverursachern. Mit zunehmender Entfernung von den Hauptverursachern atmogener Schwermetallbelastungen nehmen die Gehalte der Oberböden stark ab, bis sie Konzentrationsbereiche erreichen, die geogenen Hintergrundgehalten entsprechen. In der Karte 5 ist ein Teilausschnitt des UG 1 dargestellt, bei dem die Blei-, Kupfer- und Zinkbelastung einzelner Standorte durch Diagramme verdeutlicht wird. Neben den in den Karten A 2 bis A 5 im Anhang erkennbaren hohen Belastungen im unmittelbaren Umfeld der Hütten, die laut der Tabelle in der Legende von Karte 5 durch die Probenstandorte 1, 2 und 3 repräsentiert werden, sind erhöhte Belastungen auch direkt am Kupferschieferausstrich erkennbar.

Karte 5: Blei-, Kupfer- und Zinkbelastung von Oberböden im UG 1



Ob die in Karte 5 ermittelten Schwermetallbelastungen bei Benndorf (Be), Helbra (Hb), Ziegelrode (Zg), Ahlsdorf (Ad), Wimmelburg (Wi) und Wolferode (Wo). mit dem geogenen Ausstrich des Kupferschiefers, wie im Bericht der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) behauptet, erklärt werden können oder ob dafür andere Ursachen in Frage kommen, wird in dieser Arbeit näher untersucht. Im UG 2 bei Pölsfeld, sollten aufgrund der Tatsache, dass dieses Gebiet nur geringen atmosphärischen Belastungen der Großhütten des UG 1 ausgesetzt war, kaum beeinflusste geogene Bodenbelastungen erfasst werden.

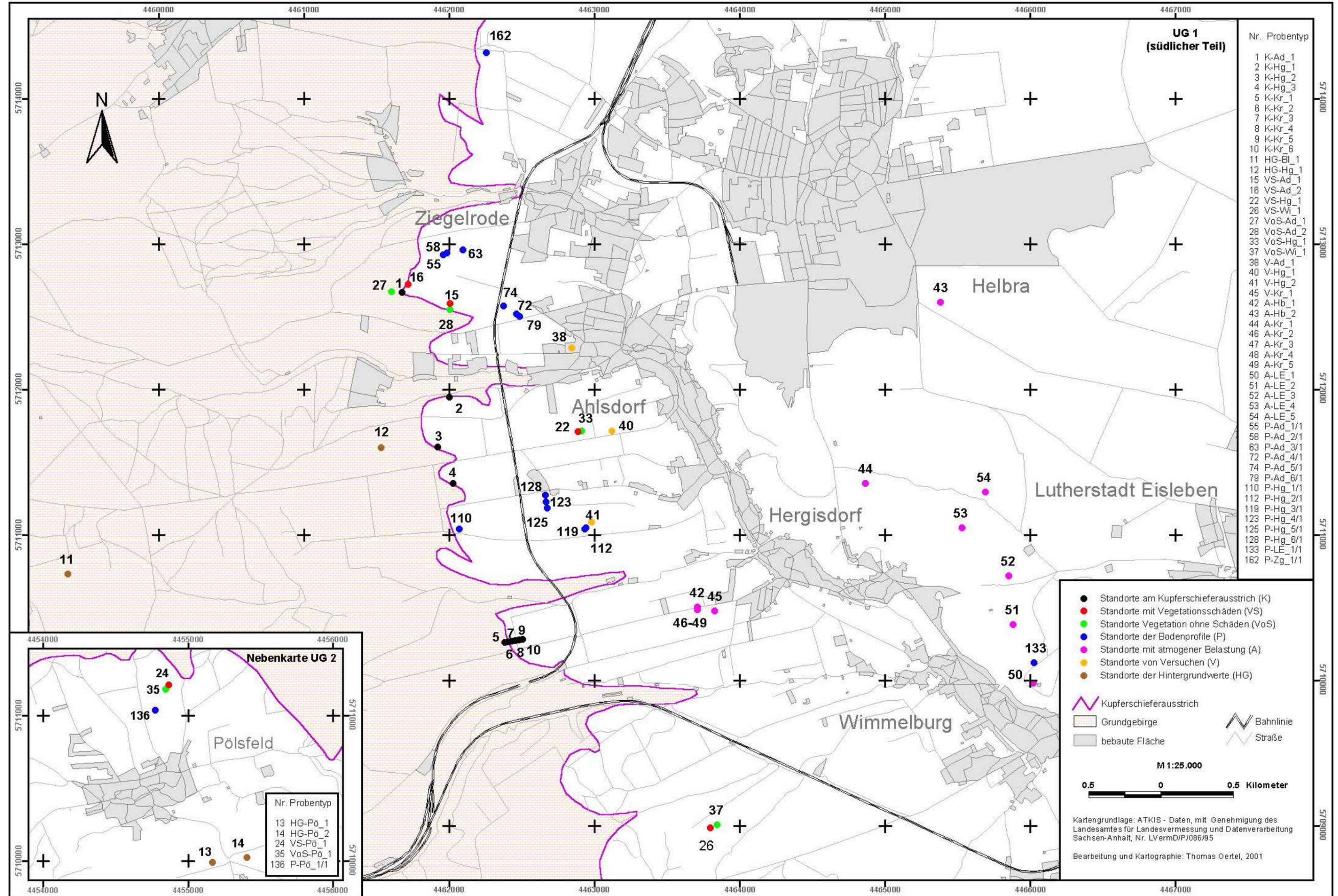
#### 4.1.2 Kartenauswertung und Fernerkundung

Die Auswertung von großmaßstäbigen topografischen Karten und geologischen Messtischblättern M 1:25.000, Karten der Mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) sowie Karten der Reichsbodenschätzung und Flurkarten (aktuelle und historische) stellten bedeutende Informationsquellen für die Lösung der Problemstellung dar. Die Lage des natürlich austreichenden Kupferschieferflözes wurde der geologisch-montanhistorischen Karte der Reviere Mansfeld (Karte 2) entnommen. Um Aussagen über die räumliche Dimension von Schadsymptomen an Kulturpflanzen (Chlorosen) innerhalb der Untersuchungsgebiete zu gewinnen, wurde zunächst versucht, diese durch Geländebegehungen, später aber auch durch eigene Befliegungen mit einem Leichtflugzeug zu verschiedenen Vegetationszeitpunkten fotografisch und kartografisch zu erfassen. Dabei war klar, dass die eigenen Luftaufnahmen eine exakte Darstellung, z. B. in Karten sowie eine genaue Berechnung der geschädigten Fläche infolge zwangsläufiger Verzerrungen kaum zulassen, da Flughöhe, Brennweite und fotografischer Winkel ständig schwanken. Der aktuelle Informationsgehalt der erstellten ca. 600 Echtfarben-Schrägluftbilder zur räumlichen Verbreitung wie auch zur Differenzierung des Grades der Vegetationsschädigungen (gelb-grün-Abstufung) sollte für die Problemlösung jedoch einen wichtigen Meilenstein bei der Lokalisierung von anthropogenen, bergbaulichen Eingriffen und deren ökologischen Folgeerscheinungen darstellen. Bessere Verschneidungsmöglichkeiten von Bildern mit topographischen Karten und Flurkarten innerhalb des GIS-Programms ArcView (nach entsprechender Entzerrung mit dem Programm WGEO) ermöglichten Color-Infrarot-Luftbilder und Satellitenbilder. Die amtlichen CIR-Luftbilder waren jedoch für die zu erfassenden Vegetationsschädigungen zunächst nicht nur hinsichtlich des Maßstabs, sondern auch aufgrund z. T. nicht optimaler Aufnahmezeitpunkte für die Problemlösung kaum verwendbar. Vom Aufnahmezeitpunkt geeignete CIR-Luftbilder wurden deshalb stark vergrößert, so dass sie für eine Lokalisierung von Vegetationsschädigungen genutzt werden konnten. Eine noch bedeutendere Datenquelle für die Untersuchungen stellten die Reinkarten (Ur-Flur-Karten) und Gemarkungskarten dar, die im Archiv des Katasteramtes Hettstedt eingesehen werden konnten. Sie zeigen die Verbreitung von Kleinhalden in einem größeren Maßstab als ein Abbild der früheren Bergbautätigkeit auf. Aus Datenschutzgründen konnte vom Katasteramt nur eine begrenzte Anzahl von Kopien dieser Karten freigegeben werden. Zahlreiche Informationsquellen (Karten, Luftbilder, Standorte und Messdaten der Boden- bzw. Schwermetallanalyse, etc.) wurden im GIS ArcView auf der Grundlage von ATKIS-Daten dargestellt, was die Erkenntnisfindung beschleunigte und eine Nutzbarmachung der gewonnenen Ergebnisse für künftige Untersuchungen erleichtert.

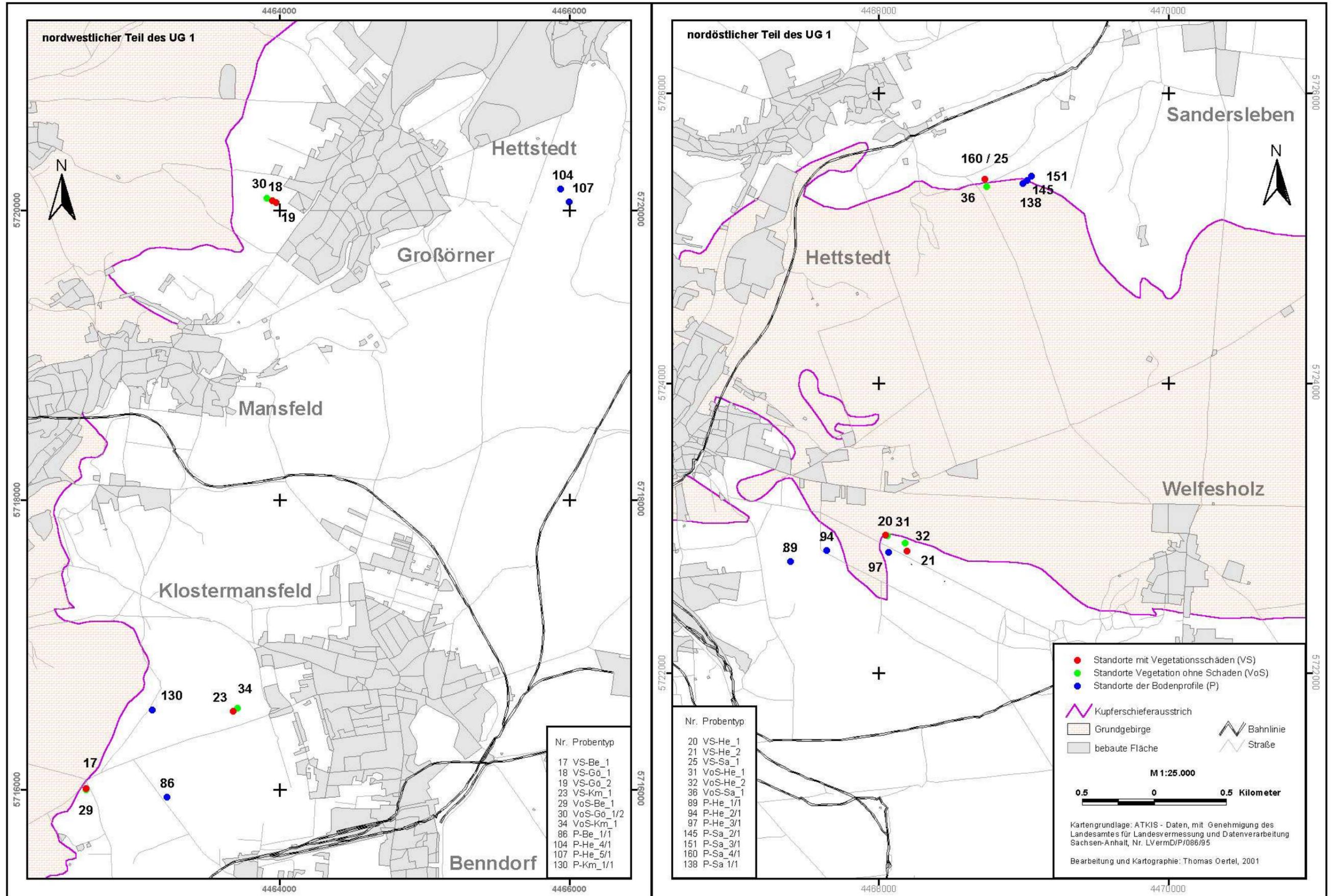
#### 4.2 Lage der Beprobungs- und Versuchsstandorte in den Untersuchungsgebieten

Im Ergebnis der Daten-, Karten- und Luftbildauswertung wurden innerhalb der Untersuchungsgebiete (UG 1 und UG 2) die in Karte 6 und Karte 7 dargestellten Standorte für Boden- und Pflanzenproben ausgewählt. Die Beprobungsstandorte am Kupferschieferausstrich wurden mit Probenotyp „K“, Standorte mit Vegetationsschäden mit Probenotyp „VS“ und Standorte ohne Vegetationsschäden mit Probenotyp „VoS“ bezeichnet. Die Standorte der Bodenprofile mit unterschiedlichen Bodenbelastungen (anthropogene und geogene), erhielten die Probenotypbezeichnung „P“. Die Standorte von Versuchen (Probenotyp „V“), die Standorte mit atmosphärischer Belastung (Probenotyp „A“) sowie die Standorte der Hintergrundwerte (Probenotyp „HG“) die die „Normalgehalte“ der Oberböden der Region repräsentieren, vervollständigen den Datenbestand zu Bodenbelastungen der Region und dienten spezifischen Fragestellungen (Tab. A 1).

Karte 6: Proben- und Untersuchungsstandorte im südlichen Teil des UG 1 und im UG 2



Karte 7: Probenstandorte im nordwestlichen Teil (bei Mansfeld) und im nordöstlichen Teil (bei Hettstedt und Sandersleben) des UG 1



## 4.3 Geländemethoden

### 4.3.1 Bodenuntersuchungen

Im Zeitraum von November 1996 bis März 1999 wurden die Untersuchungsstandorte innerhalb der UG 1 und 2 mittels Bodenaufgrabungen, Bohrstocksondierungen und Bohrungen mit dem Rammkernbohrgerät „Cobra“ auf ihre geologisch-bodenkundlichen Besonderheiten hin analysiert. Gleichzeitig galt es, Schwermetallanteile in den Pflanzen in unterschiedlichen Wachstumsphasen zu bestimmen. Zu Beginn stand die Beprobung von Bodenbereichen am natürlichen Kupferschieferausstrich am Westrand der Mansfelder Mulde im Mittelpunkt der Untersuchungen, die Aufschluss über die Bedeutung dieser Schwermetallquelle für die dort vorkommenden Oberböden geben sollte. Dazu wurden zunächst Standorte westlich von Ahlsdorf und dessen Ortsteil Ziegelrode sowie bei Hergisdorf (westlich des Ortsteils Kreisfeld) im Umgebungsbereich der Reduktionsfazies an der Zechsteinbasis (Rote Fäule) beprobt, da dort vereinzelt erhöhte Belastungen in den Böden bereits in der Studie des IPE JENA (1991) ermittelt wurden (Karte 5).

Innerhalb des UG 1 (siehe Karte 6 und Tab. A 1) wurden die einzelnen Untersuchungsstandorte am Kupferschieferausstrich zusätzlich zum Probentyp „K“ mit einem Namenskürzel für die nächstgelegene Stadt bzw. Gemeinde (z. B. „Ad“ für Gemeinde Ahlsdorf) bezeichnet. Die Aufschlüsselung der Abkürzungen ist dem Abkürzungsverzeichnis zu entnehmen.

Der Arbeitsbereich zur Untersuchung der Bedeutung des natürlichen Kupferschieferausstrichs für die Schwermetallbelastung der Oberböden bei Ahlsdorf ist beispielsweise ca. 500 Meter westlich und östlich der Bahnstrecke Erfurt-Magdeburg zwischen Kupferschieferausstrich und Kleinhaldenlandschaft lokalisiert (Abb. 9). Auch bei Hergisdorf und Kreisfeld wurden zahlreiche Oberbodenbeprobungen und Bohrstocksondierungen mit Pürkhauer- bzw. Edelmann-Bohrstöcken und Profilaufgrabungen mittels Spaten bzw. Mobilkran durchgeführt.

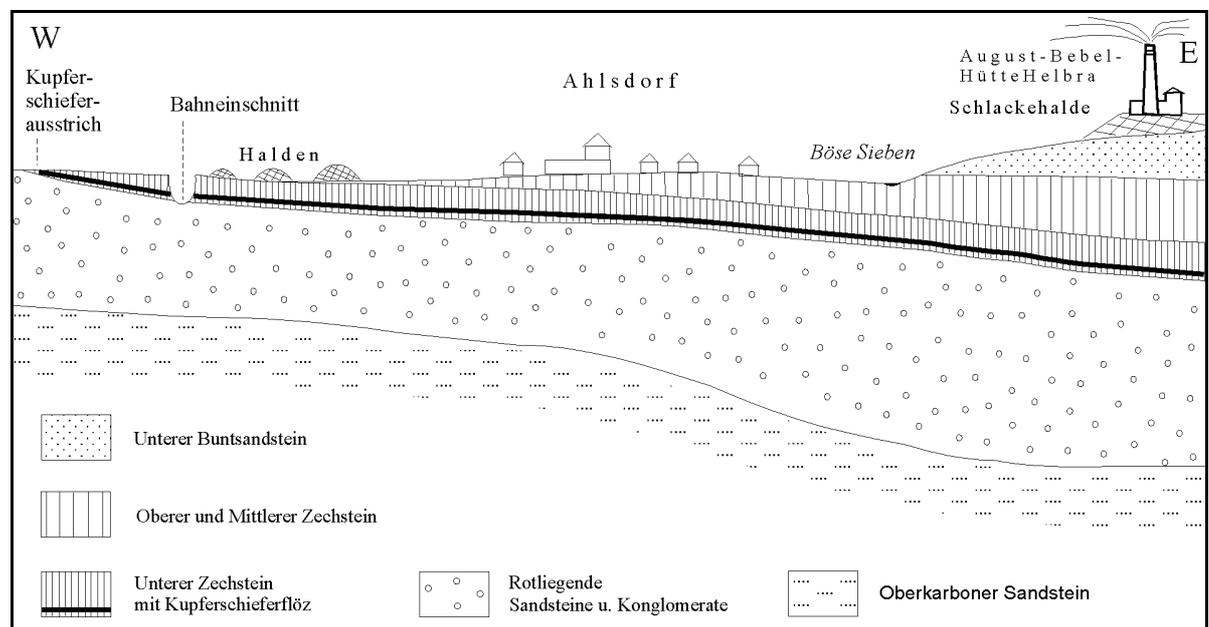


Abb. 9: Profilschnitt durch die Mansfelder Mulde bei Ahlsdorf (nach VON HOYNINGEN in NEUB et ZÜHLKE 1982, geändert)

#### 4.3.1.1 Beprobungen der Oberböden

Die Beprobung der Oberböden erfolgte ausschließlich als Mischprobe von mindestens 5 und bis zu 10 Einzelproben des A-Horizontes innerhalb von 2-4 m<sup>2</sup>. Anschließend wurden die Proben im Labor homogenisiert.

### 4.3.1.2 Aufnahme von Bodenprofilen

Die Profile wurden zum überwiegenden Teil mit Hand, in drei Fällen mittels eines Mobilkrans aufgegraben. Nach der Profilaufnahme erfolgte eine Beprobung pro Horizont, wobei die oberste Probe auch als Oberbodenmischprobe entnommen wurde. Die Standorte von Bodenprofilen sind im folgenden Text sowie in Tabellen, Abbildungen und Karten durch den Probentyp „P“ zuzüglich Ortsangabe gekennzeichnet. Die Nummer X/1 (z. B. P-Hg\_2/1) der jeweiligen Profilbezeichnung beschreibt dabei den obersten Horizont als Oberbodenmischprobe. Weitere Bodenproben in der Tiefe sind nicht eindeutig mit den Bodenhorizonten des Profils identisch.

### 4.3.1.3 Anlage einer Bodencatena

Eine Bodencatena wurde im Bereich des auf den geologischen Messtischblättern eingezeichneten Kupferschieferausstrichs bei Sandersleben mittels des Cobra-Handbohrgerätes durchgeführt, um gleichzeitig zur Bewertung der Bodenlagerungsverhältnisse genügend Probenmaterial aus tieferen Bodenschichten für Laboranalysen gewinnen zu können. Anhand von drei Bodenprofilen sollten damit die wechselnden geologischen Verhältnisse in diesem Bereich veranschaulicht und die Verteilung der Schwermetalle in den quartären Bildungen analysiert werden.

Für das Bodenprofil Sandersleben 1 (P-Sa\_1) wurde der Bereich des Grundgebirges der Halle-Hettstedter-Gebirgsbrücke, speziell der dort unter den quartären Schichten anstehenden Sandsteine und Konglomerate des Rotliegenden, gewählt. Der zweite Standort (P-Sa\_2) lag im Ausstrichbereich des Kupferschiefers. Die dritte Bohrung der Catena (P-Sa\_3) wurde im oberflächennah anstehenden Zechstein angelegt.

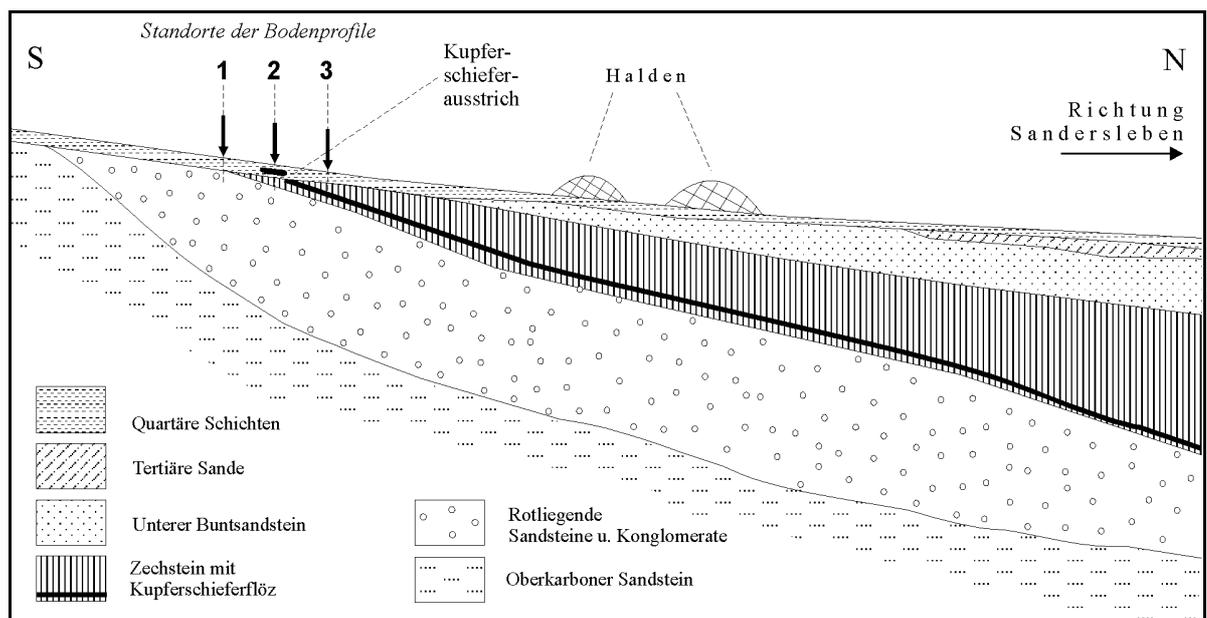


Abb. 10: Profilschnitt durch den Nordrand der Halle-Hettstedter-Gebirgsbrücke bei Sandersleben

## 4.3.2 Pflanzen- und Feldversuche

### 4.3.2.1 Wachstumsversuche auf Böden mit unterschiedlicher Schwermetallkonzentration

Um die atmogene Belastung der ehemaligen Hütten zu simulieren, wurden je 8 Pflanzgefäße mit zwei verschiedenen unbelasteten Substraten: einem Gemisch aus einem fossilen Boden bei Langenbogen und Blumenerde (V-Ad\_2) sowie einem unbelasteten Ap-Horizont der Region (HG-BI\_1) definiert mit Schwermetallsalzen aus dem Labor so belastet, dass sie anschließend über 500 mg Cu, 500 mg Zn, 500 mg Pb und 5 mg Cd je kg Boden verfügten.

Die Schwermetallsalzlösungen wurden mittels einer Plastikgießkanne auf die in Schichten in die Pflanzgefäße eingebrachten Bodensubstrate aufgetragen, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Schwermetalle sicherzustellen. In diese Gefäße wurden vier Selleriepflanzen und vier Kohlrabipflanzen (je zwei pro Boden) gepflanzt. Weiterhin wurden acht Pflanzgefäße mit je vier Pflanzen Sellerie und vier Kohlrabi auf den zwei unterschiedlichen Substraten bepflanzt, die nicht mit Schwermetallsalzen belastet wurden. Diese Pflanzenversuche wurden bis zur Ernte unter einem mit Klarsichtfolie verschweißten Gartenpavillon durchgeführt, so dass eine Belastung der Pflanzen wie auch der Böden durch die Atmosphäre nahezu ausgeschlossen war (Abb. 11). Alle 16 Versuchsgefäße wurden über den gesamten Zeitraum von Mai bis September mit Trinkwasser gegossen, um auch die „störende“ Komponente Regenwasser auszuschließen.



Abb. 11: Pflanzenversuch „Gartenpavillon“



Abb. 12: Pflanzenversuch „Frühbeet Kleingarten“



Abb. 13: Pflanzenversuch „Halde Ackergarten“



Abb. 14: Pflanzenversuch „geogene/atmogene Belastung“

Ebenso wurden 15 Pflanzen der drei Sorten Kohlrabi, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* (Sorte Delweiß), Porree, *Allium porrum* Ampeloprasum f. *porrum* (Sorte Nebraska) und Sellerie, *Apium graveolens* var. *rapaceum* (Sorte Monarch) in einem mit schwermetallhaltigen Kupferschiefersteinchen durchsetzten Boden eines Kleingartens angepflanzt (Abb. 12). Ein Frühbeet wurde im Kleingarten dort errichtet, wo bereits bei Himbeeren und Sauerkirschbäumen abnormale Pflanzenschädigungen in der Vergangenheit beobachtet wurden (Chlorosen bzw. Minderertrag).

Außerdem erfolgte eine Anpflanzung der oben genannten drei Arten (15 Pflanzen) auf einer mittelalterlichen Kleinsthalde, auf der sich bereits ein ca. 15 cm mächtiger Rohboden unter einer Grasnarbe ausgebildet hatte (Abb. 13: Pflanzenversuch „Halde Ackergarten“).

Weiterhin wurden einige Kohlrabi- und Selleriepflanzen in Versuchsgefäßen auf zwei verschiedenen Böden angepflanzt, welche vor 1990 massiver atmogener Schwermetallbelastung in der Nähe der August-Bebel-Hütte-Helbra ausgesetzt waren, und es wurden vier Versuchspflanzen auf Substraten des Ap-Horizontes über einer abgetragenen Kleinsthalde angebaut (Abb. 14).

Die Pflanzen im Kleingarten (Frühbeet) und besonders die auf dem Haldenstandort wurden regelmäßig mit Regenwasser gegossen, gehackt bzw. vom Unkraut befreit. Von den Pflanzen wurden jeweils nur die Pflanzenteile geerntet, die normalerweise in die menschliche Nahrungskette gelangen. Bei der Sellerieknolle musste besonders darauf geachtet werden, dass keine Erdpartikel an den Wurzeln haften blieben, welche später die Analysen verfälschen könnten.

#### 4.3.2.2 Feldversuch der Vergrabung verschiedener Materialien

Der Feldversuch der Vergrabung verschiedener Materialien in der Flur Hergisdorf mit anschließender Bestellung von Weizenpflanzen wurde angelegt, um Einflussfaktoren des Unterbodens auf das Wachstum der Kulturpflanzen, wie toxische Schädigung durch Schwermetalle, Wassermangel bzw. die mechanische Barrierewirkung von anthropogen eingebrachten Gesteinsschichten, besser einschätzen zu können.

In eine der ausgehobenen Gruben wurde Schiefermaterial eingebracht. Parallel dazu wurde eine Ziegelschutt- und eine Sandgrube mit gleich mächtiger Schichtenfolge gefüllt (Abb. A 1). Die Oberbodenbedeckung erfolgte mit Mutterboden aus der Umgebung, der durch seine Lage im Immissionsfeld der August-Bebel-Hütte Helbra bereits über Schwermetallbelastungen verfügte (V-Hg<sub>2</sub>). Zwischen diesen Vergrabungen wurde zu Vergleichszwecken der vor Ort angetroffene Kulturboden mit in den Versuch einbezogen und danach auf allen vier Flächen Winterweizen bestellt, dessen Vegetationsentwicklung im darauf folgenden Jahr kontinuierlich beobachtet wurde. Die Seitenwände der drei Gruben wurden mit Bodenbelag vom umgebenden Erdreich abgegrenzt, damit die sich entwickelnden Pflanzenwurzeln keine zusätzlichen Nährstoffe oder Wasser aus dem Umgebungsbereich der Vergrabung beziehen konnten.

#### 4.3.2.3 Teilsanierung eines Bodenstandortes mit Vegetationsschäden

Der Standort des Bodenprofils P-Ad\_6, der im Gelände und auf Luftbildern Chloroseschäden der Pflanzen aufwies, wurde 1998 durch Austausch von Bodenmaterial teilsaniert. Der mit Schieferbruchstücken durchsetzte Ap-Horizont wurde an dieser Stelle durch einen Mobilkran abgetragen. Der ca. 30 bis 110 cm unter der EOF liegende technogene Horizont mit einem Gesamtvolumen von ca. 8 m<sup>3</sup> wurde ausgekoffert. Anschließend erfolgte die Auffüllung des entstandenen Hohlraums mit Mutterboden von benachbarten Flächen. Nach dem Bodenaustausch erfolgte im Herbst 1998 die Bestellung mit Winterweizen. Abb. A 2 stellt die Lage und die Vegetationsverhältnisse des Standortes sowie einen Ausschnitt aus der aktuellen Flurkarte Ahlsdorf Flur 2 mit Angaben der Boden- und Ackerzahlen nach der Reichsbodenschätzung dar.

### 4.4 Labormethoden

Alle Analysen der Boden- und Pflanzenproben wurden im physisch-geographischen/geoökologischen Labor des Institutes für Geographie der Universität Halle durchgeführt. Die luftgetrockneten Bodenproben wurden im Rahmen der Probenvorbereitung auf 2 mm gesiebt und der Skelettgehalt bestimmt.

#### 4.4.1 Schwermetallanalyse

Untersucht wurden die im Mansfelder Land charakteristischen Schwermetalle Kupfer, Blei, Zink und Cadmium. Die Ermittlung der Schwermetallgesamtgehalte erfolgte anhand des Königswasseraufschlusses (HNO<sub>3</sub>-HCl) nach DIN 38 414 Teil 7. Dazu wurden 3,0 g Feinboden eingewogen und mit Königswasser bei 120°C zwei Stunden lang gekocht. Um die Verflüchtigung von Metallen zu verhindern, wurden den Aufschlussgefäßen Rückflusskühler und Absorptionsgefäße mit 10 ml 1molarer Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) aufgesetzt.

Die Aufschlüsse zur Ermittlung des pflanzenverfügbaren Anteils (mobile Anteile der relevanten Metalle) in den Substratproben erfolgte nach DIN 19 730. Dazu wurden je 20 g Feinboden mit 50 ml NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Lösung versetzt und zwei Stunden über Kopf mit etwa 20 Umdrehungen pro Minute bei Raumtemperatur geschüttelt und anschließend filtriert. Für die ersten Probenserien (40 Proben) wurden Doppelbestimmun-

gen bei beiden Aufschlussarten durchgeführt. Aufgrund der geringen Abweichungen der ermittelten Messreihen und der zum Teil extremen Streuung der Belastung einzelner Bodenproben wurde später auf Doppelbestimmungen verzichtet.

Die Analyse der Pflanzenproben erfolgte nach gründlicher Reinigung mit Wasser und nachfolgender Trocknung im Trockenschrank mittels Königswasseraufschluss, so dass sich die ermittelten Schwermetallkonzentrationen auf die Trockensubstanz (Tr. S.) beziehen. Nach der Einwaage von 3,0 g Tr. S. je Probe erfolgte vor der Zugabe von Königswasser die Zerstörung der organischen Substanz durch leichtes Erwärmen unter Zugabe von Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ).

Die Messung der „Gesamt“- (Königswasser) sowie mobilen ( $NH_4NO_3$ ) Schwermetallgehalte und der Wasseraufschlüsse erfolgte mittels Flamme am AAS (Perkin-Elmer 2100) mit den entsprechenden Wellenlängen und Gasgemischen.

#### 4.4.2 Analyse der Bodenparameter

Die Korngrößenverteilung wurde anhand der Laserbeugung (Malvern MAM 5005 Master Sizer S) bestimmt, die Fraktion 0,2 mm dabei durch Siebung abgetrennt, mit Dispergierungsmittel ( $0,1m Na_2P_2O_7$ ) versetzt, über Nacht geschüttelt und anschließend in Suspension gemessen. Die Messung der größeren Fraktion (2000 bis 0,1 mm) erfolgte trocken im Fallschacht. Das endgültige Ergebnis der Kornverteilung wurde durch Verschneiden beider Teilergebnisse erreicht.

Die Bestimmung der pH-Werte der Bodenproben erfolgte jeweils als Doppelbestimmung potentiometrisch in einer KCl-Bodenlösung und in einer destillierten  $H_2O$ -Bodenlösung mit dem pH/mV-Meter 539. Von jeder Probe wurden dazu 10 g im Becherglas mit 0,1 m KCl-Lösung bzw. mit 25 ml destilliertem Wasser versetzt und intensiv mit Glasstäbchen umgerührt, die Probenlösungen über Nacht stehen gelassen und nach Eichung des Messgerätes mit den Standard-Pufferlösungen und nochmaliger Aufwirbelung des Bodensatzes am nächsten Tag zur Messung gebracht.

Der Anteil der organischen Substanz im Boden wurde durch Glühverlust im Muffelofen nach einer labor-internen modifizierten Methode der Trockenveraschung ermittelt. Unter Glühverlust wird dabei die Gewichtsabnahme, unter Glührückstand der verbleibende Mineralanteil einer Probe nach der Veraschung bei  $550^\circ C$ , bezogen auf die bei  $105^\circ C$  zur Gewichtskonstanz getrockneten Probe, verstanden (DIN 19684 Teil 2 u. 3). Dazu wurden je Bodenprobe 2 bis 3 g lufttrockener Feinboden in einem Tiegel eingewogen, bei  $105^\circ C$  getrocknet und danach das Trockengewicht (Tiegel und trockene Probe) bestimmt, anschließend die Proben im Muffelofen, der langsam auf  $300^\circ C$  aufgeheizt wurde, 2,5 Stunden geglüht. Die verringerte Temperatur im Vergleich zur DIN wurde gewählt, um zur Nassveraschung nach Springer und Klee vergleichbare Daten zu erhalten. Die Humusanalyse wurde als Doppelbestimmung durchgeführt, der Carbonatgehalt der Bodenproben mit der Scheibler-Apparatur bestimmt. Da diese gasvolumetrische Bestimmungsmethode eine große Streubreite in den Ergebnissen aufweist, wurden drei Messreihen durchgeführt.

### 4.5 Fehlerdiskussion

#### 4.5.1 Methodische Fehler und Spezifika bei der Probenahme

Aufgrund verschiedener Untersuchungsproblematiken, insbesondere auch der Größe des UG 1, konnten z. T. nur sehr geringe Mengen von Probenpunkten bzw. Materialien zu einer spezifischen Themenstellung beprobt werden. Eine statistisch repräsentative Auswertung wird deshalb stark eingeschränkt.

Auch die zielgerichtete Probenahme von Böden bzw. Pflanzen, die sog. Extremstandorte repräsentieren, macht eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse auf die Gesamtfläche der oben beschriebenen UG problematisch. Vielmehr sind die Ergebnisse der Schwermetallbestimmungen punktueller Natur, die aufgrund der Kenntnisse der Bodeneigenschaften bzw. erkannter spezifischer Bodenphänomene in bestimmten

räumlichen Dimensionen auf andere Standorte bzw. Flächen übertragbar sind. Da die Bodenbeprobungen sich über einen längeren Zeitraum erstreckten, können jahreszeitliche bzw. witterungsbedingte Schwankungen der Messwerte nicht ausgeschlossen werden. Um diese Schwankungen zu minimieren, wurde beispielsweise die Bestimmung der Bodenfarbe nach Munsell einheitlich im luftgetrockneten Zustand vorgenommen.

#### **4.5.2 Analysefehler**

Im Rahmen eines Pre-Tests wurden für alle Parameter Doppelbestimmungen vorgenommenen, woraus sich ergab, dass für die Bestimmung der organischen Substanz und der Humifizierungsart Doppelbestimmungen und für den Carbonatanteil Dreifachbestimmungen durchzuführen sind. Für weitere Bodenparameter erfolgten Einfachbestimmungen.

Exemplarische Doppelbestimmungen bei der Bestimmung der Schwermetallgehalte nach Königswasser-aufschluss zeigten, dass hier ebenfalls keine Mehrfachmessungen notwendig waren, da die Unterschiede beider Messreihen weniger als 8,5 % betragen. Diese Toleranz spielt bei den erheblichen Konzentrationsunterschieden der Schwermetallgehalte der Bodenproben eine vernachlässigbare Rolle. Die Abweichungen erster Schwermetalldoppelbestimmungen nach Ammoniumnitrat-aufschluss betragen demgegenüber bis zu 37 % (im Durchschnitt des Pre-Tests 18 %). Dies resultiert einerseits aus den geringen pflanzenverfügbaren Schwermetallgehalten und andererseits aus der mangelnden Empfindlichkeit des Flammen-AAS. Eine Grafitrohr-ausführung des AAS stand für diese Arbeit leider nicht zur Verfügung. Insofern müssen die Werte der letztendlich als Einfachbestimmung durchgeführten Ammoniumnitratanalysen mit Vorbehalt interpretiert werden.

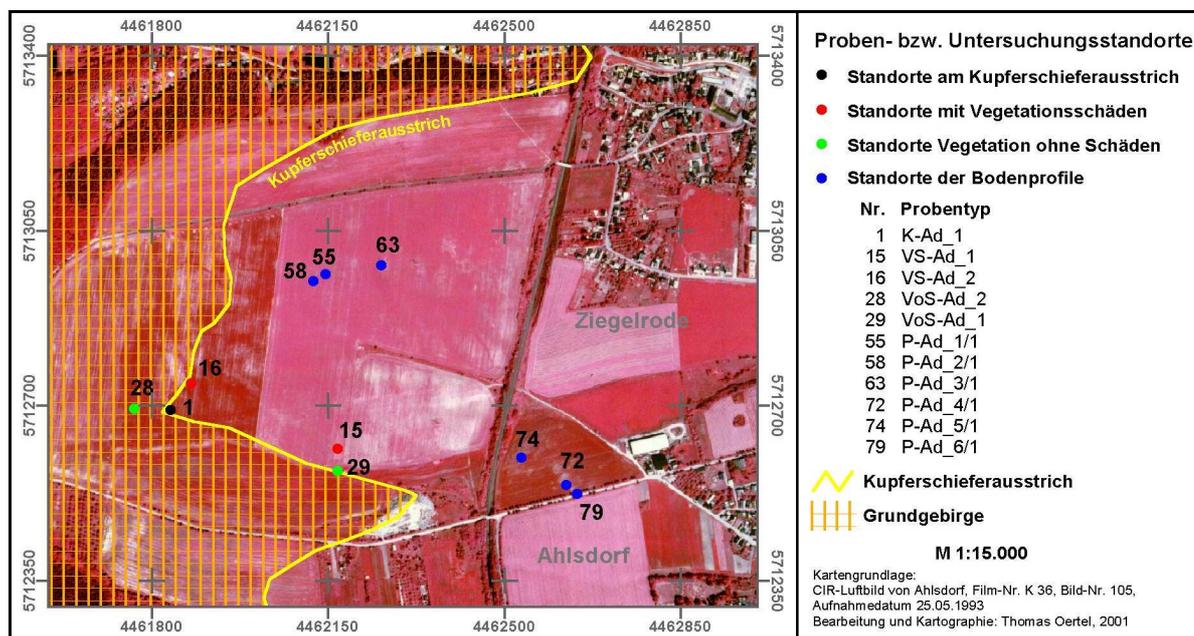
## 5 Ergebnisdiskussion

### 5.1 Ursachen der Schwermetallbelastung der Böden

#### 5.1.1 Der Kupferschieferausstrich als geogene Quelle

Das CIR-Bild vom 25.05.1993 (Karte 8) zeigt den Ackerschlag „Magdalenbreite“, der bei Ahlsdorf westlich der Bahnstrecke Erfurt-Magdeburg liegt und der 1993 mit zwei verschiedenen Getreidekulturen bestellt wurde. Im unmittelbaren Bereich des auf der geologischen Karte eingezeichneten Kupferschieferausstrichs in den Gemarkungen Ahlsdorf und Hergisdorf konnten durch Interpretationen von CIR- und Satellitenbildern keine wesentlichen Schäden der vitalen Vegetation festgestellt werden, die ursächlich auf schwermetallbelastete Substrate in den Oberböden zurückzuführen sind.

**Karte 8: CIR-Luftbild westlich Ahlsdorf mit Verlauf des Kupferschieferausstrichs**



Auf der Basis der Erkenntnisse der Interpretation weiterer CIR-Luftbilder wurden auch bei Geländebegehungen in den Gemarkungen Ahlsdorf, Hergisdorf, Kreisfeld und Benndorf im direkten Umfeld der Linie des Kupferschieferausstrichs zunächst keine wesentlichen Vegetationsschäden festgestellt, die auf belastete Bodenverhältnisse hindeuten könnten. Auf den CIR-Luftbildern waren in den Kulturvegetationsbeständen vorhandene Schäden oftmals nicht differenziert genug abgebildet oder nicht erkennbar, zum Beispiel dann, wenn Ackerschläge bereits abgeerntet waren. Deshalb wurde eine erste Befliegung des UG 1 am 20.03.1997 mit einem Ultraleichtflugzeug durchgeführt, die weitergehende Erkenntnisse über die Verbreitung von Vegetationsschäden im Umfeld des Kupferschieferausstrichs liefern sollte.

Durch zahlreiche Bohrstocksondierungen (durchschnittlich bis 200 cm, zum Teil bis zu 250 cm Tiefe) im Bereich des auf der geologischen Karte eingezeichneten Kupferschieferausstrichs in den oben genannten Gemarkungen konnte die bereits von LORENZ (1996) gewonnene Erkenntnis erhärtet werden, dass das weichselzeitliche Sedimentpaket in diesem Raum trotz nicht unbeträchtlicher, durch Bodenerosion bedingte Denudationserscheinungen, auch gegenwärtig noch als flächenhaft prägendes Substrat der Bodenhorizonte angesehen werden muss. Die im Bereich des Kupferschieferausstrichs vorkommenden Böden wurden zumeist noch in einer Tiefe von mehr als 2 m von Löß- bzw. Lößderivaten unterlagert. Die hier vorzufindenden Parabraunerden und Griserden weisen zwar häufig Profilverkürzungen auf, von einem flächenhaft dominanten Status der Pararendzinen oder gar Ranker kann man aber noch nicht ausgehen.

In weniger von Erosionserscheinungen beeinträchtigten Arealen konnte eine Zweiteilung der äolischen Decke in einen hangenden Löß und einen liegenden Fließlöß beobachtet werden (LORENZ 1996).

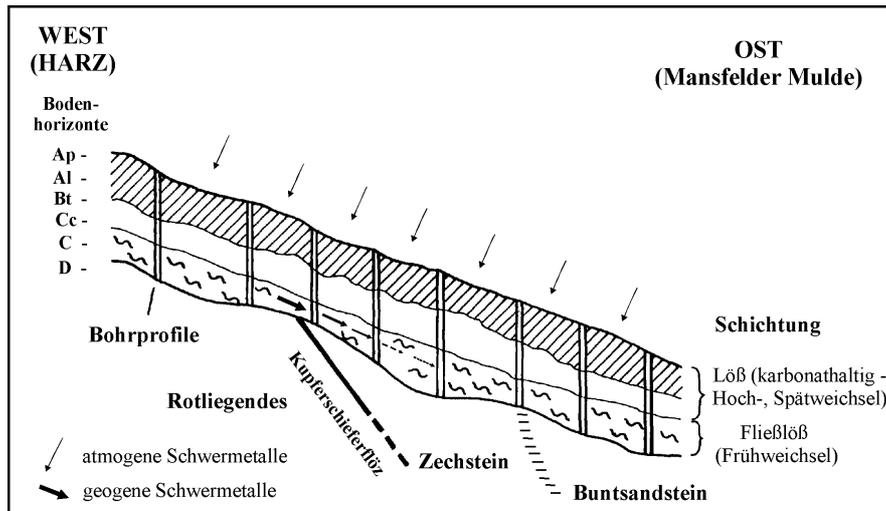
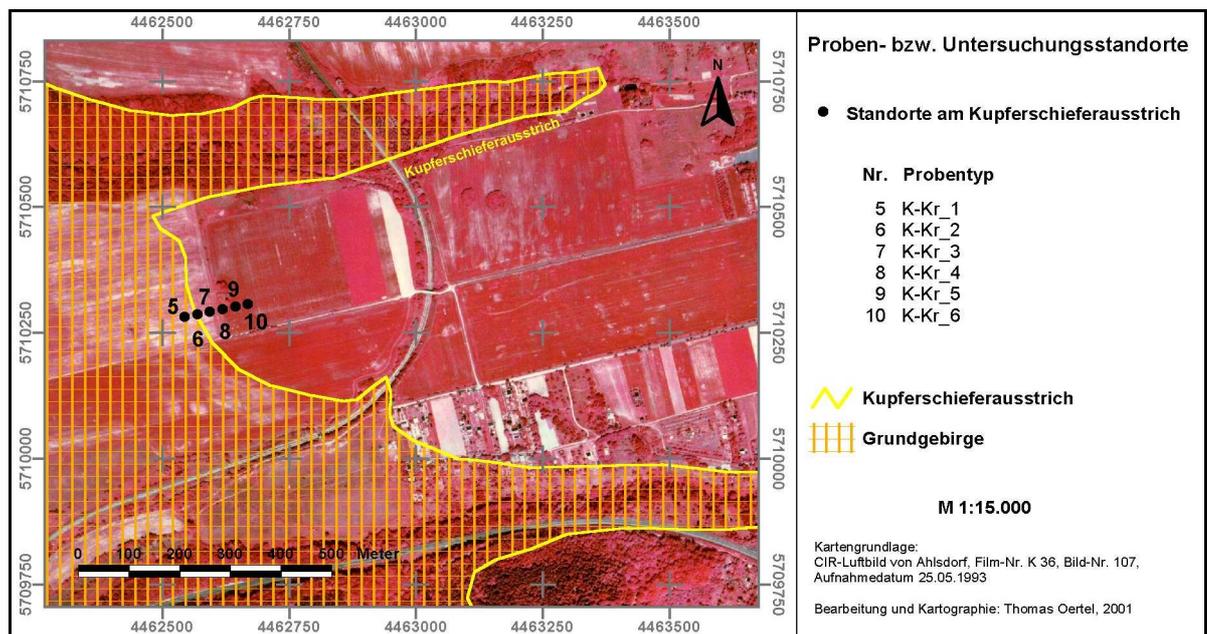


Abb. 15: Idealisiertes geologisch-bodenkundliches Geländeprofil im Bereich des Zechsteinausstrichs am östlichen Harzrand (nach FRÜHAUF in LORENZ 1996)

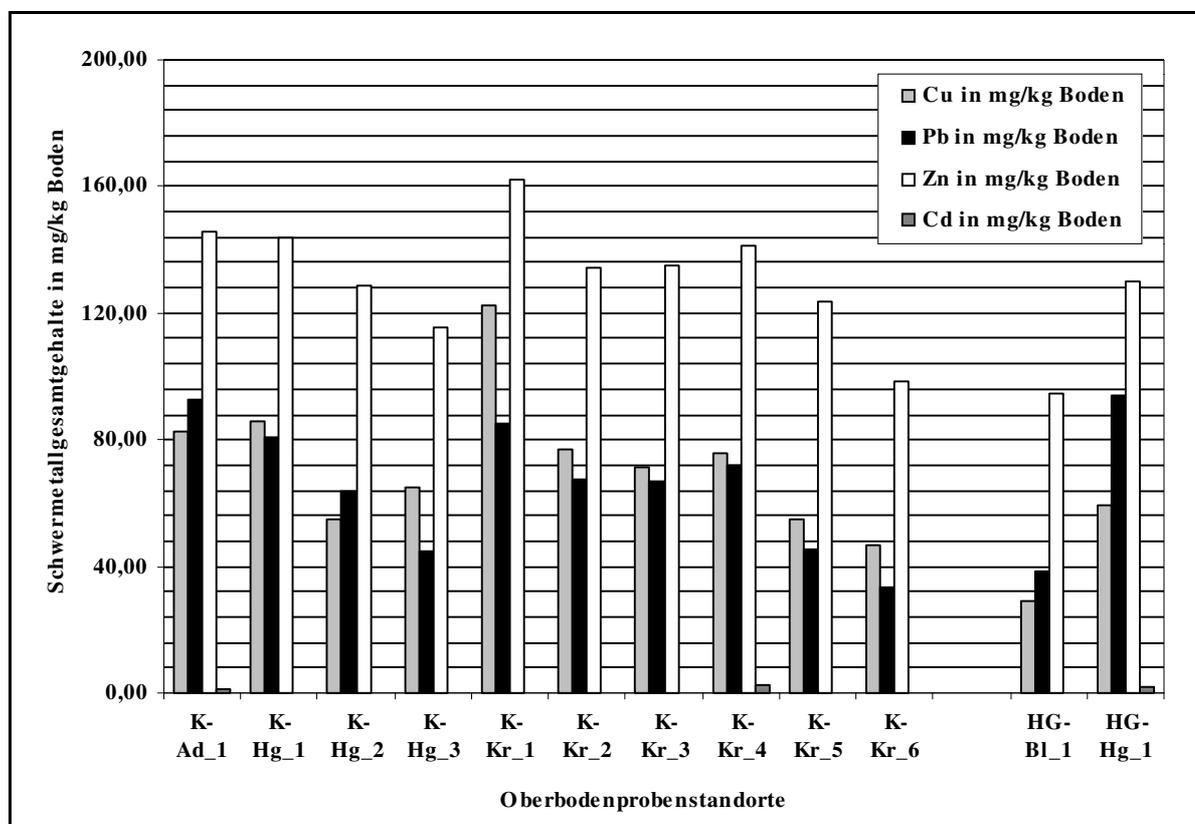
Wie Abb. 15 und Abb. 9 deutlich machen, wurden zahlreiche Oberbodenbereiche und somit auch die Kulturvegetation in der Umgebung des Kupferschieferausstrichs in der Vergangenheit zusätzlich zu den Schwermetallgehalten, die in den geogenen Ausgangsgesteinen der Bodenbildung ihre Ursache haben, durch schwermetallhaltige Emissionen der Kupferrohverhüttung und -veredlung über den atmogenen Pfad belastet. Beispielsweise ist die ehemalige Rohhütte Helbra von dem Catenastandort aus Abb. 15 ca. 2 km (Luftlinie) entfernt. Die natürliche Schwermetallquelle Kupferschieferflöz wird hier durch die oben beschriebenen Lagerungsverhältnisse nicht oberflächenwirksam und kann somit auch nicht die Ursache für Vegetationsschäden infolge zu hoher Schwermetallgehalte der Böden sein.

Anhand von sechs Oberbodenproben, die in Form eines Probentransektes (Karte 9) im Abstand von ca. 20 m über den Bereich der ausstreichenden Kupferschieferlinie in der Flur Kreisfeld gelegt wurden, sollten diese Erkenntnisse untersetzt werden.

Karte 9: Standorte der Oberbodenmischproben am Kupferschieferausstrich westlich von Kreisfeld



Die Schwermetallanalysen der Oberbodenmischproben der Geländeuntersuchungen am Kupferschieferausstrich westlich der Gemeinden Ahlsdorf und Hergisdorf (K-Ad\_1, K-Hg\_1, K-Hg\_2 und K-Hg\_3 sowie die des Proben transektes K-Kr\_1 bis K-Kr\_6) erbrachten nach Königswasseraufschluss geringere Konzentrationen, als nach den Aussagen der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) erwartet wurde (Abb. 16). Die ermittelten Gehalte liegen unter den tolerierbaren Richtwerten nach EIKMANN et KLOKE (1993).



**Abb. 16: Schwermetallgesamtgehalte von Oberbodenproben im Bereich des Kupferschieferausstrichs und Hintergrundstandorte in mg/kg Boden (nach Königswasseraufschluss)**

Der Vergleich zwischen den Schwermetallgehalten des Hintergrundstandortes HG-Hg\_1, der einen Oberbodenstandort westlich des geogenen Einflussbereiches der Gesteine des Zechsteins am Ostharrstrand repräsentiert, und den Oberbodenstandorten im direkten Bereich des Kupferschieferausstrichs, zeigt lediglich geringe Schwankungen in der Quantität der Bodenbelastungen, die u. a. auf eine unterschiedliche Intensität der atmosphären Belastung bzw. auf differierende Speicherpotentiale des Bodenmaterials zurückgeführt werden können. Eine deutliche Mehrbelastung der Schwermetallgesamtgehaltkonzentrationen am Kupferschieferausstrich (K-Standorte) gegenüber dem Hintergrundstandort HG-Hg\_1 ließ sich nicht nachweisen.

Auch im Vergleich zum ca. 3 km westlich des Kupferschieferausstrichs in der Flur Blankenheim lokalisierten Hintergrundstandortes HG-BI\_1, der sich in einer Entfernung von ca. 5 km zu den ehemaligen Großhütten der Kupferrohverhüttung (entgegen der Hauptwindrichtung SW) befindet, besitzen die K-Standorte sowie der Standort HG-Hg\_1 nur geringfügig höhere Gehalte an Schwermetallen.

Die pflanzenverfügbaren Anteile (nach Ammoniumnitrat-aufschluss) der Oberbodenmischproben aus dem Bereich des Kupferschieferausstrichs bei Hergisdorf und Kreisfeld sowie die der HG-Standorte bei Hergisdorf und Blankenheim sind in Abb. 17 dargestellt.

Die Oberbodenproben am Kupferschieferausstrich und die der Hintergrundwerte unterschreiten nach  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss bis auf die Proben K-Kr\_1, K-Kr\_2 und HG-Hg\_1 den Prüfwert für Kupfer nach der BBODSCHV (1999) von 1 mg Cu/ kg Boden auf Ackerflächen.

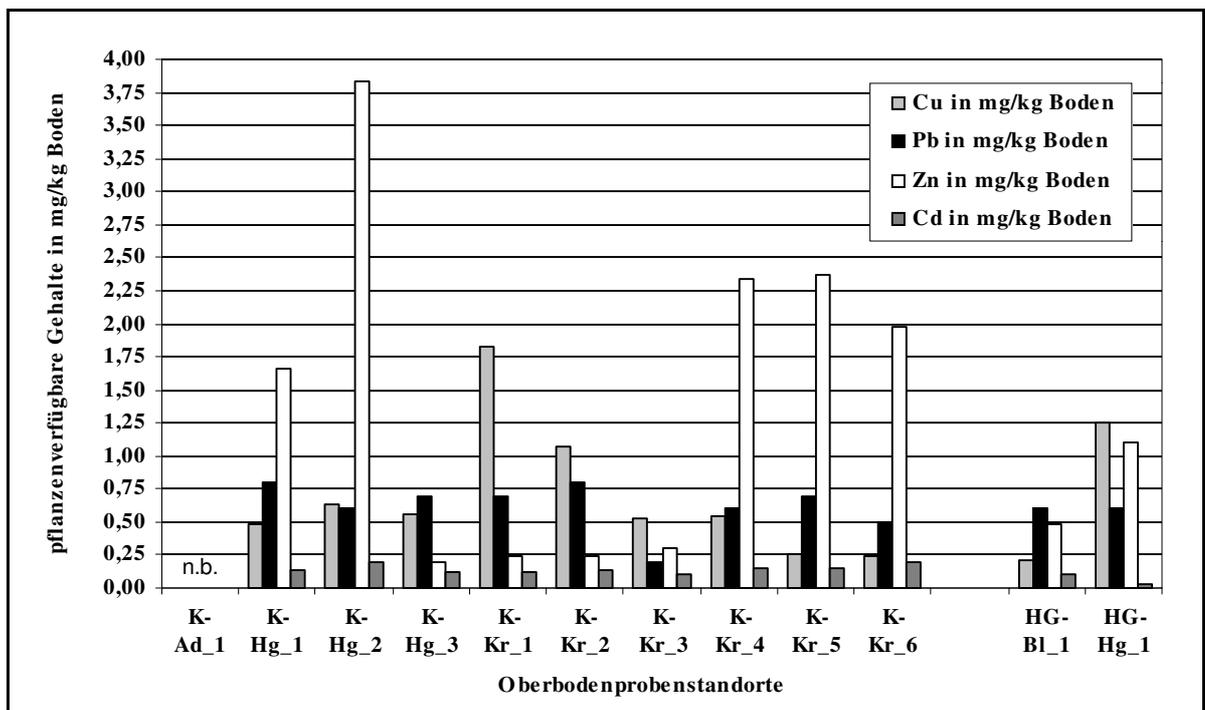


Abb. 17: Schwermetallgehalte von Oberbodenproben im Bereich des Kupferschieferausstrichs und der Standorte der Hintergrundwerte in mg/kg Boden (nach Ammoniumnitrat-aufschluss)

Die Bleikonzentrationen der K-Standorte und der HG-Standorte überschreiten hingegen, außer am Standort K-Kr\_3, den Prüfwert nach der BBODSCHV (1999) von 0,1 mg Pb/ kg Boden auf Ackerflächen mehrfach. Der Maßnahmewert für Cadmium nach BBODSCHV (1999) von 0,1 mg Cu/ kg Boden wird außer vom Hintergrundstandort HG-Hg\_1 von allen analysierten Proben, die in Abb. 17 dargestellt sind, überschritten. Für Cadmium, Blei und Kupfer traten bei den Messungen zum Teil hohe relative Standardabweichungen auf, was auf die sehr geringen Schwermetallkonzentrationen im Verhältnis zu den Nachweisgrenzen des Messverfahrens (Flammen-AAS), zurückzuführen ist. Trotz möglicher Messfehler kann eingeschätzt werden, dass im Ergebnis der Königswasser- und Ammoniumnitrat-aufschlüsse ein Einfluss von stark schwermetallhaltigem Material aus dem Kupferschieferflöz im Untergrund auf die Oberbodenmischproben nicht gegeben ist. Somit ist eine Schädigung der Kulturvegetation durch geogene Schwermetalle im Boden ohne anthropogenen Einfluss nahezu ausgeschlossen.

Im UG 1 wurde an einigen Lokalitäten östlich der Linie des Kupferschieferausstrichs in den Fluren Ahlsdorf, Hergisdorf und Sandersleben die Integration von zum Teil grobkörnigen Schieferbruchstücken in den Oberböden nachgewiesen (Abb. 18, Abb. A 4). Dieses Schiefermaterial im Oberboden kann bei den gegebenen geologischen Lagerungsverhältnissen nicht durch natürliche Transportprozesse bzw. Erosionsprozesse dorthin gelangt sein. Die Ausgangshypothese war zunächst, dass die Schieferbruchstücke im Oberboden im Zusammenhang mit dem Kupferschieferbergbau stehen, d. h., dass sie anthropogen beeinflusst und umgelagert wurden. Vergleichbare Vermutungen wurden bereits bei früheren Untersuchungen geäußert.

CÖSTER (1993) und FRÜHAUF (1995) stellten auf Flächen zwischen Halden der Kleinsthaldenlandschaft westlich von Wimmelburg signifikante Pb-, Zn- und Cu-Gehalte in Böden fest, deren Konzentration, Größenordnung und Spektrum nicht auf atmogene Belastungen, sondern auf geogene Quellen zurückzuführen sind. Als Ursache dafür geben die Autoren die Integration von Schieferbruchstücken in den Oberboden an. CÖSTER et FRÜHAUF (1998) bezeichneten diese Flächen als Standorte von „Haldenschleifungen“. Die Landwirtschaft hatte auf solchen Schlägen bereits seit den 70er bzw. 80er Jahren Versuche unternommen, die dort auftretenden Ertragsverluste zu minimieren.



**Abb. 18: Schiefermaterial im Oberboden und Vegetationsschäden bei Sandersleben (Foto: Oertel 1997)**

Schon 1976 fand VOGEL im Bereich des Kupferschieferausstrichs im südlichen Harzvorland bei Pölsfeld sogenannte „technogene Bodenhorizonte“ an zwei Bodenprofilen unterhalb des Ap-Horizontes vor, die er auf die „bergbauliche Tätigkeit des Menschen“ zurückführte. Eine Erklärung, wie und warum dieses Material so in den Boden gelangte und in welcher räumlichen Dimension diese Erscheinung auftritt, gibt der Autor nicht. An anderer Stelle zitiert er Landwirte, die von alljährlich „auftretenden Vegetationsschäden in der Umgebung der Kleinsthalden und im Bereich der abgetragenen Halden“ sprechen, er stellt aber keinen Zusammenhang zu den von ihm untersuchten „technogenen Böden“ her.

Um die Ursache dieser Phänomene näher zu untersuchen, wurde Anfang des Jahres 1997 in der Flur Sandersleben eine Bodencatena über den Bereich des nach Norden, steiler als am Westrand der Mansfelder Mulde, einfallenden Kupferschieferflözes angelegt.

Alle drei Bohrungen der Sanderslebener Catena erfolgten im Bereich eines Löß 2-Standortes (Löß-Rendzina und Kolluviallöß-Schwarzerde der Hänge). Die drei Bodenprofile, die in Abb. 10 in ihrer räumlichen Lage am Kupferschieferausstrich bei Sandersleben dargestellt wurden, sind in der Abb. 19 in Form zusammengesetzter Cobra-Bohrstockkerne abgebildet. Um die Darstellung zu verbessern, wurden die Abbildungen der Bohrstöcke um 30 % verbreitert. Farbabweichungen von der Realität bei den Fotografien der Bohrstöcke resultieren u. a. aus veränderten Lichtverhältnissen und Feuchtegehalten der Substrate bei der Profilaufnahme. Eine Vergleichbarkeit der Farben der Bodenhorizonte ist jedoch über die trocken bestimmten Farbwerte nach der Munsell Farbtabelle gegeben, die in Tab. A 1 aufgelistet sind. Diese Tabelle im Anhang enthält neben den Schwermetallgehalten der Profile auch Analyseergebnisse zu ausgewählten pedologischen Kenngrößen. Besonders auffällig sind die hohen Skelettanteile der tieferen Horizonte der Profile 1 und 2 sowie des Ap-Horizontes und des darunter aufgefundenen jC-Horizontes des Profils 3. Bei den Profilen wurden durchgängig über alle Horizonte pH-Werte im schwach alkalischen Milieu bestimmt. Die Karbonatgehalte schwanken besonders im Profil 1 zwischen 4,7 und 28,5 Vol %  $\text{CaCO}_3$ .

Ein Bohrkernverlust trat bei der 1. Bohrung im Profil Sandersleben 3 zwischen 30 und 65 cm auf. Bei der 2. Bohrung wurde als Ursache dafür schwarzes Lockergestein unterhalb des Ap-Horizontes festgestellt. Die 3. Bohrung des P-Sa\_3 endete mit einem verkleinerten Bohrdurchmesser bereits nach ca. 25 cm in einer Auflockerungszone von kalkhaltigem Festgestein in einer Tiefe von zwei Metern.

Tiefe in cm	Profil Sandersleben 1	Profil Sandersleben 2	Profil Sandersleben 3
10			
20			Ap P-Sa_3/1 (7.5YR 5/2)
30	Ap P-Sa_1/1 (10YR 4/3)	Ap P-Sa_2/1 (10YR 5/3)	
40	Ah P-Sa_1/2 (10YR 4/4)		
50			
60			
70		Cc P-Sa_2/2 (7.5YR 6/4)	jC P-Sa_3/2 (10YR 3/2)
80	Ah/Cc P-Sa_1/3 (10YR 5/4)		jC P-Sa_3/3 (10YR 4/3)
90			Cc P-Sa_3/4 (10YR 6/4)
100			
110			Cc P-Sa_3/5 (7.5YR 6/4)
120		Cc P-Sa_2/3 (10YR 6/4)	
130	Cc P-Sa_1/4 (10YR 6/4)		Cc P-Sa_3/6 (7.5YR 6/4)
140			
150		Cc P-Sa_2/4 (7.5YR 5/4)	Cc P-Sa_3/7 (10YR 7/4)
160			Cc P-Sa_3/8 (10YR 6/4)
170			
180	Cc P-Sa_1/5 (10YR 6/4)	Cc P-Sa_2/5 (5YR 5/4)	
190		Cc P-Sa_2/6 (7.5YR 6/4)	Cc P-Sa_3/9 (10YR 5/4)
200			
210			
220	Cc P-Sa_1/6 (10YR 6/4)		
230			
240			
250	Cc P-Sa_1/7 (10YR 6/4)		
260			
270			

Abb. 19: Bodencatena am Kupferschieferausstrich bei Sandersleben

Im Ergebnis der Schwermetallbestimmungen von Böden im Bereich des Kupferschieferausstrichs nach dem Königswasseraufschluss sind im Ap-Horizont des Bodenprofils Sandersleben 1 (Abb. 20) erhöhte Konzentrationen an Schwermetallen festgestellt worden. Auffällig ist, dass die Kupfer-, Blei- und vor allem die Cadmiumkonzentrationen von der EOF bis in eine Tiefe von ca. 200 cm allmählich absinken und erst in noch tieferen Bodenbereichen auf Werte ansteigen, welche die Konzentrationen im Oberboden erreichen bzw. übertreffen. Die Zinkkonzentrationen schwanken zwischen den Bodenproben 1/1 und 1/4 zwischen 503 mg/kg Boden und 751 mg/kg Boden. Die geringsten Konzentrationen innerhalb des Profils wurden bei der Probe 1/5 im Löß gemessen. Danach ist ein starker Anstieg der Konzentrationen bis auf 2138,5 mg/kg Boden bei einer Tiefe von 230-275cm unter der EOF festzustellen. Ursache hierfür sind im Löß eingemischte Kalksteinbruchstücke, die aus dem Zersatz der Hangenden Schichten des im Untergrund vorkommenden Flözes des Kupferschieferausstrichs stammen. Die relative Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle ist nach den Ergebnissen des Ammoniumnitrat-aufschlusses (dargestellt im rechten Teil der Abb. 20) sehr gering, wobei die Kupferverfügbarkeit gegenüber anderen Metallen dominiert.

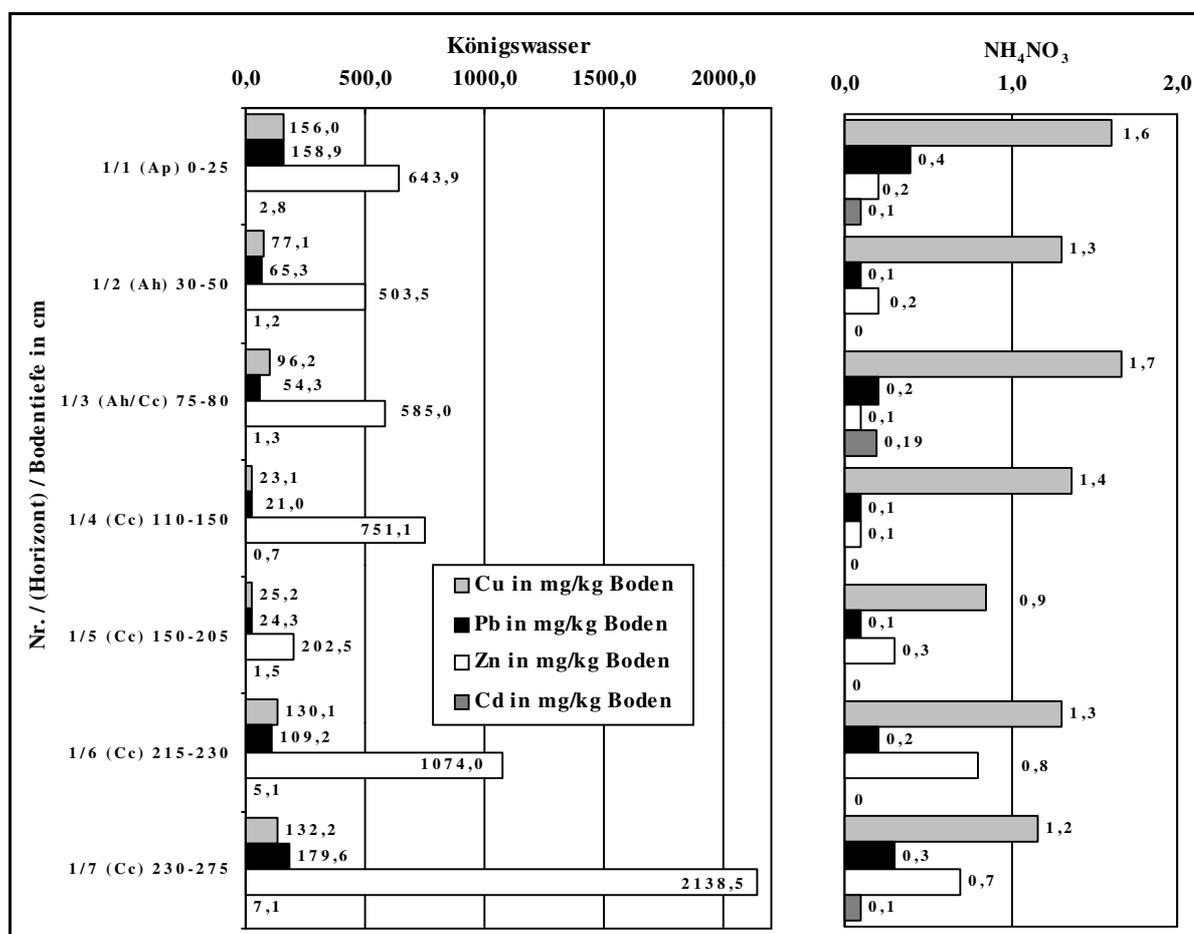


Abb. 20: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Im Ap-Horizont besitzt das Bodenprofil Sandersleben 2 (Abb. 21) bereits höhere Schwermetallgehalte als das Bodenprofil Sandersleben 1. Der Trend, dass mit zunehmender Tiefe die Metallkonzentrationen abfallen, ist jedoch auch hier gegeben. Ab einer Tiefe von ca. 140 cm wurden mit 1069,0 mg/kg Boden bei Zink und 580,1 mg/kg Boden beim Element Kupfer wieder Konzentrationen ermittelt, die sich mit Metallgehalten im Ap-Horizont in ähnlichen Größenordnungen befinden. Gegenüber der Probe des Profilabschnittes 2/3 treten im Profilabschnitt 2/4 sprunghaft höhere Skelettgehalte im Löß auf, die als Residualgesteine des Zechsteins interpretiert werden können. Unterhalb bei 2/5 nehmen die Metallgehalte im Cc-Horizont wieder ab. In einer Tiefe von 200 cm musste die Bohrung aufgrund von anstehendem Festgestein beendet werden.

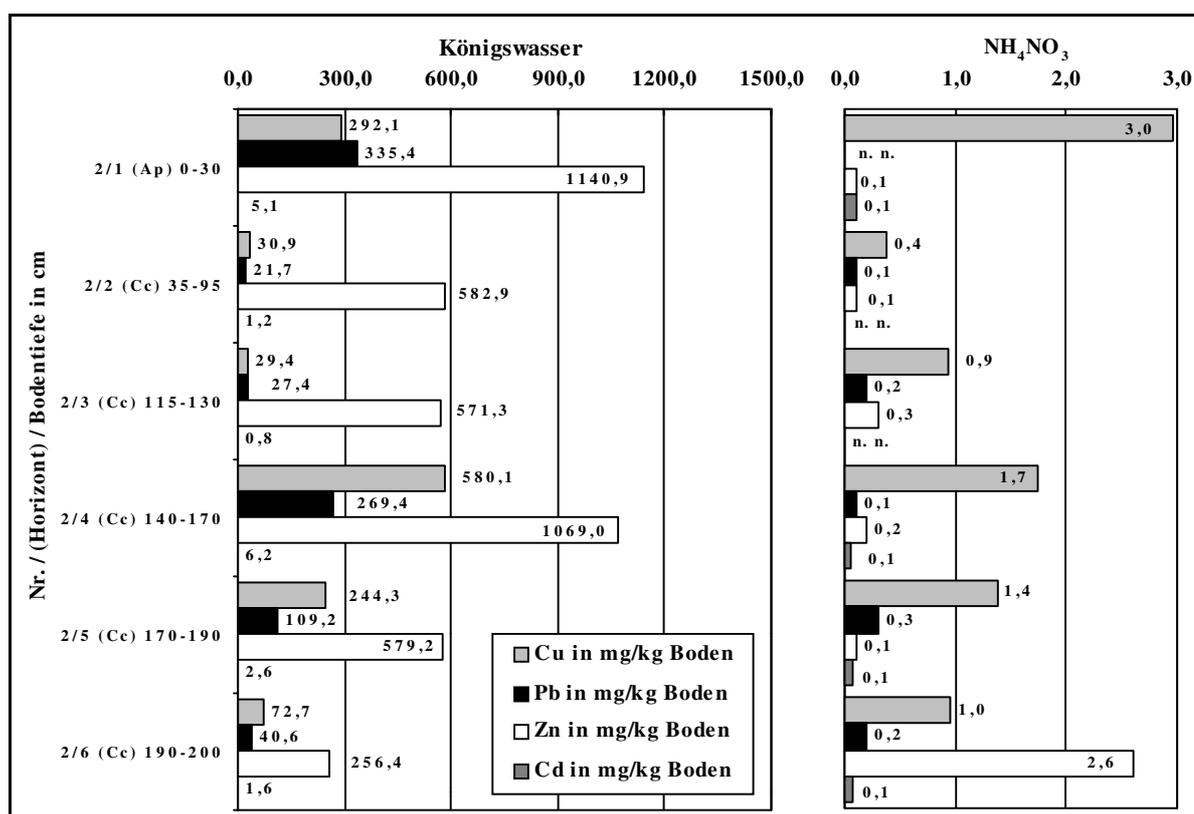


Abb. 21: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa\_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Die pflanzenverfügbaren Metallanteile (nach NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss) weisen mit Ausnahme der Kupferanteile des Oberbodens und der Zinkgehalte in der Probe 2/6 mit zunehmender Tiefe von der EOF einen ähnlichen Trend wie die beschriebenen Gehalte nach dem Königswasseraufschluss auf, nur auf niedrigerem absoluten Konzentrationsniveau.

Das Bodenprofil Sandersleben 3, das die Abb. 22 zeigt, weist bereits im Oberboden derart hohe Schwermetallkonzentrationenwerte auf, dass diese keinesfalls allein auf die beim Bodenprofil 1 beschriebene Belastungen durch die Hettstedter Hütten zurückgeführt werden können. Signifikant für die Oberbodenmischprobe ist das Auftreten von Schieferbruchstücken, die einen hohen Skelettanteil mit einem Gewichtsanteil von ca. 20 % verursachen. Weiterhin bewirken die verwitterten Anteile dieses kalkhaltigen Gesteins im Ap-Horizont einen Karbonatanteil von fast 22,9 %.

Die Ursache der erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Oberboden findet sich unterhalb des Ap-Horizontes, im anthropogen geprägten jC-Horizont, der sich zwischen 30-90 cm unter der EOF befindet und der überwiegend aus verklapptem schwarzgrauen Schiefermaterial besteht. Schiefer und Schieferbruchstücke sind im Vergleich zum Oberboden im jC-Horizont zahlreicher vorhanden und weisen einen geringeren Verwitterungsgrad auf. Der Skelettgehalt liegt zwischen 54,8 und 64,6 Gewichtsprozent. Die bis zu 4465,3 mg Kupfer/kg Boden und bis zu 5162,4 mg Zink/kg Boden im Bereich dieser eingebrachten Schiefen bewirken eine schädigende Menge an pflanzenverfügbaren Metallanteilen.

Pflanzenschädigungen waren durch das Auftreten von Chloroseerscheinungen und Minderwuchs bei den am Ende des Winters 1997 an diesem Standort vorgefundenen jungen Weizenpflanzen besonders auffällig (Abb. A 4) und sind auch aus den erhöhten Gehalten des NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschlusses in Abb. 22 ablesbar.

Unterhalb des jC-Horizontes fallen die Schwermetallgehalte im ungestörten natürlichen Ausgangssubstrat der Bodenbildung sehr stark ab, lediglich das Element Zink ist, aufgrund seines Vermögens leicht verlagerbar zu sein, auch in Tiefen zwischen 90 cm und 160 cm mit rund 450 mg/kg Boden noch stark vertreten.

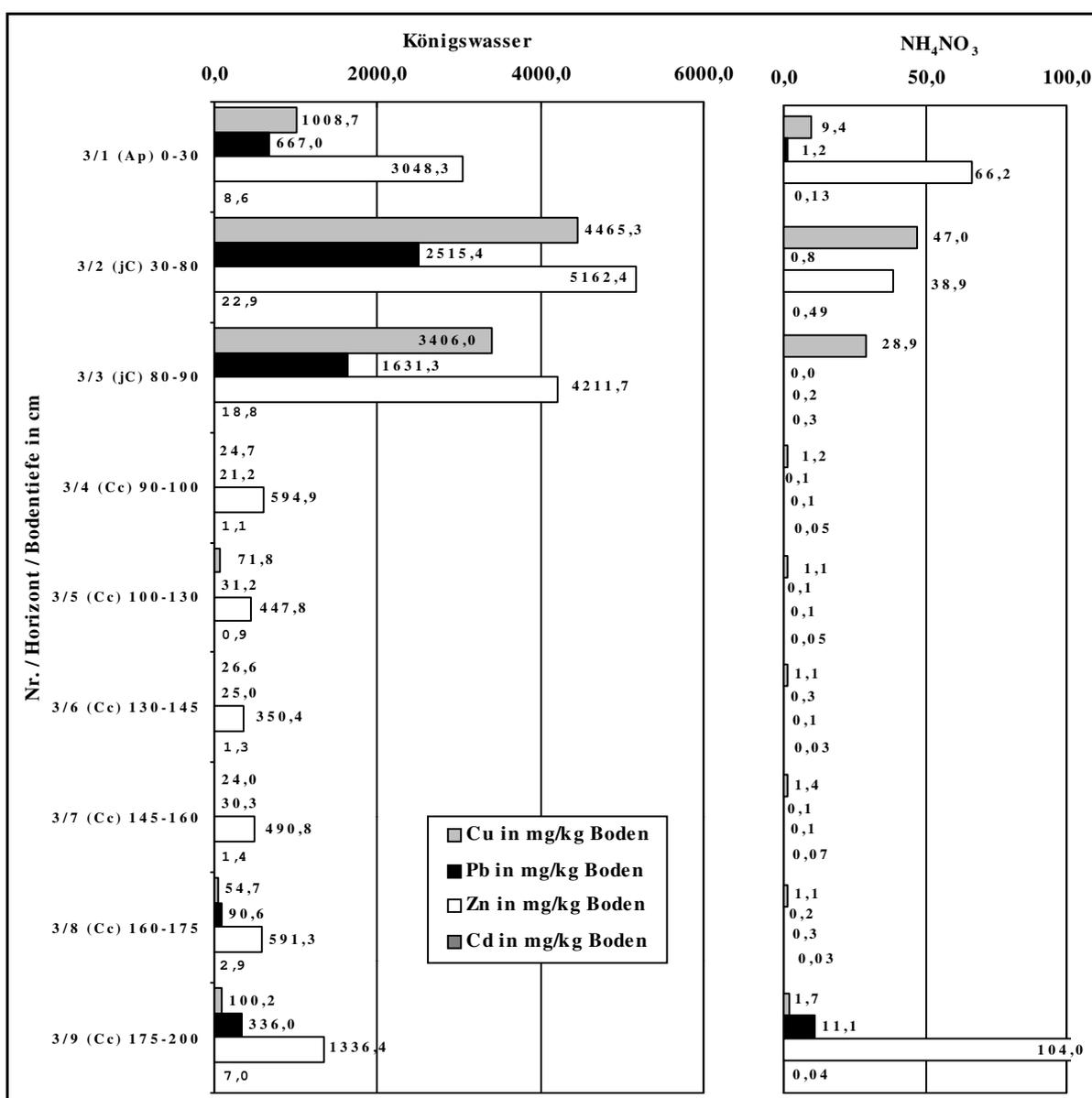


Abb. 22: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa\_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Dieser Bereich zeichnet sich durch Skelettarmut, einen geringen Gehalt an organischer Substanz, schwach basische pH-Werte und hohe Karbonatgehalte aus. Die ab ca. 160 cm Tiefe ermittelten höheren Gesamtschwermetallkonzentrationen (bis zu 336 mg Pb/kg Boden bzw. 1336,4 mg Zn/kg Boden) sind, wie beim Bodenprofil Sandersleben 2, mit dem Auftreten der Umgebungsgesteine der Zersatzzone des Kupferschieferflözes in Zusammenhang zu bringen. In diesem Horizontbereich ist gleichzeitig ein Anstieg der mobilen Schwermetallgehalte festzustellen. Die relativ schwermetallarmen Schichten der Horizonte 3/4 bis 3/7 zeigen deutlich auf, dass es keine natürlichen Einträge aus dem metallreichen Untergrund nach oben in Richtung zum Hauptwurzelschizont der Pflanzen gibt, da der Cc-Horizont als Pufferzone dazwischen liegt.

Gleichzeitig verhindert der neutrale bis leicht basische Löß des Cc-Horizontes auch, dass sich die hohen Schwermetallgehalte des durch anthropogene Tätigkeit eingebrachten jC-Horizontes kaum in die Tiefe verlagern. Eine Gefährdung für tiefere Bodenschichten bzw. für das Grundwasser ist somit vernachlässigbar gering. Als Austragspfade zur Verlagerung des Schwermetallpotentials dieser Flächen kommen somit überwiegend oberflächennahe Erosionsereignisse und die Ernte der Kulturpflanzen in Betracht. Es kann resümiert werden, dass bei den im Rahmen der Untersuchung gemachten Stichproben im Bereich des oberflächennahen Kupferschieferausstrichs am Westrand der Mansfelder Mulde und am Nordrand

der Halle-Hettstedter-Gebirgsbrücke bei überall vorgefundener Lößunterlage der Böden keine natürliche Oberflächenwirksamkeit der Schwermetalle aus dem Untergrund analysiert werden konnte.

Der über den geologischen Schichten abgelagerte, an Schwermetallen arme Löß, unterbricht auch im direkten Bereich des Ausstrichs des Kupferschieferflözes die Oberflächenwirksamkeit der pflanzenschädigenden Schwermetalle aus dem Untergrund. Ohnehin ist der oberflächennahe und somit die Böden beeinflussende Flächenanteil des natürlichen Kupferschieferausstrichs durch die geringe Mächtigkeit des Hauptflözes sehr gering. Etwas größer ist der potentielle Oberflächeneinfluss der mächtigeren, an Schwermetallen jedoch ärmeren Hangenden Schichten des Kupferschieferflözes.

Die Erkenntnis, dass Schiefermaterial aus der Bergbautätigkeit und somit Boden belastendes schwermetallhaltiges Gestein durch den Menschen unterhalb des Ap-Horizontes verklappt wurde, erklärt das Phänomen der von VOGEL (1976) im Bereich des Kupferschieferausstrichs bei Pölsfeld beschriebenen technogenen Horizonte, das in seiner räumlichen, stofflichen und zeitlichen Dimension innerhalb dieser Arbeit an verschiedenen Standorten im Zeitraum zwischen 1997 und 2001 im Mansfelder Land weiter untersucht wurde.

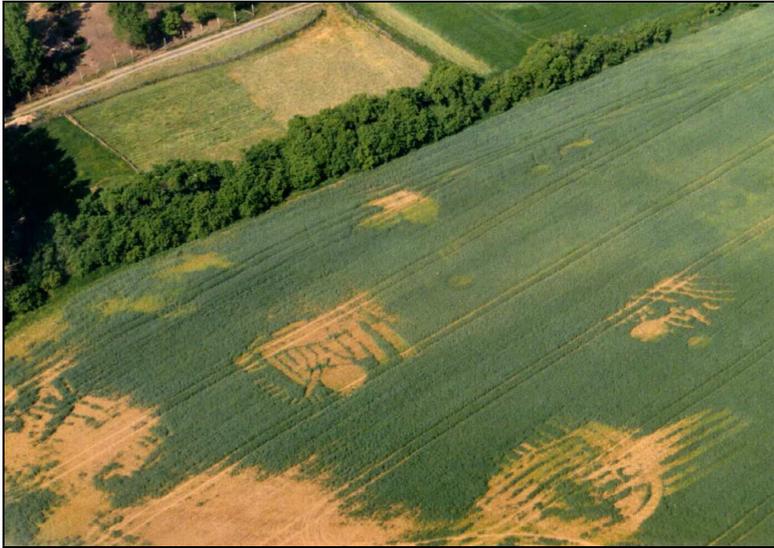
### 5.1.2 Haldenvergrabungen als anthropogene Quelle

Bereits bei ersten Geländebegehungen in verschiedenen Bereichen der Untersuchungsgebiete zwischen den Kleinhalden und dem Kupferschieferausstrich wurden wiederholt Bodenareale aufgefunden, die im Krumbereich Kupferschieferbruchstücke aufwiesen. Als Indikator zum Auffinden solcher Standorte eigneten sich besonders Pflanzen mit Chloroseschäden, die weithin als gelbe bzw. hellgrüne Flecke im Winter und im zeitigen Frühjahr das Landschaftsbild prägen. Mit zunehmender Vegetationsentwicklung im Frühsommer sind solche Standorte vom Feldrand weniger leicht zu finden und unterscheiden sich kaum von normalen Standorten. Aus der Nähe zeichnen sie sich dennoch durch ausgedünnte Kulturpflanzenbestände bzw. durch vermehrtes Wachstum an Unkräutern aus. Kurz vor der Ernte fallen solche Standorte wieder durch Minderwuchs, kleinere Wurzelsysteme und Frühreife auf (OERTEL 1998).

Mehrere Befliegungen mit einem Ultraleichtflugzeug zwischen 1997 und 1999 zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Vegetationsentwicklung, aber auch die Auswertung vorhandener CIR-Luftbilder (nach entsprechenden Vergrößerungen), zeigten eine größere, aber unregelmäßige Verbreitung solcher Standorte mit unterschiedlichster Schadwirkung an den Kulturpflanzen. In den Abb. 23 und Abb. 24 sind Vegetationsschädigungen bzw. der Totalausfall der Nutzpflanzen bereits in der Hauptwachstumsphase des Getreides im Mai 1998 sichtbar.



Abb. 23: Vegetationsdepressionen bei Benndorf (Foto: Oertel 1997)



**Abb. 24: Vegetationsausfall bei Benndorf (Foto: Oertel 1998)**

Auf dem CIR-Luftbild westlich von Kreisfeld (in Abb. 25) wird an den hellen Stellen innerhalb der rot bis dunkelrot abgebildeten Flächen der vitalen Kulturvegetation das Ausmaß der Vegetationsschäden ebenfalls deutlich. Im Anhang befinden sich weitere Geländefotos, die massive Vegetationsschäden bei Sandersleben und Pölsfeld belegen (Abb. A 4, Abb. A 5). Die Intensität und Form der Schäden an der Kulturvegetation lassen vermuten, dass die Ursache in geschädigten Bodenverhältnissen zu suchen ist.



**Abb. 25: Vegetationsschädigungen westlich von Hergisdorf und Kreisfeld (CIR-Luftbild 1993)**

### 5.1.2.1 Schwermetalle im Oberboden von Standorten mit und ohne Vegetationsschäden

Nach ersten Erkenntnissen über das Flächenausmaß dieser Schadphänomene durch Luftbildinterpretationen erfolgten weitere bodenkundliche Untersuchungen solcher Standorte. Die Untersuchungsstandorte von Oberbodenmischproben mit Vegetationsschäden (VS-Standorte) und ohne Vegetationsschäden (VoS-Standorte) sind den Karten 6 und 7, die zugehörigen Koordinatenangaben der Tab. A 1 zu entnehmen. Die Oberbodenmischproben der VS-Standorte wurden immer von Bodenbereichen auf Ackerstandorten entnommen, in denen die Kulturpflanzen sehr stark geschädigt waren. Die VoS-Standorte sind demgegenüber Vergleichsstandorte, die im Umfeld einer Extremschädigung beprobt wurden und in denen vitale Vegetationsverhältnisse vorherrschten. Ergebnisse der Analysen zu Schwermetallgesamtgehalten und pflanzenverfügbaren Anteilen der Elemente Kupfer, Blei, Zink und Cadmium von Bodenstandorten mit Vegetationsschäden aus Fluren der Untersuchungsgebiete sind in Tab. 11 dargestellt. Die zugehörigen Analyseergebnisse der Vergleichsstandorte sind in Tab. 12 aufgelistet. Für die Standorte VS-Gö\_1 und VS-Gö\_2 existiert nur ein Vergleichsstandort, der mit VS-Gö\_1/2 bezeichnet wurde. In der Abb. A 7 sind Schäden an einem jungen Weizenbestand und seine Auswirkungen auf die Wuchshöhe und Bestandsdichte von den Standorten VS-Be\_1 und VS-Be\_2 dargestellt.

**Tab. 11: Schwermetallgehalte von Oberbodenmischproben der Standorte mit Vegetationsschäden nach verschiedenen Aufschlüssen (in mg/kg Boden)**

Nr.	Probentyp	Kupfer		Blei		Zink		Cadmium	
		KW	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>						
15	VS-Ad_1	1.431,3	13,0	214,7	0,1	312,5	0,3	n. b.	0,1
16	VS-Ad_2	694,8	n. b.	184,0	n. b.	544,0	n. b.	n. b.	n. b.
17	VS-Be_1	1.123,0	12,7	948,8	1,3	1.142,6	1,1	5,6	0,2
18	VS-Gö_1	989,2	6,5	2.343,2	1,8	2.168,4	5,2	8,3	0,3
19	VS-Gö_2	1.451,0	6,0	3.112,8	3,9	2.686,8	33,4	16,6	0,9
20	VS-He_1	1.050,3	10,3	1.183,6	1,5	2.090,0	4,6	7,9	0,3
21	VS-He_2	1.209,4	5,9	1.264,5	1,9	2.436,4	15,2	8,3	0,6
22	VS-Hg_1	1.439,0	20,7	128,6	1,0	347,0	0,4	2,4	0,1
23	VS-Kl_1	2.841,0	13,1	1.780,2	1,2	4.684,1	13,5	14,4	0,3
24	VS-Pö_1	2.247,6	33,3	870,4	1,0	425,0	0,1	1,8	0,1
25	VS-Sa_1	2.195,5	8,3	1.464,4	10,1	4.436,0	12,8	18,1	0,2
26	VS-Wi_1	1.181,8	6,2	863,6	0,9	2.668,8	9,3	8,9	0,3

Die Kupfergehalte der Ap-Horizonte auf den Arealen mit starken Vegetationsschäden bzw. Vegetationsausfall (VS-Standorte) nach dem Königswasseraufschluss schwanken zwischen 694,8 mg/kg Boden und 2841,0 mg/kg Boden und erreichen im Mittel aller 12 VS-Standorte 1487,8 mg/kg Boden. Diese ermittelten Gesamtschwermetallgehalte überschreiten die tolerierbaren Orientierungswerte für Schadstoffe nach EIKMANN et KLOKE (1993) um ein Vielfaches.

**Tab. 12: Schwermetallgehalte von Oberbodenmischproben der Standorte ohne Vegetationsschäden nach verschiedenen Aufschlüssen (in mg/kg Boden)**

Nr.	Probentyp	Kupfer		Blei		Zink		Cadmium	
		KW	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	KW	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	KW	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	KW	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>
27	VoS-Ad_1	82,9	n. n.	92,9	n. n.	145,5	n. n.	0,4	n. n.
28	VoS-Ad_2	428,8	2,6	82,4	0,1	313,2	0,3	0,6	0,1
29	VoS-Be_1	379,0	4,0	622,0	0,8	1.074,0	0,5	5,8	0,2
30	VoS-Gö_1/2	187,0	0,6	281,0	0,9	463,0	5,3	1,3	0,2
31	VoS-He_1	232,2	1,9	299,0	1,1	664,6	0,5	2,9	0,2
32	VoS-He_2	208,3	0,5	327,3	1,0	712,2	12,4	3,1	0,4
33	VoS-Hg_1	174,0	1,8	121,3	1,0	338,0	0,3	1,4	0,1
34	VoS-Kl_1	478,3	3,0	402,7	1,2	697,1	2,1	3,0	0,1
35	VoS-Pö_1	264,6	0,8	137,0	0,8	340,2	0,0	1,7	0,1
36	VoS-Sa_1	613,0	2,1	533,4	0,9	934,5	0,4	5,5	0,1
37	VoS-Wi_1	195,8	1,0	231,2	0,5	512,1	0,3	1,8	0,1

Die Ergebnisse der pflanzenverfügbaren Schwermetallgehalte im Boden nach  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss (BBODSCHV 1999) überschreiten bei fast allen Probenotypen den Prüfwert für Kupfer von 1,0 mg/kg Trockenmasse Feinboden mit Ausnahme der Standorte in Pölsfeld, Hettstedt und Großörner. Auch die Prüfwerte für Blei nach der BBODSCHV (1999) von 0,1 mg Pb/ kg Boden nach  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss werden im Ap-Horizont mit 1,3 mg Pb je kg Boden erheblich überschritten.

Demgegenüber sind im jC-Horizont zwischen 25-40 cm Tiefe die pflanzenverfügbaren Bleianteile (0,9 mg/kg Boden), trotz erheblich höherer Schwermetallgesamtgehalte (1427,1 mg/kg Boden) als im Ap-Horizont, als verhältnismäßig gering einzuschätzen. Die höchsten Zn- und Cd-Gehalte wurden nach dem  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss bei der Probe VoS-He\_2 ermittelt. Bei dieser Probe wird der Maßnahmenwert für Cd in Höhe von 0,04 nach der BBODSCHV (1999) um das 40-fache überschritten.

Als Ergebnis der Untersuchungen von Bodenbereichen mit massiven Vegetationsschäden (Chlorosen) wurde festgestellt, dass überall Schichten von Kupferschiefermaterial mit unterschiedlichster Mächtigkeit im Boden anzutreffen waren. Teilweise reichen diese technogenen Bodenhorizonte bis in 1,5 m Tiefe. Sie sind auf das Vergraben von Halden und somit auf anthropogene Umlagerungen von Haldenmaterial („Berge“ und „Ausschläge“) der ehemals an diesen Standorten vorkommenden Klein- und Kleinsthalden zurückzuführen (OERTEL 1998).

Zumeist wird das Haldenmaterial noch von einer mehr oder weniger mächtigen Schicht humosen Oberbodenmaterials überdeckt. Oft ist dieser allochthone „Mutterboden“ nur noch wenige Zentimeter stark oder er dünnt völlig aus. Letzteres lässt sich überwiegend auf die Wirkung von natürlichen Bodenerosionsprozessen und auf die Bodenbearbeitung durch Großmaschinen zurückführen. Für die ökologische Beurteilung dieser Standorte ist von Bedeutung, dass die vergrabenen Schiefermaterialien große Teile des heutigen Wurzelraumes der Kulturpflanzen bilden.

Durch historische Recherchen und Befragungen von ortsansässigen Landwirten konnten wesentliche Erkenntnisse zu Erscheinungsformen, zur Technologie, zum Alter und zur flächenhaften Verbreitung dieser Haldenvergrabungen gewonnen werden. Die Vergrabungen setzten in den Untersuchungsgebieten bereits um die Mitte des vorigen Jahrhunderts ein und hatten in den nachfolgenden Jahren ihre größte Intensität. Das Material der Kleinhalden wurde dabei, wie es Abb. 26 verdeutlicht, in dafür ausgehobene 1-2 m tiefe, ca. 1,5 m breite und bis zu 10 m lange Gräben, die zuerst radial um die ehemalige Haldenfläche verliefen, geschüttet.

Über den Bereich der planierten Halden und der umgebenden Schiefervergrabungen erfolgte danach eine Überschüttung mit dem Aushubmaterial. Bei diesem handelte es sich sowohl um humosen Oberboden als auch um Unterbodensubstrate der hier verbreiteten Parabraun- bzw. Griserden. Letztlich entstanden dadurch Aufwölbungen über den vergrabenen Schiefen. Durch die Zunahme der Bearbeitungsintensität, vor allem aber infolge der durch die Schlagvergrößerung gesteigerten Erosionsdisposition, kam und kommt es heute auf diesen Standorten zur schrittweisen „Exhumierung“ dieser Haldenmaterialien. In Bereichen, wo Schieferbruchstücke noch nicht im Oberbodenmaterial (Ap-Horizont) erkennbar sind, zeigt sich zumindest im Vertikalprofil eine Integration von selbigen im unteren Teil des Hauptwurzelraumes.

Die Hauptgründe für die Einarbeitung der Schieferbruchstücke in den Erdboden sind vor allem in der Rückgewinnung der guten Böden für die landwirtschaftliche Nutzung zu sehen. Durch die Haldenüberdeckung der Ackerschläge kam es zu Flächen- und damit Ertragsverlusten, weiterhin wurden die Bearbeitung und die Produktivität der umgebenden Standorte durch diese historischen Bergbaurelikte maßgeblich beeinträchtigt (OERTEL et FRÜHAUF 1999).

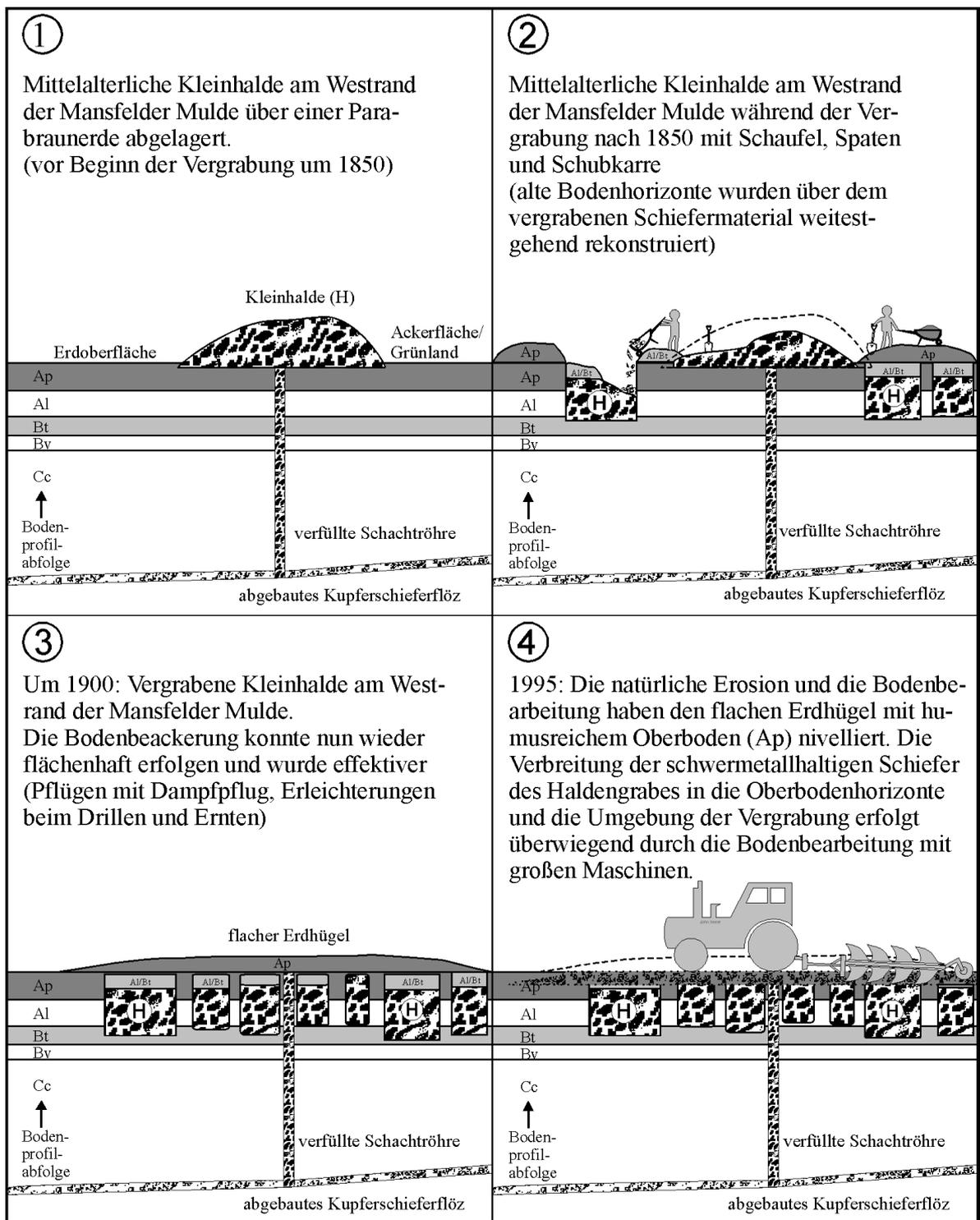


Abb. 26: Technologie der Haldenvergrabungen und der späteren Exhumierung

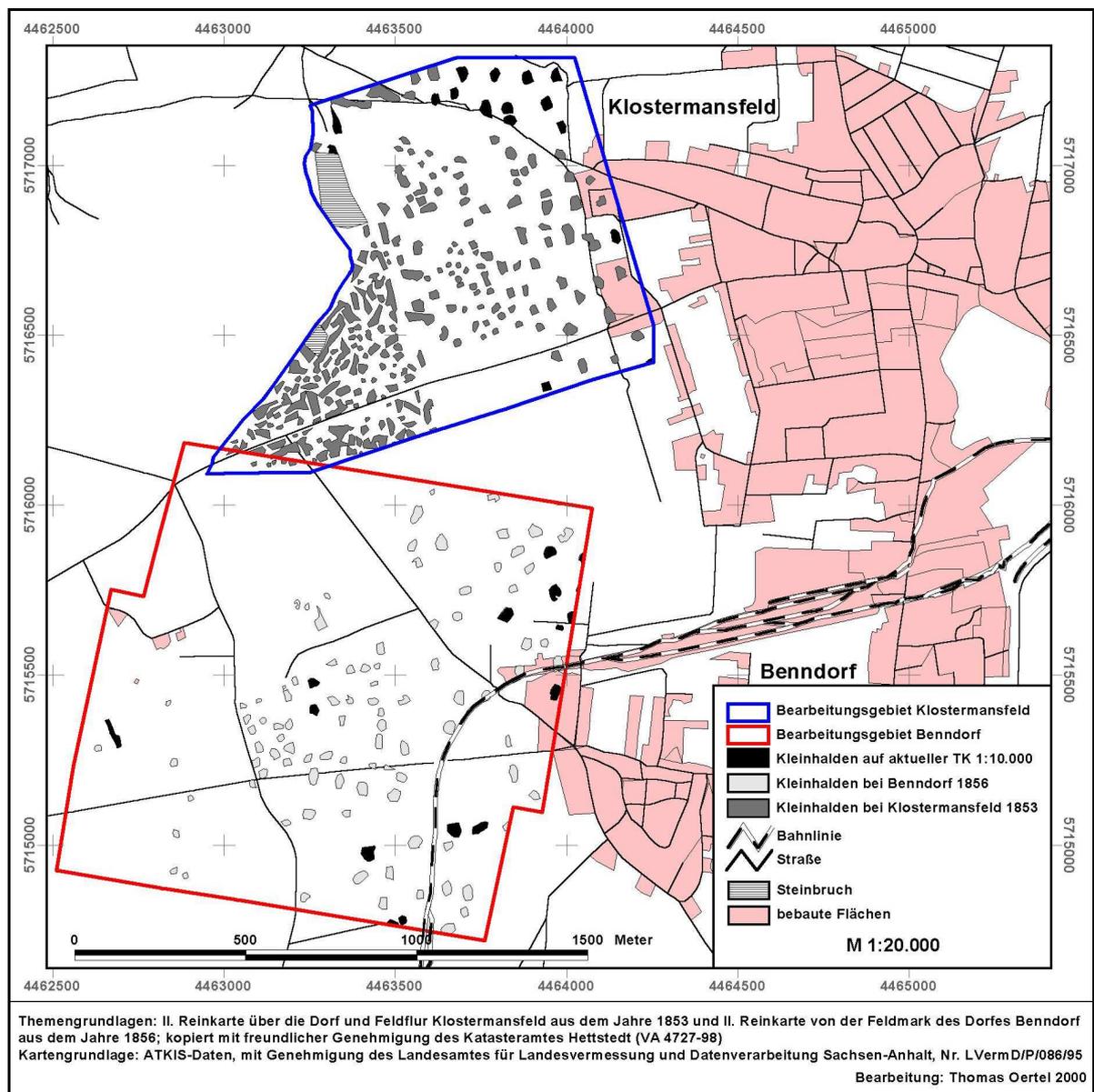
### 5.1.2.2 Abschätzung der flächenhaften Verbreitung von Vergrabungsstrukturen

Eine kartographische Analyse der historischen und aktuellen Vorkommen von Klein- und Kleinsthalden in den Gemarkungen Klostermansfeld und Benndorf beschreibt Karte 10.

Die Grenzen der Bearbeitungsgebiete Klostermansfeld und Benndorf basieren auf Kopieausschnitten der Urgemarkungskarten bzw. Reinkarten der Jahre 1853 und 1856 und sind somit nur für die abgegrenzten Flächen innerhalb der Abbildung und einen gewissen Zeitraum auswertbar. Aufgrund der großen Maßstäbe der Kopieausschnitte (1:2.000 bzw. 1:2.500) konnten Informationen zur Lage und zur Grundfläche von

ehemals vorhandenen Klein- und Kleinsthalden sehr detailliert bestimmt werden. Abb. A 6 im Anhang stellt einen Ausschnitt solch einer Reinkarte von Benndorf dar.

**Karte 10: Kleinhaldenverbreitung nach den Gemarkungskarten von Benndorf (1856) und Klostermansfeld (1853) sowie nach der aktuellen Topographischen Karte TK 1:10.000**



Die Größe der in Karte 10 dargestellten Fläche des Bearbeitungsgebietes Klostermansfeld beträgt 97,3 ha. Innerhalb dieses Bearbeitungsgebietes waren noch vor ca. 150 Jahren 238 Klein- und Kleinsthalden mit einer Gesamtfläche von 15 ha aufgeführt (KATASTERAMT HETTSTEDT 1997). Nach aktueller topographischer Karte und Flurkarte sind davon lediglich 16 Kleinhalden mit einer Gesamtfläche von 1,3 ha übrig. Im Bearbeitungsgebiet Benndorf, das eine Gesamtfläche von 168 ha umfasst, existierten im Jahre 1856 nach der damals aktuellen Flurkarte (Reinkarte) 112 Klein- und Kleinsthalden mit einer Gesamtfläche von 6,6 ha, von denen 32 Kleinhalden (2,6 ha) heute noch vorhanden sind. Die oben genannten Flächenanteile der ehemaligen Haldengrundflächen, besonders im Nordwesten des Bearbeitungsgebietes Benndorf in Karte 10, würden sich noch einmal beträchtlich erhöhen, wenn die in CIR-Luftbildern und Satellitenbildern anhand von Vegetationsschäden erkennbaren Areale zahlreicher weiterer Vergrabungsstandorte in den Berechnungen auf Basis der Reinkarten Berücksichtigung finden würden. Diese zumeist älteren und kleineren Halden waren sicherlich zum Zeitpunkt der Erstellung der Urgemarkungskarten bereits vergraben.

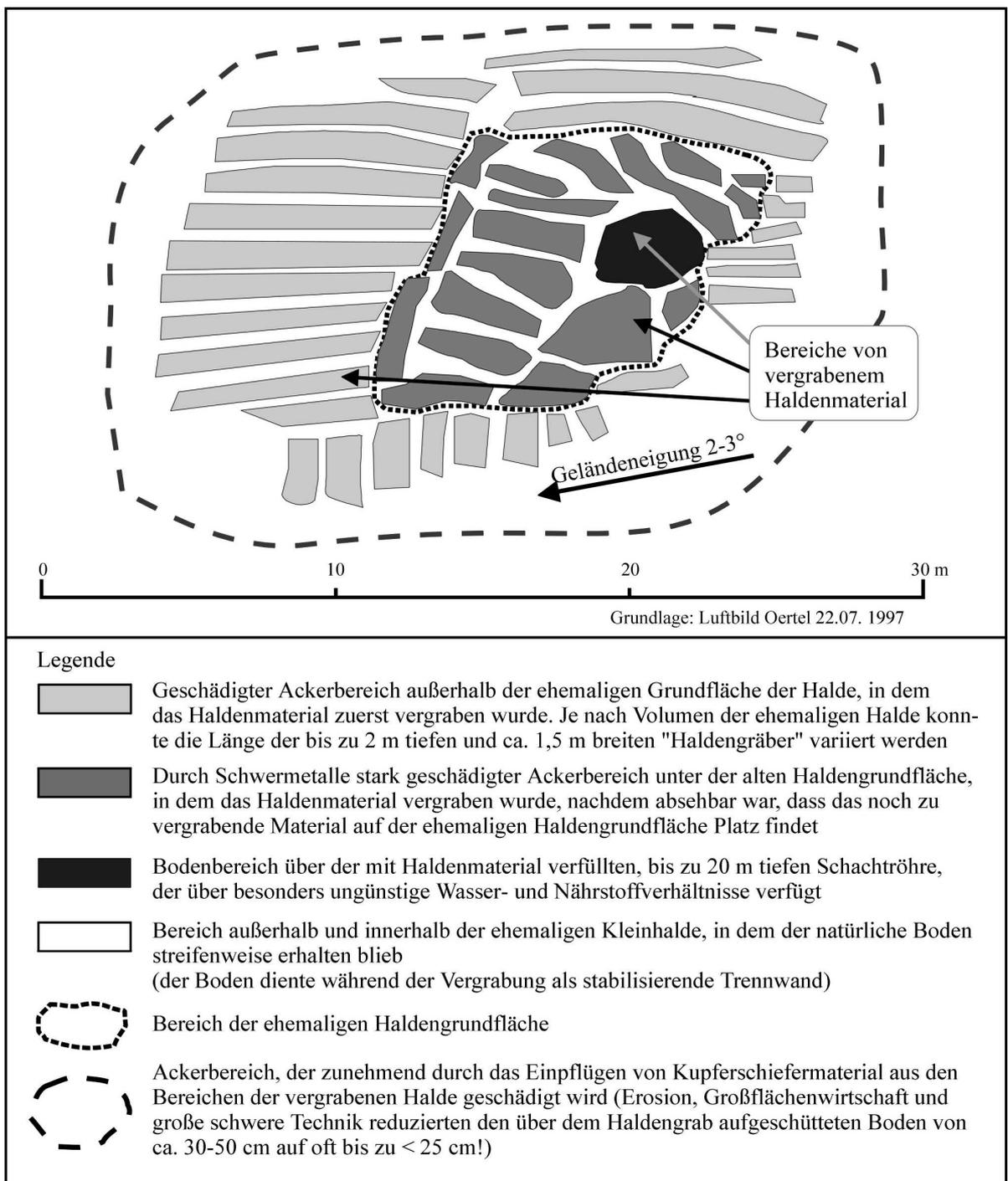
Durch die Haldenvergrabungen konnte ein bedeutender Anteil an landwirtschaftlicher Nutzfläche zurückgewonnen werden. Im Verlauf der Untersuchung zeichnete sich ab, dass die Gemarkungen Benndorf und Klostermansfeld besonders von Haldenvergrabungen gekennzeichnet sind. Das konnte nur durch kombinierte Auswertung von CIR-Luftbildern und Satellitenbildern sowie Schrägluftbildern belegt werden, welche dieses Gebiet als das mit der höchsten Dichte von Vegetationsschäden, Ertragsdepressionen und sogar Totalausfällen der Kulturpflanzen innerhalb des Mansfelder Landes auswiesen.

In historischen Quellen wird erwähnt, dass bei den Haldenvergrabungen am Ende des 19. Jahrhunderts ein wiederholtes „Durchkläuben“ dieser Schiefer hinsichtlich ihres Erzgehaltes erfolgte. Aufgrund von Verbesserungen der Schmelztechnologien konnten so wiederholt ältere Schiefererze den modernisierten Hütten beigemischt werden. Die o. g. Varianten der Materialverbringung von schwermetallhaltigem Schiefermaterial - von den Ackerstandorten weg - konnten sicherlich den Anteil der vor Ort zu vergrabenden Schiefen auf eine Restmenge beschränken. Insgesamt erwies sich der Gewinn von landwirtschaftlicher Nutzfläche durch die Vergrabung bzw. Verbringung der Bergbauhalden auch unter dem Blickwinkel des Rückganges des Arbeitskräftebesatzes in den Bergwerks- und Hüttenanlagen und der Zunahme von landwirtschaftlichem Nebenerwerb als positiv. Nach den Geländeaufnahmen und den Auswertungen der erstellten Schrägluftbilder muss davon ausgegangen werden, dass solche Haldenvergrabungen keine singulären, sondern flächenhaft auftretende Erscheinungen im Mansfelder Land sind.

Nach der Auswertung von Luft- und Satellitenbildern, Geländeuntersuchungen und ersten vorsichtigen Massenbilanzierungen können die „Haldenvergrabungen“ als Hauptursache, jedoch nicht als ausschließlicher Grund der Reduzierung der mittelalterlichen Bergbaurelikte angesehen werden. In geringerem Umfang wurden die Kleinhalden auch zur Verfüllung von natürlichen Geländedepressionen oder Abbauhohlformen genutzt. Auch ihre Verwendung im Straßenbau muss an dieser Stelle genannt werden. Teilweise wurde auch Kleinsthaldenmaterial einfach auf die im Entstehen begriffenen größeren Flachhalden aufgeschüttet.

Weiterhin könnte der Bau der Eisenbahnverbindung von Erfurt nach Magdeburg, der in unmittelbarer Umgebung zu den ehemaligen Haldenstandorten im UG 1 am Ende des 19. Jahrhunderts realisiert wurde, ein Grund für das Verschwinden der ehemaligen Klein- und Kleinsthaldenlandschaft sein. Für dieses infrastrukturelle Großprojekt war, insbesondere für die Errichtung von Bahndämmen im Bereich der Täler, ein enormer Bedarf an Füllmaterial entstanden. Außerdem fiel der Zeitpunkt des Bahnbaus in etwa mit dem Verschwinden der Kleinhalden auf den Ur-Flur-Karten zusammen.

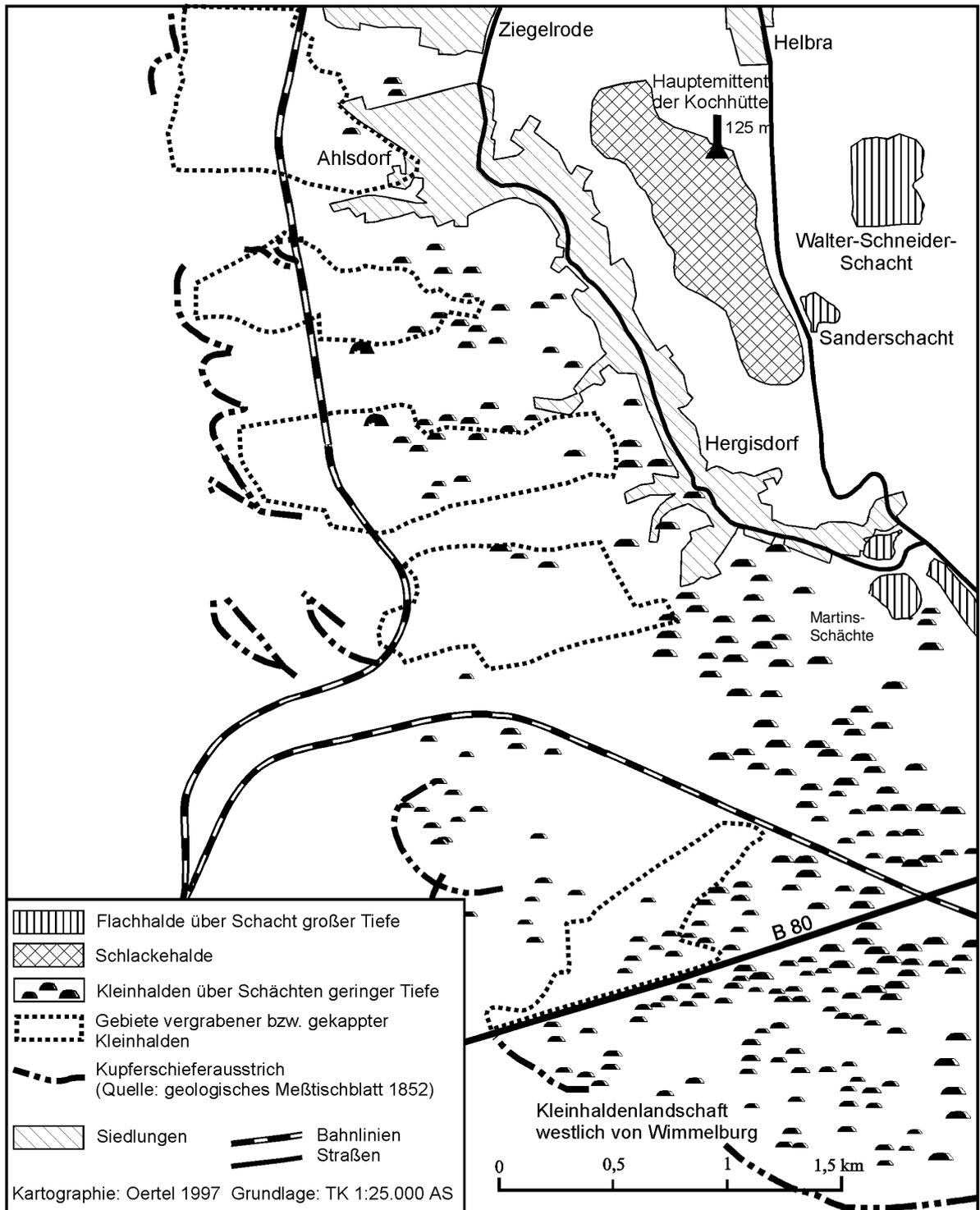
Die Vergrabung von Halden und die nachfolgende „Exhumierung“ aber auch eine anteilige Verschleppung haben nachweislich das Verbreitungsgebiet der Schiefermaterialien beträchtlich ausgedehnt (Abb. 27). Die Gelände- und Luftbildauswertung lässt erkennen, dass sich die Verbreitungsareale der schwermetallhaltigen Schiefer im Oberboden durch die Vergrabungen z. T. auf ein Mehrfaches der ehemaligen Haldengrundfläche und durch Verschleppung der Schiefer im Ap-Horizont noch darüber hinaus ausgedehnt haben. Es wird deutlich, dass dadurch die Bedeutung dieser Haldenmaterialien als Bodensubstrat (vor allem im Ap-Horizont) und somit auch als flächenhaftes Element der Kontamination für die hier angebaute Kulturpflanzen in den letzten 150 Jahren um mehr als das Doppelte zugenommen hat. Die Ausdehnung der Verbreitungsareale von vergrabenen und gekappten Kleinhalden in Teilen der Gemarkungen Ahlsdorf, Hergisdorf und Wimmelburg beschreibt die Karte 11. Vergrabungen von Schiefermaterial konnten nur in Bereichen von Ackerflächen gut nachgewiesen werden. Unter Grünland und insbesondere in Waldbereichen ist eine Lokalisierung solcher Schadstandorte über den Indikator Vegetation mit Mitteln der Luftbildinterpretation nur eingeschränkt möglich.



**Abb. 27: Flächenausmaß der Bodenschädigungen über einer Haldenvergrabung bei Benndorf**

Wie Karte 11 zeigt, kommen diese Vergrabungsareale im UG 1 überwiegend östlich des geologischen Kupferschieferausstrichs in Richtung zum Muldeninneren vor. Damit wird offensichtlich, dass von den Vergrabungsaktivitäten hauptsächlich die ältesten Haldengenerationen betroffen waren. Dies hat wiederum in ökologischer Hinsicht Konsequenzen, da dieses ältere Haldenmaterial natürlich auch am längsten Verwitterungs- und somit Metallfreisetzungsprozessen unterlag. Zum anderen wurden in dieser Frühphase der Bergbauentwicklung oftmals auch reichere Erze auf Halde geschüttet, da sie damals aus technologischen Gründen noch nicht verhüttbar waren. Vor allem in älteren Waldbeständen tritt das Phänomen der Haldenvergrabungen jedoch nicht auf, da die o. g. Gründe für eine sekundäre Umlagerung des Haldenmaterials dort nicht gegeben waren.

Karte 11: Verbreitungsareale der Kleinhalden und vergrabener Halden am Westrand der Mansfelder Mulde



Als typisches Beispiel für im Wald abgelagerte Halden im Bereich des Kupferschieferausstrichs gelten die nordöstlich von Pölsfeld heute noch zahlreich vorhandenen oberirdischen Ringhalden (SOMMER 1996). Im Rahmen der Untersuchungen im Bereich des Kupferschieferausstrichs am östlichen Harzrand kann geschlussfolgert werden, dass zu den heute hier noch verbreiteten Klein- und Kleinsthalden noch einmal ca. 50 % hinzugerechnet werden müssen, um etwa eine Vorstellung von der Anzahl dieser historischen Bergbaurelikte vor Beginn der Vergrabungsaktivitäten zu bekommen. Im Vergleich dazu zählte SOMMER (1996) beispielsweise in der Sangerhäuser Mulde mindestens 3441 Pingen und Schächte und schätzte ab, dass dies nur etwa 60 % des ehemals vorhandenen Bestandes sind.

### 5.1.2.3 Schwermetallgehalte von Profilstandorten in der Flur Hergisdorf

Die Abb. 28 zeigt Vegetationsdepressionen der Kulturvegetation (Weizen) zur Ernte 2001 am „Haldenstück“ westlich von Hergisdorf. Zahlreiche Bohrstocksondierungen in diesem Bereich erbrachten die Erkenntnis, dass sich im Unterboden vergrabenes Schiefermaterial mit ungestörten Bodenbereichen abwechselt, worin die Ursachen für die deutlich erkennbare Kästchenstruktur der Vegetationsschäden liegen. Die Abb. 29 zeigt, in der Nähe des Bodenprofils P-Hg\_2, einen Teil eines „Haldengrabes“, das eine durchschnittliche Mächtigkeit von 60 cm, eine Länge von 3,5 m und eine Breite von 4 m aufweist. Der anthropogen eingebrachte Schieferhorizont ist nur wenig verwittert und besitzt kaum Feinbodenanteile. Das über dem Schiefergrab ca. 30 cm mächtige, aufgetragene Bodenmaterial ist nur gering von Schiefermaterial durchsetzt, auch Materialeinmischungen des Ap-Horizontes in den jC-Horizontes existieren kaum.



Abb. 28: Vegetationsdepressionen zur Ernte 2001 am „Haldenstück“ westlich von Hergisdorf



Abb. 29: Vergrabenes Schiefermaterial am Standort P-Hg\_2

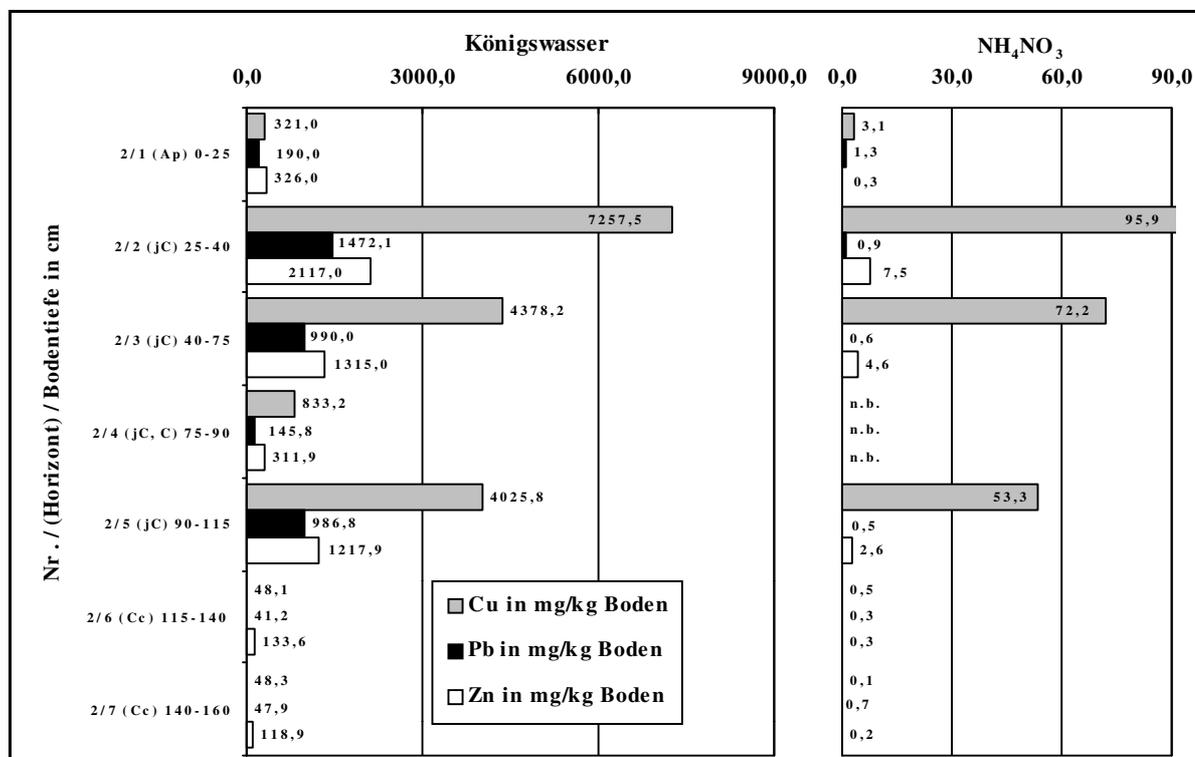


Abb. 30: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Die Bodenschwermetallgesamtgehalte (nach Königswasseraufschluss) des Standortes P-Hg\_2 sind im linken Teil der Abb. 30 und die pflanzenverfügbaren Schwermetallgehalte (nach  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss) im rechten Teil der Abb. 30 dargestellt.

Im Ap-Horizont (1/1) über dem vergrabenen Schiefermaterial wurden nach dem KW-Aufschluss 321 mg Cu/kg Boden, 190 mg Pb/kg Boden und 326 mg Zn/kg Boden ermittelt. Der anthropogen eingebrachte Schieferhorizont jC (Bodenprobe 2/2) besitzt die höchsten Schwermetallgesamtgehalte im Profil beim Element Kupfer mit 7257,5 mg/kg Boden. Die pflanzenverfügbaren Anteile ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss) dieser Probe betragen 95,9 mg Cu/kg Boden.

Die erhöhten Cu-Gehalte nach  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss im Ap-Horizont (3,1 mg/kg Boden), die bereits den Prüfwert für Ackerflächen nach BBODSCHV (1999) von 1 mg Cu/ kg Boden um das 3-fache überschreiten, steigen im darunter liegenden jC-Horizont auf fast das 100-fache des Prüfwertes an. In der Zone der vergrabenen Schiefen setzt sich diese Vielfachüberschreitung des Cu-Prüfwertes über die Probe 2/3 bis in eine Tiefe von 115 cm fort, wo sie bei Probe 2/5 immer noch das 50-fache betragen.

Im darunter lagernden Löß, der aufgrund von Einmischungen des Zechsteinkalkes einen hohen Skeletthalt besitzt (Proben 2/6 und 2/7), fallen die Kupferanteile im Boden sowohl nach dem Königswasseraufschluss als auch nach dem  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss auf vernachlässigbar geringe Konzentrationen. Ein Eintrag von Schwermetallen aus darüber liegenden, anthropogen eingebrachten Bodenschichten in diese Horizonte ist nicht erkennbar, woraus resultiert, dass auch eine weitergehende Verlagerung von Metallen in Richtung Grundwasser auszuschließen ist.

Die Prüfwerte für Blei nach der BBODSCHV (1999) von 0,1 mg Pb/kg Boden werden im Ap-Horizont mit 1,3 mg Pb/kg Boden erheblich überschritten. Demgegenüber sind im jC-Horizont zwischen 25-40 cm Tiefe die pflanzenverfügbaren Bleianteile (0,9 mg/kg Boden), trotz erheblich höherer Schwermetallgesamtgehalte (1427,1 mg/kg Boden) als im Ap-Horizont, verhältnismäßig gering.

Die hohen pflanzenverfügbaren Gehalte resultieren demnach überwiegend aus dem Eintrag von schwermetallhaltigen atmosphärischen Stäuben der bis 1990 betriebenen Kupferhütte Helbra. Dass Blei vor allem über den Luftpfad in die Böden eingetragen wird, bestätigen SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL (1998). „Bei hohen Pb-Gehalten in Böden können unspezifische Chlorosen und starke Wachstumsschäden an Wurzeln und oberirdischen Pflanzenteilen auftreten“ (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998, S. 340). Dies wird auch durch die eingeschränkte Vegetationsentwicklung auf dem Versuchsstandort V-Hg\_2 deutlich (Abb. 52). „Zunächst reichert sich das Blei in oder auf der Wurzeloberfläche an und wird erst bei höherem Pb-Angebot in die oberirdischen Pflanzenteile transportiert. In der Regel steigen die Pb-Gehalte der verschiedenen Pflanzenteile in der Reihe: Körner, Früchte, Knollen<Stängel<Blätter<Wurzeln“. (SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998, S. 339).

Die Prüfwerte nach dem  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss laut BBODSCHV (1999) für Zink (2 mg/kg Boden) des Bodenprofils Hergisdorf 2 werden in den Proben P-Hg\_2/2, P-Hg\_2/3 und P-Hg\_2/5 überschritten, wobei in 25-40 cm Tiefe mit 7,5 mg/kg die höchsten Gehalte im Profil P-Hg\_2 erreicht wurden. Die im Diagramm nicht dargestellten Cd-Konzentrationen nach  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aufschluss überschreiten in den oberen zwei Bodenhorizonten mit 0,2 mg/kg Boden den Maßnahmenwert laut BBODSCHV (1999) von 0,1 mg/kg Boden.

Die Abb. 31 zeigt die Schwermetallverteilung des Bodenprofils P-Hg\_3 nach Gesamtgehalten (Königswasser) und nach pflanzenverfügbaren Anteilen ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) und ist nur ca. 10 m neben dem Bodenprofil P-Hg\_2 lokalisiert. Die über diesem Bodenprofil wachsenden Pflanzen zeigten jedoch keine oder nur sehr geringe Einschränkungen in ihrer Vitalität. Vom Profilaufbau entspricht das Bodenprofil einer gekappten Parabraunerde und ist mit dem Bodenaufbau im rechten Teil der Abb. 29 vergleichbar.

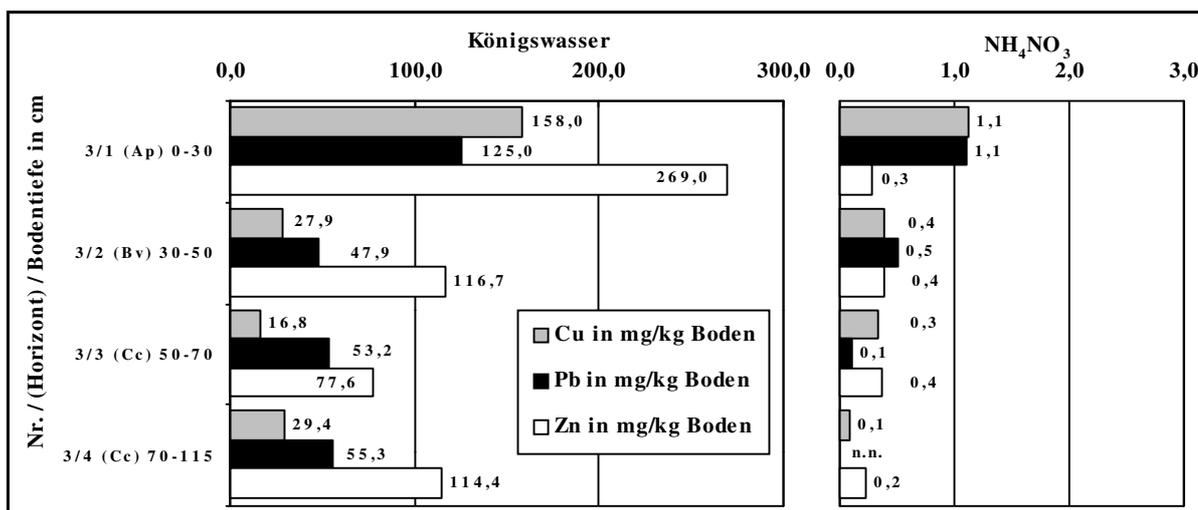


Abb. 31: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Im Oberboden weist das Profil P-Hg\_3 geringere Schwermetallkonzentrationen als der Ap-Horizont des Standortes P-Hg\_2 auf. Aufgrund der vor allem in den beiden oberen Horizonten Ap und Bv festgestellten sehr hohen Pflanzenverfügbarkeit von Blei im Vergleich zu den Gesamtgehalten wird wiederum deutlich, dass diese Belastungen überwiegend aus atmosphären Quellen stammen müssen.

Aus den unteren Bodenbereichen ab 70 cm Tiefe sind in diesem Profil geringe, toxikologisch kaum bedenkliche Konzentrationen nach beiden Aufschlüssen festzustellen. Die Cu-Konzentration nach dem NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss überschreitet lediglich im Ap-Horizont den Prüfwert laut BBODSCHV (1999) von 1 mg/kg Boden.

#### 5.1.2.4 Schwermetallgehalte von Profilstandorten in der Flur Ahlsdorf

In dem aus der Flur Ahlsdorf stammenden Bodenprofil P-Ad\_1 ist der Ap-Horizont durch die massive Einmischung von Schieferbruchstücken im anthropogen aufgeschütteten „Mutterboden“ gekennzeichnet. Sie bedingen die hohe Oberbodenkontamination und stammen aus dem anthropogen eingebrachten jC-Horizont, der die Prüfwerte laut BBODSCHV (1999) nach NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss bei den Elementen Pb, Cu und Zn massiv überschreitet.

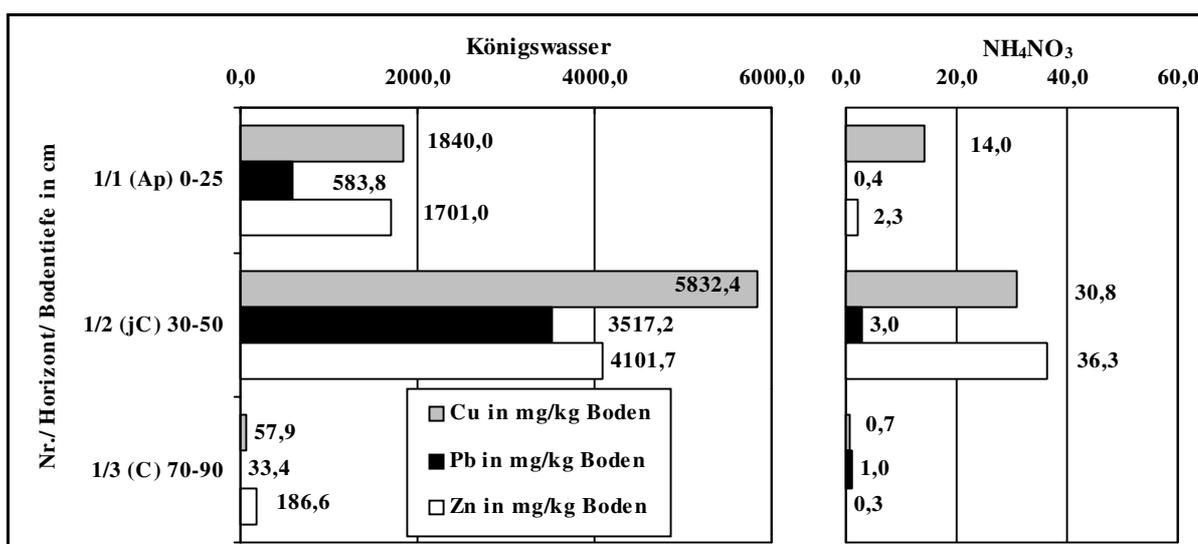


Abb. 32: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Erst im unterlagernden Löß (ab 70 cm Tiefe) sinken die Schwermetallwerte wieder stark und erreichen unterhalb 90 cm den geogenen Hintergrund, wobei der Pb-Gehalt in dieser Schicht noch das 10-fache des Prüfwertes laut BBODSCHV (1999) beträgt. Die Vegetation ist an diesem Standort nahezu völlig ausgefallen. Nur vereinzelt reichen Pflanzenwurzeln bis in das Haldensubstrat.

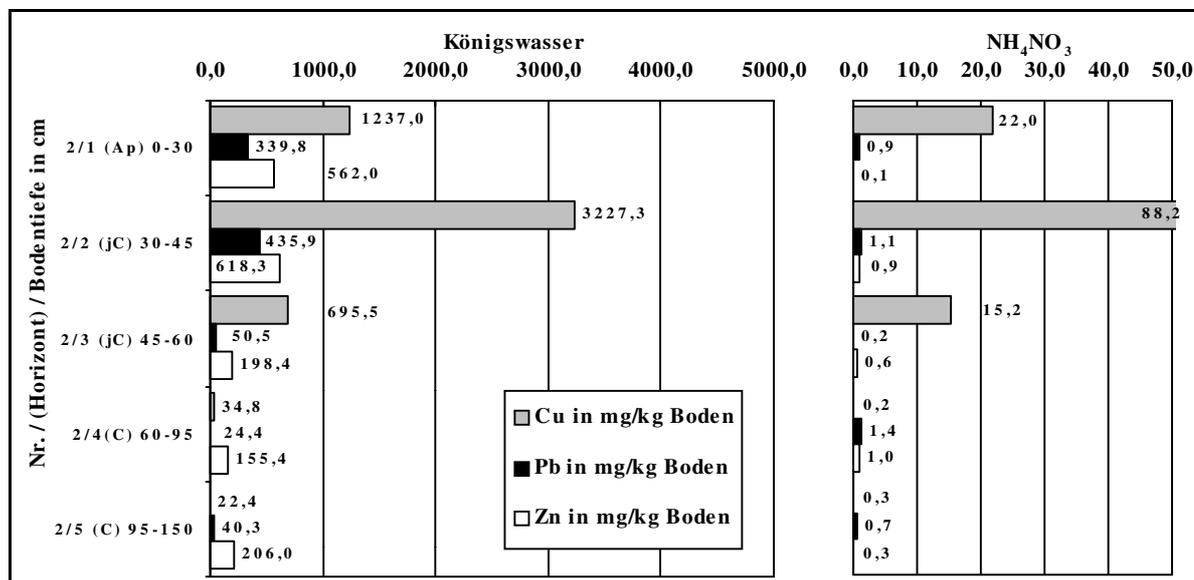


Abb. 33: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad\_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Das Bodenprofil P-Ad\_2 (Abb. 33) besitzt zwar geringere Schwermetallkonzentrationen im Ap- und jC-Horizont als das Profil P-Ad\_1, der pflanzenverfügbare Anteil von Cu nach NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss laut BBODSCHV (1999), übersteigt jedoch die Konzentrationen des P-Ad\_1 um mehr als das Doppelte und erreicht damit das 80-fache des geltenden Prüfwertes im jC-Horizont, laut BBODSCHV (1999). Auch in diesem Profil treten im Ausgangssubstrat der Bodenbildung im Untergrund vernachlässigbare Schwermetallgesamtgehalte auf. Allerdings übersteigen die pflanzenverfügbaren Anteile den Pb-Prüfwert von 0,1 mg/kg Boden nach BBODSCHV (1999).

Das Bodenprofil P-Ad\_3 in Abb. 34 weist dagegen bis in eine Tiefe von ca. 170 cm eine relativ ausgeglichene Schwermetallverteilung auf. Im tieferen Untergrund bei Probe 3/9 steigen die Gehalte von Pb und Zn über das Niveau des atmogen belasteten Oberbodens an. Die pflanzenverfügbaren Anteile von Pb übersteigen in fast allen Bodenschichten den Prüfwert von 0,1 mg/kg Boden laut BBODSCHV (1999). Cu überschreitet den Prüfwert minimal im Ap-Horizont bzw. bei 170-200 cm Bodentiefe. Die Ursache für erhöhte Belastungen unterhalb des an diesem Standort vorgefundenen zweiteiligen Lößpaketes können überwiegend durch natürliche Einmischungen (Solifluktion, Frosthub) der im Untergrund vermuteten hangenden Gesteine des Kupferschieferflözes begründet sein.

Resümierend kann festgestellt werden, dass das auftretende Haldenmaterial in mehrerer Hinsicht gravierende Veränderungen der ökologischen Standortverhältnisse gegenüber den umgebenden Böden bewirkt. Zum einen betrifft dies die Reduzierung der Feldkapazität. Andererseits verringern sich dadurch sowohl die mechanische als auch die physiologische Gründigkeit bzw. die Möglichkeit zur Durchwurzelung. Selbst wenn über dem Haldenmaterial noch eine geringfügige Schicht mit humosem Lößsubstrat auftritt, so wirken doch die unterlagernden Schiefer aufgrund ihrer Nährstoffarmut und infolge des geringen Verwitterungsgrades für die Pflanzenwurzeln als mechanische und physiologische Barriere.

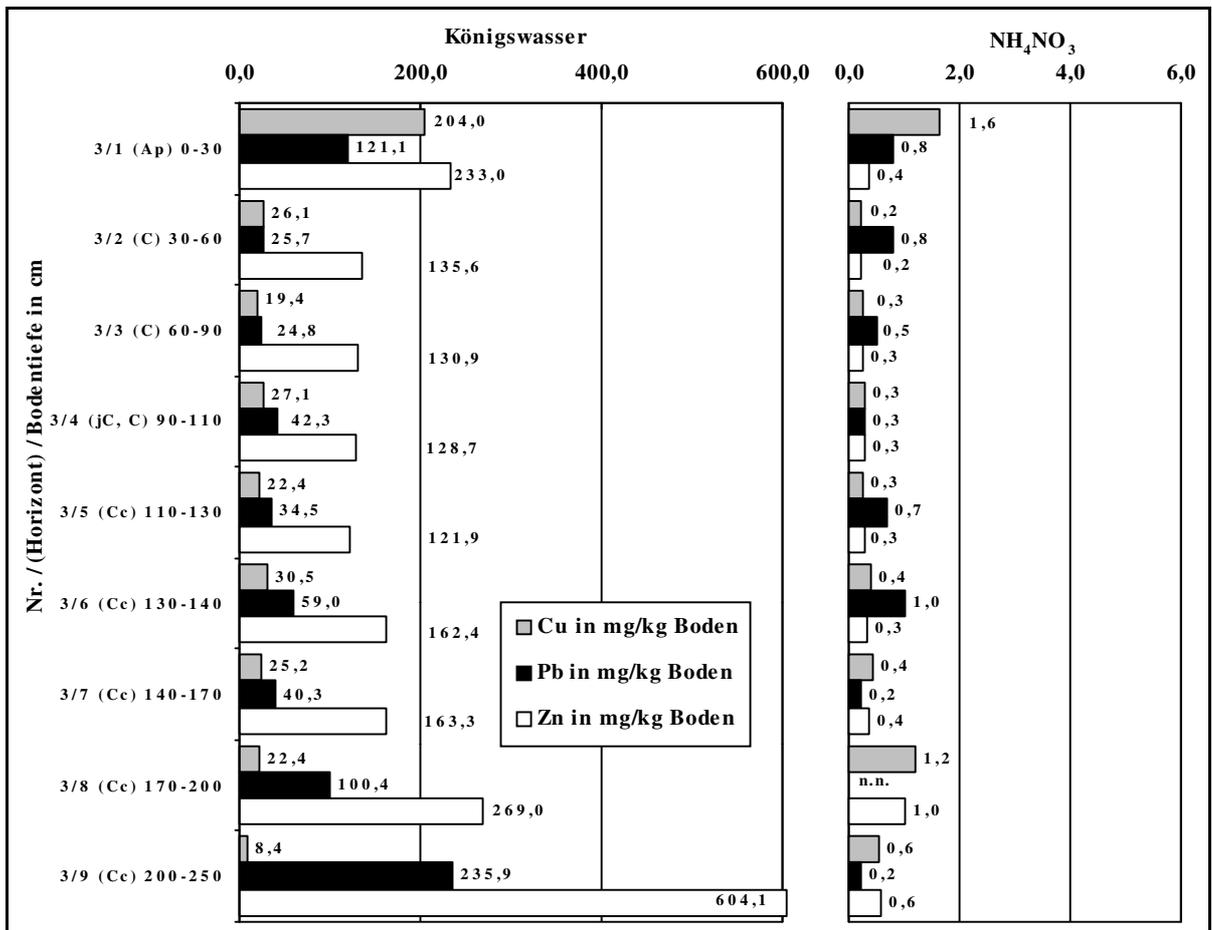


Abb. 34: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad\_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Neben diesen Ursachen sind vor allem die hohen Schwermetallkonzentrationen in diesen Materialien die Ursache für die starken Vegetationsschädigungen sowie Mindererträge bis hin zu Totalausfällen.

Die Flächenanteile mit Vegetationsschädigungen erreichen auf Schlägen mit einer ehemals hohen Haldendichte und gegenwärtig vielen „Haldengräbern“ bis zu 40 % des Gesamtschlages. Auf den Vergrabungsstrukturen selbst werden oftmals nur 25-40 % der in der Umgebung erzielten Erträge erreicht. Besonders in trockenen Jahren sind auf diesen Standorten meist sogar Totalausfälle zu verzeichnen. Dies verweist auf die schon genannten Bodenwasserhaushaltsprobleme, die sich insbesondere in einer minimierten Feldkapazität widerspiegeln.

Auf Bodenstandorten mit zahlreichen Haldenvergrabungen wird nicht nur die Menge, sondern auch die Qualität des Erntegutes erheblich verschlechtert. Ein Anbau von sortenreiner Braugerste, die 85% Vollgerste aufweisen muss, ist nicht wirtschaftlich. Auch E-Weizen mit hohem Eiweißgehalt und hoher Fallzahl ist auf diesen Flächen nach Aussagen ortsansässiger Landwirte nicht zu produzieren.

Die Schwermetallkontamination der Böden und Pflanzen erfolgt heute hauptsächlich durch den Belastungstransfer aus dem Haldenmaterial. Die früher direkt über die Blätter der Pflanzen schädigend einwirkende atmogene Schwermetallbelastung aus den Hauptemittenten, den Schornsteinen der Hütten, ist seit deren Stilllegung und Abriss (z. B. der August-Bebel-Hütte) überwiegend zum Erliegen gekommen.

### 5.1.3 Schwermetallbelastungen durch Kupferschiefer- und Schlackehalden

Schwermetallemissionen aus Kupferschieferhalden können auf verschiedenen Pfaden erfolgen. Der äolische Austrag von partikulär gebundenen Metallen ist nach CÖSTER (1993) aufgrund des sehr geringen Anteils von äolisch verfrachtbaren Korngrößenfraktionen des Haldenmaterials vernachlässigbar. Im unmittelbaren Haldenumfeld kommt dem gravitativen Transport von Haldenmaterial eine bedeutendere Rolle zu (CÖSTER et FRÜHAUF 1998). Vor allem an der Oberfläche konnten bei zahlreichen Kleinhalden Verwitterungserscheinungen beobachtet werden, wie sie bereits bei KLINGER (1996) beschrieben wurden. Nach SCHMIDT (2000) und FRÜHAUF et SCHMIDT (1997) ist das prozentuale Schwermetallpotential der größeren Spitzhalden als sehr gering einzuschätzen.



**Abb. 35: Kleinsthaldenlandschaft bei Hettstedt mit typischen Vegetationsschäden (Chlorosen) im Umfeld der Pingen**

Da das Haldenmaterial der mittelalterlichen Klein- und Kleinsthalden prozentual sehr viel größere Schwermetallanteile gegenüber jüngeren Haldentypen (Flachhalden, Spitzhalden) besitzt (SCHMIDT 2000) und da z. T. bereits eine Integration der Schiefer in die Böden der Region erfolgte, ist besonders der Schwermetalltransfer in der Vertikalen ökologisch relevant. Bei einem verstärkten Austrag in tiefere Boden- und Substratschichten können sie u. a. das Grundwasser schädigend beeinflussen.

Zur Klärung dieses Sachverhaltes wurden Bodenhorizonte unter einer Kleinhalde bei Hettstedt analysiert, die in ihrem unmittelbaren Umfeld die typischen Chloroseschäden aufwies (Abb. 35). Das Profil in Abb. 36 beschreibt die angegrabene Kleinhalde bei Hettstedt an ihrem tiefsten Geländepunkt. Die Geländeneigung der Haldenaufstandsfläche betrug ca. 3 %. Mit der Aufgrabung an der tiefstgelegenen Stelle des Haldenrandes sollte dabei gleichzeitig der Einfluss von aus dem Haldenmaterial austretenden schwermetallhaltigen Sickerwässern und von Interflow auf die darunter lagernden Bodenschichten mit erfasst werden. Die am Haldenfuß eingestellte Pioniervegetation verhindert den Austrag von Feinmaterial aus der Kleinhalde zunehmend, so dass eine äolische Verfrachtung der Schwermetalle als gering einzustufen ist. Durch die sich schließende Vegetationsdecke werden die Emissionen und die mechanische Verwitterung der Halde zunächst reduziert, die chemische Verwitterung infolge der sich im Wurzelbereich anreichernden Huminsäuren bewirkt jedoch langfristig wiederum Schwermetallausträge.



Der oberste Horizont 1/1 (Halde) ist überwiegend durch stark verwittertes Haldenmaterial gekennzeichnet, zusätzlich weist er einen hohen Anteil von Bodenmaterial aus dem früheren A-Horizont auf. Diese Vermischung entstand überwiegend durch das Einsinken der Kleinhalde in den Boden infolge ihrer Auflast. Das Schiefermaterial-Oberbodengemisch hat einen Skelettanteil von 34,9 %, einen Karbonatgehalt von 10,6 % und einen pH-Wert von 7,0 (KCl). Die Bodenprobe weist nach dem Königswasseraufschluss eine sehr hohe Schwermetallbelastung auf, vor allem beim Element Zink mit 15140,9 mg/kg Boden. Der rAh-Horizont unter der Halde, in dem noch einzelne Schieferbruchstücke aus der darüber lagernden Halde nachweisbar waren, ist mit den Elementen Zink mit 3412,3 mg/kg Boden und Blei mit 458,3 mg/kg Boden noch erheblich belastet. Neben den in den oberen Horizonten nachgewiesenen Schwermetallgehalten, die überwiegend aus den verwitternden Schiefen der Kleinhalde resultieren, muss an diesem Standort berücksichtigt werden, dass er im Emissionsbereich der Hettstedter Großhütten lokalisiert ist. Im Bereich des rBv-Horizontes (ca. 20 cm unter der EOF) erreichen die Konzentrationen so geringe Werte, dass sie mit geogenen Hintergrundgehalten vergleichbar sind.

Abb. 36: Bodenprofil P-He\_1

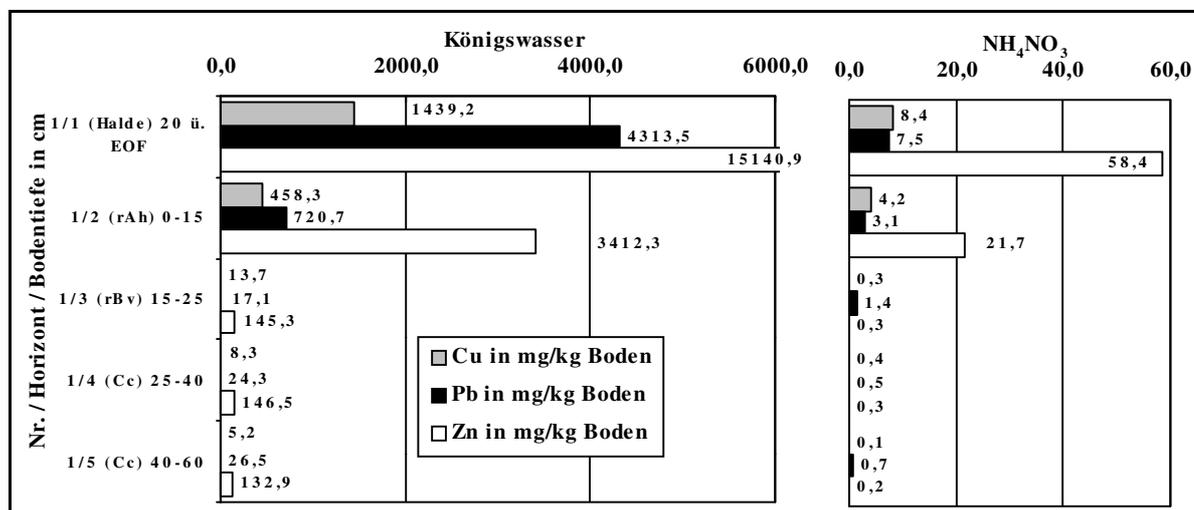


Abb. 37: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Die Ergebnisse der Schwermetallbestimmungen nach dem NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss zeigen, dass beispielsweise der Kupferwert mit 8,4 mg/kg Boden, den Prüfwert von 1 mg/kg Boden für den Schadstoffübergang Boden - Pflanze nach der BBODSCHV (1999) vom 12.07.1999 deutlich überschreitet. Der Zinkwert des Horizontes 1/1 (Halde) ist mit 58,4 mg/kg Boden ca. 30-mal so hoch, der des rAh-Horizontes ca. 10-mal so hoch wie der Prüfwert Ackerbau der BBODSCHV (1999) mit 2 mg/kg Boden. Da allerdings kaum zu erwarten ist, dass ein solcher Standort (nach einer möglichen Sanierung) künftig wieder in landwirtschaftliche Produktion übergeht (zahlreiche Halden bzw. einige Kleinhalde-landschaften stehen unter Land-

schaftsschutz), stellen diese stark belasteten Bodenhorizonte zunächst keine akute Gefährdung für die Nahrungskette dar.

Die Horizonte rBv und Cc wiesen, obwohl sie sich unmittelbar unter bedeutend kontaminierten Substraten befinden, sehr geringe Schwermetallwerte auf, die in etwa im Konzentrationsbereich geogener Hintergrundwerte liegen. Da die Böden in den Untersuchungsgebieten überwiegend im Löß entwickelt sind, zeichnen sie sich durch einen hohen Anteil an Karbonaten und Schluff aus und verfügen somit über ein sehr gutes Bindungsvermögen für Schwermetalle. Ein großflächiger Austrag der im Boden verankerten Schwermetalle in Richtung Grundwasser etc. ist deshalb an diesem Standort nicht zu erwarten.

### 5.1.3.1 Schwermetallgehalte von Profilstandorten in der Flur Hettstedt

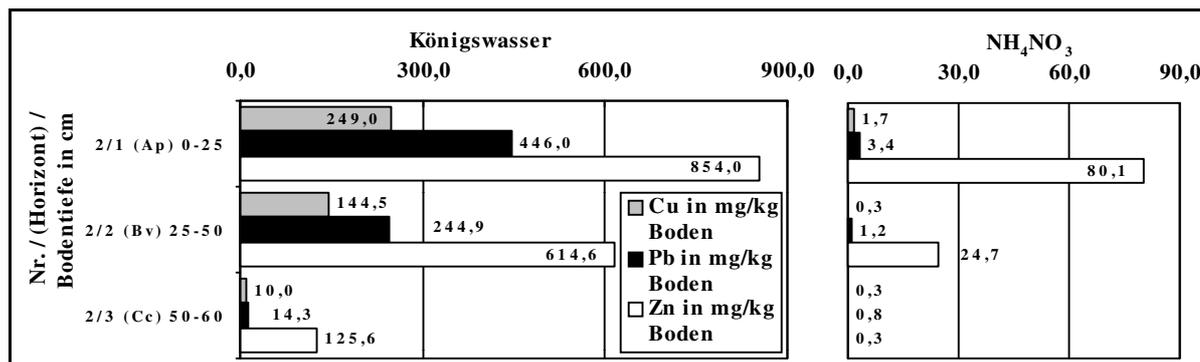


Abb. 38: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He\_2 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Das Bodenprofil Hettstedt 2 befindet sich in der näheren Umgebung (ca. 150 m) des Haldenprofilstandortes Hettstedt auf einem Ackerschlag und ist lediglich atmosphärischen Belastungen ausgesetzt. Dies ist an den in der Tiefe abnehmenden Konzentrationen über alle ermittelten Elemente hinweg ersichtlich, wobei die Pflanzenverfügbarkeit nach NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss mit 80,1 mg Zn/kg Boden im Ap-Horizont sowie mit 24,7 mg Zn/kg Boden im Bv-Horizont die auffälligsten Überschreitungen des Bodenprüfwertes von 2,0 mg Zn/kg Boden nach der BBODSCHV (1999) darstellen.

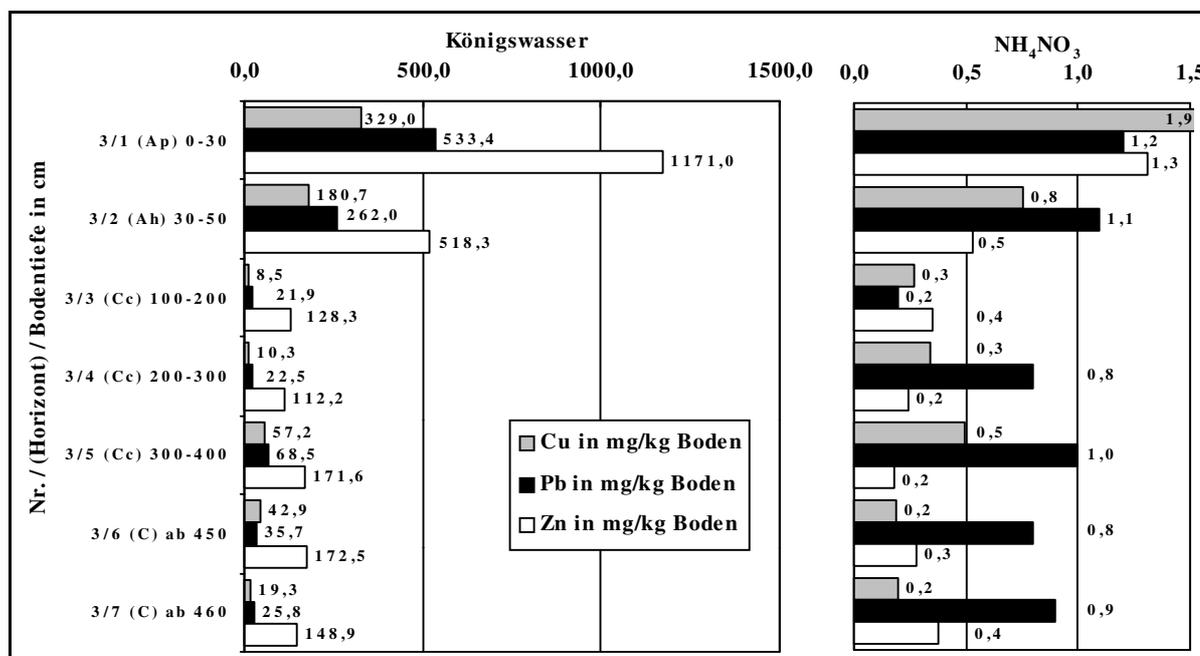


Abb. 39: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He\_3 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Das Bodenprofil P-He\_3 weist eine starke Anreicherung der Gesamtgehalte der Schwermetalle im Ap- bzw. im Ah-Horizont auf, die mit zunehmender Bodentiefe nachlässt. Ähnlich verhält es sich bei den

pflanzenverfügbaren Anteilen. Hier wird permanent in allen Bodenschichten der Prüfwert für Pb in Höhe von 0,1 mg/kg Boden laut BBODSCHV (1999) um ca. das 10-fache überschritten. Eine Überschreitung des Cu-Prüfwertes laut BBODSCHV (1999) liegt lediglich im Ap-Horizont vor.

#### 5.1.4 Boden- und Pflanzenschwermetallbelastungen durch die Verhüttung

„Die lange Zeit der Entwicklung der Kupfermetallurgie im Mansfelder Raum lässt es nicht mehr exakt zu, zwischen geogener und anthropogener Belastung durch Schwermetalle zu unterscheiden.“ (THIEDE et BERGMANN 1997, S. 26).

GALONSKA (1997, S. 32) gibt u. a. Auskunft über die Gehalte von Schwermetallen in den Kupferrohütenschlacken, ihre Fixierung in den einzelnen Schlackephase und die Möglichkeit der Mobilisierung unter Umwelteinflüssen. „Laut Holländischer Liste ... liegen die Cu-, ... Zn- ... Gehalte vorwiegend im Bereich großer Belastung und die Pb- ... Gehalte vorwiegend im Bereich mittlerer Belastung ...“. Um mögliche Umweltgefährdungen durch Schlacken abschätzen zu können, ist es wichtig, Kenntnis vom Löseverhalten der Schlackekomponenten zu erlangen. Es kann festgestellt werden, dass die Löslichkeit von Schwermetallen bei leicht basischem pH-Wert gering ist, bei sauren pH-Werten wächst die Schwermetalllöslichkeit mit steigenden HCl-Konzentrationen meist kontinuierlich (SCHRECK 1997).

Der Vergleich der Boden- und Pflanzenbelastung auf Vergrabungsstandorten mit Standorten außerhalb der Vergrabungsstrukturen lässt nicht nur eine (erwartete) markante Abnahme der Belastungsintensität deutlich werden. Da in den beprobten Ap-Horizonten in den UG (im Abstand zwischen 10 und 30 m neben den Vergrabungsstrukturen) kein Schiefermaterial nachweisbar war, kann davon ausgegangen werden, dass die hier nachgewiesene Belastung überwiegend durch die Immissionen der ehemaligen Schmelzhütten erklärbar ist. Sie repräsentieren somit in gewisser Hinsicht vor allem das historische „Erbe“ atmogener

Kontaminationswirkungen. Da man davon ausgehen kann, dass diese Einträge auch auf den Vergrabungsflächen akkumuliert wurden, hat man somit eine ungefähre Vorstellung von der Bedeutung bzw. Größenordnung dieser zwei unterschiedlichen Belastungsursachen. Die Abb. 41 beschreibt die Schwermetallgesamtgehalte und die pflanzenverfügbaren Anteile eines Bodenprofils nahe den Hettstedter Hütten, das ohne Einfluss von geogenem Schiefermaterial ist und somit nahezu ausschließlich die atmogenen (anthropogenen) Stäube dieser Emittenten widerspiegelt. Zink überschreitet im Ah-Horizont, der als Grünland genutzten Fläche am Regenbeck, den zulässigen Prüfwert um mehr als das 33-fache. Aufgrund seiner Mobilität nehmen die Konzentrationen von Zink in der Tiefe erheblich langsamer ab als bei den anderen Elementen. Das Bodenprofil am Regenbeck repräsentiert die atmogenen (anthropogenen) Quellen und ist in Tab. 13 dem Profil Ahlsdorf 1 (Standort mit allochthonen Material aus geogenen Quellen) gegenübergestellt.



**Abb. 40: Emissionsfahne der August-Bebel-Hütte Helbra, die sich über die Kleinhaldenlandschaft westlich von Benndorf und Klostermansfeld ausbreitet (panchromatisches Luftbild 1955)**

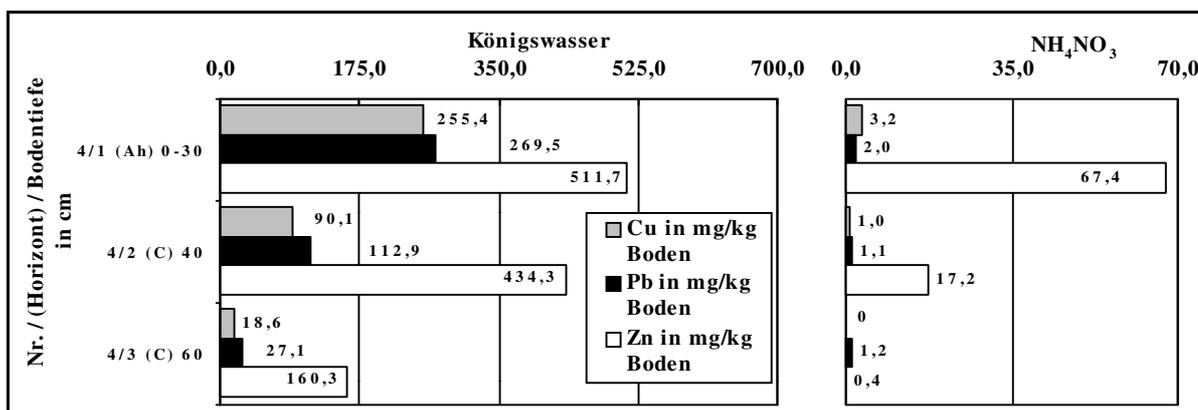


Abb. 41: Schwermetallbelastung des Bodenprofils P-He\_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Um Aussagen über die ökologische Relevanz dieser unterschiedlichen Schwermetallquellen zu gewinnen, wurde ein Vergleich der im Ammoniumnitratextrakt bestimmten pflanzenverfügbaren Metallanteile vorgenommen.

Tab. 13: Gegenüberstellung der Schwermetallgehalte des Königswasseraufschlusses mit denen des Ammoniumnitratenaufschlusses eines anthropogen und eines geogen belasteten Bodens

P-He_4: Regosol am Regenbeck (atmogene Belastung durch Hettstedter Hütten)										
	Tiefe in cm	Kupfer			Blei			Zink		
		KW (mg/kg)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (mg/kg)	Anteil von NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> an KW in %	KW (mg/kg)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (mg/kg)	Anteil von NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> an KW in %	KW (mg/kg)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (mg/kg)	Anteil von NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> an KW in %
Ah	0-30	255,4	6,5	2,5	269,5	4,0	1,5	511,7	67,4	13,2
C	40	90,1	2,0	2,2	112,9	2,2	1,9	434,3	17,2	4,0
C	60	18,6	0,0	0,2	27,1	2,4	8,9	160,3	0,4	0,3

P-Ad_1: vergrabenes Haldenmaterial über Löß mit aufgeschüttetem Ap-Horizont bei Ahlsdorf										
	Tiefe in cm	Kupfer			Blei			Zink		
		KW (mg/kg)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (mg/kg)	Anteil von NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> an KW in %	KW (mg/kg)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (mg/kg)	Anteil von NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> an KW in %	KW (mg/kg)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (mg/kg)	Anteil von NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> an KW in %
Ap	0-20	1839,5	28,0	1,5	583,8	0,8	0,1	1700,8	2,3	0,1
jC	30-50	5832,4	61,7	1,1	3517,2	6,0	0,2	4101,7	36,3	0,9
Cc	70-90	57,9	1,4	2,4	33,4	2,0	6,0	186,6	0,3	0,2

KW: Bodenaufschluss mit Königswasser (Schwermetallgesamtgehalte) DIN 38414 Teil 7

NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>: Ammoniumnitratextraktion (pflanzenverfügbare Anteile im Boden) DIN 19 730

Die Bodenschwermetallgehalte sind somit nahezu ausschließlich durch atmosphärischen Transfer von diesen ebenfalls „historischen“ Belastungsquellen erklärbar. Im Vergleich zu den im Königswasserauszug ermittelten Schwermetallgesamtgehalten erreichen die pflanzenverfügbaren Metallanteile hier durchweg höhere Werte als die der Vergrabungsstandorte. Bei diesen liegen die im Ammoniumnitratextrakt gewonnenen Metallwerte bei oder deutlich unter 1 % der Königswasserwerte. Damit wird eine höhere Verfügbarkeit der atmosphärischen eingetragenen Schwermetalle gegenüber den schieferbürtigen erkennbar. Auch hier weist Zink wiederum seine Eigenschaft als Element mit besonders hoher Verfügbarkeit nach.

Die Abb. 42 beschreibt die Schwermetallgehalte eines Bodenprofils auf dem Gelände der 1970 stillgelegten Karl-Liebnecht-Hütte in Eisleben nach Königswasseraufschluss bzw. pflanzenverfügbarem Aufschluss. Signifikant sind die hohen Anreicherungen von Schwermetallen im Oberboden und die rasch abfallenden Werte bereits in geringer Tiefe. Das Profil repräsentiert damit eindeutig Schwermetallbelastungen, die über den Luftpfad eingebracht wurden. Besonders im A-Horizont treten Prüfwertüberschreitungen nach der BBODSCHV (1999) um ein Vielfaches bei allen ermittelten Elementen auf, wobei sie am

gravierendsten bei Pb ausfallen. Vor allem im obersten Teil des A-Horizontes sind im Profil Einlagerungen von sedimentierter Asche aus der in der Umgebung ehemals lokalisierten Verhüttungsanlagen erkennbar.

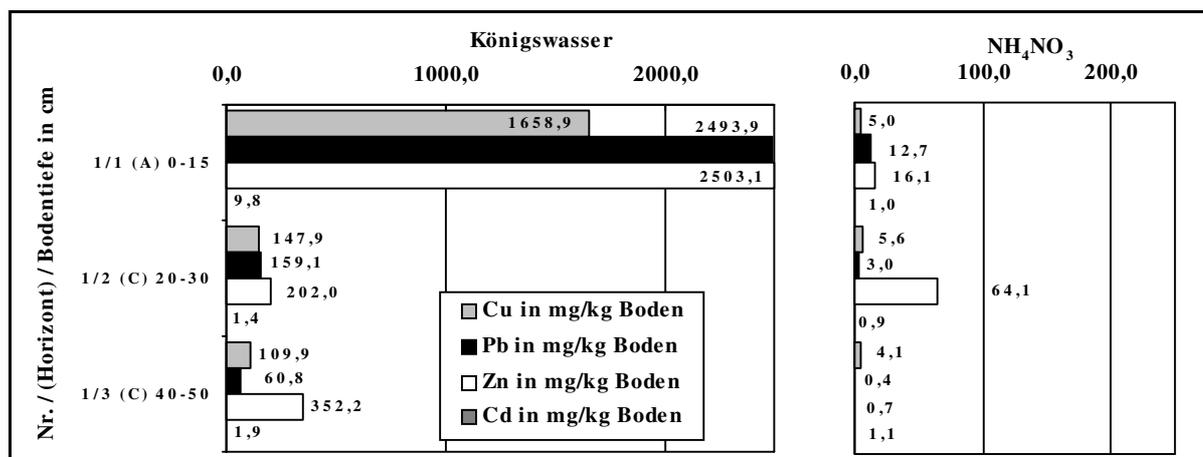


Abb. 42: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-LE\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

## 5.2 Schwermetallbelastungen von Oberbodenproben verschiedener Probentypen

Die Einteilung der Bodenproben nach Probentypen ermöglicht durch die Bildung von Mittelwerten einen Überblick über die Schwermetallgehalte der untersuchten Oberbodenbereiche in den UG. Die Oberbodenproben der Profilstandorte wurden nicht in die Mittelwertbildung einbezogen. Die Mittelwerte der Gesamtschwermetallgehalte (KW-Aufschluss) der Elemente Cu, Pb, Zn und Cd von Standorten am Kupferschieferausstrich (K) errechnen sich aus 10 Proben. Für die Mittelwertbildung der HG-Standorte dieser Elemente nach dem Königswasseraufschluss wurden 4 Proben gemittelt. Die Mittelwerte der Standorte von Vegetationsschäden (VS) ergeben sich aus 12 Proben für Cu, Pb und Zn und aus 10 Proben für Cd.

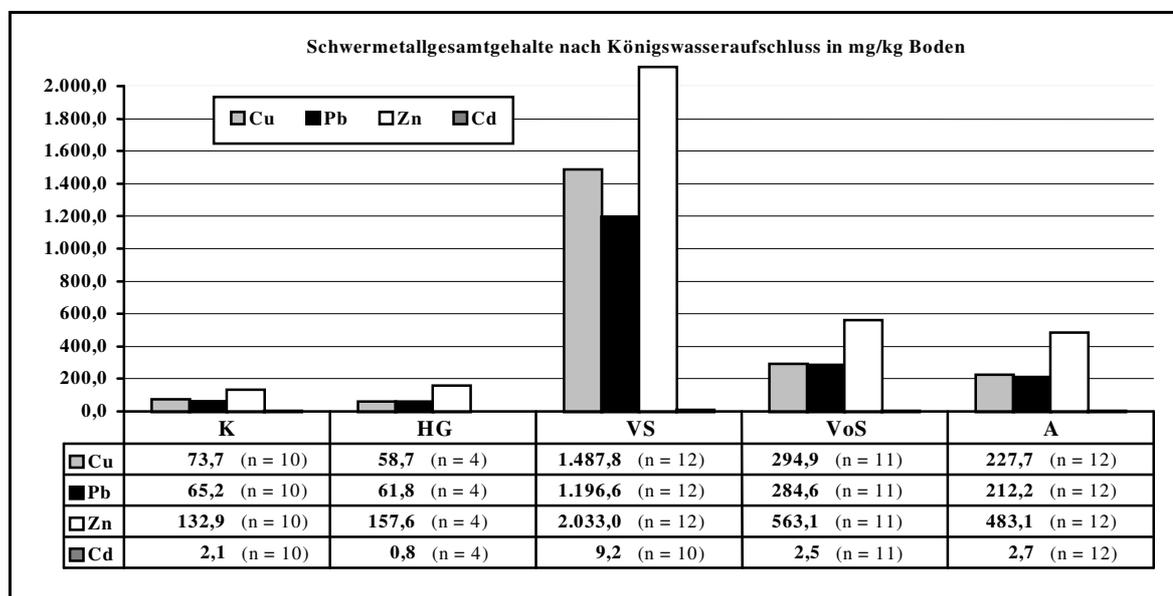


Abb. 43: Mittelwerte der Schwermetallbelastung von Oberbodenproben verschiedener Probentypen

Im Ergebnis der Untersuchungen muss deshalb bei einer Bewertung der Bodenschädigungen die Herkunft der Schwermetalle und ihr Einfluss auf die Verfügbarkeit dieser für Pflanzen bzw. die Nahrungskette beachtet werden. Diese unterscheiden sich je nach bodengeologischen Verhältnissen bei Verwitterungsböden zum Teil erheblich.

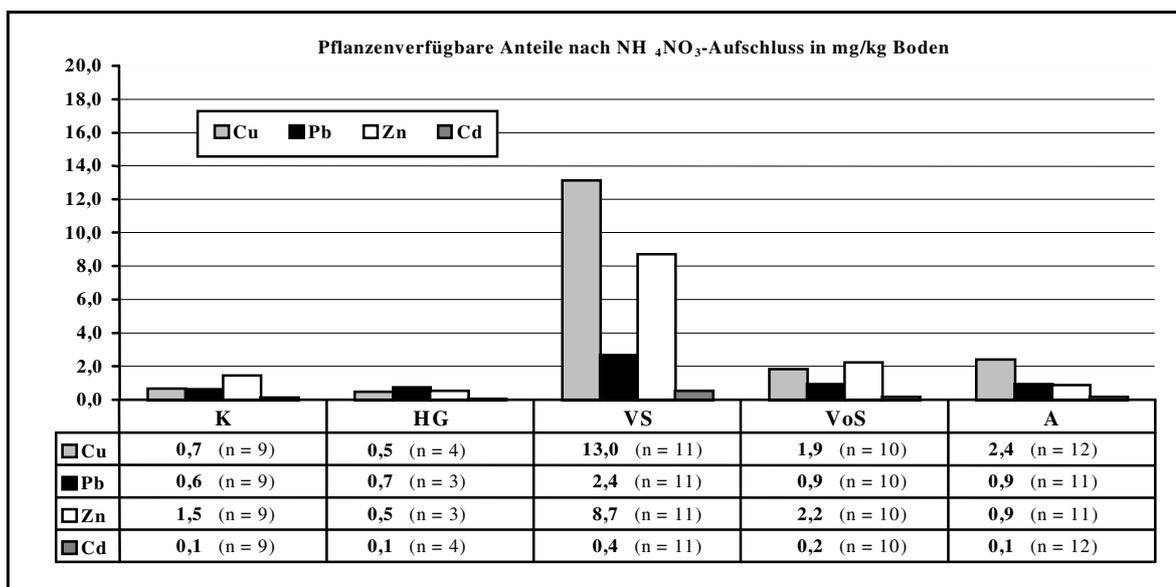


Abb. 44: Mittelwerte der Schwermetallbelastung von Oberbodenproben verschiedener Probenotypen

Der im UG 1 flächenhaft vorherrschende Löß als Ausgangssubstrat der meisten Böden schafft natürlicherweise eine relativ homogene, grundsätzlich niedrige Schwermetallbasis. Die in den Untersuchungen festgestellten zum Teil extremen Schwermetallschädigungen von Kulturpflanzen und Böden durch geogenes Material am unteren Rand des Ap-Horizontes gehen auf mehrfach anthropogenen Einfluss zurück (siehe Abb. 45).

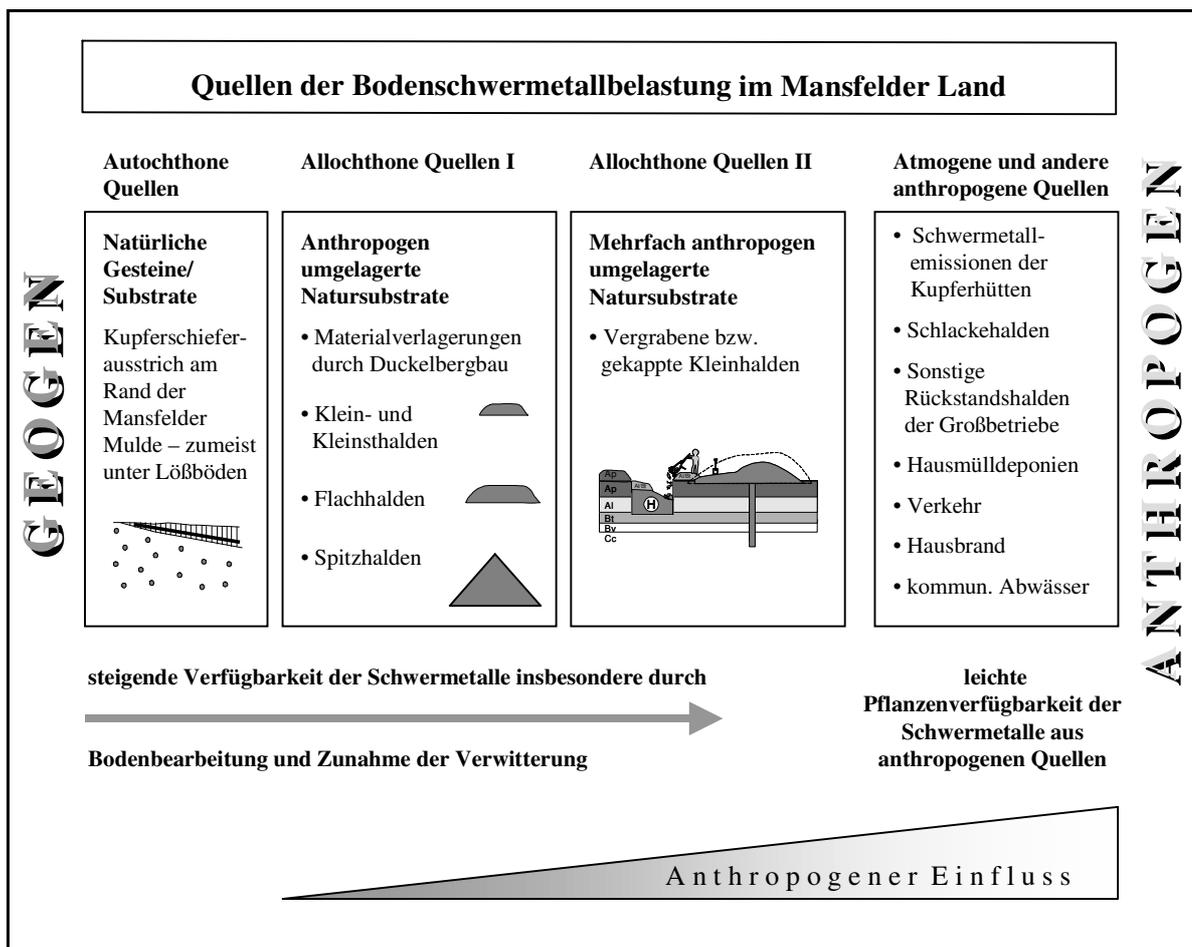


Abb. 45: Einordnung von Quellen der Bodenschwermetallbelastung nach stofflicher Herkunft und anthropogenem Einfluss

### 5.3 Einfluss der Schwermetallgehalte der Böden auf Kulturpflanzen

#### 5.3.1 Vergleich von Schwermetallgehalten in Böden mit denen in Pflanzen

Am Standort Großörner wurden Schwermetallgehalte von Boden- und Jungpflanzenproben ermittelt. Die Bodenproben wurden mittels Königswasseraufschluss bzw. Ammoniumnitratenaufschluss analysiert. Die Ergebnisse der Tab. 14 machen deutlich, dass die auf den schwermetallhaltigen Haldengräbern wachsenden, oft kranken Jungpflanzen sehr viel höhere Schwermetallgehalte beinhalten, als der pflanzenverfügbare Aufschluss des Bodens nach DIN erwarten lässt.

Bemerkenswert erscheint unter dem Blickwinkel der absoluten Belastungswerte vor allem das hohe Zink-Akkumulationsvermögen der Pflanzen. An geschädigten Jungpflanzen wurden Konzentrationen nachgewiesen, die über 50 % der Zn-Schwermetallgesamtgehalte des Bodens liegen. Bei den Analysen chlorosegeschädigter Getreidepflanzen von Vergrabungsflächen konnte festgestellt werden, dass die im Königswasseraufschluss ermittelten Metallgehalte in den Pflanzen bei den Elementen Cu und Pb zwischen 3 % und 10 % der Bodenwerte erreichen. Bei den mobileren Elementen Zn und Cd betragen die Pflanzengehalte durchschnittlich sogar zwischen 35 % und 59 % derer in den Böden. Die im Ammoniumnitratenaufschluss bestimmten pflanzenverfügbaren Anteile liegen bei Cu, Pb und Zn um oder unter 1 % der Königswasserwerte. Auch hierbei kommt insbesondere die höhere Mobilität des ökotoxikologisch brisanten Cd zum Tragen; die pflanzenverfügbaren Cd-Anteile erreichen 8-13 % der Königswasserwerte.

**Tab. 14: Vergleich von Königswasser- und Ammoniumnitratenaufschluss von Böden neben und auf vergrabenen Halden mit Schwermetallgehalten der darauf wachsenden Vegetation.**

Proben-Nr.:	Probentyp	Probe	Aufschluss	Cu in mg/kg	Pb in mg/kg	Zn in mg/kg	Cd in mg/kg
18	VS-Gö_1	Oberbodenmischprobe eines Ap-Horizontes über einer gekappten Halde bei Großörner	KW	989,2	2343,2	2623,2	8,3
18	VS-Gö_1	Oberbodenmischprobe eines Ap-Horizontes über einer gekappten Halde bei Großörner	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	13,1	3,6	5,2	0,7
Pf_6	Pfj_g (VS-Gö_1)	geschädigte junge Weizenpflanze über der ehemaligen Halde	KW	96,9	126,1	1082,4	4,9
30	VoS-Gö_1/2	Oberbodenmischprobe eines Ap-Horizontes einer Parabraunerde 30 Meter neben der gekappten Halde	KW	186,8	270,0	447,6	3,2
30	VoS-Gö_1/2	Oberbodenmischprobe eines Ap-Horizontes einer Parabraunerde 30 Meter neben der gekappten Halde	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,2	1,8	5,3	0,4
Pf_7	Pfj_v (VoS-Gö_1/2)	vitale junge Weizenpflanze auf Parabraunerde 30 Meter neben der gekappten Halde	KW	10,6	8,2	155,9	1,2

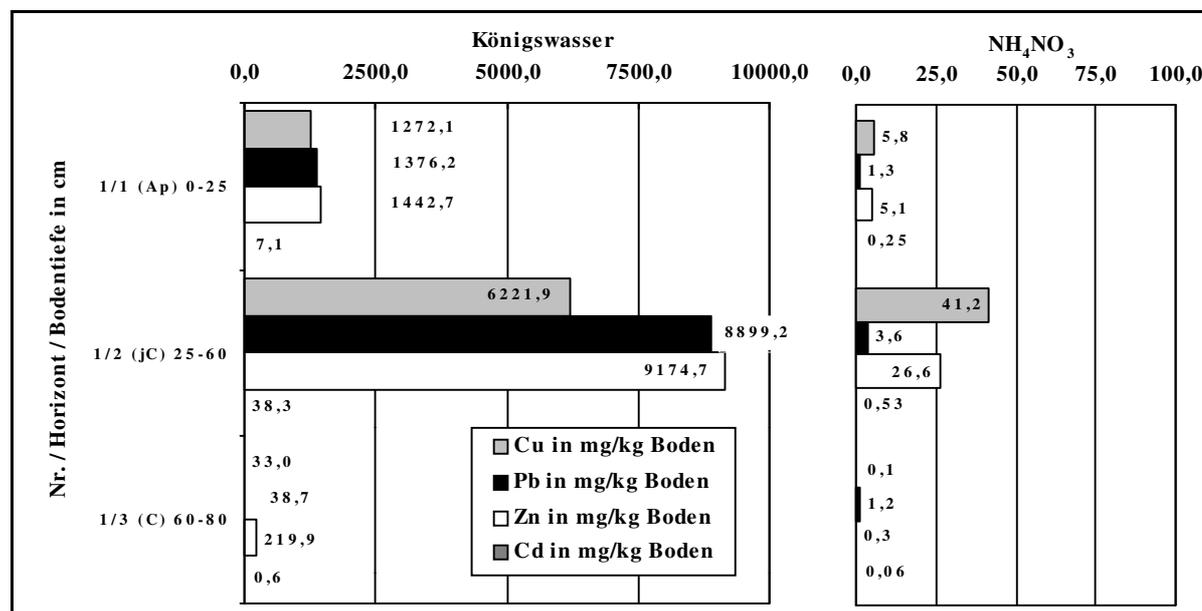
Untersuchungen haben gezeigt, dass die Resorption der Schwermetalle direkt von der an der Wurzel verfügbaren Konzentration abhängig ist (GRILL et ZENK 1989). Ursächlich für das unterschiedliche Schwermetallaufnahmevermögen der Pflanzen sind Differenzen bezüglich der Selektivität, der Wasseraufnahmerate sowie der Wurzelreichweite. Weitere Unterschiede ergeben sich auch bezüglich des Entwicklungsstadiums und des Ertrages, da durch Verdünnung bei erhöhter Grünmasse- bzw. Trockensubstanzbildung sowie durch sinkende Aufnahme bei Durchwurzelung tieferer, unbelasteter Bodenschichten der Schwermetallgehalt im Verlaufe des Wachstums abnimmt. Diesem Trend folgen auch die jungen Weizenpflanzen, die über einer Vergrabungsstruktur westlich von Klostermansfeld beprobt wurden (Tab. 15). Besonders beim mobilen Element Zn wird deutlich, dass bereits die Jungpflanzen Gehalte aufnehmen, die der Hälfte der Bodenschwermetallgehalte entsprechen. Beim toxischen Element Cd ist diese Tendenz bedenklich für die Nahrungskette. Andere Schwermetalle wie Pb und Cu werden dagegen in sehr viel geringerem Maße akkumuliert, stellen jedoch durch ihre hohen absoluten Gehalte im Boden auch zukünftig eine Schwermetallquelle für die Kulturpflanzen dar.

**Tab. 15: Elementgehalte von Oberboden- und Pflanzenproben über einer vergrabenen Halde westlich von Klostermansfeld (P-Kl\_1)**

Probe	Material / Aufschluss	Cu in mg/kg	Pb in mg/kg	Zn in mg/kg	Cd in mg/kg
Weizen ca. 25 cm groß	Jungpflanze mit Chlorosen / KW	27,2*	17,1*	776,4*	2,1*
Boden in 0-30 cm Tiefe	Ap mit Schiefen / KW	1272,5	1376,2	1442,7	7,1
Boden in 0-30 cm Tiefe	Ap mit Schiefen / NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	5,8	1,3	5,1	0,3

\* Tr. S.

Die Abb. 46 zeigt eine deutliche Zunahme der Schwermetalle im jC-Horizont. Gleiches trifft auf die pflanzenverfügbaren Anteile nach NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss zu: die Prüfwerte für Pb, Cu und Zn bzw. der Maßnahmenwert für Cd nach der BBODSCHV (1999) werden um ein Vielfaches überschritten. Ähnlich im Ap-Horizont. Hier sind die pflanzenverfügbaren Anteile zwar weitaus geringer, liegen jedoch alle noch weit über den Prüfwerten bzw. über dem Maßnahmenwert nach BBODSCHV (1999).

**Abb. 46: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Kl\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)**

Der Probenstandort, der der Abb. 46 zugrunde liegt, ist jedoch in der Vergangenheit zusätzlich zu den Schiefereinmischungen im Ap-Horizont im Oberboden auch von Hüttenstäuben belastet worden.

Um überwiegend die geogenen Schwermetallanteile zu erfassen, wurde deshalb ein vergrabener Haldenstandort in der Sangerhäuser Mulde beprobt, der außerhalb der Einflussbereiche der Großhütten lokalisiert ist. Allerdings war an diesem Standort die Mutterbodendecke schon sehr stark erodiert und mit zahlreichen Schieferbruchstücken durchsetzt. Die Lage im UG 2 der Pölsfelder Standorte ist der Karte A 6 zu entnehmen. Cd scheint in diesem geogenen Milieu im Vergleich zum Standort in Klostermansfeld jedoch weniger mobil zu sein. Die Tab. 16 zeigt, dass beim Element Zink die Konzentrationen von 350,8 ppm in einer Jungpflanze nicht einmal von der Oberbodenmischprobe erreicht wurde.

**Tab. 16: Elementgehalte von Boden- und Pflanzenproben über einer vergrabenen Halde bei Pölsfeld (nach verschiedenen Aufschlüssen)**

Probe	Material / Aufschluss	Cu in mg/kg	Pb in mg/kg	Zn in mg/kg	Cd in mg/kg
Weizen ca. 25 cm groß	Jungpflanze mit Chlorosen / KW	23,4*	17,9*	350,8*	0,0*
Boden in 0-30 cm Tiefe	Ap mit Schiefen / KW	2506,3	925,5	338,2	1,8
Boden in 0-30 cm Tiefe	Ap mit Schiefen / NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	37,3	0,8	0,1	0,1

\* Tr. S.

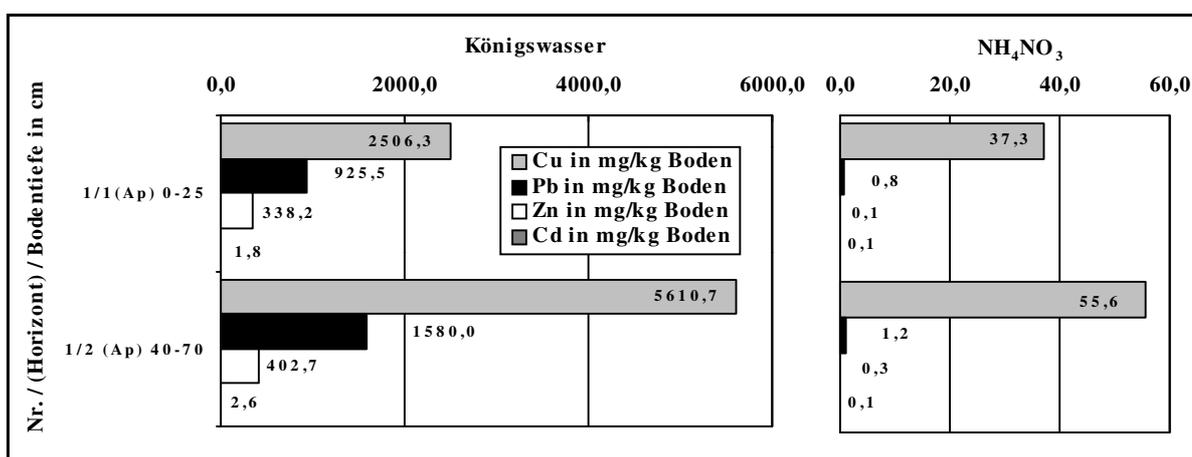


Abb. 47: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Pö\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Die Abb. 47 zeigt einen deutlichen Schwermetallanstieg ab 40 cm Bodentiefe, wobei der Gehalt an Schwermetallen im Oberboden bis 25 cm bereits stark erhöht ist.

Ähnlich bei den pflanzenverfügbaren Anteilen: hier werden die Prüfwerte bzw. bei Cd der Maßnahmenwert laut BBODSCHV (1999) von den ermittelten Werten nach NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Aufschluss überschritten. Die Prüfwerte von Cu laut BBODSCHV (1999) von 1 mg/kg Boden werden in beiden Bodenschichten sogar um mehr als das 30- bzw. 50-fache überschritten.

### 5.3.2 Vegetationsmuster über einer Haldenvergrabung und einem Vergleichsstandort



Zahlreiche Standorte, auf denen Haldenvergrabungen bzw. Haldenschleifungen stattgefunden haben, wurden vor allem kurz vor der Ernte der Kulturpflanzen durch das verstärkte Auftreten von Ruderalgesellschaften auffällig (Abb. 48). Bei der Interpretation der CIR-Luftbilder zeichnen sich diese geschädigten Bodenbereiche deshalb auch als Bereiche sehr vitaler Vegetation ab, was in einer hohen Intensität der Rotfärbung zum Ausdruck kommt, jedoch nichts mit dem dort eigentlich angestrebten Produktionsergebnis zu tun hat.

**Abb. 48: Papaver rhoeas-Vegetation über ehemaligen Haldenstandorten bei Ahlsdorf**

Um diese Pflanzenkonkurrenz zur Kulturvegetation in ihrer Differenziertheit nachzuweisen, wurde auf dem Schlag „Magdalenbreite“ in der Flur Ahlsdorf eine Pflanzenbestimmung im Frühherbst 2001 durchgeführt. Dabei wurde auf einer 1m<sup>2</sup> großen Fläche über einer Haldenvergrabung im Juli erhebliche Artenveränderung gegenüber der dort bestellten Kulturvegetation (Winterweizen) festgestellt. Es konnten zwar 173-200 Weizenpflanzen bestimmt werden, diese waren jedoch nur sehr schwach ausgebildet und erreichten lediglich eine Pflanzengröße von bis zu 15 cm.

Bei diesem sehr dünnen Bestand von kleinwüchsigen Weizenpflanzen, der auf diesem Schlag schätzungsweise eine Fläche von ca. 220 m<sup>2</sup> umfasst, konnte bereits im Frühjahr bzw. Sommer 2001 eine starke Überwucherung der Kulturvegetation mit Klettenlabkraut (*Galium aparine*) und Klatsch-Mohn (*Papaver rhoeas*) beobachtet werden. Im Spätsommer und Frühherbst dominierte dann auf dieser Fläche der Vogelknöterich (*Polygonum aviculare*). Neben diesen drei vorherrschenden Arten konnten auch noch zahlreiche weitere Ackerunkräuter auf diesem mit Schiefern belasteten Standort nachgewiesen werden (Tab. 17).

**Tab. 17: Ackerunkräuter auf Standorten vergrabener Halden**

Dominierende Art	Lat. Bezeichnung
Klettenlabkraut	<i>Galium aparine</i>
Klatsch-Mohn	<i>Papaver rhoeas</i>
Feld-Rittersporn	<i>Delphinium consolida</i>
Vogelknöterich	<i>Polygonum aviculare</i>
Windknöterich	<i>Polygonum convolvulus</i>
Ackerkratzdistel	<i>Cirsium arvense</i>
Ampferknöterich	<i>Polygonum lapathifolium</i>
Acker-Hundskamille	<i>Anthemis arvensis</i>
Gemeine Melde	<i>Atriplex patula</i>
Gemeines Hirtentäschel	<i>Capsella bursapastoris</i>
Weißer Gänsefuß	<i>Chenopodium album</i>
Bastard Gänsefuß	<i>Chenopodium hybridum</i>
Vielsamiger Gänsefuß	<i>Chenopodium polyspermum</i>
Sonnen-Wolfsmilch	<i>Euphorbia helioscopia</i>
Gemeiner Erdrauch	<i>Fumaria officinalis</i>
Strahllose Kamille	<i>Matricaria matricarioides</i>
Krauser Ampfer	<i>Rumex crispus</i>



**Abb. 49: Ackerunkräuter über einer vergrabenen Halde**

Neben den schlechten Boden- und Wassereigenschaften sind die Wurzel-, Licht- und Nahrungskonkurrenz der Ackerunkräuter für den Kleinwuchs sowie den dünnen Bestand der Kulturpflanzen verantwortlich. Überwucherungen des Getreides durch die Unkräuter im Verlauf der Vegetationsentwicklung führen zusätzlich zur Lagerung des gesamten Kulturpflanzenbestandes. Deshalb konnte auf diesem Schadstandort zur Ernte nahezu keine Weizenpflanze vom Schneidwerk des Mähreschers aufgenommen werden, was einem völligen Ertragsausfall auf dieser Fläche gleichkommt. Im Gegensatz dazu wurden auf einem ca. 40 m entfernten Vergleichsstandort auf einer ebenso 1m<sup>2</sup> großen Fläche ca. 750-800 Weizenpflanzen ermittelt. Dort konnten im Unterwuchs lediglich drei Ackerstiefmütterchen (*Viola arvensis*) und zwei Windenknöterichpflanzen (*Polygonum convolvulus*) bestimmt werden. Dieser sonst von Ackerunkräutern freie Standort erzielte einen Ertrag von 53 dt/ha Weizen und kann somit als Normalertragsstandort auf diesem Schlag gelten.

### 5.3.2.1 Schwermetalle in Nutzpflanzen auf Ackerstandorten

Die Tab. 18 beschreibt die im Rahmen der Geländearbeit gesammelten Pflanzenproben von Schadstandorten und von in deren Nachbarschaft befindlichen, scheinbar ungeschädigten Pflanzen gleicher Art. In der Spalte „Typ Pflanze“ erfolgte die Kennzeichnung der Phytologie der Pflanzen nach „geschädigt“ (\_g) und „vital“ (\_v). Von den geschädigten Pflanzen bzw. Pflanzenfrüchten standen die stark geschädigten Pflanzen im Mittelpunkt der Probenahme, mittlere und geringe Schädigungsstufen der Pflanzen wurden nicht beprobt. Somit repräsentieren die untersuchten Pflanzen bzw. Pflanzenfrüchte das derzeit maximale Ausmaß der Schwermetallaufnahme, bezogen auf einen begrenzten Bodenbereich. Analytierte Jungpflanzen, zumeist im Alter von 2-3 Monaten, sind an einem dem „Pf“ (Pflanze) nachgestellten „j“ (jung) erkennbar. Es erfolgte jeweils eine Zuordnung zu den Bodenprobenotypen.

**Tab. 18: Schwermetalle in Nutzpflanzen auf Ackerstandorten**

Pr.-Nr. Pflanze	Pr.-Nr. Boden	zugehöriger Bodenprobenotyp	Typ Pflanze	Art	Cu in mg/kg Tr. S.	RSA	Pb in mg/kg Tr. S.	RSA	Zn in mg/kg Tr. S.	RSA	Cd in mg/kg Tr. S.	RSA
Pf_1	17	VS-Be_1	Pfj_g	Weizen	207,7	0,2	124,1	1,9	928,5	0,1	3,9	2,6
Pf_2	29	VoS-Be_1	Pfj_v	Weizen	8,9	2,3	n. n.	12,6	96,3	0,1	n. n.	11,8
Pf_3	17	VS-Be_1	Pf_g	Raps	49,1	9,7	9,0	10,2	474,8	0,9	0,4	50,2
Pf_4	29	VoS-Be_1	Pf_v	Raps	37,0	15,1	10,0	12,2	224,9	4,1	0,6	23,9
Pf_5	86	P-Be_1	Pfj_g	Weizen	159,6	0,2	238,9	0,3	373,0	1,3	5,3	3,2
Pf_6	18	VS-Gö_1	Pfj_g	Weizen	96,9	0,8	126,1	1,3	1082,4	0,5	4,9	1,6
Pf_7	30	VoS-Gö_1/Gö_2	Pfj_v	Weizen	10,6	0,4	8,2	6,3	155,9	2,7	1,2	7,2
Pf_8	21	VS-He_3	Pf_g	Mais	35,3	0,6	46,1	0,7	624,0	0,3	n. b.	n. b.
Pf_9	32	VoS-He_3	Pf_v	Mais	11,2	0,5	n. n.	3,5	73,8	0,9	n. b.	n. b.
Pf_10	n. b.	n. b.	Pf_g	Rüben	25,3	0,8	1,9	37,3	132,7	6,0	n. b.	n. b.
Pf_11	n. b.	n. b.	Pf_v	Rüben	11,8	0,7	2,2	13,1	91,5	2,7	n. b.	n. b.
Pf_12	26	VS-Wi_1	Pfj_g	Weizen	53,3	3,4	19,6	3,8	793,6	1,9	5,0	1,6
Pf_13	37	VoS-Wi_1	Pfj_v	Weizen	12,1	27,2	14,8	5,1	267,6	2,3	0,4	8,5
Pf_14	130	P-Kl_1/1	Pfj_g	Weizen	27,2	25,2	17,1	5,3	776,4	0,4	2,1	11,1
Pf_15	130	P-Kl_1/1	Pfj_v	Weizen	7,2	31,0	4,7	35,1	173,4	4,5	0,6	37,6
Pf_16	136	P-Pö_1/1	Pfj_g	Weizen	23,4	16,2	17,9	13,6	350,8	1,2	n. n.	99,9
Pf_17	136	VoS-Pö_1	Pfj_v	Weizen	8,3	21,4	7,2	32,7	186,8	4,3	n. n.	72,0
Pf_18	25/160	VS-Sa_1 (P-Sa_4/1)	Pfj_g	Weizen	65,9	7,2	19,2	12,3	601,0	1,1	1,3	4,2
Pf_19	36	VoS-Sa_1	Pfj_v	Weizen	40,4	4,9	12,0	24,9	332,6	2,9	0,4	54,0
Pf_20	55	P-Ad_1/1	Pf_g	Weizen	125,7	0,4	26,3	7,2	196,3	0,4	n. b.	n. b.

Die Pflanzen auf Bodenstandorten mit Schwermetallbelastung zeigten Vegetationsschäden (VS) in Form von Chlorosen und Reduzierung der Biomasse. Bei der Pflanzenprobe Pf\_1 handelt es sich um eine geschädigte junge Weizenpflanze am Standort Be\_1. Die Pflanzenprobe Pf\_3 (Raps) wurde am gleichen Standort 15 Monate später entnommen und weist gegenüber den Analyseergebnissen der Weizenpflanze

viel geringere Elementgehalte an Cu, Pb, Zn und Cd auf. Auffällig ist, dass auf den geschädigten Vegetationsstandorten (VS) besonders die Schwermetallgehalte der jungen Weizenpflanzen sehr viel höher sind als die der ungeschädigten Vegetation (VoS) auf den benachbarten Standorten. Nach SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL (1998) und KNOCH (1997) beinhalten vegetative Pflanzenteile mehr Schwermetalle als generative Pflanzenteile. Um die direkten Auswirkungen von Schwermetallen auf die Nahrungskette zu analysieren, wurden in den UG deshalb auch Getreidekörner auf ihre Belastung untersucht (Tab. 19).

### 5.3.2.2 Schwermetallgehalte von Getreidekörnern ausgewählter Sorten

Tab. 19: Schwermetallgehalte von Getreidekörnern ausgewählter Sorten

Pr.-Nr. Pflanze	Pr.-Nr. Boden	zugehöriger Bodenprobenotyp	Typ Pflanze	Art	Cu in mg/kg Tr. S.	RSA	Pb in mg/kg Tr. S.	RSA	Zn in mg/kg Tr. S.	RSA
Pf_21	22	VS-Hg_1	PfK_g	Gerste	7,9	2,0	n. n.	52,1	318,3	5,8
Pf_22	33	VoS-Hg_1	PfK_v	Gerste	6,4	1,4	n. n.	43,1	340,6	6,1
Pf_23	110	VS-Hg_1	PfK_g	Gerste	10,5	0,4	n. n.	4,3	415,5	9,2
Pf_24	n. b.	Hg	PfK_v	Gerste	7,9	3,5	n. n.	8,2	359,0	5,3
Pf_25	112	P-Hg_2/1	PfK_g	Weizen	7,7	2,2	2,1	57,7	391,6	5,2
Pf_26	n. b.	Hg	PfK_v	Weizen	7,7	8,3	n. n.	10,3	321,8	10,4
Pf_27	n. b.	Hg	PfK_g	Weizen	6,1	3,8	n. n.	15,3	376,7	3,0
Pf_28	119	P-Hg_3/1	PfK_v	Weizen	6,7	2,0	2,6	12,0	384,8	3,6
Pf_29	130	P-Kl_1/1	PfK_g	Weizen	8,7	0,3	3,2	24,7	119,0	1,1
Pf_30	130	P-Kl_1/1	PfK_v	Weizen	6,1	1,1	n. n.	n. n.	86,4	2,9
Pf_31	136	P-Pö_1/1	PfK_g	Weizen	6,8	4,2	n. n.	n. n.	61,1	1,2
Pf_32	35	VoS-Pö_1	PfK_v	Weizen	3,9	2,0	n. n.	n. n.	37,2	5,6
Pf_33	25/160	VS-Sa_1 (P-Sa_4/1)	PfK_g	Weizen	7,6	0,2	n. n.	n. n.	114,1	0,6

Nach Tab. A 3 wird der Bleirichtwert (Weizenkorn 0,3 mg/kg Frischsubstanz) bei den Proben Pf\_25, Pf\_28 und Pf\_29 bis zum 10-fachen überschritten. Eine leichte Verringerung dieser Überschreitungen muss jedoch aufgrund der auf Trockensubstanz reduzierten Proben der Tab. 19 berücksichtigt werden.

### 5.3.3 Wachstumsversuche mit Gemüsepflanzen auf unterschiedlich belasteten Böden des Untersuchungsgebietes 1

Tab. 20: Wachstumsversuche mit Gemüsepflanzen auf unterschiedlich belasteten Böden des UG 1

Pr.-Nr. Pflanze	Pr.-Nr. Boden	zugehöriger Bodenprobenotyp	Typ Pflanze	Art	Cu in mg/kg Tr. S.	RSA	Pb in mg/kg Tr. S.	RSA	Zn in mg/kg Tr. S.	RSA	Cd in mg/kg Tr. S.	RSA
<b>Pflanzenversuch „Halde Ackergarten“</b>												
Pf_34	40	V-Hg_1	PfV_g	Porree	6,8	1,0	2,7	12,8	98,3	2,8	n. b.	n. b.
Pf_35	40	V-Hg_1	PfV_g	Kohlrabi	12,6	2,1	5,1	19,7	177,1	1,9	n. b.	n. b.
Pf_36	40	V-Hg_1	PfV_g	Sellerie	18,9	2,1	1,3	28,1	146,6	2,5	n. b.	n. b.
<b>Pflanzenversuch „Frühbeet Kleingarten“</b>												
Pf_37	38	V-Ad_1	PfV_g	Porree	4,4	0,3	1,3	43,2	87,8	1,0	n. b.	n. b.
Pf_38	38	V-Ad_1	PfV_g	Kohlrabi	14,7	2,0	n. n.	99,9	135,5	2,3	n. b.	n. b.
Pf_39	38	V-Ad_1	PfV_g	Sellerie	18,4	1,0	n. n.	99,9	115,2	2,2	n. b.	n. b.
<b>Pflanzenversuch „geogene Belastung“</b>												
Pf_40	15	VS-Ad_1	PfV_g	Sellerie	22,6	0,4	n. n.	99,0	85,0	1,0	n. b.	n. b.
Pf_41	15	VS-Ad_1	PfV_g	Kohlrabi	15,2	2,3	n. n.	11,4	219,2	4,9	n. b.	n. b.
<b>Pflanzenversuch „atmosphärische Belastung“</b>												
Pf_42	42	A-Hb_1	PfV_g	Kohlrabi	10,7	13,1	n. b.	n. b.	437,2	2,9	n. b.	n. b.
Pf_43	42	A-Hb_1	PfV_g	Sellerie	23,4	1,8	13,3	10,0	267,1	1,8	n. b.	n. b.
Pf_44	43	A-Hb_2	PfV_g	Kohlrabi	8,0	6,5	2,4	24,3	208,3	3,0	n. b.	n. b.
Pf_45	43	A-Hb_2	PfV_g	Sellerie	21,0	1,2	14,1	13,3	266,1	3,9	n. b.	n. b.

Die Kupfer- und Bleigehalte der Wachstumsversuche mit Gemüsepflanzen (Tab. 20) liegen zumeist über denen der Getreidekörner (Tab. 19), während die Zinkgehalte der Gemüsepflanzen im Durchschnitt unter denen der Getreidekörner liegen. Die Schwermetallgehalte der Gemüsepflanzen von den Probestandorten „Halde Ackergarten“ (V-Hg\_1), „Frühbeet Kleingarten“ (V-Ad\_1) sowie „geogene Belastung“ (VS-Ad\_1) und „atmogene Belastung“ (A-Hb\_1, A-Hb\_2) sind in Abb. 50 grafisch dargestellt. Die höchsten Zinkgehalte, auf den überwiegend durch Kupferschieferbruchstücke geprägten Substraten (Skelettanteil bis zu 29 %) V-Hg\_1 und V-Ad\_1, werden mit 177,1 mg Zn/kg Tr. S. bzw. 135,5 mg Zn/kg Tr. S. von Kohlrabi erreicht. Sellerie folgt mit 146,6 mg Zn/kg Tr. S. bei V-Hg\_1 und 115,2 mg Zn/kg Tr. S. bei V-Ad\_1. Bei den erheblich geringeren Kupfergehalten in den Pflanzen ist der Sellerie am höchsten betroffen.

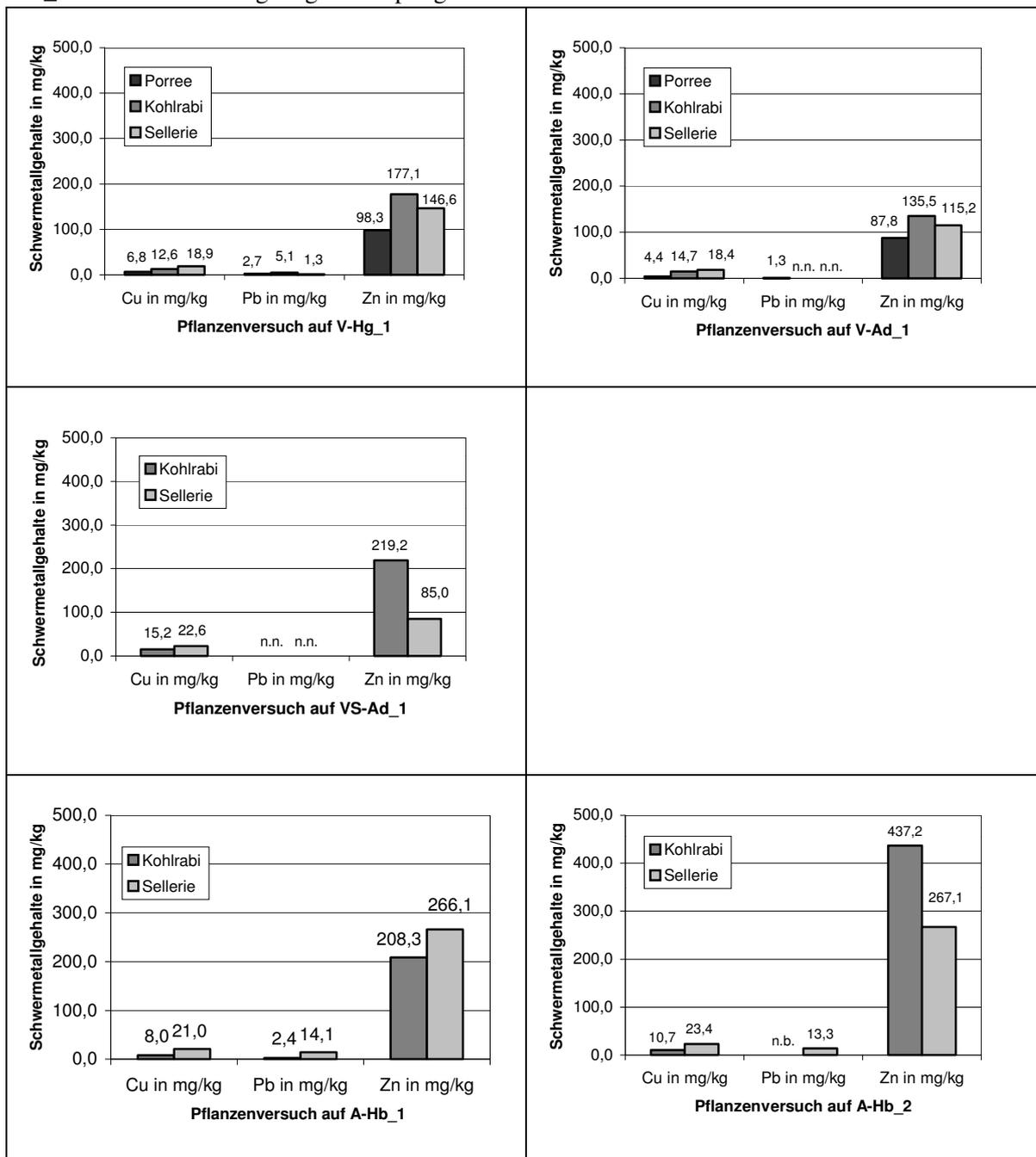


Abb. 50: Schwermetallgesamtgehalte in Gemüsepflanzen nach Versuchen auf unterschiedlich belasteten Böden des UG 1 (in mg/kg Trockensubstanz)

Ähnliche Verteilungen der Schwermetalle in Kohlrabi und Sellerie konnten auch im Pflanzenversuch auf dem Oberboden des Standortes VS-Ad\_1 festgestellt werden. Die Gemüsepflanzen, welche auf Boden substraten von Standorten östlich der Rohhütte Helbra angepflanzt wurden (vor 1990 stark durch atmoge-

ne Quellen geschädigte Oberböden), weisen innerhalb dieses Versuches die höchsten Gehalte an Schwermetallen auf. Im Kohlrabi, gewachsen auf dem Bodensubstrat von A-Hb\_2, wurden 437,2 mg Zn/kg Tr. S. analysiert. Auf dem Bodensubstrat A-Hb\_1 konnten im Kohlrabi 208,3 mg Zn/kg Tr. S. ermittelt werden. Im Vergleich zu den überwiegend durch Kupferschiefermaterial geprägten Oberböden treten vor allem beim Sellerie auf den Bodensubstraten A-Hb\_1 und A-Hb\_2 hohe Bleigehalte auf, die den Bleirichtwert nach Tab. A 3 von 0,50 mg/kg um ein Vielfaches übersteigen.

### 5.3.4 Wachstumsversuche Gemüsepflanzen auf schwermetallhaltigen und unbelasteten Substraten

Mehrere Pflanzenversuche wurden auf mit Schwermetallsalzen versetzten Böden (künstliche Belastung) durchgeführt. Bereits nach einigen Wochen blieben die Pflänzchen in den Eimern mit den belasteten Substraten in ihrer Vegetationsentwicklung zurück. Es kam zu Gelbfärbungen der Blätter und zu Welkerscheinungen bzw. zum Abwurf einzelner Blätter (Kohlrabi).

Tab. 21: Wachstumsversuche Gemüsepflanzen auf schwermetallhaltigen und unbelasteten Substraten

Pr.-Nr. Pflanze	Pr.-Nr. Boden	zugehöriger Bodenprobenotyp	Typ Pflanze	Art	Cu in mg/kg Tr. S.	RSA	Pb in mg/kg Tr. S.	RSA	Zn in mg/kg Tr. S.	RSA	Cd in mg/kg Tr. S.	RSA
Pf_46	11	HG-BI_1	PfV_g	Sellerie	27,2	1,4	123,2	0,8	1532,6	1,8	n. b.	n. b.
Pf_47	11	HG-BI_1	PfV_g	Kohlrabi	6,4	3,8	4,3	37,3	507,7	1,4	n. b.	n. b.
Pf_48	11	HG-BI_1	PfV_v	Sellerie	17,2	2,5	0,0	99,9	102,2	5,5	n. b.	n. b.
Pf_49	11	HG-BI_1	PfV_v	Kohlrabi	3,5	3,3	0,1	99,9	70,2	2,2	n. b.	n. b.
Pf_50	16	V-Ad-2	PfV_g	Sellerie	20,1	2,4	6,4	16,7	207,6	4,5	n. b.	n. b.
Pf_51	16	V-Ad-2	PfV_g	Kohlrabi	3,4	4,9	2,6	78,6	155,8	2,9	n. b.	n. b.
Pf_52	16	V-Ad-2	PfV_v	Sellerie	13,0	2,5	1,6	80,4	79,2	8,0	n. b.	n. b.
Pf_53	16	V-Ad-2	PfV_v	Kohlrabi	2,8	10,6	n. n.	99,9	72,3	8,4	n. b.	n. b.

Die Schädigungen der Pflanzen in den Eimern mit dem Gemisch aus fossilem Boden und Blumenerde waren dabei geringer als die der Pflanzen in den Eimern mit Parabraunerde von Blankenheim (HG-BI\_1). Da einige Pflanzen Kleinwuchs aufwiesen, wurden generell für die Analysen zwei Pflänzchen, die sich auf gleichen Bodenverhältnissen entwickelten, zu einer Mischprobe zusammengefasst.

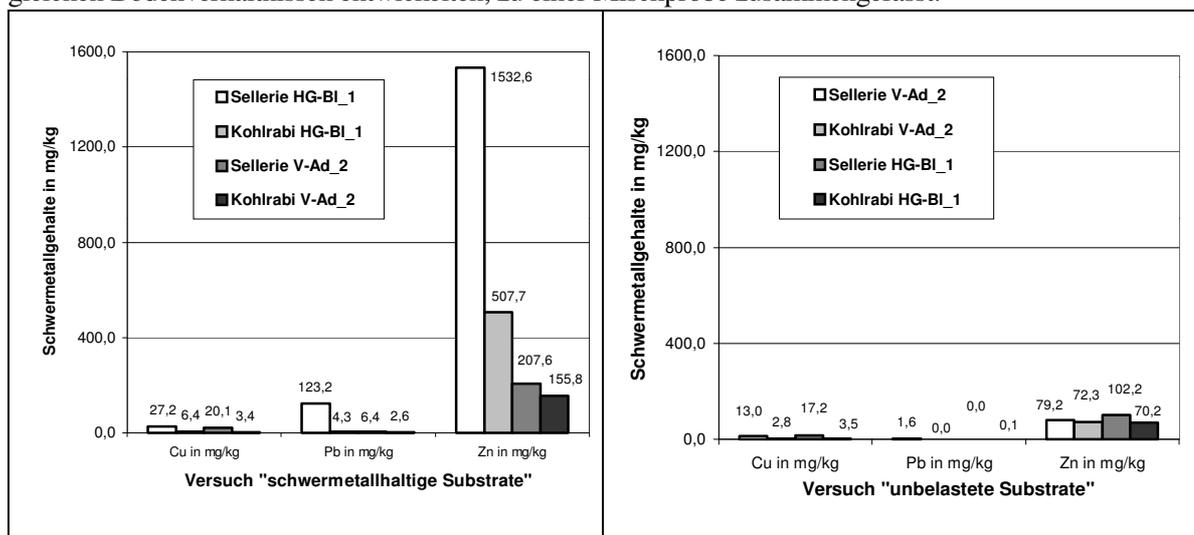


Abb. 51: Schwermetallgesamtgehalte in Gemüsepflanzen nach Versuchen auf schwermetallhaltigen und unbelasteten Substraten (in mg/kg Trockensubstanz)

Die künstlich mit Schwermetallen belasteten Substrate, die über 500 mg Cu, 500 mg Zn, 500 mg Pb und 5 mg Cd je kg Boden verfügten, verursachten, wie schon in anderen Versuchsergebnissen deutlich wurde, eine sehr hohe Belastung von Zink in den Gemüsepflanzen. Dass im Sellerie die höchsten Schwermetall-

konzentrationen erreicht werden, liegt u. a. an der großen Kontaktfläche des Knollenkörpers mit dem Boden. Verunreinigungen am Gemüse durch anhaftende Reste von Boden können keine Rolle spielen, da der Sellerie vor der Analyse geschält wurde. Auch von den anderen Pflanzen wurden vor dem Hintergrund des möglichen Anhaftens von Bodenmaterial kritisch zu beurteilende Teile, wie Wurzeln und Schale, vor der Analyse entfernt.

### 5.3.5 Wachstum und Schwermetallgehalte von Winterweizen auf Substraten mit und ohne Schwermetallbelastung (Vergrabungsversuche)

In Abb. 52 ist die Vegetationsentwicklung der Weizenpflanzen am Versuchsstandort V-Hg\_2 auf verschiedenen Untergrundmaterialien (Sand-, Ziegelschutt- und Kupferschiefervergrabungen) dargestellt. Nach der Bestellung mit Winterweizen Anfang Dezember 1997 war im März 1998 noch ein relativ einheitlicher Vegetationsbestand auf den verschiedenen Haldengräbern zu verzeichnen.

Auffällig war dann die im April einsetzende Verfärbung der Pflanzen auf dem Kupferschiefergrab (hellgrün) und eine bereits zu diesem Zeitpunkt erkennbare verminderte Wuchshöhe. Bei einer Befliegung vom 24.05.1998 traten bereits deutliche Gelbfärbungen der Pflanzen (Chlorosen) auf dem Kupferschiefergrab hervor. Diese waren bereits in ähnlicher Ausprägung in den UG über anderen zahlreichen Schiefervergrabungen auf Ackerstandorten beobachtet worden. In der Tab. 22 sind die Schwermetallwerte der jungen Weizenpflanzen über dem Kupferschiefergrab (Pf\_54) und der benachbarten, vom Bodenaufbau unveränderten „Parabraunerde“ (Pf\_55), aufgelistet. Aufgrund der hohen relativen Standardabweichung der Kupfer-, Blei- und Cadmiumgehalte sind die Ergebnisse dieser Pflanzenanalysen nicht hinreichend gesichert, so dass auf eine Auswertung verzichtet werden muss. Bei den Zinkgehalten liegen die Werte mit 140,7 mg/kg bei der Probe Pf\_54 und mit 161,2 mg/kg bei der Probe Pf\_55 in etwa auf einem Niveau.

Die Pflanzenprobe Pf\_56 repräsentiert die geernteten Weizenkörner über dem „Kupferschiefergrab“, die Pflanzenprobe Pf\_57, die der Weizenkörner vom Bodenstandort „Parabraunerde“. Die Weizenkörner dieser Proben und auch der des „Ziegelschuttgrabes“ (Pflanzenprobe Pf\_58) sowie des „Sandgrabes“ (Pflanzenprobe Pf\_59) besitzen gegenüber dem Durchschnitt der Blei- und Zinkanalysen der Körner aus Tab. 19 höhere Konzentrationen an Schwermetallen.

Eine deutlich höhere Belastung der Jungpflanzen und des Erntegutes des Standortes „Kupferschiefergrab“ gegenüber den anderen Versuchsstandorten konnte nicht nachgewiesen werden. Allerdings sind die nur schätzungsweise erfassten Ertragsunterschiede sehr deutlich. Der Ertrag vom „Kupferschiefergrab“ bleibt nicht nur aufgrund seiner sehr viel kleineren und in der Summe geringeren Anzahl von Körnern gegenüber den anderen Versuchsflächen zurück, sondern vor allem auch dadurch, dass bedingt durch den kümmerlichen Wuchs die Weizenähren überwiegend unterhalb der Schneidwerkshöhe eines Mähreschers liegen.

**Tab. 22: Wachstumsversuche von Winterweizen auf Substraten mit und ohne Schwermetallbelastung (Vergrabungsversuche)**

Pr.-Nr. Pflanze	Pr.-Nr. Boden	zugehöriger Bodenproben-typ	Typ Pflanze	Art	Cu in mg/kg Tr. S.	RSA	Pb in mg/kg Tr. S.	RSA	Zn in mg/kg Tr. S.	RSA	Cd in mg/kg Tr. S.	RSA
Pf_54	41	V-Hg_2	Pfj_g	Weizen	2,0	99,9	4,6	44,1	140,7	8,5	0,7	19,4
Pf_55	41	V-Hg_2	Pfj_v	Weizen	4,6	39,0	7,7	37,8	161,2	0,6	0,1	99,9
Pf_56	41	V-Hg_2	PfV_g	Weizenkorn	6,0	2,3	n. n.	n. n.	67,1	1,8	n. n.	n. n.
Pf_57	41	V-Hg_2	PfV_v	Weizenkorn	5,3	1,3	n. n.	n. n.	85,9	3,1	n. n.	n. n.
Pf_58	41	V-Hg_2	PfV_v	Weizenkorn	5,3	3,5	n. n.	n. n.	45,4	0,9	n. n.	n. n.
Pf_59	41	V-Hg_2	PfV_v	Weizenkorn	2,4	3,8	n. n.	n. n.	54,0	0,2	n. n.	n. n.

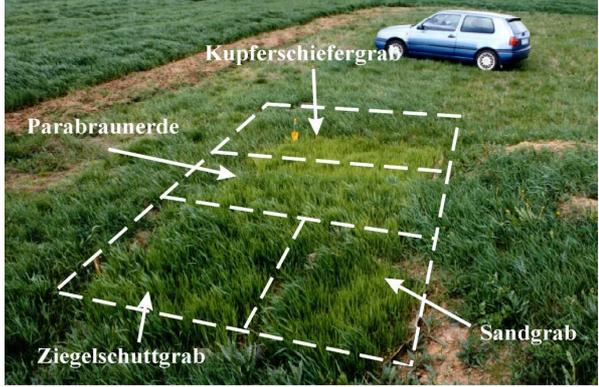
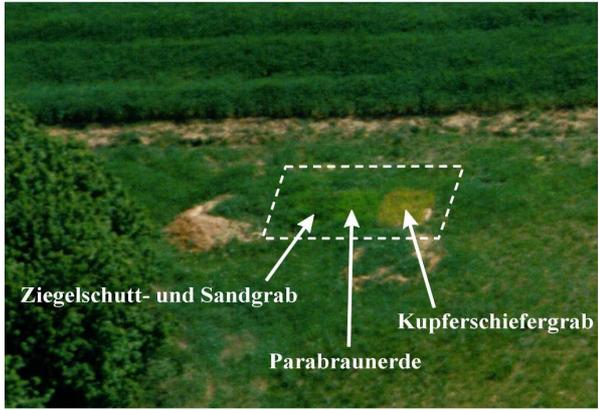
	<p>Initiale Pflanzenentwicklung des Weizens (Ende März 1998)</p> <p>Nahezu einheitlicher Vegetationsbestand über der mit Ziegelschutt und Sand gefüllten Grube im Hintergrund und der mit Kupferschiefermaterial gefüllten Grube im Vordergrund.</p>
	<p>Wachstumsphase der Versuchspflanzen (Mitte April 1998)</p> <p>In Ansätzen erkennbarer Minderwuchs und Chlorosen der Weizenpflanzen auf der mit Kupferschiefermaterial gefüllten Grube im Hintergrund.</p>
	<p>Schrägluftbild einer Befliegung vom 24.05.1998</p> <p>Die Vegetationsschäden (Chlorosen) über der mit Kupferschiefermaterial gefüllten Grube (rechts) verstärken sich durch den Einfluss der Schwermetalle.</p>
	<p>Reifephase der Weizenpflanzen im Juli 1998</p> <p>Auf dem Schiefergrab verkümmern aufgrund der Schwermetallschädigungen und der Trockenheit die Pflanzen zunehmend. Trotz des ebenfalls klüftigen Untergrundes des Sand- bzw. Ziegelschuttgrabes ist auf ihnen eine relativ gute Entwicklung des Weizens erkennbar.</p>

Abb. 52: Vegetationsentwicklung auf dem Versuchsstandort V-Hg\_2

### 5.3.6 Pflanzenverhalten nach der Teilsanierung eines Bodenstandortes mit Vegetationsschäden

Vom Standort P-Ad\_6 (Abb. A 2) wurden vor der Teilsanierung Bodenproben entnommen, deren Schwermetallgehalte und ausgewählte Bodenparameter in der Abb. 53 dargestellt sind. Der bei Haldenvergrabungen oftmals zwischen dem Ap- und jC-Horizont eingebrachte schmale Lößhorizont, der an diesem Standort besonders deutlich ausgeprägt ist, dient als horizontale Barriere, um eine Verlagerung von Teilen des Ap-Horizontes in die Hohlräume des Schieferhorizontes (jC-Horizont) zu verhindern (siehe Abb. A 8).

Der im Bodenprofil der Abb. A 8 sichtbare gelbbraune Bodenfeiler zwischen zwei benachbarten grauschwarzen Haldengräbern besteht aus unverlagertem, natürlich gewachsenen Boden bzw. dem Ausgangssubstrat der Bodenbildung. Er diente beim Vergraben der Halde als Trennwand zwischen den Haldengräbern, damit bei der Eröffnung eines weiteren Haldengrabes keine Schiefer aus dem ersten Schiefergrab nachrutschen konnten. Heute stellt er einen Bereich dar, über den die Kulturvegetation aufgrund annähernd normaler bodenphysikalischer Eigenschaften noch gute Vegetationsentwicklungen zulässt. Die in der Mitte dieser schmalen Trennwand in einer Tiefe von 110 cm genommene Probe P-Ad\_6/7 (zum Vergleich mit in der Profilabfolge der Abb. 53 unten dargestellt) enthielt nach dem Königswasseraufschluss 22 mg Cu/kg Boden, 34,8 mg Pb/kg Boden und 70,3 mg Zn/kg Boden, während der vergrabene Schieferkörper bei P-Ad\_6/3 3028,3 mg Cu/kg Boden, 654,9 mg Pb/kg Boden und 9,8 mg Cd/kg Boden enthielt.

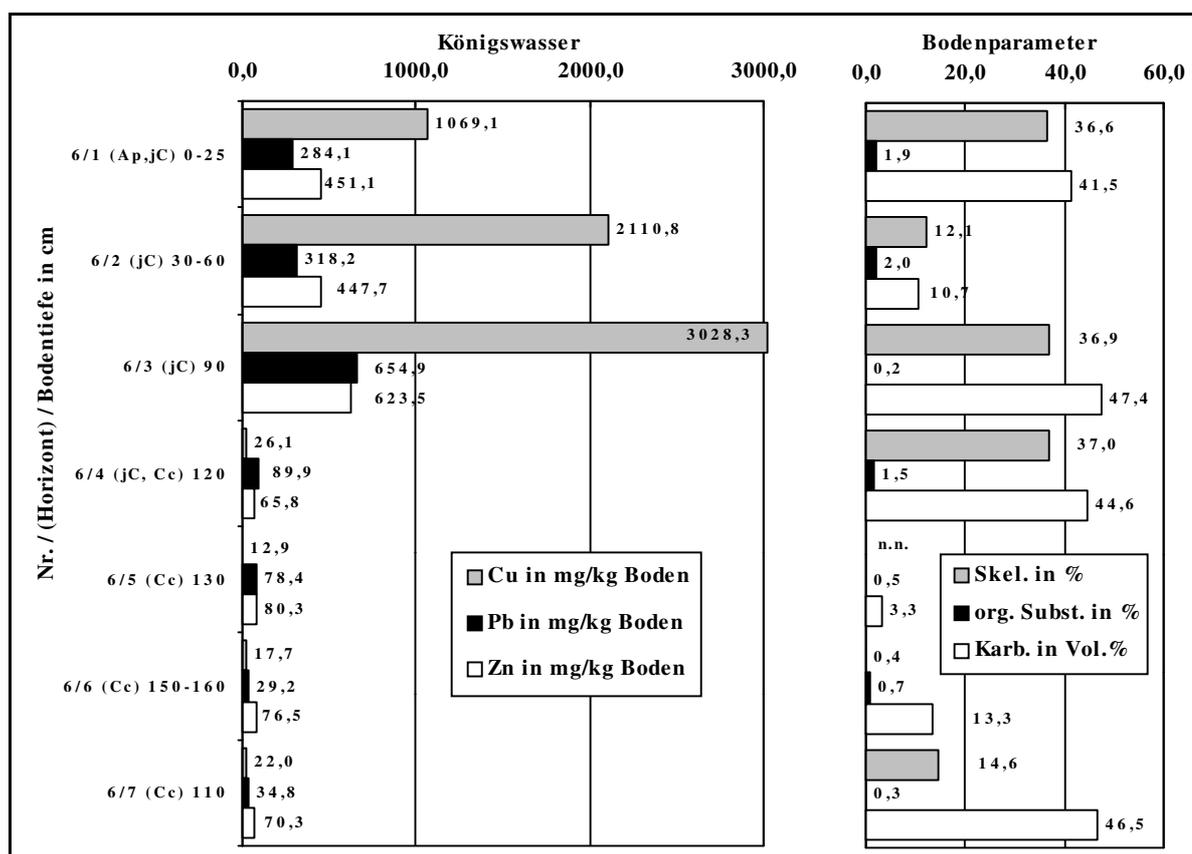


Abb. 53: Gesamtschwermetallbelastung und Bodenparameter des Bodenprofils P-Ad\_6

Nach dem Bodenaustausch an diesem Standort wurde der Aufwuchs der Winterweizenpflanzen in der folgenden Vegetationsperiode beobachtet. Chloroseschäden traten nicht auf. Zwischen den Pflanzen, die auf der sanierten Stelle aufwuchsen und denen der benachbarten Fläche gab es keine Unterschiede in der Wuchshöhe sowie Anzahl und Größe der Weizenkörner. Trotz des Sanierungserfolges stellt eine solche Teilsanierung aufgrund des hohen technischen Aufwandes und der damit verbundenen Kosten keine Gesamtlösung der Problematik „vergrabene Halden“ dar.

## 6 Abschätzung zukünftiger Gefahren für die Böden im Mansfelder Land

Die Schwermetallbelastungen der Böden im Untersuchungsgebiet resultieren aus den in Abb. 45 bereits beschriebenen geogenen und atmogenen Quellen. Bei der Verbreitung der Schwermetalle aus der Kupferschieferlagerstätte des Mansfelder Reviers spielte der Mensch die entscheidende Rolle. Infolge der bergbaulichen Tätigkeit gewann man zunächst schwermetallhaltiges Material und transportierte es dann zu verschiedenen Hüttenstandorten. Die erzhaltigen Teile davon wurden verhüttet, das taube Gestein lagerte man auf Halden ab. Neben dem in großen Mengen anfallenden Abfallprodukt Schlacke emittierten die Hütten zusätzlich schwermetallhaltige Stäube und Abwässer. Künftige Nutzungen der Landschaft werden folglich im Mansfelder Land an zahlreichen Stellen immer wieder in Konflikt mit den Resten und Abfallstoffen aus der Kupferschieferproduktion treten.

Die Bodenflächen, welche ausschließlich von Schwermetallen aus den Hütten (atmogen) belastet wurden, zeigen besonders im Bereich der Ap-Horizonte erhöhte Konzentrationen an Schwermetallen. Diese werden jedoch langfristig in ihrer Gesamtbelastung nicht gravierend zunehmen, da die Emission der Hütten nicht mehr existiert und sich auch sonst die allgemeine Immissionsbelastung u.a. durch Reduzierung der Braunkohlefeuerung verringert hat.

Für den Gemüseanbau bleiben die Böden in der Umgebung der Hütten weiterhin ungeeignet. Obst und Gemüse nehmen zwar in sehr unterschiedlichem Maße Schwermetalle (z. B. Cd) auf, ein künftiger Anbau von Gemüse sollte jedoch auf den hüttennahen Standorten generell vermieden werden.

**Tab. 23: Aufnahmevermögen von Obst und Gemüse aus dem Boden gegenüber Cadmium (LRA LUTHERSTADT EISLEBEN 1990)**

Geringe Aufnahme	Starke Aufnahme
Kartoffeln, Weißkohl, Blumenkohl, Bohnen, Tomaten, Beerenobst, sonstiges Obst	Sellerie, Spinat, Petersilie, Grünkohl

Im Bereich der Schiefervergrabungen wird durch die intensive und tiefe Bearbeitung mit Pflug, Kreiselegge und Grubber die mechanische Zerkleinerung der in die Oberböden integrierten Kupferschieferbruchstücke weiter ansteigen. Die Folge ist langfristig die erhöhte Freisetzungen von Schwermetallen im Boden und die damit einhergehende zunehmende Pflanzenverfügbarkeit. Inwieweit diese geogenen Schwermetalle aus dem Boden in Größenordnungen von den Nutzpflanzen akkumuliert werden, sollte Gegenstand künftiger Untersuchungen sein. Im Rahmen dieser Arbeit konnte bisher ermittelt werden, dass die Nutzpflanzen auf stark schwermetallhaltigen Bodenbereichen auch aufgrund der o. g. schlechteren bodenphysikalischen Verhältnisse eher zum Absterben als zur Fruchtbildung neigen.

Am brisantesten sind solche Ackerstandorte anzusehen, wo sich die Belastungen aus den Hütten und aus verwitterndem Schiefermaterial von vergrabenen Halden addieren. Für die Nahrungsmittelproduktion sind diese Flächen unter Beachtung der gesetzlichen Bestimmungen (BBODSCHG 1998; BBODSCHV 1999) in Zukunft für die Landwirtschaft kaum noch rentabel nutzbar.

Ein weiteres Problem in den UG stellt die Verdichtung des Bodengefüges durch des Einsatz immer leistungsstärkerer Technik dar, die für eine moderne, auf Produktivitäts- und Gewinnsteigerung ausgerichtete Landwirtschaft jedoch unabdingbar ist (PAUL 1999). Erntemaschinen mit großvolumigen Bunkern sowie Fahrzeuge für den Erntetransport erreichen heute bereits Gewichte bis zu 40 t (PAUL 1999). Verdichtungen, die Störungen des Luft- und Wasserhaushaltes bewirken, gehen insbesondere mit einem Verlust der Grobporen einher, was die Bodenfruchtbarkeit negativ beeinflusst. Sie können durch tiefere und häufigere Bodenbearbeitung verringert werden, im Bereich der vergrabenen Halden sind solche Maßnahmen aufgrund der Verschleppungs- und Verwitterungsproblematik von Haldenmaterial jedoch nicht möglich.

Eine weitere, aus umweltverträglichen Gesichtspunkten bedenkliche Tätigkeit des Menschen wird auch künftig weiter verfolgt werden: Neben der auch schon früher üblichen länderübergreifenden Vermarktung

der Produkte aus Mansfelder Schlacke, die nach heutigem Erkenntnisstand radioaktiv belastet sind, wird in jüngster Zeit eine erneute Schwermetallverteilung in der Region bzw. ein Schwermetallexport aus dem Mansfelder Land hinaus praktiziert.

Des weiteren erweist sich die sich ständig ausweitende Nutzung von Kupferschieferflachhaldenmaterial für bautechnische Zwecke als eine geökologisch brisante Angelegenheit (VIEHL 1997).

Besonders Feld- und Waldwege wurden um 1990 mit Bergematerial von mittleren Halden bereits repariert bzw. saniert (OERTEL 1998). In jüngster Zeit wird Haldenmaterial auch als Unterbaumaterial für größere Straßenbauten verwendet. Nach Angaben der Bauunternehmer aber, die solche Halden vermarkten, würden die auch auf diesen Halden lagernden Ausschlüge (schwermetallreiches Gestein) nicht als Rohstoffquelle für den Straßen- und Wegebau genutzt.



**Abb. 54:** Halde des „Freieslebenschachtes“ bei Großörner (Foto: Oertel 1997)

Das in der Flur Kreisfeld zur Aufschotterung eines Feldweges verwendete Schiefermaterial (siehe Tab. A 1, Bodenprobe V-Kr\_1) erreichte dennoch Schwermetallgesamtgehalte, die erheblich über den gültigen Bodengrenzwerten liegen. Die ökologische Brisanz einer unversiegelten Schotterung von Wegen mittels Bergematerial besteht vor allem darin, dass dieses durch die darüber fahrenden Kraftfahrzeuge sehr schnell zu äolisch transportierbaren Fraktionen verwittert. Dadurch könnten z. B. benachbarte Kulturpflanzen und Ackerböden mit Schadstoffen belastet werden. Die Probenstandorte A-Kr\_1 bis A-Kr\_5 befinden sich jeweils in Abständen von 2 Metern neben dem belasteten Feldweg in Kreisfeld. Die dort beobachteten Vegetationsschäden ließen sich zunächst nicht auf eine stärkere Bodenbelastung zurückführen, vielmehr könnten die schwermetallhaltigen Stäube über die Blätter die Kulturpflanzen schädigen.

## 7 Handlungsbezug zur Bodenschätzung

### 7.1 Grundlagen der Reichsbodenschätzung

Die Reichsbodenschätzung (Gesetz vom 16.10. 1934) hatte die Aufgabe, in erster Linie Unterlagen für die Besteuerung der landwirtschaftlichen Nutzflächen zu schaffen. Nach dem einheitlichen Ackerschätzungsrahmen werden Bodenart, Herkunft bzw. geologische Entstehung, Zustandsstufe und Bodenzahl sämtlicher Ackerböden im Abstand von 50 Metern durch Bodenschätzer bestimmt.

- Als Bodenart unterscheidet man die acht mineralischen Bodenarten: S, Sl, IS, SL, sl, L, LT, T und eine organische Bodenart Mo. Die Bestimmung erfolgte im Gelände mittels der Fingerprobe nach dem Anteil von Ton und Sand. Nur von einigen Musterstücken wurden Schlämmanalysen gemacht.
- Als Herkunft bzw. geologische Entstehung werden unterschieden: Dilluvialböden (D), Alluvialböden (Al), Lößböden (Lö), Verwitterungsböden (V).
- Die einzelnen Bodenarten werden nach Zustandsstufen weiter untergliedert, und zwar sind es bei Lehm (L) und bei sL-Böden maximal 7, bei Sg-Böden verschiedener Bodenarten max. 4 Zustandsstufen. Die Schaffung derartiger Abstufungen gehört zu einem bedeutenden Fortschritt gegenüber bisherigen Schätzungssystemen (RÜBENSAM et RAUE 1964).

Somit werden die wichtigsten Eigenschaften wie Humusgehalt, Kalkgehalt, Profiltiefe, Bodengefüge, Horizontgliederung sowie deren Besonderheiten erfasst, die zur Beurteilung der Ertragsfähigkeit von Bedeutung sind.

Aus der Bodenart, der geologischen Entstehung und der Zustandsstufe ergeben sich mehr als 200 Ackerklassen, die vom diluvialen Sand mit der Zustandsstufe 7 (S7D) und der Bodenzahl 7-11 bis zum Lehmlöß erster Zustandstufe (L1Lö) mit der Bodenzahl 92-100 reichen. Ackerzahlen werden durch Zu- oder Abschläge von der Bodenzahl ermittelt. Sie charakterisieren die Ertragsunterschiede, welche durch Abweichungen vom Klima, der Geländegestaltung oder auf andere natürliche Ertragsbedingungen zurückzuführen sind. Ackerland niedrigster Ertragsfähigkeit würde infolgedessen die Ackerzahl 7 als Minimum erhalten, bestes Ackerland die 100. Der Faktor Mensch, der durch Bodenbearbeitung, Düngung etc., die Ertragsfähigkeit beeinflussen kann, wird dabei nicht mit erfasst. (HERZOG 1932, KUNTZE et al. 1994, RÖSCH et KURANDT 1941, SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1998)

Für das gesamte Bundesgebiet sind Schätzungskarten unterschiedlichen Maßstabes und Schätzungsbücher in den Finanzämtern in Originalausführung vorhanden sowie in Katasterämtern im Liegenschaftskataster dokumentiert (Tab. A 4)(KUNTZE et al. 1994).

Als Ergebnis der Bodenschätzung liegen Ackerklassen mit Ackerzahlen und Grünlandklassen mit Grünlandzahlen vor. Dadurch wurde ein guter Überblick über die Kulturböden geschaffen. Die Bewertungserhebungen bilden nicht nur für steuerliche Zwecke, sondern auch als Planungsgrundlage eine gute Bezugsbasis. Die Ergebnisse der Bodenschätzung werden durch fortlaufende Nachschätzungen aktualisiert und hinsichtlich der Nutzungsabgrenzung auf den neuesten Stand gebracht. Sie sind somit ein gutes Hilfsmittel für die Nutzungsplanung, für Standortverbesserungsmaßnahmen und landwirtschaftliche Beratung, für die Preisbildung bei Verpachtungen und Beleihungen sowie für verschiedene Steuergrundlagen (z. B. Grundsteuern).

### 7.2 Abweichungen von der Reichsbodenschätzung im Untersuchungsgebiet 1

Im Untersuchungsgebiet wurden zahlreiche oberirdische Halden und deren Haldenumfeld im Rahmen der Reichsbodenschätzung erfasst und als Unland eingestuft. Das 50 x 50 m Raster war für die Ziele der Bo-

denschätzung deutschlandweit ein geeignetes Raster, jedoch für die heterogenen Strukturen der Kleinsthalden des Mansfelder Landes nicht ausreichend genug. Es ist kaum vorstellbar, dass jede heute bekannte Haldenvergrabung berücksichtigt werden konnte. Sicherlich blieben viele Standorte aufgrund des Messrasters von 50 Metern unberücksichtigt, weiterhin waren die über den Vergrabungen aufgeschütteten humusreichen Oberböden damals noch in einem mächtigeren Zustand als heute, so dass der Gesamtschlag eine bessere Bewertung erhielt als es sich heute darstellt. An einigen Ackerschlägen sind jedoch diese Skelettanteile des Kupferschiefermaterials im Boden erkannt und berücksichtigt worden. Man findet dann im Unterschied zu den umgebenden Lößstandorten (L 3 Lö) mit Bodenzahlen von 75-80 eine Einstufung als Verwitterungsstandort (sL 4 V) mit Bodenzahlen um 50. Die heutigen gravierenden Schädigungen der Böden und Pflanzen durch das Vergraben und das anschließende teilweise Exhumieren der schwermetallhaltigen Materialien war damals nicht ersichtlich oder aber die Symptome waren im Jahre der ersten Bewertung 1938 weniger stark ausgeprägt, denn auf zahlreichen Standorten stehen die Bodenwertzahlen im Vergleich zu den heute erzielbaren Erträgen im Missverhältnis, d. h., die Ackerzahlen/Bodenzahlen spiegeln nicht mehr die tatsächlichen Verhältnisse wider. Die Vielfalt der auftretenden Unstimmigkeiten soll an einem Beispiel demonstriert werden.

Der in Abb. A 9 dargestellte Ackerbereich im Vordergrund des Fotos in der Flur Mansfeld, der z. T. das in der Karte 10 eingezeichnete Bearbeitungsgebiet Klostersmansfeld zeigt, war laut der Flurkarte des Jahres 1853 noch voll von Kleinhalden, ist in der heutigen amtlichen Bodenbewertung jedoch noch immer mit L 3 Lö 75/73 bewertet. Nach Auswertungen topographischer Karten und Flurkarten sowie aus Befragungen der örtlichen Bevölkerung wurde ersichtlich, dass die Mehrzahl der Halden bis zu den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts vergraben wurden, einige wenige sind noch nach dem 2. Weltkrieg beseitigt worden.

Für die auf solchen Flächen wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betriebe ergeben sich vielfältige Probleme. Zusätzlich zur Schwermetallbelastung sowie zum Minder- und Mangelsertrag des Erntegutes haben sie vor allem Nachteile durch die nicht mehr realen Ackerzahlen. Dabei haben die grundsteuerlichen Belastungen für die Agrarbetriebe jedoch heute eher eine untergeordnete Bedeutung. Gravierender ist die Tatsache, dass die vom Finanzamt festgelegten Ackerzahlen als Maß der Bewertung bei Pacht und Kauf solcher Flächen eine bedeutende Rolle spielen.

In fiskalischer Hinsicht sind durch die gewonnenen Erkenntnisse deshalb Schlussfolgerungen zu ziehen, d. h. diese Standorte sind in einer Nachschätzung des Finanzamtes neu zu bewerten. Die Zwischenergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden dem zuständigen Finanzamt bereits in der Erarbeitungsphase zugänglich gemacht, um künftige Nachschätzungen in Kenntnis der Vergrabungs- und Exhumierungsprozesse objektiv durchführen zu können. Gemeinsam mit der Oberfinanzdirektion Magdeburg sind 1999 dazu zunächst drei Leitprofile für unterschiedliche Vergrabungsstandorttypen aufgenommen worden. Es handelt sich dabei um je ein Leitprofil in der Benndorfer Flur und der Ahlsdorfer Flur.

In der aktuellen Bodenschätzung sind diese Standorte stellvertretend für zahlreiche ähnliche Schadstandorte, deren Haldenmaterial im Ap- und im technogenen Horizont schon sehr stark verwittert ist, bisher nur sehr sporadisch berücksichtigt.

Der dritte Standort befindet sich in der Hergisdorfer Flur und repräsentiert aufgrund des groben Materials des technogenen Horizontes und der geringeren Bodeneinmischungen eine jüngere Vergrabung von Schiefermaterial (nach 1900). Er gehört zu den wenigen Standorten von vergrabenen Halden, die in der Reichsbodenschätzung mit Abschlägen als Verwitterungsstandort sL 4 V mit Ackerzahlen von 56 gegenüber 71 (in der Umgebung) bereits berücksichtigt worden sind (Abb. 55).

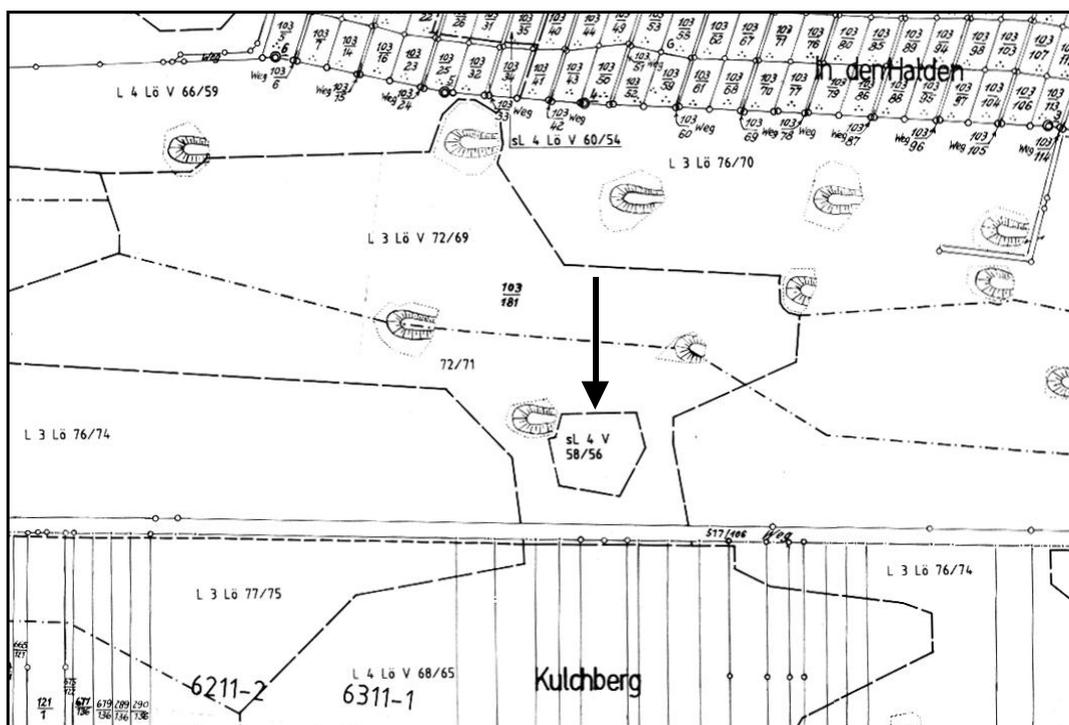


Abb. 55: Ausschnitt aus der aktuellen Flurkarte Flur 2 Hergisdorf mit Angaben zur Bodenschätzung

Um im Rahmen einer Nachschätzung alle diese Standorte in der Region Eisleben-Hettstedt optimal bewerten zu können, sind weitere wissenschaftliche Untersuchungen wie z. B. Luftbildauswertungen, Bodenuntersuchungen, vor allem aber Ertragsmessungen, nötig. Im Rahmen dieser Neubewertung sind Extremstandorte ohne Wachstum als Unland oder Ödland und andere Standorte durch Abschläge von der Ackerzahl auszuweisen. Wichtig ist außerdem, die flächenhafte Dimension der beschriebenen Erscheinungen auch auf der Flurstücksebene zu erfassen. Die Erkenntnisse über die mangelnde Aktualität der Ackerzahlen könnte auch für andere alte Bergbauggebiete, z. B. in Thüringen, Konsequenzen haben. Neue Ergebnisse erzielte in diesem Zusammenhang HERBERG (2001), der in seiner Diplomarbeit, aufbauend auf Erkenntnissen von OERTEL (1998) und OERTEL et FRÜHAUF (1999), in Zusammenarbeit mit dem Finanzamt der Lutherstadt Eisleben bereits erhebliche Veränderungen der Erträge auf solchen Standorten nachwies.

### 7.3 Ermittlung der aktuellen Erträge im UG 1 auf Ackerflächen bei Benndorf sowie Lösungsvorschläge für eine Neubewertung der Bodenstandorte

Im Untersuchungsgebiet Benndorf von HERBERG (2001), das dem Zentrum des Bearbeitungsgebietes Benndorf der vorliegenden Arbeit in Karte 8 entspricht, bildete im Jahre 2000 Winterweizen den Nutzpflanzenbestand. 1950 lag der Durchschnittsertrag auf diesen Flächen noch bei 30 dt/ha. Die von HERBERG (2001) ermittelten aktuellen Durchschnittserträge liegen auf den unbeeinflussten Ackerbereichen für den Winterweizen, mit mittleren Wuchshöhen zwischen 85 cm und 95 cm und einer Vegetationsdichte von 550-650 Pflanzen pro m<sup>2</sup>, bei 90 dt/ha (Tab. 24).

Tab. 24: Standortsspezifische Ertragsmittelwerte des Winterweizens in durch Haldenmaterial unbeeinflussten Ackerbereichen (Quelle: HERBERG 2001)

Bodenklassen	Bodenzahl / Ackerzahl	Ertrag (dt/ha)	mittlere Wuchshöhe (cm)	mittlere Pflanzenanzahl je m <sup>2</sup>
L2L6	85 / 83	96	95	668
L3L6	77 / 68	94	95	642
L4L6	69 / 59	93	90	590
L4V	57 / 50	90	85	544

Auf den Schadflächen (Bereiche vergrabener Halden) sind ausdünnte Bestände, kümmerwuchs und daraus resultierende Mindererträge charakteristisch (HERBERG 2001).

**Tab. 25: Standortsspezifische Ertragsmittelwerte und Flächenanteile in beeinflussten Ackerbereichen (Quelle: HERBERG 2001)**

Ertragsgruppe (dt/ha)	Anzahl der Flächen	Anteil an den Schadflächen	mittlere Wuchshöhe (cm)	mittlere Pflanzenanzahl je m <sup>2</sup>
<30	3	4,7%	30	283
30 – 40	5	8,0%	49	295
>40 – 50	6	8,5%	54	355
>50 – 60	11	21,3%	56	395
>60 – 70	12	15,9%	62	356
>70-80	13	24,2%	63	406
>80	8	17,4%	68	410

Geringere Ährengrößen und Kornmassen sowie eine kleinere Kornanzahl je Ähre sind außerdem symptomatisch für die Schadflächen. Die Ergebnisse der Bodenschätzung charakterisieren den Wert der Böden, der maßgeblich die Bodenpreise bestimmt. Im Bezug auf Pachtverträge zieht eine Neubewertung der Ackerzahlen auf geschädigten Bodenbereichen enorme Preisunterschiede nach sich. Aus Datenschutzgründen trifft HERBERG (2001) keine speziellen Aussagen für die Ackerflächen in seinen Untersuchungsgebieten, sondern lediglich modellhafte Aussagen: „In Sachsen-Anhalt beträgt der durchschnittliche Pachtpreis ca. 6,00 DM je Bodenpunkt pro Hektar und Jahr. Die Bodenpunkte beziehen sich dabei auf die Ackerzahlen. Berechnet man nun die Pacht für die Untersuchungsgebiete in Bezug zu den Flächenanteilen der einzelnen Bodenklassen, so ergibt sich folgendes“ (HERBERG 2001, S. 81).

**Tab. 26: Pachtdifferenzen infolge Neubewertung der Böden (HERBERG 2001)**

	Untersuchungsfläche Benndorf (21 ha)	Untersuchungsfläche Großbörner (11 ha)
Pacht alt:	7823,00 DM/a	4861,00 DM/a
Pacht neu:	6737,00 DM/a	4251,00 DM/a
Differenz:	<b>1086,00 DM/a</b>	<b>610,00 DM/a</b>

Diese Berechnungen verdeutlichen, dass schon für relativ kleine Ackerflächen erhebliche Differenzen in der Bestimmung des Pachtpreises bestehen. Da die Neubewertungen ein den tatsächlichen Ertragspotentialen entsprechendes Pachtergebnis widerspiegeln, wird deutlich, dass in der Vergangenheit auf solchen geschädigten Ackerflächen ein oft zu hoher Pachtpreis gezahlt wurde. Abschließend unterscheidet HERBERG (2001) drei verschiedene Belastungsklassen, für die er neue Ackerzahlen bestimmt (Tab. 27).

**Tab. 27: Kennzeichnung und Bewertung der Schadensklassen (HERBERG 2001)**

	Belastungsklasse A	Belastungsklasse B	Belastungsklasse C
<b>Profilvarianten:</b>	A	B	C
<b>Durchschnittsertrag: (dt/ha)</b>			
Winterweizen	85 – 60	< 60 – 40	< 40
Durumweizen	60 – 45	< 45 – 30	< 30
<b>Bodenzahl: (nach Verwitterungsstandorten)</b>	64 – 56	55 – 47	46 – 39
<b>Rohrertragszahlen:</b>			
Winterweizen	66 – 46	45 – 31	< 31
Durumweizen	64 – 48	47 – 32	< 32
<b>Schadflächen- und (Gesamtflächenanteile) in Benndorf (%)</b>	57,8 (14,8)	29,7 (7,7)	12,5 (3,2)
<b>Schadflächen- und (Gesamtflächenanteile) in Großbörner (%)</b>	25,9 (5,3)	62,8 (12,9)	11,3 (2,3)
<b>Ackerzahlen:</b>	65 – 47	46 – 31	< 31

Da die neu ermittelten Ackerzahlen enorm von den geltenden abweichen, müssen im Zuge einer Nachschätzung die vom mittelalterlichen Bergbau überprägten Ackerflächen neu beurteilt werden. Eine Bewertung von Einzelschadflächen erweist sich diesbezüglich als ungeeignet, da durch den 50-m-Gitternetzbezug der Geländebegehungen nur zufällig Haldenvergrabungen angetroffen werden (HERBERG 2001).

Eine Einzelfallanalyse jedes Schadstandortes, die mit einem erheblichen Aufwand von Befliegungen, Interpretationen von Luftbildern sowie zahlreiche Geländeuntersuchungen unternommen werden müsste, ist nach den bisherigen Erkenntnissen von HERBERG (2001) und OERTEL (1998) nicht sinnvoll.

„Eine großflächige Bewertung erscheint daher sinnvoll. In Absprache mit dem Finanzamt Eisleben und der Oberfinanzdirektion Magdeburg erfolgt auf geschädigten Ackerbereichen die Ausweisung von Sonderflächen. Diese sollen großflächig die Bereiche mit Haldenvergrabungen kennzeichnen. Für diese wurden von der Oberfinanzdirektion Magdeburg anhand der Ertrags- und Analyseergebnisse prozentuale Abrechnungswerte (Tab. 28) bestimmt.“ (HERBERG 2001, S. 78)

**Tab. 28: Abrechnungen von der Bodenzahl je Schadensklasse (OBERFINANZDIREKTION MAGDEBURG 2001)**

Schadensklasse	Abrechnungen von der Bodenzahl
A	5 – 10 %
B	20 – 30 %
C	30 – 40 %

Der Hauptanteil der einzelnen Schadensflächen bestimmt dabei die Zuordnung der Schadensklassen. Unterstützend wirken dabei der Schiefergehalt im Ap-Horizont, die Ausprägung von Vergrabungsstrukturen aber auch Aussagen der Landwirte über die Ertragssituation betroffener Bereiche (HERBERG 2001).

## 8 Anforderungen des Bundesbodenschutzgesetzes sowie Vorschläge für künftige standortgerechte Bodennutzungen

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass nicht der Ausstrich des Kupferschieferflözes, sondern das Vergraben und Verschleppen von Haldenmaterial die Hauptursache der gravierenden Boden- und Pflanzenbelastungen im Untersuchungsgebiet darstellen. Dies wurde in bisherigen Gutachten übersehen (z. B. in der ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. (1991) oder nur am Rande erwähnt (z. B. bei IPE JENA 1991). Vor allem aber wurde das flächenhafte Ausmaß dieser Phänomene in der Vergangenheit nicht erkannt. Hieraus ergeben sich Probleme für die landwirtschaftliche Nutzung und ein nicht unerhebliches Gefährdungspotential für die Nahrungskette bis hin zum Menschen. Maßnahmen oder Empfehlungen zur Problemreduzierung sind zwar dringend geboten, erscheinen jedoch praktisch nur schwer umsetzbar, da sie aus naturräumlichen und ökonomischen Gründen nur unzureichende Alternativen zur bisherigen Produktion darstellen. Nach OERTEL et FRÜHAUF (2000) wäre die schrittweise Herausnahme der Standorte mit einem besonders hohen Anteil an Vergrabungsstrukturen aus der Ackernutzung eine Möglichkeit zur Problemlösung.

Der Fortschritt in Wissenschaft und Technik sowie das steigende Bewusstsein für die Schutzbedürftigkeit der menschlichen Lebensgrundlagen haben dazu geführt, dass 1998 das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen (BBODSCHG) in Kraft gesetzt wurde. Diese Änderung gesellschaftlicher Normen führt aber unweigerlich zu konkreten wirtschaftlichen Auswirkungen für die Nutzer des Bodens. So ist zum Beispiel zu vermuten, dass die vergrabenen bzw. gekappten Halden des Kupferschieferbergbaus heute schädliche Bodenveränderungen im Sinne des § 2 BBODSCHG (1998) bewirken. Ob und in welchem Umfang dies zutrifft, wäre nach der Durchführungsverordnung zum BBODSCHG (1998) im Einzelfall durch orientierende Untersuchungen zu klären. Nach § 4 BBODSCHG (1998) ergeben sich aus dem Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung Sanierungspflichten für den Verursacher, dessen Rechtsnachfolger, den Eigentümer und den Besitzer des betroffenen Grundstückes. Für die Erfüllung solcher Sanierungspflichten wird ein hoher Aufwand notwendig sein. Da im Falle der vergrabenen Halden die Verursacher oder deren Rechtsnachfolger in den seltensten Fällen ausfindig gemacht werden können, trafe eine eventuelle Sanierungsverpflichtung die Eigentümer und Besitzer der Grundstücke. Hieraus könnten sich betriebswirtschaftliche Probleme vor allem für landwirtschaftliche Betriebe ergeben. Sollten Sanierungsmaßnahmen nicht möglich oder nicht zumutbar sein, kommen auch Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen in Betracht (vorstellbar sind hier zum Beispiel Anbau- oder Vermarktungsbeschränkungen). Auch diese treffen vor allem die landwirtschaftlichen Betriebe. Unter diesem Gesichtspunkt sollte auf Ebene der Verwaltung und der Politik darüber nachgedacht werden, ob und wie die Folgekosten von schädlichen Bodenveränderungen teilweise von der Allgemeinheit übernommen werden könnten. Zwischen den zuständigen Behörden und den betroffenen Eigentümern und Landwirtschaftsbetrieben muss deshalb diskutiert werden, durch welche Maßnahmen wirtschaftliche Nachteile sinnvoll ausgeglichen werden können. Sofern dabei die nachfolgend beispielhaft genannten betriebstechnologischen Maßnahmen nicht zu einer ausreichenden Entlastung der Landwirtschaftsbetriebe führen, sollten letztendlich auch staatliche Transferleistungen in Betracht gezogen werden. Denkbar wäre zum Beispiel, die belasteten Standorte der landwirtschaftlichen Nutzung zu entziehen. Dafür käme zum Beispiel die Umwidmung zu Gewerbe- oder Industriegebieten oder die Versiegelung im Zuge der Errichtung neuer Verkehrsinfrastrukturen in Betracht. Das ist jedoch kaum zu erwarten, da für diese Nutzungen kein größerer Bedarf besteht, andererseits die Landwirtschaftsbetriebe aber an der Weiternutzung der Flächen interessiert sind. Außerdem ist die Bebaubarkeit der Standorte aufgrund der Siedlungsstruktur, der Baugrundverhältnisse und der Morphologie größtenteils eingeschränkt. Das Aufforsten dieser Standorte stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Flächen aus der landwirtschaftlichen Nutzung zu nehmen. Eine extensivere Form der agrarischen Nutzung, zumindest bei der Bodenbearbeitung (pflügen, grubbern, eggen), sollte ab sofort für die mit vergrabenen bzw. gekappten Kleinsthalden belasteten Flächen ins Auge gefasst werden. Vorteile einer pfluglosen Bodenbearbeitung sind die Reduzierung der Bearbeitungskosten, die Erhöhung der Stabilität und der Tragfä-

higkeit des Bodens, die Rückbildung geringer und mittlerer Strukturschäden durch höhere biologische Aktivität und die Gewährleistung eines wirksamen Erosionsschutzes durch Akkumulation von Ernterückständen an der Bodenoberfläche. Als Nachteile gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug erweisen sich jedoch der erheblich schlechtere Wirkungsgrad in der mechanischen Unkrautbekämpfung, der höhere Dichtlagerungsgrad des Oberbodens, verbunden mit schlechterer Erwärmbarkeit im Frühjahr und Luftmangelerscheinungen bei hohen Niederschlägen sowie eine nicht mehr gewährleistete ausreichende Funktionsfähigkeit auf verdichteten und/oder vernässten Böden und Standorten mit geringer Gefügestabilität (WERNER et al. 1999).

In den Bereichen um die Hüttenstandorte, die maßgeblich durch erhöhte, d. h. grenzwerttangierende bzw. überschreitende Schwermetallbelastungen der obersten Bodenhorizonte gekennzeichnet sind, könnten demgegenüber das Tiefpflügen von Ackerflächen bzw. das Umbrechen von Grünlandstandorten sinnvolle Maßnahmen darstellen, um die Schadstoffe auf einen größeren Bodenbereich zu verteilen und somit eine Verminderung der Schadstoffkonzentrationen je kg Boden zu erreichen. In geringem Umfang könnte sich die Belastung dieser Standorte auch durch gezielten Anbau schwermetallakkumulierender Pflanzen langfristig sukzessive reduzieren lassen. Dabei ist zu beachten, dass diese Pflanzen nicht in die Nahrungskette gelangen. Für weniger stark belastete Flächen (sowohl vergrabene Halden als auch Hüttenstandorte) ist die Nutzung als Futtergetreideflächen und Grünlandstandorte und damit eine Herauslösung aus der direkten Nahrungskette des Menschen eine Alternative. Auch die Vermehrung von Kulturpflanzen, insbesondere aber der Anbau nachwachsender Rohstoffe, sind Möglichkeiten einer Agrarproduktion außerhalb der Nahrungsketten (Raps-Biodiesel, Faserpflanzen-Zellulose/Brennstoff). Mehrjährige Pflanzen sind zu bevorzugen, da sie meist über große Wurzelsysteme verfügen und die Vergrabungsstrukturen umwachsen können. Es sollte natürlich auch geprüft werden, ob ein Aufbringen von unbelastetem oder kaum kontaminiertem Mutterbodenmaterial ebenfalls zu einer Problemreduzierung beitragen kann. Die vollständige bzw. teilweise Sanierung von Vergrabungsstandorten durch Austausch der kontaminierten Bodenhorizonte mit unbelastetem Material ist aufgrund der Vielzahl der Standorte sicherlich die aufwendigste Variante.

In Zukunft werden bei der sich abzeichnenden Marktlage (Agrarüberproduktion in den Industriestaaten) landwirtschaftliche Produkte von stark mit Schwermetallen belasteten Flächen nur sehr schwer vermarktable sein. Zur Zeit funktioniert der Verkauf von Agrarerzeugnissen von diesen Flächen nur deshalb unproblematisch, da sowohl in den landwirtschaftlichen Betrieben, als auch beim Agrarhandel, eine Vermischung mit anderen Partien und damit eine Verdünnung stattfindet. Für eine Produktion schadstofffreier ökologisch erzeugter Nahrungs- und Futtermittel sind die durch vergrabene Halden und Hütten stark belasteten Standorte ungeeignet.

Es sollte insgesamt darauf geachtet werden, dass die Böden ein schwach alkalisches Milieu haben, da auf sauren Böden die Schwermetallaufnahme der Pflanzen relativ hoch ist. Um Austräge besonders von leicht pflanzenverfügbaren und leicht im Boden verlagerbaren Schwermetallen wie Cd, Hg, Zn zu vermindern, sind regelmäßige Kalkungen (alle vier Jahre) auf diesen Standorten vorzunehmen. Eine Verschneidung von Erntegut mit Produkten aus unbelasteten Regionen kann ebenso als Maßnahme zur Reduzierung des Belastungsrisikos beitragen. Auch der Anbau von Sorten, die vergleichsweise wenig Schwermetalle akkumulieren, dient der Problemlösung.

In jedem Fall sind allen auf diesen Flächen wirtschaftenden Agrarbetrieben die gewonnenen geoökologischen und geochemischen Informationen über die Schadphänomene der Böden und Kulturpflanzen schnell zugänglich zu machen. Dadurch werden die Betriebe in ihren Bemühungen unterstützt, den gesetzlichen Vorgaben zu entsprechen und sich den Standort- und Marktbedingungen anzupassen. Somit kann die Wettbewerbsfähigkeit der Betriebe erhalten und eine zukunftsbeständige Landbewirtschaftung bzw. Landschaftspflege unterstützt werden.

## 9 Zusammenfassung

Bisherige Publikationen über das Mansfelder Land gingen von einer allgemein typisch höheren Schwermetallbelastung im Bereich des Kupferschieferausstrichs aus. Teilweise wurden sogar stark erhöhte Schwermetallkonzentrationen im Boden auf das ausstreichende Flöz zurückgeführt.

Aus den Untersuchungsergebnissen wird jedoch deutlich, dass der überwiegende Teil der Boden- und Pflanzenbelastungen am Kupferschieferausstrich und im Umfeld der Kleinhaldenfelder nicht durch das natürlich zu Tage tretende Flöz verursacht wird. Der natürliche Kupferschieferausstrich am Westrand der Mansfelder Mulde, der fast vollständig mit einer hochweichselzeitlichen Lößauflage überdeckt ist, besitzt aufgrund seiner geringen räumlichen Fläche nur eine relativ untergeordnete Bedeutung für Schwermetallbelastungen von Bodenstandorten, insbesondere von Oberböden.

Im Verlauf der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit konnten durch Luftbildauswertungen, historische Kartenrecherchen sowie Gelände- und Laboranalysen im Bereich zwischen dem natürlichen Kupferschieferausstrich und der Kleinhaldenlandschaft neue Erkenntnisse über Standorte von anthropogen verlagertem Schiefermaterial (Haldenvergrabungen) als wesentliche Quelle der hohen Schwermetallbelastungen in den Böden und Pflanzen gewonnen werden.

Die in der Studie der Arge TÜV Bayern - L.U.B. (1991) gemachten Aussagen hinsichtlich des bedeutenden Einflusses der geogenen Schwermetallquellen auf die Bodenbelastung im Untersuchungsgebiet sind dahingehend zu präzisieren, dass der anthropogenen Komponente bezüglich der Verbreitung und Erhöhung der Verfügbarkeit von schwermetallhaltigem Gesteinsmaterial, z. B. durch Bodenbearbeitung, ein höherer Stellenwert einzuräumen ist.

Die am Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts durchgeführten Vergrabungen von zumeist mittelalterlichen Klein- und Kleinsthalden auf Ackerflächen haben in den Untersuchungsgebieten zahlreiche Bodenbereiche im Untergrund mit schwermetallhaltigem, struktur- und gefügezerstörendem Material stark belastet. Bodenbearbeitung und Erosion führten später zur Nivellierung der Aufwölbungen aus Oberbodenmaterial, die über den Vergrabungen aufgeschüttet waren.

In Verbindung mit tieferer und intensiver Bodenbearbeitung sowie Bodenerosion als Folge der Großflächenbewirtschaftung kam es im Bereich der Vergrabungen zur zunehmenden Integration von Schieferbruchstücken in den Hauptwurzelhorizont der Pflanzen. Die eingemischten Schieferelemente unterliegen im Oberboden verstärkt der Verwitterung, die zur vermehrten Freisetzung von Schwermetallen führt, deren toxische Wirkung sich überwiegend im Wurzelbereich der Pflanzen nachweisen lässt. Weiterhin bewirken sie einen sehr ungünstigen Wasserhaushalt durch Trockenfallen der über den wasserdurchlässigen Schichten künstlich aufgetragenen Bodenhorizonte und durch die Einschränkung bzw. den Ausfall der Kapillarkräfte im Unterboden. Darüber hinaus stellt das Haldenmaterial, aufgrund seines zum Teil geringen Feinbodenanteils, eine nährstoffarme, mechanische Barriere dar, die für die Pflanzen nur eine limitierte Möglichkeit zur Durchwurzelung erlaubt. So kommt es zu Vegetationsschädigungen, Ertragsausfällen und teilweise zu Kontaminationen des Erntegutes. Hieraus ergeben sich Probleme für die landwirtschaftliche Nutzung und ein nicht unerhebliches Gefährdungspotential für die Nahrungskette bis hin zum Menschen.

Im Laufe der Zeit wurden die Schieferelemente auch über den Bereich der Vergrabung hinaus verschleppt, so dass Haldenvergrabungen mittlerweile als raumbedeutsame Bodenflächenschädigung in den Untersuchungsgebieten einzustufen sind. Es ist davon auszugehen, dass die Schädigung infolge Erosionswirkung, Verschleppung und Verwitterung des Schiefermaterials sogar noch zunehmen wird. Deshalb sollten diese Prozesse künftig noch mehr Beachtung finden, um standortgerechte Maßnahmen zum Bodenschutz einzuleiten.

Sowohl anthropogene Quellen als auch geogene Quellen, die einem unterschiedlichen Grad anthropogener Beeinflussung ausgesetzt sein können, verursachen schädliche Bodenveränderungen in den Untersuchungsgebieten. Bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle aus geogenen und anthropogenen Quellen wurde festgestellt, dass die Mobilisierbarkeit der atmogen aus den Kupferhütten im Mansfelder Land emittierten und danach in die Oberböden eingetragenen Schwermetalle wesentlich höher ist als die der zumeist in sulfidischer Bindung vorliegenden Schwermetalle des Schiefermaterials. Allerdings liegen die Schwermetallgehalte der Böden, die stark mit Schiefermaterial durchsetzt sind, meist über denen, die sich in den Oberböden im Umfeld der Hütten analysieren lassen.

Die Beprobungen von Schiefermaterial zahlreicher Klein- und Kleinsthalden in früheren Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Standorte von vergrabener Haldenmaterial zuzüglich der Beprobungsstandorte von HERBERG (2001) lassen erste Erkenntnisse bezüglich Größenordnungen von Konzentrationen ausgewählter Schwermetalle zu.

Eine endgültige exakte Bestimmung zur qualitativen und quantitativen Schwermetallbelastung der verschiedenen Schwermetallquellen für die Böden (so auch der vergrabenen Halden) im Rahmen einer Gesamtbilanzierung wird u. a. durch die am Kupferschieferausstrich festgestellten unterschiedlichen Metallspektren und -häufigkeiten der einzelnen Faziesbereiche sowie der schwer erfassbaren räumlichen Verbreitung der gesamten historischen Bergbauaktivitäten nicht möglich sein.

Dennoch sollten weitere Beobachtungen und Beprobungen der bereits erfassten Vergrabungsflächen erfolgen, um somit die räumliche Ausbreitung der Schadphänomene durch bodenerosionsbedingte und bearbeitungsbedingte Schwermetallemissionen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen im gesamten ehemaligen Bergbauggebiet prognostizieren zu können.

Für eine umfassende geökologische Umweltanalyse ergeben sich aus diesem Kenntnisstand u. a. weitergehende Aufgabenstellungen:

1. Umfangreiche kartographische Erfassung aller ehemaligen Haldenstandorte auf der Basis der im Katasteramt vorliegenden Ur-Flur-Karten im Maßstab 1:2000 und Abgleich mit den Vegetationsschadensbereichen im Bereich zwischen dem Kupferschieferausstrich und der Zone der Flachhalden auf der Basis einer aktuellen großmaßstäbigen Luftbild- oder Scannerbefliegung
2. Flächenhafte Erfassung aller Ertragsausfälle (in Qualität und Quantität) bzw. Ertragsdepressionen durch die Landwirtschaft mit Hilfe des Einsatzes von GPS-Systemen
3. Einrichtung eines der Problematik entsprechenden Umwelt-Monitoring durch die zuständigen Behörden
4. Erarbeitung von Lösungsvorschlägen, wie Erntegüter der Agrarbetriebe in ausreichenden Abständen zuverlässig auf Schadstoffe kontrolliert werden können

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Belastungen im Raum Eisleben-Hettstedt sehr stark differieren und alle Maßnahmen standortgerecht darauf ausgerichtet sein müssen. Zur Zeit ist noch keine flächenhafte Beeinträchtigung der Nahrungsmittelproduktion durch Schwermetalle in den Böden der Untersuchungsgebiete im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Bereich gegeben. Die Schäden am Boden sind jedoch zum Teil massiv und irreversibel, so dass die Umsetzung der Bundesbodenschutzverordnung im Rahmen des Bundesbodenschutzgesetzes dem Rechnung tragen muss. Partielle Stilllegungen von Flächen sind in den Untersuchungsgebieten ökologisch wie ökonomisch unvermeidlich. Der Staat und besonders die Region sind in diese Verantwortung mit einzubeziehen.

## 10 Literaturverzeichnis

**AGRICOLA, G. (1980):** Vom Berg und Hüttenwesen. Ausgabe nach dem Original von 1556, Düsseldorf.

**ALEF, K. (1994):** Biologische Bodensanierung. VCH, Weinheim.

**ALLOWAY, B. J. (1999):** Vorgänge in Böden und das Verhalten von Schwermetallen. In: Schwermetalle in Böden. Berlin, Heidelberg, S. 11-40.

**ALLOWAY, B. J. et AYRES, D. C. (1996):** Schadstoffe in der Umwelt. Spektrum Verlag, Heidelberg, Berlin.

**ALTERMANN, M., FELDMANN, R., STEININGER, M. (1997):** Schwermetallgehalte der Böden im Mitteldeutschen Ballungsraum – ein Überblick. UFZ-Bericht 15/1997. UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Leipzig.

**ALTERMANN, M., KÜHN, D., FUCHS, M., JÄHNERT, R. (1995):** Auswertung und kartografische Umsetzung von Feldaufnahmen und Bodenanalysen des Kreises Querfurt. unveröff. Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

**ANDREAE, H. (1994):** Schwermetalle in Böden der Sößemulde. In: Matschullat, J., Heinrichs, H., Schneider, J., Ulrich, B. [Hrsg.]: Gefahr für Ökosysteme und Wasserqualität. Ergebnisse interdisziplinärer Forschung im Harz. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

**ARGE TÜV BAYERN - L. U. B. (1991):** Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Umweltsanierung des Großraumes Mansfeld“. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit von der Arbeitsgemeinschaft TÜV Bayern - L.U.B. Lurgi-Umwelt-Beteiligungsgesellschaft, Eisleben.

**BAXMANN, M. (1996):** Die Modernisierung des Niederlausitzer Braunkohlenbergbaus und ihre Folgen. In: Bergbau und Umweltgeschichte in Mitteldeutschland. Sammelband zum Kolloquium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am 07.03.1996, S. 27-36.

**BENNETT, M. R. et DOYLE, P. (1999):** Environmental geology: geology and the human environment. John Wiley and Sons Ltd., Chichester.

**BERGMANN, H. (2001):** Pflanzen mögen Schwermetalle nicht - Stress-Stoffwechsel bei Weizen und Gerste untersucht. In: Schlaglichter 2001, S. 18. aus Amino Acids. Springer, Wien, 1998-.

**BEUGE, P. et SCHULZE, H. (1976):** Geochemisch bedingte Umweltbeeinflussung durch Quecksilber und Fluor. In: Autorenkollektiv: Spurenelemente im Wirkungsbereich Industrie - Biosphäre: Vorträge zum Berg- und Hüttenmännischen Tag 1975 in Freiberg. In: Freiburger Forschungshefte, Leipzig, S. 157-164.

**BLIEFERT, C. (1994):** Umweltchemie. Weinheim.

**BLUME, H.-P. (1992):** Handbuch des Bodenschutzes. Ecomed, Landsberg/Lech.

**BLUME, H.-P. (1994):** Böden in Ballungsräumen. In: Kreysa, G. et Wiesner, J. [Hrsg.] 1994: Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium. DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt/Main, S. 33-58.

**BODE, G. (1996):** Ausgrabungen im Kupferschieferaltbergbau am Nordrand der Sangerhäuser Mulde. In: Landesheimatbund Sachsen-Anhalt e.V./Verein Mansfelder Bergarbeiter Sangerhausen e.V. [Hrsg.]: Stu-

dien zum Altbergbau in der Sangerhäuser Mulde. Beiträge zur Regional- und Landeskultur Sachsen-Anhalts. H. 2, Druck-Zuck, Halle, S. 5-17.

**BREDER, R. (1994):** Probenahme und Analytik schwermetallbelasteter Böden. In: Kreysa, G. et Wiesner, J. [Hrsg.] 1994: Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium. DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt/Main, S. 105-180.

**BROOKS, R. R., CHIARUCCI, A., JAFFRÉ, T. (1998):** Revegetation and Stabilisation of Mine Dumps and other Degraded Terrain. In: Brooks, R.R.: Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining. CAB International. Oxon, New York.

**BRÜMMER, G., GERTH, J., HERMS, U. (1986):** Heavy metal species and availability in soils. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **149**, S. 382-396.

**BUCHWALD, K. et ENGELHARDT, W. [HRSG.] (1999):** Umweltschutz – Grundlagen und Praxis. Schutz des Bodens. Bd. 4, Economica Verlag, Bonn.

**BUNDES - BODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG (BBODSCHV) (1999):** BGBl. I S. 1554. Auf Grund der §§ 6, 8 Abs. 1 und 2 und des § 13 Abs. 1 Satz 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502) durch die Bundesregierung verordnet.

**BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (BBODSCHG) (1998):** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Beschluss vom 05.02.1998. In: Holzwarth, F., Radtke, H., Hilger, B. 1998: Bundes-Bodenschutzgesetz: Handkommentar. Bodenschutz und Altlasten. Bd. 5. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

**CÖSTER, D. (1993):** Ermittlung und Bewertung von Schwermetallgehalten ackerbaulich genutzter Böden in der Umgebung von Bergbauhalden des ehemaligen Mansfelder Kupferschieferbergbaus. Univ. Halle, Diplomarbeit.

**CÖSTER, D. et FRÜHAUF, M. (1998):** Untersuchungen zu Bodenkontaminationen durch äolischen Schwermetallaustrag aus Großhalden des Mansfelder Kupferschieferbergbaus. In: Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften Bd. 20, Halle, S. 65-75.

**DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E. V. (DVWK) (1988):** Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen. Teil 1: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. Hamburg, Berlin.

**EIGENDORF, E. (1982):** Die geschichtliche Entwicklung: historischer Mansfelder Kupferschieferbergbau. In: Neuß, E. et Zühlke, D.: Mansfelder Land – Werte unserer Heimat. Bd. 38, Akademie Verlag, Berlin, S. 29-31.

**EIKMANN, T. (1994):** Aufnahme von Arsen, Blei und Cadmium durch den Menschen in Ballungsräumen mit direkter und indirekter Beteiligung des Bodens. In: Kreysa, G. et Wiesner, J. [Hrsg.] 1994: Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium. DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt/Main, S. 277-298.

**EIKMANN, T. et KLOKE, A. (1993):** Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-) Stoffe in Böden. In: Rosenkranz, D. et al. [Hrsg.]: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin, Losebl.-Ausg., Kennz. 9305, S. 1-7.

- EISENHUTH, K.-H. et KAUTSCH, E. (1954):** Handbuch für den Kupferschieferbergbau. Fachbuchverlag, Leipzig.
- ERNST, W. H. O. (1983):** Ökologische Anpassungsstrategien an Bodenfaktoren. Ber. Delagutsch. Bot. Ges., **96**, S. 49-71.
- FELDHAUS, D., SCHRÖDTER, M., GUTTECK, U. (1996):** Hintergrundwerte für Schwermetalle in Böden des Landes Sachsen-Anhalt. Mitt. Geol. Sachsen-Anhalt **2**, Halle, Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt, S. 205-211.
- FENT, K. (1998):** Ökotoxikologie. Thieme Verlag, Stuttgart.
- FIEDLER, H. J. (1990):** Bodennutzung und Bodenschutz. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- FIEDLER, H. J. et RÖSLER, H. J. (1987):** Spurenelemente in Böden. In: Spurenelemente in der Umwelt, Jena 1987, S. 7-14 u. S. 65-78.
- FILIPINSKI, M. et GRUPE, M. (1990):** Verteilungsmuster lithogener, pedogener und anthropogener Schwermetalle in Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. **153**, S. 69-73.
- FILIPINSKI, M. et al. (1991):** Mobilität geogener und anthropogener Schwermetalle. In: Rosenkranz, D. et al. [Hrsg.]: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin, Losebl.-Ausg., Bd. 1, Kennz. 1530, S. 37-58.
- FLEIGE, H. et HINDEL, R. (1991):** Geogene Grundgehalte von Schwermetallen in Böden. In: Rosenkranz, D. et al. [Hrsg.]: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin, Losebl.-Ausg., Bd. 1, Kennz. 1530, S. 6-37.
- FREDE, H.-G., BACH, M. (1996):** Landschaftsstoffhaushalt. In: Blume, H.-P. 1996: Handbuch der Bodenkunde. Losebl.-Ausg. 4.4.2. Ecomed, Landsberg. S. 8.
- FRIELINGHAUS, M., BEESE, F., ELLERBROCK, R., MÜLLER, L., ROGASIK, H. (1999a):** Risiken der Bodennutzung und Indikation von schädlichen Bodenveränderungen in der Gegenwart. In: Buchwald, K. et Engelhardt, W. [Hrsg.]: Umweltschutz: Grundlagen und Praxis. Bd. 4. Schutz des Bodens. Economica-Verlag, Bonn.
- FRIELINGHAUS, M., DEUMLICH, D., FUNK, R., SCHÄFER, H., BEESE, F., ELLERBROCK, R., MÜLLER, L., ROGASIK, H. (1999b):** Modelle und Methoden zur Abschätzung der Bodennutzung. In: Buchwald, K. et Engelhardt, W. [Hrsg.]: Umweltschutz: Grundlagen und Praxis. Bd. 4. Schutz des Bodens. Economica-Verlag, Bonn.
- FRIELINGHAUS, M., KOCCMIT, A., RATZKE, U. (1993):** Veränderungen von Bodenprofilen an wasserbeeinflussten Hängen und Auswirkungen auf die Bodenerodibilität im Jungmoränengebiet. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. **72**, S. 1169-1172.
- FRÜHAUF, M. (1992):** Zur Problematik und Methodik der Getrennterfassung geogener und anthropogener Schwermetallgehalte in Böden. In: Geoökodynamik. Band 13. Bensheim, S. 97-120.
- FRÜHAUF, M. (1995):** Landschaftliche Besonderheiten und Umweltprobleme im Mansfelder Land. In: Schriftenreihe der Gesellschaft für Deutschlandforschung. **46**, Berlin, S. 115-141.
- FRÜHAUF, M. (1999):** Das Mansfelder Land - Kontrastraum zwischen landschaftlichen „Highlights“, Umweltbelastung und sozialen sowie wirtschaftlichen Problemen. Hercynia N.F. **32**, S. 161-190.
- FRÜHAUF, M. et SCHMIDT, G. (1997):** Natürliche und anthropogene Schwermetallquellen im ehemaligen Mansfelder Kupferschiefer-Bergbaurevier. In: Entwicklung von Landnutzung und Umweltqualität in Mit-

teldeuschland. Sammelband zur Tagung am 21. und 22. Okt. 1996. Universitätszentrum für Umweltwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, S. 178-199.

**GALONSKA, K. (1997):** Phasenbestand, Gefüge und Spurenelementgehalt sowie Elution von Kupferrohüttenschlacken (Helbra/Eisleben). In: Schreck, P. et Gläßer, W. [Hrsg.] 1997: Reststoffe der Kupferschieferverhüttung. Teil 1: Mansfelder Kupferschlacken. Beiträge zum Workshop am 4. und 5. Dezember 1996 in Bad Lauchstädt. UFZ-Bericht **23/1997**. UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH. Leipzig, S. 31-36.

**GILBERT, G. K. (1971):** Hydraulic mining debris in the Sierra Nevada. United States geological survey professional paper. **105**.

**GOUDIE, A. (1994):** Mensch und Umwelt. Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford.

**GRILL, E. et ZENK, M. H. (1989):** Wie schützen sich Pflanzen vor toxischen Schwermetallen? In: Chemie in unserer Zeit. 23. Jahrgang 1989. Nr. 6. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, S. 193-199.

**GRÜN, M., MACHELETT, B., KRONEMANN, H., LEITERER, M., MARTIN, M.-L. (1993):** Schwermetallbelastung der landwirtschaftlich genutzten Böden in den neuen Bundesländern. unveröff., AUA GmbH, Jena.

**GRUNOW, H. J. (1995):** Industriearchäologische Untersuchungen im Sangerhäuser Revier. In: Zur Geschichte des Mansfelder Kupferschieferbergbaus. Clausthal-Zellerfeld.

**GRYSCHKO, R. et al. (1995):** Schwermetallaufnahme von Gemüsepflanzen auf Schlackeböden. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. **76**, S. 277-280.

**HAASE, G. et al. (1970):** Sedimente und Paläoböden im Lößgebiet. In: Ergänzungsheft Nr. **274** zu Petermanns Geogr. Mitteilungen. Gotha, Leipzig, S. 99-208.

**HADDADIN, J., DAGOT, C., FICK, M. (1995):** Models of Bacterial Leaching. Enzyme Microb. Technol. **17**, S. 290-305.

**HAPKE, H. J. (1984):** Metallbelastungen von Futter- und Lebensmitteln, Akkumulationen in der Nahrungskette. In: Merian, E. [Hrsg.]: Metalle in der Umwelt - Verteilung, Analytik und biologische Relevanz, Weinheim, S. 35-44.

**HARRES, H.-P. (1992):** Schwermetalle in Böden. In: Geoöko-Test, Heft 1. Darmstadt, S. 5-14.

**HARRES, H.-P. (1998):** Schwermetallgehalte in Böden, Pflanzen, Fließgewässern und Sedimenten unterschiedlich belasteter Regionen Südsardiniens. Untersuchungen zur regionalen Differenzierung und zeitlichen Veränderung sowie zur geoökologischen Relevanz von Schwermetallverlagerungen. Habil. Univ. Halle.

**HEINRICH, D. et HERGT, M. (1991):** dtv-Atlas zur Ökologie. München.

**HERBERG, H. (2001):** Historische Bergbauaktivitäten und ihre Auswirkungen auf die Standortqualität und den Ertrag am Westrand der Mansfelder Mulde. Univ. Halle, Diplomarbeit.

**HILDMANN, E. (1996):** Bergbaufolgelandschaften – Zeugen des Braunkohlenbergbaus in Mitteldeutschland. In: Bergbau und Umweltgeschichte in Mitteldeutschland, Sammelband zum Kolloquium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am 07.03.1996, S. 57-62.

**HILLER, D. A. (1997a):** Auswirkungen der Industrialisierung des Ruhrgebietes auf den Boden. In: Deutsches Institut für Fernstudienforschung an der Universität Tübingen [Hrsg.] 1997: Veränderung von Böden durch anthropogene Einflüsse: Ein interdisziplinäres Studienbuch. Springer-Verlag, Berlin.

- HILLER, D. A. (1997b):** Grundsätzliche Möglichkeiten des Umgangs mit den Bodenbelastungen. In: Deutsches Institut für Fernstudienforschung an der Universität Tübingen [Hrsg.] 1997: Veränderung von Böden durch anthropogene Einflüsse: Ein interdisziplinäres Studienbuch. Springer-Verlag, Berlin.
- HODEL, M. (1994):** Untersuchungen zur Festlegung und Mobilisierung der Elemente As, Cd, Ni und Pb an ausgewählten Festhasen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Huminstoffen. Dissertation In: Karlsruher Geochemische Hefte Bd. 5
- HOFFMANN, W. (1925):** Mansfeld. Gedenkschrift zum 725-jährigen Bestehen des Mansfeld-Konzerns. Berlin.
- HOHL, R. [HRSG.] et al. (1981):** Die Entwicklungsgeschichte der Erde. Leipzig.
- INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND ÖKOTOXIKOLOGIE (IPE) (1991):** Untersuchungen zum Schwermetalleintrag in die Nahrungskette im Mansfelder Land. Themenleiter Prof. Dr. M. Grün. Jena. unveröff.
- JANKOWSKI, G. (1995) (BEARB.):** Zur Geschichte des Mansfelder Kupferschieferbergbaus. Clausthal-Zellerfeld.
- JANKOWSKI, G. (1996):** Die Mansfelder Kupferschieferbergbauhalden und ihre Auswirkungen auf die Umwelt. In: Bergbau und Umweltgeschichte in Mitteldeutschland, Sammelband zum Kolloquium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am 07.03.1996, S. 89-94.
- JANKOWSKI, G. (1999):** Der Mansfelder Kupferschieferbergbau von den Anfängen bis zur Freierklärung 1671. In: Landkreis Mansfelder Land [Hrsg.]: 800 Jahre Mansfelder Kupferschieferbergbau und Hüttenwesen. Eine Schrift zum Fest. Eisleben.
- KAPOOR, A., VIRARAGHAVAN, T., HANSON, A. T., SAMANI, Z. (1995):** Remediation of Chromium-Containing Soils by Heap Leaching: Column Study. J. Environ. Eng. **121**, S. 366-367.
- KERNDORF, H. et SCHNITZER, M. (1980):** Sorption of metals on humid acids. Geochim. Cosmochim. Acta **44**, 1701-1708.
- KLETTE, W. (1996):** Die Kupferproduktion im Mansfelder Land und ihre Auswirkungen auf die Umwelt. In: Bergbau und Umweltgeschichte in Mitteldeutschland, Sammelband zum Kolloquium an der Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg am 07.03.1996, S. 95-110.
- KLINGER, D. (1996):** Halden des Altbergbaus im Mansfelder Land als Schwermetallemitter. Dipl.-Arb. Inst. f. Geografie. Univ. Halle.
- KLOKE, A. (1993):** Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden In: Rosenkranz, D. et al. [Hrsg.]: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin, Losebl.-Ausg., Bd. 3 Kennz. 9300. S. 1-3.
- KNITZSCHKE, G. (1995):** Metall- und Produktionsbilanz für die Kupferschieferlagerstätte im südöstlichen Harzvorland. In: Zur Geschichte des Mansfelder Kupferschieferbergbaus. Clausthal-Zellerfeld.
- KNOCHE, H. (1996):** Schadstoffe in Ökosystemen – Ableitung von Bodennormwertkonzepten aus vorliegenden Analysedaten. Diss., Univ. Mainz.
- KÖNIG, W. (1990):** Untersuchung und Beurteilung von Kulturböden bei der Gefährdungsabschätzung von Altlasten. In: Rosenkranz, D. et al. [Hrsg.]: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin. Kennz. 3550. S. 1-34.

- KÖNIG, W. et KRAMER, F. (1985):** Schwermetallbelastung von Böden und Kulturpflanzen in Nordrhein-Westfalen. Schriftenr. Landesanstalt Ökologie, Landschaftsentw., Forstplanung, Nordrhein-Westfalen. Bd. 10.
- KRUMBIEGEL, G. et SCHWAB, M. (1974):** Saalestadt Halle und Umgebung – Ein geologischer Führer. Teil 1: Geologische Grundlagen. Halle (Saale).
- KRUMBIEGEL, G. et SCHWAB, M. (1982):** Der Naturraum. In: Neuß, E. et Zühlke, D.: Mansfelder Land – Werte unserer Heimat. Bd. 38. Akademie Verlag, Berlin, S. 1-14.
- KUNTZE et al. (1991):** Empfindlichkeit der Böden gegenüber geogenen und anthropogenen Gehalten an Schwermetallen – Empfehlungen für die Praxis. In: Rosenkranz et al. [Hrsg.]: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin, Losebl.-Ausg., Bd. 1, Kennz. 1530. S. 1-6.
- KUNTZE, H., G. RÖSCHMANN, G. SCHWERDTFEGER (1994):** Bodenkunde. Stuttgart.
- LAMPING, H. (1985):** Bergbau soll tote Mitte Australiens erschließen. In: Geograph. Rundschau. H. 1.
- LANDRATSAMT LUTHERSTADT EISLEBEN (1990):** Anbau- und Verzehrempfehlungen für Obst und Gemüse aus schwermetallbelasteten Kleingärten.
- LAU (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT) (1996):** Bodendatenbank. Auszug vom 06.02.1996. Halle.
- LORENZ, B. (1996):** Der Kupferschieferausstrich am östlichen Harzrand und seine Auswirkungen auf die Bodenschwermetallgehalte. - Diplomarb. Inst. f. Geogr. Univ. Halle (unveröff.).
- MACBETH DIVISION OF KOLLMORGEN INSTRUMENTS CORPORATION (1994):** Munsell soil color charts. New Windsor.
- MAHN, E.-G., SCHUBERT, R., WEINERT, E. (1986):** Exkursionsführer Mansfelder Hügelland. Universität Halle. Sektion Biowissenschaften, Halle.
- MANZ, M. (1997):** Mobilität und Bioverfügbarkeit luftgetragener Schadstoffe in emittentennahen Agrarböden Sachsen-Anhalts. UFZ-Bericht 20/1997. UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Leipzig.
- MENGEL, K. (1984):** Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR (1961):** Klimatologische Normalwerte für das Gebiet der DDR. Akademie Verlag, Berlin.
- MEYER, D. E. et WIGGERING, H. (1991):** Steinkohlenbergbau – ökologische Folgen, Risiken und Chancen. In: Wiggering, H. et Kerth, M. [Hrsg.]: Bergehalten des Steinkohlenbergbaus. Braunschweig, Wiesbaden.
- MEYNEN, E., SCHMITTHÜSEN, J. (1962):** Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Veröffentlichungen der Bundesanstalt für Landeskunde und des deutschen Instituts für Länderkunde. Band II, Bad Godesberg.
- MIEHLICH, G.; CRÖßMANN, G.; LUX, W. (1994):** Herkunft und Vorkommen von Blei, Cadmium und Arsen in Böden von Ballungsräumen. In: Kreysa, G. et Wiesner, J. [Hrsg.] 1994: Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium. DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V.. Frankfurt/Main, S. 59-78.

- MÜCKE, E. (1982):** Der Naturraum: Klima, Böden. In: Neuß, E. et Zühlke, D.: Mansfelder Land – Werte unserer Heimat. Bd. 38. Akademie Verlag, Berlin, S. 17.
- NEUMAIER, H. et WEBER, H. H. (1993):** Altlasten – Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer-Verlag, Berlin.
- NEUß, E. et ZÜHLKE, D. (1982) (AUTORENKOLLEKTIV):** Mansfelder Land – Werte unserer Heimat. Bd. 38, Akademie Verlag, Berlin.
- NEWTON, J. G. (1976):** Induced and natural sinkholes in Alabama: continuing problem along highway corridors. In: Zwanig, F. R.: Subsidence over mines and caverns. National Academy of Science. Washington D.C., S. 9-16.
- NOE, K. (1990):** Korngrößenbezogene Methoden zur Erkennung und Bewertung anthropogener Schwermetall-Belastungen in Böden - Fallbeispiel: Rhein-Neckar-Raum, Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen, Band 36, Diss.. Univ. Heidelberg.
- NOELL UMWELTDIENSTE GMBH (1993):** Umweltschutz-Pilotprojekt Mansfeld AG. Zusammenfassender Endbericht. unveröffentl.
- OERTEL, T. (1998):** Untersuchung und Bewertung von geogenen und anthropogenen Bodenschwermetallanreicherungen als Basis einer geökologischen Umweltanalyse im Raum Eisleben - Hettstedt. In: Beiträge der 3. Tagung zur geographischen Umweltforschung in Mitteldeutschland. UZU Schriftenreihe N.F. Bd. 2, Halle. S. 33-43.
- OERTEL, T. et FRÜHAUF, M. (1999):** Bedeutung geogener Ursachen für die Schwermetallbelastung von Böden im Mansfelder Land. In: Hercynia N.F. 32, S. 111-126.
- OERTEL, T. et FRÜHAUF, M. (2000):** Haldenvergrabungen als Ursache der Schwermetallbelastung von Böden im Mansfelder Land. In: Schriftenreihe des Mansfeld-Museums (Neue Folge), Hettstedt, Nr. 5 (2000), S. 119-131.
- OHSE, A. (1996):** Der Mitteldeutsche Umwelt- und Technikpark – Relikte der ersten Phase der Industrialisierung im Zeitz-Weißenfelser-Braunkohlenrevier in Mitteldeutschland. Sammelband zum Kolloquium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am 07.03.1996, S. 63-66.
- PAUL, R. (1999):** Zur Verdichtungsgefährdung im Rahmen des Bodengefügeschutzes auf großen Flächen. In: Einfluss der Großflächenlandwirtschaft auf den Boden. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt [Hrsg.]. Erfurt.
- PFÜTZNER, B. et al. (1994):** Hydrogeologisches Modell für das Einzugsgebiet des Süßen Sees. unveröff..
- PRÜEB, A. (1992):** Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile und mobilisierbare, potentiell ökotoxische Spurenelemente in Böden. Diss. Univ. Karlsruhe.
- PRÜEB, A. (1994):** Einstufung mobiler Spurenelemente in Böden. In: Rosenkranz, D. et al. [Hrsg.]: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Berlin. Kennz. 3600. S. 1-59.
- RADKAU, J. (2000):** Natur und Macht: eine Weltgeschichte der Umwelt. Beck Verlag, München.
- RATCLIFFE, D. A. (1974):** Ecological Effects of mineral exploitation in the United Kingdom and their significance to nature conservation. Proceedings of the Royal Society of London. 339A, S. 72-355.
- REBER, H. (1994):** Einfluss von Schwermetallen auf die Mikroflora und Fauna des Bodens. In: Kreysa, G. et Wiesner, J. [Hrsg.] 1994: Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium. DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V.. Frankfurt/Main, S. 299-318.

- RÖSLER, H. J. (1976):** Spurenelemente im Wirkungsbereich Industrie – Biosphäre. In: Autorenkollektiv: Spurenelemente im Wirkungsbereich Industrie – Biosphäre: Vorträge zum Berg- und Hüttenmännischen Tag 1975 in Freiberg. Freiburger Forschungshefte. Leipzig, S. 9-12.
- RÜBENSAM, E. et RAUE, K. (1964):** Ackerbau. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin.
- SCHEFFER, F. et SCHACHTSCHABEL, P. (1998):** Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Aufl., Enke, Stuttgart.
- SCHMIDT, G. (1993):** Bodenerosion und diffuser Stoffeintrag in das Vorflutersystem des Süßen Sees unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetalldynamik. In: Veröffentlichungen des Staatlichen Amtes für Umweltschutz Halle (Saale). H. 2, S. 40-51.
- SCHMIDT, G. (1997):** Umweltbelastung durch Bergbau – Der Einfluss von Halden des Mansfelder Kupferschieferbergbaus auf die Schwermetallführung der Böden und Gewässer im Einzugsgebiet Süßer See. Diss. Univ. Halle.
- SCHMIDT, G. (2000):** Umweltbelastung durch Bergbau – Der Einfluss von Halden des Mansfelder Kupferschieferbergbaus auf die Schwermetallführung der Böden und Gewässer im Einzugsgebiet Süßer See. In: Hallesche Studien zur Geographie Bd. 3, Halle.
- SCHMIDT, G. et FRÜHAUF, M. (1996):** Analyse und Modellierung von Stoffeintrag, -transport und Schwermetallbelastung im Einzugsgebiet von Böser Sieben und Salzgraben. Abschlussbericht DFG-Forschungsvorhaben Fr. 867/6-1, 6-2. (unveröff.).
- SCHRECK, P. (1996):** Zur Mobilisierung und Verbreitung von Schadstoffen aus den Halden des Kupferschieferbergbaues im Mansfelder Land. In: Bergbau und Umweltgeschichte in Mitteldeutschland, Sammelband zum Kolloquium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am 07.03.1996, S. 111-116.
- SCHRECK, P. (1997):** Schadstoffausträge aus den Halden der Kupferschieferverhüttung. In: Schreck, P. et Gläßer, W. [Hrsg.] 1997: Reststoffe der Kupferschieferverhüttung. Teil 1: Mansfelder Kupferschlacken. Beiträge zum Workshop am 4. und 5. Dezember 1996 in Bad Lauchstädt. UFZ-Bericht 23/1997. UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH. Leipzig, S. 9-15.
- SCHRÖDER, E. et FISCHER, G. (1934):** Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern – Blatt Mansfeld. Berlin.
- SCHRÖDTER, M., MACHULLA, G., PRASSE, J. (1990):** Zum Einfluss von Schwermetallen auf Bodenorganismen ackerbaulich genutzter Standorte im Raum Hettstedt. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Halle. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Reihe. XXXIX 1990. H. 2, S. 71-80.
- SCHUBERT, R. (1953/54):** Die Schwermetallpflanzengesellschaften des östlichen Harzvorlandes. Wissenschaftliche Zeitschrift der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, math.-nat. Reihe, 3, S. 51-70.
- SCHUBERT, R. (1954):** Zur Systematik und Pflanzengeographie der Charakterpflanzen der Mitteldeutschen Schwermetallpflanzengesellschaften. Wissenschaftliche Zeitschrift der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, math.-nat. Reihe, 3, S. 863-882.
- SCHULTE, A. et BLUM, W.E.H. (1997):** Schwermetalle in Waldökosystemen. In: Matschullat, J., Tobeschall, H.J., Voigt, H.-J. 1997: Geochemie und Umwelt. Springer, Berlin-Heidelberg, S. 53-74.
- SCHULZ, D. et WIGGERING, H. (1991):** Die industrielle Entwicklung des Steinkohlenbergbaus und der Anfall von Bergematerial. In: Wiggering, H. et Kerth, M. [Hrsg.]: Bergehalden des Steinkohlenbergbaus. Braunschweig, Wiesbaden.
- SCHWABE, H. (1995):** Bewertung der Nutzung von Bodenmonolithen und künstlicher Schwermetallbelastung für geoökologische Laborversuche. Diss. Univ. Halle.

- SENGUPTA, M. (1993):** Environmental Impacts of Mining: Monitoring, Restoration, and Control. Lewis Publishers. Boca Raton.
- SIEBERT, A., BRUNS, I., KRAUSS, G.-J., MIERSCH, J., MARKERT, B. (1995):** The use of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica* L. ex Hedw. as a bioindicator for heavy metals. 1. Fundamental investigations into heavy metal accumulation in *Fontinalis antipyretica* L. ex Hedw.. In: *The Science of the Total Environment* 177 (1996). Elsevier Science B.V., S. 137-144.
- SOMMER, F. (1996):** Erfassung des historischen Bergbaugesbietes am Ausgehenden des Kupferschieferflözes im Raum Pölsfeld. In: Landesheimatbund Sachsen-Anhalt e.V./Verein Mansfelder Bergarbeiter Sangerhausen e.V. [Hrsg.]: *Studien zum Altbergbau in der Sangerhäuser Mulde. Beiträge zur Regional- und Landeskultur Sachsen-Anhalts. H. 2.* Druck-Zuck GmbH, Halle.
- STOYE, H. (1978):** Untersuchung des Wirkungskomplexes Schwermetallmetabolismus – landwirtschaftliche Ertragsleistung. Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität Halle- Wittenberg, (unveröff.).
- STRAHLER, A. N. et STRAHLER A. H. (1973):** Environmental geoscience: interaction between natural systems and man. Hamilton. Santa Barbara.
- THIEDE, K. et BERGMANN, A. (1997):** Mehrdimensionale Varianz- und Diskriminanzanalyse nachgewiesener Schwermetallbelastungen in Böden. In: *TerraTech* 3/1997.
- THOMAS, M. (1980):** Feststoffumlagerungen im Einzugsgebiet des Süßen See. Forschungsbericht, Universität Halle. Sektion Geographie.
- THOMAS, M. (1983):** Böden und Feststoffumlagerung im Einzugsgebiet des Süßen Sees bei Eisleben (Bezirk Halle). In: *Petermanns Geographische Mitteilungen.* 4.1983, S. 257-260.
- VEREIN MANSFELDER BERG- UND HÜTTENLEUTE E.V., LUTHERSTADT EISLEBEN UND DEUTSCHES BERGBAU-MUSEUM BOCHUM [HRSG.] (1999):** Mansfeld: die Geschichte des Berg- und Hüttenwesens. Lutherstadt Eisleben, Bochum.
- VERKLEIJ, J. A. C. (1993):** The Effects of Heavy Metal Stress on Higher Plants and their Use as Bio-monitors. In: Markert, B.: *Plants as Biomonitors.* VCH. Weinheim.
- VIEHL, W. (1997):** Erfahrungen über Einsatzmöglichkeiten von Mansfelder Kupferschlacke. In: Schreck, P. et W. Gläßer [Hrsg.] 1997: *Reststoffe der Kupferschieferverschüttung – Teil 1: Mansfelder Kupferschlacken.* UFZ-Bericht Nr. 23/1997, S. 51-54. Leipzig.
- VIERECK-GÖTTE, L. et EWERS, U. (1997):** Grundlagen und Verfahren der Ableitung von Richtwerten. In: Matschullat, J., Tobschall, H.J., Voigt, H.-J. 1997: *Geochemie und Umwelt.* Springer, Berlin-Heidelberg. S. 53-74.
- VOGEL, W. (1976):** Die Beziehungen zwischen dem ausstreichenden Kupferschieferflöz und den Schwermetallgehalten in Hangsedimenten und -böden im südlichen Harzvorland (Gemarkung Pölsfeld) und ihr Einfluss auf die landwirtschaftliche Nutzung. Diplomarbeit. Univ. Halle. (unveröff.).
- WAGENBRETH, O. (1996):** Zum Landschaftsbild der Bergreviere vor, während und nach dem Bergbau. In: *Bergbau und Umweltgeschichte in Mitteldeutschland, Sammelband zum Kolloquium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am 07.03.1996,* S. 77-87.
- WAGENBRETH, O. et STEINER, W. (1990):** Geologische Streifzüge: Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- WALLNÖFER, P. R. et ENGELHARDT, G. (1995):** Schadstoffe aus dem Boden. In: Hock, B. et Elstner, E.F. [Hrsg.]: *Schadwirkungen auf Pflanzen: Lehrbuch der Pflanzentoxikologie.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford.

- WALLWORK, K. L. (1974):** Direlict land. David & Charles. Newton Abbot.
- WEDEPOL, K. H. (1984):** Die Zusammensetzung der oberen Erdkruste und der natürliche Kreislauf ausgewählter Metalle. In: Merian, E. [Hrsg.]: Metalle in der Umwelt. Weinheim S. 1-10.
- WEINERT, E. (1982):** Der Naturraum: pflanzengeographische Gliederung. In: Neuß, E. et Zühlke, D.: Mansfelder Land – Werte unserer Heimat. Bd. 38. Akademie Verlag, Berlin, S. 18-22.
- WERNER, D., REICH, J., DEGNER, J. (1999):** „Pflügen“ oder „Nicht Pflügen“. In: Einfluss der Großflächenlandwirtschaft auf den Boden. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (TMLNU) [Hrsg.]. Erfurt.
- WESTERMANN, E. (1971):** Das Eislebener Garkupfer und seine Bedeutung für den europäischen Kupfermarkt 1460 – 1560. Köln, Wien.
- WILD, A. (1995a):** Umweltorientierte Bodenkunde: eine Einführung. Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford.
- WILD, A. (1995b):** Soils and the Environment: an Introduction. Cambridge University Press. Cambridge.
- WILLE, F. (1993):** Bodensanierungsverfahren. Vogel Buchverlag. Würzburg.
- WINDE, F. (1997):** Schlammablagerungen in urbanen Vorflutern - Ursachen, Schwermetallbelastung und Remobilisierbarkeit untersucht an Vorflutern der Saale bei Halle. Diss. Edition Wissenschaft. Reihe Geowissenschaften. Bd. 23. 144 S. Marburg.
- WOHLRAB, B., EHLERS, M., GÜNNEWIG, D., SÖHNGEN, H.-H. (1995):** Oberflächennahe Rohstoffe – Abbau, Rekultivierung, Folgenutzung im Spannungsfeld zwischen gesicherter Versorgung und Umweltverträglichkeit. Jena, Stuttgart.
- YAHYA, A. et MÜLLER, G. (1994):** Schwermetallbelastung des Le An Flusssystem in der Jiangxi Provinz in Südost-China durch Minenabwässer. In: Matschullat, J. et Müller, G. [Hrsg.]: Geowissenschaften und Umwelt. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- YOUNG, J. E. (1992):** Mining the earth. Worldwatch Paper 109, S. 1-53.
- YOUNG, J. E. (1993):** Umweltproblem Bergbau: Strategien gegen die Ausbeutung der Erde. Worldwatch-Paper Bd. 5. Wochenschau-Verlag. Schwalbach.
- ZIERDT, K. (1991):** Untersuchungen zur geogenen und anthropogenen Schwermetallbelastung ausgewählter Hallescher Böden, Diss. Univ. Halle.
- ZUMBROICH, T., HERWEG U., MÜLLER, A. (1994):** Zur Schwermetallbelastung von Nutzpflanzen in einer Region mit ehemaligen Erzbergbau. In: Wasser und Boden. Heft 1.
- ZENK, M. H. (1996):** Heavy metal detoxification in higher plants – a review. Elsevier Science B.V. Gene 179. S. 21-30.

## 11 Quellen

**BUNDESGESUNDHEITSAMT (1990):** ZEBS-Werte - Lebensmittelrichtwerte der zentralen Erfassungs- und Bewertungsstelle.

**FZB MÜNCHEBERG BEREICH BODENKUNDE/FERNERKUNDUNG EBERSWALDE, abgeschlossen 1980:** Karte der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung im Maßstab 1:100.000. Gesamtleitung R. Schmidt, Freigabe von Vektordaten erfolgte mit Unterstützung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt und freundlicher Genehmigung Geologischen Landesamtes Sachsen-Anhalt.

**LANDESAMT FÜR LANDESVERMESSUNG UND DATENVERARBEITUNG SACHSEN-ANHALT: ATKIS – Daten (Auszüge für den Landkreis Mansfelder Land und Teile des Landkreises Sangerhausen).** Genehmigungs-Nr.: LVermD/P/086/95, Freigabe von Vektordaten erfolgte mit freundlicher Unterstützung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.

**LANDESAMTES FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (1997):** Sondergutachten. Auszüge von Schwermetallbelastungen der Oberböden aus der Bodendatenbank des Katasters Boden (KatBo).

**OBERFINANZDIREKTION MAGDEBURG (2001):** Abrechnungen von der Bodenzahl je Schadensklasse.

## 12 Karten und Luftbilder

**FULDA, E. et HÜLSEMANN, P. (1930):** Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern – Blatt Eisleben. Berlin.

**GEOLOGISCHES LANDESAMT SACHSEN-ANHALT [HRSG.] (2000):** Geologisch-montanhistorische Karte der Reviere Mansfeld und Sangerhausen M 1:50.000. Halle (Saale). Vektordatenfreigabe mit Genehmigung des Herausgebers.

**KATASTERAMT HETTSTEDT, (1998):** II. Reinkarte über die Dorf und Feldflur Klostermansfeld aus dem Jahre 1853. Kopie von Kartenausschnitten mit Genehmigung, VA 4727-98.

**KATASTERAMT HETTSTEDT, (1998):** II. Reinkarte von der Feldmark des Dorfes Benndorf aus dem Jahre 1856 Kopie von Kartenausschnitten mit Genehmigung, VA 4727-98.

**LANDESAMT FÜR LANDESVERMESSUNG UND DATENVERARBEITUNG SACHSEN-ANHALT (1994):** Topographische Karten: TK 1:10.000 Blatt 32-23-B-d-4 Hergisdorf, Blatt 32-23-B-b-4 Mansfeld, Blatt 32-23-B-d-2 Helbra

**LANDESAMT FÜR LANDESVERMESSUNG UND DATENVERARBEITUNG SACHSEN-ANHALT (1993):** Color-Infrarot-(CIR) Luftbilder Maßstab ca. 1:10.000:  
CIR-Luftbild von Pölsfeld, Film-Nr. K 36, Bild-Nr. 106, Aufnahmedatum: 25.05.1993  
CIR-Luftbild von Ahlsdorf, Film-Nr. K 36, Bild-Nr. 105, Aufnahmedatum: 25.05.1993  
CIR-Luftbild von Ahlsdorf, Film-Nr. K 36, Bild-Nr. 107, Aufnahmedatum: 25.05.1993  
CIR-Luftbild von Klostermansfeld, Film-Nr. K 55, Bild-Nr. 104, Aufnahmedatum: 01.07.1993

**PREUBISCHE GEOLOGISCHE LANDESANSTALT [HRSG.] (1930):** Abgedeckte geologische Übersichtskarte der Mansfelder Mulde M 1:100.000, Blatt Eisleben.

**PREUBISCHE GEOLOGISCHE LANDESANSTALT [HRSG.] (1931):** Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern M 1:25.000, Blatt Mansfeld.

## 13 Anhang

### Karten

- Karte A 1: Abgedeckte geologische Karte der Mansfelder Mulde (FULDA et HÜLSEMANN 1930)
- Karte A 2: Kupferbelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete
- Karte A 3: Bleibelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete
- Karte A 4: Zinkbelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete
- Karte A 5: Cadmiumbelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete
- Karte A 6: Kleinhaldenlandschaft und Standorte von Haldenvergrabungen vor dem Kupferschieferausstrich bei Pölsfeld (Sangerhäuser Mulde)

### Abbildungen

- Abb. A 1: Materialherkunft und Aufbau des Pflanzenversuches V-Hg\_2
- Abb. A 2: Vegetationsschäden bei Ahlsdorf (P-Ad\_6), Vorgehensweise der Teilsanierung und Ausschnitt aus aktueller Flurkarte
- Abb. A 3: Vegetationsschäden infolge Haldenvergrabungen bzw. Haldenkappungen im UG 1 (Quelle: CIR-Luftbilder 1993)
- Abb. A 4: Kulturvegetationsausfall in der Flur Sandersleben über Bodenbereichen mit vergrabendem Schiefermaterial (Foto: Oertel 1998)
- Abb. A 5: Vegetationsschäden (Chlorosen) über Bodenbereichen mit vergrabendem Schiefermaterial bei Pölsfeld (Foto: Oertel 1998)
- Abb. A 6: Kartenausschnitt der II. Reinkarte über die Dorf und Feldflur Klostermansfeld aus dem Jahre 1853 (KATASTERAMT HETTSTEDT 1998; Foto: Oertel 1998)
- Abb. A 7: Kulturvegetation mit und ohne Schäden auf dem Ackerstandort „Katzenwinkel“ bei Benndorf und Vergleich der chlorosegeschädigten sowie vitalen jungen Weizenpflanzen von diesem Standort (Fotos: Oertel 1997)
- Abb. A 8: Zwei Haldengräber mit Stützpfiler und Abdeckung aus Löß bei P-Ad\_6 im Jahre 1999 und gesunder Bestand von Raps auf dem teilsanierten Bodenstandort (P-Ad\_6) im Jahre 2001 (Fotos: Oertel 1999, 2001)
- Abb. A 9: Schwermetallschäden bei Weizen in der Frühphase der Pflanzenentwicklung westlich von Klostermansfeld (Foto: Oertel 1997)
- Abb. A 10: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 11: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 12: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_5 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 13: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_6 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 14: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad\_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 15: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad\_5 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 16: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Be\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 17: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa\_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 18: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Zg\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)
- Abb. A 19: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He\_5 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

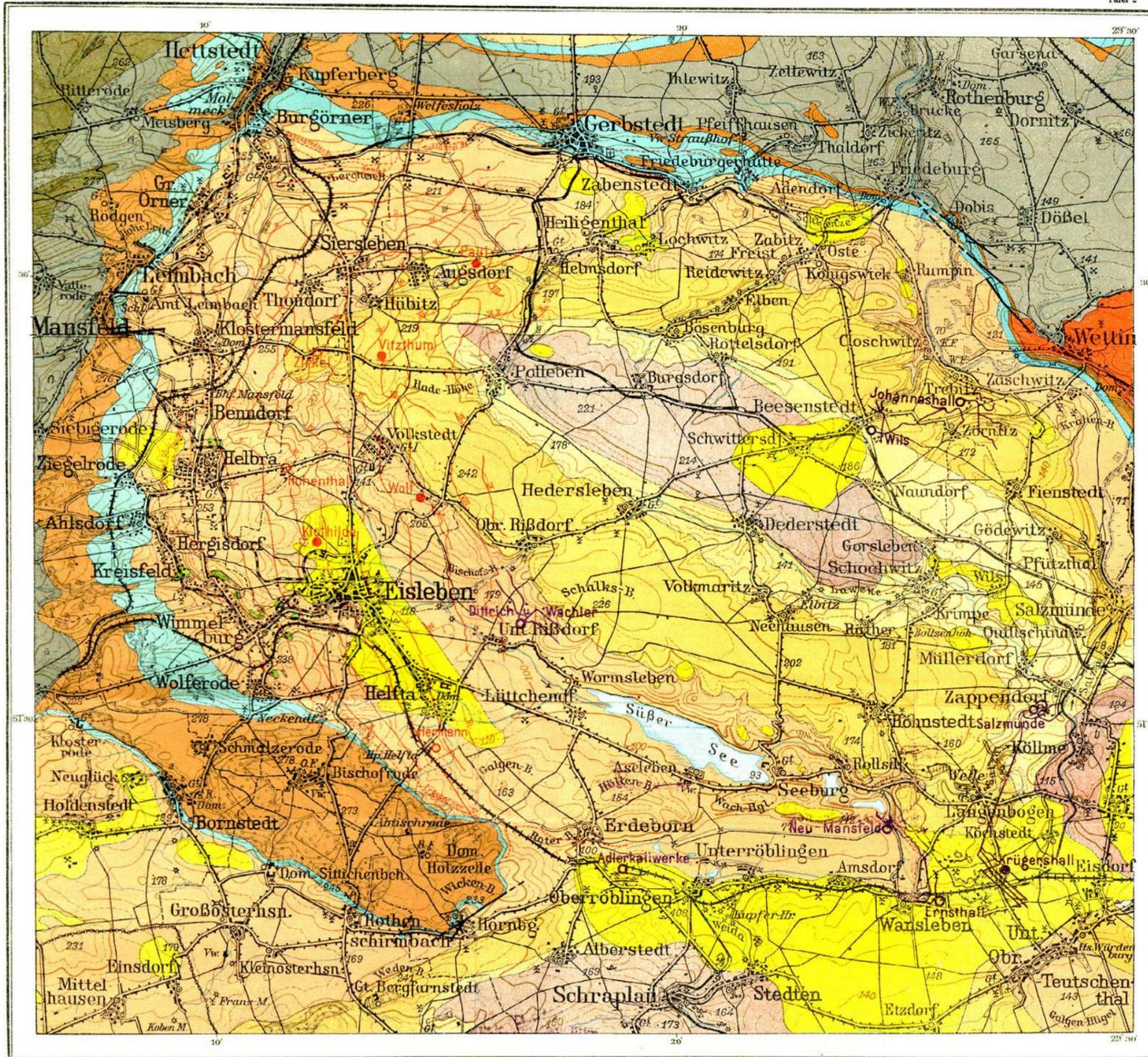
### Tabellen

- Tab. A 1: Schwermetallgehalte und Bodenparameter der Proben- und Untersuchungsstandorte
- Tab. A 2: Ausgewählte Schwermetallgehalte in Oberböden der Gemeinden Ahlsdorf, Hergisdorf und Wimmelburg (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991)
- Tab. A 3: Richt- bzw. Grenzwerte für Blei und Cadmium in Nahrungs- und Futterpflanzen (BUNDESGESUNDHEITSAMT 1990)
- Tab. A 4: Ackerschätzungsrahmen (KUNTZE et al. 1994)

Karte A 1: Abgedeckte geologische Karte der Mansfelder Mulde (FULDA et HÜLSEMANN 1930)

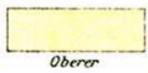
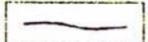
Erläuterung zur geologischen Karte von Preußen, Blatt Eisleben

Tafel 2



Abgedeckte geologische Übersichtskarte der Mansfelder Mulde

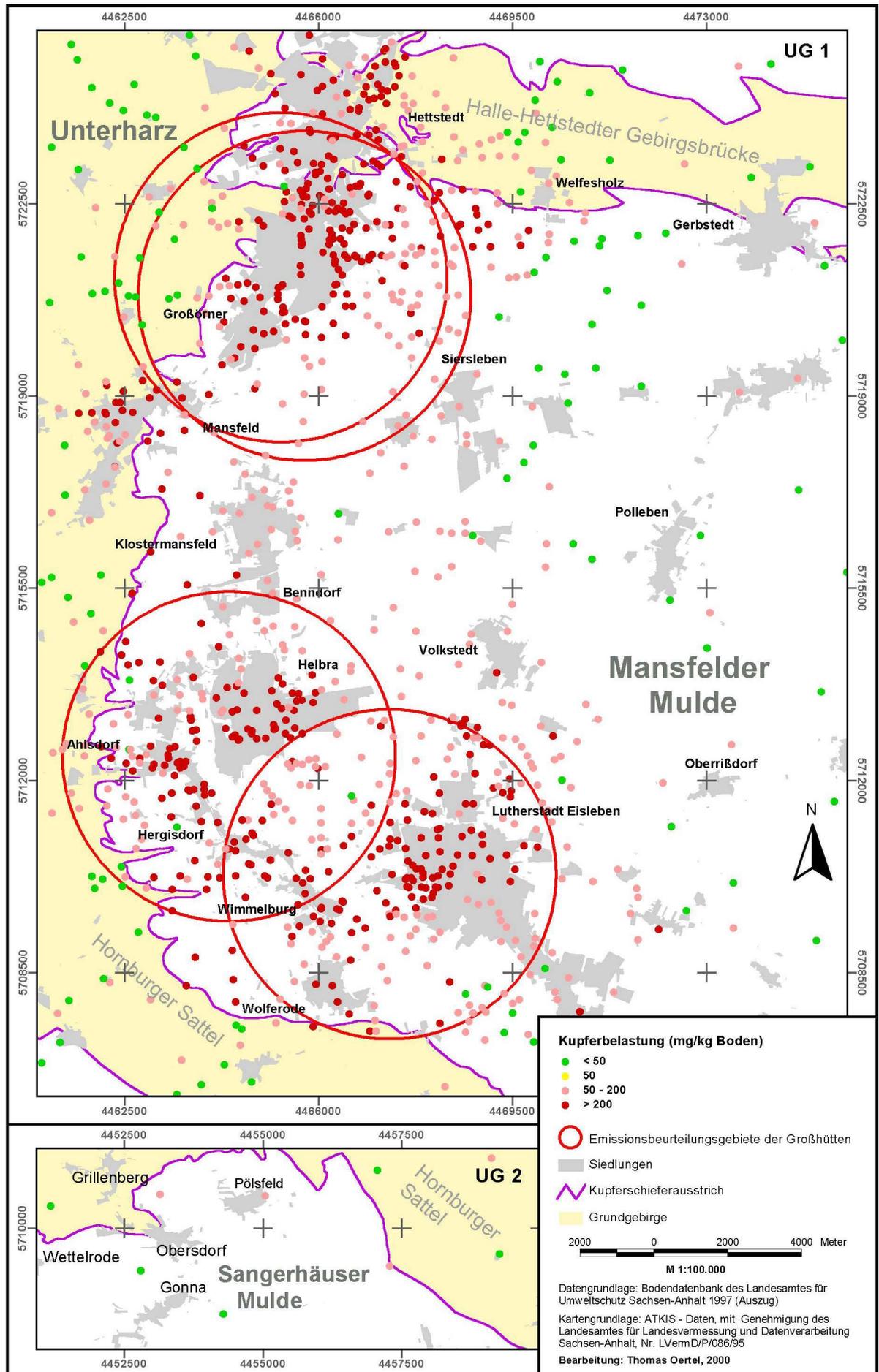
Nach den Aufnahmen der Preußischen Geologischen Landesanstalt  
Bearbeitet von ERNST FULDA, 1929

-  Tertiär
-  Muschelkalk
-  Oberer Buntsandstein
-  Mittlerer Buntsandstein
-  Unterer Buntsandstein
-  Zechstein
-  Gips des Oberen Zechsteins
-  Rotliegendes
-  Porphyr
-  Karbon
-  Devon
-  Streichenstecken im Kupferschieferbergbau und Stollenquerschläge
-  Strecken im Salzbergbau
-  Kupferschiefer-Schächte in Betrieb | stillgelegt
-  Kalisalz-Schächte in Betrieb | stillgelegt

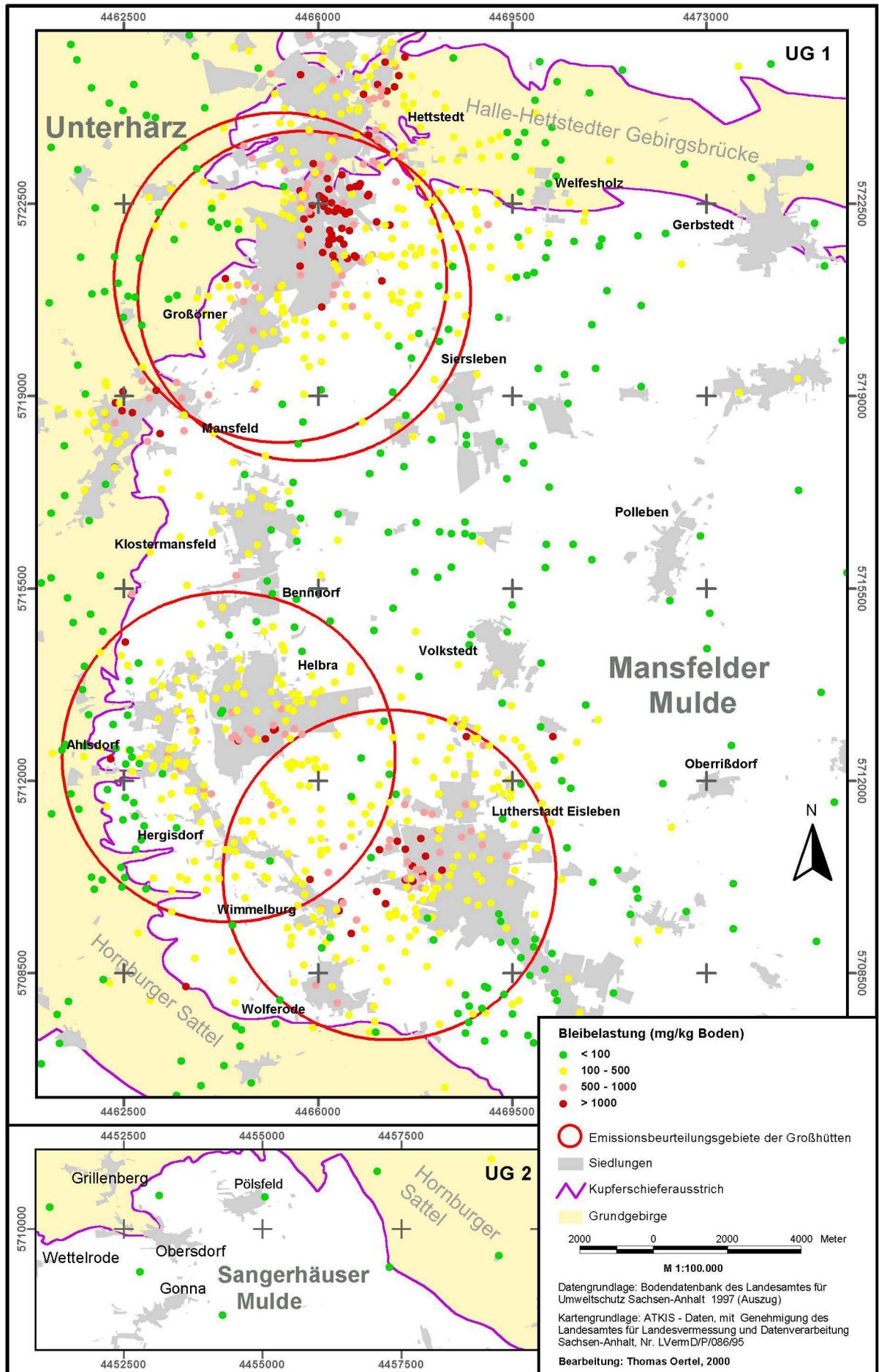
1:100000 (1cm der Karte = 1km der Natur).



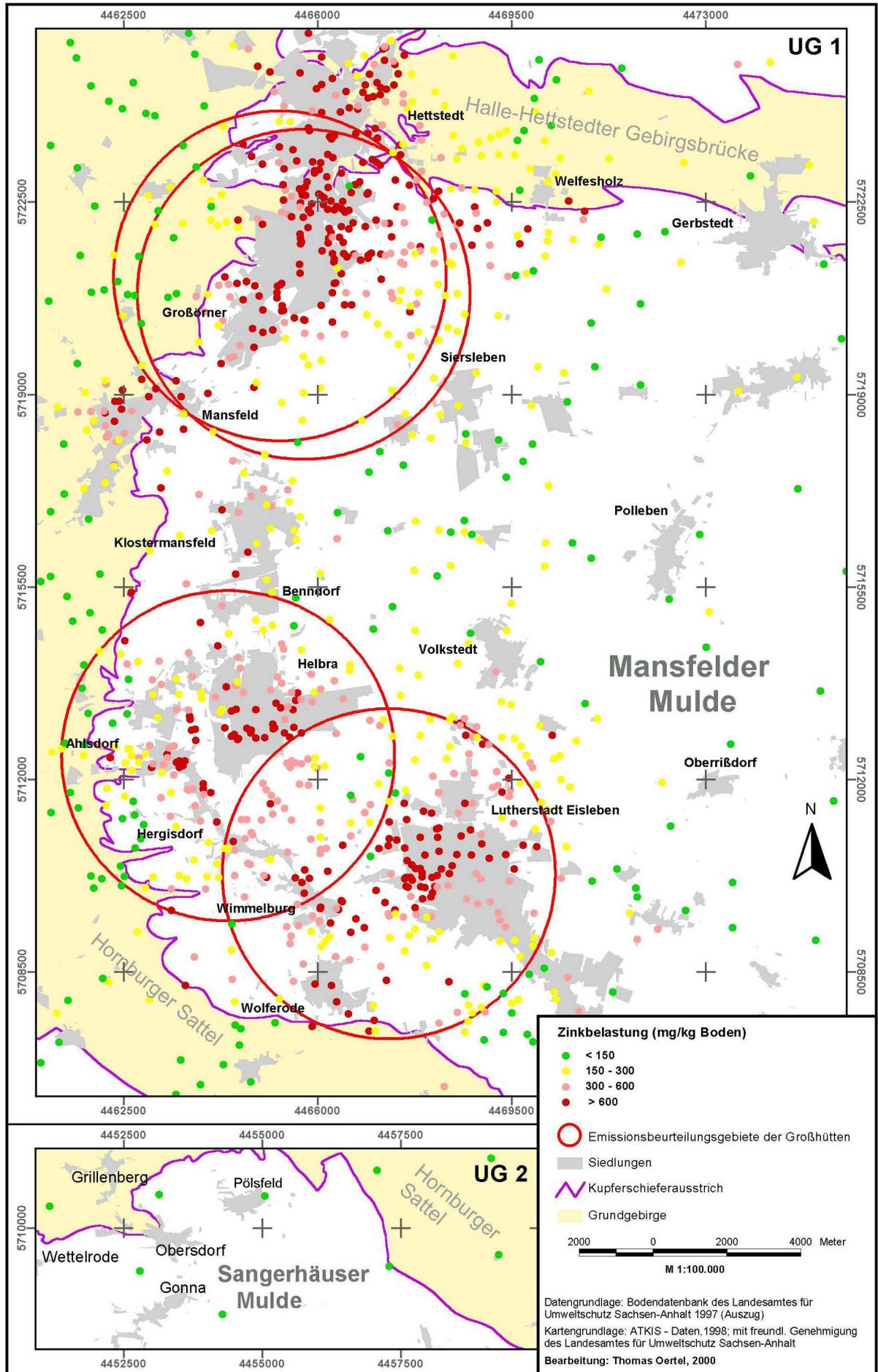
Karte A 2: Kupferbelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete



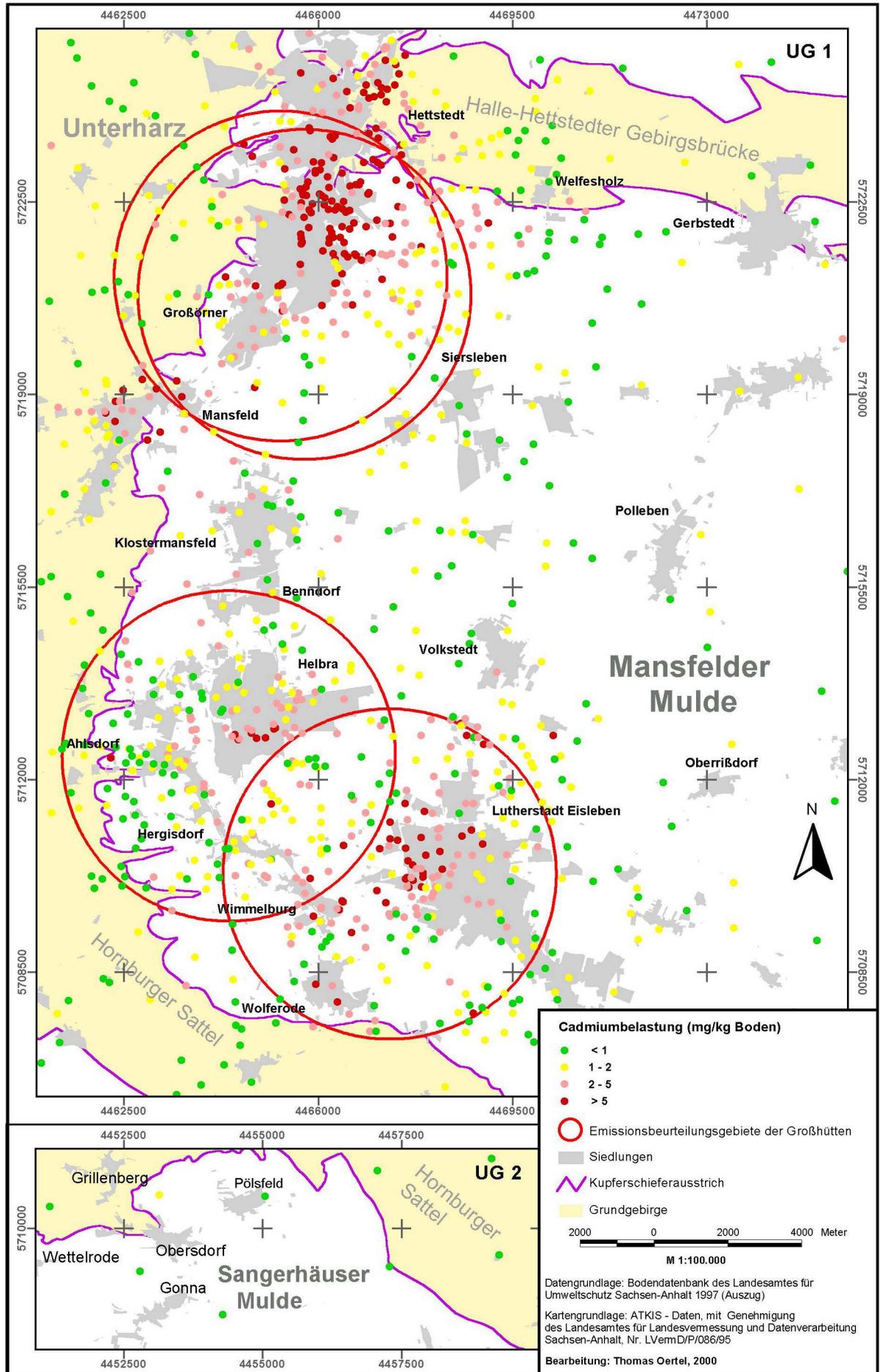
Karte A 3: Bleibelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete



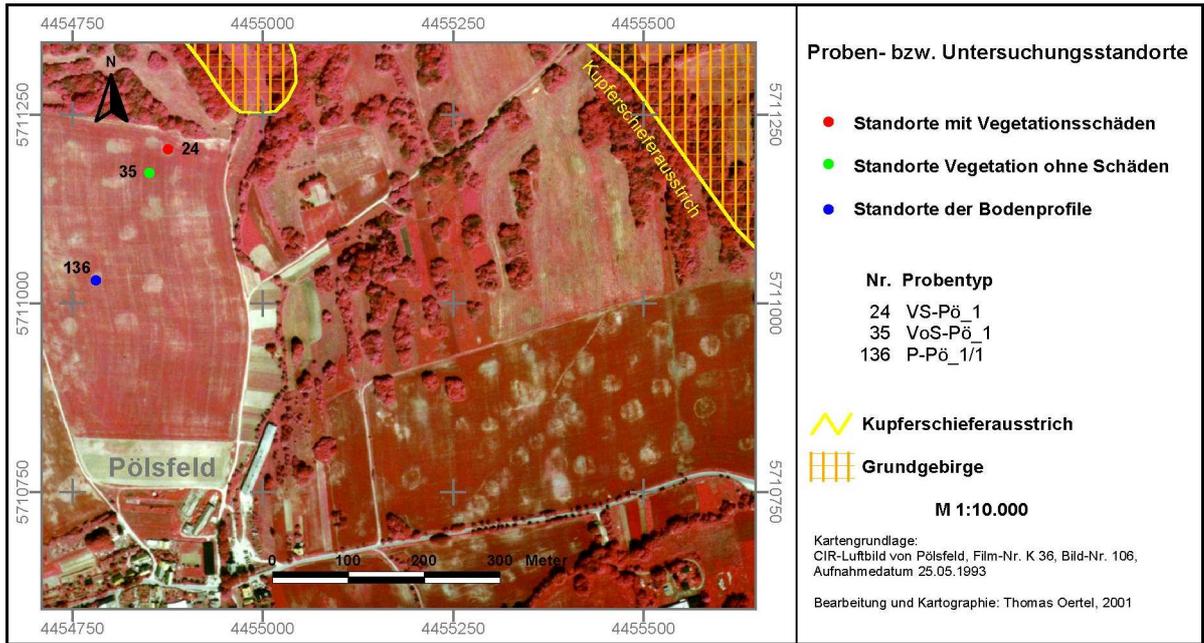
Karte A 4: Zinkbelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete



Karte A 5: Cadmiumbelastung von Oberböden der Untersuchungsgebiete

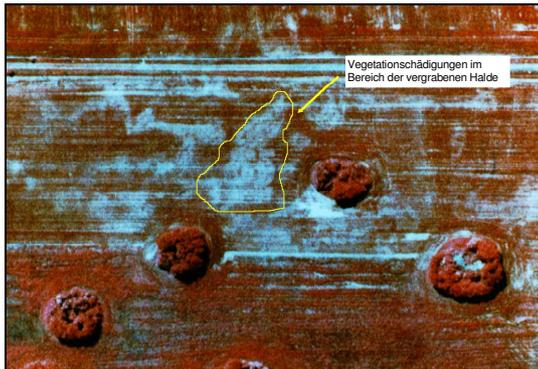


**Karte A 6: Kleinhaldenlandschaft und Standorte von Haldenvergrabungen vor dem Kupferschieferausstrich bei Pölsfeld (Sangerhäuser Mulde)**





a) Vergrabungsstandort "am Haldenstück" Hergisdorf, durch die Niedrigbfliegung mit Leichtflugzeug entdeckt.



b) Lage des Standortes konnte durch sehr starke optische Vergrößerung eines CIR-Senkrecht-Luftbildes konkretisiert werden.



c) Aufschichtung im Bereich der vergrabenen Halde, die den anthropogen eingebrachten sog. "technogenen Haldenhorizont" im Boden verdeutlicht.



d) Aushub von 2 Gruben: Grube 1 mit Sand- und Ziegelschuttfüllung (schwermetallfreies Material)

Grube 2 gefüllt mit ausgeschachtetem Haldenmaterial (schwermetallbelastet).

Mit diesen Grubenfüllungen soll eine Bewertung der Ursachen der Pflanzenschädigungen über vergrabenen Halden ermöglicht werden. Ursachen sind:

- Schwermetallgehalte der Schiefergesteine,
- Klüftigkeit und somit hohe Wasserleitfähigkeit des Materials,
- mechanische Barriere des Haldengrabes.



e) Seitenabdichtung der Grube 1, (Sand/ Ziegelschutt), um eine Durchwurzelung der später angebauten Nutzpflanzen zum benachbarten Boden zu verhindern.



f) Auf beide Gruben, deren Materialfüllungen vergleichbare Wasserleitfähigkeiten aber unterschiedliche Schwermetallgehalte besitzen, wurde Oberboden aus der Umgebung aufgebracht.



g) Ziegelschutt-Sandgrab (rechts), neues Haldengrab (links) und Fläche der Parabraunerde (Mitte), die mit Winterweizen bestellt wurden.

(Fotos: Oertel 1997)

Abb. A 1: Materialherkunft und Aufbau des Pflanzenversuches V-Hg\_2

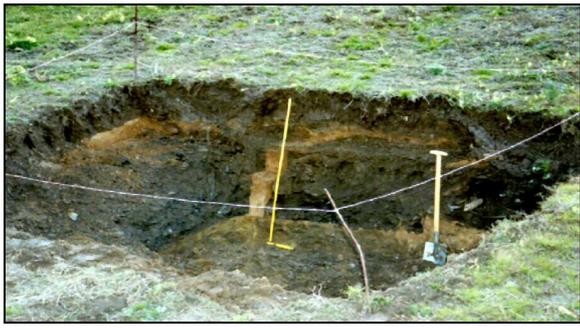
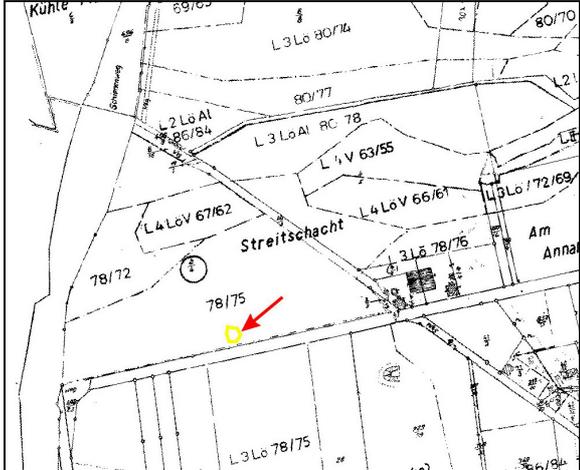
	<p>a: Geländefoto einer Ackerfläche bei Ahlsdorf, deren junge Kulturvegetation (Weizen) durch Chlorosen geschädigt ist.</p> <p>(Foto: Oertel 1997)</p>
	<p>b: Das Foto dokumentiert den Standort nach der Auskoffierung durch einen Mobilkran. In den Hohlraum wurde anschließend Mutterboden eingebracht.</p> <p>(Foto: Oertel 1999)</p>
	<p>c: Stark vergrößertes Color-Infrarot-Luftbild vom Standort P-Ad_6 (gelb markiert) mit Vegetationsschäden.</p> <p>(CIR-Luftbildausschnitt bei Ahlsdorf, Film-Nr. K 36, Bild-Nr. 105, Aufnahmedatum: 25.05.1993)</p>
	<p>d: Ausschnitt aus der aktuellen Flurkarte Ahlsdorf Flur 2 mit Angaben der Reichsbodenschätzung.</p> <p>(Flurkartenausschnitt Gemarkung Ahlsdorf Flur 2)</p>

Abb. A 2: Vegetationsschäden bei Ahlsdorf (P-Ad\_6), Vorgehensweise der Teilsanierung und Ausschnitt aus aktueller Flurkarte



Abb. A 3: Vegetationsschäden infolge Haldenvergrabungen bzw. Haldenkappungen im UG 1 (Quelle: CIR-Luftbilder 1993)



**Abb. A 4: Kulturvegetationsausfall in der Flur Sandersleben über Bodenbereichen mit vergrabendem Schiefermaterial (Foto: Oertel 1998)**



**Abb. A 5: Vegetationsschäden (Chlorosen) über Bodenbereichen mit vergrabendem Schiefermaterial bei Pölsfeld (Foto: Oertel 1998)**



Abb. A 6: Kartenausschnitt der II. Reinkarte über die Dorf und Feldflur Klostermansfeld aus dem Jahre 1853 (KATASTERAMT HETTSTEDT 1998; Foto: Oertel 1998)

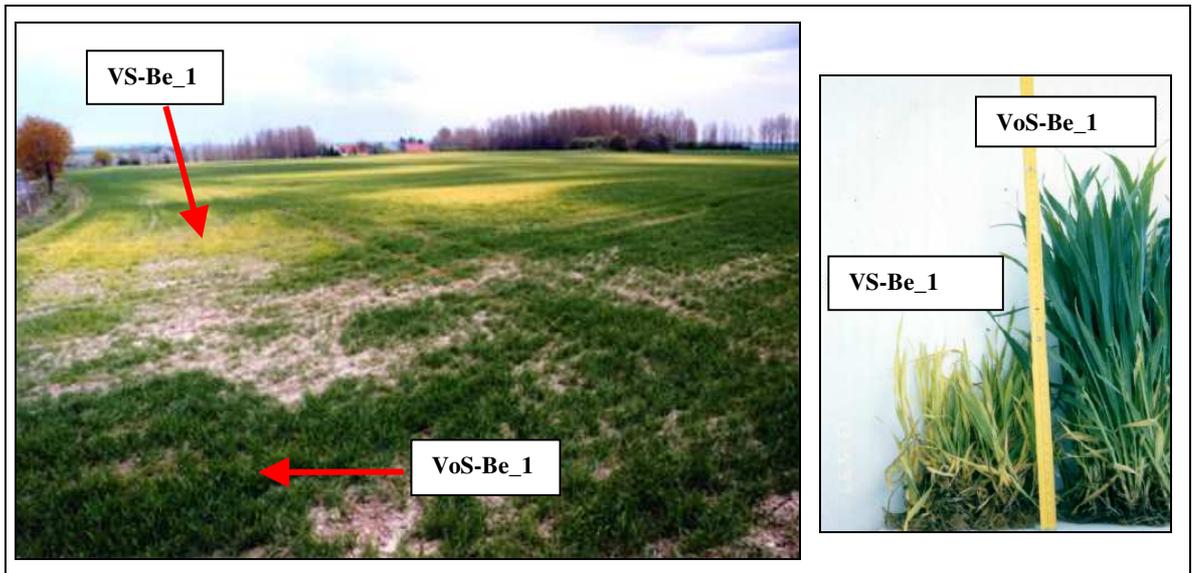


Abb. A 7: Kulturvegetation mit und ohne Schäden auf dem Ackerstandort „Katzwinkel“ bei Benndorf und Vergleich der chlorosegeschädigten sowie vitalen jungen Weizenpflanzen von diesem Standort (Fotos: Oertel 1997)



Abb. A 8: Zwei Haldengräber mit Stützfeiler und Abdeckung aus Löß bei P-Ad\_6 im Jahre 1999 und gesunder Bestand von Raps auf dem teilsanierten Bodenstandort (P-Ad\_6) im Jahre 2001 (Fotos: Oertel 1999, 2001)



Abb. A 9: Schwermetallschäden bei Weizen in der Frühphase der Pflanzenentwicklung westlich von Klostermansfeld (Foto: Oertel 1997)

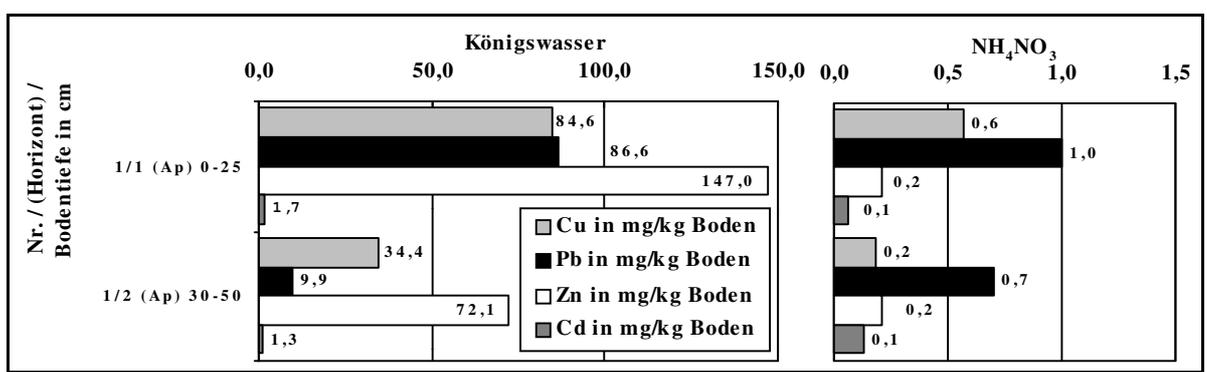


Abb. A 10: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

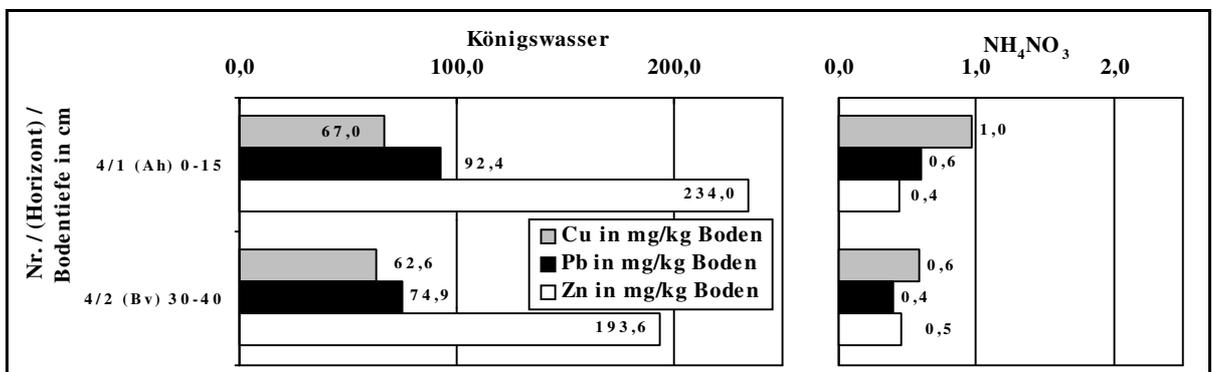


Abb. A 11: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

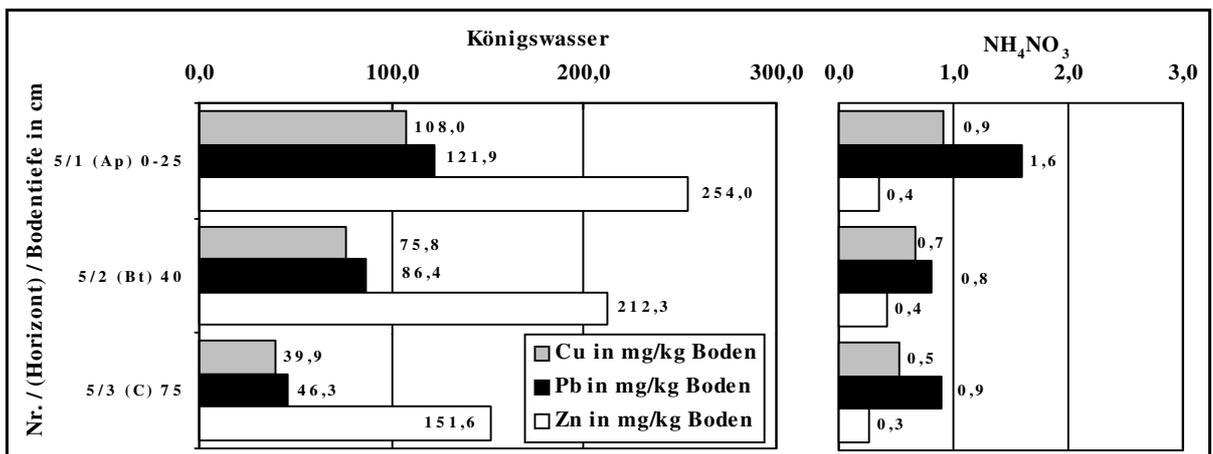


Abb. A 12: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_5 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

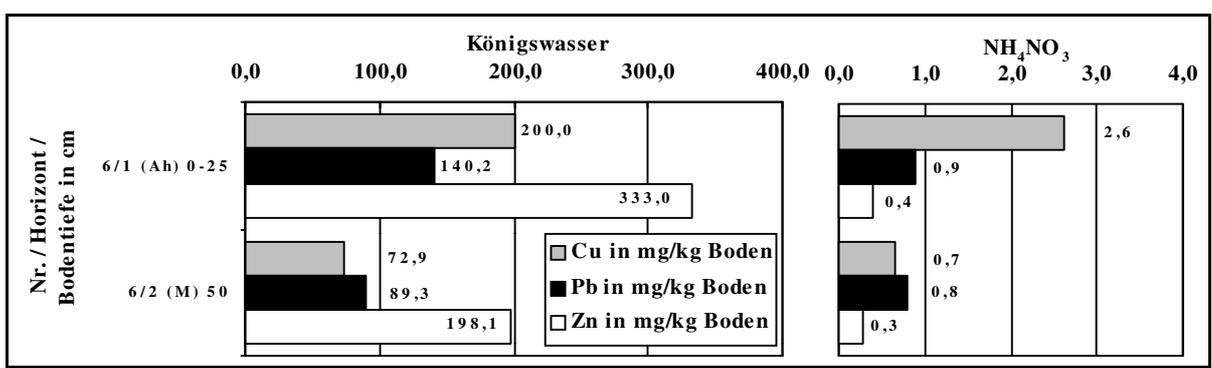


Abb. A 13: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Hg\_6 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

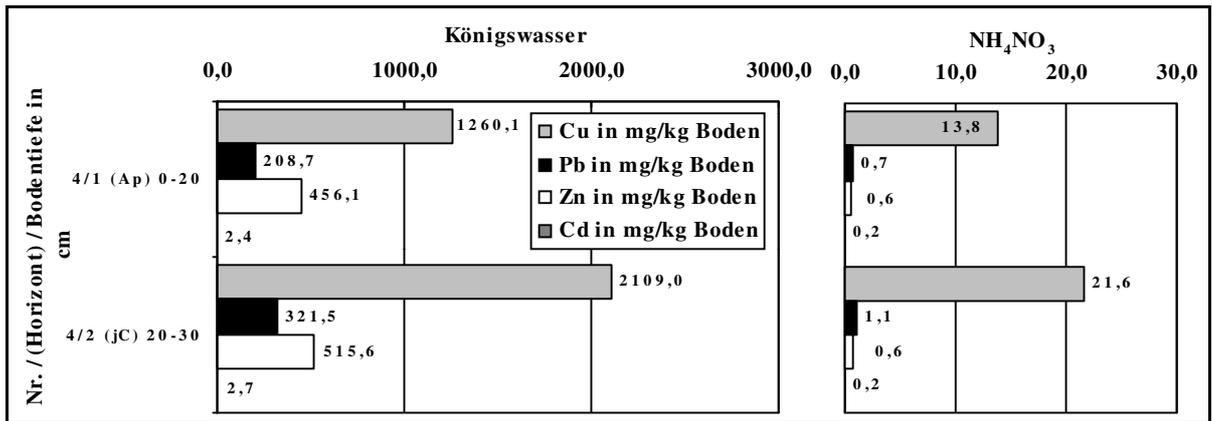


Abb. A 14: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad\_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

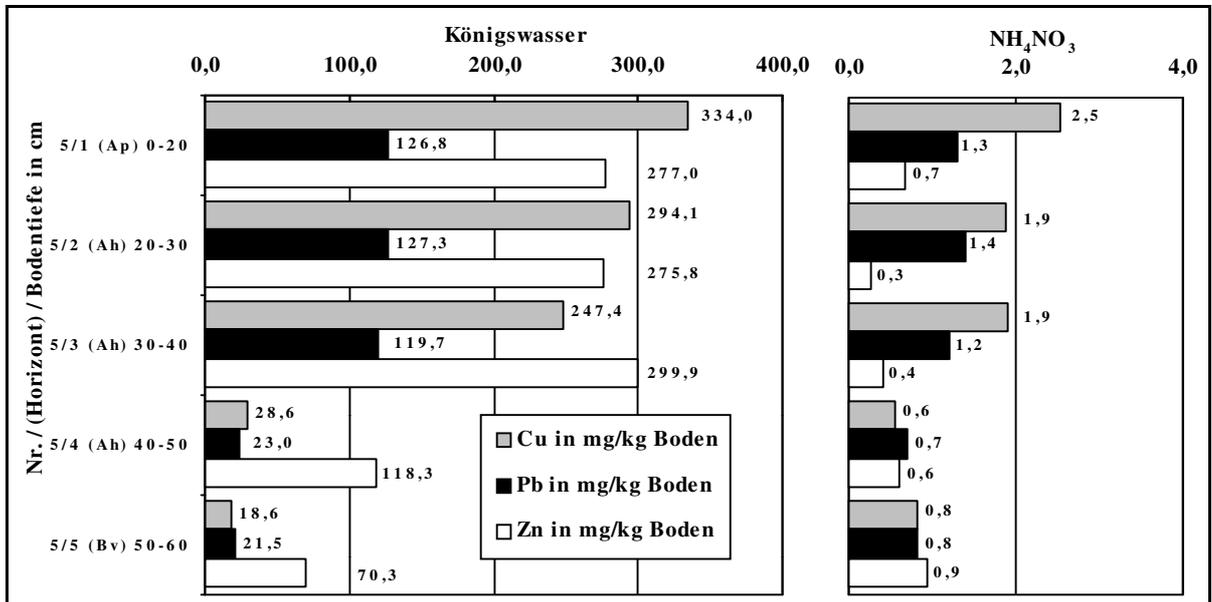


Abb. A 15: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Ad\_5 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

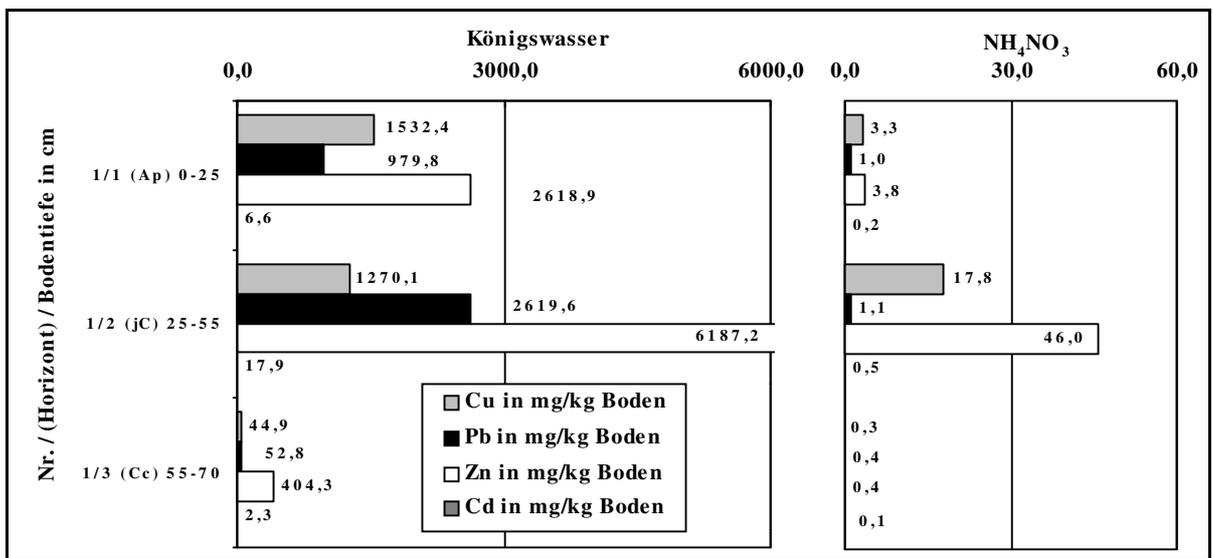


Abb. A 16: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Be\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

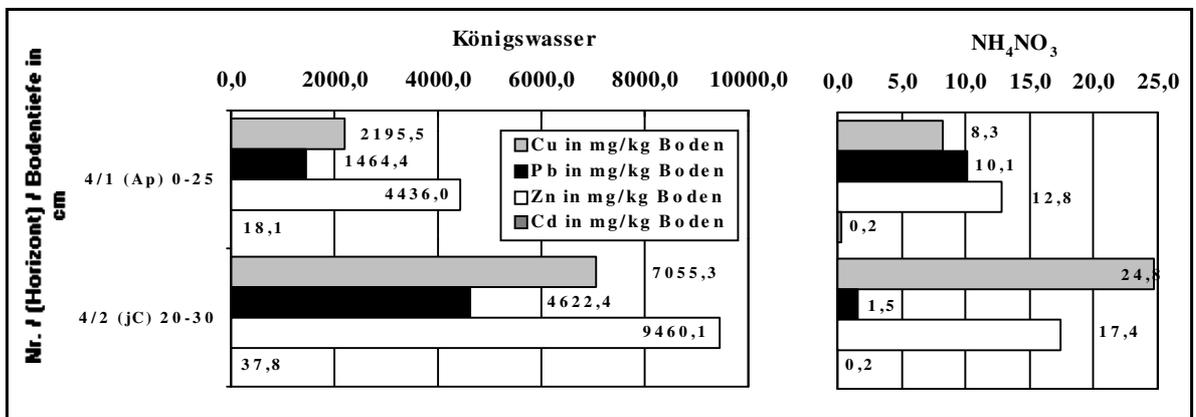


Abb. A 17: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Sa\_4 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

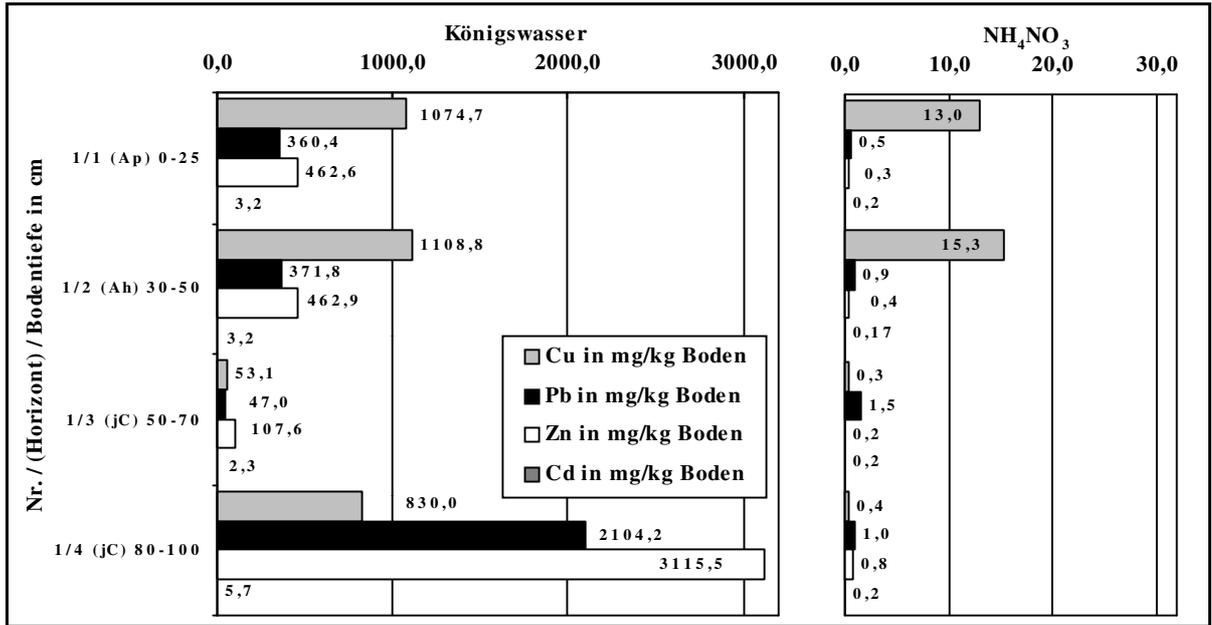


Abb. A 18: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-Zg\_1 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

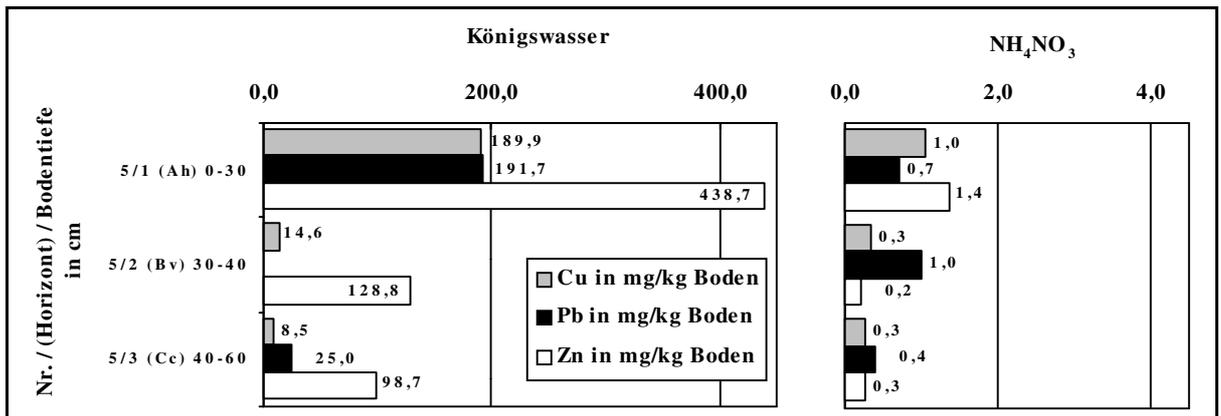


Abb. A 19: Schwermetallbelastungen des Bodenprofils P-He\_5 (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Anteile)

Tab. A 1: Schwermetallgehalte und Bodenparameter der Proben- und Untersuchungsstandorte

Nr.	HW	RW	Probentyp	Munsell Farbtafel (trocken)	Tiefe (cm)	Horiz.	Kupfer				Blei				Zink				Cadmium				Skel. (%)	o. S. (%)	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	CaCO <sub>3</sub> (%)	GS (%)	MS (%)	FS (%)	GU (%)	MU (%)	FU (%)	T (%)
							KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>													
							mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA												
1	4461837	5712692	K-Ad_1	10YR 4/2	0-25	Ap	82,9	0,3	n. b.	n. b.	92,9	1,2	n. b.	n. b.	145,5	0,3	n. b.	n. b.	1,5	4,3	n. b.	n. b.	6,8	2,3	7,7	6,9	0,7	5,0	22,0	19,0	19,0	15,0	10,0	8,0
2	4462163	5711970	K-Hg_1	10YR 4/3	0-25	Ap	85,5	0,3	0,5	8,8	80,5	0,7	0,8	45,3	143,9	0,2	1,7	1,6	1,8	6,5	0,1	10,3	7,5	2,9	6,5	5,8	0,6	5,0	29,0	12,0	19,0	17,0	10,0	7,0
3	4462084	5711627	K-Hg_2	10YR 4/2	0-25	Ap	55,2	0,5	0,6	8,4	63,7	1,5	0,6	29,7	128,6	0,1	3,8	0,6	1,9	10,6	0,2	5,1	6,4	2,7	6,3	5,4	0,6	9,0	22,0	15,0	18,0	20,0	9,0	6,0
4	4462188	5711379	K-Hg_3	10YR 4/3	0-25	Ap	65,3	0,3	0,6	4,3	44,8	3,6	0,7	12,2	115,7	0,3	0,2	12,7	2,3	0,9	0,1	7,4	7,0	2,5	8,0	7,2	1,7	3,0	23,0	23,0	23,0	14,0	8,0	6,0
5	4462543	5710282	K-Kr_1	10YR 4/3	0-25	Ap	122,3	1,2	1,8	3,1	85,0	2,6	0,7	24,8	162,1	0,5	0,2	10,1	2,6	1,8	0,1	23,5	7,0	3,3	7,7	7,3	2,8	9,0	28,0	12,0	19,0	15,0	10,0	7,0
6	4462568	5710287	K-Kr_2	10YR 4/3	0-25	Ap	77,3	0,3	1,1	5,6	67,3	1,8	0,8	43,9	134,4	0,2	0,2	6,5	2,4	1,8	0,1	7,1	6,4	2,7	7,9	7,3	1,6	9,0	24,0	14,0	19,0	15,0	9,0	7,0
7	4462592	5710292	K-Kr_3	10YR 4/3	0-25	Ap	71,5	0,3	0,5	8,9	66,7	1,8	0,2	54,2	135,0	0,3	0,3	2,8	2,3	7,2	0,1	25,7	5,0	2,6	7,1	6,7	1,5	8,0	23,0	14,0	19,0	16,0	10,0	7,0
8	4462618	5710297	K-Kr_4	10YR 4/3	0-25	Ap	75,6	0,3	0,5	5,5	71,8	1,7	0,6	21,2	141,6	0,3	2,3	1,3	2,3	7,9	0,2	9,7	5,2	2,5	6,4	5,8	1,6	3,0	24,0	19,0	21,0	16,0	9,0	7,0
9	4462643	5710302	K-Kr_5	10YR 4/3	0-25	Ap	55,0	1,0	0,3	16,3	45,3	1,8	0,7	33,8	123,9	0,4	2,4	0,8	2,0	5,8	0,2	11,8	2,8	2,5	6,1	5,3	1,7	6,0	26,0	16,0	21,0	16,0	8,0	7,0
10	4462667	5710307	K-Kr_6	10YR 4/3	0-25	Ap	46,8	1,3	0,2	14,0	33,6	4,9	0,5	30,9	98,6	0,5	2,0	1,0	1,8	6,3	0,2	7,3	3,6	2,1	6,3	5,5	1,5	5,0	24,0	18,0	21,0	15,0	8,0	8,0
11	4459535	5710753	HG-BI_1	7.5YR 4/4	0-25	Ap	28,8	0,8	0,2	3,5	38,5	3,3	0,6	11,4	94,6	0,8	0,5	0,9	0,7	7,2	0,1	18,8	7,3	3,2	6,3	5,7	1,4	9,0	28,0	12,0	19,0	15,0	10,0	7,0
12	4461692	5711623	HG-Hg_1	10YR 4/2	0-25	Ap	59,2	0,2	1,3	20,4	93,7	1,4	n. n.	n. n.	129,8	0,5	1,1	2,1	1,7	5,8	0,0	51,7	5,2	2,3	7,7	7,0	n. n.	6,0	24,0	18,0	19,0	16,0	9,0	8,0
13	4455175	5709982	HG-Pö_1	2.5YR 3/6	0-25	Ap	40,8	16,8	0,1	4,1	60,8	3,1	1,0	16,9	213,8	2,3	n. n.	n. n.	0,4	27,1	0,1	26,5	4,0	3,6	7,3	6,8	0,2	n. n.	1,0	12,0	28,0	25,0	20,0	15,0
14	4455411	5710016	HG-Pö_2	2.5YR 3/6	0-25	Ap	105,9	5,8	0,2	1,7	54,2	2,5	0,7	13,5	192,3	4,5	0,0	99,9	0,6	55,4	0,1	10,4	2,6	3,8	7,4	6,8	0,2	n. n.	2,0	13,0	23,0	25,0	21,0	16,0
15	4462169	5712614	VS-Ad_1	10YR 4/2	0-25	Ap	1.431,3	0,4	13,0	2,0	6.487,4	0,4	0,1	99,9	312,5	0,5	0,3	5,0	n. b.	n. b.	0,1	12,5	32,8	3,4	7,7	7,1	1,3	8,0	24,0	16,0	17,0	16,0	11,0	7,0
16	4461877	5712745	VS-Ad_2	10YR 4/1	0-25	Ap	694,8	0,1	n. b.	n. b.	184,0	0,6	n. b.	n. b.	544,0	0,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	23,2	2,1	8,0	7,2	3,0	11,0	22,0	15,0	15,0	15,0	11,0	8,0
17	4462860	5716005	VS-Be_1	10YR 4/3	0-25	Ap	1.123,0	0,3	12,7	0,2	948,8	1,2	1,3	12,5	1.142,6	0,5	1,1	2,2	5,6	1,3	0,2	11,0	29,8	4,4	7,6	7,0	2,3	7,0	22,0	20,0	17,0	16,0	10,0	7,0
18	4464150	5720062	VS-Gö_1	10YR 4/2	0-25	Ap	989,2	0,1	13,1	0,4	2.343,2	0,5	3,6	12,7	2.623,2	1,1	5,2	0,5	8,3	0,6	0,7	4,1	36,7	4,0	7,4	7,1	6,4	9,0	24,0	14,0	18,0	16,0	9,0	7,0
19	4464174	5720051	VS-Gö_2	10YR 4/2	0-25	Ap	1.451,0	1,0	6,0	1,0	3.112,8	0,4	3,9	4,1	2.686,8	0,7	33,4	1,3	16,6	0,8	0,9	4,5	52,3	5,7	6,9	6,6	3,9	14,0	23,0	13,0	17,0	15,0	9,0	7,0
20	4468053	5722941	VS-He_1	10YR 4/2	0-25	Ap	1.050,3	0,7	10,3	0,7	1.183,6	0,9	1,5	15,1	2.090,0	0,3	4,6	0,7	7,9	1,2	0,3	6,8	8,1	2,6	7,9	7,4	10,5	13,0	24,0	12,0	20,0	13,0	7,0	8,0
21	4468204	5722830	VS-He_2	10YR 4/2	0-25	Ap	1.209,4	0,3	5,9	1,3	1.264,5	0,3	1,9	14,2	2.436,4	0,6	15,2	0,9	8,3	1,4	0,6	3,4	21,9	2,6	7,8	7,1	14,9	n. n.	3,4	13,9	29,7	23,9	15,1	14,1
22	4463047	5711733	VS-Hg_1	10YR 5/4	0-25	Ap	1.439,0	0,4	20,7	0,6	128,6	1,2	1,0	23,5	347,0	2,0	0,4	7,0	2,4	3,4	0,1	18,0	31,7	3,4	7,5	7,2	6,9	10,4	40,4	4,2	17,5	13,0	8,1	6,2
23	4463877	5716538	VS-KI_1	10YR 4/2	0-25	Ap	2.841,0	0,7	13,1	0,8	1.780,2	0,1	1,2	10,1	4.684,1	1,4	13,5	0,7	14,4	1,4	0,3	3,0	24,6	4,1	7,7	7,4	8,4	n. n.	5,0	13,0	30,0	23,0	15,0	13,0
24	4454868	5711203	VS-Pö_1	10YR 4/1	0-25	Ap	2.247,6	0,6	33,3	0,8	870,4	0,4	1,0	24,6	425,0	2,1	0,1	25,0	1,8	5,8	0,1	15,0	29,5	3,6	7,7	7,4	20,1	n. n.	3,0	12,0	29,0	24,0	17,0	15,0
25	4468739	5725396	VS-Sa_1	10YR 3/2	0-25	Ap	2.195,5	0,2	8,3	0,3	1.464,4	0,6	10,1	27,9	4.436,0	0,9	12,8	0,7	18,1	2,9	0,2	5,4	36,5	4,9	7,5	7,2	18,6	n. n.	8,0	17,0	29,0	21,0	13,0	12,0
26	4463959	5709011	VS-Wi_1	10YR 4/1	0-25	Ap	1.181,8	0,7	6,2	0,1	863,6	0,6	0,9	1,6	2.668,8	1,1	9,3	0,3	8,9	1,3	0,3	6,5	25,7	3,8	7,5	6,9	1,9	n. n.	1,0	9,0	36,0	27,0	16,0	12,0
27	4461764	5712694	VoS-Ad_1	10YR 4/3	0-25	Ap	82,9	0,3	n. n.	n. n.	92,9	1,2	n. n.	n. n.	145,5	0,3	n. n.	n. n.	0,4	2,7	n. n.	n. n.	6,8	2,3	7,7	6,9	n. n.	5,0	22,0	19,0	19,0	15,0	10,0	8,0
28	4462169	5712570	VoS-Ad_2	10YR 4/2	0-25	Ap	428,8	0,4	2,6	6,0	82,4	2,3	0,1	99,9	313,2	1,7	0,3	6,1	0,6	3,1	0,1	29,1	16,9	3,5	7,0	6,0	n. n.	8,0	24,0	17,0	14,0	16,0	13,0	9,0
29	4462859	5715996	VoS-Be_1	10YR 4/3	0-25	Ap	379,0	0,8	4,0	0,6	622,0	2,1	0,8	8,0	1.074,0	3,0	0,5	5,5	5,8	5,3	0,2	5,3	11,2	2,3	7,7	7,1	0,9	5,0	21,0	18,5	17,0	16,0	11,5	8,0
30	4464111	5720080	VoS-Gö_1/2	10YR 4/3	0-25	Ap	186,8	0,4	1,2	8,5	270,0	0,6	1,8	15,4	447,6	1,6	5,3	0,8	3,2	3,3	0,4	6,4	4,0	3,4	6,2	5,8	1,4	7,0	27,0	17,0	18,0	16,0	9,0	6,0
31	4468069	5722937	VoS-He_1	10YR 4/3	0-25	Ap	232,2	1,2	1,9	3,4	299,0	0,7	1,1	25,1	664,6	0,9	0,5	2,7	2,9	0,6	0,2	10,3	27,8	2,4	8,0	7,3	1,2	3,0	29,0	16,0	18,0	16,0	10,0	8,0
32	4468189	5722885	VoS-He_2	10YR 4/3	0-25	Ap	208,3	0,4	0,5	4,4	327,3	0,7	1,0	19,5	712,2	0,2	12,4	2,5	3,1	2,1	0,4	3,0	1,3	2,6	6,5	5,8	0,9	n. n.	0,3	9,0	36,9	25,3	15,2	13,3
33	4463073	5711738	VoS-Hg_1	10YR 5/4	0-25	Ap	174,0	1,0	1,8	2,9	121,3	1,2	1,0	25,7	338,0	1,0	0,3	3,7	1,4	3,2	0,1	36,2	3,3	3,2	7,4	7,1	n. n.	10,9	45,2	2,7	15,9	12,1	7,2	5,6
34	4463906	5716558	VoS-KI_1	10YR 4/2	0-25	Ap	478,3	0,6	3,0	3,4	402,7	0,5	1,2	9,2	697,1	2,1	2,1	4,1	3,0	3,9	0,1	12,2	14,0	4,1	7,8	7,5	3,2	n. n.	4,0	12,0	31,0	23,5	15,5	14,0
35	4454847	5711172	VoS-Pö_1	10YR 4/1	0-25	Ap	264,6	1,9	0,8	0,7	137,0	0,3	0,8	8,3	340,2	1,7	0,0	7,1	1,7	15,0	0,1	26,9	10,4	4,5	8,0	7,2	8,9	n. n.	4,0	12,0	30,0	24,0	17,0	13,0
36	4468755	5725348	VoS-Sa_1	10YR 4/2	0-25	Ap	613,0	1,0	2,1	0,7	533,4	0,8	0,9	14,4	934,5	0,9	0,4	3,5	5,5	7,8	0,1	45,8	22,7	3,9	7,6	7,1	1,8	n. n.	1,0	11,0	35,0	25,0	16,0	13,0
37	4464006	5709031	VoS-Wi_1	10YR 4/2	0-25	Ap	195,8	3,3	1,0	0,5	231,2	0,3	0,5	23,4	512,1	0,4	0,3	8,8	1,8	8,6	0,1	14,6	6,2	3,2	7,4	6,9	0,5	n. n.	n. n.	8,0	37,0	25,0	15,0	14,0
38	4463007	5712309	V-Ad_1	10YR 5/2	0-25	Ap	1.178,0	1,0	8,7	0,5	270,7	0,5	1,1	16,9	566,3																			

Tab. A 1: Schwermetallgehalte und Bodenparameter der Proben- und Untersuchungsstandorte (Fortsetzung)

Nr.	HW	RW	Probentyp	Munsell Farbtafel (trocken)	Tiefe (cm)	Horiz.	Kupfer				Blei				Zink				Cadmium				Skel. (%)	o. S. (%)	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	CaCO <sub>3</sub> (%)	GS (%)	MS (%)	FS (%)	GU (%)	MU (%)	FU (%)	T (%)
							KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>													
							mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA												
55	4462120	5712949	P-Ad_1/1	10YR 5/3	0-25	Ap	1.840,0	0,2	14,0	0,7	583,8	3,6	0,4	99,9	1.701,0	2,0	2,3	0,6	n. b.	n. b.	0,2	22,6	12,1	n. b.	7,4	7,0	1,6	n. n.	2,0	12,0	36,0	27,0	13,0	10,0
56	4462120	5712949	P-Ad_1/2	10YR 4/1	30-50	jC	5.832,4	0,1	30,8	0,2	3.517,2	0,8	3,0	6,2	4.101,7	1,3	36,3	0,2	n. b.	n. b.	0,6	2,2	54,3	n. b.	7,8	7,3	7,3	n. n.	3,2	14,0	36,6	26,6	11,3	8,3
57	4462120	5712949	P-Ad_1/3	10YR 6/6	70-90	C	57,9	0,5	0,7	22,4	33,4	2,7	1,0	23,3	186,6	0,7	0,3	6,8	n. b.	n. b.	0,1	13,0	n. n.	n. n.	8,0	7,1	2,1	n. n.	n. n.	7,0	45,4	25,8	9,4	12,4
58	4462144	5712963	P-Ad_2/1	7.5YR 4/2	0-30	Ap	1.237,0	0,4	22,0	0,6	339,8	0,4	0,9	15,2	562,0	2,0	0,1	6,4	n. b.	n. b.	0,1	9,9	13,3	n. b.	7,9	7,3	5,9	n. n.	2,0	11,0	37,0	26,0	14,0	11,0
59	4462144	5712963	P-Ad_2/2	7.5YR 5/2	30-45	jC	3.227,3	0,3	88,2	0,3	435,9	1,4	1,1	7,9	618,3	1,8	0,9	2,5	n. b.	n. b.	0,2	2,9	33,2	n. b.	7,9	7,4	18,5	n. n.	0,6	9,3	39,4	27,5	12,1	11,2
60	4462144	5712963	P-Ad_2/3	7.5YR 6/2	45-60	jC	695,5	0,2	15,2	0,5	50,5	2,7	0,2	99,9	198,4	2,1	0,6	5,5	n. b.	n. b.	0,1	16,1	3,4	n. b.	8,0	7,4	1,0	n. n.	0,0	5,8	41,8	28,9	12,1	11,4
61	4462144	5712963	P-Ad_2/4	7.5YR 6/4	60-95	C	34,8	1,9	0,2	25,0	24,4	3,8	1,4	14,6	155,4	1,8	1,0	3,5	n. b.	n. b.	0,2	7,0	2,6	n. b.	8,2	7,1	n. b.	n. n.	0,0	6,0	43,1	26,6	9,8	14,5
62	4462144	5712963	P-Ad_2/5	10YR 6/4	95-150	C	22,4	1,5	0,3	5,9	40,3	2,7	0,7	30,9	206,0	5,8	0,3	5,2	n. b.	n. b.	0,1	5,9	0,8	n. b.	8,4	7,5	9,1	n. n.	0,6	10,0	42,9	23,0	9,9	13,6
63	4462255	5712982	P-Ad_3/1	10YR 5/3	0-30	Ap	204,0	1,0	1,6	0,7	121,1	1,4	0,8	16,2	233,0	4,0	0,4	7,9	n. b.	n. b.	0,2	6,6	5,9	n. b.	7,7	7,1	0,2	n. n.	n. n.	8,0	38,0	27,0	15,0	12,0
64	4462255	5712982	P-Ad_3/2	10YR 6/4	30-60	C	26,1	0,3	0,2	10,0	25,7	5,2	0,8	13,4	135,6	1,0	0,2	12,2	n. b.	n. b.	0,1	13,9	8,5	n. b.	8,2	7,3	n. b.	n. n.	0,0	5,6	43,6	26,8	10,6	13,5
65	4462255	5712982	P-Ad_3/3	10YR 6/6	60-90	C	19,4	1,3	0,3	9,6	24,8	8,6	0,5	33,8	130,9	2,2	0,3	1,4	n. b.	n. b.	0,1	20,6	7,8	n. b.	8,3	7,3	n. b.	n. n.	n. n.	8,4	45,2	23,8	9,2	13,4
66	4462255	5712982	P-Ad_3/4	7.5YR 6/4	90-110	jC, C	27,1	0,7	0,3	12,3	42,3	2,4	0,3	44,2	128,7	7,9	0,3	5,8	n. b.	n. b.	0,1	32,6	15,8	n. b.	8,2	7,3	0,2	n. n.	0,1	9,2	42,5	24,2	10,3	13,8
67	4462255	5712982	P-Ad_3/5	10YR 6/4	110-130	Cc	22,4	1,4	0,3	7,2	34,5	3,9	0,7	47,1	121,9	8,5	0,3	5,5	n. b.	n. b.	0,1	40,9	3,5	n. b.	8,5	7,7	7,0	n. n.	n. n.	6,8	39,9	27,1	11,8	14,3
68	4462255	5712982	P-Ad_3/6	7.5YR 6/4	130-140	Cc	30,5	2,1	0,4	11,3	59,0	3,7	1,0	36,8	162,4	4,8	0,3	2,2	n. b.	n. b.	0,1	7,5	12,7	n. b.	8,6	7,8	12,3	n. n.	1,4	12,9	42,8	20,0	9,5	13,5
69	4462255	5712982	P-Ad_3/7	10YR 6/4	140-170	Cc	25,2	1,9	0,4	7,2	40,3	6,2	0,2	99,9	163,3	4,7	0,4	7,2	n. b.	n. b.	0,1	31,5	7,8	n. b.	8,5	7,8	11,2	n. n.	0,1	11,3	48,4	19,4	8,8	12,1
70	4462255	5712982	P-Ad_3/8	10YR 5/4	170-200	Cc	22,4	0,7	1,2	1,5	100,4	1,5	n. n.	n. n.	269,0	0,5	1,0	1,2	n. b.	n. b.	0,1	44,5	11,4	n. b.	8,3	7,7	34,1	n. n.	0,9	13,2	45,8	22,6	7,3	10,2
71	4462255	5712982	P-Ad_3/9	2.5Y 5/3	200-250	Cc	8,4	2,8	0,6	6,4	235,9	0,9	0,2	99,9	604,1	0,2	0,6	2,3	n. b.	n. b.	0,2	7,2	6,5	n. b.	8,2	8,1	73,9	n. n.	1,4	12,6	46,9	24,0	6,1	9,0
72	4462623	5712542	P-Ad_4/1	10YR 4/1	0-20	Ap	1.260,1	1,0	13,8	0,1	208,7	0,6	0,7	28,1	456,1	0,9	0,6	2,1	2,4	0,5	0,2	17,0	25,7	4,0	7,7	7,1	2,3	14,0	20,0	12,0	18,0	15,0	11,0	8,0
73	4462623	5712542	P-Ad_4/2	10YR 5/1	20-30	jC	2.109,0	0,3	21,6	1,5	321,5	0,3	1,1	20,5	515,6	0,1	0,6	2,2	2,7	4,3	0,2	5,0	49,6	4,1	7,8	7,2	2,6	14,2	21,9	9,9	16,8	14,7	10,6	8,3
74	4462534	5712596	P-Ad_5/1	10YR 4/2	0-20	Ap	334,0	0,5	2,5	2,0	126,8	0,3	1,3	21,0	277,0	1,0	0,7	3,2	n. b.	n. b.	0,2	18,1	14,2	3,5	7,9	7,1	1,9	13,0	27,0	11,0	18,0	16,0	10,0	7,0
75	4462534	5712596	P-Ad_5/2	10YR 5/2	20-30	Ah	294,1	0,3	1,9	4,6	127,3	0,9	1,4	6,4	275,8	1,3	0,3	4,7	n. b.	n. b.	0,1	8,9	8,4	3,1	8,1	7,3	2,4	8,8	28,0	11,3	17,8	15,4	10,6	8,2
76	4462534	5712596	P-Ad_5/3	10YR 5/2	30-40	Ah	247,4	0,5	1,9	3,7	119,7	0,5	1,2	16,3	299,9	0,6	0,4	0,8	n. b.	n. b.	0,2	15,1	3,2	2,9	8,2	7,3	2,4	6,5	24,1	16,5	18,2	15,2	10,5	9,0
77	4462534	5712596	P-Ad_5/4	10YR 6/4	40-50	Ah	28,6	0,8	0,6	6,0	23,0	6,5	0,7	15,6	118,3	3,1	0,6	1,0	n. b.	n. b.	0,1	30,0	0,3	1,2	8,4	7,4	6,0	7,4	15,9	20,1	20,0	16,6	8,6	8,8
78	4462534	5712596	P-Ad_5/5	10YR 6/4	50-60	Bv	18,6	0,5	0,8	8,2	21,5	4,2	0,8	22,0	70,3	1,5	0,9	1,2	2,4	1,4	0,1	14,5	0,3	0,8	8,5	7,6	15,6	13,4	22,8	10,2	18,0	19,2	7,8	7,5
79	4462644	5712524	P-Ad_6/1	10YR 5/4	0-25	Ap, jC	1.069,1	0,3	n. b.	n. b.	284,1	0,5	n. b.	n. b.	451,1	0,7	n. b.	n. b.	8,9	0,6	n. b.	n. b.	36,6	1,9	7,8	7,2	41,5	n. n.	1,9	10,7	33,6	28,2	13,8	5,8
80	4462644	5712524	P-Ad_6/2	10YR 4/3	30-60	jC	2.110,8	0,3	n. b.	n. b.	318,2	0,5	n. b.	n. b.	447,7	2,4	n. b.	n. b.	9,6	1,0	n. b.	n. b.	12,1	2,0	7,8	7,1	10,8	n. n.	0,1	8,2	32,2	27,6	17,8	7,8
81	4462644	5712524	P-Ad_6/3	10YR 4/3	bei 90	jC	3.028,3	0,3	n. b.	n. b.	654,9	2,4	n. b.	n. b.	623,5	1,1	n. b.	n. b.	9,8	1,2	n. b.	n. b.	36,9	0,2	8,5	8,0	47,4	0,2	6,3	14,3	34,7	20,1	10,4	6,1
82	4462644	5712524	P-Ad_6/4	10YR 6/4	120	jC, Cc	26,1	1,6	n. b.	n. b.	89,9	2,5	n. b.	n. b.	65,8	1,5	n. b.	n. b.	9,9	0,4	n. b.	n. b.	37,0	1,5	8,1	7,6	44,6	n. n.	1,1	10,0	30,2	28,0	15,7	7,4
83	4462644	5712524	P-Ad_6/5	10YR 5/4	130	Cc	12,9	0,6	n. b.	n. b.	78,4	3,4	n. b.	n. b.	80,3	1,9	n. b.	n. b.	2,5	0,7	n. b.	n. b.	n. n.	0,5	8,3	7,3	3,3	n. n.	0,0	5,8	19,0	27,9	24,4	12,4
84	4462644	5712524	P-Ad_6/6	2.5YR 7/3	150-160	Cc	17,7	2,2	n. b.	n. b.	29,2	5,8	n. b.	n. b.	76,5	2,3	n. b.	n. b.	3,7	2,4	n. b.	n. b.	0,4	0,7	8,3	7,4	13,3	n. n.	n. n.	6,4	39,3	27,1	12,1	7,4
85	4462644	5712524	P-Ad_6/7	10YR 6/4	110	Cc	22,0	0,5	n. b.	n. b.	34,8	3,6	n. b.	n. b.	70,3	0,7	n. b.	n. b.	3,7	7,4	n. b.	n. b.	14,6	0,3	8,3	7,6	46,5	n. n.	2,2	14,6	26,2	22,5	14,9	8,3
86	4463422	5715945	P-Be_1/1	10YR 4/4	0-25	Ap	1.532,4	2,3	3,3	1,0	979,8	0,1	1,0	17,2	2.618,9	2,1	3,8	0,5	6,6	2,5	0,2	2,5	7,6	3,1	7,9	7,2	3,8	n. n.	1,0	10,0	35,0	24,0	16,0	13,0
87	4463422	5715945	P-Be_1/2	7.5YR 4/1	25-55	jC	1.270,1	0,9	17,8	1,8	2.619,6	0,2	1,1	7,8	6.187,2	1,7	46,0	0,5	17,9	1,3	0,5	3,0	11,6	2,5	8,2	7,5	10,0	n. n.	1,2	10,2	31,4	25,2	16,6	15,4
88	4463422	5715945	P-Be_1/3	10YR 6/6	55-70	Cc	44,9	14,3	0,3	4,4	52,8	5,6	0,4	16,2	404,3	2,2	0,4	5,1	2,3	4,4	0,1	36,5	1,0	1,0	8,5	7,8	14,4	n. n.	0,1	7,7	37,2	27,0	12,4	15,7
89	4467397	5722758	P-He_1/1	10YR 3/2	20 ü. EOF	OO	1.439,2	0,4	8,4	0,5	4.313,5	4,0	7,5	0,6	15.140,9	5,8	58,4	1,3	n. b.	n. b.	4,1	0,2	34,9	n. b.	7,1	7,0	10,6	n. n.	6,0	19,8	37,3	20,2	9,3	7,4
90	4467397	5722758	P-He_1/2	10YR 4/4	0-15	rAh	458,3	0,3	4,2	1,7	720,7	2,2	3,1	3,7	3.412,3	1,1	21,7	1,3	n. b.	n. b.	2,0	0,7	9,0	n. b.	7,4	7,1	2,4	n. n.	n. n.	8,4	38,3	25,8	14,6	13,0
91	4467397	5722758	P-He_1/3	10YR 6/6	15-25	rBv	13,7	6,3	0,3	9,7	17,1	4,5	1,4	14,4	145,3	3,9	0,3	5,2	n. b.	n. b.	0,2	1,5	n. n.	n. b.	7,6	7,3	n. b.	n. n.	n. n.	8,0	48,1	23,7	9,1	11,1
92	4467397	5722758	P-He_1/4	10YR 7/4	25-40	Cc	8,3	1,4	0,4	9,8	24,3	1,1	0,5	61,9	146,5	2,0	0,3	8,4	n. b.	n. b.	0,1	21,3	n. n.	n. b.	8,0									

Tab. A 1: Schwermetallgehalte und Bodenparameter der Proben- und Untersuchungsstandorte (Fortsetzung)

Nr.	HW	RW	Probentyp	Munsell Farbtafel (trocken)	Tiefe (cm)	Horiz.	Kupfer				Blei				Zink				Cadmium				Skel. (%)	o. S. (%)	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	CaCO <sub>3</sub> (%)	GS (%)	MS (%)	FS (%)	GU (%)	MU (%)	FU (%)	T (%)	
							KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		KW		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>														
							mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA	mg/kg	RSA													mg/kg
110	4462231	5711065	P-Hg_1/1	7.5YR 5/4	0-25	Ap	84,6	0,3	0,6	7,0	86,6	1,9	1,0	12,3	147,0	0,5	0,2	3,1	1,7	4,5	0,1	9,8	8,5	2,5	7,9	7,2	1,3	9,0	26,0	15,0	18,0	15,0	10,0	7,0	
111	4462231	5711065	P-Hg_1/2	7.5YR 6/4	30-50	Ap	34,4	0,5	0,2	15,4	9,9	4,8	0,7	16,2	72,1	0,6	0,2	3,0	1,3	7,1	0,1	9,3	11,5	1,3	8,3	7,4	0,7	10,3	25,5	13,8	20,6	14,7	8,4	6,7	
112	4463102	5711070	P-Hg_2/1	10YR 5/3	0-25	Ap	321,0	0,3	3,1	1,8	190,0	0,8	1,3	9,8	326,0	1,0	0,3	6,1	n. b.	n. b.	0,2	12,5	31,3	n. b.	8,0	7,2	6,5	n. n.	2,0	11,0	28,0	23,0	19,0	17,0	
113	4463102	5711070	P-Hg_2/2	10YR 3/2	25-40	jC	7.257,5	0,4	95,9	2,2	1.472,1	0,4	0,9	19,1	2.117,0	2,6	7,5	2,0	n. b.	n. b.	0,2	7,2	63,5	n. b.	8,1	7,5	19,6	1,0	17,6	22,0	22,7	16,5	10,3	9,8	
114	4463102	5711070	P-Hg_2/3	10YR 3/2	40-75	jC	4.378,2	0,1	72,2	1,3	990,0	2,2	0,6	44,9	1.315,0	0,9	4,6	1,1	n. b.	n. b.	0,1	24,7	78,4	n. b.	8,2	7,7	29,0	n. n.	5,8	22,0	27,0	21,5	12,7	10,9	
115	4463102	5711070	P-Hg_2/4	10YR 6/4	75-90	jC,C	833,2	0,4	n. b.	n. b.	145,8	1,3	n. b.	n. b.	311,9	1,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. n.	n. n.	79,7	n. b.	8,2	7,6	57,9	n. n.	3,4	18,1	30,3	18,1	13,5	16,6	
116	4463102	5711070	P-Hg_2/5	10YR 3/2	90-115	jC	4.025,8	0,4	53,3	0,1	986,8	2,2	0,5	47,4	1.217,9	2,4	2,6	0,9	n. b.	n. b.	0,1	7,6	76,0	n. b.	8,1	7,6	33,3	0,5	12,4	19,9	23,8	17,6	12,3	13,5	
117	4463102	5711070	P-Hg_2/6	2.5Y 6/4	115-140	Cc	48,1	0,5	0,5	6,1	41,2	3,2	0,3	27,5	133,6	4,7	0,3	8,6	n. b.	n. b.	0,1	18,7	42,0	n. b.	8,5	7,6	23,0	n. n.	1,0	11,7	26,7	22,0	15,9	22,6	
118	4463102	5711070	P-Hg_2/7	2.5Y 6/4	140-160	Cc	48,3	0,4	0,1	12,1	47,9	3,5	0,7	27,4	118,9	4,3	0,2	11,7	n. b.	n. b.	0,1	0,9	66,3	n. b.	8,5	7,6	24,9	n. n.	2,3	14,4	24,4	21,4	16,2	21,3	
119	4463095	5711063	P-Hg_3/1	10YR 5/4	0-30	Ap	158,0	1,0	1,1	3,7	125,0	0,9	1,1	15,3	269,0	2,0	0,3	3,4	n. b.	n. b.	0,2	7,9	2,4	n. b.	8,2	7,4	10,6	n. n.	1,0	10,0	28,0	24,0	19,0	18,0	
120	4463095	5711063	P-Hg_3/2	10YR 5/4	30-50	Bv	27,9	1,2	0,4	11,8	47,9	6,0	0,5	44,3	116,7	3,0	0,4	7,6	n. b.	n. b.	0,1	19,0	39,1	n. b.	8,3	7,5	44,3	n. n.	0,3	11,4	28,6	25,7	18,0	16,0	
121	4463095	5711063	P-Hg_3/3	10YR 6/4	50-70	Cc	16,8	2,0	0,3	6,5	53,2	3,9	0,1	99,9	77,6	6,8	0,4	2,2	n. b.	n. b.	0,0	99,9	30,5	n. b.	8,4	7,9	75,5	n. n.	2,2	27,9	36,2	15,0	8,5	10,2	
122	4463095	5711063	P-Hg_3/4	10YR 6/6	70-115	Cc	29,4	2,1	0,1	63,0	55,3	3,5	n. n.	99,9	114,4	2,4	0,2	10,1	n. b.	n. b.	0,1	31,2	45,7	n. b.	8,4	7,8	58,6	n. n.	1,7	22,3	34,8	14,5	10,3	16,5	
123	4462830	5711248	P-Hg_4/1	10YR 5/4	0-15	Ah	67,0	2,3	1,0	2,5	92,4	3,1	0,6	15,8	234,0	2,0	0,4	6,3	n. b.	n. b.	0,1	9,9	59,5	n. b.	7,9	7,2	28,4	n. n.	1,0	9,0	25,0	27,0	20,0	17,0	
124	4462830	5711248	P-Hg_4/2	10YR 6/4	30-40	Bv	62,6	0,6	0,6	8,3	74,9	1,4	0,4	43,3	193,6	0,7	0,5	2,4	n. b.	n. b.	0,0	46,5	34,7	n. b.	8,2	7,5	67,5	n. n.	1,9	11,0	34,8	28,6	10,6	13,1	
125	4462838	5711208	P-Hg_5/1	10YR 5/4	0-25	Ap	108,0	1,0	0,9	9,9	121,9	1,5	1,6	4,0	254,0		0,4	12,7	n. b.	n. b.	0,2	6,1	26,8	n. b.	8,0	7,2	10,7	n. n.	2,0	11,0	28,0	24,0	19,0	16,0	
126	4462838	5711208	P-Hg_5/2	10YR 5/4	40	Bt	75,8	0,3	0,7	7,6	86,4	0,7	0,8	9,0	212,3	3,0	0,4	3,7	n. b.	n. b.	0,1	9,6	17,5	n. b.	8,1	7,1	8,4	n. n.	1,7	7,9	27,0	26,3	20,6	16,6	
127	4462838	5711208	P-Hg_5/3	10YR 5/4	75	C	39,9	0,2	0,5	6,1	46,3	6,8	0,9	11,6	151,6	6,2	0,3	6,0	n. b.	n. b.	0,1	10,5	19,7	n. b.	8,2	7,2	34,8	n. n.	1,2	9,7	29,4	26,5	17,4	15,8	
128	4462823	5711298	P-Hg_6/1	10YR 5/4	0-25	Ah	200,0	1,2	2,6	2,4	140,2	1,2	0,9	24,8	333,0	1,0	0,4	15,9	n. b.	n. b.	0,2	17,8	47,5	n. b.	7,8	7,1	14,3	n. n.	3,0	13,0	35,0	22,0	14,0	12,0	
129	4462823	5711298	P-Hg_6/2	10YR 5/4	50	M	72,9	0,9	0,7	7,8	89,3	0,6	0,8	27,5	198,1	3,4	0,3	3,4	n. b.	n. b.	0,1	9,4	29,4	n. b.	8,1	7,3	18,7	n. n.	0,5	9,3	31,6	26,1	17,1	15,5	
130	4463318	5716548	P-Kl_1/1	10YR 4/3	0-25	Ap	1.272,1	0,7	5,8	0,1	1.376,2	0,3	1,3	8,3	1.442,7	0,5	5,1	0,2	7,1	3,2	0,3	8,8	21,2	3,6	7,4	6,9	2,1	n. n.	2,0	11,0	35,0	25,0	15,0	13,0	
131	4463318	5716548	P-Kl_1/2	2.5Y 3/2	25-60	jC	6.221,9	1,0	41,2	1,3	8.899,2	0,2	3,6	1,9	9.174,7	0,9	26,6	1,5	38,3	0,6	0,5	2,0	65,9	3,9	8,0	7,5	23,1	0,5	19,3	22,3	21,5	16,3	9,8	10,3	
132	4463318	5716548	P-Kl_1/3	10YR 6/6	60-80	C	33,0	17,8	0,1	7,6	38,7	3,9	1,2	7,3	219,9	1,5	0,3	13,2	0,6	18,0	0,1	13,4	0,1	1,5	7,9	6,9	0,2	n. n.	0,1	6,6	46,1	25,4	9,0	12,9	
133	4466187	5710145	P-LE_1/1	10YR 4/1	0-15	A(h)	1.658,9	0,6	5,0	2,6	2.493,9	0,4	12,7	0,6	2.503,1	0,8	16,1	1,8	9,8	2,0	1,0	1,5	1,9	6,6	6,4	5,8	0,5	33,6	30,7	4,4	12,9	9,4	4,9	3,7	
134	4466187	5710145	P-LE_1/2	10YR 6/3	20-30	C	147,9	0,8	5,6	4,1	159,1	1,5	3,0	6,3	202,0	7,7	64,1	0,6	1,4	1,4	0,9	2,6	1,3	2,6	4,7	4,3	0,6	37,4	32,3	2,1	10,0	8,6	5,3	4,1	
135	4466187	5710145	P-LE_1/3	10YR 6/4	40-50	C	109,9	2,1	4,1	6,1	60,8	5,5	0,4	8,7	352,2	4,4	0,7	46,4	1,9	13,7	1,1	1,5	0,9	2,3	4,7	4,2	5,0	44,5	28,1	2,1	9,1	7,7	4,3	3,9	
136	4454767	5711031	P-Pö_1/1	10YR 4/2	0-25	Ap	2.506,3	0,3	37,3	0,9	925,5	0,8	0,8	11,0	338,2	2,7	0,1	59,1	1,8	9,8	0,1	23,1	22,6	3,6	7,8	7,4	20,1	n. n.	2,0	11,0	30,0	25,0	17,0	15,0	
137	4454767	5711031	P-Pö_1/2	10YR 4/1	40-70	Bt/jC	5.610,7	0,5	55,6	11,9	1.580,0	0,6	1,2	6,2	402,7	1,4	0,3	8,5	2,6	4,9	0,1	10,6	31,8	4,1	8,1	7,4	19,4	n. n.	5,3	15,1	27,9	21,8	14,9	15,0	
138	4469001	5725367	P-Sa_1/1	10YR 4/3	0-25	Ap	156,0	0,4	1,6	14,9	158,9	3,0	0,4	47,1	643,9	4,6	0,2	6,8	2,8	10,5	0,1	7,2	4,7	2,1	7,9	7,3	7,6	12,4	25,7	4,7	23,8	16,2	9,9	7,0	
139	4469001	5725367	P-Sa_1/2	10YR 4/4	30-50	Ah	77,1	3,6	1,3	6,7	65,3	2,2	0,1	99,9	503,5	6,2	0,2	13,7	1,2	4,3	0,04	27,5	2,4	1,5	8,1	7,4	4,7	10,4	32,4	3,6	21,0	16,7	8,8	6,7	
140	4469001	5725367	P-Sa_1/3	10YR 5/4	75-80	Ah/Cc	96,2	3,5	1,7	12,0	54,3	1,6	0,2	48,2	585,0	5,3	0,1	24,4	1,3	11,1	0,1	16,1	2,0	1,2	8,0	7,5	8,0	9,9	23,2	4,5	26,6	17,8	9,4	8,2	
141	4469001	5725367	P-Sa_1/4	10YR 6/4	110-150	Cc	23,1	6,9	1,4	13,3	21,0	9,6	0,1	99,9	751,1	3,2	0,1	29,9	0,7	38,4	0,0	15,0	0,1	0,6	8,2	7,7	13,2	10,7	22,4	5,5	29,9	15,3	7,4	8,5	
142	4469001	5725367	P-Sa_1/5	10YR 6/4	150-205	Cc	25,2	23,1	0,9	43,0	24,3	4,1	0,1	99,9	202,5	6,9	0,3	3,5	1,5	7,1	0,0	37,3	n. n.	0,5	8,3	7,7	28,5	9,0	33,1	4,5	24,8	14,6	6,5	7,4	
143	4469001	5725367	P-Sa_1/6	10YR 6/4	215-230	Cc	130,1	2,8	1,3	21,2	109,2	1,0	n. n.	n. n.	1.074,0	1,5	0,8	0,5	5,1	4,5	0,0	99,9	37,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
144	4469001	5725367	P-Sa_1/7	10YR 6/4	230-275	Cc	132,2	5,9	1,2	5,9	179,6	2,1	0,3	36,7	2.138,5	1,0	0,7	2,4	7,1	4,0	0,1	1,9	68,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
145	4469033	5725391	P-Sa_2/1	10YR 5/3	0-30	Ap	292,1	0,4	3,0	20,8	335,4	0,4	0,1	99,9	1.140,9	2,8	0,1	15,9	5,1	1,8	0,1	11,6	4,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
146	4469033	5725391	P-Sa_2/2	7.5YR 6/4	35-95	Cc	30,9	13,7	0,4	47,8	21,7	1,4	0,1	99,9	582,9	3,0	0,1	20,2	1,2	14,1	0,0	28,8	n. n.	0,6	8,4	7,5	22,5	15,3	37,6	4,0	21,2	10,8	4,8	6,1	
147	4469033	5725391	P-Sa_2/3	10YR 6/4	115-130	Cc	29,4	26,1	0,9	31,1	27,4	2,3	0,2	54,4																					

**Tab. A 2: Ausgewählte Schwermetallgehalte in Oberböden der Gemeinden Ahlsdorf, Hergisdorf und Wimmelburg (ARGE TÜV BAYERN - L.U.B. 1991)**

Ort	Lage	Nutzung	Hochwert	Rechtswert	pH-Wert	Pb in mg/kg	Cd in mg/kg	Cu in mg/kg	Zn in mg/kg
Ahlsdorf	Ortslage	Garten	5712455	4463285	7,4	503	3,9	768	887
Ahlsdorf	Weinberg	Acker	5712400	4462775	7,5	217	1,8	311	308
Ahlsdorf	an der Plantage	Acker	5712400	4462255	7,7	1107	7,6	2021	1168
Ahlsdorf	Sommerberg	Acker	5712440	4461775	6,3	134	1,6	149	236
Ahlsdorf	Höhe 303,4	Wiese	5712500	4461205	6,8	124	1,6	109	211
Ahlsdorf	LPG - Weg	Acker	5712560	4462580	7,7	132	1,6	289	222
Ahlsdorf	Winterberg	Acker	5711765	4461540	6,1	68	0,7	72	89
Ahlsdorf	Theodorschacht	Acker	5717795	4464470	6,3	161	2,2	138	370
Hergisdorf	Ortslage	Garten	5711820	4463645	7,4	242	2,4	287	517
Hergisdorf	an der Halde	Acker	5711670	4463170	7,6	196	1,9	298	302
Hergisdorf	an der Bahn	Acker	5711600	4462670	7,7	45	0,5	78	106
Hergisdorf	an der Freileitung	Acker	5711535	4462180	7,2	103	1,4	127	188
Hergisdorf	Höhe 301,4	Acker	5711480	4461680	6,8	69	1,5	72	141
Hergisdorf	Winterberg	Wiese	5711400	4461185	5,9	84	1,5	62	136
Kreisfeld	an der Halde	Acker	5710255	4465030	7,3	313	3,5	386	590
Kreisfeld	Höhe 213,2	Acker	5710250	4464500	7,3	227	3,5	320	399
Kreisfeld	an der Freileitung	Acker	5710240	4464000	7,6	243	2	316	277
Kreisfeld	Blankenheimer Weg	Acker	5710250	4463500	7,4	200	2	320	254
Kreisfeld	an der Bahn	Acker	5710230	4463030	7,6	140	2,4	607	216
Kreisfeld	am Gehöft	Acker	5710235	4462510	6,2	66	0,8	87	101
Kreisfeld	am Wäldchen	Acker	5710245	4461910	5,4	39	0,3	34	62
Wimmelburg	Geflügelfarm	Acker	5709240	4465885	7,7	160	1	156	287
Wimmelburg	hinter der Siedlung	Acker	5709325	4465440	7,3	193	2,9	192	337
Wimmelburg	Gartenanlage	Garten	5709860	4464680	7,7	207	2	231	407
Wimmelburg	an der B80	Acker	5708770	4463775	6,5	180	1,8	335	311
Ziegelrode	am Wäldchen	Wiese	5713820	4462590	7,8	44	3	46	68
Ziegelrode	am Feld	Acker	5714095	4462565	7,8	194	2,1	977	341
Ziegelrode	e 282,6	Acker	5714340	4462060	7,5	138	1,5	242	184

**Tab. A 3: Richt- bzw. Grenzwerte für Blei und Cadmium in Nahrungs- und Futterpflanzen (BUNDESGESUNDHEITSAMT 1990)**

Bewertungskriterium	Kultur	Blei	Cadmium
Lebensmittelrichtwerte der zentralen Erfassungs- und Bewertungsstelle des Bundesgesundheitsamtes (ZEBS-Werte) (mg/kg Frischsubstanz)	Weizenkorn	0,30	0,10
	Roggenkorn	0,40	0,10
	Kartoffel	0,25	0,10
	Blattgemüse (ausgenommen Grünkohl, Küchenkräuter, Spinat)	0,80	0,10
	Grünkohl	2,00	0,10
	Küchenkräuter	2,00	0,10
	Spinat	0,80	0,50
	Sproßgemüse	0,50	0,10
	Fruchtgemüse	0,25	0,10
	Wurzelgemüse (ausgenommen Knollensellerie)	0,25	0,10
	Knollensellerie	0,25	0,20
Grenzwerte der Futtermittelverordnung für Einzelfuttermittel (mg/kg bei einem Restwassergehalt von 12 %)	Beeren-, Kern- und Steinobst	0,50	0,05
	Grünlandaufwuchs, Silomais u. a. Grünfutter, Heu	40	1,0
	andere pflanzliche Einzelfuttermittel (Getreide, Rüben)	10	1,0

Tab. A 4: Ackerschätzungsrahmen (KUNTZE et al. 1994)

Bodenart	Entstehung	Zustandsstufe						
		1	2	3	4	5	6	7
S Sand	D		41–34	33–27	26–21	20–16	15–12	11–7
	Al		44–37	36–30	29–24	23–19	18–14	13–9
Sl(S/IS) anlehmgiger Sand	D		51–43	42–33	34–28	27–22	21–17	16–11
	Al		53–46	45–38	37–31	30–24	23–19	18–13
	V		49–43	42–36	35–29	28–23	22–18	17–12
IS lehmiger Sand	D	68–60	59–51	50–44	43–37	36–30	29–23	22–16
	Lö	71–63	62–54	53–46	45–39	38–32	31–25	24–18
	Al	71–63	62–54	53–46	45–39	38–32	31–25	24–18
	V		57–51	50–44	43–37	36–30	29–24	23–17
	Vg			47–41	40–34	33–27	26–20	19–12
SL(IS/sL) stark lehmiger Sand	D	75–68	67–60	59–52	51–45	41–38	37–31	30–23
	Lö	81–73	72–64	63–55	54–47	46–40	39–33	32–25
	Al	80–72	71–63	62–55	54–47	46–40	39–33	32–25
	V	75–68	67–60	59–52	51–44	43–37	36–30	29–22
	Vg			55–48	47–40	39–32	31–24	23–16
sL sandiger Lehm	D	84–76	75–68	67–60	59–53	52–46	45–39	38–30
	Lö	92–83	82–74	73–65	64–56	55–48	47–41	40–32
	Al	90–81	80–72	71–64	63–56	55–48	47–41	40–32
	V	85–77	76–68	67–59	58–51	50–44	43–36	35–27
	Vg			64–55	54–45	44–36	35–27	26–18
L Lehm	D	90–82	81–74	73–66	65–58	57–50	49–43	42–34
	Lö	100–92	91–83	82–74	73–65	64–56	55–46	45–36
	Al	100–90	89–80	79–71	70–62	61–54	53–45	44–35
	V	91–83	82–74	73–65	64–56	55–47	46–39	38–30
	Vg			70–61	60–51	50–41	40–30	29–19
LT schwerer Lehm	D	87–79	78–70	69–62	61–54	53–46	45–38	37–28
	Al	91–83	82–74	73–65	64–57	56–49	48–40	39–29
	V	87–79	78–70	69–61	60–52	51–43	42–34	33–24
	Vg			67–58	57–48	47–38	37–28	27–17
T Ton	D		71–64	63–56	55–48	49–41	39–30	29–18
	Al		74–66	65–58	57–50	44–36	40–31	30–18
	V		71–63	62–54	53–45	47–40	35–26	23–14
	Vg			59–51	50–42	41–33	32–24	25–14
Mo Moor		54–46	45–37	36–29	28–22	21–16	15–10	

Al = Alluvium (Holozän); D = Diluvium (Pleistozän), z. T. Tertiär; Lö = Löß; V = Verwitterungsboden; g = Gestein, steinig

## **Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht zu haben.

Thomas Oertel

Gera, Oktober 2002

**Lebenslauf**

Name: Thomas Oertel

Anschrift: Marienstraße 53  
06546 Gera

Geburtsdatum: 04. Juni 1969

Geburtsort: Lutherstadt Eisleben

Familienstand: verheiratet, 2 Kinder

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung: 1975-1985 Polytechnische Oberschule Ahlsdorf  
1985-1987 Erweiterte Oberschule Lutherstadt Eisleben,  
Abitur 1987

Wehrdienst: 1987-1989

Tätigkeit: 1990 Südharzmöbel Eisleben - Verpacker

Studium: 1990-1991 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Diplomlehrer  
Fachrichtung Geographie/ Mathematik  
1991-1996 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Studium der Geographie  
Nebenfächer: Geologie und Geobotanik

Studienabschluss: 1996 Diplom-Geograph

Berufliche Tätigkeit: 1996-1999 Promotionsstudent am Institut für Geographie der Martin-Luther-Universität Halle  
2000 Angestellter der Wirtschaftsfördergesellschaft Ostthüringen in Gera

Gera, 2002-09-17