

Christian OPP, Leipzig

## Geographische Beiträge zur Analyse und Bewertung von Formen der Bodenbelastung im Halle-Leipziger Raum

### 1. Einführung

Am Institut für Geographie und Geoökologie Leipzig wurden zwischen 1986 und 1989 im Halle-Leipziger Raum umfangreiche Untersuchungen von Belastungen verschiedener Ökosystemkompartimente durch direkte und indirekte Nutzungseinwirkungen durchgeführt (vgl. AGEN 1991). Im Rahmen eines vom Ministerium für Forschung und Technologie der ehemaligen DDR geförderten Forschungsthemas (F/E-AUFGABE ZF 12 . . . 1989), das die Sachgebiete

- Atmosphärische Deposition und Immission mittels Depositionssammler und Schneemonitoring,
- Stoffbelastung ausgewählter Kulturpflanzen und der Ackerkrume mittels Pflanzen- und Bodenmonitoring,
- Stoffbelastung in den Deckschichten zweier quartärer Grundwasserleiter,
- Belastungen von Böden durch Bodenverdichtungen und Schwermetalle,
- Belastung und Tragfähigkeit von Grünlandstandorten

beinhaltete (vgl. auch Abb. 1), sollten Kriterien zur geoökologischen Bewertung dieser nutzungsbedingten Belastungsformen abgeleitet werden.

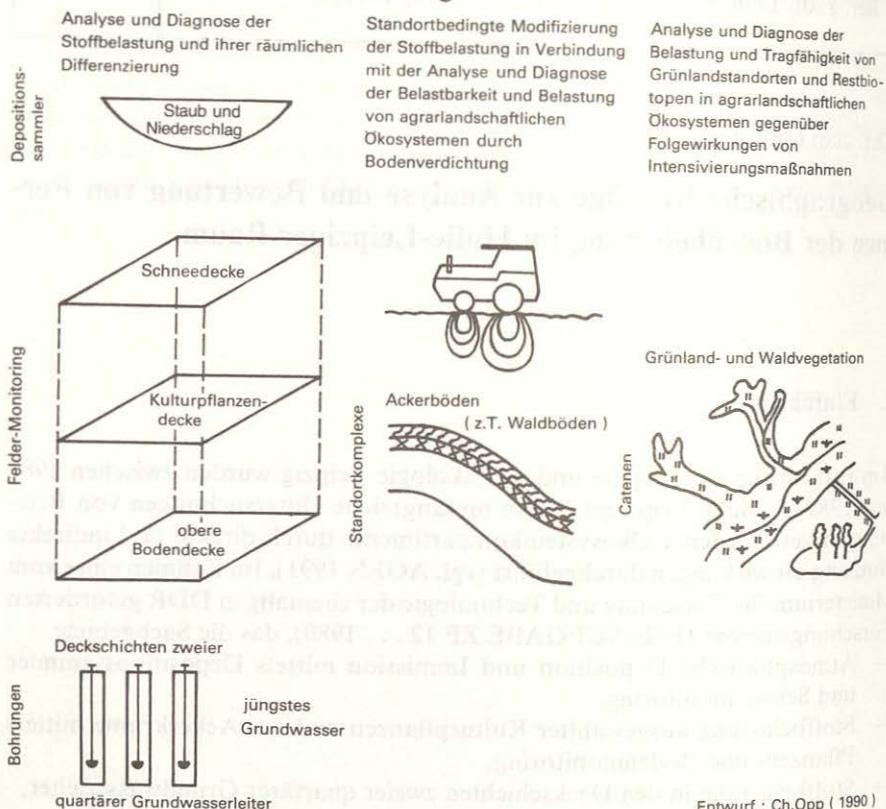
In dem vorliegenden Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse zur Bodenbelastung durch Bodenverdichtungen und durch Schwermetallkontamination aus dem Halle-Leipziger Raum vorgestellt, die im Rahmen der oben genannten Arbeiten ermittelt wurden.

### 2. Untersuchungsraum

#### 2.1 Naturräumliche und wirtschaftsräumliche Merkmale

Naturräumlich gehört das Untersuchungsgebiet zum mitteleuropäischen Lößgürtel. Eine meist nur wenige Dezimeter mächtige äolische Decke aus wechsellagerndem Löß über Moränenablagerungen der Saale-Kaltzeit ist der flächenhaft

Abb. 1: Untersuchungen zur Stoffbelastung und ihrer standort- und ökosystemspezifischen Wirkungen



am meisten verbreitete Standorttyp. Folgende typische Gebietseinheiten kommen im Untersuchungsgebiet vor:

- lößbedeckte Hügel und Platten mit nährstoffreichen Schwarzerdebildungen im Westen,
- sandlöß- und lößbedeckte Hügel und Platten mit nährstoffreichen Braunerdebildungen im Zentrum und Südosten,
- sandbedeckte Hügel und Platten mit nährstoffarmen Böden im Nordosten,
- auelehmbedeckte Talböden mit nährstoffreichen Auenböden in der Saale-, Weiße Elster-, Mulde- und Elbaue und deren Nebenflüssen,
- kippsubstratbedeckte Platten und Talböden, nördlich und südlich von Leipzig, nordöstlich, östlich und südlich von Halle.

Wirtschaftsräumlich gehört der Untersuchungsraum zum mitteldeutschen Ballungsgebiet mit den Kernen Leipzig, Halle und Dessau. Seit dem Bau des Eisenbahnnetzes, erste Hälfte des 19. Jahrhunderts, setzte im Raum Halle-Leipzig eine bedeutende Industrieentwicklung ein, die durch den beginnenden großflächigen Abbau von Braunkohle, Ende des 19. Jahrhunderts, und die darauf

basierende Energiewirtschaft einen erheblichen Entwicklungsimpuls erhielt (SCHOLZ 1977; SCHMIDT 1992). Die DDR weitete den Braunkohlenbergbau, außer in der Niederlausitz auch im Halle-Leipziger Raum noch aus. Neben der Energieerzeugung wurde die Braunkohle vor allem in der chemischen Industrie zur Herstellung von Grund- und Synthesestoffen verwendet. Die in diesem Raum ansässigen Chemiebetriebe zählten zu den größten in der ehemaligen DDR. Zusammen mit anderen Verursachern trugen sie ganz wesentlich zur Umweltbelastung dieses Raumes bei (SCHWARTAU 1987; ÖSEK 1991; ZEUCHNER 1992). Weniger bekannt ist, daß dieser Raum zugleich eines der am intensivsten landwirtschaftlich genutzten Gebiete der ehemaligen DDR war, in dem auch die höchsten Erträge der ostdeutschen Landwirtschaft erzielt wurden (OPP 1991 b).

## 2.2 Ursachen der Bodenbelastung von Freiflächen im Halle-Leipziger Raum

Zirka 70—75 Prozent der Flächen im Halle-Leipziger Raum werden landwirtschaftlich, nur zirka 10—12 Prozent werden forstwirtschaftlich genutzt. Auf diesen Flächen trägt die Landwirtschaft selbst zu einem erheblichen Teil zur Bodenbelastung bei. Eine sehr negative Randbedingung, die die Bodenbelastungen förderte, stellen der generelle Rückgang an landwirtschaftlicher Nutzfläche in den letzten Jahrzehnten, in Verbindung mit der Flurgehölzentblößung und der zeitgleich immer intensiveren Bewirtschaftung von Großschlägen dar. Eine Folge davon ist die Zunahme der Bodenerosion auf den Großschlägen. Der für die Bewirtschaftung großer Schläge erforderliche Einsatz größerer und schwerer Landtechnik führte zumeist zu nachhaltigen Bodenverdichtungen bis in große Tiefe. Das Erfüllen der von der DDR-Landwirtschaftspolitik aufgestellten Planvorgaben erforderte die Applikation großer Mengen an Dünger, Pflanzenschutzmittel, Wachstumsregulatoren, Klärschlamm und Beregnungswasser. Schließlich führte die Trennung von Tier- und Pflanzenproduktion zu immensen Problemen der Gülleverwertung, des -transports und zu zusätzlichen Emissionen.

Atmogene Immissionen in Form von Stäuben, Gasen, Säuren, Aerosolen und Strahlen tragen nicht nur in unmittelbarer Nähe der Emissionsquellen: Kraftwerke, Industrie, Hausbrand, Verkehr, sondern auch im emittentenfernen Umfeld zur Bodenkontamination bei. Begünstigt wird dieser Sachverhalt durch die sehr große Windoffenheit der waldarmen Agrar- und Großtagebaulandschaften des Halle-Leipziger Raumes.

Die vom Flußwasser und den Flußsedimenten, Grundwasser, Abwasser sowie vom Wasser und den Sedimenten der Seen und Tagebaurestlöcher durch Verlagerung ausgehenden „fluvialen“ Immissionen spielen ebenso im Ballungsraum Halle-Leipzig eine bedeutende Rolle. Da die Einzugsgebiete der in den Untersuchungsraum fließenden Flüsse Saale, Weiße Elster, Pleiße, Mulde und Elbe auch in altindustriellen Verdichtungsgebieten liegen, führen sie eine sehr hohe, von

verschiedenen Kontaminanten angereicherte Stofffracht, die sie in den Halle-Leipziger Raum eintragen.

Die im Untersuchungsgebiet vorhandenen industriellen, kommunalen und militärischen Deponien, Altablagerungen und Altstandorte waren und sind bedeutende Kontaminationsquellen für eine Belastung des Bodens und anderer Ökosystemkompartimente.

Geogene Anreicherungen von Schwermetallen treten im Gebiet Eisleben-Helbra-Hettstedt, westlich von Halle, auf, wo kupfererzführende Schichten des Zechsteins oberflächennah vorkommen und über Jahrhunderte hinweg bis 1990 ausgebeutet wurden. Zur geogenen radioaktiven Verstrahlung von Sedimenten, darunter auch der Braunkohle, kommt es in der Leipziger Tieflandsbucht, weil die aus dem sächsischen Erzgebirge und dem ostthüringischen Raum in die Leipziger Tieflandsbucht fließenden Grundwässer radioaktiv angereichert sind.

### 3. Untersuchungsmethodik und -parameter

Die Erfassung der Belastungssituation hinsichtlich Bodenverdichtung und Schwermetallkontamination erfolgte in drei räumlichen Ebenen. Eine zentrale Stellung nahm dabei die Untersuchung sechs sogenannter „Standortkomplexe“ (STK) ein. Diese Testgebiete umfassen mit Ausnahme der Stadt-, Auen- und Kippenböden das typische Standortspektrum zwischen Saale und Elbe im mitteleuropäischen Raum. Jeder STK besteht aus vier bis acht Einzelstandorten, die zumeist in catenaler Anordnung auftreten. Eine erste Ebene der Untersuchungen stellt der räumliche Vergleich zwischen den STK dar. Er wurde sowohl auf Basis des Norm- bzw. Hochflächenprofils eines jeden STK als auch auf Basis der Durchschnittswerte aller zum STK gehörenden Einzelprofile durchgeführt. In einer zweiten Untersuchungsebene wurde die standörtliche Differenzierung innerhalb eines STK, entlang von Catenen, ermittelt. In der dritten Untersuchungsebene wurden die nutzungsintensitäts- und -artbedingten Unterschiede zwischen Standorten mit gleichen natürlichen Standorteigenschaften in der Schlagmitte, am Schlagrand bzw. auf dem Vorgewende und im benachbarten Forst festgestellt. Die Ermittlung der wichtigsten bodenverdichtungsanzeigenden Parameter erfolgte an 250 cm<sup>3</sup>-Stechzylindern in den Profiltiefenbereichen: unterer Oberboden (OB), Krumenbasis (KB) und Unterboden (UB). Die in den Tabellen und Abbildungen für einzelne Profiltiefenbereiche wiedergegebenen Kennwerte: GP1 — schnelldränende Grobporen, GP2 langsam dränende Grobporen, GP — Grobporenvolumen, PV — Gesamtporenvolumen, TRD — Trockenrohdichte und KF — gesättigte, vertikale Wasserleitfähigkeit stellen Mittelwerte aus sechs Parallelproben dar. Die Ermittlung der Schwermetallgesamtgehalte für die Elemente Kupfer, Cadmium, Blei, Chrom, Nickel und Zink erfolgte mittels Atomadsorptionsspektrometer im Königswasseraufschluß an gestörtem Probenmaterial. Als unerlässlich für eine gesicherte Interpretation sowohl der physikalischen als auch der chemischen belastungsanzeigenden Parameter und Kennwerte erwies sich die Ermittlung der Bodenstandarddaten:

Textur, FAT (Ton und Feinschluffgehalt), Humusgehalt, C/N-Verhältnis, T-Wert, V-Wert und pH(KCl)-Wert und die Standort- und Bodenprofilaufnahme (nach BODENKUNDLICHE KARTIER-ANLEITUNG 1982 und TGL 24 300 1978).

Der Interpretation der ermittelten Werte liegen die Norm-, Richt- und Grenzwerte der Tabelle 1 zugrunde. Die vergleichende Auswertung der ermittelten Parameter und Kennwerte — das sind Durchschnittswerte aus Parallelproben — zwischen den Standortkomplexen (STK) erfolgte in der Art, daß der Wert, der die höchste physikalische Belastung bzw. Stoffkonzentration zum Ausdruck bringt, die Wertzahl 1 erhält, der Wert, der die geringste Belastung bzw. Stoffkonzentration zum Ausdruck bringt, die höchste Wertzahl erhält. Die Anzahl der Wertzahlen entspricht stets der Anzahl der zu vergleichenden Standorte bzw. STK.

Tab. 1: Verwendete Norm-, Richt- und Grenzwerte bei der Untersuchung von Bodenverdichtungen und Schwermetallen in Böden

Parameter (Maßeinheit)	empirisch gewonnene Richt- und Grenzwerte						Quelle	
GPI (Vol %) schnell dränende Grobporen	< 10 setzt Ertragsrückgang ein						1	
PV (Vol %) Porenvolumen	< 38 liegt Verdichtung vor						2	
TRD (g/cm <sup>3</sup> ) Trockenrohddichte	> 1,65 liegt Verdichtung vor						3	
KF (m/d) gesättigte vertikale Wasserleitfähigkeit	> 0,1 liegt keine Verdichtung vor						4	
	0,01—0,1 liegt eine mäßige Verdichtung,						4	
	< 0,01 starke Verdichtung vor						4	
Schwermetallgesamtgehalte (in mg/kg)	Cu	Cd	Pb	Cr	Ni	Zn	Quelle	
	Grenzwerte	100(60)	3,0(1,0)	100	100	50	300(150)	5
	Normalgehalte	2—40	<0,5	2—60	5—100	5—50	10—80	6

1 bis 3 nach LIEBEROTH 1982,  
 4 nach WERNER 1985  
 5 nach Klärschlammverordnung der BRD, () in Diskussion befindliche Grenzwerte  
 6 nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1989

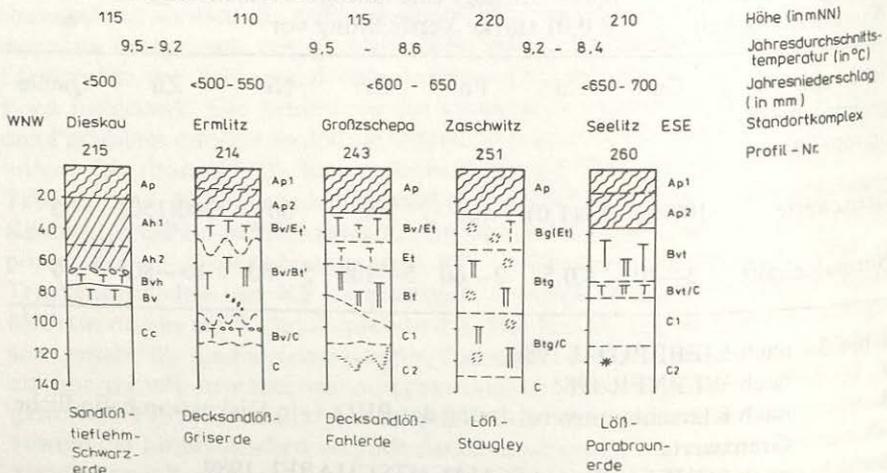
## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Bodenverdichtungsuntersuchungen

#### 4.1.1 Vergleich zwischen den Standortkomplexen

Tabelle 2 zeigt die jeweils im Bereich des Oberbodens (OB), der Krumbasis (KB) und des Unterbodens (UB) ermittelten verdichtungsanzeigenden Parameter und deren Bewertung für typische Böden einer Chorosequenz (vgl. Abb. 2) zwischen dem östlichen Stadtrand von Halle (STK Dieskau) und dem Mittelsächsischen Lößgebiet (STK Seelitz). Die an dieser Sequenz ermittelte Abstufung der durch Verdichtungsprozesse bewirkten Schädigung der Bodenstruktur zeigt eine regelhafte Abnahme des Schädigungsgrades entsprechend der bodengenesischen Reihe von der Schwarzerde über die Griserde, Parabraunerde, Fahlerde bis zum Staugley (Pseudogley). Die Einbeziehung aller Einzelstandorte und der Vergleich zwischen den STK ergab das gleiche Ergebnis (OPP 1989). Auch bei Untersuchungen in Niedersachsen, im Übergangsbereich zwischen Sandlöß und Lößgebieten, unter vergleichbaren Bodenbedingungen, wurde die gleiche Abstufung ermittelt (SAUERBECK 1990). Als Ursachen für die oben genannte Abstufung können die folgenden angesehen werden: Die pedogen stärker vorverdichteten Lessivee-Böden Mittelsachsens weisen homogenere Kornpackungen auf. Dies führt zu einer höheren Abstützwirkung und damit zu einer geringeren Verdichtbarkeit. Außerdem verfügen die ton- und schluffreichen Löß-Lessivee-

Abb. 2: Sequenz typischer Böden der Standortkomplexe von Nordwestsachsen nach Mittelsachsen



Böden über eine höhere Strukturelastizität. Diese bewirkt infolge jahreszeitlich alternierenden Quellen und Schrumpfen eine gewisse Selbstlockerung verdichteter Schichten. Die im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes gelegenen Schwarzerde- und Griserdestandorte weisen dagegen mächtigere humose Horizonte auf, die im oberen Profilbereich über kaum pedogenetisch vorverdichtete Schichten und Horizonte verfügen. Deshalb sowie aufgrund ihrer heterogeneren Kornpackung bzw. der höheren Mischkörnigkeit der Sandlößböden sind sie eher zusammendrückbar und deformierbar.

Tab. 2: Ausgewählte verdichtungsanzeigende Kennwerte und ihre Wertung in einer Sequenz typischer Böden und Standortkomplexe von Nordwestsachsen nach Mittelsachsen

Bodentyp	Schwarzerde STK Dieskau	Griserde Ermlitz	Fahlerde Großzasch.	Staugley Zaschwitz	Parabraunerde Seelitz
<b>pedohydrologische Kennwerte nach Meßbereichen</b>					
<b>Grobporenvolumen 1 (%)</b>					
OB	4	3	8	7	5
OB/KB	2	7	5	9	5
UB	4	10	9	7	3
Mittelwert	3,3	6,6	7,3	7,7	4,3
Wertzahl <sup>1</sup>	1.	3.	4.	5.	2.
<b>Porenvolumen (%)</b>					
OB	34	34	38	46	43
OB/KB	31	35	37	46	43
UB	34	35	39	42	41
Mittelwert	33	34,7	30	44,7	42,3
Wertzahl <sup>1</sup>	1.	2.	3.	5.	4.
<b>Luftkapazität (%)</b>					
OB	4	3	8	12	9
OB/KB	2	7	11	14	9
UB	7	10	13	11	6
Mittelwert	4,3	6,6	10,7	12,3	8,0
Wertzahl <sup>1</sup>	1.	2.	4.	5.	3.

<b>Trockenrohdichte g/cm<sup>3</sup></b>					
OB	1,74	1,74	1,62	1,42	1,50
OB/KB	1,80	1,71	1,66	1,41	1,52
UB	1,71	1,74	1,61	1,56	1,54
Mittelwert	1,75	1,73	1,63	1,46	1,52
Wertzahl <sup>1</sup>	1.	2.	3.	5.	4.
<b>gesättigte Wasserleitfähigkeit (m/d)</b>					
OB	0,011	0,001	0,140	0,047	0,012
OB/KB	0,060	0,005	0,081	0,042	0,006
UB	0,077	0,123	0,246	0,243	0,079
Mittelwert	0,049	0,043	0,156	0,111	0,032
Wertzahl <sup>1</sup>	3.	1.	5.	4.	2.
<hr/>					
Summe d. Wertzahlen	7	10	10	24	15
	1.	2.	4.	5.	3.
<hr/>					

1 Verdichtung von 1. nach 5. abnehmend

#### 4.1.2 Catenale Differenzierung

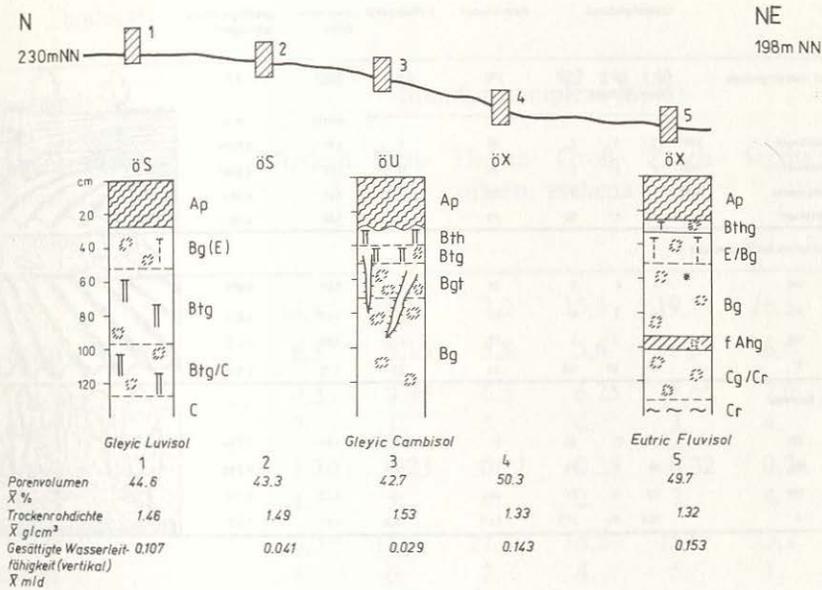
Abbildung 3 zeigt beispielhaft, was ebenfalls an den Catenen der anderen STK festgestellt wurde:

- Das Anfangsglied der Catenen, das Hochflächenprofil, repräsentiert den durchschnittlichen Verdichtungszustand — die „Norm“-Verdichtung des STK und der Catena.
- Catenaglieder, die durch Bodenabtrag gekennzeichnet sind, stellen in der Regel die Standorte mit der stärksten (höchsten) Verdichtung dar.
- Die Endglieder der Catenen, die durch Bodenakkumulation charakterisiert werden können, sind in der Regel die am geringsten verdichteten Standorte. Sie weisen allerdings eine sehr hohe Verdichtungsdisposition bzw. Verdichtbarkeit auf (vgl. OPP 1991 c).

Außerdem wurden an vielen Akkumulationsstandorten markante vertikale Abfolgen stark und weniger stark verdichteter Kolluvien festgestellt.

Begründet kann die vorgefundene Situation der catenalen Differenzierung wie folgt werden: Das Hochflächenprofil stellt innerhalb der Catenen stets den Norm-Typ, das heißt die durch Erosion und Akkumulation unbeeinflusste Ausprägung der jeweiligen standörtlichen Verhältnisse dar (OPP 1985). Dieser Standort reagiert deshalb auch „durchschnittlich“ auf die technikinduzierte Belastung. Die durch Erosion bzw. Materialabtrag charakterisierten Standorte weisen die größte Labilität gegenüber lateralen Scherkräften auf. Die durch den Oberflächenabtrag an die Bodenoberfläche gelangenden, vormalis tieferen dichte-

Abb. 3: Bodenphysikalische Kennwerte der Catena Zschwitz in Mittelsachsen

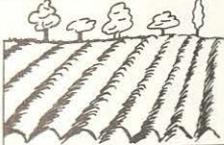


ten Schichten verfügen in der Regel nur über eine sehr geringe Strukturelastizität. Die Senkenstandorte weisen eine hohe Verdichtbarkeit auf, weil die Akkumulation des erosiv verlagerten Bodenmaterials zu einer insgesamt labilen Schichtung und Strukturierung führt. Da sie außerdem innerhalb der Catenen Bodenfeuchtezuschuß-Standorte darstellen, birgt die dort länger anhaltende feuchtebedingt nicht gegebene Befahrbarkeit, insbesondere im Frühjahr, bei Befahrung eine erhöhte Verdichtungsgefahr in sich.

#### 4.1.3 Nutzungsbedingte Differenzierung

Die in Abbildung 4 wiedergegebenen Kennwerte weisen die Ackerstandorte generell als stark schadverdichtet aus. Trotzdem zeigen sowohl jeder einzelne Kennwert als auch die Durchschnittswerte die deutlich stärkere Verdichtung des Vorgewendestandorts gegenüber dem Standort außerhalb des Vorgewendes. Die Tatsache, daß hier Werte des Grobporenvolumens und der Luftkapazität gleich Null auftreten, zeugt davon, daß dieser Teil des Schlages bereits mehr Fahrbahn als Acker ist. Im Gegensatz dazu weisen die Kennwerte des Waldprofils unter den gleichen natürlichen Standortbedingungen einen völlig unverdichteten Boden aus.

Abb. 4: Bodenphysikalische Kennwerte benachbarter Sandlößtieflhm-Schwarzstaugley-Standorte unterschiedlicher Nutzungsintensität

auf dem Vorgeende	Grobporvolumen			Porenvolumen	Luftkapazität	Trassenroh- dichte	gesättigte Wasser- leitfähigkeit	
	GP1 >50µm	GP2 10-50µm	ΣGP	PV	AK	TRD	KF	
	----- % -----					g/ccm	m/d	
Oberboden (OB)	1	1	2	30	1	1,85	0,0004	
Krumenbasis (KB)	0	2	2	28	0	1,92	0,0001	
Unterboden (UB)	3	2	5	29	3	1,88	0,008	
Mittelwert	1,3	1,7	3,0	2,9	1,3	1,88	0,0031	
außerhalb des Vorgeendes								
OB	4	4	8	35	3	1,69	0,001	
KB	3	3	6	35	3	1,68	0,011	
UB	2	3	5	32	2	1,80	0,012	
X	3,0	3,3	6,3	3,4	2,7	1,72	0,008	
im Restwald								
OB	23	11	34	61	25	1,06	1,550	
KB	19	9	28	54	18,5	1,26	0,288	
UB	13	8	21	49	13	1,32	0,210	
X	18,3	9,3	27,7	54,7	18,8	1,21	0,682	

Der Vergleich bodenphysikalischer Kennwerte in der Regel mehr oder weniger stark verdichteter Äcker zu den in der Nähe der STK untersuchten Waldstandorten (wenn vorhanden) der ursprünglich gleichen oder ähnlichen Standortverhältnisse zeigt deutlich, wie weit sich die intensiv genutzten Acker-Ökosysteme von den wenig bzw. quasi nicht genutzten Restwaldökosystemen hinsichtlich des Bodenzustandes „entfernt“ haben. Da im Halle-Leipziger Raum nur noch selten Restwälder des gleichen Standorttyps in der Nähe von Äckern vorkommen, können diese nicht direkt zur Festlegung von Bodenrichtwerten herangezogen werden. Solche Vergleiche geben allerdings wichtige Hinweise zum Ausmaß der Bodenveränderung bzw. zur „Entfernung“ gegenüber dem „ursprünglichen“ Zustand der Böden.

## 4.2 Untersuchung der Schwermetallgehalte in Böden

### 4.2.1 Vergleich zwischen den Standortkomplexen

In Tabelle 3 wurden ausgewählte Ergebnisse von Monitoringuntersuchungen der Jahre 1987 und 1988 in Form von Mittelwerten an den STK zusammengestellt. Dabei wurden durch jeweils 20—25 Stichproben des Oberbodens 1—2 Mischproben je STK gewonnen, die auf Bodenstandarddaten und Schwermetallge-

Tab. 3: Ausgewählte Ergebnisse des 1987er und 1988er Bodenmonitorings an den Standortkomplexen und ihre Wertung (Mittelwerte des Oberbodens)

Bodenstandard- daten Schwermetall- gesamtgehalte (SM <sub>t</sub> ) Wertzahlen (Wz)	Standortkomplexe (STK)					
	Dieskau	Erm- litz	Hohen- prießn.	Groß- zscheпа	Zasch- witz	Seelitz
Ton (%)	18,4	14,5	7,2	15,3	19,1	16,5
pH (KCl)	6,3	5,15	5,8	5,6	6,3	6,6
Cu (mg/kg)	9,3	9,95	6,5	6,25	7,65	7,0
Wertzahl	2.	1.	5.	6.	3.	4.
Cd (mg/kg)	1,22	0,23	0,22	0,35	0,32	0,24
Wertzahl	1.	5.	6.	2.	3.	4.
Pb (mg/kg)	16,5	15,5	21,2	16,5	15,9	23,2
Wertzahl	3.	6.	2.	4.	5.	1.
Ni (mg/kg)	10,3	8,6	1,8	6,4	10,8	8,2
Wertzahl	2.	3.	6.	5.	1.	4.
Zink (mg/kg)	16,5	25,5	59,6	22,35	25,1	26,2
Wertzahl	6.	3.	1.	5.	4.	2.
Summe Wz SM <sub>t</sub>	14	18	20	22	16	15
Wz STK	1.	4.	5.	6.	3.	2.

samtgehalte untersucht wurden (vgl. HAASE et al. 1990). Dieser Überblick zeigt, daß mit Ausnahme des Cadmiumgehaltes am STK Dieskau die Schwermetallgehalte deutlich unter den Grenzwerten (vgl. Tab. 1) liegen. Die Untersuchung der Bodenprofile der Einzelstandorte der STK bestätigte die relativ geringen Schwermetallgesamtgehalte. Sowohl bei den Oberboden- und Krumenbasisgehalten als auch bei den Unterbodengehalten konnte eine direkte Abhängigkeit der Schwermetallgesamtgehalte von den Sorptionseigenschaften der Böden festgestellt werden. So ergab der Vergleich der Hochflächenstandorte, daß die sorptionsstärkeren Böden: Löß-Parabraunerde, Sandlößtieflehm-Schwarzerde und Löß-Stau(Pseudo)gley die relativ höchsten Schwermetallgehalte aufweisen, während die stark sandige Decksandlöß-Fahlerde die geringsten Schwermetallgehalte aufweist.

#### 4.2.2 Catenale Differenzierung

Innerhalb der Catenen der STK wurde erwartungsgemäß eine Stoffanreicherung bei den Kolluvialstandorten gegenüber den Hochflächenstandorten festgestellt, wie das Abbildung 5 zeigt. In dem durch bedeutende bodenerosive Abpflungen gekennzeichneten mittelsächsischen Raum konnte jedoch auch festgestellt werden, daß — bedingt durch den Abtrag des A-Horizontes an den Denudationsstandorten und der dadurch oberflächennahen Lage sorptionsstarker Bt-Horizonte — die relativ höchsten Gehalte einiger Schwermetalle an den Denudationsstandorten auftreten (vgl. Abb. 6).

Abb. 5: Gegenüberstellung ausgewählter Elementgehalte des Hochflächen- (Löß — Parabraunerde) und des Senkenprofils (Kolluvialschluff — Graugley) der Catena Seelitz

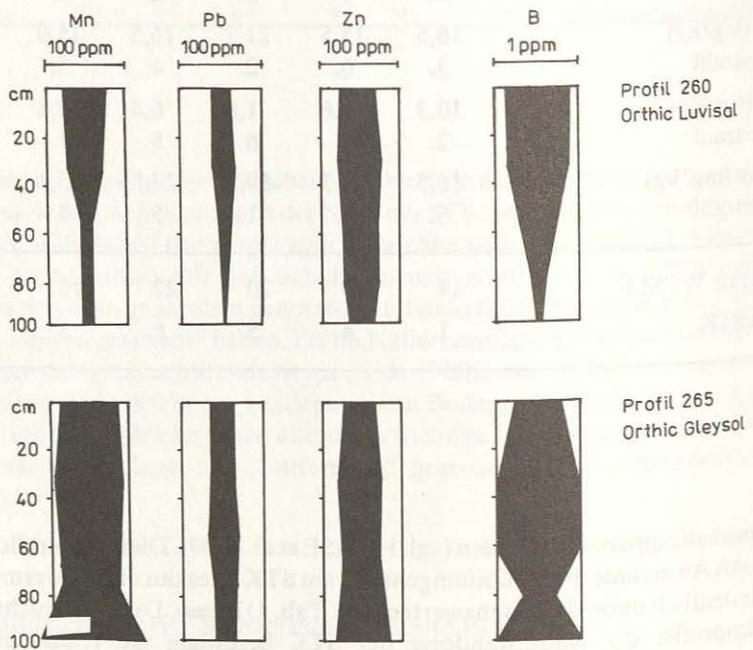
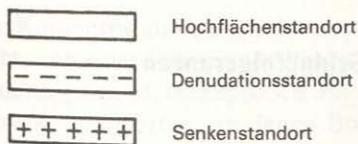
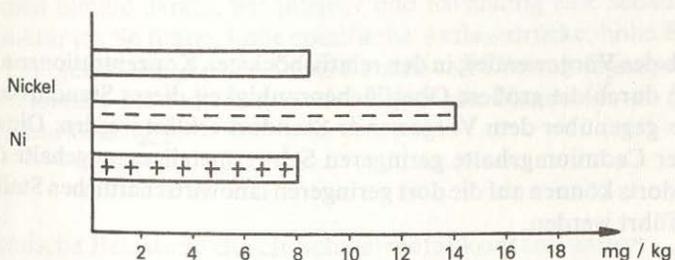
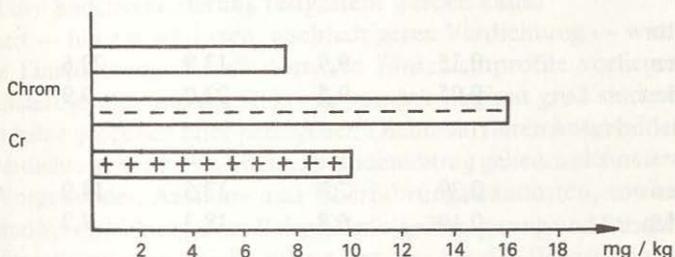
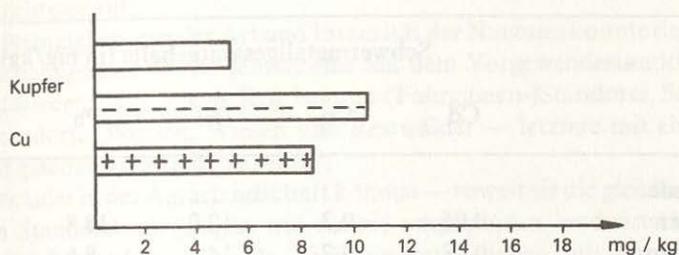


Abb. 6: Kupfer-, Chrom- und Nickelgehalte (1,5 n HNO<sub>3</sub>-Extrakt) der Ap-Horizonte in drei Positionen der Catena Seelitz (Mittelsachsen)



#### 4.2.3 Nutzungsbedingte Differenzierung

An den bereits in Abbildung 4 skizzierten unterschiedlich bzw. unterschiedlich intensiv genutzten Sandlößtieflern-Schwarzgleystandorten wurden ebenfalls Schwermetallgesamtgehalte ermittelt. Tabelle 4 zeigt, daß — mit Ausnahme der Cadmiumgehalte — alle anderen Schwermetalle am Schlagmitte-Standort,

Tab. 4: Ausgewählte Schwermetallgesamtgehalte benachbarter, unterschiedlich intensiv genutzter Sandlößtieflern-Schwarzstaugley-Standorte

Standort	Schwermetallgesamtgehalte (in mg/kg)				
	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Vorgewende</b>					
Oberboden	0,05	9,3	12,0	18,8	40,7
Unterboden	0,08	9,7	14,5	8,6	30,0
<b>Schlagmitte</b>					
Oberboden	0,15	9,9	13,9	22,6	49,4
Unterboden	0,05	9,5	22,0	9,9	36,7
<b>Restwald</b>					
Oberboden	0,39	7,7	13,5	14,9	22,4
Unterboden	0,19	6,8	18,3	7,9	19,1

außerhalb des Vorgewendes, in den relativ höchsten Konzentrationen auftreten. Das kann durch die größere Oberflächenrauigkeit dieses Standort- und Nutzungstyps gegenüber dem Vorgewende-Standort erklärt werden. Die mit Ausnahme der Cadmiumgehalte geringeren Schwermetallgesamtgehalte des Restwaldstandorts können auf die dort geringeren landwirtschaftlichen Stoffeinträge zurückgeführt werden.

## 5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

### 5.1 Physikalische Belastung der Böden durch Verdichtung

Die Höhe und Nachhaltigkeit der flächenhaft verbreiteten Schadverdichtungen beweisen die außerordentlich hohe Belastung und Degradierung der Ackerflächen des Untersuchungsraumes zwischen Saale und Elbe.

Folgende räumliche Verbreitungsmechanismen konnten ermittelt werden:

- Die Sandlöß-Böden östlich von Halle sind stärker verdichtet als die Lößböden Mittelsachsens;
- der Schädigungsgrad der Bodenstruktur nimmt entsprechend der bodengenetischen Reihe: Schwarzerde-Griserde-Parabraunerde-Fahlerde-Stau-(Pseudo)gley ab;
- die durch Bodenabtrag gekennzeichneten Oberhangstandorte sind in der

- Regel am stärksten verdichtet; die Hochflächenstandorte weisen meist einen mittleren, die Unterhangstandorte den geringsten Schädigungsgrad durch Verdichtung auf;
- in Abhängigkeit von der Art und Intensität der Nutzung konnte der höchste Schädigungsgrad der Bodenstruktur auf dem Vorgewendestandort festgestellt werden; dann folgen: Regelspuren-(Fahrgassen-)Standorte, Schlagmitte-Standorte, Weiden, Wiesen und Restwälder — letztere mit einer quasi nicht geschädigten Bodenstruktur;
- Restwälder in der Agrarlandschaft können — soweit sie die gleichen natürlichen Standortbedingungen wie die sie umgebenden landwirtschaftlichen Nutzflächen aufweisen — als „Eichstandorte“ dienen, mit deren Hilfe das Maß der Bodenveränderung festgestellt werden kann.

Modifiziert — hin zur stärkeren, nachhaltigeren Verdichtung — wird die oben genannte Einschätzung überall dort, wo Einsichtprofile vorliegen, wo die Substratheterogenität und die Ackerkrumenmächtigkeit groß sind, wo im Unterboden keine geogenen oder pedogenen Dichtebanden ausgebildet sind, wo die Vorverdichtung gering ist, an durch Bodenabtrag gekennzeichneten Standorten, an Vorgewende-, Auffahr- und Überfahrungsstandorten, sowie an durch Splash- und Spritzwirkung, zum Beispiel infolge Beregnung und Straßenverkehr, beeinflussten Standorten. Nicht zuletzt hat die Art der Bewirtschaftung einen wesentlichen Einfluß darauf, wie intensiv und nachhaltig eine Schädigung der Bodenstruktur ist. So führen hohe spezifische Auflagedrucke, hohe Radlasten, niedrige Fahrgeschwindigkeit und eine Vielzahl von Überrollungen pro Zeiteinheit, insbesondere auf feuchten, nicht tragfähigen Standorten zu besonders starken Schädigungen.

## 5.2 Chemische Belastung durch Schwermetallkontamination

Die festgestellten Konzentrationen der Schwermetalle in den Böden gestatten es in der Regel nicht, von einer Schwermetallbelastung dieser Standorte zu sprechen. Die Bestimmung von Pflanzenproben auf den gleichen Standorten zeigte jedoch, daß selbst an Standorten, an denen Bodengrenzwerte deutlich unterschritten wurden, es zu Grenzwertüberschreitungen in den Pflanzen kommen kann. Dies macht deutlich, daß der hier verwendete Schwermetallgesamtgehalt nur eine begrenzte Aussagefähigkeit besitzt. Er hat jedoch seine Berechtigung bei Überblicksdarstellungen der Grundbelastung eines Gebietes. Die Ableitung und Quantifizierung des aktuellen und potentiellen Gefährdungspotentials schwermetallkontaminierter Böden erfordert sowohl die Bestimmung des pflanzenverfügbaren und austauschbaren (zum Grundwasser verlagerbaren) Anteils an der Schwermetallfraktion als auch die Ermittlung und Kontrolle der die Schwermetallsorption und -desorption beeinflussenden Bodeneigenschaften. Eine Schlüsselfunktion für die Kontrolle des Bodenzustandes, auch nur gering mit Schwermetallen kontaminierter Standorte, nimmt der pH-Wert ein, da er zusammen mit anderen die Sorption und -desorption bestimmenden Bodenmerkmalen ausschlaggebend dafür ist, ob Schwermetalle mobilisiert werden und somit in die

Nahrungskette gelangen können oder ob sie immobilisiert werden (BRÜMMER 1978). Aufgrund der insgesamt relativ geringen Schwermetallkonzentrationen in den untersuchten Böden des Untersuchungsgebietes wurde die Verbreitung höherer bzw. niedrigerer Schwermetallgehalte stets in Abhängigkeit von der Verbreitung besserer bzw. schlechterer Bodensorptionseigenschaften ermittelt.

### 5.3 Ökosystemare Zusammenhänge

Obwohl das Ziel dieser Untersuchungen nicht darin bestand, Zusammenhänge zwischen Bodenverdichtungen und der Schwermetallkontamination von Böden zu analysieren, können doch einige Erkenntnisse als Rückschlüsse aus beiden Untersuchungen gewonnen werden. So wurde festgestellt, daß die am stärksten verdichteten Böden bzw. Bodenschichten nur sehr geringe Schwermetallgehalte aufweisen. Gering bis mäßig verdichtete Böden wirken dagegen als Sorptionsbarriere für Schwermetalle. Auch aus der Literatur ist bekannt (z. B. HORN 1989; KAUPENJOHANN und ZECH 1990), daß bei besonders starker Schädigung der Bodenstruktur das Sorptionsvermögen des Bodens für eingetragene Stoffe, darunter auch Schwermetalle, stark nachläßt.

Die physikalische Deformierung der Bodenstruktur induziert nicht nur physikalische, physiko-chemische und pedo-chemische Veränderungen im Boden. Sie führt auch zur Verschlechterung der Humusqualität im Bereich der Verdichtung. Außerdem behindern Bodenverdichtungen auch die Bodenfauna in der Grabe-, Freß- und Stoffwechselaktivität. Bekannt sind auch die negativen Wirkungen von Bodenverdichtungen auf das Wurzelwachstum und den Pflanzenertrag (OPP 1987; PETELKAU und DANNOWSKI 1989). Daß Bodenverdichtungen auch einen bedeutenden Einfluß auf die Infiltration des Niederschlagswassers und damit auf die Grundwasserbildung haben, konnte mit Versickerungsmessungen nachgewiesen werden (OPP, MÜLLER und JOHN 1989).

Die im Halle-Leipziger Raum infolge der wirtschaftlichen und technologischen Umstrukturierung oder Schließung vieler Industriebetriebe und Kraftwerke innerhalb der letzten zwei Jahre beobachtete deutliche Reduzierung staubhaltiger Immissionen vermindert zwar die Gefahr von Bodenoberflächenverkrustungen, gleichzeitig ist damit aber ein erhöhtes Risiko der Bodenversauerung und damit der Mobilisierung von Schadstoffen verbunden. Letzteres kann auch durch die zeitweise Stilllegung vormals als Äcker genutzter Flächen gefördert werden. Deshalb müssen diese Prozesse der veränderten Bewirtschaftungs- und Stoffeintragsbedingungen auf den verschiedenen Nutzflächen des Halle-Leipziger Raumes kontrolliert und wissenschaftlich begleitet werden. Dazu sind sowohl Überblicksuntersuchungen im mittleren Maßstab in Form von Monitoring, z. B. pH-Wert-Monitoring, als auch standort- und nutzungsspezifische Ökosystemuntersuchungen im großen Maßstab notwendig. Um in beiden Maßstabsebenen bzw. Untersuchungsniveaus effektiv arbeiten zu können, sollten die Untersuchungen mittels eines hierarchisch strukturierten und für geographische Informationssysteme (GIS) algorithmierbaren Indikatorensystems durchgeführt werden.

## Literatur

- AGEN 1991: Ausgewählte geoökologische Entwicklungsbedingungen Nordwestsachsens (ehemaliger Bezirk Leipzig). Institut für Geographie und Geoökologie Leipzig (Hrsg.). Leipzig.
- BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 1982: 3. verbesserte und erweiterte Auflage. Hannover.
- BRÜMMER, G. 1978: Funktion des Bodens im Stoffhaushalt der Ökosphäre. In: G. OLSCHOWSKY (Hrsg.): Natur- und Umweltschutz in der Bundesrepublik Deutschland, Hamburg und Berlin, 111—124.
- F/E-AUFGABE ZF 12.00.27 497 1989: Kriterien zur geoökologischen Bewertung von Flächennutzungsprozessen. Staatsplanthema, Institut für Geographie und Geoökologie der AdW der DDR, Leipzig, (unveröffentlicht).
- HAASE, G., HÄNDEL, L., NAGEL, C., OPP, Ch. und R. ZIERATH 1990: Environmental Impacts by Input of Substances in Landscapes of the District (Bezirk) of Leipzig, Germany. In: *GeoJournal*, 22.2, 153—165.
- HORN, R. 1989: Die Bedeutung der Bodenstruktur für die Nährstoffverfügbarkeit. In: *Kali-Briefe* (Büntehof), 19, 7, 505—515.
- KAUPENJOHANN, M. und W. ZECH 1990: Bodenchemische Veränderungen durch atmogene Säure- und  $\text{NH}_4$ -Einträge in Waldökosysteme: Grenzwerte der Belastbarkeit aus der Sicht des Boden- und Gewässerschutzes. In: *Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Böden*. = Kurzfassungen der VDI-Tagung, Lindau, o. S.
- LIEBEROTH, I. 1982: *Bodenkunde*, 3. Auflage. Berlin.
- OPP, Ch. 1985: Bemerkungen zur Catena-Konzeption unter besonderer Berücksichtigung der eine Catena ausbildenden Prozesse. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 125, 1, 25—32.
- OPP, Ch. 1989: Belastungen landwirtschaftlich genutzter Böden hinsichtlich Verdichtung und Kontamination mit Schwermetallen an ausgewählten Standorten im Bezirk Leipzig. Institut für Geographie und Geoökologie der AdW der DDR, GZ-4-Teilbericht 4. Leipzig (unveröffentlicht).
- OPP, Ch. 1991 a: Analysis of Heavy-metal contents at highly contaminated agricultural sites by way of profile investigations. In: *International East-West-Symposium on contaminated areas in Eastern Europe — origin, monitoring, sanitation*. International Society of Ecotoxicology and Environmental Safety (Hrsg.) Gosen, 146—151.
- OPP, Ch. 1991 b: Umweltprobleme in Agrarlandschaften. Ergebnisse geoökologischer Untersuchungen in den neuen Bundesländern. In: *Geographische Rundschau*, 43, 10, 597—605.
- OPP, Ch. 1991 c: Actual problems of loadability and load in Agroecosystems. In: *Ekologia* (CSFR), Vol. 10, No. 4, 373—388.
- OPP, Ch., MÜLLER, E. and A. JOHN 1989: Effects of the cultivation of large fields with special regard to its influence on infiltration and soil erosion. In: *Proceedings of the International Conference Soil Conservation and Environment*. Piestany Spa (CSFR), 109—110.

- OPP, Ch., STACH, J. and G. HANSCHMANN 1992: Load on differently used soils by heavy metals within the highly contaminated area of Bitterfeld (FRG). In: Science of the Total Environment (in press).
- ÖSEK 1991: Ökologisches Sanierungs- und Entwicklungskonzept Leipzig/Bitterfeld/Halle/Merseburg. Langfassung. Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.). F+E-Vorhaben des Umweltbundesamtes 104 02 803.
- SAUERBECK, D. 1990: Mündliche Mitteilung. — Braunschweig.
- SCHEFFER, F. und R. SCHACHTSCHABEL 1989: Lehrbuch der Bodenkunde. 12. neubearbeitete Auflage. Stuttgart.
- SCHOLZ, D. 1977: Die industrielle Agglomeration im Raum Halle-Leipzig zwischen 1850 und 1945 und die Entstehung des Ballungsgebietes. In: Halle-sches Jahrbuch für Geowissenschaften, 2, Halle, 87—116.
- SCHWARTAU, G. 1987: Umweltprobleme in einem alten Industrievier — der Ballungsraum Halle-Leipzig. In: Geographische Rundschau, 39, 11, 628—632.
- TGL 24 300 1978: Fachbereichsstandard: Standortaufnahme von Böden. Berlin.
- WERNER, D. 1985: Raddruckbedingte Strukturschäden in Löß-Schwarzerden der DDR. In: Erhöhung der Wassernutzung im Boden und durch die Pflanze zur Steigerung und Stabilisierung der Erträge in der Pflanzenproduktion. = Tag.bericht Nr. 231 der AdL der DDR, 285—296.
- ZEUCHNERS, S. 1992: Sanierung der alten Industrieregion Halle/Leipzig/Bitterfeld — Erfahrungen aus der Ruhrgebietspolitik. — Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik e. V., — 2/1992, Bochum.