

Texte

**30**  
**07**

ISSN  
1862-4804

## Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung

Umwelt  
Bundes  
Amt 

Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 202 33 305 und 202 74 271  
UBA-FB 001017



## Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung

von

**Dr. W. Kördel** (Projektleitung und Koordination der Teilvorhaben)  
**Dr. M. Herrchen, Dr. J. Müller**

Bearbeitung Teilvorhaben Bodenuntersuchung und Teilvorhaben Stoffuntersuchung  
(hier: Analytik organischer Schadstoffe in Sekundärrohstoffdüngern außer  
Klärschlamm)

Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Oekologie  
(Fh-IME), Schmallenberg

**Dr. S. Kratz, Dr. J. Fleckenstein, Prof. Dr. E. Schnug**

Bearbeitung Teilvorhaben Stoffuntersuchungen

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Bundesforschungsanstalt für  
Landwirtschaft (FAL), Braunschweig

**Dr. Saring, Dr. J. Thomas (bis 31.12.2004), H. Haamann**

Bearbeitung Teilvorhaben Bodenuntersuchungen

C.A.U. Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich mbH, Dreieich

**Dr. Reinhold**

Bearbeitung ergänzender Teile zum Teilvorhaben Stoffuntersuchungen

Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH, Werder / OT Phöben

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist als Download  
unter der Adresse [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)  
sowie als Printfassung verfügbar.

Die in dem Bericht geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

**Herausgeber:** Umweltbundesamt  
Postfach 14 06  
06813 Dessau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

**Redaktion:** Fachgebiet II 2.6  
Ines Vogel

Dessau, Juli 2007

# **Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung**

## Teil I: Stoffuntersuchungen

FKZ: 202 33 305

## Teil II: Bodenuntersuchungen

FKZ: 202 74 271

Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (Fh-IME)  
57392 Schmallenberg

Projektleitung und Koordination der Teilvorhaben:  
Dr. W. Kördel

Bearbeitung Teilvorhaben Bodenuntersuchung  
und

Teilvorhaben Stoffuntersuchung (hier: Analytik organischer Schadstoffe in  
Sekundärrohstoffdünger außer Klärschlamm):

Dr. M. Herrchen  
Dr. J. Müller

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)  
38116 Braunschweig

Bearbeitung Teilvorhaben Stoffuntersuchungen:

Dr. S. Kratz  
Dr. J. Fleckenstein  
Prof. Dr. E. Schnug

C.A.U. Gesellschaft für Consulting und Analytik im  
Umweltbereich mbH63303 Dreieich

Bearbeitung Teilvorhaben Bodenuntersuchungen:

Dr. Saring  
Dr. J. Thomas (bis 31.12.2004)  
H. Haamann

Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH  
Am Phöbener Bruch 2c

14542 Werder / OT Phöben

Bearbeitung ergänzender Teile zum Teilvorhaben Stoffuntersuchungen:  
Dr. Reinhold

# 1 Zusammenfassung

## Hintergrund

In Deutschland werden in der Landwirtschaft in großem Maßstab Düngemittel eingesetzt. Neben Nährstoffen und organischer Substanz werden jedoch auch Schwermetalle und organische Schadstoffe eingetragen, deren Frachten aus Vorsorgegründen auf solch ein Maß begrenzt werden müssen, dass es zu keiner Anreicherung kommen kann. Eine Abfallverwertung auf Böden wird jedoch nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Einerseits ist auf die Nützlichkeit der Verwertung durch die in den Materialien enthaltenen Nährstoffe und die organische Substanz hin zu weisen, andererseits ist zu betonen, dass diese positiven Effekte nur dann eintreten können, wenn strenge Grenzwerte für Schadstofffrachten festgelegt werden.

Um dies zu erreichen, bedarf es einer systematischen Zusammenstellung von Gehalten von anorganischen und organischen Schadstoffen in den Düngern und parallel dazu in den landwirtschaftlich genutzten Böden. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, in welchem Maße die in Düngern befindlichen Schadstoffe zu einer Beeinträchtigung der Qualität der landwirtschaftlichen Böden führen können.

## Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel des Gesamt-Vorhabens ist zum einen die Bereitstellung aktueller Datensätze zu organischen und anorganischen Schadstoffen in Düngemitteln und ein Abgleich der ermittelten Konzentrationen mit bestehenden Grenz- und Richtwerten. Dies bedeutet für Metalle und ihre Verbindungen eine Aktualisierung der Boysen-Studie sowie die erstmalige umfassende Datenerhebung für organische Schadstoffe. Zum anderen sollen ausreichende Datensätze zu über Dünger in landwirtschaftlich genutzte Böden eingetragenen und sich dort ggf. anreichernden Schadstoffen erhoben werden. Ziel ist dabei die Bereitstellung von validen Informationen zur möglichen Beschränkung dieser Schadstofffrachten. Der Schwerpunkt liegt hier bei den organischen Schadstoffen, während Metalle und ihre Verbindungen, über die bereits Informationen vorliegen, im Sinne von Referenzsubstanzen mit erhoben werden.

## Zusammenfassung der Ergebnisse

### Gehalte von organischen und anorganischen Schadstoffen in Düngern

Die derzeit geltenden Grenzwerte der DüMV werden von den phosphatfreien auf dem Markt angebotenen Mineraldüngern weitgehend eingehalten. Eine Ausnahme bildet auf den ersten Blick lediglich die Gruppe der Kalkdünger, wobei hier nur einzelne Sondertypen durch besonders hohe Schwermetallgehalte herausragen. Eine andere Situation herrscht bei den phosphathaltigen Düngemitteln vor; hier kann es bisweilen zu Kennzeichnungswert-überschreitungen kommen. Schlussfolgerungen hinsichtlich der Gültigkeit der Daten der Boysen-Studie werden vor dem Hintergrund der heterogenen Datenlage nicht vorgenommen.

Als wichtigstes Ergebnis beim Vergleich von Daten über konventionelle und ökologische Wirtschaftsdünger ist festzuhalten, dass sich anhand der bisherigen Datenlage zwischen beiden Systemen nur für Kupfer sowie mit Einschränkungen für Zink, wo sich für konventionelle Wirtschaftsdünger bei Rindern, Schweinen und Geflügel fast durchweg höhere Gehalte zeigen als

für ökologische, Unterschiede feststellen ließen. Die vom UBA vorgeschlagenen Bewertungswerte für Schwermetalle werden für As, Cd, Cr, Ni und Pb im Mittel von allen Tierarten unterschritten. Anders ist dies bei Zn und Cu, hier werden die vorgeschlagenen Bewertungswerte bei Wirtschaftsdüngern von Schweinen und Geflügel bereits im Mittel überschritten.

Die Grenzwerte der AbfklärV für Schwermetalle in Klärschlamm werden von deutschen Schlämmen in der Regel mehr oder weniger weit unterschritten. In Einzelfällen können bei Extremwerten Grenzwertüberschreitungen vorkommen. Erwartungsgemäß höhere Schwermetallgehalte zeigt die Klärschlammasche. Auch die schutzgutbezogen abgeleiteten und vorsorgeorientierten Vorschläge des UBA für die Bewertung von Schwermetallen in Klärschlamm werden hinsichtlich Cd, Cr, Ni und Pb problemlos eingehalten; für Hg, Cu und Zn werden sie im Mittel von allen betrachteten Schlammtypen mehr oder weniger deutlich überschritten. Die Grenzwerte der AbfklärV für PCB und PCDD/F werden von deutschen Schlämmen in der Regel unterschritten, für die anderen organischen Schadstoffe sind bisher in Deutschland keine Grenzwerte definiert. Auf EU-Ebene wurden Grenzwerte für PCB und PCDD/F (entsprechen der AbfklärV), PAK, NP(EO), LAS und DEHP zur Diskussion gestellt. Für PAK, NP(EO) und LAS können diese oftmals nicht eingehalten werden, die Einhaltung des vorgeschlagenen Grenzwertes für DEHP scheint dagegen anhand der bisherigen Datenlage unproblematisch. Für Organozinnverbindungen wurden in einer aktuellen Studie des LUA NRW Grenzwertbereiche für MBT, DBT und TBT formuliert. Die aktuelle Datenlage zeigt, dass diese von allen drei Verbindungen regelmäßig überschritten werden. Für MKW existiert bisher weder ein gültiger Grenzwert noch ein Vorschlag für einen solchen.

### **Gehalte von Schadstoffen in landwirtschaftlichen Böden unter verschiedenen Düngeregimen**

Beprobt wurden insgesamt 32 verschiedene Flächen. Dabei handelte es sich um mit Klärschlamm gedüngte Flächen mit verschiedenem Anbau sowie entsprechende Kontrollflächen ohne Klärschlammaufbringung, jedoch mit anderen Düngevarianten wie auch Aufbringung von Wirtschaftsdüngern. Kontrollflächen im strengen Sinn, das heißt Flächen komplett ohne Düngeraufbringung, standen nicht zur Verfügung. Die gewählten Kontrollflächen zeichneten sich durch räumliche Nähe zur mit Klärschlamm gedüngten Fläche sowie durch vergleichbare Bodeneigenschaften aus.

#### Schadstoffkonzentrationen im Boden und Vergleich mit Triggerwerten

Für die analysierten Metalle und ihre Verbindungen wurde festgestellt, dass die Boden-Beaufschlagungen mit Klärschlämmen in einigen Fällen zu einer geringfügigen Erhöhung der Mittelwerte im Vergleich zu den nicht mit Klärschlamm aber größtenteils mit Wirtschaftsdüngern beaufschlagten Flächen geführt haben. Entsprechend den Ergebnissen der Stoffgehaltsermittlung in Kapitel I können Wirtschaftsdünger durchaus auch hohe Gehalte an Schwermetallen enthalten, insbesondere Kupfer und Zink. Die Klärschlammdüngungen führten bisher jedoch nur in Einzelfällen zu einer solchen Erhöhung der Stoffgehalte, dass Belastungen oberhalb der Vorsorgewerte entstanden. So traten vereinzelt Maximalwerte auf, die etwas oberhalb der Vorsorgewerte für Böden der Bodenarten Sand sowie Lehm/Schluff lagen.

Aus dem analysierten Stoffspektrum organischer Stoffe konnten für die Verbindungen Benzo(a)pyren,  $\Sigma$  PAK nach EPA, Organozinnverbindungen und Moschusverbindungen

Anreicherungen nach Klärschlamm-Aufbringung gefunden werden. Die gefundenen Maximalwerte für Benzo(a)pyren und  $\Sigma$  PAK nach EPA liegen oberhalb der Vorsorgewerte der BBodSchV. Bei den genannten Verbindungen handelt es sich um organische Stoffgruppen, die im Boden persistent sind. Dahingegen wurden hinsichtlich der leicht abbaubaren Chemikalien LAS und Phthalate in den untersuchten landwirtschaftlich genutzten Böden, die mit Klärschlamm beaufschlagt wurden, keine signifikanten Anreicherungen gegenüber den Kontrollflächen ermittelt. Für Nonylphenol und -ethoxylate lagen alle Messungen unterhalb der Bestimmungsgrenze. Das bedeutet, dass das Kriterium der Persistenz eine sehr entscheidende Größe und damit ein wesentliches Element bei der Beurteilung ist. Bei einer Nutzung von Klärschlämmen als Sekundärrohstoffdünger sollte demnach die Persistenz von mengenmäßig wichtigen Stoffen, die über den jeweiligen Pfad (z.B. Kläranlage) entsorgt werden, getestet und in die Betrachtung einbezogen werden. Ebenso ist auch bei anderen organischen Düngern vorzugehen.

### Vergleich von Klärschlamm-gedüngten und anderen Flächen

Ziel des Vergleichs von landwirtschaftlichen Flächen, die mit Klärschlamm auf der einen Seite bzw. anderen Düngern auf der anderen Seite beaufschlagt sind, ist die Identifizierung typischer Schadstoffe, die durch eine Klärschlamm-Aufbringung auf die Fläche gelangen können. Diese Stoffe sind jene, die in der Mehrzahl der betrachteten Flächenvergleiche auf den Klärschlammflächen in höheren Gehalten im Vergleich zu den Kontrollflächen auftreten.

Aus der Auswertung und Gegenüberstellung ging hervor, dass Mono- und Dibutylzinn-Kation und polycyclische Moschusverbindungen typischerweise in den Böden nachgewiesen werden, die mit Klärschlamm beaufschlagt sind. Bei allen anderen untersuchten Schadstoffen bestimmen eher die konkrete Herkunft des Klärschlammes und weniger der Dünger-Typ das Schadstoffspektrum bzw. die eingebrachten Schadstoffe sind im Boden gut abbaubar.

Zusammenfassend wird in Bezug auf die organischen Kontaminanten deutlich:

- Die Gehalte an ubiquitär vorkommenden Kontaminanten wie PCBs liegen in Klärschlämmen nicht wesentlich über den für Böden abgeleiteten Vorsorgewerten, die für PAKs im Mittelwert doppelt so hoch wie die Vorsorgewerte nach BBodSchV. Für PCB wurden keine erhöhten Gehalte im Boden bei den mit Klärschlamm gedüngten Flächen gefunden, für PAK teilweise höhere Gehalte als bei den Kontrollflächen.
- Die Gehalte von im Boden leicht abbaubaren Stoffen auf den mit Klärschlamm gedüngten Flächen unterschieden sich im Gegensatz zu den ursprünglichen Stoffgehalten der Klärschlämme nicht signifikant von denen der Kontrollflächen, da nur in einem Fall die Probenahme relativ zeitnah nach der Klärschlamm-Ausbringung erfolgen konnte. Diese Kontaminanten waren also bereits weitgehend abgebaut. Dies betrifft die Detergentien LAS und NP/NPEO sowie die Phthalate.
- Im Boden der mit Klärschlamm gedüngten Flächen wurden gegenüber den Kontrollflächen in signifikanten Mengen vor allem persistente Kontaminanten identifiziert, die bisher nicht ubiquitär in Böden verteilt sind. Dies sind die im Projekt bestätigten Stoffe aus den Gruppen der Zinnorganika und Moschusverbindungen.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Glossar	5
Hintergrund	9
Zielsetzung und Aufgabenstellung	11
Teil I: Stoffuntersuchungen	
I.1 Literaturrecherche	12
I.2 Erzeugung neuer Daten – anorganische Stoffe	14
I.2.1 Mineralische und organisch-mineralische Handelsdünger	14
I.2.2 Ökologische Wirtschaftsdünger	14
I.2.3 Bioabfallkomposte und Gärprodukte	14
I.3 Erzeugung neuer Daten	15
I.3.1 Gülle	15
I.3.2 Komposte	15
I.3.3 Gärprodukte	15
I.3.4 Mineraldünger	15
I.4 Ergebnisse und Diskussion	16
I.4.1 Mineraldünger	16
I.4.2 Detailbetrachtung verschiedener Phosphordünger	22
I.4.3 Wirtschaftsdünger – Schwermetalle	24
I.4.4 Klärschlamm – Schwermetalle	29
I.4.5 Klärschlamm – organische Schadstoffe	34
I.4.6 Gülle, Kompost, Gärprodukte und Mineraldünger – organische Schadstoffe	44
I.5 Regionale Auswertung der Daten von Bioabfallkompostieranlagen	48
I.6 Bewertung von Gärprodukten – Nährstoffe und Schwermetalle	52
I.7 Bewertung von Abwasserschlammkomposten	56
Teil II: Bodenuntersuchungen	66
II.1 Literaturrecherche	66
II.2 Durchführung der experimentellen Untersuchungen	69
II.2.1 Stoffauswahl	69
II.2.2 Flächenauswahl	71
II.2.3 Flächenbeprobung	72
II.3 Ergebnisse und Diskussion	74
II.3.1 Chemikalien-bezogene Auswertung	74
II.3.1.1 Verteilung der Stoffgehalte	74
II.3.1.2 Ergebnisdiskussion	79
II.3.1.3 Zusammenfassung der experimentellen Befunde	83
II.3.1.4 Einordnung analysierter Schadstoffkonzentrationen in Literaturwerte	83
II.3.1.5 Zusammenfassung: Einordnung analysierter Schadstoffkonzentrationen in Literaturwerte	88
II.3.2 Flächen-bezogene Auswertung	88
II.3.2.1 Ergebnisse der Flächen-bezogenen Auswertung	89
II.3.2.2 Schlussfolgerungen zur Flächen-bezogenen Auswertung	103
II.3.2.3 Zusammenfassung: Flächen-bezogenen Auswertung	104
II.4 Zusammenfassung: Schadstofffrachten und resultierende typische Konzentrationen in landwirtschaftlichen Böden unter verschiedenen Düngerregimen	105

## Glossar

Abkürzung	Vollbezeichnung
1234678 HeCDD	1,2,3,4,6,7,8 - Heptachlordibenzodioxin
1234678 HeCDF	1,2,3,4,6,7,8 - Heptachlordibenzofuran
123478 HxCDD	1,2,3,4,7,8 - Hexachlordibenzodioxin
123478 HxCDF	1,2,3,4,7,8 - Hexachlordibenzofuran
1234789 HeCDF	1,2,3,4,7,8,9 - Heptachlordibenzofuran
123678 HxCDD	1,2,3,6,7,8 - Hexachlordibenzodioxin
123678 HxCDF	1,2,3,6,7,8 - Hexachlordibenzofuran
12378 PeCDD	1,2,3,7,8 - Pentachlordibenzodioxin
12378 PeCDF	1,2,3,7,8 - Pentachlordibenzofuran
123789 HxCDD	1,2,3,7,8,9 - Hexachlordibenzodioxin
123789 HxCDF	1,2,3,7,8,9 - Hexachlordibenzofuran
1-Methylnaphthalin	1-Methylnaphthalin
234678 HxCDF	2,3,4,6,7,8 - Hexachlordibenzofuran
23478 PeCDF	2,3,4,7,8 - Pentachlordibenzofuran
2378 TCDD	2,3,7,8 - Tetrachlordibenzodioxin
2378 TCDF	2,3,7,8 - Tetrachlordibenzofuran
2-Methylnaphthalin	2-Methylnaphthalin
ACE	Acenaphthen
ACY	Acenaphthylen
AHTN	Tonalid®
ANT	Anthracen
As	Arsen
B(a)A	Benzo(a)anthracen = 1,2 Benzanthrazen
B(a)P	Benzo(a)pyren
B(b)FA	Benzo(b)fluoranthen
B(bjk)FA	Benzo(b+j+k)fluoranthen
B(e)P	Benzo(e)pyren
B(g,h,i)P	Benz(g,h,i)perylen
B(k)FA	Benzo(k)fluoranthen
BBP	Benzylbutylphthalat
BG	Bestimmungsgrenze
C.A.U.	Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich mbH, Daimlerstraße 23, 63303 Dreieich
Cd	Cadmium
CHR	Chrysen
Chrys. + Triph.	Chrysen (+ Triphenylen)
Coronen	Coronen
Cr	Chrom
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DBahA	Dibenzo[ah]anthracen
DBP	Dibutylphthalat
DBT	Dibutylzinn-Kation
DEHP	Di-(2-ethylhexyl)-phthalat

DEP	Diethylphthalat
DiB(a,h)A	Dibenz(a,h)anthracen
Dimethylnaphthaline	Dimethylnaphthaline
DMP	Dimethylphthalat
DnBP	Di-n-butylphthalat
DOP	Diocetylphthalat
DOT	Diocetylzinn-Kation
FA	Fluoranthen
Fh-IME	Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie, Auf dem Aberg 1, 57392 Schmallenberg
FLA	Fluoranthen
FLU	Fluoren
GC	Gaschromatographie
Hg	Quecksilber
HHCB	Galaxolid®
HPLC	Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie
I(1,2,3-cd)P	Indeno(1,2,3-cd)pyren
IND	Indeno[1,2,3-cd]pyren
K	Kalium
k.S.m.	keine Summe möglich
LAS	lineare Alkylbenzolsulfonate
MBT	Monobutylzinn-Kation
Methylnaphthaline	Methylnaphthaline
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MOT	Monooctylzinn-Kation
MS	Massenspektrometrie
m <sub>T</sub>	Trockenmasse, Trockengewicht
N	Stickstoff
N Kjeldahl	Stickstoff nach Kjeldahl
NAP	Naphthalin
nb	nicht bestimmt
Ni	Nickel
NP	Nonylphenol
NP1EO	4-Nonylphenol monoethoxylat
NP2EO	4-Nonylphenol diethoxylat
NPE	Nonylphenoethoxylate (Summe)
NPEO	Nonylphenoethoxylate
OCDD	Octachlordibenzodioxin
OCDF	Octachlordibenzofuran
P	Phosphor
P gesamt	Phosphor gesamt
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAK (EPA)	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (nach EPA, 16 Einzelverbindungen)
PAK (EWG)	10 PAK nach 86/275/EWG
PAK (LfU)	24 PAK-Einzelverbindungen nach LfU

PAK (TVO)	Summe PAK nach TrinkwVO (6 Einzelverbindungen)
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCB (6)	polychlorierte Biphenyle (6 Kongenere)
PCB (7)	polychlorierte Biphenyle (7 Kongenere)
PCB-101	polychlorierte Biphenyle-101
PCB-118	polychlorierte Biphenyle-118
PCB-138	polychlorierte Biphenyle-138
PCB-153	polychlorierte Biphenyle-153
PCB-180	polychlorierte Biphenyle-180
PCB-28	polychlorierte Biphenyle-28
PCB-52	polychlorierte Biphenyle-52
PCDD	polychlorierte Dibenzodioxine
PCDD/F	polychlorierte Dibenzodioxine + polychlorierte Dibenzofurane
PCDF	polychlorierte Dibenzofurane
Perylen	Perylen
PHE	Phenanthren
PYR	Pyren
TBT	Tributylzinn-Kation
TBTO	Tributylzinnoxid
TCHT	Tricyclohexylzinn
TCyT	Tricyclohexylzinn-Kation
TeBT	Tetrabutylzinn
TI	Thallium
TM	Trockenmasse
TPhT	Triphenylzinn-Kation
TTBT	Tetrabutylzinn-Kation
U	Uran
Zn	Zink

## Hintergrund

In Deutschland werden in der Landwirtschaft in großem Maßstab Düngemittel (Mineralischer Dünger, Wirtschaftsdünger, Kompost, Klärschlamm und weitere Materialien) eingesetzt. Neben dem Eintrag von Nährstoffen und organischer Substanz werden jedoch auch Schwermetalle und organische Schadstoffe eingetragen. Aus Vorsorgegründen müssen bedenkliche Stoffeinträge auf solch ein Maß begrenzt werden, dass es zu keiner Anreicherung von Schadstoffen kommen kann. So beschloss die Agrar- und Umweltministerkonferenz auf ihrer Sitzung von 13. Juni 2001, dass wegen der besonderen Bedeutung der landwirtschaftlichen Böden für eine Produktion gesunder Nahrungsmittel ... sicher zu stellen (ist), dass es durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (insbesondere Aufbringung von Klärschlamm, Gülle und anderen Wirtschaftsdüngern, mineralischem Dünger und Kompost) zu keiner Anreicherung von Schadstoffen im Boden kommt.

*In ähnlicher Weise äußerte sich der Wissenschaftliche Beirat Bodenschutz in seinem Gutachten zum Thema "Wege zum vorsorgenden Bodenschutz - Fachliche Grundlagen und konzeptionelle Schritte für eine erweiterte Boden-Vorsorge". Nachdrücklich hingewiesen wird auf die Gefahr der Belastung von Böden durch die Verwertung von Düngern. Dabei steht bisher der Eintrag von Schwermetallen und wenigen persistenten organischen Schadstoffen (Dioxine/Furane, PCBs und PAHs) im Mittelpunkt. Insbesondere das Spektrum der organischen Schadstoffe ist dabei jedoch nicht ausreichend und muss durch weitere prioritäre Stoffe ergänzt werden. Der Beirat führt dazu im Einzelnen aus:*

"Materialien und Produkte, die in und auf Böden ein- und aufgebracht werden, können die Böden in positiver und nützlicher Weise verändern oder beeinflussen. Sie können jedoch auch zu einer Beeinträchtigung der natürlichen Bodenfunktionen führen. Im wesentlichen handelt es sich dabei um stoffliche Einwirkungen auf Grund der Schadstoffgehalte der Materialien und Produkte.

Aus Vorsorgegründen sollte die Verwertung von Abfällen in und auf Böden, deren Schadstoffgehalte das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung besorgen lassen, grundsätzlich unterbleiben. Daher empfiehlt der Beirat, die abfallrechtlichen Regelungen für die Verwertung von Klärschlamm und Bioabfällen zu vereinheitlichen und mit dem Schutzgut "Boden" schnellstens zu harmonisieren. Aufgrund der Relevanz organischer Schadstoffe wäre es wünschenswert, dass auch die Vorsorgewerte der BBodSchV für diese Stoffe in den abfallrechtlichen Regelungen berücksichtigt werden. Fachlich nicht nachvollziehbar ist die derzeit ungleiche Behandlung verschiedener organischer "Abfälle zur Verwertung" im Hinblick auf den Untersuchungsumfang der Böden.

Die Anforderungen an die bodenbezogene Verwertung verschiedenartiger Abfälle sollen auf Grundlage einheitlicher Maßstäbe und von harmonisierten Bodenwerten erfolgen. Zulässige Stoffkonzentrationen in unterschiedlicher Höhe können bei den verschiedenen Abfällen zwar fachlich begründbar sein, sie müssen jedoch ein einheitliches Schutzniveau gewährleisten. Der Beirat sieht es daher als erforderlich an, die zur Zeit vorliegenden Anforderungen des vorsorgenden Bodenschutzes und die abfallrechtlichen Anforderungen an die Verwertung von Abfällen (AbfKlÄV, BioAbfV, LAGA Technische Regeln) zu harmonisieren. Der Beirat regt an, die Grundsätze der Vorsorge im Bodenschutz bei der Auf- und Einbringung von Materialien in und auf Böden in allen Anwendungsbereichen einheitlich in einem Regelwerk festzulegen."

Des Weiteren hat die EU-Kommission im September 2006 einen Entwurf der Bodenschutzstrategie vorgelegt. Wesentlicher Punkt des Konzeptes, der das Thema der

Projektes betrifft, ist die Vorsorge zur Erhaltung eines guten Bodenzustandes, damit der Boden seine zahlreichen Funktionen erfüllen kann. Als wesentliche Hauptgefahren für die Bodenqualität werden genannt:

- Bodenkontaminationen durch
  - Nährstoffungleichgewichte in Böden
  - Bodenbelastung durch Düngemittel
  - Verwertung von Abfällen ( z.B. Klärschlamm)
- Rückgang der organischen Substanz durch intensive Bewirtschaftungsformen
- Rückgang der biologischen Vielfalt in Boden bedingt durch Schadstoffeinträge und Bewirtschaftung

Eine Abfallverwertung auf Böden wird nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Einerseits wird auf die Nützlichkeit der Verwertung durch die in den Materialien enthaltenen Nährstoffen und die organische Substanz hingewiesen, andererseits wird betont, dass diese positiven Effekte nur dann eintreten können, wenn strenge Grenzwerte für Schadstofffrachten festgelegt werden.

Für wesentlich wurde auch von EU-Seite eine Harmonisierung der verschiedenen Verordnungen und Richtlinien einschließlich der Einbeziehung bisher nicht geregelter Bereiche zur Erreichung eines vorsorgenden Bodenschutzes angesehen.

Um die verschiedene genannten Ziele zu erreichen, bedarf es einer systematischen Zusammenstellung von Gehalten von Metallen und organischen Schadstoffen in den Düngern und parallel dazu in den landwirtschaftlich genutzten Böden. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, in welchem Maße die in Düngern befindlichen Schadstoffe zu einer Beeinträchtigung der Qualität der landwirtschaftlichen Böden zur Nahrungsmittelproduktion führen können.

Mit dem Konzept „Gute Qualität und sichere Erträge“ haben BMVEL und BMU diese Zielsetzung fachtechnisch umgesetzt. Um Auswirkungen auf die Praxis zu beurteilen und Qualitätsmängel bei den bislang verwendeten Stoffe aufzuzeigen, war die Erhebung einer neuen Datenbasis notwendig geworden.

Im Jahr 1992 hat das Umweltbundesamt mit seiner Studie „Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln“ (UBA-Texte 55/92, bekannt als „Boysen-Studie“) erstmals eine Übersicht der verschiedenen Düngemittel bereitgestellt. Bis heute liegen keine weiteren Studien in dieser Bandbreite vor, auch neuere Studien, die sich mit Schwermetallen in der Landwirtschaft befassen, greifen vielfach auf diese Datenbasis zurück.

Für organische Schadstoffe liegen eine Reihe von Untersuchungen vor, die sich jedoch hinsichtlich ihrer heterogenen Datenbasis nicht einheitlich interpretieren lassen, sondern jeweils bestimmte Aspekte hervorheben. Dabei handelt es sich beispielsweise um Untersuchungen zur Abbaubarkeit und Verlagerung (Fate-Untersuchungen) der Stoffe oder aber generell zu Konzentrationsbereichen in Dünger oder landwirtschaftlich genutztem Boden (zum Beispiel aus Dauerbeobachtungsflächen oder Praxisstandorten).

Das Umweltbundesamt förderte daher nun ein Vorhaben mit dem Titel „Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung“. Aufgabe des Vorhabens war es, zunächst eine fundierte Sammlung der in Deutschland vorliegenden Daten über Gehalte anorganischer und organischer Schadstoffe in Mineraldüngern, Wirtschaftsdüngern und Sekundärrohstoffdüngern sowie in landwirtschaftlich

genutzten Böden zusammen zu stellen und ggf. ergänzende Analysen durchzuführen, soweit Datenlücken identifiziert wurden. Berücksichtigt werden sollten dabei die Schwermetalle Zn, Cu, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Tl und Zn, sowie die organischen Schadstoffe PCB, Dioxine/Furane, PAK, NP/NPEO, LAS, DEHP und DBP, Organozinn-Verbindungen und MKW.

## **Zielsetzung und Aufgabenstellung**

Ziel des Gesamt-Vorhabens ist zum einen die Bereitstellung aktueller Datensätze zu organischen und anorganischen Schadstoffen in Düngemitteln und ein Abgleich der ermittelten Konzentrationen mit bestehenden Grenz- und Richtwerten. Dies bedeutet für Metalle und ihre Verbindungen eine Aktualisierung der Boysen-Studie sowie die erstmalige umfassende Datenerhebung für organische Schadstoffe. Zum anderen sollen ausreichende Datensätze zu über Dünger in landwirtschaftlich genutzte Böden eingetragene und sich dort ggf. anreichernde Schadstoffe erhoben werden. Ziel ist dabei die Bereitstellung von validen Informationen zur möglichen Beschränkung dieser Schadstofffrachten. Der Schwerpunkt liegt hier bei den organischen Schadstoffen, während Metalle und ihre Verbindungen, über die bereits Informationen vorliegen, im Sinne von Referenzsubstanzen mit erhoben werden.

*Entsprechend der Zielsetzung ist das Gesamtvorhaben in zwei Teile, Teil I: Stoffuntersuchungen und Teil II: Bodenuntersuchungen, aufgeteilt. Der vorliegende Text orientiert sich an dieser Aufteilung und präsentiert getrennt für beide Teile die Vorgehensweise, wesentliche Ergebnisse sowie deren Interpretation.*

Teil I, Stoffuntersuchungen, hat schwerpunktmäßig zur Aufgabe, eine Zusammenstellung, Aufarbeitung und Interpretation von bereits verfügbaren Informationen zu erstellen. Ein technisches Hilfsmittel ist dabei eine umfangreiche ACCESS-Datenbank, die statistische Auswertungen erlaubt. Ein kleineres Arbeitspaket beinhaltet die experimentelle Bereitstellung von Daten zu anorganischen und organischen Schadstoffen in Wirtschaftsdünger und Mineraldünger (letzterer nur für organische Schadstoffe).

Teil II, Bodenuntersuchungen, ist in eine kürzere Literaturrecherche mit – in Analogie zu Teil I – entsprechenden ACCESS-Datenbankeinträgen und einen längeren experimentellen Teil zur Erfassung von Stoffgehalten in mit Düngern beaufschlagten landwirtschaftlich genutzten Böden aufgeteilt. Der experimentelle Teil wiederum umfasst die Festlegung des Untersuchungsprogramms (Stoff- und Flächenauswahl), die Durchführung der Untersuchungen sowie die abschließende Auswertung durch Einordnung in die vorliegenden Literaturwerte, durch Vergleich mit Vorsorgewerten sowie die Identifizierung von organischen Leitsubstanzen in landwirtschaftlichen Böden, die auf eine vorangehende Klärschlammaufbringung hinweisen.

## Teil I: Stoffuntersuchungen

### I.1 Literaturrecherche

Zur fachlichen Unterstützung wurde ein Projektbeirat mit Vertretern aus Wissenschaft, Verbänden und Verwaltung berufen. Diesen so wie weiteren möglichen Multiplikatoren wurden von FAL und Fh-IME gemeinsam erstellte Anschreiben mit Leitfäden zur Daten- und Informationsabfrage zugeschickt, der Rücklauf der Briefaktion war allerdings außerordentlich gering wie in Tabelle I.1 dargestellt ist.

Tabelle I.1: Rücklauf auf die Rundschreiben mit Bitte um Datenzulieferung

	Angeschriebene Stellen	davon		
		keine Rückmeldung	abschlägige Antwort	Datenzulieferung (bzw. Zusage)
<i>Projektbeirat</i>	15	7	3	2
<i>Sonstige Institutionen, Verbände und Unternehmen</i>	77	51	18	5 (3)
<i>Landesumweltämter</i>	16	4	1	9 (2)
<b>Summe</b>	<b>108</b>	<b>62</b>	<b>22</b>	<b>15 (6)</b>

Parallel zur Kontaktaufnahme mit Institutionen und Behörden wurde eine Internet- und Literaturrecherche zum Teilvorhaben Stoffuntersuchungen durchgeführt. Einbezogen wurden zum einen Publikationen aus dem In- und Ausland (Monographien, Beiträge in Fachzeitschriften, Forschungsberichte, Internetpublikationen u.ä.) ab ca. 1990 sowie zum anderen von einzelnen Institutionen zur Verfügung gestellte unpublizierte Projektberichte und Datensammlungen („graue Literatur“).

Für die Verwaltung und Auswertung der recherchierten und zur Verfügung gestellten Daten über Schadstoffe in mineralischen und organischen Düngemitteln wurde eine MS Access Datenbank erstellt.

Die Datenbank umfasst mit Stand vom 20.05.2005 7450 Datensätze aus 171 Datenquellen. In die Datenbank wurden auch solche Ausgangsstoffe aufgenommen, die bisher nicht als Düngemittel(ausgangsstoff) zugelassen sind, deren Verwendung aber diskutiert wurde oder wird.

Details sind in der folgenden Tabelle I.2 zusammengefasst.

Tabelle I.2: Art und Anzahl der Datensätze in der Datenbank

<b>Mineraldünger und deren Ausgangsstoffe / Abfallprodukte</b>		<b>1822</b>
davon	aus der Boysen-Studie (1992)	1204
	Rohphosphate	248
	Sonstige Ausgangsstoffe	16
	Abfallprodukte (Phosphogypsum)	4
<b>Tierische Wirtschaftsdünger</b>		<b>281</b>
davon	konventionell	278
	ökologisch	3
<b>Klärschlämme (inkl. Wasserwerksschlämme)</b>		<b>4650</b>
davon	unkompostiert	4616
	Klärschlammkompost	32
	Klärschlammasche	2
<b>Bioabfälle (aus getrennter Sammlung / sonstige)</b>		<b>237</b>
davon	Unkompostierte Ausgangsstoffe	89
	Bioabfallkompost	148
<b>Pflanzliche Stoffe aus Garten- und Landschaftspflege / Zierpflanzenverarbeitung</b>		<b>192</b>
davon	Unkompostierte Ausgangsstoffe	95
	Grüngutkompost	97
<b>Gärrückstände aus Biogasanlagen</b>		<b>5</b>
<b>Grobaschen aus Verbrennung pflanzlicher Stoffe</b>		<b>51</b>
<b>Klärkalke</b>		<b>9</b>
<b>Sonstige</b>		<b>203</b>
<i>Summe Datensätze</i>		<i>7450</i>

Von den 377 Datensätzen zu mineralischen und organisch-mineralischen Handelsdüngern stammen nur 61 aus deutschen Quellen, 100 aus dem europäischen und 216 aus dem außereuropäischen Ausland. Um die Datenlage für den deutsch-europäischen Raum zu aktualisieren, wurde im Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL eine Sammlung aktuell auf dem europäischen Markt befindlicher Handelsdünger angelegt, insgesamt umfasst die Sammlung 65 Proben. Aus der Auswertung der verfügbaren Daten zum Bereich Wirtschaftsdünger ergab sich eine erhebliche Datenlücke für die Inhaltsstoffe ökologischer Wirtschaftsdünger. Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes wurde daher auf die Untersuchung ökologischer Wirtschaftsdünger gelegt.

## **I.2 Erzeugung neuer Daten - anorganische Schadstoffe**

### **I.2.1 Mineralische und organisch-mineralische Handelsdünger**

Von den 1822 Datensätzen zu mineralischen und organisch-mineralischen Handelsdüngern stammen allein 1204 aus der Boysen-Studie von 1992, die ja als Vergleichsbasis für die aktuelle Situation dienen sollte. 248 beschreiben Rohphosphat, 20 sonstige Ausgangsstoffe oder Abfallprodukte (Phosphogypsum) für die bzw. aus der Herstellung P-haltiger Dünger. Von den übrigen 350 Datensätzen stammen nur 61 aus deutschen Quellen, dagegen 100 aus dem europäischen und 216 aus dem außereuropäischen Ausland. Aufgrund dieser unbefriedigenden Datenlage wurde im Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL eine Sammlung aktuell auf dem Markt befindlicher Handelsdünger angelegt. Hierzu wurden zum einen auf dem Markt befindliche Handelsdünger eingekauft, zum anderen wurden auf dem europäischen Markt tätige Düngemittelproduzenten/-vertreiber um Überlassung repräsentativer Muster gebeten. Dieser Bitte kamen nur 5 von 12 angefragten Düngemittelproduzenten/-vertreiber nach, insgesamt umfasst die Sammlung 65 Proben.

### **I.2.2 Ökologische Wirtschaftsdünger**

Aus der Auswertung der verfügbaren Daten zum Bereich Wirtschaftsdünger ergab sich eine erhebliche Datenlücke für die Inhaltsstoffe ökologischer Wirtschaftsdünger. In Absprache mit dem Projektgeber wurde daher vereinbart, einen Schwerpunkt des Projektes auf die Untersuchung ökologischer Wirtschaftsdünger zu legen. Hierzu wurde das Praxis-Forschungs-Netz Ökologischer Landbau, welches in der FAL vom Institut für Ökologischen Landbau, Trenthorst und vom Institut für Betriebswirtschaft, Agrarstruktur und Ländliche Räume zu vielfältigen Forschungszwecken aufgebaut wurde, genutzt. Mit der Durchführung der Probenahme wurde ein externes Unternehmen (Bodenuntersuchungsinstitut Koldingen der Firmengruppe Agrolab) beauftragt, die Mineralstoffanalytik wurde im Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (FAL) durchgeführt. Auf 167 ökologisch wirtschaftenden Betrieben mit Tierhaltung wurden von April bis Juli 2004 500 Wirtschaftsdünger-Proben gezogen, dabei erfolgte schwerpunktmäßig eine Beprobung von Rindvieh, Schweinen, Legehennen und Schafen.

### **I.2.3 Bioabfallkomposte und Gärprodukte**

Auf der Grundlage des vom Umweltbundesamt und der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. beauftragten und durch die Bioplan GmbH erstellten Berichtes zur „Neubewertung von Kompostqualitäten“ - Teilleistung „Bewertung von bis zu 300 Kompostierungsanlagen“ liegen Datenauswertungen für 376 Bioabfallkompostierungs-anlagen vor. Die Ergebnisse der Einzelanlagenauswertungen sind in einem zweiten Bearbeitungsschritt einer regionalen Auswertung unterzogen worden. Eine Kurzfassung dieser Regionalauswertung ist in diesem Bericht enthalten.

Für die Bereitstellung einer Datengrundlage über Schwermetalle in Gärprodukten wurden – ebenfalls durch die Bioplan GmbH - Ergebnisse von Untersuchungen der Jahre 1999 bis 2004 für 97 Vergärungsanlagen (davon 87 Anlagen mit flüssigen und 10 Anlagen mit festen Gärprodukten) mit über 1.200 Datensätzen einer umfangreichen statistischen Auswertung unterzogen. Die in die Auswertung einbezogenen Anlagen stellen etwa 20 % der bundesweit bekannten Vergärungsanlagen. Die Standorte der Vergärungsanlagen sind über die gesamte Bundesrepublik

Deutschland verteilt und gelten als weitgehend repräsentativ für den Stand der Technik. Die auszuwertenden Daten stammen aus Recherchen über den Fachverband Biogas e.V., die Biogas-Union e.V. und die Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.. Eine Kurzfassung der Ergebnisse dieser Auswertungen findet sich in diesem Bericht.

### **I.3 Erzeugung neuer Daten - organische Schadstoffe**

#### **I.3.1 Gülle**

Die Auswahl der Gülleproben erfolgte durch das Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig (FAL) in Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem Fh-IME.

Hinsichtlich der Probenauswahl sollte im Projekt der Schwerpunkt gemäß Empfehlung des Beirates auf die Analyse von Gülle und Festmist gelegt werden. Um gleichzeitig eine Differenzierung möglicher Belastungen hinsichtlich der Betriebsführung zu erhalten, wurden 10 Proben aus konventionellen landwirtschaftlichen Betrieben und 11 Proben aus ökologisch arbeitenden landwirtschaftlichen Betrieben ausgewählt. Die begrenzte Probenauswahl verdeutlicht, dass keine repräsentativen Aussagen möglich sein werden, jedoch wichtige Informationen über Größenordnungen der Schadstoffe in Gülle und ein Vergleich mit anderen Materialien wie Komposte, Gärrückstände und Klärschlämme möglich sein sollte.

Innerhalb der Güllen werden wiederum die Probenarten Rind und Schwein und bei den ökologisch arbeitenden Betrieben zusätzlich Legehennen berücksichtigt und hier – soweit vorhanden – alle Altersstufen.

#### **I.3.2 Komposte**

Die Auswahl der Komposte erfolgte durch Dr. Jürgen Reinhold (Bioplan Potsdam) in Zusammenarbeit mit Dr. Andreas Kirsch von den Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. Die Identität der Proben sowie ihre Charakterisierung ist nur diesen Institutionen bekannt. Untersucht wurden Proben mit den Bezeichnungen K1 bis K10.

#### **I.3.3 Gärprodukte**

Die Auswahl der Gärprodukte erfolgte ebenso wie die der Komposte durch Dr. Reinhold (Bioplan Potsdam) und Dr. Kirsch (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.). Die Proben wurden genommen und geliefert durch die INFU mbH in Neu-Eichenberg (Geschäftsbereich PlanCoTec, Ansprechpartnerin: Frau Marciszyn). Untersucht wurden 9 Proben mit den Bezeichnungen Gär 1 bis Gär 9.

#### **I.3.4 Mineraldünger**

Die Auswahl der Mineraldünger erfolgte durch FAL und Fh-IME in Absprache mit dem Auftraggeber. Diese Probenart war zunächst im Leistungsumfang nicht erhalten. Da jedoch Dünger auf dem Markt sind, die als „umhüllt“ bezeichnet werden oder wie die Probe Nr. MD 18 aus Kakaoschalen, fermentiertem Hühnerdung, Harnstoff und anorganischen Bestandteilen zusammengemischt wurden, sollte anhand von vier Proben zumindest ein erster Einblick gewonnen werden, ob solche Proben in höheren Gehalten organische Schadstoffe enthalten.

## I.4 Ergebnisse und Diskussion

### I.4.1 Mineraldünger

Nach der vorliegenden Auswertung der verfügbaren Daten über Schwermetalle in Mineraldüngern aus 1992-2004 (FAL-Datenbank) werden die derzeit geltenden Grenzwerte der DüMV von den P-freien auf dem Markt angebotenen Mineraldüngern weitgehend eingehalten. Eine Ausnahme bildet auf den ersten Blick lediglich die Gruppe der Kalkdünger, wobei hier nur einzelne Sondertypen, die aus diversen Sekundärrohstoffen wie pflanzlichen Aschen, Klärkalk o.ä. hergestellt werden, durch besonders hohe Schwermetallgehalte herausragen. Herkömmliche Kalkdünger wie bspw. Kohlensäurer Kalk oder Branntkalk liegen dagegen in der Regel deutlich unterhalb der geltenden Kennzeichnungs- und Grenzwerte.

Eine andere Situation herrscht bei den P-haltigen Düngemitteln vor, insbesondere bei Cd, Cr, Ni und Tl kann es hier bisweilen zu Kennzeichnungswertüberschreitungen (Kennzeichnungswerte: Glühphosphat, teilaufgeschlossenes und weicherdiges Rohphosphat, Thomasphosphat, Superphosphat, Triple-Superphosphat) kommen. In einzelnen Extremfällen wird bei Ni und Tl auch der Grenzwert der DüMV überschritten. Der nachträglich in die DüMV eingefügte, für alle Mineraldünger geltende Cd-Grenzwert von 1,5 mg/kg Cd wird von P-haltigen Düngern regelmäßig überschritten. Der derzeitige phosphatbezogene Cd-Grenzwert der DüMV wird zwar im Mittel noch von allen Düngemitteln eingehalten, bei Umsetzung der vom UBA für P-Dünger vorgeschlagenen schutzgutbezogenen Bewertungswerte für P-haltige Mineraldünger (ebenfalls phosphatbezogen) würden jedoch ebenfalls diverse reine P-Dünger sowie verschiedene NPK- und organisch-mineralische Mehrnährstoffdünger oberhalb des Bewertungswertes von 25 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liegen. Dies sollte auch vor dem Hintergrund der im „EU proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council relating to Cd in fertilizers“ vom 31.07.2003 formulierten Erkenntnis gesehen werden, dass nur Dünger mit Cd-Konzentrationen ≤ 20 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> zu keiner Langzeitakkumulation von Cd im Boden führen. Entsprechend schlägt die EU sogar eine schrittweise Reduzierung des Grenzwertes von 60 über 40 bis auf 20 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vor.

Eine eindeutige Schlussfolgerung hinsichtlich der Gültigkeit der Daten der Boysen-Studie erscheint vor dem Hintergrund der heterogenen Datenlage außerordentlich schwierig. Die gezeigten Daten zeichnen sich insbesondere durch enorme Schwankungsbreiten aus, die auf unterschiedliche Ursachen (Herkunft der Ausgangsstoffe, Herstellungsprozess, Extraktions- und Analysenverfahren, Zusammensetzung und Umfang der Stichproben) zurückzuführen sind. Teilweise werden die Daten der Boysen-Studie durch neuere Literatur sowie durch die Mustersammlung der FAL bestätigt, teilweise zeigen sich Abweichungen, die jedoch keine eindeutige Tendenz nach oben oder unten aufweisen.

#### **Fazit:**

Eine repräsentative Untersuchung der auf dem europäischen Markt angebotenen Düngemittel, so wie sie ursprünglich von dieser Studie angedacht war jedoch auf Grund der mangelnden Kooperationsbereitschaft der angefragten Düngemittelproduzenten/-vertreiber nicht zu Stande kam, wäre dringend erforderlich, um ein eindeutiges Bild aktueller Schwermetallgehalte in Mineraldüngern zeichnen zu können.

Zur Veranschaulichung werden ausgewählte Ergebnisse (für Cadmium, Kupfer und Blei) in den folgenden Graphiken dargestellt und diskutiert.

### Cadmium:

Die mittleren Cd-Gehalte in Mineraldüngern bewegen sich zwischen <1 und rund 16 mg/kg. Die Angaben weisen eine sehr hohe Schwankungsbreite auf, wie der obere Teil von Abbildung I.1 anhand der einfachen Standardabweichung zeigt. Wiederum zeigen P-haltige Dünger deutlich höhere Cd-Gehalte als P-freie. Die Kennzeichnungspflicht von 1 mg/kg Cd wird von allen P-haltigen Düngern klar überschritten, von den P-freien dagegen in der Regel unterschritten (eine Ausnahme sind die Kalkdünger). Nachträglich wurde in die Düngemittelverordnung auch ein Grenzwert für Cd in Mineraldüngern eingefügt, dieser liegt bei 1,5 mg/kg Cd. Von den P-haltigen Mineraldüngern wird er ebenso wie der Kennzeichnungswert im Mittel überschritten.

Im Vergleich Boysen / FAL-Datenbank weisen die neueren Daten für Phosphat-, NPK- und NP-Dünger tendenziell niedrigere, für Kalk-, organisch-mineralische und PK-Dünger höhere Cd-Gehalte aus als die Boysen-Daten, was allerdings von den sehr großen Spannweiten relativiert wird.

Neben dem allgemein gültiger Cd-Grenzwert für Mineraldünger ist in der DüMV für P-haltige Dünger ab 5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> zusätzlich ein auf den P-Gehalt bezogener Grenzwert von 50 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> für fertige Produkte bzw. 70 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> für Ausgangsstoffe festgeschrieben. Bei einem P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt von 52% (MAP) entspricht dieser Grenzwert einem Cd-Gehalt von 26 mg/kg, bei 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (TSP, DAP) 23 mg/kg, bei 18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Superphosphat) 9 mg/kg und bei 5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (einige NPK-Dünger) 2,5 mg/kg. Ein Rohphosphat mit einem durchschnittlichen P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt von 32% darf als Ausgangsstoff einen maximalen P-Gehalt von 22,4 mg/kg haben. Die auf P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> bezogenen Cd-Gehalte zeigt Abbildung I.2.

Der Phosphat-bezogene Grenzwert der DüMV wird im Mittel von allen Düngemittelgruppen eingehalten, wobei die organisch-mineralischen Mehrnährstoffdünger mit im Mittel rund 48 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recht nah an den Grenzwert herankommen. Vom UBA wird jedoch in der neuesten Fassung des Konzeptes „Gute Qualität und sichere Erträge“ (Bericht des UBA ans BMU vom 24.06.2003 (unveröffentlicht)) ein nur halb so hoher Grenzwert von 25 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vorgeschlagen. Dieser würde von Phosphat- und NPK-Dünger derzeit deutlich überschritten (Abbildung I.2).

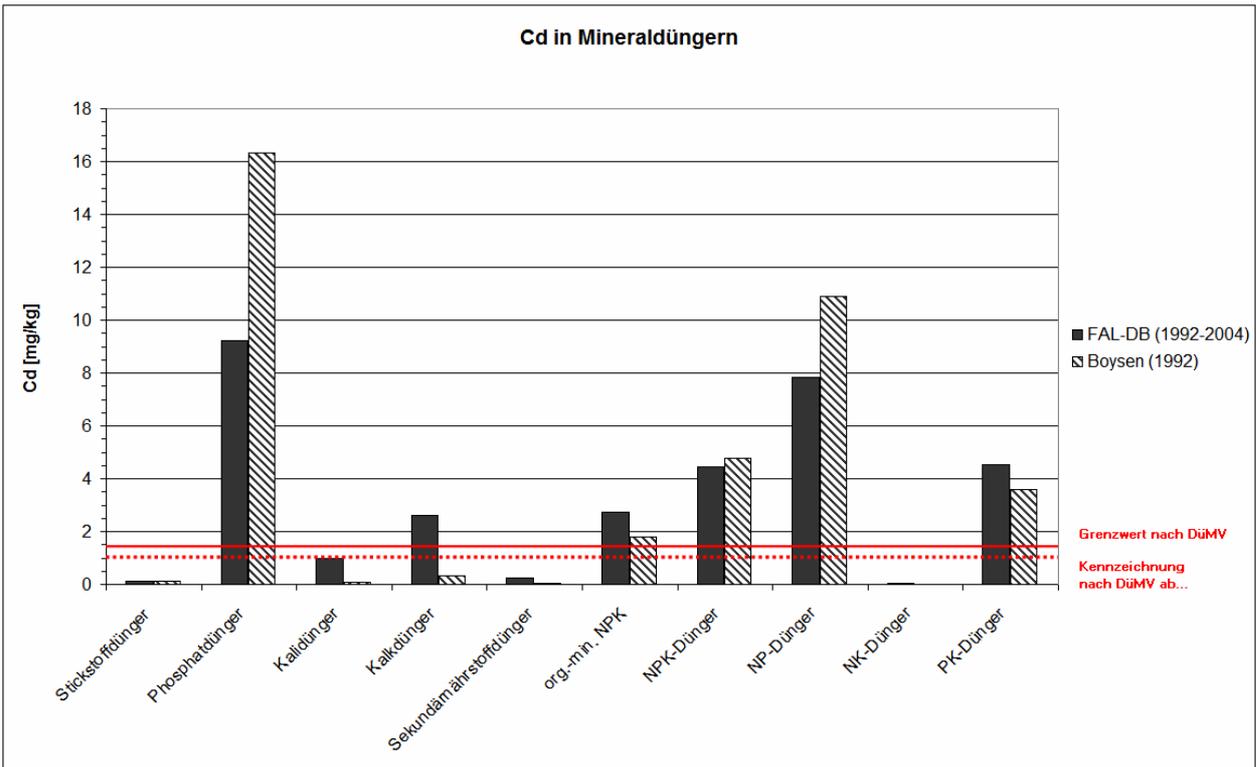
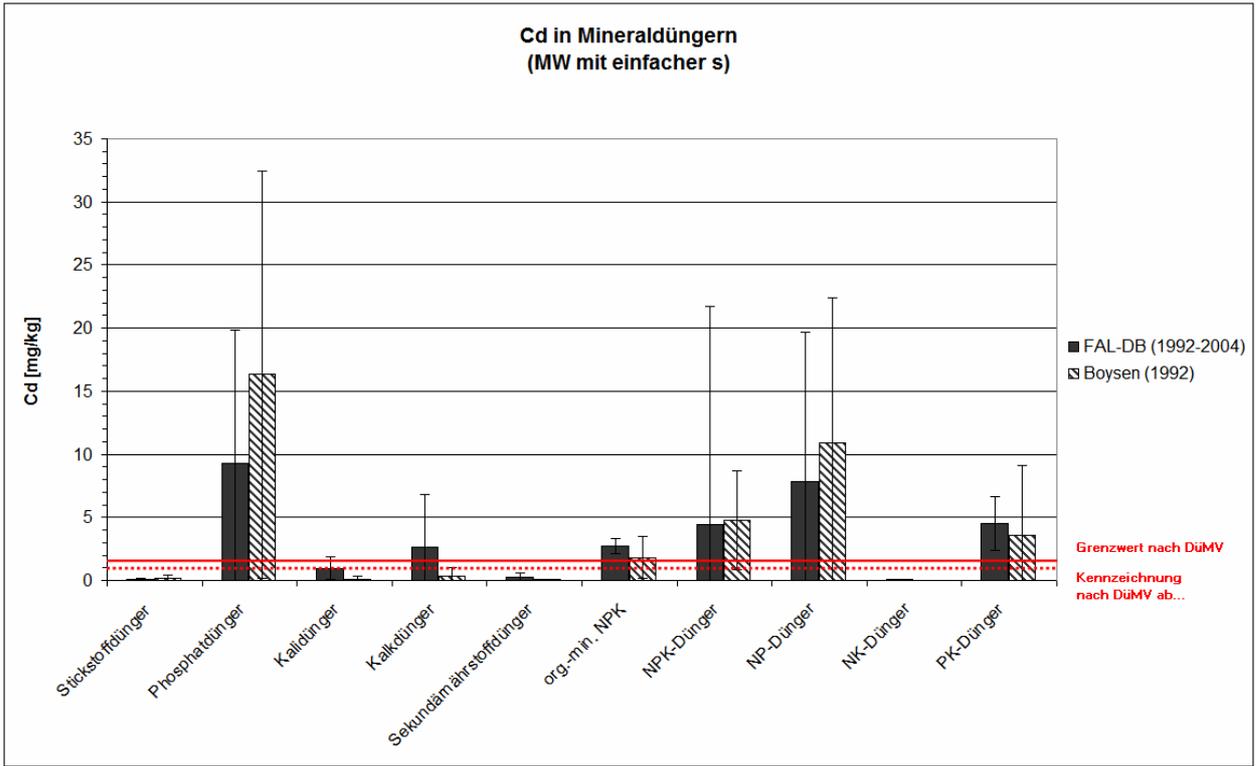


Abbildung I. 1: Cd-Gehalte in Mineraldüngern (aggregierte oder einfache Mittelwerte, mit und ohne einfache Standardabweichung) im Vergleich Boysen-Studie und FAL-Datenbank (DB)

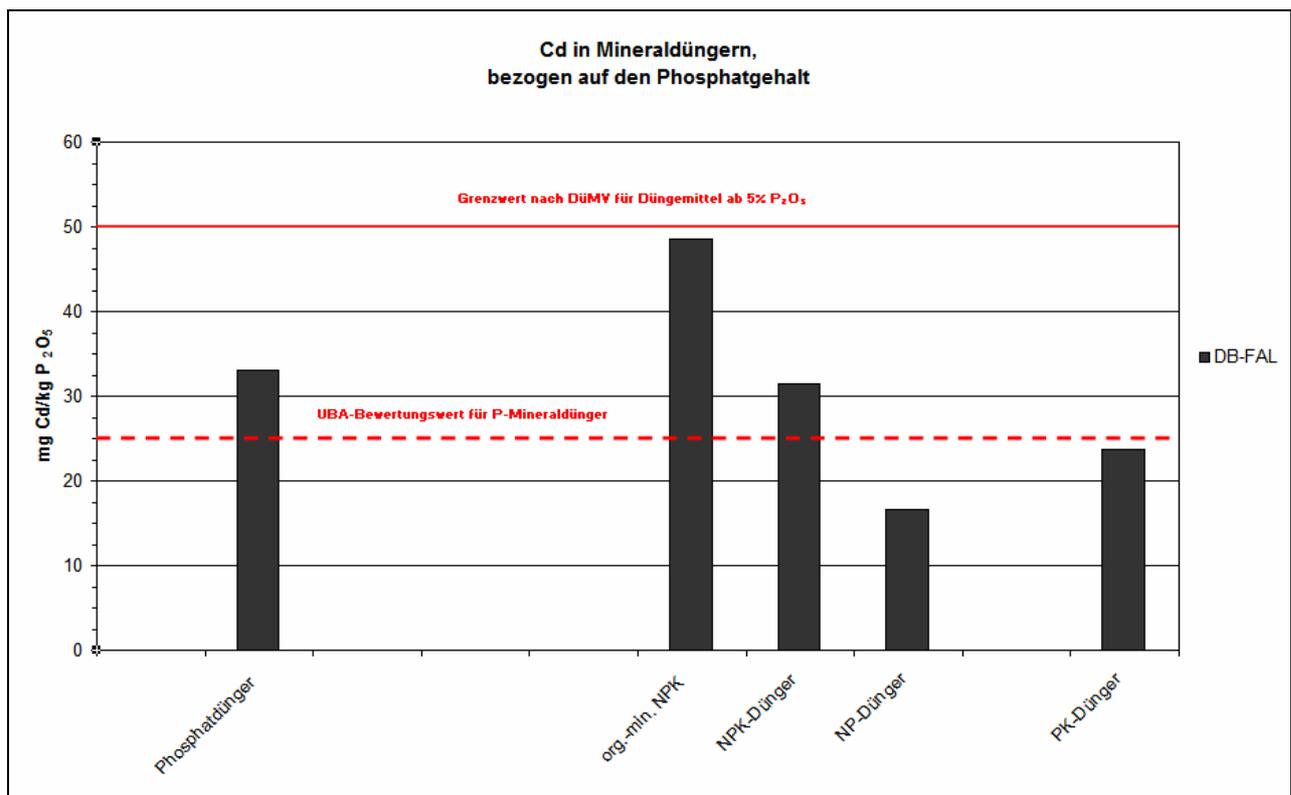


Abbildung I. 2: Mittlere Cd-Gehalte in Mineraldüngern, bezogen auf den Phosphatgehalt

### Kupfer:

Extrem hohe Schwankungsbreiten zeigen sich auch hinsichtlich der Cu-Gehalte in Mineraldüngern, insbesondere bei den Kalkdüngern. Mittlere Cu-Gehalte liegen ganz überwiegend in der Größenordnung von <1 bis 15 mg/kg Cu, der Grenzwert von 70 mg/kg Cu wird lediglich von Kalk- und NPK-Düngern überschritten, hier allerdings um ein Vielfaches (352 bzw. 172 mg/kg Cu) (Abbildung I. 3).

Bei den NPK-Düngern aus der FAL-Sammlung, die den Grenzwert überschreiten, handelt es sich um ein deutsches (96 mg/kg Cu) und 6 in Ungarn vertriebene Produkte (89 bis 1768 mg/kg Cu), die ganz bewusst mit Spurennährstoffzusätzen versehen sind. Düngemittel mit Spurennährstoffen sind von der Grenzwertsetzung für Kupfer und Zink gemäß Tabelle 1 in Anlage 2 der DüMV ausgenommen.

Eine Kennzeichnungspflicht ist für Kupfer aufgrund seiner Sonderstellung als essenzielles Spurenelement nicht festgeschrieben.

Mit Ausnahme der Kalk- und der NPK-Dünger liegen keine wesentlichen Unterschiede in den beiden betrachteten Datensätzen vor, wobei die Angaben der Boysen-Studie tendenziell noch etwas höhere Cu-Gehalte ausweisen als die neueren Daten. Wie bereits bei As, Cd und Cr festgestellt, zeichnen sich meist auch hier die P-freien Dünger durch geringere Cu-Gehalte als die P-haltigen Dünger aus.

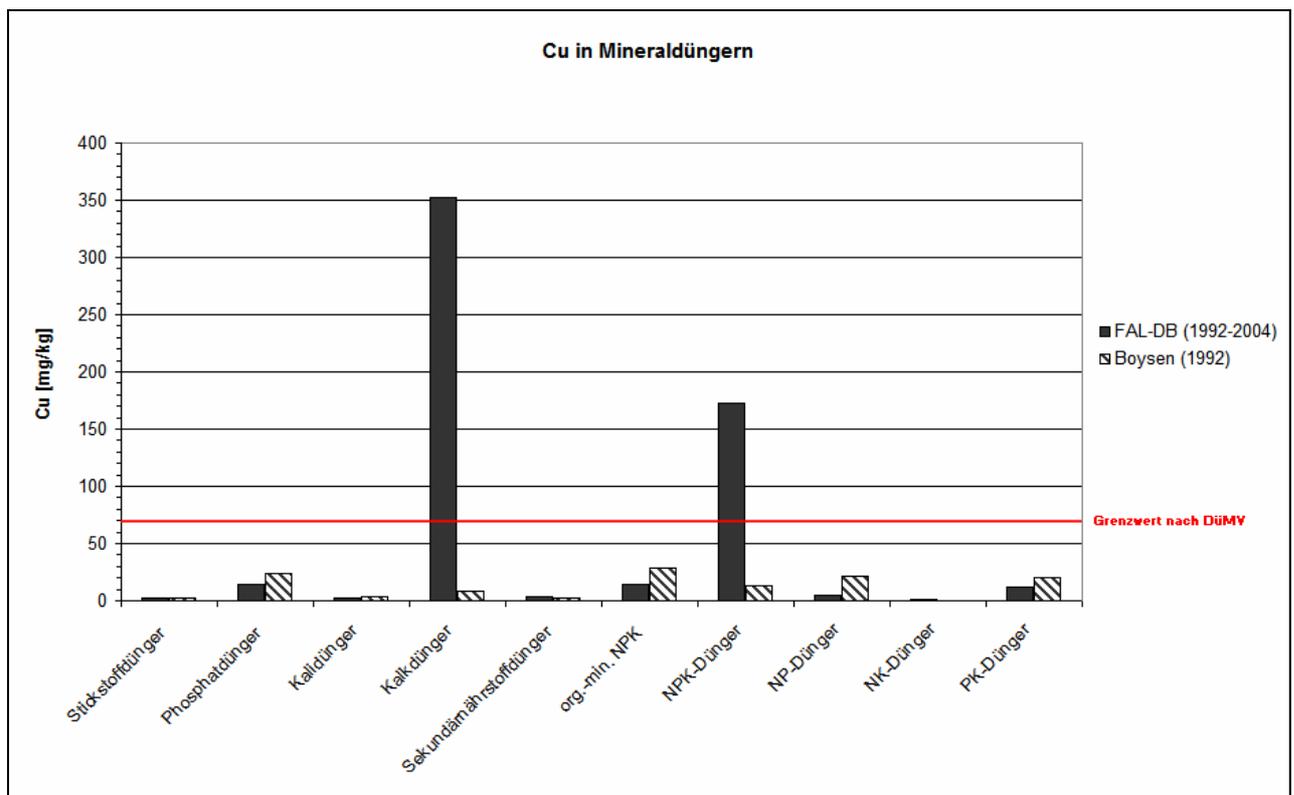
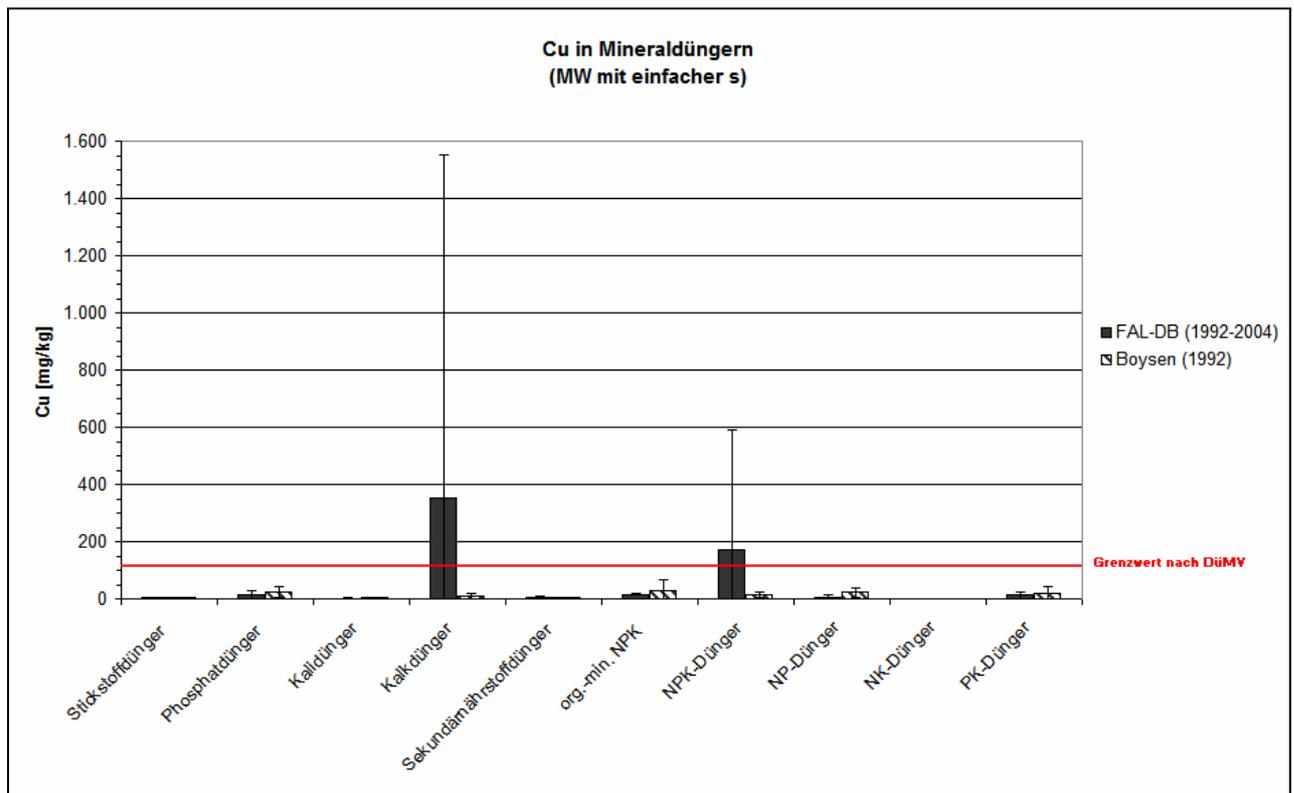


Abbildung I. 3: Cu-Gehalte in Mineraldüngern (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit und ohne einfache Standardabweichung) im Vergleich Boysen-Studie und FAL-Datenbank (DB)

## Blei:

Mittlere Blei-Gehalte in Mineraldüngern liegen zwischen <1 und 13 mg/kg Pb, nur die Kalkdünger ragen hier mit einem Mittelwert von 112 mg/kg heraus (Abbildung I. 4), Maximalgehalte für diese Gruppe reichen sogar bis zu mehr als 2100 mg/kg Pb. Kennzeichnungs- und Grenzwert von 125 bzw. 150 mg/kg Pb werden demnach im Mittel nicht überschritten, nur bei den NPK-Düngern können auch Maximalgehalte oberhalb 150 mg/kg Pb erreicht werden (bis zu 169 mg/kg Pb). Anders als bei den meisten anderen betrachteten Schwermetallen ist bei Pb keine Tendenz zu höheren Gehalten bei P-haltigen Düngern zu erkennen.

Zwischen Boysen und den neueren Daten bestehen keine wesentlichen Unterschiede.

### **I.4.2 Detailbetrachtung verschiedener Phosphordünger**

Die vorangegangenen Ausführungen haben verdeutlicht, dass im Allgemeinen P-haltige Dünger höhere Schwermetallgehalte aufweisen als P-freie. Nachdem zunächst die Düngemittel aufgrund ihrer Nährstoffzusammensetzung zu Gruppen zusammengefasst betrachtet wurden, soll daher nun die Gruppe der Phosphatdünger differenzierter betrachtet werden, wobei die Schwermetallgehalte sowohl in Bezug auf die Originalsubstanz als auch in Abhängigkeit vom Phosphatgehalt dargestellt werden. Neben den Kennzeichnungs- und Grenzwerten der DÜMV sind hier zusätzlich die auf den Phosphatgehalt bezogenen Vorschläge des UBA für Bewertungswerte (interner Bericht des UBA an BMU vom 24.06.2003, unveröffentlicht) zu mineralischen P-Düngern eingezeichnet.

In den verschiedenen P-Düngern variieren die mittleren As-Gehalte zwischen <1 und 12 mg/kg As. Allerdings zeichnen die beiden betrachteten Datensätze keinen einheitlichen Trend: Beispielsweise gibt Boysen den niedrigsten As-Gehalt für weicherdiges Rohphosphat an, die FAL-Sammlung zeigt genau das Gegenteil. Ähnliches ist für Triple-Superphosphat festzustellen. Hier wird der starke Einfluss der Auswahl der zu untersuchenden Proben deutlich. Einen wesentlichen Einfluss dürfte dabei insbesondere die Herkunft des Rohphosphates als Ausgangsstoff für P-haltige Düngemittel haben, denn in Abhängigkeit von Genese und Zusammensetzung des Rohphosphates können die As-Gehalte ebenso wie die Gehalte an anderen Schwermetallen stark schwanken.

Die für As getroffenen Aussagen lassen sich grundsätzlich auch auf die anderen Schwermetalle übertragen.

Bei Cd ist festzuhalten, dass der vom UBA vorgeschlagene Grenzwert von 25 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> im Mittel von teilaufgeschlossenem Rohphosphat und Triple-Superphosphat (TSP) überschritten würde, während der geltende phosphatbezogene Grenzwert der DÜMV für P-Dünger von 50 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> von allen P-Düngern eingehalten wird. Der nachträglich in die DÜMV eingefügte Grenzwert für alle Mineraldünger (1,5 mg/kg Cd) wird von Superphosphat, TSP, Glühphosphat sowie von teilaufgeschlossenem und weicherdigem Rohphosphat im Mittel überschritten. Die höchsten Cd-Gehalte werden nach Boysen ebenso wie nach der FAL-Datenbank in TSP erreicht, welches zugleich auch den höchsten P-Gehalt unter den beschriebenen P-Düngern aufweist. Die auf den Phosphatgehalt bezogene Darstellung zeigt jedoch wie auch schon bei

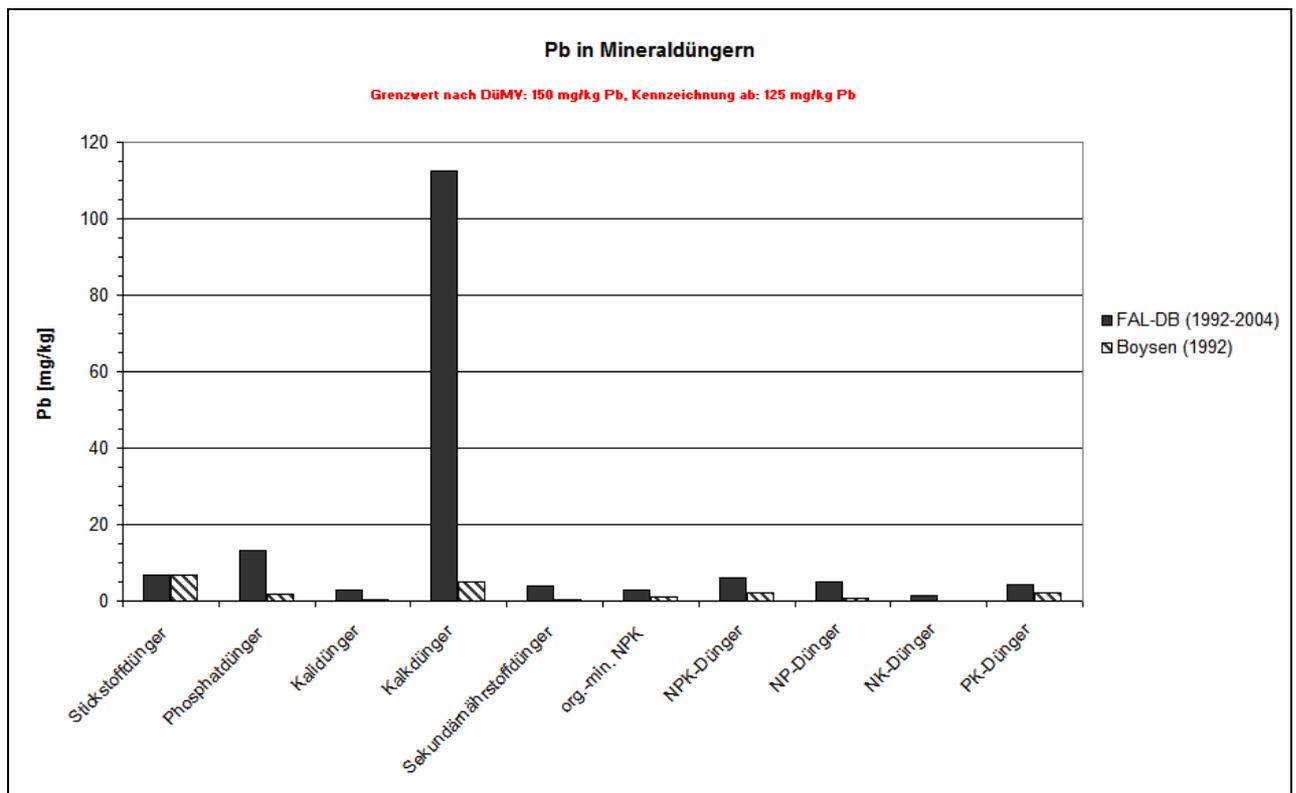
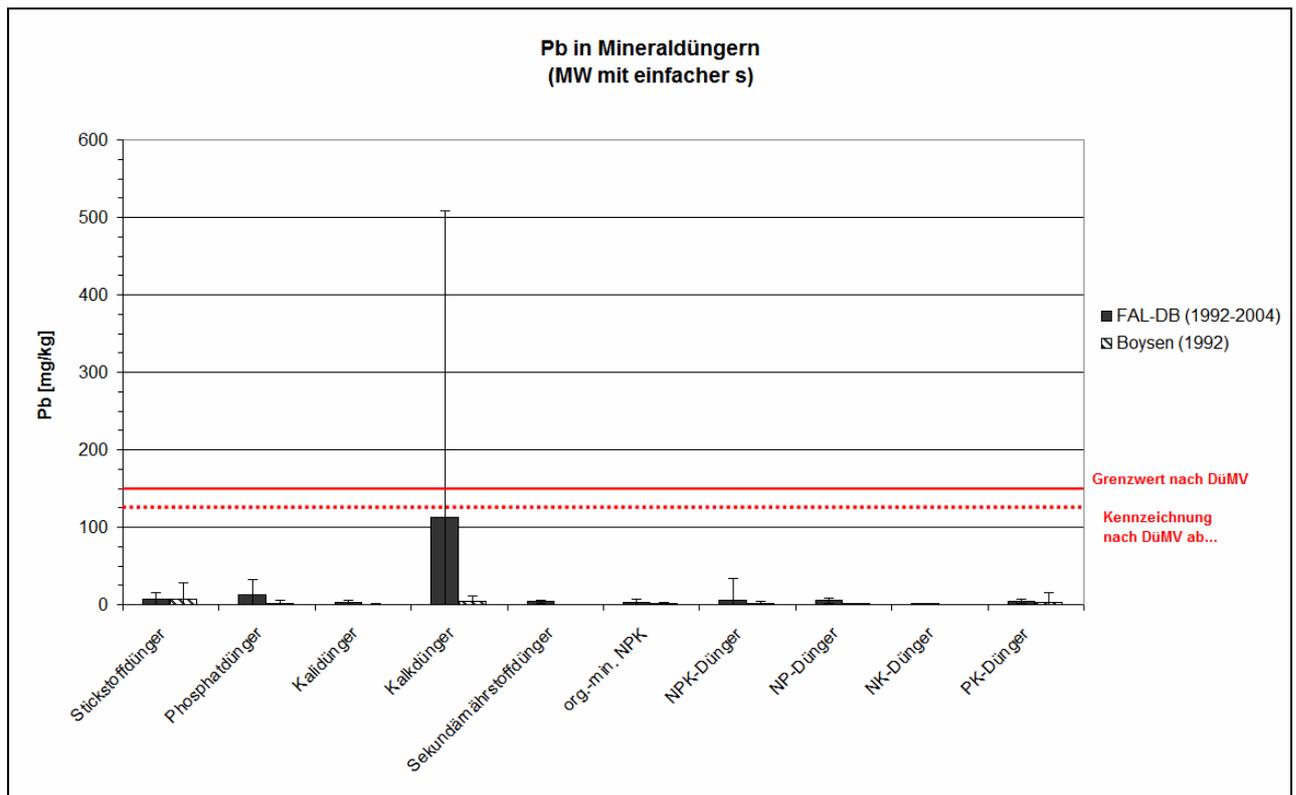


Abbildung I. 4: Pb-Gehalte in Mineraldüngern (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit und ohne einfache Standardabweichung) im Vergleich Boysen-Studie und FAL-Datenbank (DB)

As, dass neben dem Phosphatgehalt ganz offenbar auch andere Faktoren die Variabilität der Schwermetallgehalte beeinflussen. Wie bereits diskutiert, dürfte hier vornehmlich die Genese und

Zusammensetzung des zur Herstellung verwendeten Rohphosphates eine Rolle spielen, weiterhin von Bedeutung dürfte auch der Herstellungsprozess (z.B. Glühphosphat, Thomasphosphat) sein.

### **I.4.3 Wirtschaftsdünger – Schwermetalle**

Als wichtigstes Ergebnis beim Vergleich von Daten über konventionelle und ökologische Wirtschaftsdünger ist festzuhalten, dass sich mit Ausnahme von Kupfer sowie mit Einschränkungen auch für Zink anhand der bisherigen Datenlage zwischen beiden Systemen keine eindeutigen Unterschiede im Schwermetallgehalt feststellen lassen. Für Kupfer und teilweise auch für Zink zeigen konventionelle Wirtschaftsdünger bei Rindern, Schweinen und Geflügel fast durchweg höhere Gehalte als ökologische. Die weiteren in die Untersuchung einbezogenen Schwermetalle wiesen je nach Tierart und Schwermetall mal bei der konventionellen, mal bei der ökologischen Variante höhere Gehalte auf, wobei sich weder für eine einzelne Tierart(gruppe), noch für ein einzelnes Schwermetall eine einheitliche Tendenz beschreiben lässt. Hinzu kommen sehr hohe Schwankungsbreiten innerhalb der betrachteten Gruppen, was die Interpretationsmöglichkeiten weiter eingrenzt. Unterschiede in Schwermetallgehalten scheinen demnach bei den meisten Schwermetallen weniger systemspezifisch, als vielmehr ganz individuell bedingt zu sein, wichtige Steuerungsfaktoren sind, wie bereits eine vorangegangene UBA-Studie zur Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben aus dem Jahr 2004 gezeigt hat, Futtermittelzusätze (beispielsweise Herkunft der Rohphosphate zur Herstellung des Mineral-P), Trinkwasser, Abrieb aus der Stalleinrichtung, bei Auslaufhaltung eventuell auch bodenbürtige Einflüsse. Dieser Frage wurde im Rahmen der vorliegenden Studie allerdings nicht weiter nachgegangen.

Unabhängig vom Produktionssystem zeigen in der Regel Wirtschaftsdünger von Schweinen und Geflügel höhere Schwermetallgehalte als jene von Rindern, Schafen und Ziegen.

Die vom UBA vorgeschlagenen Bewertungswerte für Schwermetalle werden für As, Cd, Cr, Ni und Pb im Mittel von allen Tierarten unterschritten, nur vereinzelt treten – vor allem bei den Wirtschaftsdüngern von Schweinen und Geflügel - höhere Maximalgehalte auf. Anders ist dies bei Zn und Cu, hier werden die vorgeschlagenen Bewertungswerte bei Wirtschaftsdüngern von Schweinen und Geflügel bereits im Mittel überschritten. Über die Gehalte von Hg und Tl liegt bislang nur eine sehr geringe Datenbasis vor. Da die gemessenen Gehalte sich sehr nah an der Nachweisgrenze bewegen, sind kaum verallgemeinerungsfähige Aussagen zulässig.

Ebenfalls eine sehr schwache Datenbasis existiert für U in Wirtschaftsdüngern. Die im Rahmen dieses Projektes gemessenen Daten weisen mittlere Gehalte in einer Größenordnung zwischen <1 und 6 mg/kg TM aus, wobei ähnlich wie bei den anderen Schwermetallen Wirtschaftsdünger von Schweinen und Geflügel höhere Gehalte haben als solche von Rindern und Kleinwiederkäuern.

Auch hier werden wiederum Ergebnisse für Cadmium, Kupfer, Blei und Zn exemplarisch wiedergegeben.

## Cadmium

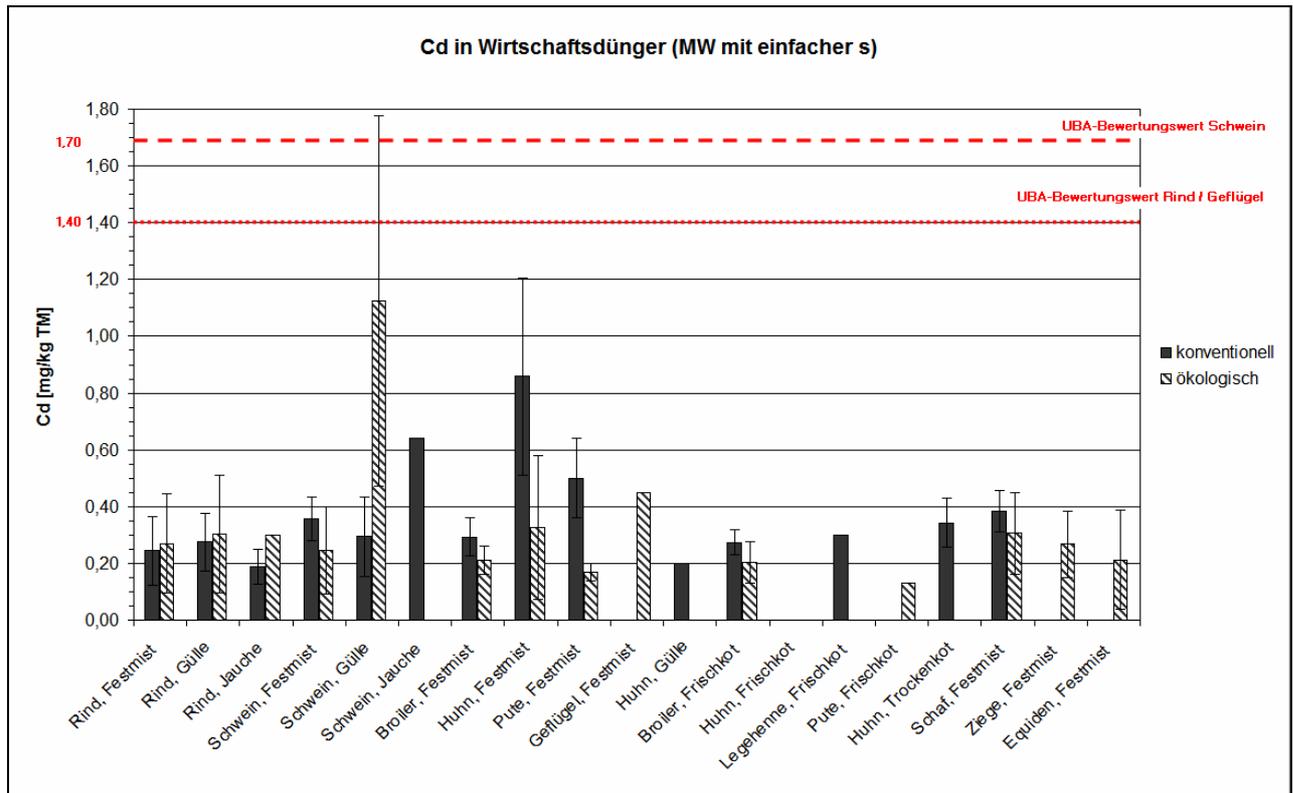


Abbildung I.5: Cd-Gehalte in konventionellen und ökologischen Wirtschaftsdüngern (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

Mittlere Cadmiumgehalte in Wirtschaftsdüngern liegen bis auf wenige Ausnahmen unterhalb von 1 mg/kg TM, in den meisten Fällen sogar < 0,5 mg/kg TM (Abbildung I.5). Die höchsten Mittelwerte zeigen ökologische Schweinegülle mit 1,1 mg/kg TM (allerdings bei n=2) und konventioneller Festmist vom Huhn mit 0,86 mg/kg TM. Die vorgeschlagenen UBA-Bewertungswerte werden nur in Extremfällen überschritten: So zeigt konventionelle Schweinegülle Maximalgehalte bis zu 1,8 mg/kg TM Cd, bei ökologischer sind es maximal 1,5 mg/kg TM Cd. Ökologischer Hühnermist weist maximale Gehalte bis zu 1,6 mg/kg TM Cd auf. Eine Tendenz hinsichtlich des Unterschiedes ökologisch / konventionell ist auch hier nicht zu erkennen. Klare Unterschiede zeigen lediglich Schweinegülle sowie Hühner- und Putenfestmist, allerdings mit unterschiedlicher Richtung und unter der bereits erwähnten Einschränkung, dass für ökologische Schweinegülle ebenso wie für ökologischen Putenfestmist nur 2 Werte vorliegen.

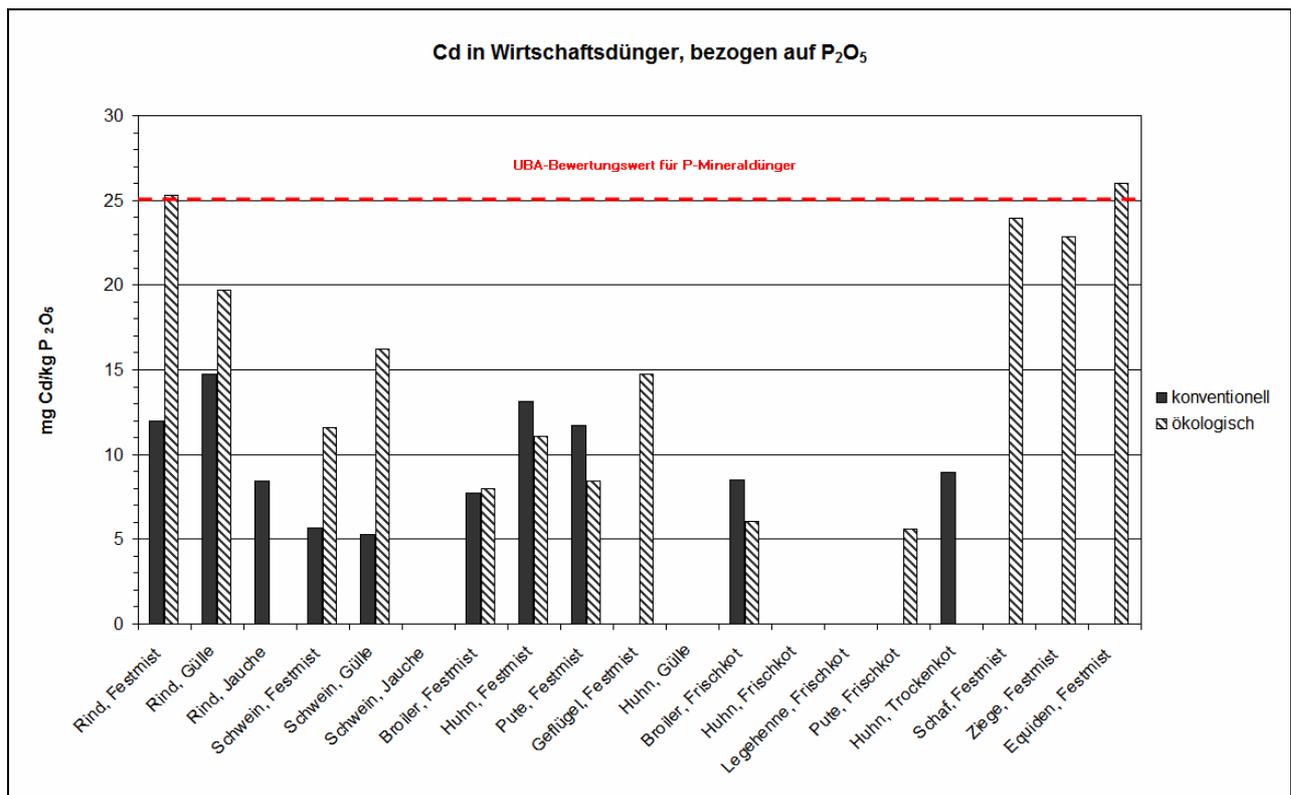


Abbildung I 6: Cd-Gehalte in konventionellen und ökologischen Wirtschaftsdüngern, bezogen auf den Phosphatgehalt

Analog zu den Mineraldüngern soll auch für die Wirtschaftsdünger der Cd-Gehalt auf den Phosphatgehalt bezogen betrachtet werden. Aufgrund der spezifischen Phosphatgehalte der Wirtschaftsdünger einzelner Tierarten kommt man hier zu einer ganz anderen Aussage, als wenn man die auf die Trockensubstanz bezogenen Cd-Gehalte betrachtet: Besonders schlecht in Bezug auf etwaige Grenzwerte (zur Orientierung ist hier der UBA-Bewertungswert für Mineraldünger eingezeichnet) schneiden Rinder- und Equidenmist sowie der Mist von Kleinwiederkäuern ab, die zwar vergleichsweise niedrige Cd-Gehalte, zugleich aber auch sehr geringe P-Gehalte und ein entsprechend ungünstiges Cd/P-Verhältnis aufweisen (Abbildung I.6). Als P-Dünger eingesetzt schneiden dagegen Schweine- und Geflügelmist deutlich besser ab, insbesondere auch im Vergleich mit verschiedenen mineralischen P-Düngern wie etwa Triple-Superphosphat, welches den UBA-Bewertungswert von 25 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> klar überschreitet.

## Kupfer

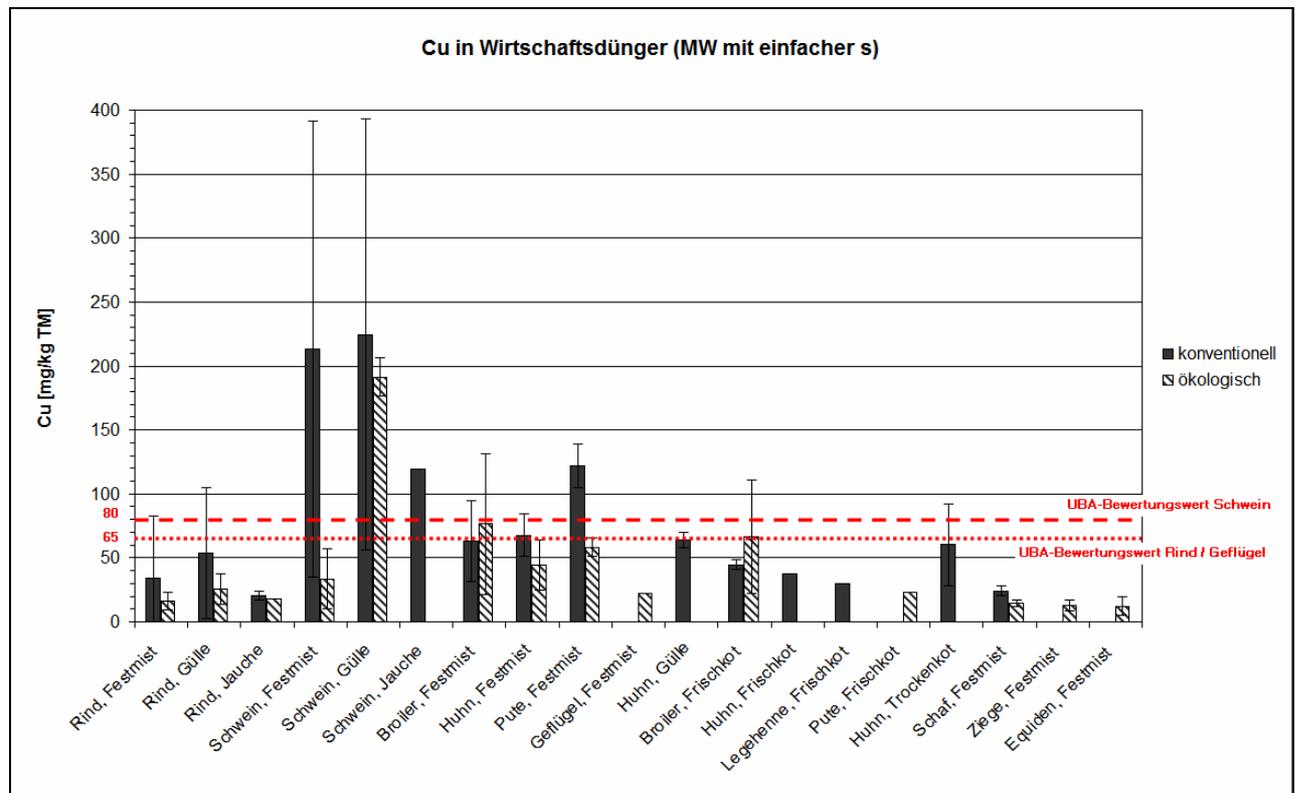


Abbildung I.7: Cu-Gehalte in konventionellen und ökologischen Wirtschaftsdüngern (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

Mittlere Kupfer-Gehalte in Wirtschaftsdünger reichen von 12 bis zu 225 mg/kg TM (Abbildung I. 7). Die höchsten Mittelwerte (zwischen 191 und 225 mg/kg TM Cu) weisen Schweinegülle (konventionell und ökologisch) sowie konventioneller Schweinefestmist auf, gefolgt von konventionellem Putenfestmist und konventioneller Schweinejauche (122 bzw. 119 mg/kg TM Cu). Fast alle anderen Wirtschaftsdüngertypen liegen hinsichtlich ihrer Cu-Gehalte im Mittel unterhalb der vorgeschlagenen UBA-Bewertungswerte von 80 mg/kg TM für Schweine bzw. 65 für Rind und Geflügel, lediglich Wirtschaftsdünger vom Broiler liegen bereits im Mittel am oder knapp oberhalb des entsprechenden Bewertungswertes. Wie die Standardabweichungen zeigen, kommt es aber in Extremfällen auch für weitere Wirtschaftsdünger zu Überschreitungen der vorgeschlagenen Werte. Mit Ausnahme der Broiler weisen die meisten konventionellen Wirtschaftsdünger im Mittel m.o.w. deutlich höhere Cu-Gehalte auf als die ökologischen.

## Blei

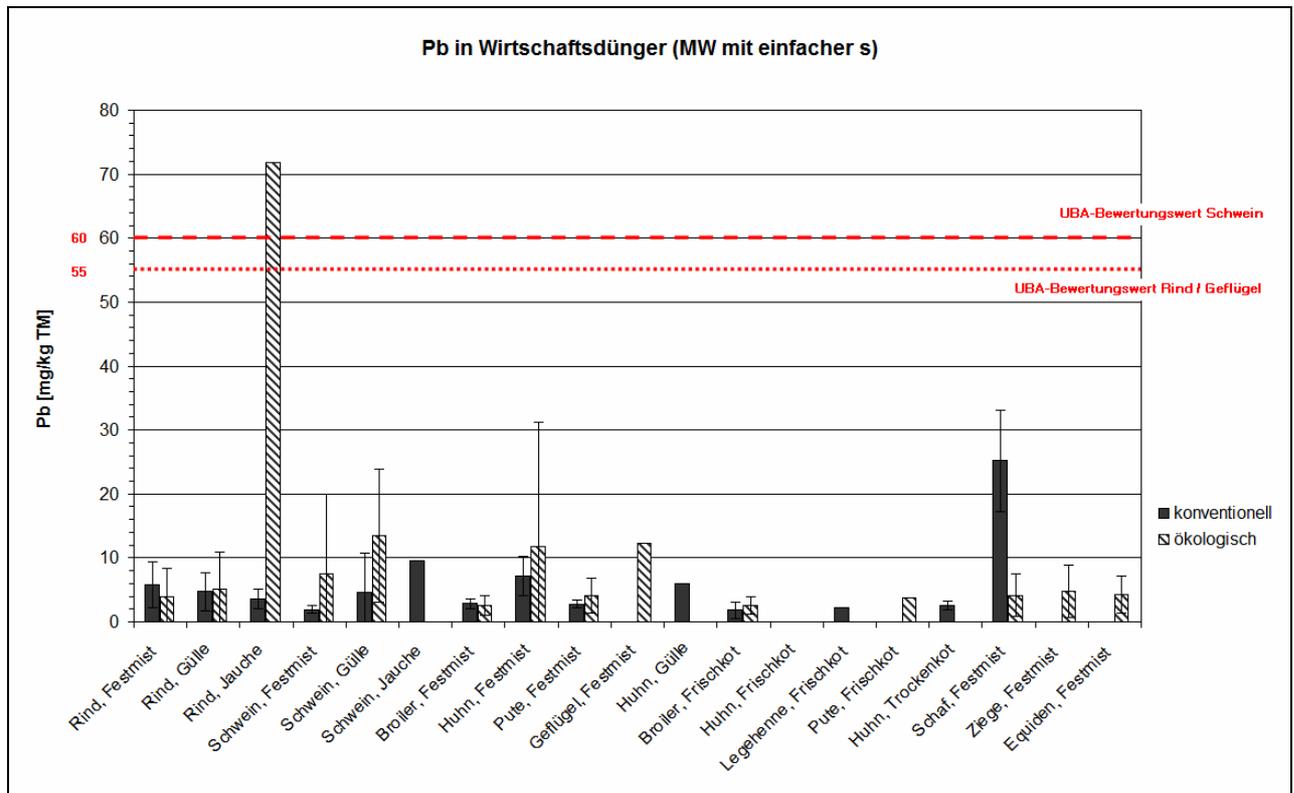


Abbildung I. 8: Pb-Gehalte in konventionellen und ökologischen Wirtschaftsdüngern (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

Mittlere Pb-Gehalte von Wirtschaftsdüngern liegen fast durchweg zwischen 2 und rund 14 mg/kg TM. Ausnahmen sind ökologische Rinderjauche mit einem mittleren Gehalt (aus 9 Proben) von 72 mg/kg TM Pb, und konventioneller Schafsmist mit einem Mittelwert von 25 mg/kg TM Pb (Abbildung I. 8). Der vorgeschlagene UBA-Bewertungswert von 55 bzw. 60 mg/kg TM Pb wird im Mittel nur von der ökologischen Rinderjauche überschritten, in Extremfällen können auch ökologischer Schweine- und Hühnermist darüber liegen.

Unterschiede zwischen ökologischen und konventionellen Wirtschaftsdüngern (z.B. höhere Gehalte für ökologisch gehaltene Schweine und Hühner) werden auch bei Pb durch breite Spannweiten relativiert und zeigen keine einheitliche Tendenz, deutlich ist lediglich, wie schon bei Cr und Ni, der Unterschied bei Schafen mit höheren Gehalten für die konventionelle Variante.

## Zink

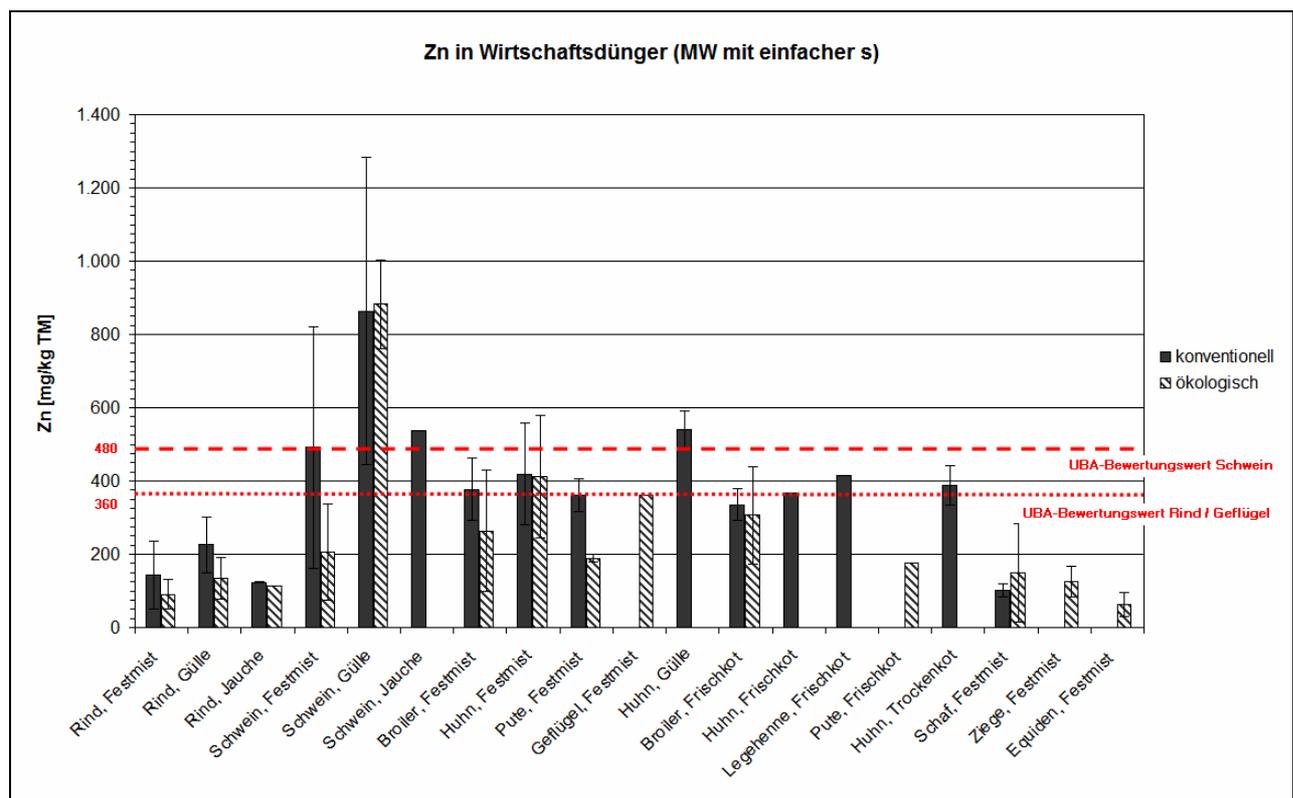


Abbildung I. 8a: Zn-Gehalte in konventionellen und ökologischen Wirtschaftsdüngern (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

Mittlere Zink-Gehalte in Wirtschaftsdüngern liegen in einer Größenordnung zwischen rund 63 bis zu 883 mg/kg TM (Abb. I 8a). Besonders hohe Gehalte finden sich in Schweinegülle (ökologisch wie konventionell), besonders niedrige in Wirtschaftsdüngern von Rindern und Kleinwiederkäuern sowie Equiden. Ein klarer Unterschied zwischen ökologischer und konventioneller Haltung ist für den Festmist von Schwein und Pute mit höheren Gehalten bei konventionell gehaltenen Tieren auszumachen, die gleiche Tendenz zeigt auch der Wirtschaftsdünger vom Rind. Bei Schafsmist ist die Tendenz umgekehrt. Bei den anderen Tierarten sind die Unterschiede nur gering ausgeprägt. Ähnlich wie bei Kupfer werden auch bei Zn die vorgeschlagenen UBA-Bewertungswerte (480 bzw. 360 mg/kg TM Zn) für Schwein und Geflügel schon im Mittel überschritten.

### I.4.4 Klärschlamm – Schwermetalle

Die derzeit noch gültigen Grenzwerte der AbfKlärV für Schwermetalle in Klärschlamm, die allerdings im Rahmen der Novellierung dieser Verordnung voraussichtlich eine wesentliche Absenkung erfahren werden, werden von deutschen Schlämmen in der Regel mehr oder weniger weit unterschritten. In Einzelfällen können bei Extremwerten Grenzwertüberschreitungen vorkommen. Erwartungsgemäß höhere Schwermetallgehalte zeigt die Klärschlammasche, hier kommt es bei den Mittelwerten für Cu und Zn unter Umständen doch auch zu Grenzwertüberschreitungen (allerdings bisher nur eine Datenquelle mit 2 Datensätzen!). Auch die

schutzgutbezogen abgeleiteten und vorsorgeorientierten Vorschläge des UBA für die Bewertung von Schwermetallen in Klärschlamm werden hinsichtlich Cd, Cr, Ni und Pb problemlos eingehalten, für Hg, Cu und Zn (hier wäre es günstig, wenn die Abbildungen für Zink und Hg aus dem Hauptbericht noch eingefügt würden) werden sie allerdings bereits im Mittel von allen betrachteten Schlammtypen mehr oder weniger deutlich überschritten werden.

U liegt in deutschen und europäischen Schlämmen in ähnlicher Größenordnung vor wie in Wirtschaftsdüngern, hierfür wurde bislang noch kein Grenzwert definiert.

Der EU-Vorschlag zu „threshold values for heavy metals in soils“ basiert auf einer Differenzierung der erlaubten Metallgehalte nach pH-Werten des Bodens. Die Analytik erfolgt als Bestimmung der Gesamtgehalte über den Königswasseraufschluß. Dieser Ansatz sowie die derzeit in den einzelnen Mitgliedsländern angewandten Bewertungsschemata werden in dem UBA-Bericht „International Derivation of Threshold Values for Heavy Metals in Soils“ zusammengestellt und diskutiert. Dabei wird auch auf die Berücksichtigung der (Bio)-Verfügbarkeit in den einzelnen Bewertungsansätzen eingegangen.

Im folgenden sind die Ergebnisse für Cadmium, Kupfer und Blei sowie für Zn und Hg detailliert.

### Cadmium

Für Cd liegen die mittleren Gehalte in Klärschlamm durchweg unter 2 mg/kg TM, höhere Gehalte finden sich naturgemäß in Klärschlammasche (aufgrund der geringen Stichprobenzahl [n=2] nicht in der Abbildung), wo ein Mittelwert von 3,6 mg/kg TM gemessen wurde. Auch hier weisen die Standardabweichungen auf nur geringe Werteschwankungen hin, selbst kompostierter Klärschlamm zeigt im Maximum nicht mehr als 6,5 mg/kg Cd (Abbildung I. 9). Der Grenzwert der AbfKlärV von 10 mg/kg TM wird damit von allen Schlammtypen im Mittel weit unterschritten, lediglich für leichte Böden, wo ein Grenzwert von 5 mg/kg TM gilt, kann kompostierter Klärschlamm im Einzelfall zu hoch belastet sein. Die große Gruppe der Schlämme ohne Spezifikation verdeutlicht allerdings, dass in Extremfällen auch sehr hohe Cd-Gehalte auftreten können: gemessen wurden bis zu 229 mg/kg TM. Dass der Mittelwert dennoch unter 2 mg/kg TM liegt, zeigt, dass es sich hierbei tatsächlich nur um Einzelfälle handelt.

Der vom UBA vorgeschlagene schutzgutbezogen abgeleitete und vorsorgeorientierte Bewertungswert für Cd liegt mit 1,7 mg/kg TM allerdings deutlich niedriger als der geltende Grenzwert der AbfKlärV. Dieser Wert wird bereits im Mittel aller aus der Literatur zusammengestellten und von zusätzlich angesprochenen Einrichtungen zur Verfügung gestellten Klärschlammdaten überschritten.

Wie bei Mineral- und Wirtschaftsdüngern soll auch hier eine auf den Phosphatgehalt bezogene Betrachtung durchgeführt werden: Mit Ausnahme von kompostiertem und Klärschlamm aus Regenklärbecken liegt der phosphatbezogene Cd-Gehalt in Klärschlamm zwar unter dem Grenzwert der DüMV für P-Mineraldünger, der UBA-Bewertungswert wird jedoch bei fast allen Schlammtypen überschritten oder nur ganz geringfügig unterschritten. Bezogen auf seine Qualität

als P-Dünger im Vergleich zu den Mineraldüngern schneidet Klärschlamm damit deutlich ungünstiger ab als die Wirtschaftsdünger.

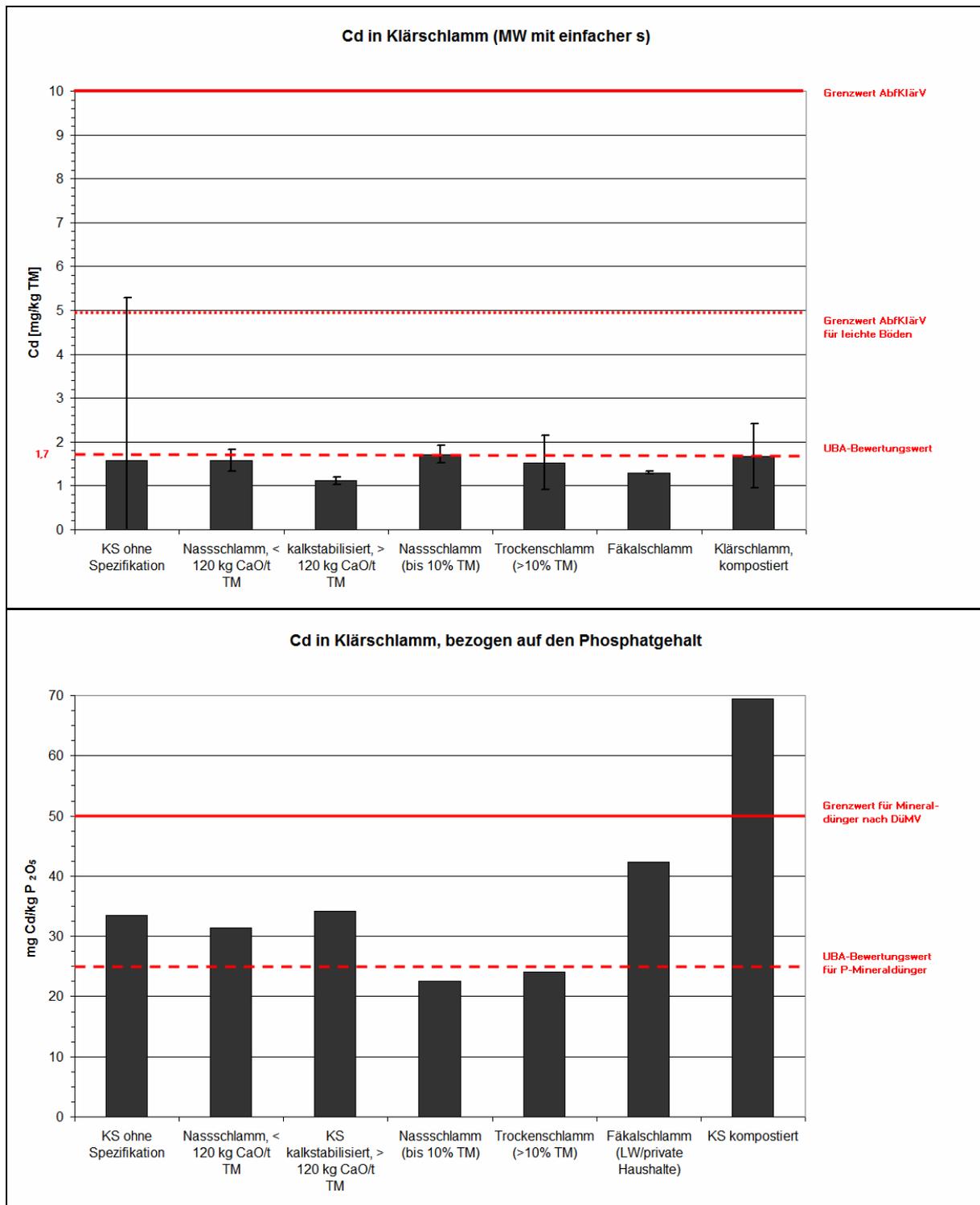


Abbildung I. 9: Cd-Gehalte in Klärschlamm, bezogen auf die Trockenmasse (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung) sowie auf den Phosphatgehalt (aggregierte Mittelwerte)

## Kupfer

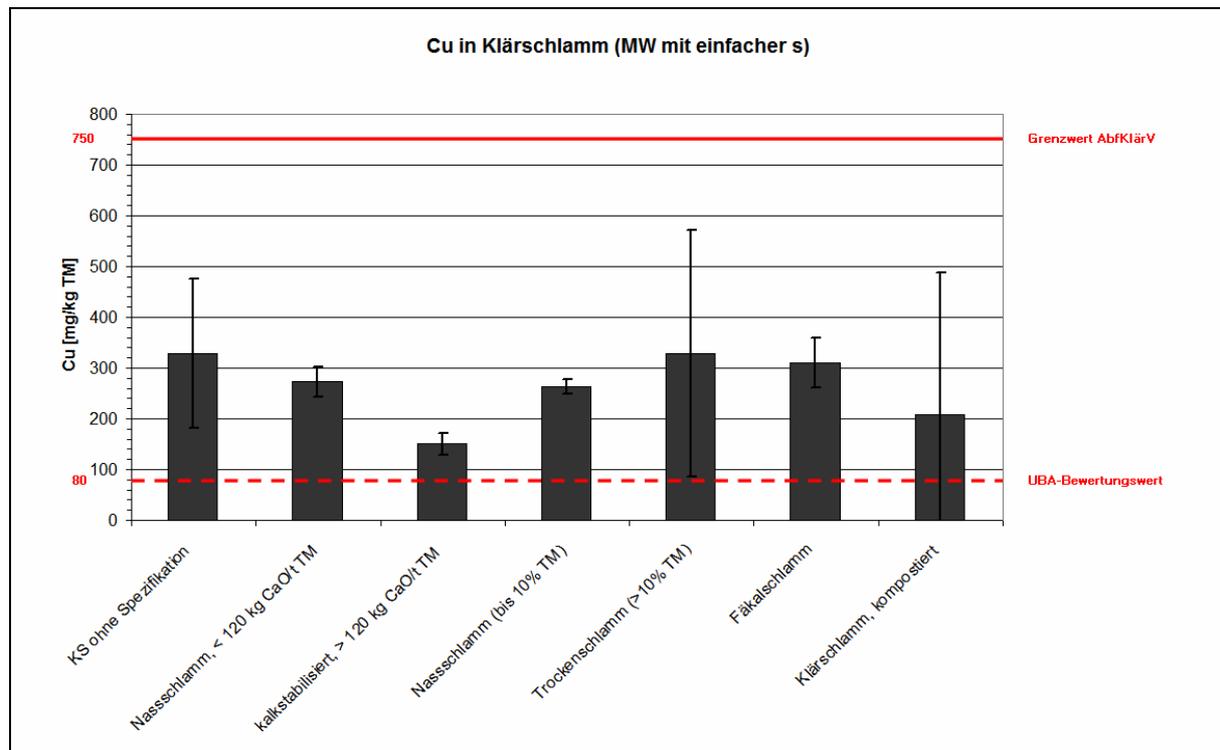


Abbildung I. 10: Cu-Gehalte in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

Die Bandbreite mittlerer Kupfer-Gehalte in Klärschlämmen reicht von 150 mg/kg TM (kalkstabilisierter KS) bis zu 328 mg/kg TM (Trockenschlamm, KS ohne Spezifikation), in Klärschlammasche wurde ein mittlerer Cu-Gehalt von 1109 mg/kg TM gemessen (Abbildung I. 10). Damit wird der Grenzwert der AbfKlärV von 750 mg/kg TM im Mittel weit unterschritten. Extremwerte reichen allerdings in mehreren Fällen über den Grenzwert hinaus: So wurden in nicht kalkstabilisiertem Nassschlamm Werte bis zu 1131, in Trockenschlamm bis zu 1306 mg/kg TM gemessen, in der Gruppe der Schlämme ohne Spezifikation liegt das Maximum sogar bei 3440 mg/kg TM. Der vom UBA vorgeschlagene Bewertungswert von 80 mg/kg TM Cu wird, wie die Abbildung I. 10 verdeutlicht, bereits im Mittel von allen betrachteten Klärschlammtypen deutlich überschritten.

## Blei

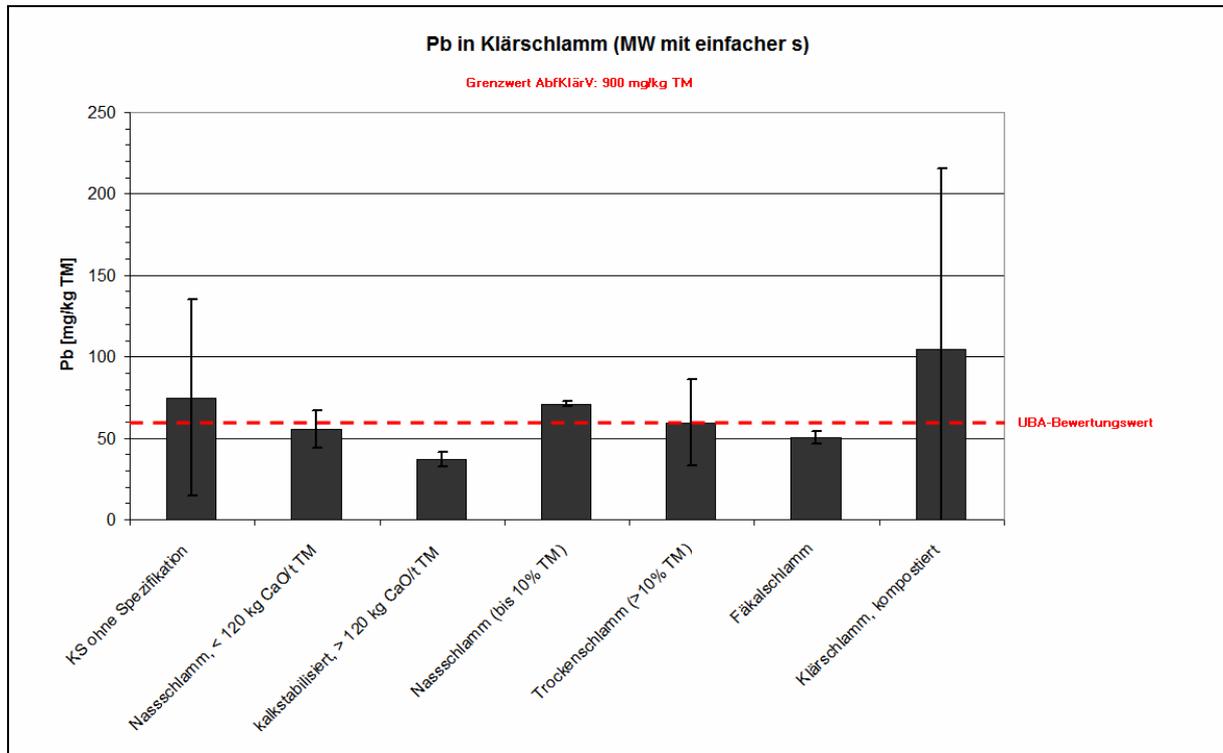


Abbildung I. 11: Pb-Gehalte in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

Mittlere Blei-Gehalte in Klärschlämmen liegen in der Regel bei weniger als 10% des Grenzwertes der AbfKlärV von 900 mg/kg TM. Etwas höhere Werte werden von kompostiertem Klärschlamm mit 104 mg/kg TM und Klärschlammasche mit 247 mg/kg TM erreicht (Abbildung I.11), auch dort wird aber der Grenzwert noch immer weit unterschritten. Vereinzelt kommen Grenzwertüberschreitungen in der Gruppe der Schlämme ohne Spezifikation vor, wo Maxima bis zu 999 mg/kg TM erreicht werden. Der vom UBA vorgeschlagene Bewertungswert für Pb von 60 mg/kg TM wird jedoch von allen Schlammtypen im Mittel nur knapp unter- oder auch überschritten (Abbildung I.11).

## Zink und Quecksilber

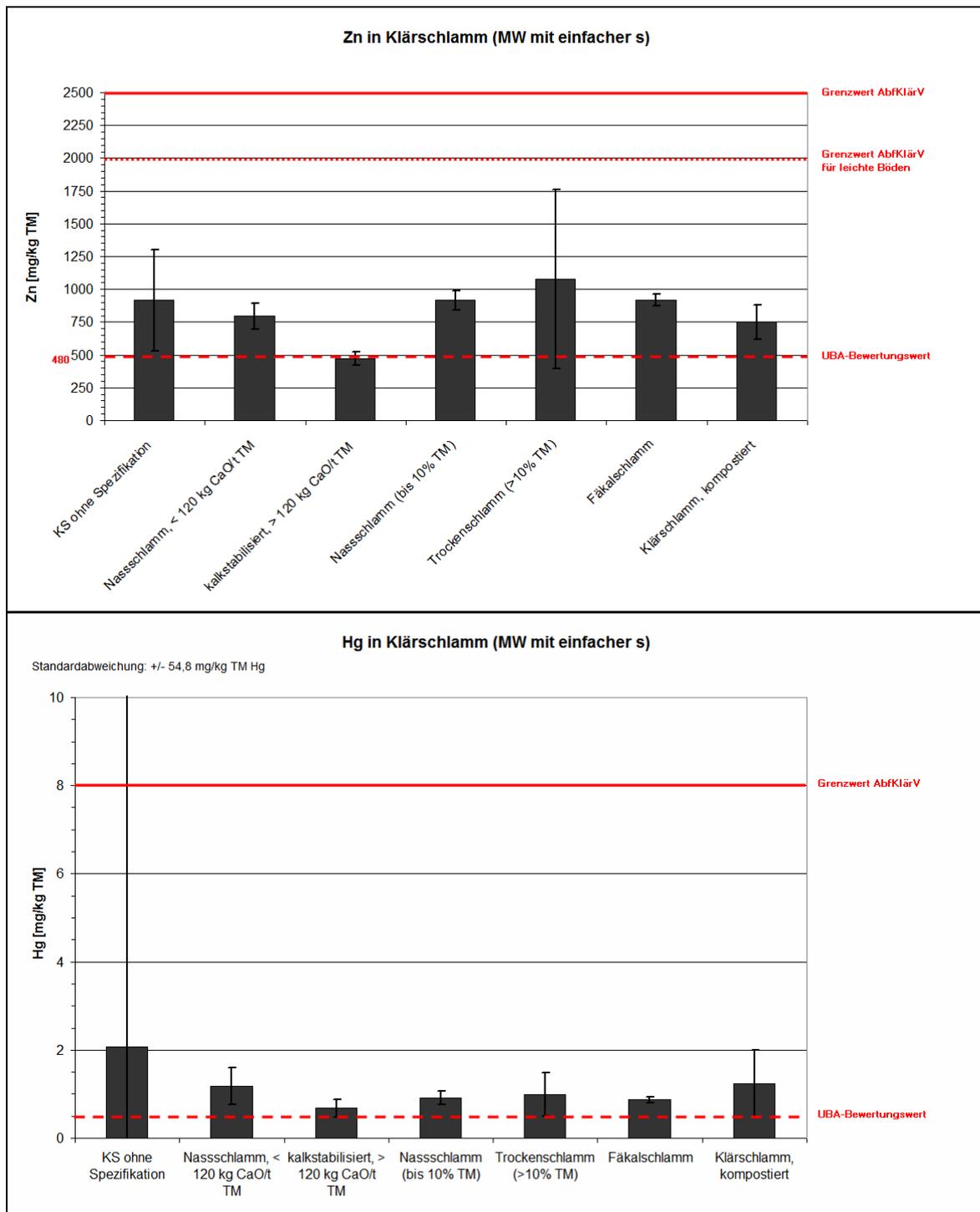


Abbildung I. 11a: Zn- und Hg-Gehalte in Klärschlamm, bezogen auf die Trockenmasse (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

### 1.4.5 Klärschlamm – organische Schadstoffe

Die Grenzwerte der AbfklärV für PCB und PCDD/F werden von deutschen Schlämmen in der Regel unterschritten, für die anderen organischen Schadstoffe sind bisher in Deutschland keine

Grenzwerte definiert. Auf EU-Ebene diskutiert werden Grenzwerte für PCB und PCDD/F (entsprechen der AbfKlärV), PAK, NP(EO), LAS und DEHP. Für PAK, NP(EO) und LAS können die zur Diskussion gestellten Grenzwerte oftmals nicht eingehalten werden, die Einhaltung des vorgeschlagenen Grenzwertes für DEHP scheint dagegen anhand der bisherigen Datenlage unproblematisch. Für Organozinnverbindungen wurden in einer aktuellen Studie des LUA NRW (2005) Grenzwertbereiche für MBT, DBT und TBT formuliert. Die aktuelle Datenlage zeigt, dass diese von allen drei Verbindungen regelmäßig überschritten werden. Für MKW existiert bisher weder ein gültiger Grenzwert noch ein Vorschlag für einen solchen.

Weitere Überlegungen zu Bewertungsansätzen sind im Teil „Bodenuntersuchungen“ dargestellt.

## PCB

Nach AbfKlärV sind in Klärschlamm die Gehalte der 6 PCB-Kongeneren Nummer 28, 52, 101, 138, 153 und 180 zu bestimmen, in der europäischen Literatur wird mitunter aber auch eine Summe aus 7 Kongeneren angegeben, wobei als siebentes Kongener das PCB-118 hinzu kommt.

Abbildung I. 12 zeigt, dass im Mittel in der Summe PCB (6) nicht mehr als 100 µg/kg TM erreicht werden, womit der Grenzwert der AbfKlärV von 1200 µg/kg TM zu weniger als 10% ausgeschöpft wird. Den höchsten Mittelwert zeigt Trockenschlamm, was auch für die Summe PCB (7) gilt (Abbildung I. 12). Der im 3. Arbeitspapier der EU zur Novellierung der Klärschlammrichtlinie 86/275/EWG (EU Arbeitsunterlage Schlämme, 3. Entwurf, April 2000) diskutierte niedrigere Grenzwert von 800 µg/kg TM für die Summe PCB (7) wird nach derzeitiger Datenlage ebenfalls deutlich unterschritten.

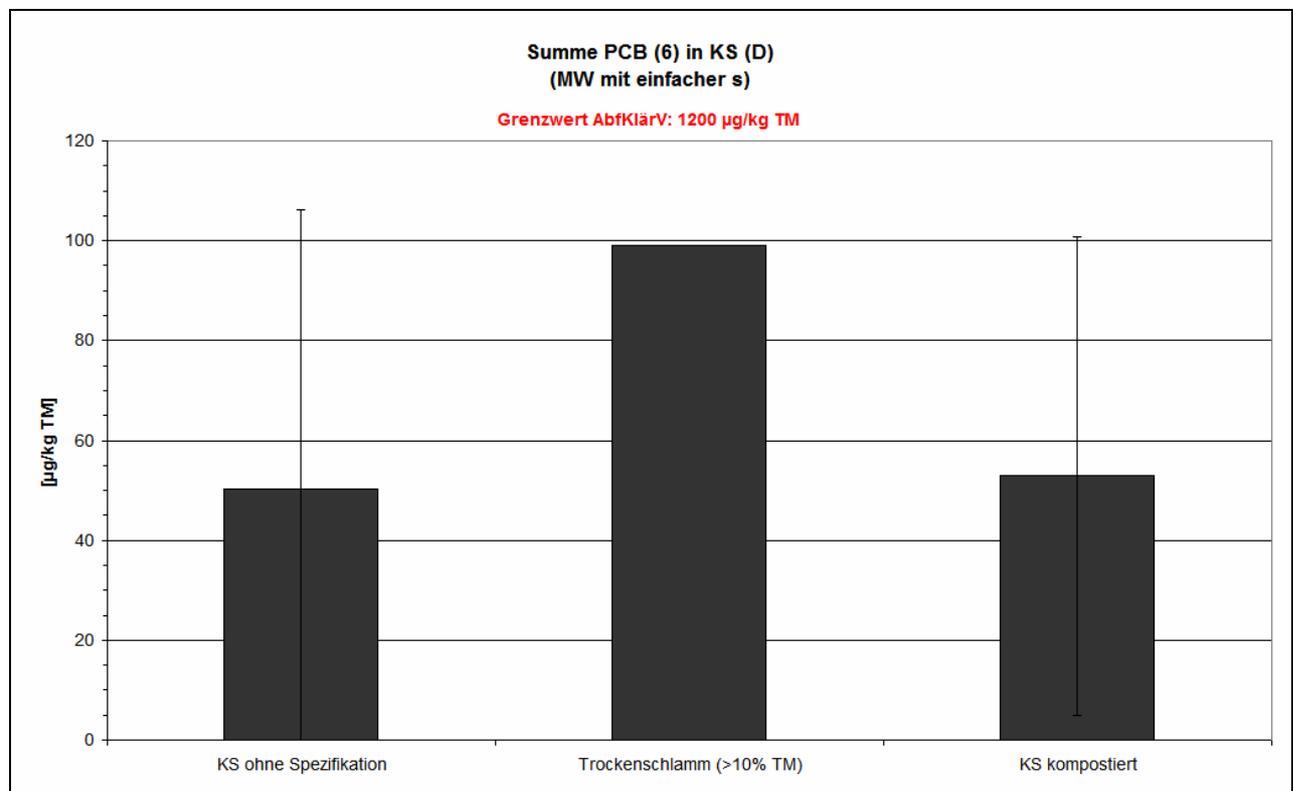


Abbildung I. 12: PCB (Summe aus 6 Kongeneren nach AbfKlärV) in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

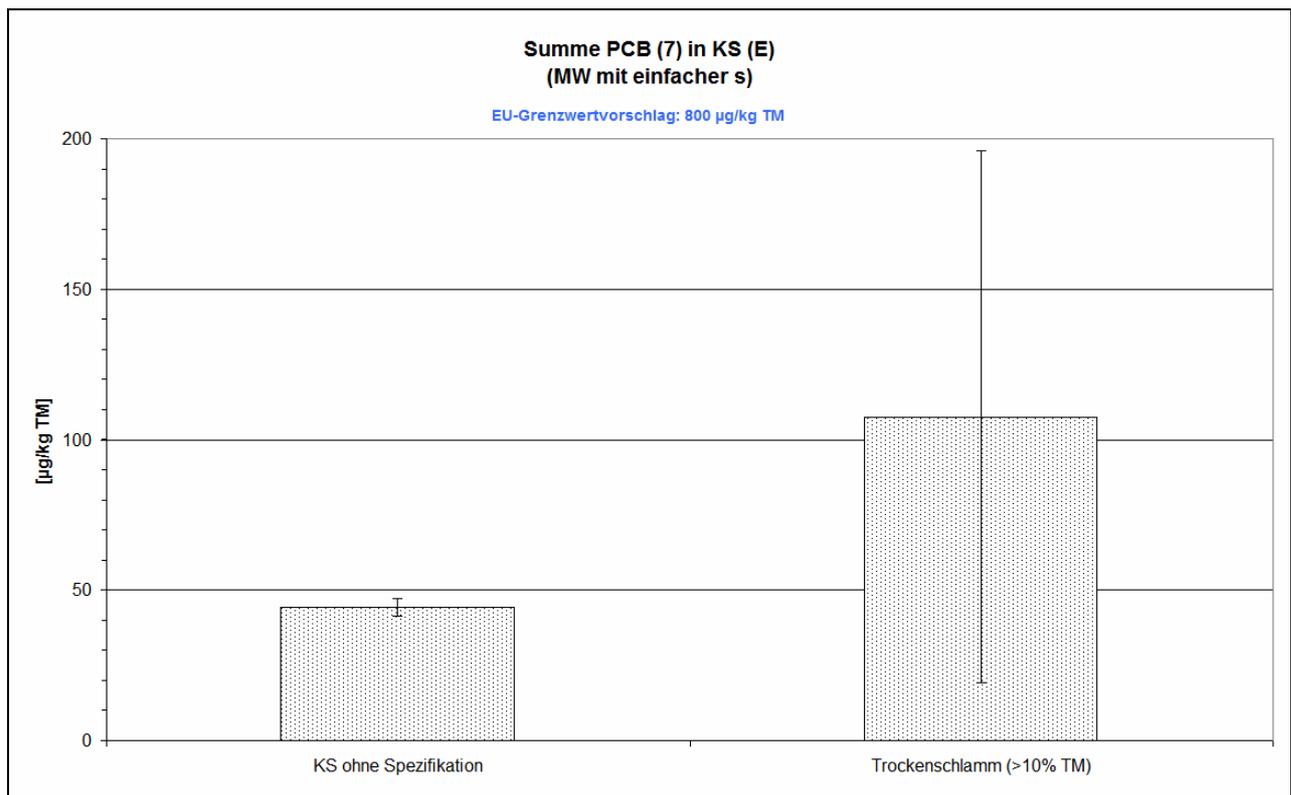


Abbildung I. 13: PCB (Summe aus 7 Kongeneren) in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

### PCDDF

Im Mittel wird der Grenzwert der AbfklärV (entspricht dem in der EU diskutierten Grenzwertvorschlag) von 100 ng TE/kg TM für die Summe von PCDD/F in PCDD-Toxizitätsäquivalenten nach AbfklärV von allen Schlammtypen unterschritten (Abbildung I. 14). Besonders hohe Gehalte kommen allerdings in der Gruppe der Klärschlämme ohne Spezifikation (Deutschland) vor, wie bereits die einfache Standardabweichung zeigt. Im Extremfall werden Maximalgehalte bis zu 3800 ng TE/kg TM erreicht. Europäische Schlämme zeigen deutlich niedrigere Gehalte, allerdings liegt hier nur eine einzige Datenquelle zugrunde. Die Kompostierung von Klärschlamm führt offenbar zu einer Anreicherung von PCDD/F, auch hier wurden Extremwerte bis zu 468 ng TE/kg TM gemessen.

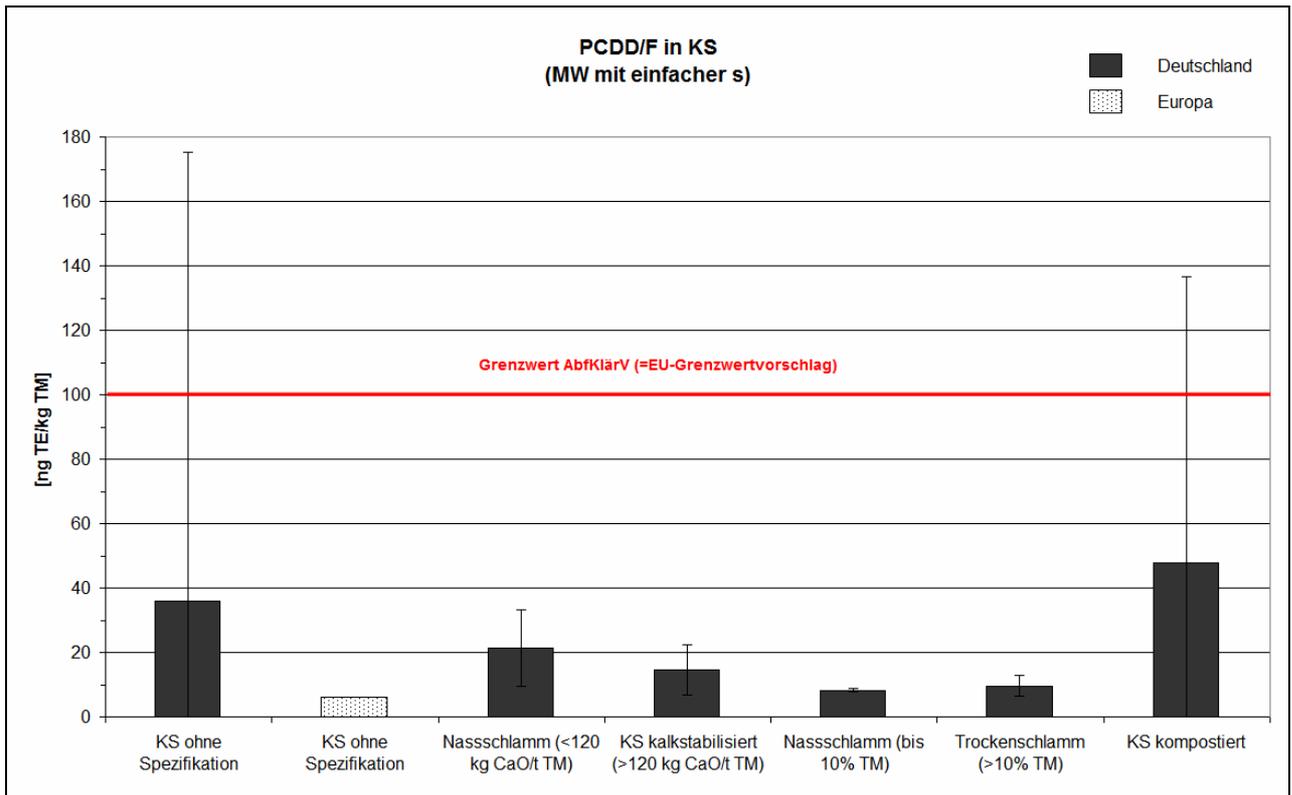


Abbildung I. 14: PCDD/F (Summe von 17 Einzelverbindungen in PCDD-Toxizitäts-Äquivalenten nach AbfklärV) in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

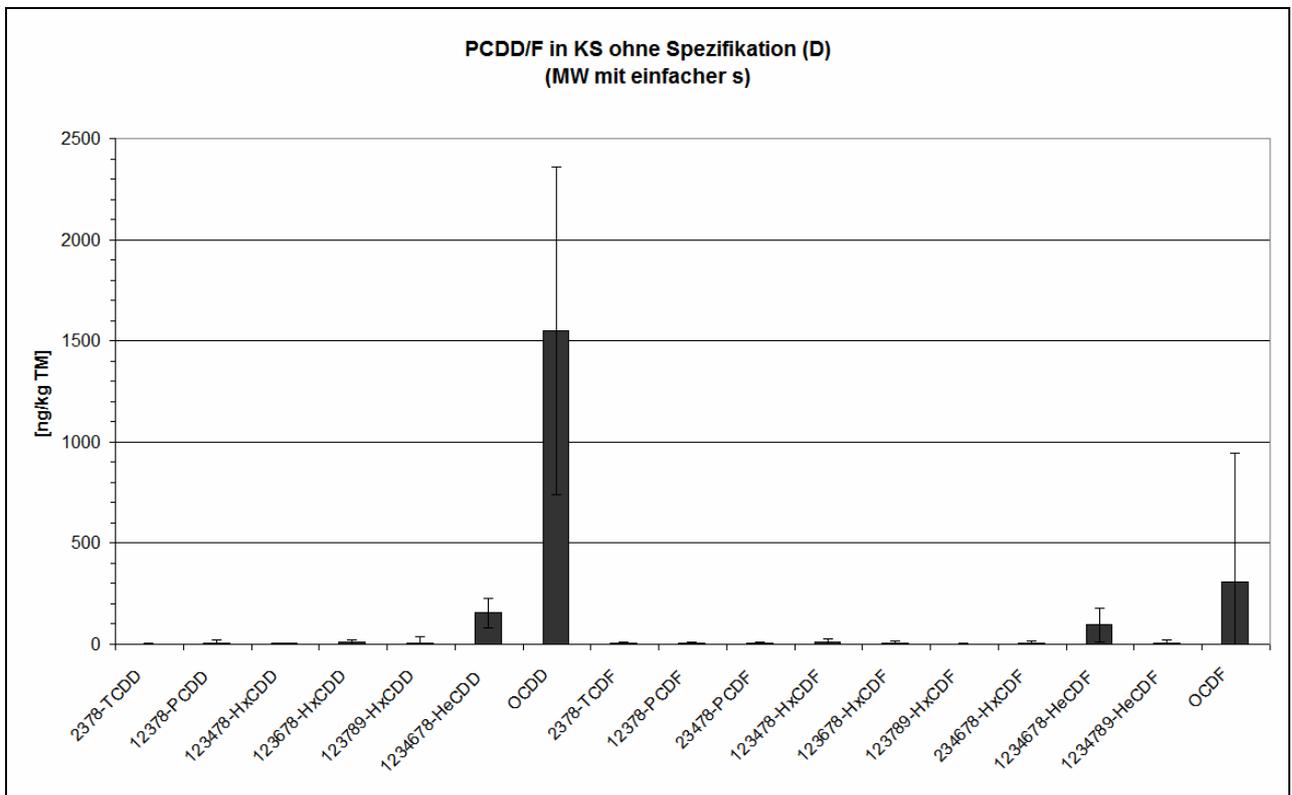


Abbildung I. 15: PCDD/F in Klärschlamm ohne Spezifikation (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

## PAK

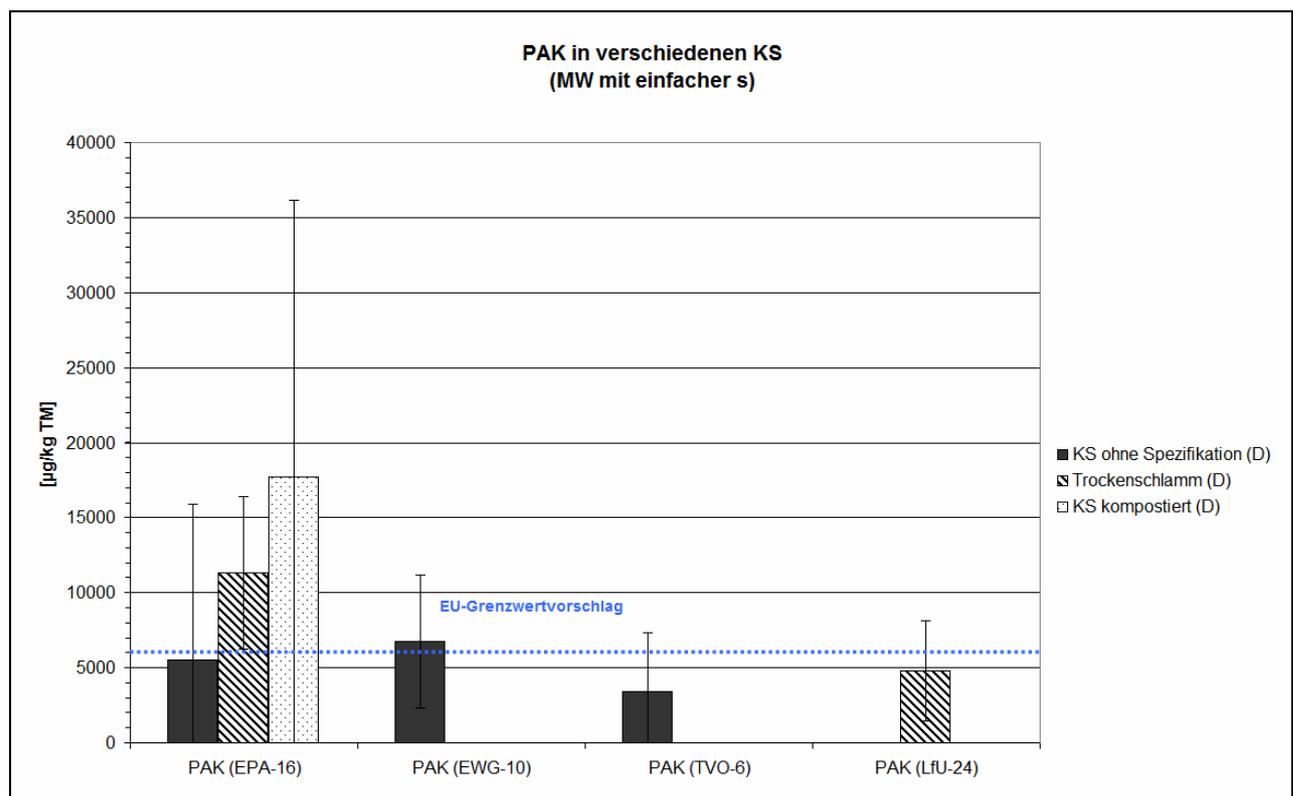


Abbildung I. 16: PAK (Summen, verschiedene Berechnungsweisen) in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

Die gebräuchlichste Berechnungsweise des PAK-Summenparameters ist die nach US EPA (US EPA Method 610 „Organic chemical analysis of municipal and industrial wastewater – polynuclear aromatic hydrocarbons“), hier gehen 16 Einzelverbindungen in die Summe ein. Die EU-Richtlinie 86/275/EWG schlägt dagegen nur die Summierung von 10 Einzelverbindungen vor, während nach der TrinkwasserVO nur 6 Verbindungen aufsummiert werden. Das LfU rechnet mit 24 Einzelverbindungen.

Nur für die EPA-Summe liegen Daten für verschiedene Schlammtypen vor, aus denen hervorgeht, dass durch Kompostierung eine Anreicherung von PAK in Klärschlamm stattfinden kann. Auch der Trockenschlamm zeichnet sich durch höhere Gehalte aus als die Gruppe der Schlämme ohne Spezifikation (Abbildung I.16). Ein offizieller Grenzwert für PAK in Klärschlämmen wurde in Deutschland bisher nicht definiert. Im EU-Arbeitspapier zur Änderung der Klärschlammrichtlinie wird für eine Summe von 9 bzw. 10 PAK (Benzo-Fluoranthen wird teilweise separat als Benzo(b)- und Benzo(k)-Fluoranthen, teilweise als zusammengefasste Gruppe aus 3 Kongeneren - Benzo(bjk)-Fluoranthen - angeführt) ein Grenzwert von 6000 µg/kg TM vorgeschlagen. Ein Abgleich mit bereits vorhandenen Daten ist hier schwierig, da in der überwiegenden Zahl der Fälle bisher entweder der EPA-Summenparameter für 16 PAK oder jener der TVO für nur 6 PAK publiziert wurde (siehe hierzu die entsprechenden Datenblätter in Anhang I-A2d). Der Summenparameter der EWG wurde nur in einer Quelle (Entsorgungsverband Saar, 2001, Mittelwert aus 11 Anlagen) gefunden, demnach würde der in der EU diskutierte Grenzwertvorschlag im Mittel bereits leicht überschritten. Errechnet man für Klärschlamm ohne Spezifikation aus den im Datenblatt gegebenen Mittelwerten für Deutschland den EWG-

Summenparameter, so ergibt sich ein Wert von 4919 µg/kg TM, im Mittel deutscher Klärschlämme wäre somit der diskutierte EU-Grenzwert einhaltbar. Das betreffende Datenblatt zeigt aber auch, dass bereits bei einzelnen in die Summe eingehenden Verbindungen maximale Gehalte auftreten können, die deutlich oberhalb der vorgeschlagenen Grenzmarke von 6000 µg/kg TM liegen.

#### Nonylphenol (NP) und Nonylphenoethoxylate (NPEO)

Für NP, N1PEO und NP2EO existiert bislang noch kein bindender Grenzwert, im EU-Arbeitspapier wird für die Summe der drei Verbindungen ein Grenzwert von 50000 µg/kg TM zur Diskussion gestellt (dem folgt auch das UBA in seinem bereits an früherer Stelle zitierten Bericht). Wie aus Abbildung I.17 ersichtlich, kann bereits NP allein mit im Mittel rund 46000 µg/kg TM nah an diesen Grenzwert heranreichen, die Summe aus NP und den beiden NPEO liegt zwar für deutsche Klärschlämme (11 Meßwerte) im Mittel darunter, für europäische (59 Meßwerte) jedoch weit darüber.

#### Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS)

Für LAS werden im EU-Arbeitspapier 2600 mg/kg TM als Grenzwert zur Diskussion gestellt, dem folgt auch das UBA in seinem Bericht ans BMU. Die große Gruppe der deutschen Schlämme ohne Spezifikation hält diesen Grenzwert im Mittel ein, die einfache Standardabweichung liegt jedoch schon klar darüber (Abbildung I. 18), das Maximum reicht bis zu 8100 mg/kg TM. Die europäischen Angaben für diese Gruppe liegen zwar im Mittel deutlich niedriger, allerdings mit einer großen Spannweite, das Maximum reicht hier mit 5600 mg/kg TM ebenfalls über den Grenzwert hinaus. Besonders hohe Gehalte zeigen die europäischen Daten für Nass- und Trockenschlämme, diese liegen bereits im Mittel oberhalb des Grenzwertes und erreichen maximale Gehalte bis zu 8519 bzw. 13092 mg/kg TM. Bei der Kompostierung wird LAS offenbar abgebaut, die beiden verfügbaren Einzelwerte für kompostierte Schlämme zeigen Gehalte von nur 36 bzw. 130 mg/kg TM.

#### Phthalate

Die Datenbank enthält Angaben zu verschiedenen Phthalaten, bewertet bzw. mit einem Grenzwertvorschlag versehen wurde bisher jedoch nur DEHP. Aus Abbildung I. 19 ist ersichtlich, dass die Gehalte von DEHP enormen Schwankungsbreiten unterliegen, im Mittel allerdings der auf EU-Ebene diskutierte Grenzwertvorschlag von 100000 µg/kg TM (so auch vom UBA übernommen) deutlich unterschritten wird. Auch bei den anderen Phthalaten sind, sofern mehr als eine Datenquelle vorliegt, außerordentlich hohe Schwankungsbreiten zu verzeichnen.

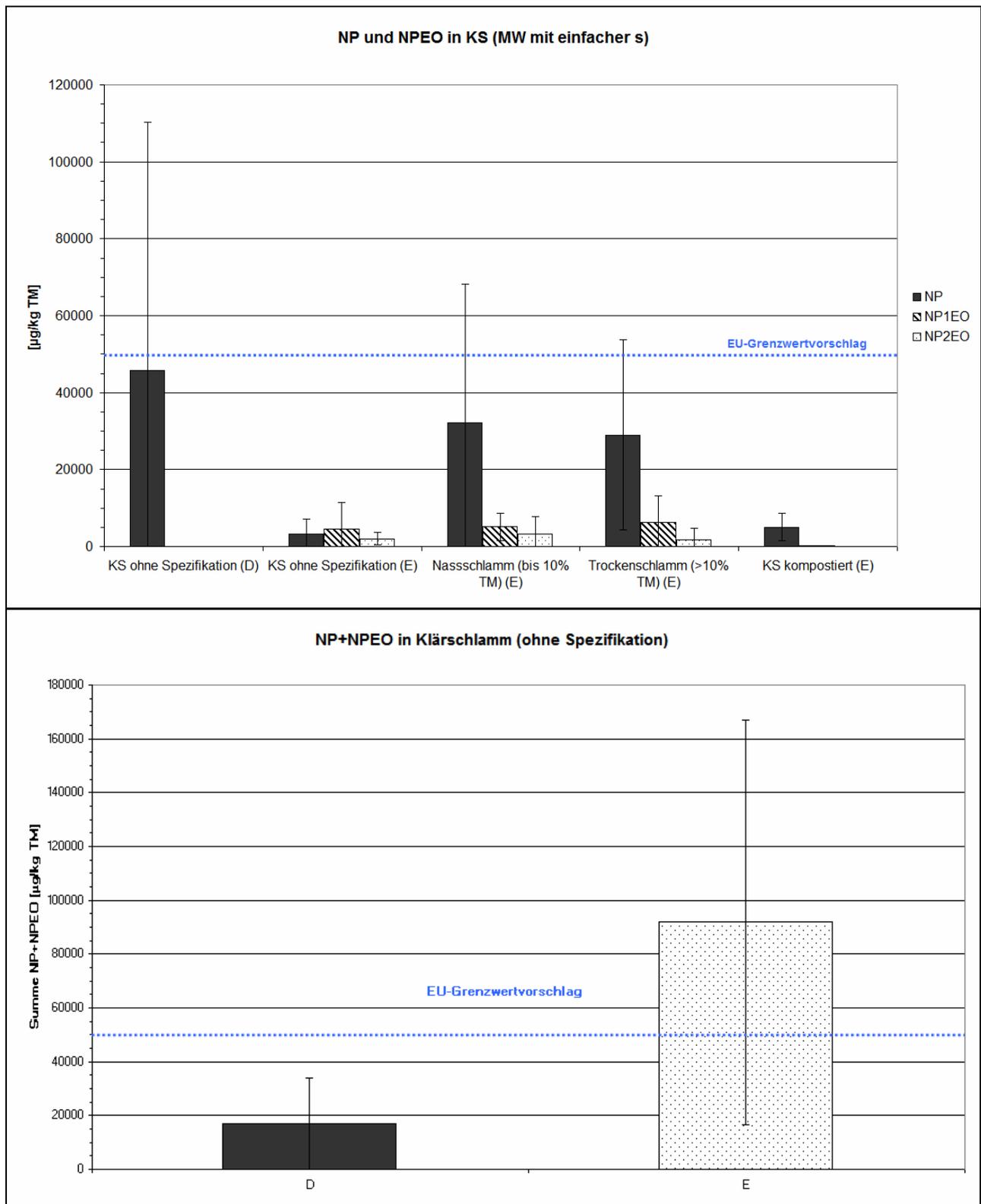


Abbildung I. 17: NP und NPEO in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung), oben: Einzelverbindungen, unten: Summe aus NP und NPEO für deutsche (D) und europäische (E) Klärschlämme

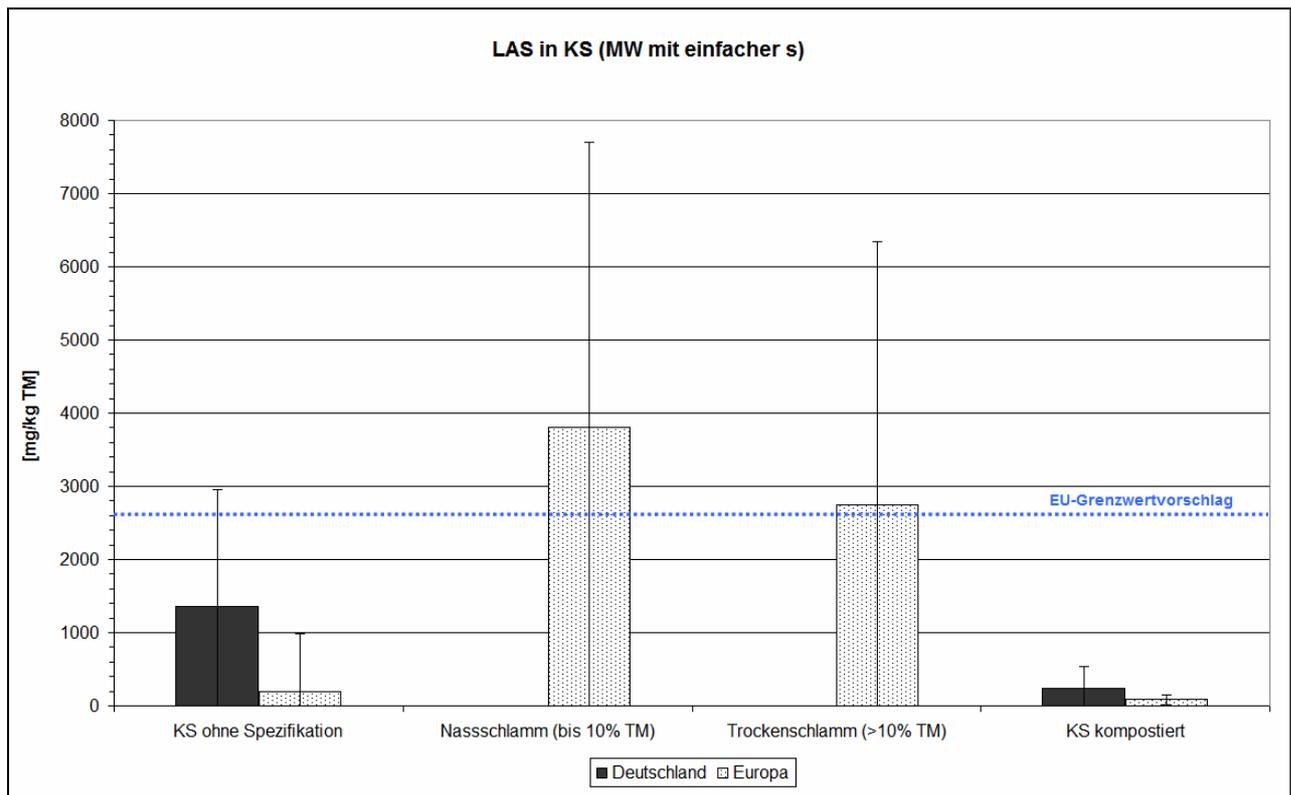


Abbildung I.18: LAS in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

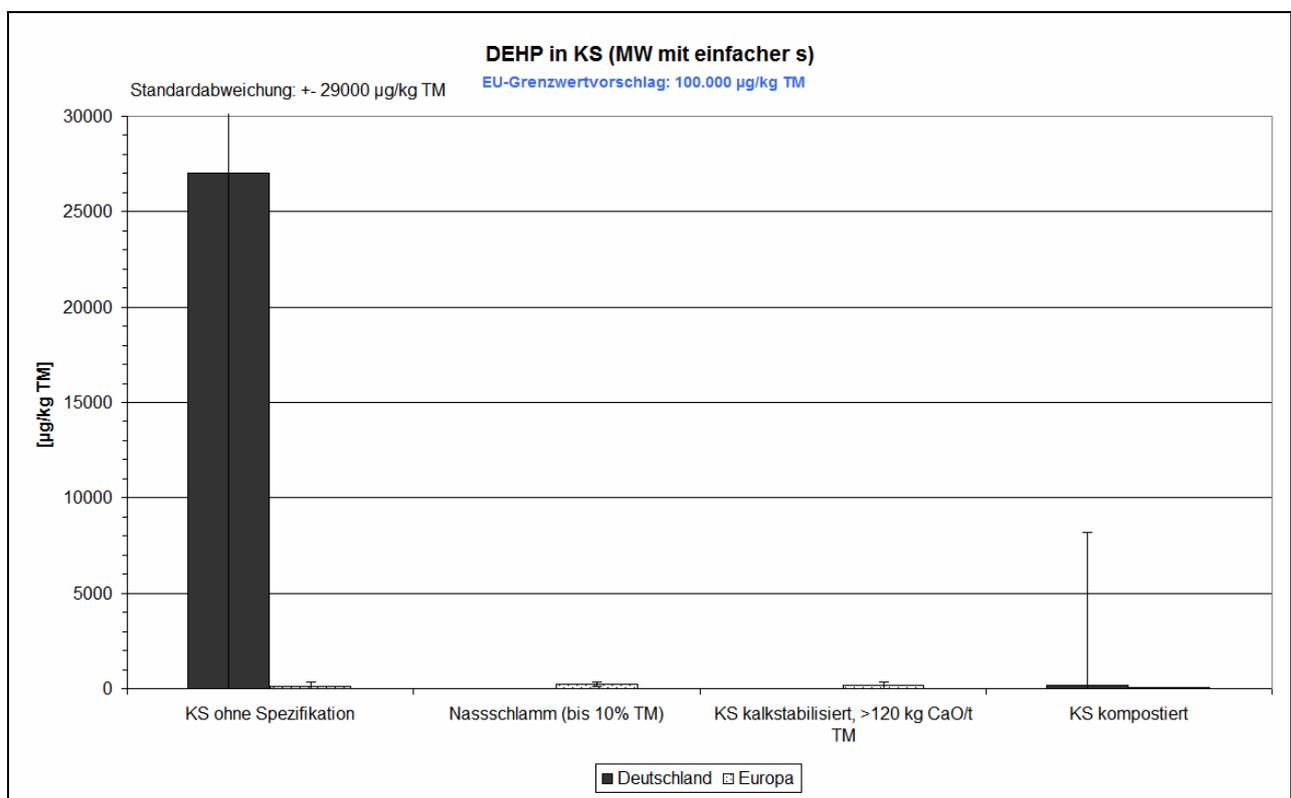


Abbildung I.19: DEHP in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

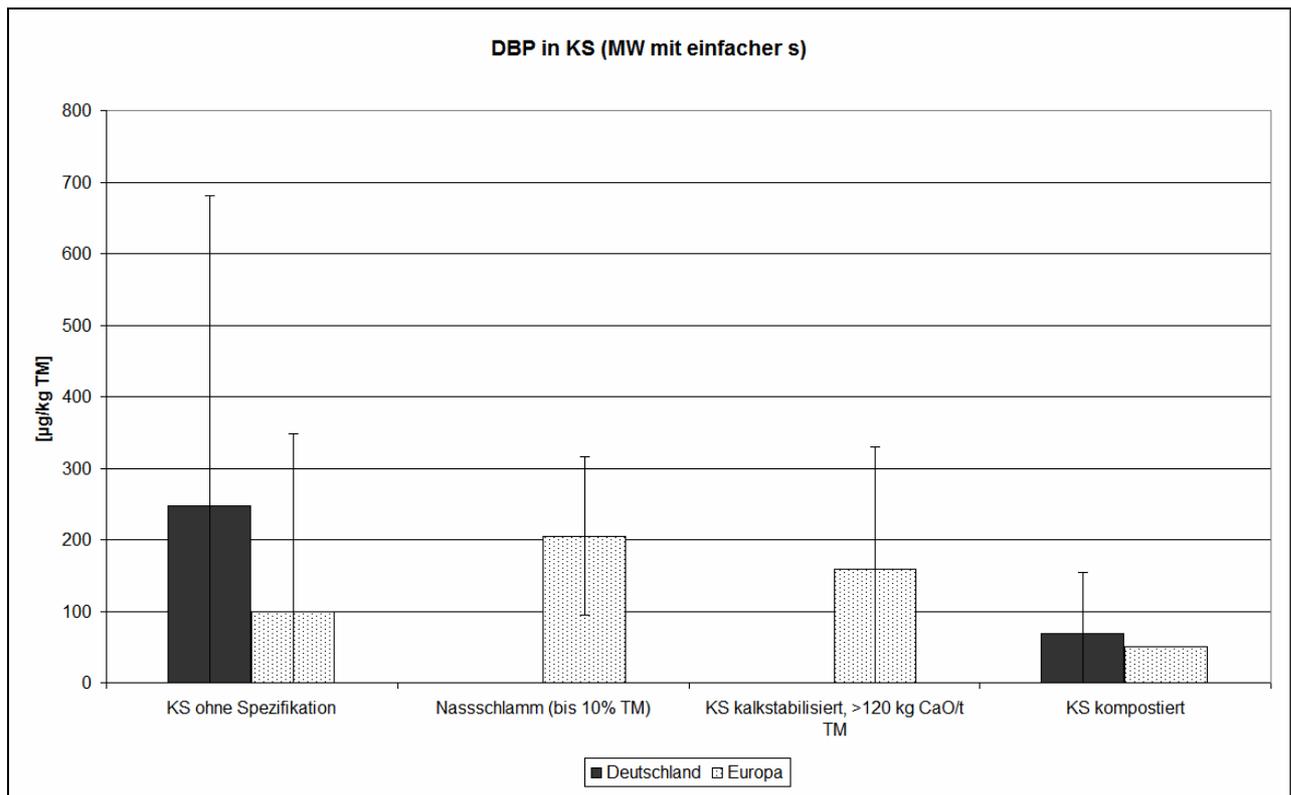


Abbildung I. 20: DBP in Klärschlamm (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

### Organozinnverbindungen

Organozinnverbindungen sind im 3. Arbeitspapier zur Novellierung der EU-Klärschlammrichtlinie noch nicht berücksichtigt. In einer aktuellen Studie des LUA NRW (2005) wurden Grenzwertbereiche für MBT (100-200 µg/kg TM), DBT (10-150 µg/kg TM) und TBT (5-30 µg/kg TM) formuliert. Die Ableitung erfolgte auf Grundlage des Medianwertes der in der Studie analysierten nordrheinwestfälischen Schlämme bzw. als Spanne zwischen Medianwert und ökotoxikologischer Geringfügigkeitsschwelle (MUNLV, 2005). Wie aus Abbildungen I.21 und I.22 ersichtlich, werden die dort genannten Bereiche von allen drei Verbindungen regelmäßig überschritten, wobei die höchsten Gehalte von DBT mit im Mittel bis zu 343 µg/kg TM (deutscher Klärschlamm ohne Spezifikation) erreicht werden. Die großen Standardabweichungen deuten allerdings bereits darauf hin, dass die gemessenen Gehalte sehr stark variieren und in Extremfällen deutlich höhere Gehalte erreicht werden.

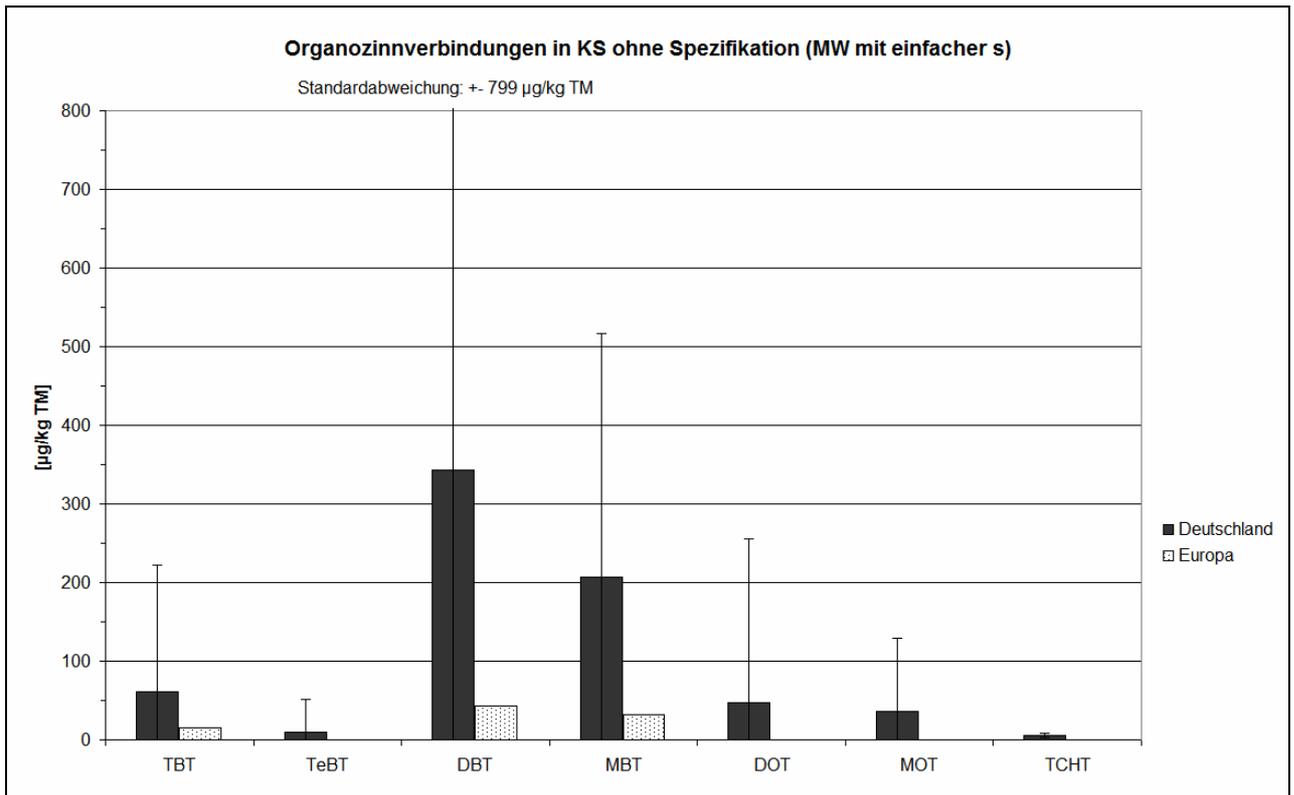


Abbildung I. 21: Organozinnverbindungen in Klärschlamm ohne Spezifikation (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

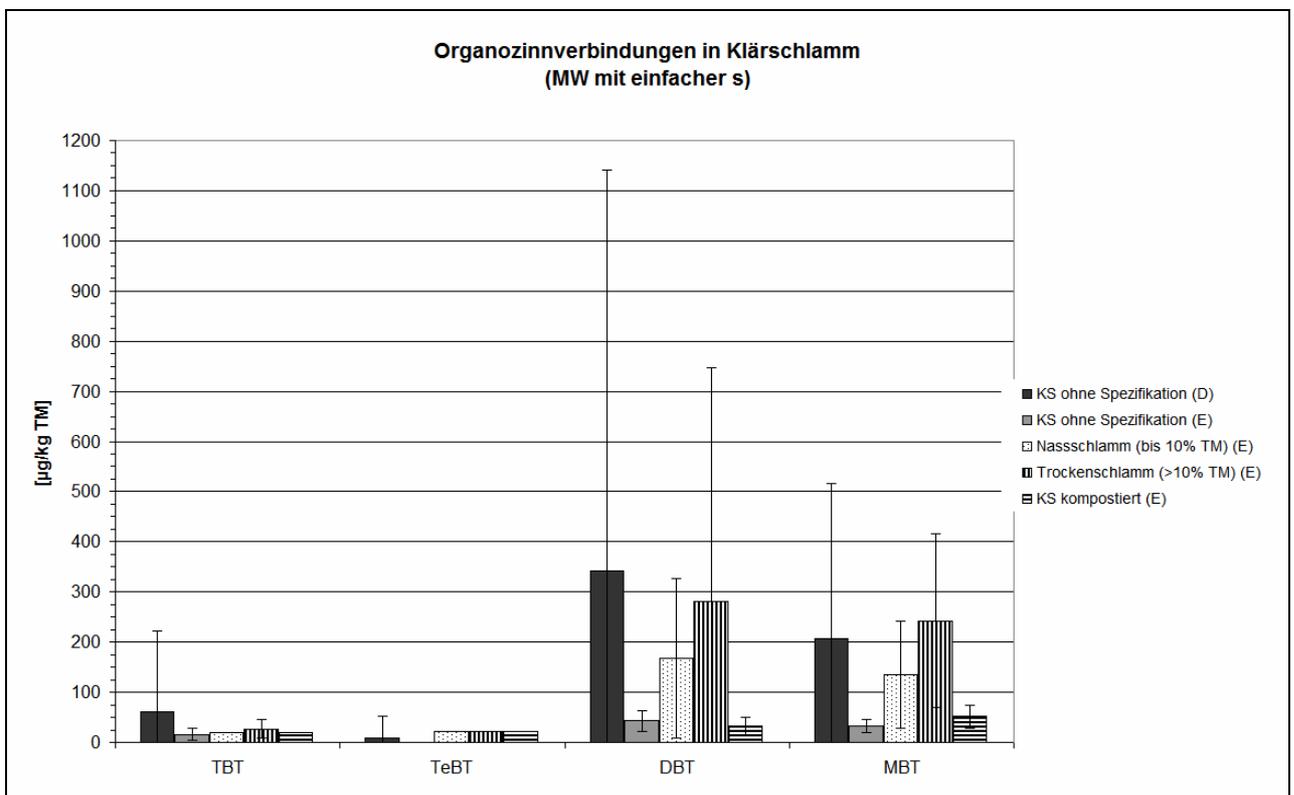


Abbildung I. 22: Organozinnverbindungen in verschiedenen Schlammtypen im Vergleich (aggregierte oder einfache Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung)

### 1.4.6 Gülle, Kompost, Gärprodukte und Mineraldünger - organische Schadstoffe

Im diesem Abschnitt werden die experimentellen Untersuchungsergebnisse hinsichtlich organischer Schadstoffe in Gülle, Kompost, Gärprodukte und Mineraldünger behandelt.

Dazu werden die Verteilungsdaten der organischen Kontaminanten graphisch mittels Box-Whisker-Plots dargestellt. Die Box wird begrenzt von dem 25 % - und dem 75 % - Perzentil. Die Linie innerhalb der Box gibt den Median an. Die Whisker geben das 5 % - bzw. das 95 % - Perzentil an und die Minimal- bzw. Maximalwerte werden durch Kreuze dargestellt.

#### Detergenzien (Nonylphenol/Nonylphenoethoxylate sowie LAS)

Abbildung I.23 und Abbildung I.24 verdeutlichen, dass in den untersuchten Gülle aus konventionell und ökologisch arbeitenden Betrieben offensichtlich keine Nonylphenoethoxylate enthaltende Industriereiniger eingesetzt werden. Stattdessen wird in Probe 2d (Henne) ein sehr hoher Wert für LAS (2175 mg/kg mT) gefunden. Da alle anderen Werte bei 250 mg/kg mT und darunter liegen, kann davon ausgegangen werden, dass der Stall kurz vor der Probennahme intensiv gereinigt wurde.

Bei zwei Proben der konventionell arbeitenden Betriebe (Proben G6 und G8) zeigt sich, dass offensichtlich Nonylphenoethoxylat, das Detergenz in Reinigungsmitteln, in der Gülle abgebaut wird. Probe G6 enthält praktisch nur die beiden Ethoxylate, während Probe G8 keine Ethoxylate mehr enthält, sondern diese bereits weiter zum Nonylphenol abgebaut wurden.

Vergleicht man die Gehalte mit den in der EU-Klärschlammverordnung vorgesehenen Werten, so wird deutlich, dass die Nonylphenolwerte nur 1% des Grenzwertes ausschöpfen.

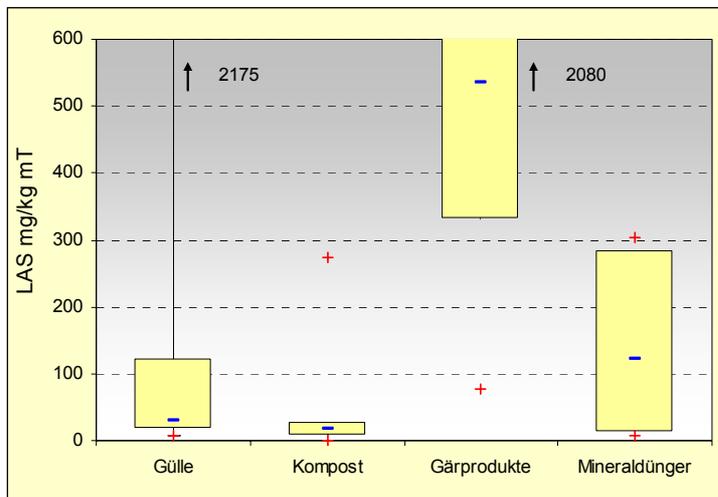
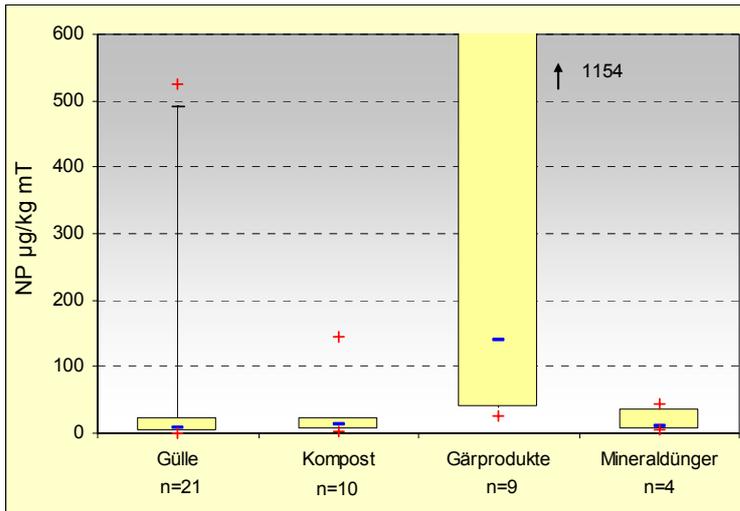
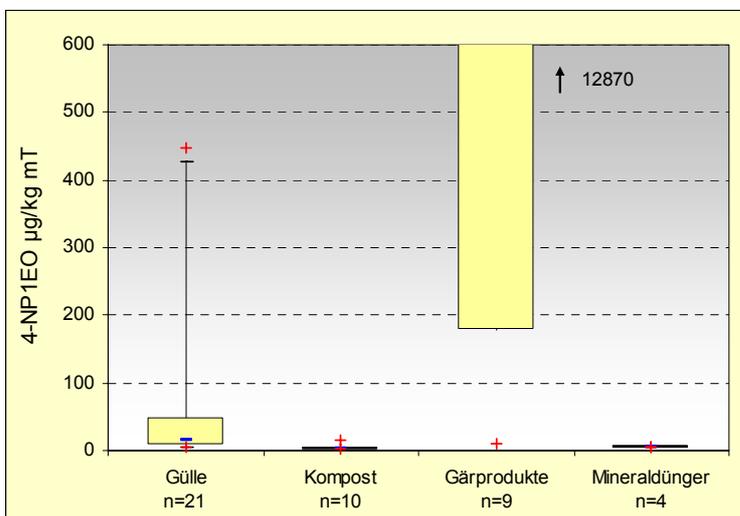


Abbildung I.23: Verteilung der LAS-Gehalte in den untersuchten Sekundärrohstoffdüngern



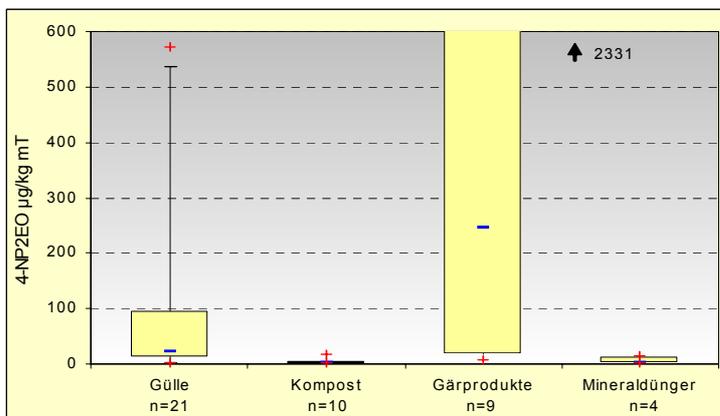
Vorgeschlagener Grenzwert  
in EU-Klärschlamm-  
verordnung:  
50 mg/kg (für NP/NPEO)

Abbildung I.24: Verteilung der 4-Nonylphenol - Gehalte in den untersuchten Sekundärrohstoffdüngern



Vorgeschlagener Grenzwert  
in EU-Klärschlamm-  
verordnung:  
50 mg/kg (für NP/NPEO)

Abbildung I.25: Verteilung der 4-Nonylphenol monoethoxylat - Gehalte in den untersuchten Sekundärrohstoffdüngern



Vorgeschlagener Grenzwert  
in EU-Klärschlamm-  
verordnung:  
50 mg/kg (für NP/NPEO)

Abbildung I.26: Verteilung der 4-Nonylphenol diethoxylat - Gehalte in den untersuchten Sekundärrohstoffdüngern

Bis auf einen Wert für LAS der Probe 2d, liegen alle anderen Werte weit unter dem vorgeschlagenen Grenzwert.

Der Vergleich Gärprodukte und Komposte zeigt, dass während der aeroben Vorbehandlung der Kompostherstellung gegebenenfalls im Ausgangsmaterial vorhandene Detergenzien weitestgehend abgebaut werden, so dass die Werte ebenfalls weit unter dem Grenzwert für Klärschlämme liegen. Gärprodukte zeigen dagegen deutlich höhere Gehalte sowohl an LAS als auch an Nonylphenol und Nonylphenoethoxylaten.

### Phthalate

Bei den Phthalaten konnte in den Gülle der konventionellen und der ökologischen Tierhaltung kein DBP nachgewiesen werden, während DEHP in allen Proben vorhanden ist. Generell zeigt sich, dass in den konventionellen Betrieben anscheinend mehr Kunststoff eingesetzt wird, da hier die Werte höher liegen (Mittelwert konventioneller Haltung = 3,26 mg/kg mT zu Mittelwert ökologischer Haltung = 0,45 mg/kg mT). Legt man wiederum den Grenzwertvorschlag für Klärschlämme von 100 mg/kg mT zu Grunde, so wird deutlich, dass der höchst gemessene Wert von 17 mg/kg mT deutlich von dem Grenzwert entfernt ist.

Deutlich höhere Werte wurden bei Komposten und Gärprodukten gemessen. Bei Komposten fällt auf, dass die Werte stark streuen (0,4 mg/kg mT bis 244 mg/kg mT). Dieser hohe Wert überschreitet deutlich den EU-Grenzwertvorschlag für Klärschlämme, der mit 100 mg/kg mT angegeben ist. Bei den Gärprodukten wird zwar dieser Wert nicht überschritten, die Gehalte liegen jedoch im Durchschnitt signifikant über denen der Komposte.

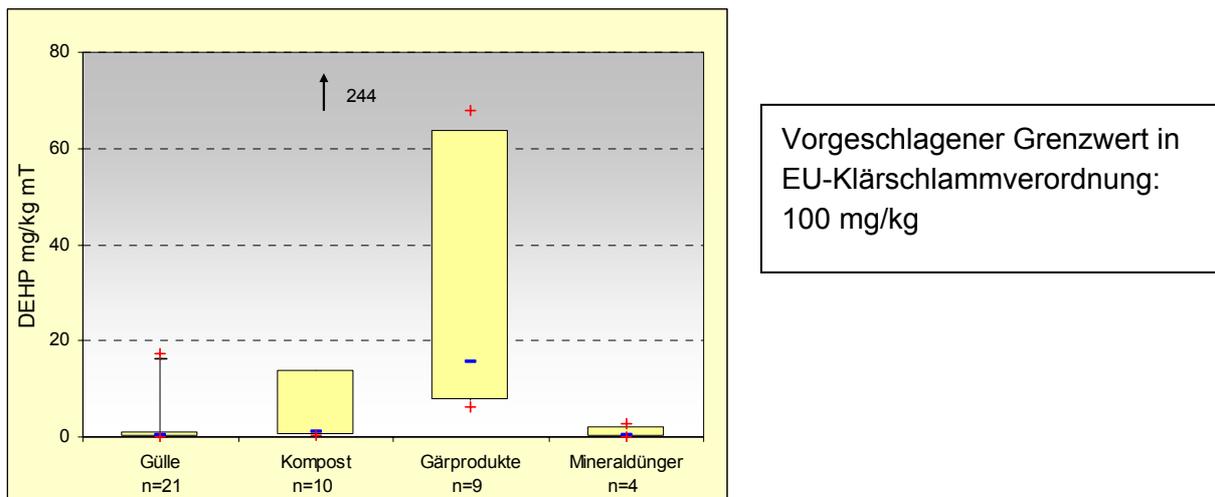


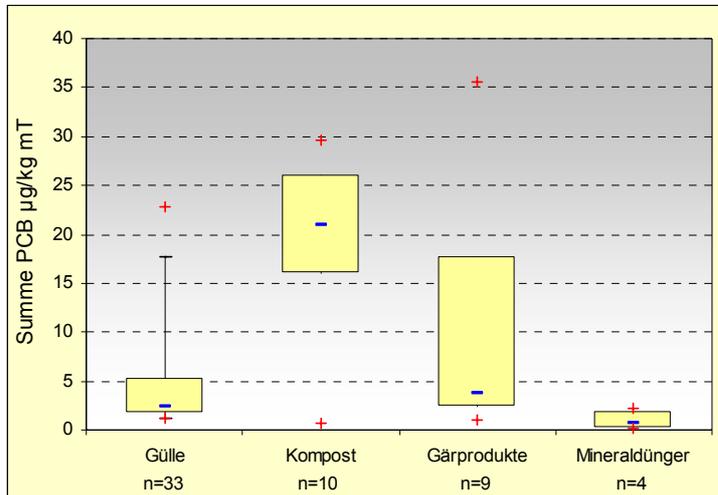
Abbildung I.27: Verteilung der DEHP-Gehalte in den untersuchten Sekundärrohstoffdüngern

### Organozinnverbindungen

Bei den organischen Zinnverbindungen wird überwiegend MBT und in signifikant geringeren Gehalten DBT gefunden, während bei allen Proben TBT unterhalb bzw. im Bereich der Bestimmungsgrenze lag. Bei MBT liegen die Gehalte in der Gülle aus konventionell arbeitenden Betrieben im Mittel über denen der ökologischen und diese wiederum etwas über den Werten in Komposten. Gärprodukte zeigen wiederum deutlich höhere Gehalte als Komposte.

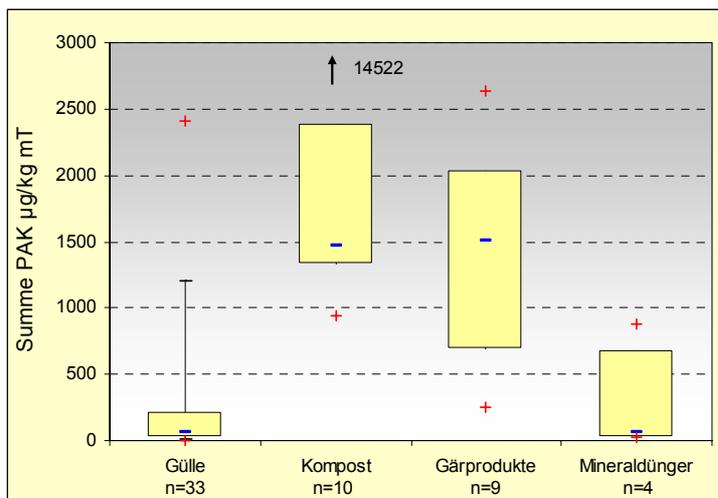
## Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die Werte für die PCBs und PAKs in den Gülleproben zeigen nur sehr geringe Gehalte. Auffallend ist ein Wert (Probe 75a) aus ökologischer Haltung, wo vielleicht angenommen werden kann, dass der untersuchte Mist mit Aschen kontaminiert wurde. Der Mittelwert für die Gülleproben liegt deutlich unter dem Wert für Komposte und Gärprodukte.



Vorgeschlagener Grenzwert in  
EU-Klärschlammverordnung:  
100 mg/kg

Abbildung I.28: Verteilung der PCB-Gehalte (Summe PCB) in den untersuchten Sekundärrohstoffdüngern



Vorgeschlagener Grenzwert in EU-  
Klärschlamm-verordnung:  
6 mg/kg (für EPA-PAKs)

Abbildung I.29: Verteilung der PAK-Gehalte (Summe PAK nach EPA) in den untersuchten Sekundärrohstoffdüngern

Vergleicht man die PCB- und PAK-Gehalte in den verschiedenen untersuchten Materialien mit entsprechenden Richt- und Bodenwerten, so erhält man folgendes Bild:

Für die Summe der PAKs liegen Vorsorgewerte nach BBodSchV sowie Vorschläge für Bodenwerte nach EU 3rd Draft ENV.E3/LM, 27 April 2000, vor. Ein Vergleich der Gehalte in den Materialien mit Bodenwerten ist aus fachtechnisch-wissenschaftlicher Sicht in erster Näherung angemessen. Die entsprechenden Bodenwerte sind mit 3 – 10 mg/kg TG (BBodSchV) und 10 – 30 mg/kg TG (EU-Draft) je nach Humusgehalt des Bodens angegeben. Lediglich der Maximalwert für die Summe der PAKs in Kompost, der bei 14,5 mg/kg TG liegt, überschreitet die festgelegten bzw. vorgeschlagenen Bodenwerte. Alle

weiteren PAK-Gehalte in Gülle, Gärprodukte, Mineraldünger und Kompost liegen unterhalb der Bodenwerte.

Die AbfKlärV weist einen Grenzwert für PCBs (Kongenere 28, 52, 101, 138, 153 und 180) von 0,2 mg/kg TG aus. Der Vorsorgewertebereich nach BBodSchV liegt bei 0,05 -0,1 mg/kg (PCB6) und der EU-Vorschlag bei 0,6 – 1 mg/kg TG. Der im Rahmen des Vorhabens höchste Maximalwert ist der von PCBs in Gärprodukten, der bei 0,035 mg/kg liegt. Von daher liegen alle PCB-Gehalte in den untersuchten Materialien Gülle, Gärprodukte, Mineraldünger und Kompost unterhalb der verschiedenen Materialgrenzwerte und Bodenwerte.

Die MKW wurden in den Gülleproben nicht untersucht, da Gülle originär viele Kohlenwasserstoffe enthält. In den Komposten wurden bis auf eine nur geringe Gehalte gefunden.

## **I.5 Regionale Auswertung der Daten von Bioabfallkompostierungsanlagen**

Es wurde eine umfassende statistische Auswertung der aktuellen Mittelwerte von 376 RAL-gütesicherten Bioabfallkompostierungsanlagen durchgeführt. Diese Auswertung umfasst drei wesentliche Bestandteile:

- a) Aussagen zur bundesweiten Verteilung von Inhaltsstoffen, getrennt nach Biotonnen-, Misch- und Grüngutkomposten
- b) Multiple Varianzanalyse zur Prüfung der Hypothese über Einflüsse der bodenschutzrelevanten Standortfaktoren „Vorherrschende Hauptbodenart am Kompostanlagenstandort“, „Zugehörigkeit des Anlagenstandortes zu einem Verdichtungsraum“ und „Art des Inputmaterials“
- c) Gruppierung der Kompostinhaltsstoffe getrennt nach Hauptinputmaterialarten sowie der Kompostierungsanlagen nach Rangfolge der hier angetroffenen Schwermetallgehalte

Die Ergebnisse der regionalspezifischen Auswertungen von Mittelwerten der Kompostqualitäten aus 376 RAL-fremdüberwachten Bioabfallkompostanlagen sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle I 3.: Übersicht zur regionalen Auswertung von Kompostmerkmalen in Deutschland

Kompost- merkmal	Art der erkennbaren Einflüsse auf die Kompostmerkmale	
	abnehmende Gehalte	zunehmende Gehalte
organische Substanz	auf Sandstandorten	in Gebirgsregionen
basisch wirksame Bestandteile	auf ehemaligen Überschwemmungsstandorten	auf kalkhaltigen Standorten
Phosphat	in glazialen Abstromgebieten	Biotonne im Süden bis zur Mitte Deutschlands
Kalium	in glazialen Abstromgebieten	Biotonne im Süden bis zur Mitte Deutschlands
Magnesium	in der Norddeutschen Tiefebene	auf magnesiumhaltigen Standorten
Salzgehalt	keine	bei Biotonne
Steine >2mm	keine	In Thüringen und im Vogtland
Fremdstoffe	keine	bei Biotonne
Blei	keine	im Erzgebirge und im Thüringer Wald
Cadmium	keine	im Erzgebirge und im Vogtland
Chrom	keine	in der Vogelsbergregion, im Erzgebirge und im Vogtland, hinzu kommen kleinräumige Erhöhungen im Osten Deutschlands
Kupfer	keine	kleinflächig differenziert vor allem durch Biotonne
Nickel	in der Norddeutschen Tiefebene	in der Vogelsbergregion, im Erzgebirge und im Vogtland
Quecksilber	keine	in Regionen mit chemischer Industrie und Bergbau
Zink	keine	Vorwiegend in Industrie- und Bergbauregionen

Es ist festzustellen, dass sowohl die Garten- und Parkabfälle und die daraus hergestellten Grüngutkomposte sowie die getrennt gesammelten Siedlungsabfälle und die hier hergestellten Biotonnenkomposte die jeweilige standorttypische Hintergrundsituation widerspiegeln. Die

Bioabfallkompostierung in Deutschland folgt heute im Wesentlichen den Nährstoff- und Schadstoffverhältnisse ihres jeweiligen Einzugsgebietes. Eine Reinigungsleistung für die Umwelt sollte vor allem am Beginn der Stoffkreislaufkette durch primäre Eintragsreduzierung vorgenommen werden. Die Bioabfallkompostierung kann qualitativ, d.h. im Hinblick auf die Inhaltsstoffe, nur so gut betrieben werden, wie es die tatsächlich vorhandene Umweltsituation zulässt.

Die Kompostqualitäten können am besten in folgender Reihenfolge der geprüften Einflussfaktoren unterschieden werden:

Schwermetallrangfolge > Hauptbodenarten > Inputmaterial > Verdichtungsraum

Zwischen den wertgebenden und den vorsorgebestimmenden Inhaltsstoffen ergeben sich dabei in der Tendenz leichte Unterschiede, die jedoch nicht wesentlich sind.

Am Beispiel der Kompostgehalte von organischer Substanz und Phosphat sollen in Tabelle I 4. die Auswirkungen bodenschutzrelevanter Standortmerkmale auf die wertgebenden Inhaltsstoffe von behandelten Bioabfällen aufgezeigt werden.

Tabelle I 4.: Einfluss von Inputmaterial, Verdichtungsräumen und vorherrschender Hauptbodenart der Anlagenstandorte auf die C:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Verhältnisse in Bioabfallkomposten

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Gehalte an organischer Substanz</b>	<b>Gesamtphosphatgehalte (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	<b>C: P-Verhältnis</b>
<b>Inputmaterialwirkungen</b>			
Grüngut	34,9 TS-%	0,531 TS-%	38,1
Mischgut	38,0 TS-%	0,745 TS-%	29,6
Biotonne	39,1 TS-%	0,814 TS-%	27,9
<b>Wirkungen von Verdichtungsräumen</b>			
ohne Verdichtung	37,3 TS-%	0,735 TS-%	29,4
mit Verdichtung	37,3 TS-%	0,658 TS-%	32,9
<b>Wirkungen der vorherrschenden Hauptbodenart</b>			
Sonstige Böden	41,1 TS-%	0,795 TS-%	30,4
Lehm- bzw. Schluffböden	39,2 TS-%	0,709 TS-%	32,1
Sandböden	31,7 TS-%	0,595 TS-%	30,9

Von besonderem Interesse sind die clusteranalytischen Anlagengruppierungen. Die hier vorgenommene Gruppierung nach Schwermetallgehaltsrangfolge hat sich als sehr gutes Prüfkriterium erwiesen. Als Beispiele flächige Differenziertheit von Vorsorgemerkmale in Deutschland sollen in den Abbildungen I 30 und I 31 die Anlagenverteilungen für Kupfergehalte in Biotonnenkomposten und für Zinkgehalte in Grüngutkomposten dargestellt werden.

Niedrige Kupfergehalte finden sich besonders in mittel- bis norddeutschen Biotonnenkompostanlagen, während hohe Kupfergehalte besonders im südwestdeutschen Raum

vertreten sind. Erhöhte Zinkgehalte finden sich bei Grüngutkompostanlagen vor allem in ehamligen industriellen und bergbaulichen Ballungszentren. Auch hier konzentrieren sich niedrige Gehalte auf den süddeutschen Raum

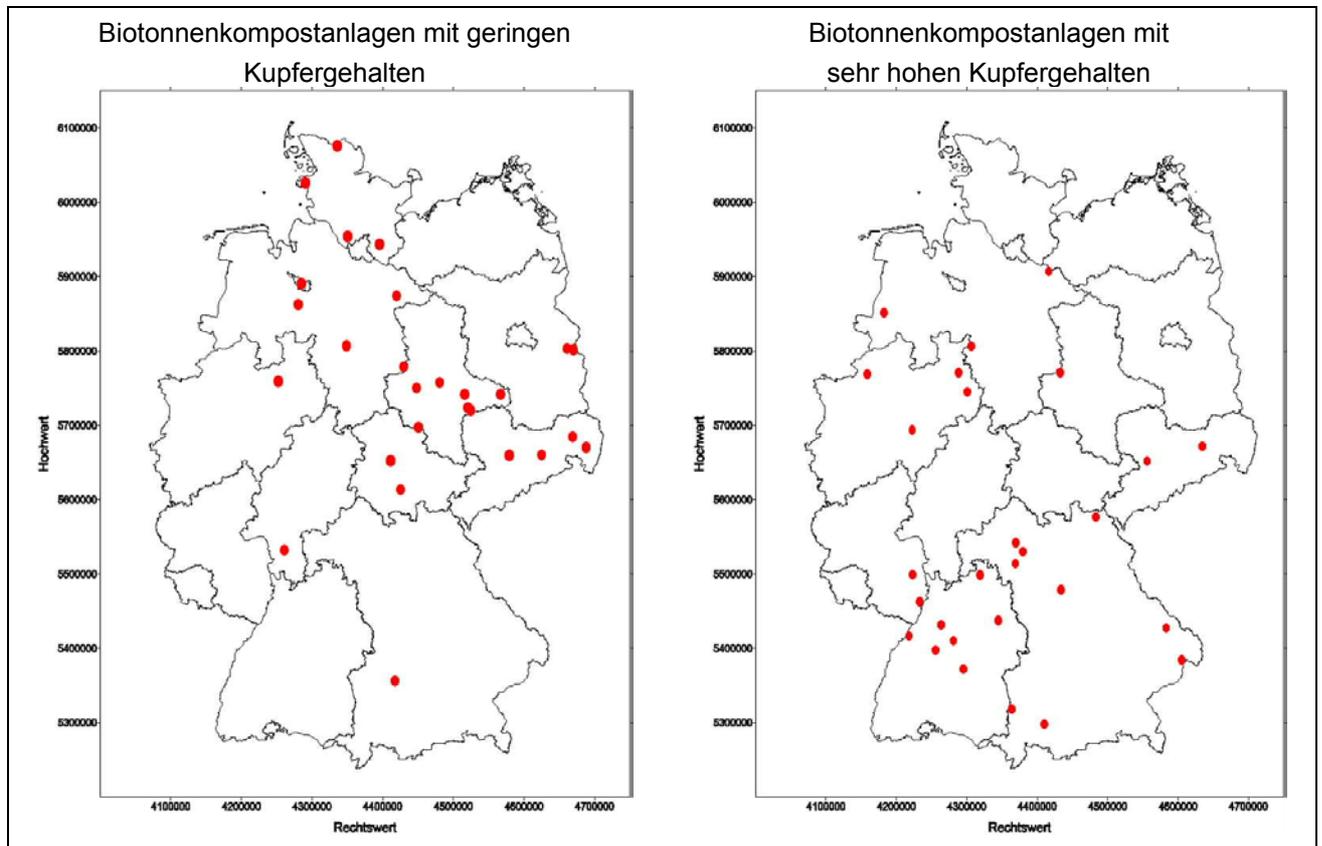


Abbildung I 30.: Standorte von Biotonnenkompostanlagen mit unterschiedlichen Kupfergehalten

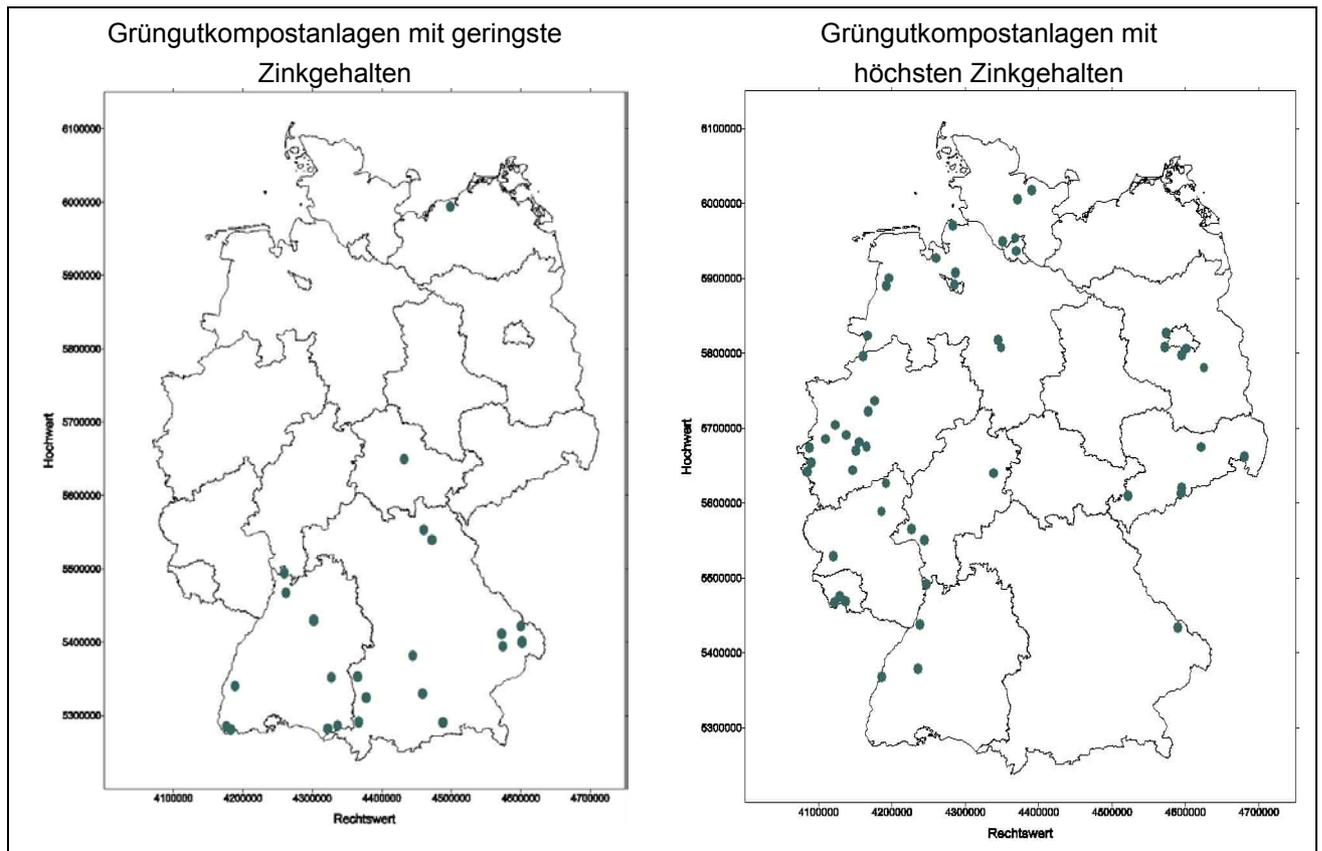


Abbildung I 31.: Anlagenstandorte von Grüngutkompostanlagen mit unterschiedlichen Zinkgehalten

## I.6 Bewertung von Gärproduktqualitäten – Nährstoffe und Schwermetalle

Organische Schadstoffe in Gärprodukten wurden bereits in Kapitel I.4.6 behandelt.

Die Ergebnisse von Untersuchungen der Jahre 1999 bis 2004 wurden für 97 Vergärungsanlagen (davon 87 Anlagen mit flüssigen und 10 Anlagen mit festen Gärprodukten) mit über 1.200 Datensätze einer umfangreichen statistischen Auswertung unterzogen.

Bezogen auf das Jahr 2003 wurden für ausgewählte Parameter bundesweit folgende mittlere Gehalte festgestellt und mit den Ergebnissen bei der Neubewertung von Bioabfallkomposten verglichen.

Tabelle I 5.: Mittelwerte für Gärreststoffe aus 87 Anlagen mit flüssigen und 10 Anlagen mit festen Gärreststoffen im Vergleich zu Bioabfallkomposten

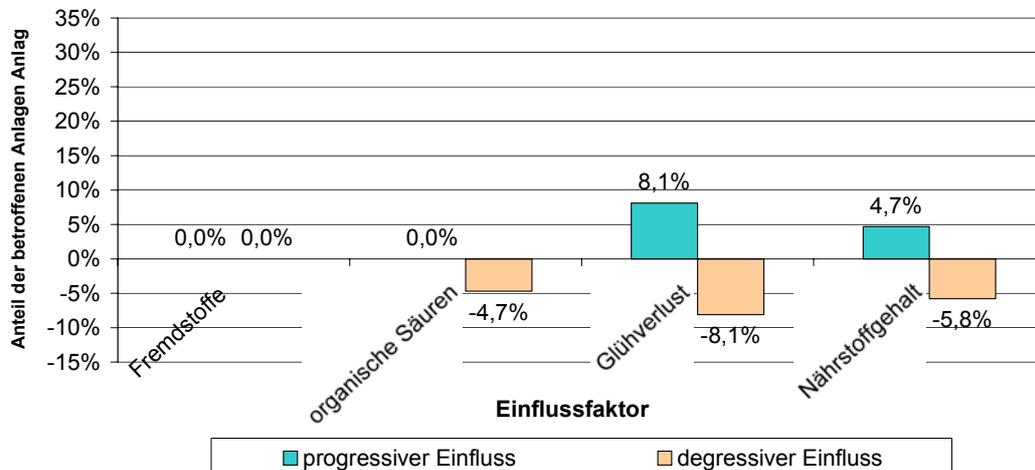
Parameter	Maß-Einheit	Kompost-mittelwert 2002	Gärreststoffmittelwerte 2003			
			Mittelwerte		% zu Kompost	
			flüssig	fest	flüssig	fest
Trockensubstanzgehalt	% FS	64,7	5,2	38,8	8,0	60,0
Glühverlust (organische Substanz)	% TS	37,3	64,6	52,5	173,2	140,8
basisch wirksame Bestandteile	CaO % TS	4,79	4,94	9,48	103,1	197,9
Stickstoff, gesamt	N % TS	1,52	11,03	2,14	725,7	140,8
Phosphat, gesamt	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % TS	0,83	4,51	1,95	543,4	234,9
Kaliumoxid, gesamt	K <sub>2</sub> O % TS	1,26	6,62	1,15	525,4	91,3
Magnesiumoxid, gesamt	MgO % TS	0,84	1,14	0,92	135,7	109,5
keimfähige Samen und Pflanzenteile	St./l	0,08	0,08	0,00	100,0	0,0
Salmonellen		0,00	0,01	0,01		
Fremdstoffe > 2mm (gesamt)	% TS	0,20	0,07	0,14	35,0	70,0
Blei	mg/kg TS	46,4	11,2	32,1	24,1	69,2
Cadmium	mg/kg TS	0,474	0,381	0,488	80,4	103,0
Chrom	mg/kg TS	25,3	17,4	22,1	68,8	87,4
Kupfer	mg/kg TS	57,7	158,1	53,4	274,0	92,5
Nickel	mg/kg TS	16,3	11,6	14,8	71,2	90,8
Quecksilber	mg/kg TS	0,156	0,130	0,148	83,3	94,9
Zink	mg/kg TS	203,7	560,0	198,8	274,9	97,6

Die Trockensubstanzgehalte der Gärprodukte liegen deutlich unter denen der Bioabfallkomposte, insbesondere die der flüssigen Gärprodukte. Während die festen Gärprodukte bezüglich ihrer Inhaltsstoffe eine grundsätzliche Ähnlichkeit zu den Bioabfallkomposten aufweisen, ist für die flüssigen Gärprodukte von einer andersartigen Zusammensetzung auszugehen. Vor allem die Nährstoffgehalte (N, P, K) aber auch die Gehalte von Zink und Kupfer liegen weit über denen der Bioabfallkomposte und der festen Gärprodukte.

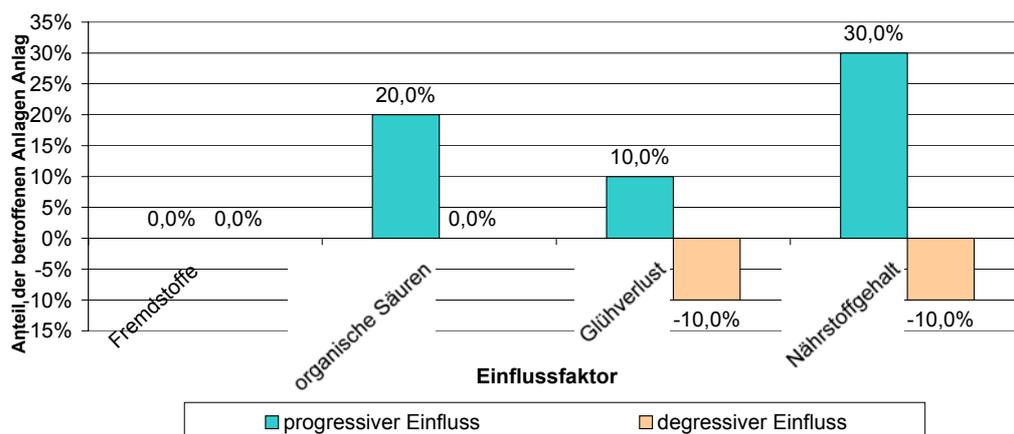
Die Hauptursachen für die andersartige Zusammensetzung der flüssigen Gärprodukte liegen in den vorwiegend tierischen Ausgangsstoffen (vorwiegend Gülle mit hohen Anteilen aus der Schweinehaltung) und in der Flüssigvergärung (verbunden mit einer hohen Löslichkeit der Nährstoffe).

Die festen Gärprodukte haben eine ähnliche Düngewirkung wie die Biokomposte. Während die Nährstoffwirkungen der flüssigen Gärprodukte eher noch höher zu bewerten und damit eher vergleichbar mit Mineraldüngern sind.

Schwermetallkonzentrationen der Gärprodukte wurden in Abhängigkeit von den Parametern Fremdstoffgehalt, organische Substanz, Vergärungsgrad (organische Säuren) und Summe der Nährstoffgehalte (N, P, K) betrachtet (siehe Abbildung I 32)



#### Flüssige Gärreststoffe



#### Feste Gärreststoffe

Abbildung I 32.: Anteil der deutschen Vergärungsanlagen mit statistisch gesicherten linearen Beziehungen der mittleren Schwermetallkonzentrationen zu ausgewählten Gärreststoffmerkmalen

Es wurde in progressiven Einfluss (Zunahme der Schwermetallkonzentration) und degressiven Einfluss (Abnahme der Schwermetallkonzentration) unterschieden. Entsprechend den erheblichen Unterschieden in der Inputmaterialzusammensetzung ergeben sich für die flüssigen Gärprodukte völlig andersartige Zusammenhänge als bei den festen Gärprodukten.

Die festen Gärprodukte zeigen Ähnlichkeiten zu den Bioabfallkomposten, was die Zusammenhänge der Schwermetallgehalte zur organischen Substanz und zu den Nährstoffen betrifft. Fremdstoffe zeigen hier jedoch überhaupt keine Beziehungen zu den Schwermetallen.

Die flüssigen Gärprodukte weisen in deutlich geringerem Maße Beziehungen der Schwermetallgehalte zu anderen Parametern auf. Das deutet auf eine hochgradige

Eigenständigkeit der Schwermetallbelastungen in diesen Materialien hin, was auf anthropogene Einträge außerhalb der allgemeinen Hintergrundbelastungen hinweist. Die hier nachweisbaren Schwermetallbelastungen werden vorwiegend durch Zink und Kupfer verursacht. Für diese beiden Schwermetalle sind Anstrengungen zur Reduzierung im Inputmaterial Gülle (vor allem Schweinegülle) durch Ablösung von Zink- und Kupferpräparaten als Futtermittelzusätze, sowie die Vermeidung von kupferhaltigen Klauenbädern (vor allem in Rindergülle) dringend erforderlich. Auch Fettabfälle können wegen ihrer extrem hohen Abbaubarkeit zu grenzwertrelevanten Schwermetallanreicherungen beitragen.

Durch statistisch Auswertungen wurden Erwartungsbereiche für die oben genannten Mittelwerte und die zugehörigen Einzelmesswerte abgeleitet. Auf der Grundlage dieser Auswertungen können Validierungswerte für Anlagenmittelwerte und für Einzelmesswerte abgeleitet werden, deren Einhaltung durch die Vergärungsanlagen sicher gewährleistet werden kann. Anhand dieser Validierungswerte können die Auswirkungen von Richt- bzw. Grenzwerten auf den derzeitigen Stand der Biomassevergärung abgeschätzt werden (siehe Tabelle I 6.)

Tabelle I 6.: Ableitung von Validierungsgrenzen für Gärreststoffe aus der statistischen Auswertung von Untersuchungen an 97 Anlagen in Deutschland nach Bioabfallverordnung (Anlagengewährleistung bei: n = 4 ; p < 0,05).

Schwermetall	Maßeinheit	Gewährleistungsgrenzen für Gärreststoffe			
		Anlagenmittelwerte		Einzelmesswerte	
		flüssig	fest	flüssig	fest
keimfähige Samen und Pflanzenteile	St./l	1	1	3	1
Salmonellen		0,1*	0,1*	1	1
Fremdstoffe > 2mm	TS-%	0,7	0,4	4,0	1,0
Blei	mg/kg TS	60	50	120	120
Cadmium	mg/kg TS	1,3	0,7	3,4	1,8
Chrom	mg/kg TS	65	40	190	70
Kupfer	mg/kg TS	700	80	1100	160
Nickel	mg/kg TS	60	30	130	50
Quecksilber	mg/kg TS	0,6	0,3	1,2	1,4
Zink	mg/kg TS	1750	370	3000	690

\* - bzw. maximal jede 10. Probe positiv

Die genannten Gewährleistungs- bzw. Validierungsgrenzen stellen den aktuellen Sachstand dar. Es wird davon ausgegangen, dass diese Werte durch die Betreiber von Biogasanlagen nur in geringem Maße sofort absenkbar sind. Die hohen Gewährleistungsgrenzen für Zink und Kupfer verdeutlichen dagegen den dringenden Handlungsbedarf bezüglich der Eintragsvermeidung über Futtermittelzusätze in der landwirtschaftlichen Tierhaltung, insbesondere bei Schweinen, aber auch mögliche Auswirkungen von stark methanisierbaren Fettabfällen.

Eine Reihe von geltenden Grenzwerten und derzeit zur Diskussion gestellten Grenzwertvorschlägen wurden anhand der statistischen Datenauswertungen von Gärproduktuntersuchungsergebnissen aus 97 Vergärungsanlagen auf die Gewährleistung der Grenzwerteinhaltung geprüft (sicher, nicht sicher oder nicht gewährleistet). Nachfolgende Verordnungen bzw. Konzeptionen wurden einbezogen:

- Bioabfallverordnung für zwei Aufwandmengen
- EU-Öko-Landbau-Verordnung 2092/91
- BMU / BMVEL – Konzept für die Ton-, Lehm- und Sandboden (Juni 2002)
- Überarbeitetes UBA – Konzept für die Ton-, Lehm- und Sandboden (Dezember 2002)
- Vorschlag des UBA an das BMU vom 24. Juni 2003

Die festen und flüssigen Gärprodukte zeigen bei Bewertung nach den Grenzwerten der Bioabfallverordnung deutliche Unterschiede. Die festen Gärprodukte sind ähnlich positiv zu bewerten wie Bioabfallkomposte. Etwa 70 % der Anlagen mit flüssigen Gärprodukten können dagegen diese Grenzwerte nicht einhalten. Die nachfolgenden Anlagenbewertungen anhand im Vergleich zur BioAbfV niedrigerer Grenzwertvorschläge erfolgt daher nur noch für die festen Gärprodukte.

Die neuen UBA-Wertevorschläge an das BMU vom 24. Juni 2003 führen zu ähnlichen Anlagenbewertungen wie die Grenzwerte nach BioAbfV § 4 (3) Satz 2 für Aufwandmengen von 30 t TS in 3 Jahren.

Wegen der geringen Anzahl der für diese Auswertung verfügbaren Anlagen mit festen Gärprodukten und des damit sehr eingeschränkt erfassten Inputmaterialspektrums, sind die hier vorliegenden Aussagen nur eingeschränkt nutzbar. Für bundesweit repräsentative Aussagen sind weiterführende Datenerfassungen und –bewertungen erforderlich.

Für flüssige Gärprodukte ist die bundesweite Repräsentanz der Datenlage deutlich besser gegeben, erreicht aber noch nicht die Datendichte und Bewertungssicherheit der Bioabfallkomposte und ermöglicht keine belastbaren Aussagen zur Wirkung nachwachsender Energiepflanzen auf die Gärproduktqualitäten. Bei den flüssigen Gärprodukten besteht für Kupfer und Zink dringender Handlungsbedarf mit dem Ziel von Eintragsminderungen in die Vergärungsanlagen, unter besonderer Berücksichtigung der Wirkungspfade:

Futtermittel ⇒ Tiernahrung ⇒ Gülle ⇒ flüssige Gärprodukte.

Desinfektionsmittel ⇒ Gülle ⇒ flüssige Gärprodukte.

Die Streubreite der Schadstoffmittelwerte innerhalb von Vergärungsanlagen ist im Vergleich zu Kompostierungsanlagen weitaus größer, was auf einen deutlichen Handlungsbedarf zur Verbesserung im Qualitätsmanagement der flüssigen Gärprodukte hinweist.

## **I.7 Bewertung von Abwasserschlammkompostqualitäten – Nährstoffe und Schwermetalle**

Die Ergebnisse der Abwasserschlammkompostuntersuchungen der Jahre 1999 bis 2005 wurden für 12 Behandlungsanlagen einer umfangreichen statistischen Auswertung unterzogen. Dabei

wurden bezogen auf das Jahr 2005 für ausgewählte Parameter bundesweit folgende mittlere Gehalte festgestellt und mit Angaben aus dem UBA/BGK-Projekt „Neubewertung von Kompostqualitäten“ zum Jahr 2002 verglichen (siehe Tabelle I 7.).

Tabelle I 7.: Vergleich der Mittelwerte von Komposten aus Bioabfällen (BK) bzw. aus Abwasserschlämmen (ASK)

Parameter	Maßeinheit	Mittelwert		ASK in % zu BK
		BK	ASK	
Glühverlust (organische Substanz)	% TS	37,3	51,5	138,1%
basisch wirksame Bestandteile	CaO % TS	4,79	6,33	132,2%
Stickstoff, gesamt	N % TS	1,52	1,60	105,3%
Phosphat, gesamt	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % TS	0,83	4,52	544,6%
Kaliumoxid, gesamt	K <sub>2</sub> O % TS	1,26	0,38	30,2%
Magnesiumoxid, gesamt	MgO % TS	0,84	0,81	96,4%
keimfähige Samen und Pflanzenteile	St./l	0,08	0,14	175,0%
Salmonellen		0,00	0,01	
Fremdstoffe > 2mm (gesamt)	% TS	0,20	0,06	30,0%
Blei	mg/kg TS	46,4	66,8	144,0%
Cadmium	mg/kg TS	0,474	1,059	223,4%
Chrom	mg/kg TS	25,3	44,4	175,5%
Kupfer	mg/kg TS	57,7	178,3	309,0%
Nickel	mg/kg TS	16,3	26,5	162,6%
Quecksilber	mg/kg TS	0,156	0,425	272,4%
Zink	mg/kg TS	203,7	620,6	304,7%
AOX	mg/kg TS		123,1	
PCB	mg/kg TS		0,049	
PCDD/F	ng TE/kg TS		11,6	
PAK	mg/kg TS		4,21	
DEHP	mg/kg TS		14,1	
LAS	mg/kg TS		84,3	
NPE	mg/kg TS		12,1	

Wesentlich höhere Gehalte als in den Bioabfallkomposten sind bei den Abwasserschlammkomposten für folgende Parameter festzustellen

- Phosphat, gesamt
- Kupfer
- Zink
- Quecksilber

Die Schwermetallkonzentrationen wurden in Abhängigkeit von den Parametern Fremdstoffgehalt, organische Substanz, Rottegrad (Selbsterwärmbarkeit) und Summe der Nährstoffgehalte betrachtet. Dabei wurden folgende Zusammenhänge gefunden und mit den Ergebnissen bei Bioabfallkompostierungsanlagen verglichen (siehe Abbildung I 33).

Es wurde in progressiven Einfluss (Zunahme der Schwermetallkonzentration) und degressiven Einfluss (Abnahme der Schwermetallkonzentration) unterschieden. Den stärksten progressiven Einfluss üben die Nährstoffgehalte aus. Höhere Gehalte an organischer Substanz (Glühverluste) sind am häufigsten mit abnehmenden Schwermetallkonzentrationen verbunden.

Die Zusammenhänge von Schwermetallgehalten zu anderen Kompostmerkmalen sind in den Anlagen mit Bioabfall- und Abwasserschlammkompostierung ähnlich.

Durch statistisch Auswertungen wurden Erwartungsbereiche für die oben genannten Mittelwerte und die zugehörigen Einzelmesswerte abgeleitet. Auf der Grundlage dieser Auswertungen können Validierungswerte für Anlagenmittelwerte und für Einzelmesswerte abgeleitet werden, deren Einhaltung durch die Abwasserschlammkompostierungsanlagen sicher gewährleistet werden kann.

Die Ergebnisse dieser Gewährleistungsgrenzenableitung sind in Tabelle I 8. zusammengestellt.

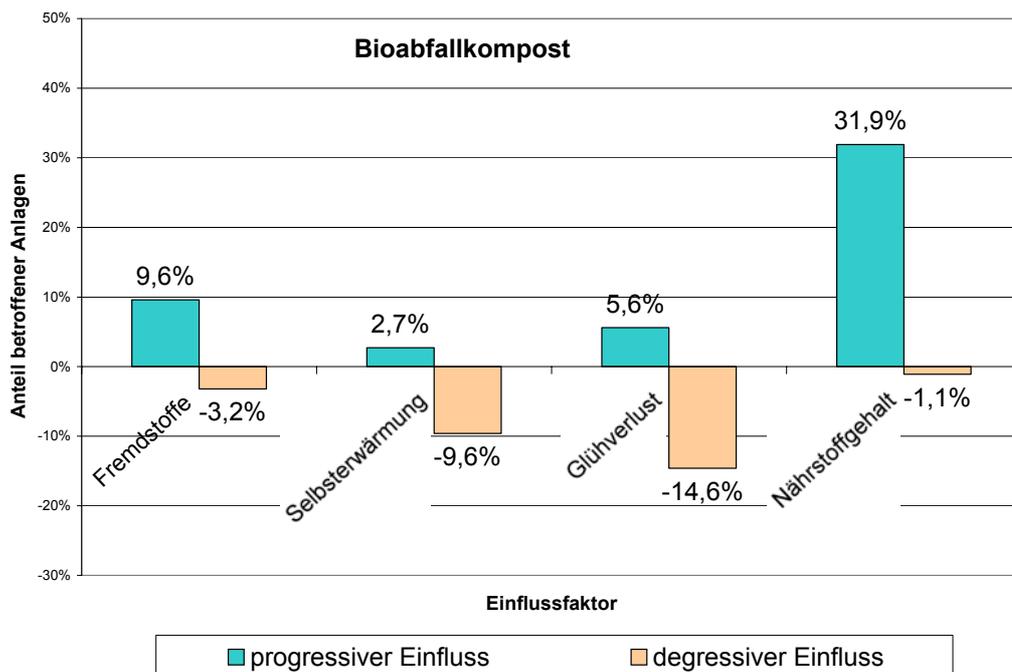
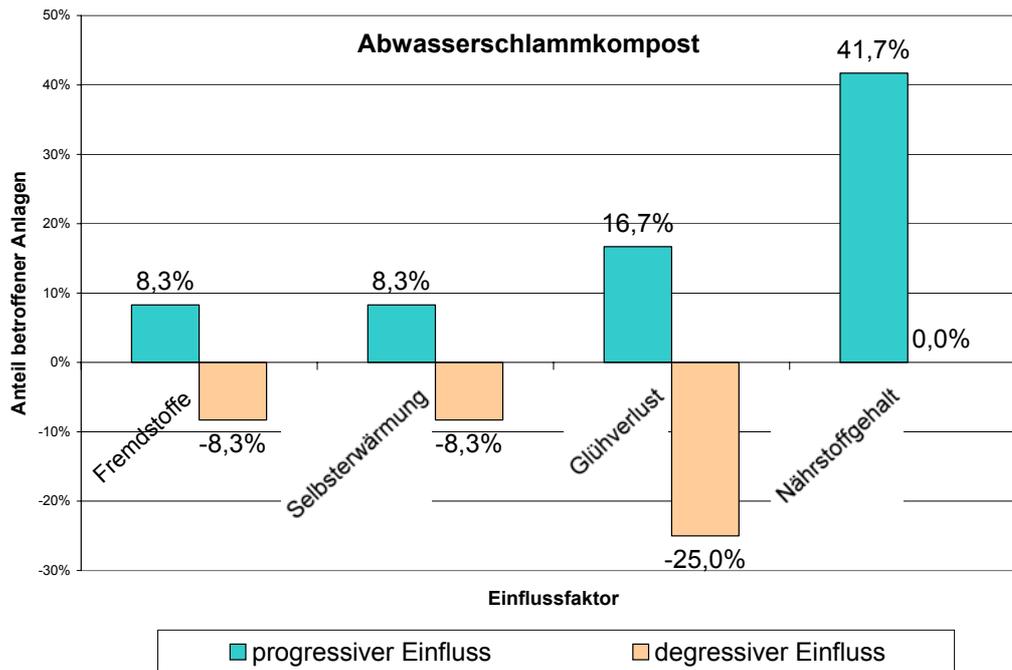


Abbildung I 33.: Vergleich der Zusammenhänge von Fremdstoffgehalt, organische Substanz, Rottegrad (Selbsterwärbarkeit) und Summe der Nährstoffgehalte mit der Schwermetallbelastung in Kompostierungsanlagen

Tabelle I 8.: Validierungsgrenzen für Abwasserschlämm- und Bioabfallkomposte von RAL-fremdüberwachten Anlagen

(Anlagengewährleistung bei: n = 4 ; p < 0,05)

Schwermetall	Maßeinheit	Gewährleistungsgrenzen für Abwasserschlämmkomposte		Gewährleistungsgrenzen für Bioabfallkomposte	
		Anlagenmittelwerte	Einzel-messwerte	Anlagenmittelwerte	Einzel-messwerte
keimfähige Samen und Pflanzenteile	St./l	2	3	1	6
Salmonellen		0,1*	1	0,1*	1
Fremdstoffe > 2mm	TS-%	0,2	0,5	0,6	1,7
Blei	mg/kg TS	130	220	120	190
Cadmium	mg/kg TS	1,9	2,8	1,1	1,8
Chrom	mg/kg TS	80	150	70	100
Kupfer	mg/kg TS	270	500	110	180
Nickel	mg/kg TS	50	80	60	80
Quecksilber	mg/kg TS	1,0	1,5	0,5	1,1
Zink	mg/kg TS	1000	1400	380	530
AOX	mg/kg TS	210	390		
PCB	mg/kg TS	0,1	0,3		
PCDD/F	ng TE/kg TS	40	50		
PAK	mg/kg TS	12	17		
DEHP	mg/kg TS	65	90		
LAS	mg/kg TS	210	350		
NPE	mg/kg TS	35	45		

\* - bzw. maximal jede 10. Probe positiv

Die Validierungsgrenzen für Kompostparameter können verglichen für Bioabfälle und Abwasserschlämme in folgend genannte Gruppen unterteilt werden:

einheitliche Gewährleistungsgrenzen für Bioabfall- und Abwasserschlammkomposte	<ul style="list-style-type: none"><li>• keimfähige Samen und Pflanzenteile</li><li>• Salmonellen</li><li>• Fremdstoffe</li><li>• Blei</li><li>• Nickel</li></ul>
bis 100 % höhere Gewährleistungsgrenzen für Abwasserschlammkomposte	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cadmium</li><li>• Chrom</li><li>• Quecksilber</li></ul>
über 200 % höhere Gewährleistungsgrenzen für Abwasserschlammkomposte	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kupfer</li><li>• Zink</li></ul>

Die oben genannten Gewährleistungs- bzw. Validierungsgrenzen sind geeignet, Grenzwertvorschläge für diese Parameter hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit durch die Kompostanlagen zu bewerten.

Eine Reihe von geltenden Grenzwerten und derzeit zur Diskussion gestellten Grenzwertvorschlägen wurden anhand der statistischen Datenauswertungen von Kompostuntersuchungsergebnissen aus 12 RAL-fremdüberwachten Abwasserschlammkompostierungsanlagen auf die Gewährleistung der Grenzwerteinhaltung geprüft (sicher, nicht sicher oder nicht gewährleistet). Nachfolgende Verordnungen bzw. Konzeptionen wurden einbezogen:

- Klärschlammverordnung und RAL-Gütezeichen 258
- Bioabfallverordnung für zwei Aufwandmengen
- EU-Öko-Landbau-Verordnung 2092/91
- BMU / BMVEL – Konzept für die Ton-, Lehm- und Sandboden (Juni 2002)
- Überarbeitetes UBA – Konzept für die Ton-, Lehm- und Sandboden (Dezember 2002)
- Vorschlag des UBA an das BMU vom 24. Juni 2003

Es wurde deutlich, dass die Grenzwerte der Klärschlammverordnung problemlos und die des RAL-Gütezeichens 258 bei hohen Qualitätssicherungsanstrengungen eingehalten werden können. Die Qualitätsanforderungen aller übrigen geprüften Bewertungsvorschläge für die stoffliche Verwertung aus dem Konzept von BMU und BMELV sowie nachfolgende Vorschläge des Umweltbundesamtes können dagegen nicht eingehalten werden.

## **I.8 Zusammenfassung: Mittlere Schadstoffgehalte in mineralischen und organischen Düngemitteln**

Es wurde als Fazit der Datenbankauswertung zu Schwermetallen eine Tabelle erstellt, die mittlere Gehalte in diversen Düngemitteln enthält, soweit Datensätze mit n=3 oder mehr zu dem betreffenden Düngemittel und Schwermetall vorlagen. Lagen mehr als 10 Datensätze vor, ist der

betreffende Wert fett gekennzeichnet (Tabelle I.3). In analoger Weise werden auch die mittleren Gehalte der verschiedenen organischen Schadstoffe tabellarisch wiedergegeben (Tabelle I.4). Angegeben sind die Ergebnisse der Literaturrecherchen (für die Klärschlämme; Ergebnisse für Klärschlämme ohne Spezifikation) sowie der Analysen, die in diesem Vorhabensteil I erarbeitet wurden.

Tabelle I.3: Mittlere Schwermetallgehalte in Düngemitteln, Angaben in mg/kg (Mineraldünger) bzw. mg/kg TM Wirtschaftsdünger und Klärschlamm) (Anmerkung: Tabelle enthält nur Angaben mit einem Stichprobenumfang von n=3 oder mehr, Werte ab n=10 sind fett gedruckt, bei Leerstellen ist entweder n<3 oder es ist keine Angabe zu diesem Dünger vorhanden)

Typenbezeichnung	Spezifikation	Zn	Cu	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Tl	U
<b>N-Mineraldünger</b>											
Ammoniumsulfatlösung aus der Abluftreinigung		0,21	0,12	0,01	0,0004	0,1	0,003	0,08	0,1	0,04	
Ammoniumsulfat		2,9	0,27	0,21	0,07	1,2	0,11	0,38	0,26	0,15	
Ammoniumsulfatsalpeter		1,9	0,39			1,4		1	0,47		
Harnstoff		1,7	0,4		0,03	0,33	0,07	0,26	0,09		
Kalkammonsalpeter		<b>32,3</b>	<b>4</b>	0,31	<b>0,17</b>	<b>2,9</b>	0,01	<b>2,3</b>	<b>16</b>	0,04	0,23
<b>P-Dünger</b>											
Superphosphat		<b>93,6</b>	<b>24,8</b>	<b>3,9</b>	<b>3,3</b>	<b>23,9</b>	0,04	<b>16,3</b>	<b>20,9</b>	0,52	<b>72,2</b>
Glühphosphat		221	26,7		2,8	781		176	23,9		
teilaufgeschlossenes Rohphosphat		241	34,4		7,3	34,7		19	8,7		
weicherdiges Rohphosphat				11,7							50,2
Triple-Superphosphat		<b>159</b>	<b>5,2</b>	<b>10,7</b>	<b>14,4</b>	<b>131</b>	0,09	<b>17,6</b>	<b>10,1</b>	0,78	<b>197</b>
<b>K-Dünger</b>											
Kaliumchlorid		<b>2,2</b>	<b>1,6</b>	0,25	<b>1</b>	<b>6,5</b>	0,09	<b>2,3</b>	<b>3,1</b>	0,12	0,56
Kaliumsulfat mit Mg		2,8	2,9		0,23	11,5		0,21	0,65		
<b>Kalkdünger</b>											
Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	Grobasche Holz	<b>379</b>	<b>164</b>	<b>4</b>	<b>2,3</b>	<b>161</b>	<b>0,03</b>	<b>53,7</b>	<b>26,7</b>		
Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	Grobasche Restholz	166	451		2,7	234		116	319		
Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	Grobasche Altholz	1234	6914	17	20	466		179	2144		
Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	Grobasche Stroh	77	22,7		0,03	13,7		5,5	4,6		
Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	Grobasche Ganzpflanzen	200	52		0,07	18,3		9,7	4,8		
Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	Grobasche (Zsf.)	<b>399</b>	<b>569</b>	<b>6,1</b>	<b>3,2</b>	<b>176</b>	<b>0,61</b>	<b>62,9</b>	<b>168</b>		
Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	keine	1047	126	10,2	10,6	105		67,7	33,8		
Kalkdünger aus der Gewinnung oder Verarbeitung von Kalkstein oder Dolomit				1	0,36		0,14	3,6	1,6	0,21	
Kalkdünger aus der Entschwefelung von Abgasen aus der Verbrennung von Steinkohle		115	50	11,2	0,23	13,8	0,12	21	75,2	0,05	
Kalkdünger aus der Aufbereitung von Trink- und Brauchwasser (Wasserwerksschlamm)		<b>121</b>	<b>55,2</b>	16,7	<b>0,54</b>	<b>13,7</b>	0,05	<b>22,3</b>	<b>19,5</b>	0,18	

Typenbezeichnung	Spezifikation	Zn	Cu	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Tl	U
Kalkdünger aus der Phosphatfällung in Klarablaufwasser (Klärkalk)		440	697		0,41	16,6	0,47	15,3	20,4		
Kohlensaurer Kalk		<b>25,4</b>	<b>7,4</b>			<b>11,3</b>					
Branntkalk		69,3	12,3		0,82	4,3		2,9	25,4		
Hüttenkalk		4	5,7	0,5	0,12	74	0,01	8	1,5	0,03	
Konverterkalk		<b>181</b>	<b>19,3</b>	<b>1,3</b>	<b>0,34</b>	<b>1205</b>	<b>0,01</b>	<b>17,4</b>	<b>31,8</b>	<b>0,03</b>	
<b>Sekundärnährstoffdünger</b>											
Calciumsulfat		15	4,8		0,49	3,3		3,1	3,7		
<b>Mehrnährstoffdünger</b>											
NPK-Dünger		<b>283</b>	<b>172</b>	<b>2</b>	<b>4,5</b>	<b>18,2</b>	<b>0,02</b>	<b>5,5</b>	<b>6,1</b>	<b>0,19</b>	<b>22,6</b>
NP-Dünger		<b>121</b>	<b>4,6</b>	<b>11,2</b>	<b>7,8</b>	<b>63</b>	0,12	<b>16,4</b>	<b>5,1</b>	0,48	<b>65,2</b>
PK-Dünger		128	12,3	5,2	4,5	79,5	0,07	17,5	4,2	0,45	87,6
<b>Organisch-mineralische Düngemittel</b>											
Organisch-mineralische N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- oder NPK-Dünger		64	14,4	1,1	2,7	16,7	0,03	6,6	2,8	0,1	18,8
<b>Organische N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- oder NPK-Dünger (Wirtschaftsdünger)</b>											
konventioneller Wirtschaftsdünger	Gülle Rind	<b>225</b>	<b>53,7</b>	<b>1,6</b>	<b>0,28</b>	<b>4,8</b>	<b>0,04</b>	<b>5,4</b>	<b>4,7</b>	0,08	1,1
konventioneller Wirtschaftsdünger	Gülle Schwein	<b>864</b>	<b>225</b>	<b>1,2</b>	<b>0,29</b>	<b>6,7</b>	<b>0,03</b>	<b>9,8</b>	<b>4,5</b>	<b>0,05</b>	<b>3,5</b>
konventioneller Wirtschaftsdünger	Gülle Huhn	541	64,2								
konventioneller Wirtschaftsdünger	Jauche Rind	<b>124</b>	<b>20,5</b>		<b>0,19</b>				<b>3,6</b>		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Jauche Schwein	538	119		0,64	14,5		10,9	9,6		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Festmist Rind	<b>144</b>	<b>34,2</b>	<b>1,1</b>	<b>0,24</b>	<b>9,7</b>	<b>0,08</b>	<b>7,4</b>	<b>5,8</b>		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Festmist Schwein	<b>491</b>	<b>213</b>	0,79	<b>0,36</b>	<b>12,3</b>	0,07	<b>5,2</b>	<b>1,9</b>		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Festmist Huhn	<b>419</b>	<b>67,8</b>	0,46	<b>0,86</b>	<b>6,1</b>	0,04	<b>7,7</b>	<b>7,2</b>		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Festmist Broiler	<b>377</b>	<b>112</b>	<b>9,3</b>	<b>0,44</b>	<b>30,7</b>	<b>0,08</b>	<b>13,2</b>	<b>3,3</b>	<b>0,06</b>	<b>0,68</b>
konventioneller Wirtschaftsdünger	Festmist Pute	<b>362</b>	<b>122</b>		<b>0,5</b>	<b>14,7</b>		<b>5,1</b>	<b>2,8</b>		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Festmist Schaf	101	24,3		0,38	54,7		15,8	25,2		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Trockenkot Huhn	<b>388</b>	<b>60,3</b>		<b>0,34</b>	5,7	0,04	4,8	<b>2,6</b>		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Frischkot Legehennen	416	30		0,3				2,2		
konventioneller Wirtschaftsdünger	Frischkot Broiler	<b>336</b>	<b>44,8</b>	0,75	<b>0,27</b>	57,4	0,09	21,9	<b>1,8</b>	0,06	0,75
ökologischer Wirtschaftsdünger	Gülle Rind	<b>135</b>	<b>25,2</b>	<b>1,2</b>	<b>0,3</b>	<b>14,1</b>	<b>0,04</b>	<b>8,8</b>	<b>5,2</b>	<b>0,09</b>	<b>0,35</b>
ökologischer Wirtschaftsdünger	Gülle Schwein	883	191		1,1				13,5		
ökologischer Wirtschaftsdünger	Jauche Rind	114	18		0,3	5,5		5	71,8		
ökologischer Wirtschaftsdünger	Festmist Rind	<b>91</b>	<b>16,1</b>	<b>0,75</b>	<b>0,27</b>	<b>3,9</b>	<b>0,05</b>	<b>4,5</b>	<b>3,9</b>	<b>0,05</b>	<b>0,24</b>
ökologischer Wirtschaftsdünger	Festmist Schwein	<b>207</b>	<b>33,5</b>	<b>1,1</b>	<b>0,25</b>	<b>8</b>	<b>0,04</b>	<b>6,7</b>	<b>7,4</b>	<b>0,06</b>	<b>1,1</b>
ökologischer Wirtschaftsdünger	Festmist Huhn	<b>411</b>	<b>44,4</b>	<b>3</b>	<b>0,33</b>	<b>13,7</b>	<b>0,05</b>	<b>12,7</b>	<b>11,7</b>	<b>0,06</b>	<b>2,7</b>
ökologischer Wirtschaftsdünger	Festmist Broiler	<b>264</b>	<b>74,1</b>	<b>0,90</b>	<b>0,21</b>	<b>34,8</b>	<b>0,08</b>	<b>12,9</b>	<b>2,7</b>	<b>0,09</b>	<b>2,2</b>
ökologischer Wirtschaftsdünger	Festmist Pferd	63,2	12,2	0,76	0,21	5,9	0,04	6,9	4,2	0,04	0,23
ökologischer Wirtschaftsdünger	Festmist Schaf	<b>149</b>	<b>14,5</b>	<b>0,8</b>	<b>0,31</b>	<b>4</b>	<b>0,04</b>	<b>4,8</b>	<b>4,1</b>	<b>0,06</b>	<b>0,28</b>
ökologischer Wirtschaftsdünger	Festmist Ziege	124	13,2		0,27	2,4	0,07	4,4	4,8		0,51
ökologischer Wirtschaftsdünger	Frischkot Broiler	<b>306</b>	<b>66,6</b>	<b>0,77</b>	<b>0,2</b>	<b>39,3</b>	0,06	<b>13,3</b>	<b>2,6</b>	0,1	<b>2,4</b>
<b>Organische N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- oder NPK-Dünger (Klärschlamm)</b>											
Klärschlamm	ohne	<b>917</b>	<b>328</b>	<b>4,6</b>	<b>1,6</b>	<b>47,3</b>	<b>2,1</b>	<b>30,1</b>	<b>75</b>	<b>0,34</b>	<b>3,2</b>

Typenbezeichnung	Spezifikation	Zn	Cu	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Tl	U
Klärschlamm	Nassschlamm, <120 kg CaO/t TM	796	273	3,6	1,6	31,9	1,2	21,1	56	0,11	
Klärschlamm	kalkstabilisiert, >120 kg CaO/t TM	471	150	2,8	1,1	45,1	0,68	19,6	37	0,16	
Klärschlamm	Nassschlamm (bis 10% TM)	916	263		1,7	38	0,91	28,7	71		
Klärschlamm	Trockenschlamm (>10% TM)	1079	328	3,93	1,52	42,5	0,99	30,1	60		
Klärschlamm	Fäkalschlamm (Landwirtschaft / private Haushalte)	917	310		1,3	28,2	0,87	15,6	50		
Klärschlamm	kompostiert	750	209		1,7	66,5	1,2	23,6	104		
<b>Organische N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- oder NPK-Dünger (Kompost)</b>											
Kompost 2002		203,7	57,7		0,47	25,3	0,16	16,3	46,4		
<b>Organische N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- oder NPK-Dünger (Gärrückstände)</b>											
Gärrückstände flüssig 2003		560,0	158,1		0,38	17,4	0,13	11,6	11,2		
Gärrückstände fest 2003		198,8	53,4		0,49	22,1	0,15	14,8	32,1		
<b>Organische N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- oder NPK-Dünger (Klärschlammkompost)</b>											
Klärschlammkompost 2006		620,6	178,3		1,06	44,4	0,43	26,5	66,8		

Tabelle I.4: Mittlere Gehalte organischer Schadstoffe in Düngemitteln, Angaben je nach Chemikalie unterschiedlich

Stoff	Einheit	Gülle		Kompost		Gärprodukte		Klär-schlamm	Mineraldünger	
		Median	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median	Mittelwert	Mittelwert	Median	Mittelwert
Lineare Alkylbenzolsulfonate	mg/kg TM	164	29	42	18	877	536	1400	138	121
4-Nonylphenol	µg/kg TM	43	7	26	13	371	139	15000 – 45000 (NP+NPEO)	18	11
4-Nonylphenol monoethoxylat		55	15	5	4	3392	1104		5	5
4-Nonylphenol diethoxylat		73	22	3	2	1023	246		5	2
Dibutylphthalat	µg/kg TM	74	47	204	14	808	772	250	50	39
Di-(2-ethylhexyl)-phthalat		1786	399	30092	902	29684	15511	27000	857	258
Monobutylzinn-Kation	µg/kg TM	113	52	75	28	250	184	205	-	-
Dibutylzinn-Kation		20	9	-	-	24	23	350	-	-
Tributylzinn-Kation		19	8	-	-	15	12	60	-	-
Monooctylzinn-Kation		34	10	53	4	56	50	45	-	-
Diocetylzinn-Kation		20	10	-	-	80	61	50	-	-
Triphenylzinn-Kation		-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
Summe PCB (nach DIN) (PCB 28/52/101/138/153/180)	µg/kg TM	4	2	20	21	10	< 7	98	1	1
Summe PAK (nach EPA)	µg/kg TM	199	67	3006	1466	1428	1512	4300	257	62
Mineralöl-KW	mg/kg TM			0,5	0,2	4,6	4,0	k.A.	0,5	0,3
PCDD/F	ng TEq/kg							36		

## Teil II: Bodenuntersuchungen

Der Teil II, Bodenuntersuchungen, umfasst eine kürzere Literaturrecherche zu bereits vorliegenden Daten zu Stoffgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden und - soweit vorliegend – in den aufgebrachten Düngern. Der experimentelle Teil beschäftigt sich mit der Analyse von Konzentrationen von zuvor mit dem Projektbeirat konsensual festgelegten Schadstoffen in mit Düngern beaufschlagten landwirtschaftlich genutzten Böden.

### II.1 Literaturrecherche

Zur Erhebung von Literaturdaten wurde in Analogie zum Teil I, Stoffuntersuchungen, eine Umfrage an die bereits in diesem Teil genannten Multiplikatoren durchgeführt. Seitens der Multiplikatoren respektive angesprochenen Institutionen erfolgte von 50% keine Rückmeldung auf den versandten Questionnaire. 38% meldeten sich, wobei 6% keine Möglichkeit des Dateninputs sahen, 20% an andere Datenquellen weiterverwiesen und 12% Daten zur Verfügung stellten. Durch erneute persönliche Kontaktaufnahme konnten von weiteren 12% der Multiplikatoren Informationen erhalten werden. Damit beläuft sich der grundsätzliche Rücklauf insgesamt auf 50%.

Die tatsächliche Datenbereitstellung seitens 24% der Multiplikatoren entsprach jedoch lediglich einem Umfang von weniger als 10 Literaturstellen, so dass in Faktendatenbanken, durch online-Recherchen und durch „graue“ Literatur zusätzliche Information akquiriert wurde. Beide Aktivitäten führten zu insgesamt 44 Literaturzitaten, die quantitative Aussagen (Gehaltsangaben für Schadstoffe im landwirtschaftlich genutzten Boden) enthielten, sowie zu 16 Zitaten, die Hintergrundinformationen, jedoch keine Angaben zu Gehalten enthielten.

Die quantitativen Aussagen wurden in eine ACCESS-Datenbank eingestellt, die im folgenden in wesentlichen Punkten vorgestellt wird.

#### Anzahl der Einträge pro Formular

Tabelle II.1: Anzahl von Datenbank-Einträgen

Formularbezeichnung	Anzahl der Einträge	Bemerkung
Allgemein	233	In einer Vielzahl von Fällen wurden pro Literaturstelle mehrere Substanzen untersucht, die jeweils einem separaten Eintrag entsprechen; maximal könnten damit $44 * (7 \text{ Metalle} + 7 \text{ organische Stoffe}) = 616$ Einträge vorliegen.
Boden	1218	Es lagen Bodengehalte für verschiedene Tiefen und Probenahmezeiten vor.
Dünger_und_Schadstoff	434	Es wurden verschiedene Düngeregime eingesetzt.
Pflanze	1347	Es wurden verschiedene Pflanzen bzw. Pflanzenteile untersucht.
Methodik_und_Analytik	233	Entspricht der Anzahl der Gesamteinträge

### Informationsdichte pro Substanz

Erwartungsgemäß ist die Informationsdichte für die betrachteten Substanzen sehr unterschiedlich, wobei – abgesehen von Chrom und Quecksilber und deren Verbindungen – die Zahl der Einträge für Metalle die der organischen Stoffe bei weitem übersteigt.

### Datenpaare

Eine wesentliche Zielsetzung bei der Informationsakquisition war der Erhalt von in sich geschlossenen Aussagen zum Gehalt organischer Substanzen im applizierten Dünger, auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche nach Applikation sowie in der Pflanze (beispielsweise am Ende der Vegetationsperiode). Durch Darstellung solcher „Datenpaare“ lassen sich Stoffströme und Konzentrationsverläufe, die bei der Bewertung organischer Chemikalien eine wesentliche Rolle spielen, gut analysieren. Für einige wenige der betrachteten organischen Stoffe lagen diese Datenpaare vor; der weitaus größte Datenumfang bezog sich jedoch auf Konzentrationen in Düngern oder in landwirtschaftlich genutzten Böden, wobei hier wiederum die Schwerpunkt auf Stoffgehalte in Düngern lag.

### Studientyp

Beim Studientyp ist zwischen Laborstudien, Untersuchungen im Gewächshaus, Lysimeterstudien, Plotversuchen, Feldstudien, Erhebungen im Rahmen von Monitoring-Programmen zur Beschreibung des Umweltzustandes („state-of-the-environment“; hier auch: Dauerbeobachtungsflächen) und Praxisstandorten zu unterscheiden. Die Aussagegehalte sind durchaus unterschiedlich: während Laborstudien unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden und zu reproduzierbaren und generalisierbaren Aussagen führen, beschreiben Feldstudien und insbesondere Erhebungen zum Umweltzustand die aktuelle Situation am betrachteten Standort und zur betrachteten Zeit. Von daher sind beide Studientypen komplementär. Der Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten liegt – insbesondere bei den Metallen – auf den Feldstudien, die im Rahmen von zum Teil langfristigen Projekten durchgeführt wurden. Bei den organischen Stoffen spielen neben den Feldstudien Plotversuche und auch Erhebungen zur Beschreibung des Umweltzustandes eine Rolle. Einige wenige neuere Untersuchungen befassen sich mit Praxisstandorten.

### Zeitraum und Zeitpunkt der Durchführung von Studien

Weitere wesentliche Informationen für die Bewertung der Studien sind der Zeitraum und auch der Zeitpunkt der Durchführung der Studien, wobei hier insbesondere die Feldstudien und Plotversuche von Interesse sind. Bei längerfristig angelegten Studien kann beispielsweise bei der Betrachtung organischer Chemikalien davon ausgegangen werden, dass Abbau und Verbleib in ausreichendem Maße erfasst werden. Bei der Interpretation älterer Studien ist zu berücksichtigen, dass Messverfahren und Nachweisgrenzen inzwischen verbessert worden sind.

Eine tabellarische Darstellung von Studiendauern und –zeitpunkten zeigt:

- Metalle und ihre Verbindungen werden bereits seit den 70er Jahren intensiv untersucht, wobei auch Ergebnisse von Studiendauern von bis zu 20 Jahren vorliegen.

- Für persistente organische Stoffe wie PAHs (persistente Repräsentanten), PCBs und Dioxine, die ebenfalls bereits seit Mitte der 70er Jahre in der Umweltdiskussion sind, liegen Studien mit Laufzeiten von bis zu 20 Jahren vor.
- Phthalate, lineare Alkylsulfonate (LAS) und Nonylphenol (und –ethoxylate) sind Verbindungen, die erst seit wenigen Jahren als prioritäre Umweltchemikalien eingestuft werden. Die Verbindungen sind nicht persistent. Entsprechend liegen Studienergebnisse aus dem Zeitraum 1995 bis 2000 vor, wobei die Studiendauern 5 Jahre nicht überschreiten.
- Organozinnverbindungen werden ebenfalls bereits seit längerem in die Umweltanalytik einbezogen; allerdings steht die Substanzgruppe aufgrund ihrer endokrinen Wirkungen vertieft seit den 90er Jahren in der Diskussion.

### Organische Düngemittel

Die ausgesprochene Mehrzahl der Studien (83% der ausgewerteten Zitate) betrachtet Chemikalien in Klärschlamm, der auf landwirtschaftlich genutzte Böden aufgebracht wird. Daneben werden Müllkompost (8,5%) sowie eine Kombination aus Klärschlamm und Rindenmulch (8,5%) als Dünger eingesetzt und analysiert

### Liste bisher vornehmlich beprobter Versuchsflächen

Eine interessante, wenngleich zur Flächenauswahl nur mittelbar nutzbare Information, die in der Datenbank abgelegt ist, ist die des räumlichen Bezugs aller Studien. Aus Abbildung II.8 geht hervor, dass insbesondere für Metalle und ihre Verbindungen eine Vielzahl von Versuchen auf Flächen in Deutschland durchgeführt worden sind. Phthalate, LAS, NP/NPEO, PAHs und PCBs in Dünger und landwirtschaftlich genutztem Boden wurden in der Schweiz (z.B. FAL Reckenholz, EPF Lausanne), aber auch in Deutschland untersucht.

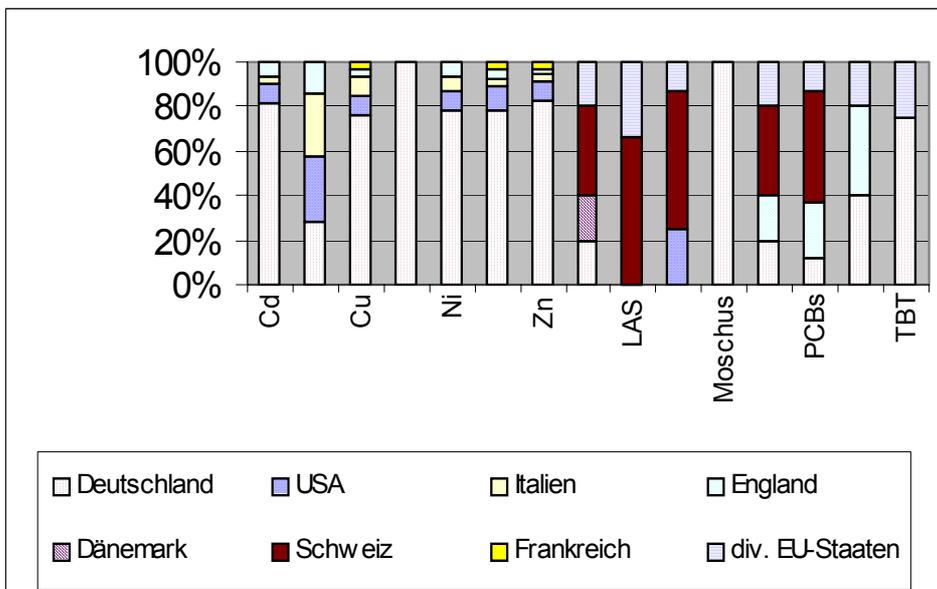


Abbildung II.1 Räumliche Bezüge der Studien

## Stoffgehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden nach Düngerapplikation

Die Gehaltsbereiche für die landwirtschaftlich genutzten Böden sind für die betrachteten organischen Chemikalien und Metalle in der folgenden Abbildung dargestellt. Diese Gehaltsbereiche werden in der letzten Phase der Studie den hier analysierten Konzentrationen gegenübergestellt. Bei einer Interpretation der Daten sowie der Einordnung weiterer gemessener Werte in diese Zusammenstellung ist zu berücksichtigen, dass die Datenbasis – wie bereits mehrfach erwähnt – sehr heterogen ist. In verschiedenen Fällen beruhen die Aussagen aus Einzelmessreihen, während für die gut untersuchten Schwermetalle umfangreiche Datensätze vorliegen.

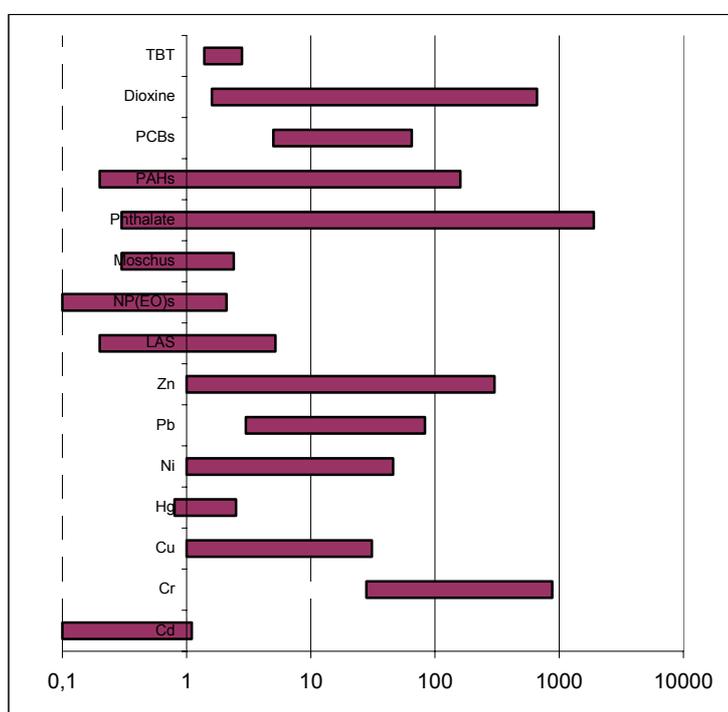


Abbildung II.2 Bereiche [mg/kg TG] für Schadstoffgehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden nach Düngung; Ergebnisse aus der Projektphase I

## II.2 Durchführung der experimentellen Untersuchungen

### II.2.1 Stoffauswahl

Ein wesentliches Ergebnis der vorgestellten Literaturrecherche ist eine begründete Auswahl von Stoffen zur Einbeziehung in die nun durchzuführenden experimentellen Untersuchungen. In einem weiteren Schritt, in der Auswertungsphase, werden die analysierten Stoffgehalte in den Kontext bisher gefundener Bereiche gestellt und eine Gesamtaussage gemacht.

Da der Datenumfang und damit auch die Verallgemeinerbarkeit der publizierten Ergebnisse für einige Chemikalien gering ist, werden im Sinn einer Unterstützung der Begründung für die

Stoffauswahl Resultate zweier weiterer Projekte des UFO-Plans herangezogen. Dabei handelt es sich um:

- Kreislaufwirtschaft – Stoffstrommanagement: Ermittlung und Auswertung von Daten zur Beurteilung prioritärer organischer Schadstoffe in Abfalldüngern (niedrig belastete Klärschlämme aus ländlichen Regionen und Kompost) sowie in organischen Wirtschaftsdüngern (Gülle und Jauche) für eine Risikobewertung (FKZ: 299 33 314)
- Evaluierung und Erweiterung der Grundlagendaten für die Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Pflanze (FKZ: 203 73 273)

Auf Basis der genannten drei Quellen sowie nach Abstimmung mit dem Projektbeirat (zwei UBA-Fachgespräche) wurde folgende Stoffauswahl vorgenommen.

Tabelle II.2: Untersuchungsparameter

<b>Anorganische Untersuchungsparameter</b>	
Trockenrückstand	
Phosphor gesamt	Pges
Kalium	K
Stickstoff, Kjeldahl	Nges
Blei	Pb
Cadmium	Cd
Chrom	Cr
Kupfer	Cu
Nickel	Ni
Quecksilber	Hg
Zink	Zn
<b>Organische Untersuchungsparameter</b>	
<b>Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)</b>	
Naphthalin	NAP
Acenaphthylen	ACY
Acenaphthen	ACE
Fluoren	FLU
Phenanthren	PHE
Anthracen	ANT
Fluoranthren	FLA
Pyren	PYR
Benzo[a]anthracen	BaA
Chrysen	CHR
Benzo[b]fluoranthren / Benzo[k]fluoranthren	BbF/BkF
Benzo[e]pyren	BeP
Benzo[a]pyren	BaP
Dibenzo[ah]anthracen	DBahA
Indeno[1,2,3-cd]pyren	IND
Benzo[ghi]perylen	BghiP
<b>Polychlorierte Biphenyle (PCB)</b>	
PCB 28	
PCB 52	
PCB 101	
PCB 138	
PCB 153	

PCB 180	
<b>Organische Zinnverbindungen</b>	
Monobutylzinn-Kation	MBT
Dibutylzinn-Kation	DBT
Tributylzinn-Kation	TBT
Tetrabutylzinn-Kation	TTBT
Monooctylzinn-Kation	MOT
Diocetylzinn-Kation	DOT
Tricyclohexylzinn-Kation	TCyT
Triphenylzinn-Kation	TPhT
<b>Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS)</b>	
<b>Nonylphenol und Nonylphenoethoxylate</b>	
4-Nonylphenol (techn. Isomerengemisch)	4NP
4-Nonylphenol monoethoxylat	4NP1EO
4-Nonylphenol diethoxylat	4NP2EO
<b>Phthalsäureester</b>	
Dibutylphthalat	DBP
Di-n-butylphthalat	DnBP
Di-(2-ethylhexyl)-phthalat	DEHP
<b>Polycyclische Moschusverbindungen</b>	
Galaxolid®	HHCB
Tonalid®	AHTN

## II.2.2 Flächenauswahl

Die untersuchten Bodenproben stammten aus Flächen in Rheinland-Pfalz, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg. Bis auf die Proben aus Nordrhein-Westfalen, die von Dr. Delschen, LUA NRW zur Verfügung gestellt wurden, wurden alle Proben von C.A.U. genommen.

Der Auswahl der Flächen lag die Hauptprämisse zugrunde, den Einfluß der Klärschlammaufbringung auf landwirtschaftlich genutzten Böden repräsentativ zu erfassen. Demnach fanden folgende Kriterien Berücksichtigung:

- Verteilung der Untersuchungsflächen über mehrere Bundesländer
- Berücksichtigung verschiedener Bodenarten
- Nachvollziehbarkeit der Düngehistorie (Art, Menge und Zeitpunkte)
- Vorhandensein von nicht mit Klärschlamm beaufschlagten Referenzflächen

Die Recherche nach geeigneten Flächen erfolgte nach Beratung mit dem Fachbeirat und dem Umweltbundesamt insbesondere über die Landesumweltämter und landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsämter.

***An dieser Stelle ist festzuhalten, dass es in einer Vielzahl von Fällen schwierig war, entsprechende repräsentative Flächen zur Beprobung zu erhalten. Das Resultat ist von daher eine pragmatische Lösung, die nicht in jedem Fall allen Anforderungen an die Repräsentativität genügen kann!***

Nach konkreter Festlegung wurden im Regelfalle über die Besitzer der Flächen Informationen zur Düngehistorie und zu möglichen Referenzflächen eingeholt und Genehmigungen zur Beprobung beantragt. Informationen zur Düngehistorie bedeuten jedoch nicht, dass Daten zu Schadstoffgehalten in den Düngern vorliegen; eine unmittelbare Erstellung des Datenpaares „Schadstoffgehalt im Dünger – Schadstoffgehalt im Boden“ ist von daher nicht möglich. Eine spätere Plausibilitätsbetrachtung der gefundenen Bodengehalte wird dadurch vorgenommen, dass die analysierten Konzentrationen Literaturdaten gegenübergestellt werden.

Es wurden 98 Bodenproben von 32 Flächen untersucht.

Tabelle II.3: Übersicht über die untersuchten Bodenproben

Land	Anzahl	Proben	Flächen	mit Klärschlamm gedüngte Flächen	Kontrollflächen
Rheinland-Pfalz		36	8	3 + 1 Wiederholung	4 + 1 Wiederholung
Hessen		15	5	4	1
Niedersachsen		33	11	5	6
Nordrhein-Westfalen		5	5	4	1
Baden-Württemberg		9	3	2	1
<b>Summe</b>		<b>98</b>	<b>32</b>	<b>18</b>	<b>14</b>

Beprobt wurden mit Klärschlamm gedüngte Flächen mit verschiedenem Anbau, teilweise zu verschiedenen Zeiten (Wiederholungsbeprobung) sowie entsprechende Kontrollflächen *ohne* Klärschlammaufbringung, jedoch mit anderen Düngevarianten. Die Kontrollflächen zeichnen sich durch räumliche Nähe zur mit Klärschlamm beaufschlagten Fläche und/oder vergleichbare Bodencharakterisierung aus.

### II.2.3 Flächenbeprobung

#### Probennahme

Die Beprobung der Flächen wurde in enger Anlehnung an das Vorgehen der Studie der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (P. Dreher et al., 2003) wie folgt durchgeführt:

- Entnahme von drei Einzelmischproben je Fläche aus der Ackerkrume
- Jede Einzelmischprobe besteht aus mindestens 20 Einstichen (ggf. > 20 bis zum Erreichen der gewünschten Entnahmemenge).
- Die Einstiche erfolgten in drei Probennahmelinien : kreisförmig um den Flächenmittelpunkt und zwischen den Flächeneckpunkten in zwei Diagonalen (eine Einzelmischprobe entspr. einer Probennahmelinie; siehe Skizze)
- Die Einstichstellen wurden mit ausreichendem Abstand zu Ackerrändern (Weg, Straße, Gebäude) und möglichen Störungen (z.B. Masten, Verfüllungen o.ä.) ausgewählt.

- Beprobungsfläche: Bei kleinen Äckern wurde die Gesamtfläche beprobt, bei großen Ackerflächen wurde eine Teilfläche von ca. 1ha (100 x 100 m) abgegrenzt und beprobt (auf Lageplan/Standortskizze vermerkt)
- Einstichtiefe entspricht Tiefe der Ackerkrume / Bearbeitungstiefe (meist 30-40 cm)
- Jeweils ein Einstich pro Probennahmelinie wurde bis 1 m unter Geländeoberkante abgeteuft und das Bohrprofil gemäß C.A.U.-Formblatt aufgenommen.
- Entnahmemenge je Einzelmischprobe beträgt ca. 5 l

#### Homogenisierung und Aufteilung der Proben (vor Ort):

- Jede der drei Einzelmischproben wurde einzeln in Stahlgefäßen gründlich gemischt und homogenisiert.
- Jeder der drei Einzelmischproben pro Fläche wurde auf vier (gut gefüllte) Literflaschen wie folgt aufgeteilt: 1 Probe für Metallanalytik, 2 Proben für Organika, 1 Rückstellprobe

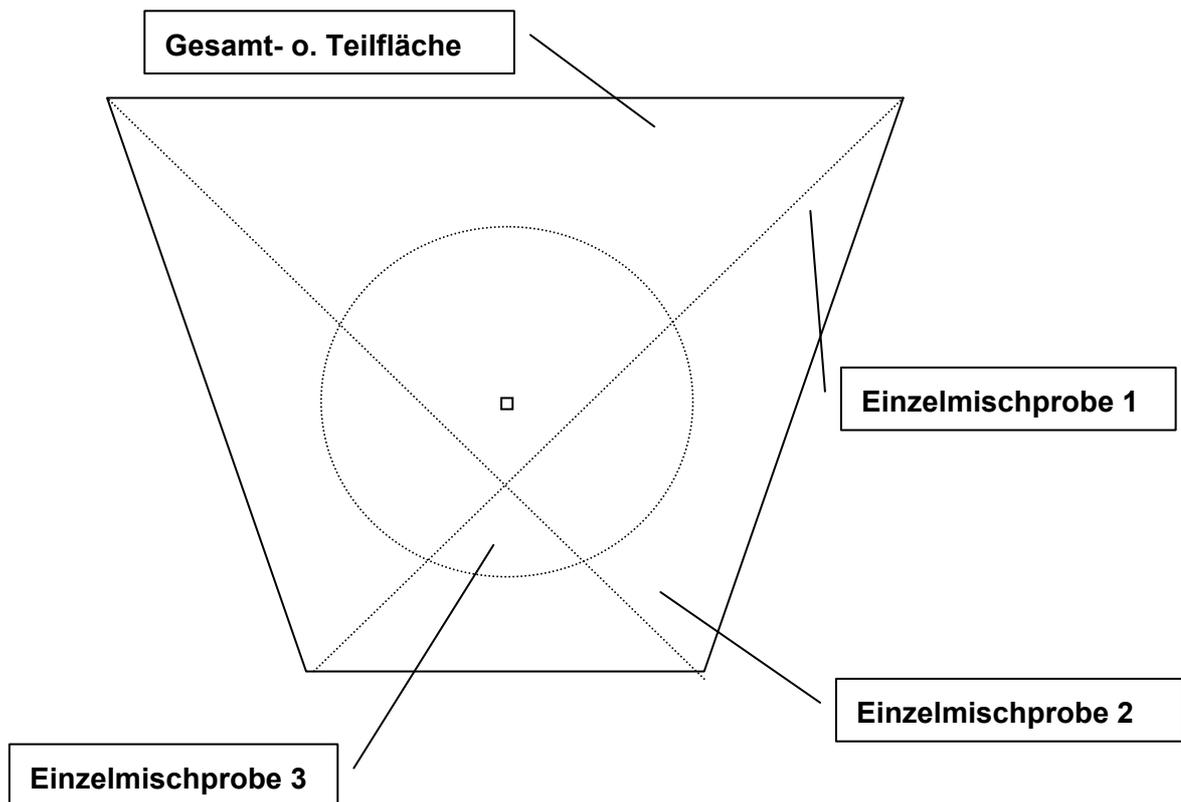


Abbildung II.3: Beprobung der Referenzflächen über Probennahmelinien

#### Qualitätssicherung

Folgende qualitätssichernde Maßnahmen wurden durchgeführt:

- Gewinnung von 3 voneinander unabhängigen Mischproben je Referenz- bzw. Kontrollfläche
- Analyse aller 3 Mischproben je Fläche
- Durchführungen von Doppelbestimmungen je ca. 10 Analysen

- Kreuzanalyse ausgewählter Proben in den Laboren der C.A.U. GmbH und der IME
- Rückstellung von tiefgefrorenen Proben für Wiederholanalysen

## **II.3 Ergebnisse und Diskussion**

Für eine Auswertung sind grundsätzlich zwei Ansätze mit unterschiedlichen Zielsetzungen möglich. Zum einen kann eine Untersuchungsparameter-bezogene Auswertung (Chemikalien-bezogene Auswertung) durchgeführt werden. Diese kann beispielsweise zum Ziel haben, mittlere und maximale Konzentrationen der betreffenden Chemikalie auf der Gesamtheit der untersuchten Flächen zu bestimmen und diese Konzentrationen wiederum Triggerwerten gegenüber zu stellen. Diesem Verfahren liegt letztlich eine Chemikalien-bezogene Denkweise und Gesetzgebung zugrunde. Daneben kann die Auswertung Flächen-bezogen erfolgen, das heißt durch Vergleich von mit Klärschlamm gedüngten Flächen und Kontrollflächen. Auf diese Weise sollten sich im Sinne eines „Fingerprints“ diejenigen Chemikalien identifizieren lassen, die auf einer Klärschlamm-gedüngten Fläche mit höherer Konzentration auftreten im Vergleich zu anderen Flächen. Diese Stoffe könnten dann als Indikatorsubstanzen angesehen werden. Im folgenden werden beide Auswertungsmöglichkeiten und deren Ergebnisse vorgestellt.

### **II.3.1 Chemikalien-bezogene Auswertung**

#### **II.3.1.1 Verteilung der Stoffgehalte**

Insgesamt ist festzustellen, dass die gemessenen Gehalte für alle Chemikalien und die beiden Varianten (Klärschlamm-gedüngte Fläche und Kontrolle) sehr niedrig sind und – insbesondere bei den organischen Stoffen – häufig Werte unterhalb der Nachweisgrenzen aufweisen. Vergleicht man jeweils die Minimal- und Maximalwerte der beiden Varianten, so erkennt man, dass – erwartungsgemäß – für die meisten der untersuchten Substanzen die Maximalwerte der KS-beaufschlagten Flächen über den entsprechenden Werten der Referenzflächen lagen. Die Minimalwerte sind (bis auf PAKs) für beide Varianten identisch und entsprechen Werten unterhalb den Nachweisgrenzen.

Die Unterschiede in den Maximalwerten zwischen Klärschlamm-gedüngten Flächen und Kontrollen sind für die meisten Chemikalien ausgesprochen gering und liegen bei Faktoren zwischen 0,5 und 10. Alle Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen zunächst für die organischen Stoffe und dann für die Metalle dargestellt.

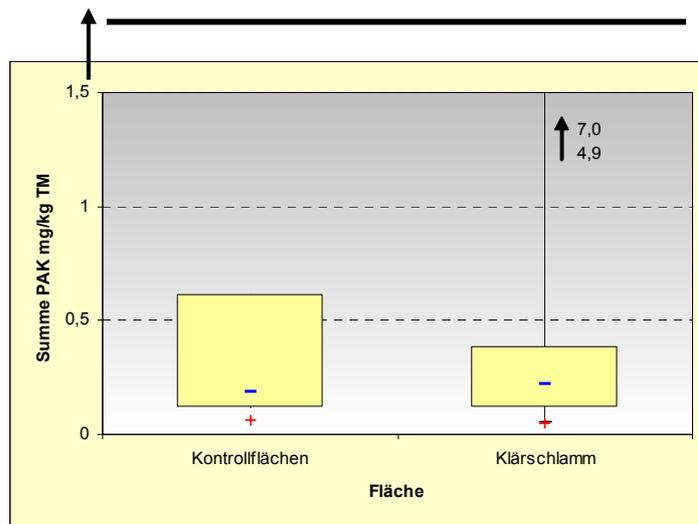


Abbildung II.4: Verteilung der PAK-Gehalte (Summe PAK nach EPA) in den untersuchten Böden

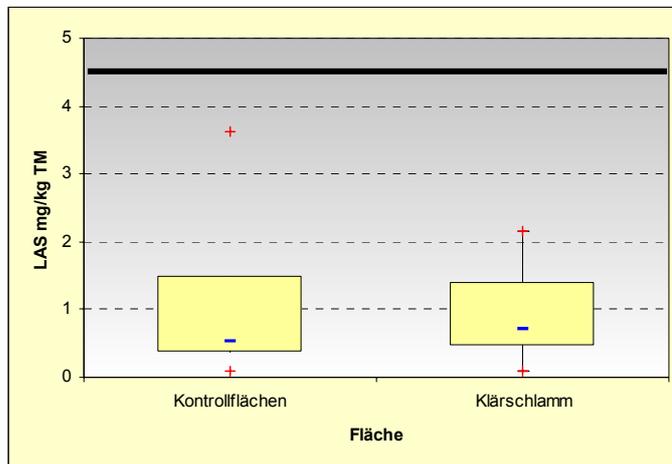


Abbildung II.5: Verteilung der LAS-Gehalte in den untersuchten Böden

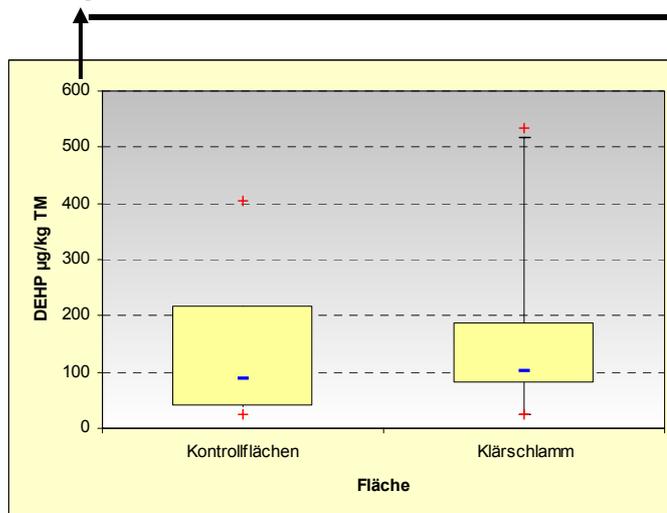
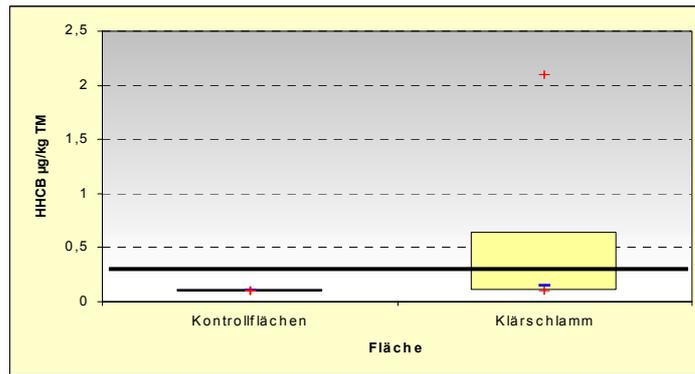


Abbildung II.6: Verteilung der DEHP-Gehalte in den untersuchten Böden



PNEC<sub>Boden</sub>:  
0,31 µg/kg TM

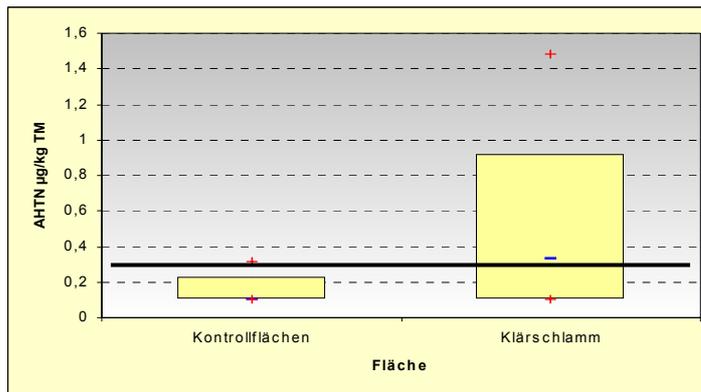
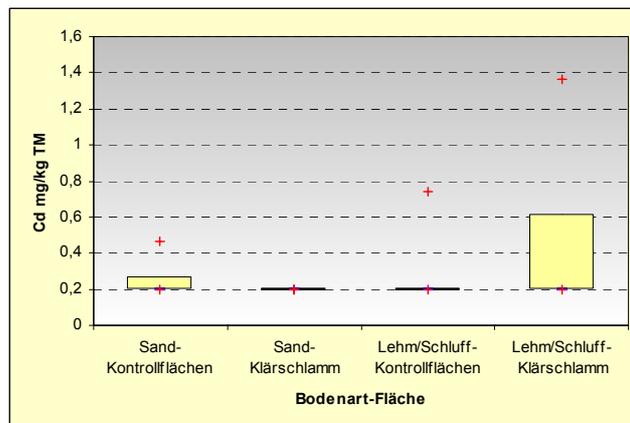


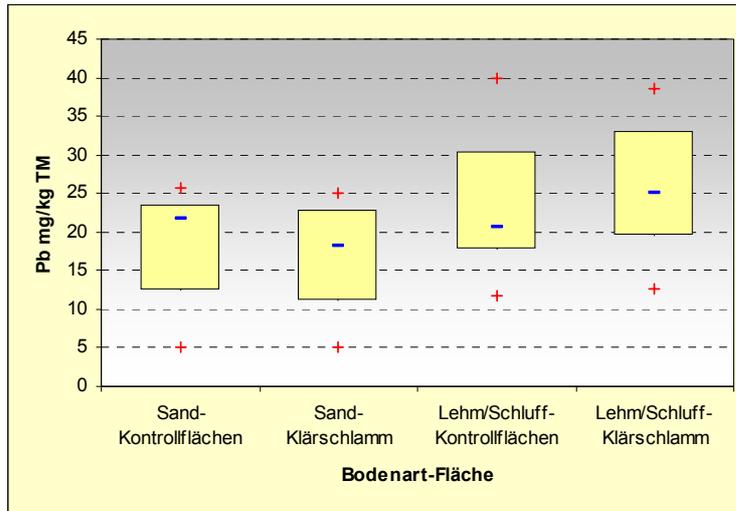
Abbildung II.7: Verteilung von Polycyclischen Moschusverbindungen (Galaxolid<sup>®</sup>, HHCb oben und Tonalid<sup>®</sup>, AHTN unten) in den untersuchten Böden

Da für Metalle und ihre Verbindungen Hintergrundwerte, aber auch andere Bodenwerte (zum Beispiel Vorsorgewerte), in der Regel differenziert nach Sand und Schluff/Lehm angegeben sind, werden hier die Ergebnisse entsprechend differenziert. Dabei umfassen die Sandkontrollflächen insgesamt 4 Flächen, die mit Klärschlamm beaufschlagten sandigen Böden ebenfalls 4 Flächen, die Schluff/Lehm Kontrollflächen 10 Flächen und die entsprechenden mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen 14 Flächen.



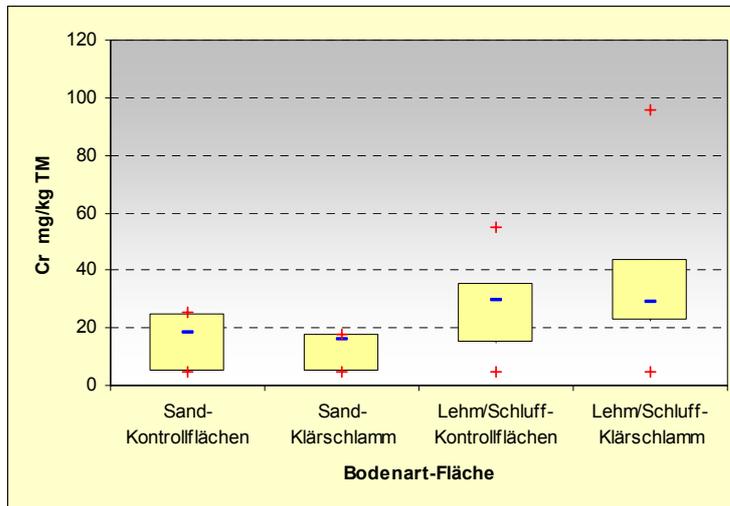
Vorsorgewerte  
(Königswasser):  
1,0 mg/kg  
(Lehm/Schluff)  
0,4 mg/kg (Sand)

Abbildung II.8: Verteilung der Cadmium-Gehalte in den untersuchten Böden



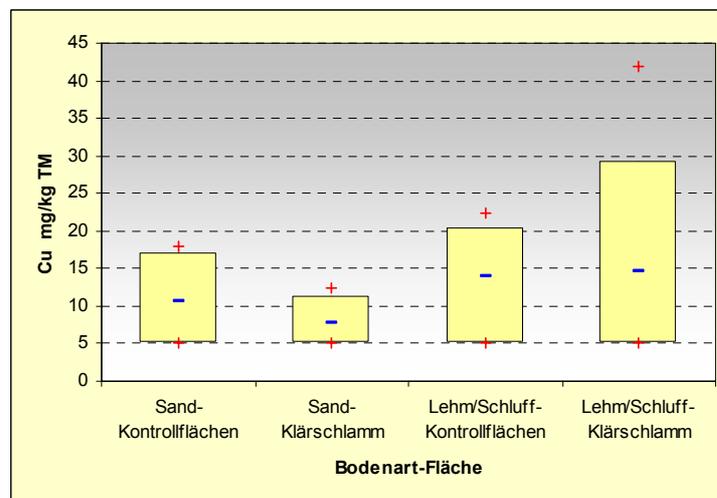
Vorsorgewerte  
(Königswasser):  
710 mg/kg  
(Lehm/Schluff)  
40 mg/kg (Sand)

Abbildung II.9: Verteilung der Blei-Gehalte in den untersuchten Böden



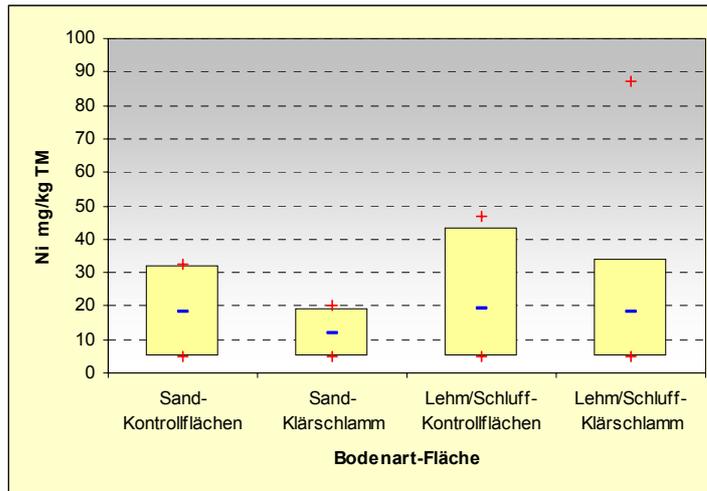
Vorsorgewerte  
(Königswasser):  
60 mg/kg  
(Lehm/Schluff)  
30 mg/kg (Sand)

Abbildung II.10: Verteilung der Chrom-Gehalte in den untersuchten Böden



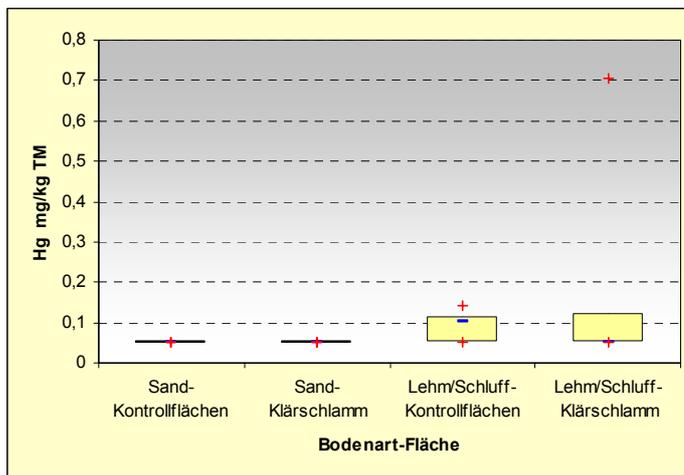
Vorsorgewerte  
(Königswasser):  
40 mg/kg  
(Lehm/Schluff)  
20 mg/kg (Sand)

Abbildung II.10: Verteilung der Kupfer-Gehalte in den untersuchten Böden



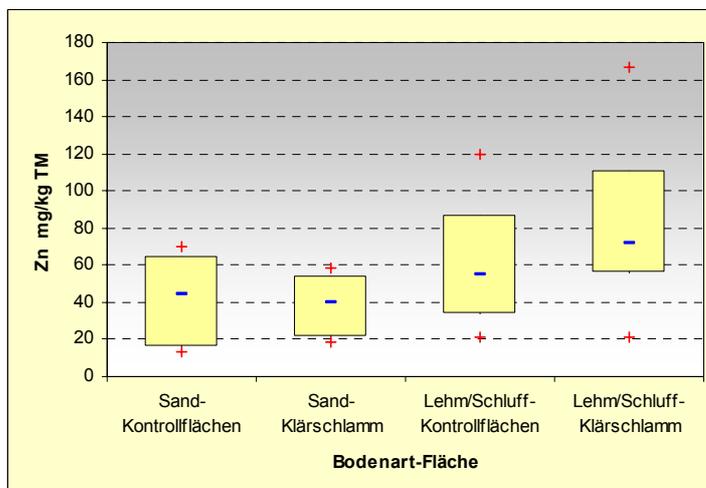
Vorsorgewerte  
(Königswasser):  
50 mg/kg  
(Lehm/Schluff)  
15 mg/kg (Sand)

Abbildung II.12: Verteilung der Nickel-Gehalte in den untersuchten Böden



Vorsorgewerte  
(Königswasser):  
0,5 mg/kg  
(Lehm/Schluff)  
0,1 mg/kg (Sand)

Abbildung II.13: Verteilung der Quecksilber-Gehalte in den untersuchten Böden



Vorsorgewerte  
(Königswasser):  
150 mg/kg  
(Lehm/Schluff)  
60 mg/kg (Sand)

Abbildung II.14: Verteilung der Zink-Gehalte in den untersuchten Böden

### II.3.1.2 Ergebnisdiskussion

#### Metalle und ihre Verbindungen:

##### Blei:

Der Median der Bleikonzentration in den Klärschlamm-beaufschlagten Sand-Flächen liegt bei 18 mg/kg TG, wohingegen der Wert auf den entsprechenden Kontrollflächen bei 23 mg/kg TG liegt. Die Maximalwerte sind 26 mg/kg (Kontrollfläche) bzw. 25 mg/kg (Klärschlammfläche). Der Vorsorgewert für sandige Böden liegt bei 40 mg/kg TG und wird von daher auf keiner der Flächen – auch nicht von den Maximalwerten – überschritten.

Für die Lehm/Schluff-Flächen kann der Median mit 21 mg/kg TG (Kontrollflächen) und 25 mg/kg TG (Klärschlammflächen) angegeben werden; die Maximalwerte sind 40 mg/kg TG (Kontrollfläche) bzw. 38 mg/kg TG (Klärschlammfläche). Auf den Lehm/Schluff-Flächen weichen die Maximalwerte deutlich mehr von den Mittelwerten ab als auf den Sand-Flächen. Der Maximalwert wurde auf einer Fläche gemessen, die in der Zeit von 1980 bis 1990 jährlich mit 267 – 314 m<sup>3</sup>/ha beschlammte wurde. Der Vorsorgewert für Lehm/Schluff liegt bei 70 mg/kg TG und wird auch hier in keinem der Fälle überschritten.

##### Cadmium:

Der Maximalwert auf den Sand-Kontrollflächen liegt bei 0,5 mg/kg TG, während der entsprechende Wert auf den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen bei < 0,4 mg/kg TG liegt, so wie auch Median, Mittelwert und 90. Perzentile. Der Vorsorgewert wurde mit 0,4 mg/kg TG abgeleitet; das bedeutet, dass dieser Wert auf einer der Sand-Kontrollflächen leicht überschritten wird. Dabei handelt es sich um eine zwischen 2002 und 2004 mit Gülle (1 – 1,4 t/ha) beaufschlagte Fläche.

Die Maximalwerte für die Lehm/Schluff-Kontrollflächen sind mit 0,75 mg/kg TG und für die mit Klärschlamm beaufschlagten entsprechenden Flächen mit 1,35 mg/kg TG analysiert worden. Bei der letztgenannten Fläche handelt es sich um eine Fläche, die 1997 mit 21,5 t/ha TM beaufschlagt worden ist. Bei der Probenahme war der Bewuchs Sommergerste, im Vorjahr war Getreide angebaut worden. Der entsprechende Vorsorgewert für Lehm/Schluff liegt bei 1 mg/kg TG und wird durch den analysierten Maximalwert überschritten. Median und Mittelwert liegen sowohl für die Kontrollflächen als auch die Klärschlammflächen deutlich unterhalb des Vorsorgewertes.

##### Chrom:

Die Mediane für die Sandflächen sind mit 19 mg/kg TG (Kontrollflächen) und 18 mg/kg TG (Klärschlammflächen) angegeben. Die Maximalwerte wurden zu 24 mg/kg TG (Kontrollfläche) bzw. 19 mg/kg TG (Klärschlammfläche) analysiert. Bei letztgenannter handelt es sich um eine Fläche, die im Frühjahr 2004 mit 3 t/ha beaufschlagt worden war. Der entsprechende Vorsorgewert für Sand liegt bei 30 mg/kg TG und wird von daher in allen Fällen deutlich unterschritten.

Die Mediane für die Lehm/Schluff-Flächen liegen bei 32 mg/kg TG (Kontrollfläche) und 28 mg/kg TG (Klärschlammfläche). Der Maximalwert wurde auf einer Fläche nachgewiesen, die 1997 mit 21,5 t/ha TM beaufschlagt worden ist, und liegt bei 95 mg/kg TG. Dabei handelt es

sich um dieselbe Fläche, die auch für Cadmium den Maximalwert aufweist. Der Vorsorgewert für Lehm/Schluff wurde mit 100 mg/kg TG abgeleitet und wird von daher auch für den Maximalwert leicht unterschritten.

#### Kupfer:

Der Median der Kupferkonzentration in den Klärschlamm-beaufschlagten Sand-Flächen liegt bei 7,5 mg/kg TG, wohingegen der Wert auf den entsprechenden Kontrollflächen bei 11 mg/kg TG liegt. Die Maximalwerte sind mit 18 mg/kg (Kontrollfläche) bzw. 12 mg/kg (Klärschlammfläche) angegeben. Der Vorsorgewert für sandige Böden liegt bei 20 mg/kg TG und wird von daher auf keiner der Flächen – auch nicht von den Maximalwerten – überschritten.

Für die Lehm/Schluff-Flächen kann der Median mit 14 mg/kg TG (Kontrollflächen) und 15 mg/kg TG (Klärschlammflächen) angegeben werden; die Maximalwerte sind 22 mg/kg TG (Kontrollfläche) bzw. 42 mg/kg TG (Klärschlammfläche). Auch hier weichen die Maximalwerte auf den Lehm/Schluff-Flächen deutlich mehr von den Mittelwerten ab als auf den Sand-Flächen. Der Maximalwert wurde wiederum auf der Fläche gemessen, die auch für Cd und Cr die höchsten Werte aufwies. Der Vorsorgewert für Lehm/Schluff liegt bei 40 mg/kg TG und wird vom Maximalwert leicht überschritten.

#### Nickel:

Die Mediane für die Sandflächen sind mit 19 mg/kg TG (Kontrollflächen) und 12 mg/kg TG (Klärschlammflächen) angegeben. Die Maximalwerte wurden zu 31 mg/kg TG (Kontrollfläche) bzw. 20 mg/kg TG (Klärschlammfläche) analysiert. Bei letztgenannter handelt es sich um eine Fläche, die im Frühjahr 2004 mit 3 t/ha beaufschlagt worden war; sie weist auch für Chrom den entsprechenden Maximalwert auf. Der Vorsorgewert für Sand liegt bei 15 mg/kg TG und wird von daher von beiden Maximalwerten sowie dem Median der Kontrollfläche überschritten.

Die Mediane für die Lehm/Schluff-Flächen liegen bei 20 mg/kg TG (Kontrollfläche) und 18 mg/kg TG (Klärschlammfläche). Der Maximalwert von 88 mg/kg TG wurde auf der Fläche nachgewiesen, die auch im Fall von Cd, Cr und Cu den höchsten Wert aufwies. Der Vorsorgewert für Lehm/Schluff wurde mit 50 mg/kg TG abgeleitet und wird von den Medianen deutlich unterschritten.

#### Zink:

Die Mediane für die Sandflächen sind mit 42 mg/kg TG (Kontrollflächen) und 40 mg/kg TG (Klärschlammflächen) angegeben. Die Maximalwerte wurden zu 70 mg/kg TG (Kontrollfläche) bzw. 59 mg/kg TG (Klärschlammfläche) analysiert. Der entsprechende Vorsorgewert für Sand liegt bei 60 mg/kg TG und wird von daher lediglich von dem Maximalwert auf der Kontrollfläche überschritten. Dabei handelte es sich um eine Fläche, die mit Mineraldünger beaufschlagt worden war.

Die Mediane für die Lehm/Schluff-Flächen liegen bei 56 mg/kg TG (Kontrollfläche) und 73 mg/kg TG (Klärschlammfläche). Der Maximalwert von 165 mg/kg TG wurde auf einer Fläche nachgewiesen, die in der Zeit von 1980 bis 1990 jährlich mit 267 – 314 m<sup>3</sup>/ha beschlammte

wurde (siehe auch Blei). Der Vorsorgewert liegt bei 150 mg/kg TG und wird lediglich vom letztgenannten Maximalwert überschritten.

### **Organische Schadstoffe:**

#### Benzo(a)pyren und $\Sigma$ PAKs nach EPA:

Die Ergebnisse belegen den oft beobachteten Konzentrationsunterschied zwischen B(a)P und  $\Sigma$  PAKs von einem Faktor von etwa 10.

Der Mittelwert für BaP in den Klärschlamm-gedüngten Böden liegt mit 0,075 mg/kg TG unterhalb der beiden Vorsorgewerte. Der entsprechende Maximalwert, der mit 0,567 mg/kg TG angegeben ist, liegt um einen Faktor von 2 oberhalb des für Böden mit einem Humusgehalt von <8% angegebenen Vorsorgewertes von 0,3 mg/kg TG. Bei nicht mit Klärschlamm gedüngten Flächen wird der Vorsorgewert eingehalten.

Der Maximalwert tritt bei einer Fläche auf, die bereits bei der Diskussion der Metalle als Fläche identifiziert worden war, die offenbar mit relativ hoch kontaminiertem Klärschlamm beaufschlagt worden war. Die relativ hohen Kontaminationen beschränken sich offensichtlich nicht nur auf Metalle, sondern beziehen sich auch auf organische Verbindungen.

#### $\Sigma$ PCB nach DIN:

Sowohl der Mittelwert als auch der Maximalwert in den KS-beaufschlagten Böden liegt mit 0,015 bzw. 0,02 mg/kg unterhalb der abgeleiteten Vorsorgewerte (0,1, für Humus > 8%; 0,05 für Humus < 8%) . Der Maximalwert für eine mit Klärschlamm applizierte Flächen liegt bei 0,065 mg/kg TG und damit deutlich über dem Maximalwert der Kontrolle, der mit 0,017 analysiert wurde.

#### Organozinnverbindungen:

Die Ergebnisse zeigen, dass aus dem Spektrum der untersuchten Organozinnverbindungen auf den Klärschlamm-Flächen insbesondere MBT sowie MOT gefunden werden. TBT wurde – wenn überhaupt – nur in sehr geringen Konzentrationen gefunden. Auf einer Fläche wurde in einer Probe außerdem das Tricyclohexylzinn-Kation, in einem anderen Fall das DBT-Kation analysiert.

Auf den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen liegen die Werte für MBT und DBT in einzelnen Proben über denen der Kontrollflächen. Der höchste gemessene Wert für MBT beträgt 25  $\mu$ g/kg. Dabei handelt es sich um eine Fläche, die 2004 mit 4,9 t/ha TM gedüngt worden war. Bei Probenahme war kein Bewuchs vorhanden.

Für MOT und DOT ergibt sich ein anderes Bild. Hier werden in einer mit Stallmist und Gülle gedüngten Fläche die höchsten Gehalte (6,7  $\mu$ g MOT/kg TG bzw. 13,6  $\mu$ g DOT /kg TG) gemessen. Bei allen anderen Flächen liegen jedoch die Gehalte sowohl für MOT als auch für DOT unter 3,0  $\mu$ g/kg TG.

### LAS:

Für LAS sind bei den von C.A.U. ermittelten Werte keine signifikanten Unterschiede zwischen den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen und den Kontrollflächen zu finden. Die von FH-IME gemessenen Werte liegen alle unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,15 mg/kg TG.

### Moschusverbindungen:

Alle Werte für die mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen liegen über denen der Kontrollflächen, was darauf zurückzuführen ist, dass die Einträge von Galaxolid und Tonalid über den Klärschlamm-Pfad erfolgen. Die Mittelwerte auf den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen liegen bei 0,48 µg HHCB/kg TG bzw. 0,52 µg AHTN/kg TG. Die beiden gefundenen Maximalwerte liegen auf derselben Fläche. Diese wurde 2001 mit 3,8 t/ha und 2004 mit 5 t/ha beaufschlagt.

### 4-Nonylphenol und Nonylphenoethoxylate:

Alle Werte (Kontrollflächen und mit Klärschlamm beaufschlagte Flächen) liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze (NP: 0,1 mg/kg; NP1EO und NP2EO: 2 mg/kg).

### Phthalate:

DEHP-Gehalte in Klärschlämmen liegen im Bereich von 20-100 mg/kg. Die EU hat einen Wert von 100 mg DEHP/kg TS für Klärschlämme vorgeschlagen.

DEHP akkumuliert nicht im Boden, da der Schadstoff im Boden abbaubar ist. Es konnte im Rahmen des Vorhabens „Evaluierung und Erweiterung der Grundlagendaten für die Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Pflanze – Teil I, organische Stoffe“ (FKZ: 203 73 273) gezeigt werden, dass mehr als 90% des DEHP innerhalb einer Vegetationsperiode abgebaut werden kann. Dies wird auch durch den Vergleich des DEHP-Gehaltes in den Proben 1, 16 und 17 deutlich. Probe 1 wurde im Frühjahr nach Klärschlammausbringung genommen. Dabei wurden Gehalte an DBP von 160 µg/kg und an DEHP von 85 µg/kg gemessen. Bei der Herbstapplikation waren die Phthalate soweit abgebaut, dass die Analysenergebnisse unter der Bestimmungsgrenze lagen. Die Ermittlung verlässlicher Abbaudaten ist daher eine entscheidende Information.

DEHP scheint kein spezifisches Klärschlammproblem darzustellen. So werden zwar die höchsten Gehalte mit 533 µg/kg TG bei einer mit Klärschlamm, Stallmist und Gülle gedüngten Fläche gemessen; allerdings zeigt auch die Kontrollfläche mit 370 µg/kg TG ebenfalls einen hohen Gehalt. Ein weiterer hoher Gehalt wird mit 403 µg/kg auf Fläche 5 (Kontrollfläche mit Mineraldünger gedüngt) gemessen. Diese Befunde zeigen das ubiquitäre Auftreten von Phthalaten sowie den nicht zu vernachlässigenden Eintragspfad über die Luft.

### II.3.1.3 Zusammenfassung der experimentellen Befunde

Generell lässt sich – bei Betrachtung der Mediane – für die analysierten **Metalle** und ihre Verbindungen sagen, dass die Boden-Beaufschlagungen mit Klärschlämmen in einigen Fällen zu einer geringfügigen Erhöhung der Mittelwerte geführt haben. Die Bodenbeaufschlagungen mit Klärschlamm führten bisher jedoch nicht zu einer solchen Erhöhung der Stoffgehalte, dass Belastungen oberhalb der Vorsorgewerte entstanden. Allerdings traten vereinzelt Maximalwerte auf, die leicht oberhalb der Vorsorgewerte für Böden der Bodenarten Sand sowie Lehm/Schluff lagen. Dabei handelte es sich jedoch in vielen Fällen um dieselbe Fläche, die offenbar mit relativ hoch kontaminiertem Klärschlamm beaufschlagt worden war.

Weiterhin wurde festgestellt, dass für 66% der untersuchten **organischen Chemikalien** die hier erhobenen Konzentrationsbereiche deutlich unterhalb der in der Literatur gefundenen typischen Bereiche liegen. 33% der analysierten Stoffe weisen mit der Literatur vergleichbare Konzentrationsbereiche auf.

Aus dem analysierten Stoffspektrum konnten für die Verbindungen Benzo(a)pyren,  $\Sigma$  PAK nach EPA, Organozinnverbindungen und Moschusverbindungen Anreicherungen nach Klärschlamm-Aufbringung gefunden werden. Die gefundenen Maximalwerte für Benzo(a)pyren und  $\Sigma$  PAK nach EPA liegen oberhalb der Vorsorgewerte der BBodSchV. Damit führt die Klärschlamm-Aufbringung nachweislich zu einer Anreicherung von organischen Schadstoffen im Boden, wenngleich größtenteils auf niedrigem Niveau.

Bezieht man somit die Persistenz eines Kontaminanten als wesentliches Element in die Beurteilung mit ein, so wird deutlich, dass das Anreicherungspotential eines Stoffes in Böden zur entscheidenden Größe wird. Diese Aussage deckt sich mit der von P. Dreher veröffentlichten Aussage in der Studie „Organische Schadstoffe in Ackerböden Baden-Württembergs“ [Dreher et al., 2003]. Auch er weist auf eine mögliche Anreicherung persistenter organischer Stoffe wie polycyclische Moschusverbindungen, Organozinnverbindungen und Dioxine/Furane in mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen hin. Nur eine Persistenz der in den Böden nachgewiesenen Organika kann zu einer signifikanten Anreicherung bei wiederholter Applikation führen. Bei den im Vorhaben erhobenen Daten wird dies am Beispiel der Moschusverbindungen deutlich. Bei einer Nutzung von Klärschlämmen als Sekundärrohstoffdünger sollte demnach die Persistenz von mengenmäßig wichtigen Stoffen, die über die Kläranlage entsorgt werden, getestet und in die Betrachtung einbezogen werden.

### II.3.1.4 Einordnung analysierter Schadstoffkonzentrationen in Literaturwerte

Im Rahmen der Literaturstudie wurden Minimal- und Maximalwerte für Schadstoffkonzentrationen in landwirtschaftlichen Böden nach Düngeraufbringung zusammengestellt. Diesen Werten werden nun die im Rahmen des Vorhabens analysierten Konzentrationen gegenübergestellt.

### **Metalle und ihre Verbindungen:**

Die Metalle Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Nickel und Zink wurden im Rahmen dieser Studie zu Vergleichszwecken mit analysiert. Für sie liegen aus langjährigen Untersuchungen umfangreiche Veröffentlichungsergebnisse vor, die bereits vielfach diskutiert worden sind. Es ist nicht Gegenstand dieses Vorhabens, zu dieser Diskussion beizutragen. Aus diesem Grund findet für Metalle und ihre Verbindungen – abgesehen von der weiter unten angegebenen Zusammenfassung - keine weitere Darstellung statt.

### **Organische Schadstoffe:**

#### Benzo(a)pyren und $\Sigma$ PCB nach DIN:

Der im Rahmen dieses Vorhabens gefundene Konzentrationsbereich liegt für beide Substanzgruppen deutlich unterhalb des aus Literaturdaten zusammengestellten typischen Bereichs.

Da beide Substanzgruppen seit langem in der umweltrelevanten Diskussion sind, liegen eine Vielzahl von Untersuchungen, auch älteren Datums, vor. Aus diesen werden nur einige wenige ausgewählt und im folgenden diskutiert.

[Düring, R.-A. und S. Gäth, 2001] fassen die Ergebnisse zu polychlorierte Biphenylen in Böden nach Anwendung organischer Siedlungsabfälle folgendermaßen zusammen:

Organische Siedlungsabfälle wurden auf drei Standorten, die praxisüblich bewirtschaftet werden, gemäß den gesetzlichen Vorgaben (Bioabfallkompost: 10 t TS/ha; Klärschlamm: 5 T TS /ha) sowie mit dreifacher Klärschlamm-Aufwandmenge ausgebracht. Bei den Böden handelt es sich um eine Braunerde aus Flugsand, eine Löß-Parabraunerde sowie einen braunen Auenboden. Bodenproben wurden in unterschiedlicher Tiefe entnommen.

Typische PCB-Muster wurden in den Klärschlämmen ermittelt. Dabei waren die höchsten Konzentrationen mit 50 - 80 µg/kg TG bei den höher chlorierten Kongeneren festzustellen. Die Klärschlammdüngung der Böden führte nach einmaliger Applikation zu qualitativ bestimmbareren Spuren der PCBs 101, 153, 138 und 180 in den oberflächennahen Proben der unbearbeiteten Böden. In den pflug- und grubbearbeiteten Böden führte der mit der Einmischung einhergehende Verdünnungseffekt zu Konzentrationen, die mit der verwendeten Analytik nicht mehr zu erfassen waren. Es wurde die grundsätzliche Schlussfolgerung gezogen, dass „die Belastung landwirtschaftlicher Böden mit PCBs über die Düngung mit Klärschlämmen weiterhin sehr hoch bzw. hoch ist. Aufgrund der fehlenden Durchmischung unbearbeiteter Böden - hier lediglich als Extremvariante von konservierenden Verfahren betrachtet - ist der Verdünnungseffekt wesentlich geringer als in konventionell bearbeiteten Böden.

[R.E. Alcock et al., 1996] ziehen in ihrer Veröffentlichung die Schlussfolgerung, dass atmosphärische Einträge die PCB-Gehalte im Boden einer der betrachteten Versuchsflächen zu dominieren scheinen. Dies gelte auch für die Flächen, die sehr hohe Mengen an Klärschlämmen erhalten haben. Zusätzlich resultierte die Klärschlamm-Zugabe in einer vorübergehenden Steigerung der PCB-Gehalte. Der anschließende Belastungsrückgang ist auf Verflüchtigung, Bioabbau sowie die Bildung reversibel gebundener Rückstände zurückzuführen, wobei die Verflüchtigung als Hauptaustragspfad angesehen wird.

Die Veröffentlichung von [J.D. Berset et al., 1995] zielt darauf ab, einen Überblick über den damals aktuellen Stand der Kontamination von landwirtschaftlich genutzten Böden und Klärschlämmen sowie weiteren Sekundärrohstoffdüngern in der Schweiz zu geben. Dabei wurden zwei organische Substanzgruppen - PCBs und PAHs - untersucht. Die PAH-Konzentrationen in Böden lagen zwischen 60 - 575 µg/kg, die in Klärschlamm zwischen 1,7 - 15 mg/kg, in Kompost zwischen 0,8 - 2,7 mg/kg. Entsprechende PCB-Konzentrationen in Böden lagen durchschnittlich bei 14 µg Summe PCBs/kg TG und repräsentierten damit übliche Hintergrundkonzentrationen. PCB-Konzentrationen in Kompost lagen mit 32-37 µg/kg etwas höher; die höchsten Werte wurden mit 0,4 mg/kg TG im Klärschlamm gefunden.

[P. Diercxsens and J. Tarradellas, 1987] untersuchten in ihrer Studie zu Bodenverunreinigungen bei Klärschlammapplikation neben DEHP und NP auch die Stoffgruppen der PAHs und PCBs. Dabei zeigte der Boden unmittelbar nach Applikation eine Akkumulation der genannten Schadstoffe, wohingegen einen Monat nach Applikation die Konzentrationen auf die Level zurückging, die auch unmittelbar vor Klärschlammaufbringung gemessen worden waren. Das bedeutet, dass bei PAHs und PCBs mit einem zusätzlichen Eintrag über den Luftpfad zu rechnen ist. Einige Testplots, die über einen Zeitraum von 10 Jahren mit Mineraldünger, Schweinegülle und Klärschlamm beaufschlagt wurden, zeigen für PAHs einen Konzentrationsanstieg auf den Flächen, die mit Klärschlamm beaufschlagt wurden. In ähnlicher Weise dürften Klärschlämme vornehmlich auch für einen PCB-Konzentrationsanstieg verantwortlich sein; jedoch ist der PCB-Gehalt in Schweinegülle nicht zu vernachlässigen.

#### Organozinnverbindungen:

Zu Konzentrationen von Organozinnverbindungen in mit Klärschlamm applizierten landwirtschaftlichen Böden liegen sehr wenige Literaturzitate vor. Eine der wenigen bekannten Studien ist die von [P. Dreher et al., 2003]. Die entsprechenden Mittelwerte für die Summe an OZV liegt auf den verschiedenen mit Klärschlamm applizierten Flächen zwischen 4,4 – 26,6 µg/kg. Der hohe Wert ist auf einen Versuchsstandort zurückzuführen, während bei den Praxisstandorten die Werte zwischen 4,4 – 8,3 µg/kg lagen.

Die in der vorliegenden Studie analysierten Mittelwerte liegen zwischen < BG und 4,4 µg/kg, was sich gut mit den von [P. Dreher et al., 2003] gefundenen Werten deckt. Insbesondere MBT und DBT, aber auch Tricyclohexylzinn-Kation, wurden – jetzt bezogen auf den Maximalwert – in Konzentrationen zwischen 8,4 – 25,2 µg/kg detektiert.

#### LAS:

Der im Rahmen dieses Vorhabens durch C.A.U. gefundene Konzentrationsbereich (< 0,2 – 2,2 mg/kg) ist nahezu identisch mit dem in der Literatur gefundenen typischen Bereich (0,2 – 5 mg/kg).

[K. Figge et al., 1998]: untersuchten Abbau und Verbleib eines Gemisches aus linearen Alkylbenzolsulfonaten. Die Schadstoff wurden mit Faulschlamm in die Ackerkrume zweier hinsichtlich Bodentyp und Bewuchs unterschiedlicher Agrarökosystemausschnitte eingetragen und mit Radiotracer-technik unter einem definierten, für die Hauptvegetationszeit in Norddeutschland repräsentativen Standardklima quantitativ untersucht. Nach 76 bzw. 106

Tagen wurde das Verhalten bestimmt. Es wurde nahezu die gesamte Menge an eingetragener Radioaktivität wiedergefunden, wobei in der Atmosphäre 63 bzw. 72%, im Bodenkern 27 bzw. 18% , in der Biomasse 7 bzw. 6% und im Sickerwasser 1 bzw. 1,4% auftraten.

In [A. Marcomini et al., 1989] sind Ergebnisse von Langzeituntersuchungen in den Jahren 1976-1986 präsentiert. In den Studien wurde ständig bewachsenes Grasland mit insgesamt 142 t KS TG /ha appliziert. Der Versuchsort war eine landwirtschaftliche Untersuchungsstation für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld, Schweiz. Unmittelbar sowie ein Jahr nach Klärschlammapplikation wurden Bodenproben entnommen und auf PCBs, NP, NPE und LAS hin untersucht. Die NP und LAS-Konzentrationen im Boden nehmen innerhalb des Versuchszeitraums um zum Teil mehr als 90 Prozent ab.

#### 4-Nonylphenol:

Die Gehalte von NP und NPEO liegen in diesem Vorhaben für alle Proben unterhalb der Bestimmungsgrenzen (0,1 mg/kg für NP und 2 mg/kg für NPEO). Damit liegen die Werte für NP unterhalb des aus Literaturdaten zusammengestellten typischen Bereichs von 0,1 – 2 mg/kg.

In der Literaturstudie von [T. Kaiser et al., 1998] wurden Klärschlammproben aufgeführt, die in allen westdeutschen Bundesländern in den Jahren 1987 bis 1989 auf 4-NP hin untersucht worden waren. In verschiedenen Teilen des Bundesgebietes wurden darüber hinaus langjährige Versuchsböden auf organische Stoffe hin untersucht. Den Böden waren seit bis zu 10 Jahren mehr oder weniger erhebliche Mengen an Klärschlamm zugesetzt worden. In diesen Böden konnten NP gehalte zwischen  $< 0,1$  mg/kg TS und 0,7 mg/kg TS gemessen werden. Der höchste Wert stammte dabei allerdings aus einem Boden, dem das 40fache der erlaubten Aufwandmenge an Klärschlamm zugeführt worden war.

In [Düring, R.-A. und S. Gäth, 1999] wurden organische Siedlungsabfälle auf drei Standorten, die praxisüblich bewirtschaftet werden, gemäß den entsprechenden gesetzlichen Vorgaben (Bioabfallkompost: 10 t TS/ha; Klärschlamm: 5 T TS /ha) ausgebracht. Bei den Böden handelte es sich um eine Braunerde aus Flugsand, eine Löß-Parabraunerde sowie einen braunen Auenboden, die unbearbeitet blieben, mit Schwergrubber bzw. Pflug bearbeitet wurden. Bodenproben wurden in unterschiedlicher Tiefe entnommen. Der Eintrag von Nonylphenol über Klärschlämme in landwirtschaftlich genutzte Böden konnte anhand von Messungen durch die typischen Isomerenmuster bestätigt werden. Die ermittelten Konzentrationen der Nonylphenole in den KS betrug 20 - 50 mg/kg TG. Die Analyse der unbearbeiteten Böden nach Klärschlammausbringung ergab Konzentrationen bis etwa 1 mg/kg TS. Es wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Belastung landwirtschaftlicher Böden mit NP über die Düngung mit Klärschlamm weiterhin sehr hoch bzw. hoch ist. Aufgrund der fehlenden Durchmischung unbearbeiteter Böden - hier lediglich als Extremvariante konservierender Verfahren - ist der Verdünnungseffekt wesentlich geringer als in konventionell bearbeiteten Böden.

Diese Schlussfolgerungen konnten – wie bereits oben erwähnt – im hier durchgeführten Vorhaben (Werte s.o.) nicht bestätigt werden. Diese Befunde sind jedoch in Einklang mit denen der Studie von [P. Dreher et al., 2003]. Die letztgenannte sagt, dass „in den Bodenproben Nonyl-/Octylphenol nicht nachzuweisen waren.“

### Dibutylphthalat und DEHP:

Der im Rahmen dieses Vorhabens gefundene Konzentrationsbereich von < 50 µg/kg bis 533 µg/kg mit einem Mittelwert von 132 µg/kg liegt durchaus im Rahmen des aus Literaturdaten zusammengestellten typischen Bereichs (< 50 – 1900 µg/kg), wenngleich an dessen unterem Ende.

Auch in der Literatur wird wiederholt sowohl auf die Abbaubarkeit der Phthalate als auch auf deren ubiquitäres Auftreten nach Eintrag über verschiedene Pfade - wie zum Beispiel den Luftpfad – hingewiesen. In [P. Diercxsens and J. Tarradellas, 1987] zum Beispiel zeigt der Boden unmittelbar nach Klärschlammaufbringung eine Akkumulation der Schadstoffe; einen Monat nach Applikation gehen die Konzentrationen jedoch auf die Level zurück, die unmittelbar vor Klärschlammaufbringung gemessen wurden.

[D. Merkel et al., 1996] wählten aus dem Probenaufkommen der LUFA Hameln 61 Klärschlammproben aus. Sie zogen von Standorten mit und ohne Klärschlammmanwendung sowie von zwei Feldversuchsflächen der Landwirtschaftskammer Hannover insgesamt 120 Bodenproben. Bei den Versuchen auf Lehm- bzw. Sandboden waren in einmaligen Gaben bis zu 400 t Klärschlamm-Trockenmasse je ha aufgebracht worden. Zwar traten in den Klärschlämmen im Vergleich zu anderen organischen Schadstoffen relativ hohe DEHP-Konzentrationen auf. Im Boden ist bei ordnungsgemäßer Klärschlammausbringung jedoch weder eine nennenswerte Verlagerung in den Unterboden noch eine Anreicherung zu beobachten.

Die Autoren [J. Vikesoe et al., 2002] fanden signifikante Korrelationen zwischen den Konzentrationen von Phthalaten im Boden mit der Art der Düngung. Eine Klärschlamm-Applikation unterhalb einer gewissen Grenze führte nicht zu erhöhten Konzentrationen im Vergleich zu den Feldern, die mit Wirtschaftsdünger oder Mineraldünger beaufschlagt worden waren. Die Konzentrationen in diesen Böden sind nahe denen des nicht bewirtschafteten Bodens. Phthalate wurden auch dann gefunden, wenn das Feld seit 50 Jahren nicht mehr bearbeitet worden ist. Hier wurde der Einfluß atmosphärischer Einträge diskutiert. Sehr hohe Klärschlamm-Beaufschlagungen führen jedoch zu signifikanten Phthalat-Konzentrationen, die selbst 8 Jahre nach Düngung noch nachzuweisen sind.

In der Studie von [P. Dreher et al., 2003] wurde in der keiner der untersuchten Bodenproben DEHP gefunden.

### Moschusverbindungen:

Veröffentlichungen, in denen Ergebnisse zu Gehalten an Moschusverbindungen (mit HHCB und AHTN als Repräsentanten) in Klärschlämmen oder Klärschlamm-gedüngten Böden veröffentlicht sind, sind selten. Eine Ausnahme ist [P. Dreher et al., 2003]. An sechs untersuchten Praxisstandorten wurden auf 4 mit Klärschlamm gedüngten Flächen HHCB und/oder AHTN oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Die Konzentrationen lagen zwischen 0,33 und 2,1 mg/kg. Weiterhin ist festzuhalten, dass „bei allen Standorten, deren Gehalte oberhalb der Bestimmungsgrenze lagen, die Gehalte auf den Klärschlammflächen höher als die der Referenzflächen waren“. Es wurde die Schlussfolgerung gezogen: „...da ein bedeutender atmosphärischer Eintrag dieser Verbindungen oder sonstige Einträge eher

unwahrscheinlich waren, konnte als Ursache des Vorkommens nur auf eine zurückliegende Klärschlammmanwendung geschlossen werden.“

Die im Rahmen dieses Vorhabens erhobenen Daten liegen für AHTN zwischen  $< 0,2 - 1,5$   $\mu\text{g}/\text{kg}$  sowie für HHCb zwischen  $< 0,2 - 2,1$   $\mu\text{g}/\text{kg}$  und bestätigen damit die Literaturergebnisse.

### **II.3.1.5 Zusammenfassung: Einordnung analysierter Schadstoffkonzentrationen in Literaturwerte**

Es kann zusammengefasst werden, dass für etwa 70% der in dieser Studie analysierten **Metalle** und ihre Verbindungen die Konzentrationsbereiche vergleichbar sind zu den in der Literatur gefundenen typischen Bereichen. Für etwa 20% liegen die in dieser Studie gefundenen Werte etwas niedriger im Vergleich zur Literatur. Der in der vorliegenden Studie analysierte Konzentrationsbereich für Nickel ist geringfügig höher im Vergleich zu dem in der Literatur gefundenen typischen Bereich.

Für etwa 2/3 der untersuchten **organischen Schadstoffe** liegen die im Rahmen dieser Studie gemessenen Konzentrationsbereiche der Mittelwerte deutlich unterhalb der in der Literatur gefundenen typischen Bereiche liegen. Etwa 1/3 der analysierten Stoffe weisen Konzentrationsbereiche für die Mittelwerte auf, die mit der Literatur vergleichbar sind.

Diese Ergebnisse dürften zum einen darauf zurückzuführen sein, dass es sich bei einer Reihe von Veröffentlichungen um ältere ausländische Studien handelt, wo auch auf Praxisflächen langjährige Klärschlammapplikationen mit erhöhten Schadstoffgehalten nicht völlig ausgeschlossen sein dürften. Zum anderen liegen Ergebnisse von Versuchsflächen vor, die gezielt mit erhöhten Schadstoffgehalten beaufschlagt wurden, um das Verhalten der Stoffe verfolgen zu können.

Veröffentlichungen jüngerer Datums, zum Beispiel die Studie von [P. Dreher et al., 2003], zeigen entsprechend auch für die Versuchsflächen erhöhte Schadstoffgehalte, während im Gegensatz dazu die Gehalte auf den Praxisstandorten sich sehr gut mit den in dieser Studie für die Praxisstandorte gefundenen niedrigen Werte decken.

Auch in der Literatur wird die Abbaubarkeit der organischen Schadstoffe in die bewertende Diskussion einbezogen. Des Weiteren wird auch – falls von den Stoffeigenschaften und dem Verwendungsmuster her zutreffend – der Luftpfad als wichtiger Eintragspfad berücksichtigt.

### **II.3.2 Flächen-bezogene Auswertung**

Neben der Chemikalien-bezogenen Auswertung, deren Ergebnisse in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt wurden, ist eine Flächen-bezogene Auswertung sinnvoll. Das bedeutet, dass Flächenpaare (Kontrolle und entsprechende mit Klärschlamm beaufschlagte Flächen) verglichen werden. Auch werden auf diese Weise alle untersuchten Schadstoffe auf beiden Flächen des Flächenpaares gegenübergestellt. Es ist das Ziel, Kontaminanten im Sinne eines „Fingerprints“ bzw. im Sinne von Leitsubstanzen zu identifizieren, deren erhöhte Gehalte auf die

Klärschlammapplikation zurückzuführen sind. Auch sollten auf diese Weise Ausreißer (vereinzelte erhöhte Schadstoffgehalte) identifizierbar sein.

Beprobte wurden insgesamt 32 verschiedene Flächen. Dabei handelt es sich um mit Klärschlamm gedüngte Flächen mit verschiedenem Anbau, teilweise zu verschiedenen Zeiten (Wiederholungsbeprobung) sowie entsprechende Kontrollflächen ohne Klärschlamm-aufbringung, jedoch mit anderen Düngevarianten. Kontrollflächen im strengen Sinn, das heißt Flächen komplett ohne Düngeraufbringung standen nicht zur Verfügung. Die gewählten Kontrollflächen zeichnen sich durch räumliche Nähe zur mit Klärschlamm gedüngten Fläche sowie durch vergleichbare Bodeneigenschaften aus. Auf diese Weise lassen sich „Cluster“ bilden, die Flächenvergleiche ermöglichen. Insgesamt 10 Flächenvergleiche können so durchgeführt werden.

### II.3.2.1 Ergebnisse der Flächen-bezogenen Auswertung

Die folgenden Tabellen geben die Ergebnisse der Flächenvergleiche detailliert wieder. Es ist in den Tabellen durch den Schriftschnitt markiert, ob die Kontaminantengehalte auf den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen (**fett**) oder den nicht mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen (**fett und kursiv**) erhöht sind. Diese Beurteilung beruht nicht auf einer statistischen Auswertung, sondern auf Expertenabschätzung. Diskutiert werden im folgenden jeweils die Stoffgruppen sowie prägnante Ergebnisse. Zusätzlich werden diesen Ergebnistabellen jeweils weitere Tabellen mit Informationen zum Düngeregime und zur Flächencharakteristik vorangestellt. Auf diese Weise lassen sich Schlussfolgerungen besser einordnen.

Tabelle II.4: Flächencharakteristiken für Flächenvergleich 1 (in Tabelle II.5)

Standort-Kürzel	Düngung	Anbau	Boden
<b>RLP-1A-KS</b>	Klärschlamm, 3 t/ha TM, letzte Aufbringung Frühjahr 04; zusätzlich: 120 kg Nmin/ha, 200 kg Kali/ha (60%ig)	akt.: Winterweizen; Raps, Triticale, Erbsen	Sand
<b>RLP-1B-KS</b>	Wiederholungsbeprobung nach Klärschlammbeaufschlagung April 04	akt.: Winterweizen; Raps, Triticale, Erbsen	Sand
<b>RLP-1B (0,1m)</b>	Wiederholungsbeprobung nach Klärschlammbeaufschlagung April 04; (Entnahmetiefe 0-0,1m)	akt.: Winterweizen; Raps, Triticale, Erbsen	Sand
<b>RLP-2A-Min</b>	<b>Kontrollfläche</b> Mineraldünger	Winterweizen	Sand
<b>RLP-2B-Min</b>	Wiederholungsbeprobung Kontrollfläche	Winterweizen	Sand
<b>RLP-2B (0,1m)</b>	Wiederholungsbeprobung Kontrollfläche (Entnahmetiefe 0 - 0,1m)	Winterweizen	Sand

Tabelle II.5: Flächenvergleich 1

Fläche		RPL-1A-KS	RPL-1B-KS (Wdh.)	RPL-1B KS (Wdh., 10 cm Tiefe)	RPL-2A-Min (Kontrolle)	RPL-2B-Min (Kontrolle, Wdh.)	RPL-2B Min (Kontrolle, Wdh., 10cm Tiefe)
Stoff							
Blei	mg/kg	22	22	25	26	22	22
Cadmium	mg/kg	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Chrom	mg/kg	18	17	18	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>23</b>
Kupfer	mg/kg	11	11	12	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
Nickel	mg/kg	20	19	19	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>31</b>
Quecksilber	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Zink	mg/kg	10	53	58	<b>70</b>	<b>63</b>	<b>63</b>
Benzo[a]pyren	mg/kg	0,023	0,02	0,033	<b>0,077</b>	<b>0,057</b>	<b>0,053</b>
Σ PAK nach EPA	mg/kg	0,243	0,21	0,277	<b>0,760</b>	<b>0,573</b>	<b>0,523</b>
Σ PCB nach DIN	mg/kg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Monobutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<b>2,8</b>	<2	<b>4</b>	2
Dibutylzinn-Kation	µg/kg	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Tributylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Tetrabutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Monooctylzinn-Kation	µg/kg	<b>2</b>	<2	<2	<b>2,4</b>	2	<2
Diocetylzinn-Kation	µg/kg	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Tricyclohexylzinn-Kation	µg/kg	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Triphenylzinn-Kation	µg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1
LAS		<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<0,2	<b>0,4</b>	<b>1</b>
4-Nonylphenol	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
4-Nonylphenol mono- + -diethoxylat	mg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2
DBT	µg/kg	<100	<100	<100	<100	<100	<100
DnBT	µg/kg	<b>160</b>	<100	<100	<100	<100	<100
DEHP	µg/kg	<b>85</b>	<50	<50	<50	<50	<50
HHCB	µg/kg	<b>1,41</b>	<b>&lt;0,2</b>	<b>0,7</b>	<0,2	<0,2	<0,2
ATHC	µg/kg	<b>0,97</b>	<b>0,32</b>	<b>0,42</b>	0,23	0,22	<0,2

fett = die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte  
 fett und kursiv = die nicht mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte

Bei diesem Vergleich handelt es sich um Flächen aus Rheinland-Pfalz. Fläche 1A wurde mit Klärschlamm beaufschlagt und nach der Vegetationsperiode erneut beprobt (1B), wobei auch Proben aus 0-10 cm Tiefe gezogen wurden (3. Spalte). Bei der Vergleichsfläche handelt es sich um eine mit Mineraldünger behandelte Fläche (2A), die in Analogie zur Fläche 1 ebenfalls erneut beprobt wurde.

Die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt für LAS, Phthalate und polycyclische Moschusverbindungen erhöhte Gehalte gegenüber den nicht mit Klärschlamm gedüngten Flächen. Die letztgenannte Fläche weist bei einer Reihe von Metallen sowie BaP und Summe PAHs gegenüber der mit Klärschlamm behandelten Fläche höhere Gehalte auf.

Tabelle II.6: Flächencharakteristiken für Flächenvergleiche 2 und 3 (in Tabelle II.7)

Standort-Kürzel	Düngung	Anbau	Boden
<b>RLP-3-KS</b>	Klärschlamm, 2x in 6 Jahren, zuletzt 2003; 1x in 3 Jahren 120 kg Nmin/ha, 10 dZ Kali/ha, K+P	Mais, Weizen, Wintergerste, teilw. Raps	Lehm/ Schluff
<b>RLP-4-St</b>	1x in 3 Jahren 120 kg Nmin/ha, 10 dZ Kali/ha, K+P; zusätzlich: Festmist 50 t/ha in 3 Jahren	Winterweizen, Wintergerste, Hafer	Lehm/ Schluff
<b>RLP-5-Min</b>	Kontrollfläche Mineraldünger; von 1994 bis 2004 (ohne 2001) jährlich je 60 – 150 kg/ha Nmin, Phosphor und Kali	Braugerste, zuletzt Triticale, Rotationsbrache	Lehm/ Schluff
<b>RLP-8-KS</b>	Klärschlamm, 4,8 t/ha TM; 1x in 3 Jahren; kein Mineraldünger	Winterweizen, Raps	Lehm/ Schluff
<b>RLP-6-Ko</b>	Kompost, 36 t/ha in 2003; zuvor jährlich 15 m <sup>3</sup> Schweinegülle/ha	Raps, Wintergerste, Winterweizen	Lehm/ Schluff
<b>RLP-7-Gü</b>	Gülle und Pferdemist in 1997	Raps, Wintergerste, Winterweizen	Lehm/ Schluff

Bei beiden "Flächenclustern" handelt es sich wiederum um Flächen aus Rheinland-Pfalz. Pro Flächenvergleich wurden drei Flächen miteinander verglichen. Dabei handelt es sich bei Flächenvergleich 2 um eine mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche, die mit einer mit Stallmist gedüngten Fläche sowie einer mit Mineraldünger gedüngten Fläche verglichen wird (letztgenannte hat andere Bodeneigenschaften und ist von daher nur bedingt als Kontrolle zu nutzen). Beim Flächenvergleich 3 wird die mit Klärschlamm applizierte Fläche mit Flächen verglichen, die mit Kompost bzw. Gülle gedüngt wurden.

Tabelle II.7: Flächenvergleiche 2 und 3

Fläche		RPL-3-KS	RPL-4-St (Kontrolle1, Stallmist,)	RPL-5-Min (Kontrolle 2, nur bedingte Kontrolle)	RPL-8-KS	RPL-6-Ko (Kontrolle 1)	RPL-7-Gü (Kontrolle 2)
Stoff							
Blei	mg/kg	18	18	17	20	<b>21</b>	<b>20</b>
Cadmium	mg/kg	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	0,4
Chrom	mg/kg	27	<b>32</b>	<b>30</b>	30	<b>36</b>	<b>34</b>
Kupfer	mg/kg	<10	12	<10	16	<b>22</b>	<b>20</b>
Nickel	mg/kg	20	24	19	25	<b>43</b>	<b>47</b>
Quecksilber	mg/kg	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,11
Zink	mg/kg	53	<b>60</b>	43	67	<b>87</b>	<b>92</b>
Benzo[a]pyren	mg/kg	0,01	0,01	<b>0,017</b>	0,01	0,01	<b>0,013</b>
Σ PAK nach EPA	mg/kg	0,11	0,10	<b>0,183</b>	0,087	0,097	<b>0,16</b>
Σ PCB nach DIN	mg/kg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
Monobutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<b>3,3</b>	<2	<2	<b>3,3</b>
Dibutylzinn-Kation	µg/kg	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Tributylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Tetrabutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Monooctylzinn-Kation	µg/kg	2,0	2,0	2,0	<2	<b>2,3</b>	<b>2,0</b>
Diocetylzinn-Kation	µg/kg	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Tricyclohexylzinn-Kation	µg/kg	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Triphenylzinn-Kation	µg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1
LAS		<0,2	<0,2	<0,2	0,3	0,3	0,6
4-Nonylphenol	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
4-Nonylphenol mono- + -diethoxylat	mg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2
DBT	µg/kg	<100	<100	<100	<100	<100	<100
DnBT	µg/kg	<100	<100	<100	<100	<100	<100
DEHP	µg/kg	80	59	<b>403</b>	197	<b>303</b>	<b>243</b>
HHCB	µg/kg	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
ATHC	µg/kg	<0,2	<b>0,21</b>	<b>0,27</b>	<0,2	<b>0,31</b>	<b>0,21</b>

fett = die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte  
 fett und kursiv = die nicht mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte

Die Ergebnisse für beide Vergleiche sind recht einheitlich: die nicht mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen weisen für eine Reihe von Metallen, für BaP und Summe PAHs, MBT und MOT aus der Gruppe der Organozinnverbindungen, DEHP sowie ATHC gegenüber den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen – wenn zum Teil auch nur geringfügig – erhöhte Werte auf.

Tabelle II.8: Flächencharakteristiken für Flächenvergleiche 4 und 5 (in Tabelle II.9)

Standort-Kürzel	Düngung	Anbau	Boden
<b>HE-1-KS</b>	Klärschlamm-Kompost 1995: 3,3 t/ha TM; 1999: 10 t/ha TM; 2002: 6,6 t/ha TM	aktuell Winter-weizen; Raps, Winterweizen, Gerste	Lehm/ Schluff
<b>HE-2-KS</b>	Klärschlamm, mit Kalk konditioniert; 1993: 14,9 t/ha TM; 1996: 15 t/ha TM 1999: 23,3 t/ha TM; 2002: 26,5 t/ha TM		Lehm/ Schluff
<b>HE-4-KS</b>	Langzeitfeldversuche der Uni Gießen (1969 bis 1989) Klärschlamm, jährlich 2,5 – 5 T/ha TM	Mineraldünger u. Gründüngung (Erbsen) n. Getreide	Lehm/ Schluff
<b>HE-5-KS</b>	Klärschlamm 1996: 3 t/ha TM; 1999: 2,2 t/ha TM; 2003: 1,5 t/ha TM	Getreide	Lehm/ Schluff
<b>HE-3-Min</b>	Langzeitfeldversuche Uni Gießen; Kontrollfläche zu lfd. Nr. 12	Mineraldünger u. Gründüngung (Erbsen) n. Getreide	Lehm/ Schluff

Tabelle II.9: Flächenvergleiche 4 und 5

Fläche		HE-1-KS (keine Kontrolle)	HE-2-KS (keine Kontrolle)		HE-4-KS (Langzeit- versuchs- fläche)	HE-5-KS	HE-3-Min (Kontrolle, Langzeit- versuchs- fläche)
Stoff							
Blei	mg/kg	19	24		<b>24</b>	<b>23</b>	20
Cadmium	mg/kg	<0,4	<0,4		<b>0,6</b>	<0,4	<0,4
Chrom	mg/kg	23	30		<b>44</b>	<b>44</b>	41
Kupfer	mg/kg	14	28		19	18	17
Nickel	mg/kg	16	24		<b>34</b>	<b>35</b>	30
Quecksilber	mg/kg	<0,1	0,11		0,23	<0,1	0,14
Zink	mg/kg	57	78		<b>81</b>	<b>63</b>	59
Benzo[a]pyren	mg/kg	0,013	0,017		<b>0,04</b>	0,017	0,017
Σ PAK nach EPA	mg/kg	0,093	0,197		<b>0,4</b>	0,19	0,16
Σ PCB nach DIN	mg/kg	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
Monobutylzinn-Kation	µg/kg	3,6	4,1		<b>10,9</b>	<2	3,3
Dibutylzinn-Kation	µg/kg	<5	<5		<5	<5	<5
Tributylzinn-Kation	µg/kg	2,0	<2		<2	<2	<2
Tetrabutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2		<2	<2	<2
Monooctylzinn-Kation	µg/kg	3,1	3,9		<2	<2	<2
Diocetylzinn-Kation	µg/kg	<3	<3		<3	<3	<3
Tricyclohexylzinn-Kation	µg/kg	9,0	<4		<4	<4	<4
Triphenylzinn-Kation	µg/kg	<1	<1		<1	<1	<1
LAS		0,3	<0,2		<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	0,4
4-Nonylphenol	mg/kg	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1
4-Nonylphenol mono- + -diethoxylat	mg/kg	<2	<2		<2	<2	<2
DBT	µg/kg	<100	<100		<100	<100	<100
DnBT	µg/kg	<100	<100		<100	<100	<100
DEHP	µg/kg	108	96		<50	<50	<50
HHCB	µg/kg	<0,2	<0,2		<0,2	<0,2	<0,2
ATHC	µg/kg	0,35	0,31		<0,2	<0,2	<0,2

fett = die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte  
 fett und kursiv = die nicht mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte

Für die beiden mit Klärschlamm gedüngten Flächen HE-1-KS und HE-2-KS liegen keine Kontrollflächen vor. Vergleicht man die Ergebnisse jedoch beispielsweise mit den ebenfalls mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen HE-4-KS und HE-5-KS, so können erhöhte Gehalte an DEHP und ATHC festgestellt werden.

Bei Flächenvergleich 5 weisen die beiden mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen gegenüber der Kontrolle höhere Gehalte an einigen Metallen, an BaP und Summe PAHs, an MBT und LAS aus. Bei der Fläche HE-4-KS handelt es sich um eine Versuchsfläche der Universität Gießen. Diese weist erwartungsgemäß gegenüber der zweiten mit Klärschlamm beaufschlagten Fläche He-5-KS insbesondere für MOT, LAS und Summe PAKs, aber auch für einzelne Metalle, zum Teil deutlich höhere Gehalte auf.

Tabelle II.10: Flächencharakteristiken für Flächenvergleiche 6 und 7 (in Tabelle II.11)

<b>Standort-Kürzel</b>	<b>Düngung</b>	<b>Anbau</b>	<b>Boden</b>
<b>NDS-1-KS</b>	Klärschlamm: von 1994 bis 2004 (ohne 1996) jährlich 1,5 t/ha TM; Stallmist jährlich 10-15 t/ha; Gülle jährlich 3 t/ha	Mais	Sand
<b>NDS-3-KS</b>	Klärschlamm: angeblich ähnlich wie lfd. Nr. 18	Mais	Lehm/ Schluff
<b>NDS-2-St/Gü</b>	von 1994 bis 2004: Stallmist jährlich 10-15 t/ha; Gülle jährlich 3 t/ha	Mais	Sand
<b>NDS-4</b>	Kontrolle; jährlich Stallmist und Gülle	Getreide	Lehm/ Schluff
<b>NDS-5-KS</b>	Klärschlamm: 1999: 1 t/ha TM; 2000: 0,9 t/ha TM; 2002: 0,8 t/ha TM; 2003: 0,7 T/ha TM; Gülle: 2001: 1,2 t/ha TM; 2004: 1 t/ha TM	Raps, Weizen, Gerste	Sand
<b>NDS-6-Gü</b>	Kontrolle; Gülle: 2002 bis 2004: 1-1,4 t/ha TM	Weizen, Gerste	Sand

Tabelle II.11: Flächenvergleiche 6 und 7

Stoff	Fläche	NDS-1-KS	NDS-3-KS	NDS-2-St/Gü (Kontrolle, Stallmist, Gülle)	NDS-4 (Kontrolle)		NDS-5-KS	NDS-6-Gü (Kontrolle, Gülle)
Blei	mg/kg	13	13	<b>23</b>	12		14	15
Cadmium	mg/kg	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4		<0,4	0,5
Chrom	mg/kg	<10	<10	<10	<b>16</b>		14	13
Kupfer	mg/kg	<10	<10	<10	<10		<10	<10
Nickel	mg/kg	<10	<10	<10	<10		<10	<10
Quecksilber	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
Zink	mg/kg	<b>26</b>	21	17	23		22	<b>26</b>
Benzo[a]pyren	mg/kg	0,01	0,01	0,01	<b>0,04</b>		0,01	0,01
Σ PAK nach EPA	mg/kg	0,12	0,113	0,063	<b>0,647</b>		<b>0,153</b>	0,130
Σ PCB nach DIN	mg/kg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
Monobutylzinn-Kation	µg/kg	2,9	<2	<2	<2		<2	<2
Dibutylzinn-Kation	µg/kg	<5	<5	<5	<5		<5	<5
Tributylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2		<2	<2
Tetrabutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2		<2	<2
Monooctylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<b>6,7</b>	<2		<2	<2
Diocetylzinn-Kation	µg/kg	<3	<3	<b>13,6</b>	<3		<3	<3
Tricyclohexylzinn-Kation	µg/kg	<4	<4	<4	<4		<4	<4
Triphenylzinn-Kation	µg/kg	<1	<1	<1	<1		<1	<1
LAS		1,8	2,2	<b>3,4</b>	0,3		<b>0,7</b>	0,6
4-Nonylphenol	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
4-Nonylphenol mono- + -diethoxylat	mg/kg	<2	<2	<2	<2		<2	<2
DBT	µg/kg	<100	<100	<100	<100		<100	<100
DnBT	µg/kg	277	<100	153	<100		<100	<100
DEHP	µg/kg	<b>533</b>	190	<b>370</b>	130		86	<b>88</b>

fett = die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte  
 fett und kursiv = die nicht mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte

Beide Flächenvergleiche für die niedersächsischen Flächen weisen ein recht heterogenes Bild auf. Die Gehalte an Metallen unterscheiden sich zwischen den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen und den Kontrollflächen nur geringfügig voneinander. Im Flächenvergleich 6 zeigt eine der Kontrollflächen gegenüber der anderen Kontrollfläche und den mit Klärschlamm gedüngten Fläche erhöhte Gehalte and BaP und Summe PAHs. Dahingegen zeigt die Klärschlamm-Fläche beim Flächenvergleich 7 leicht erhöhte Gehalte an Summe PAHs im Vergleich zur nicht mit Klärschlamm gedüngten Flächen. Die MOT- und DOT-Gehalte liegen im Flächenvergleich 6 bei einer der Kontrollflächen oberhalb der Bestimmungsgrenze, während alle anderen OZV sowohl auf den mit Klärschlamm beaufschlagten Flächen als auch auf den Kontrollflächen unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen. LAS weist bei einer der Kontrollflächen (Flächenvergleich 6)

höhere Gehalte im Vergleich zu den anderen Flächen auf. DEHP zeigt sowohl bei einer mit Klärschlamm gedüngten Fläche als auch bei einer Kontrollfläche höhere Werte im Vergleich zu den anderen Flächen.

Tabelle II.12: Flächencharakteristiken für Flächenvergleiche 8 und 9 (in Tabelle II.13)

Standort-Kürzel	Düngung	Anbau	Boden
<b>NDS-7-KS</b>	Klärschlamm: 2000: 1,4 T/ha TM; 2001: 1,2 t/ha TM; 2002: 0,9 t/ha TM; 2003: 0,6 t/ha TM; 2004: 1 t/ha TM Rindergülle: 1994-1999: jährlich 60 m <sup>3</sup> /ha; 2000-2004: jährlich 16m <sup>3</sup> /ha	Silomais, Getreide	Sand
<b>NDS-8-Gü</b>	Kontrolle; Rindergülle: 1994 – 2004: jährlich 60 m <sup>3</sup> /ha	Grünland, Mais, Getreide	Sand
<b>NDS-9-KS</b>	Klärschlamm: 1980 – 1990: jährlich 267-314 m <sup>3</sup> /ha	Mais	Lehm/ Schluff
<b>NDS-10-St</b>	Kontrolle; Stallmist: 1986-1995 jährlich 76 – 142 t/ha; 1999: 19 t /ha	Phacelia	Lehm/ Schluff
<b>NDS-12-Gü</b>	Kontrolle; Gülle: 1987-1996: insgesamt 943 m <sup>3</sup> /ha Stallmist: 2001: 45 t/ha	Weizen, Zwischenfruchtbau	Lehm/ Schluff

Tabelle II.13: Flächenvergleiche 8 und 9

Fläche		NDS-7-KS	NDS-8-Gü (Kontrolle, Gülle)		NDS-9-KS	NDS-10-St (Kontrolle, Stallmist)	NDS-12-Gü (Kontrolle, Gülle)
Stoff							
Blei	mg/kg	<10	<10		<b>39</b>	30	26
Cadmium	mg/kg	<0,4	<0,4		<b>0,44</b>	<0,4	<0,4
Chrom	mg/kg	<10	<10		<b>27</b>	15	13
Kupfer	mg/kg	<10	<10		<b>33</b>	14	14
Nickel	mg/kg	<10	<10		<b>15</b>	<10	<10
Quecksilber	mg/kg	<0,1	<0,1		<b>0,71</b>	0,13	0,11
Zink	mg/kg	<b>18</b>	13		<b>167</b>	55	34
Benzo[a]pyren	mg/kg	<0,001	<b>0,003</b>		<b>0,067</b>	0,027	0,013
Σ PAK nach EPA	mg/kg	0,05	<b>0,077</b>		<b>0,59</b>	0,267	0,15
Σ PCB nach DIN	mg/kg	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
Monobutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2		<b>11</b>	5,9	<2
Dibutylzinn-Kation	µg/kg	<5	<5		<5	<5	<5
Tributylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2		<2	<2	<2
Tetrabutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2		<2	<2	<2
Monooctylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2		<2	<b>2,1</b>	<2
Dioctylzinn-Kation	µg/kg	<3	<3		<3	<3	<3
Tricyclohexylzinn-Kation	µg/kg	<4	<4		<4	<4	<4
Triphenylzinn-Kation	µg/kg	<1	<1		<1	<1	<1
LAS		1,7	<b>2,0</b>		1,4	<b>2,1</b>	0,5
4-Nonylphenol	mg/kg	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1
4-Nonylphenol mono- + -diethoxylat	mg/kg	<2	<2		<2	<2	<2
DBT	µg/kg	<100	<100		<100	<100	<100
DnBT	µg/kg	<100	<100		<100	<100	<100
DEHP	µg/kg	<b>93</b>	83		<b>175</b>	104	53
HHCB	µg/kg				<b>0,46</b>	<0,2	<0,2
ATHC	µg/kg				<b>1,35</b>	<0,2	<0,2

fett = die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte  
 fett und kursiv = die nicht mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte

Stoffgehalte im Rahmen des Flächenvergleichs 8 sind insgesamt niedrig; die Konzentrationen liegen sowohl für die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche als auch die Kontrollfläche häufig unterhalb der Bestimmungsgrenzen. BaP und Summe PAHs sowie LAS weisen bei der Kontrollfläche gegenüber der Klärschlammfläche höhere Gehalte auf. Der Gehalt von DEHP ist auf der mit Klärschlamm behandelten Fläche gegenüber der Kontrollfläche erhöht.

Im Rahmen des Flächenvergleichs 9 weisen die Metalle, BaP und Summe PAHs, DEHP sowie die polycyclischen Moschusverbindungen auf der mit Klärschlamm gedüngten Fläche gegenüber den Kontrollflächen höhere Gehalte auf.

Tabelle II.14: Flächencharakteristiken für Flächenvergleich 10 (in Tabelle II.15)

<b>Standort-Kürzel</b>	<b>Düngung</b>	<b>Anbau</b>	<b>Boden</b>
<b>NRW-2-KS</b>	Klärschlamm: 2001: 3,8 t/ha TM; 2004: 5 t/ha TM)	kein Bewuchs bei PN	Lehm/ Schluff
<b>NRW-3-KS</b>	Klärschlamm: 2002 4,9 t/ha TM	kein Bewuchs bei PN	Lehm/ Schluff
<b>NRW-4-KS</b>	Klärschlamm: 2002: 4,9 t/ha TM	kein Bewuchs bei PN	Lehm/ Schluff
<b>NRW-5-KS</b>	Klärschlamm: 2000: 4,8 t/ha TM; 2004: 5 t/ha TM	kein Bewuchs bei PN	Lehm/ Schluff
<b>NRW 1</b>	Kontrolle	kein Bewuchs bei PN	Lehm/ Schluff

Tabelle II.15:Flächen-bezogene Auswertung: Flächenvergleich 10

Fläche		NRW-2-KS	NRW-3-KS	NRW-4-KS	NRW-5-KS	NRW-1 (Kontrolle)
Stoff						
Blei	mg/kg	<b>33</b>	30	26	<b>37</b>	31
Cadmium	mg/kg	<0,4	0,47	<0,4	0,65	<0,4
Chrom	mg/kg	21	<b>28</b>	16	<b>35</b>	23
Kupfer	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10
Nickel	mg/kg	11	<10	<10	<10	<10
Quecksilber	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
Zink	mg/kg	59	<b>77</b>	41	<b>100</b>	52
Benzo[a]pyren	mg/kg	<b>0,04</b>	0,03	0,03	<b>0,17</b>	0,03
Σ PAK nach EPA	mg/kg	<b>0,35</b>	<b>0,29</b>	0,23	<b>1,35</b>	0,26
Σ PCB nach DIN	mg/kg	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Monobutylzinn-Kation	µg/kg	<b>3,5</b>	<b>25</b>	2,5	<b>4,6</b>	2,5
Dibutylzinn-Kation	µg/kg	<5	<5	<5	<5	<5
Tributylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2	<2
Tetrabutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<2	<2
Monooctylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2	<b>3,0</b>	<2
Diocetylzinn-Kation	µg/kg	<3	<3	<3	<3	<3
Tricyclohexylzinn-Kation	µg/kg	<4	<4	<4	<4	<4
Triphenylzinn-Kation	µg/kg	<1	<1	<1	<1	<1
LAS		<b>1,1</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>	<b>1,4</b>	0,6
4-Nonylphenol	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
4-Nonylphenol mono- + -diethoxylat	mg/kg	<2	<2	<2	<2	<2
DBT	µg/kg	<100	<100	<100	<100	<100
DnBT	µg/kg	<100	<100	<100	<100	<100
DEHP	µg/kg	122	133	98	130	<b>191</b>
HHCB	µg/kg	<b>2,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,32</b>	<b>1,2</b>	<0,2
ATHC	µg/kg	<b>1,48</b>	<b>0,22</b>	<b>0,76</b>	<b>1,14</b>	<0,2

fett = die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte  
 fett und kursiv = die nicht mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte

In Nordrhein-Westfalen standen für den Flächenvergleich vier mit Klärschlamm behandelte Flächen sowie eine Kontrollfläche zur Verfügung. Die Vergleichsergebnisse sind recht eindeutig: auf den Klärschlammflächen weisen die meisten Metalle, MBT und (für eine Fläche) MOT, LAS sowie die polycyclischen Moschusverbindungen erhöhte Gehalte gegenüber den nicht mit Klärschlamm behandelten Flächen auf. Die Gehalte von BaP und Summe PAHs sind im Vergleich zu Kontrolle höher oder identisch. Lediglich DEHP weist auf der nicht mit Klärschlamm behandelten Fläche höhere Gehalte auf.

Tabelle II.16: Flächencharakteristiken für Flächenvergleich 11 (in Tabelle II.17)

<b>Standort-Kürzel</b>	<b>Düngung</b>	<b>Anbau</b>	<b>Boden</b>
<b>BW-1-KS</b>	Klärschlamm: 1997: 21,5 t/ha TM	Sommergerste, Vorjahr Getreide	Lehm/ Schluff
<b>BW-2-KS</b>	Klärschlamm: 1993-2003: insgesamt 17t/ha TM Gülle und Stallmist: Menge unbekannt	Getreide	Lehm/ Schluff
<b>BW-3-St</b>	Kontrolle (Wiese), Stallmist	Grünland	Lehm/ Schluff

Für die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche BW-1-KS war keine direkte Kontrollfläche vorhanden; diese Fläche wird dennoch in den Vergleich mit BW-2-KS und Kontrollfläche BW-3-St einbezogen.

Tabelle II.17: Flächen-bezogene Auswertung: Flächenvergleich 11

Stoff	Fläche	BW-1-KS (keine direkte Kontrolle vorhanden)	BW-2-KS	BW-3-St (Kontrolle, Stallmist)
Blei	mg/kg	33	32	28
Cadmium	mg/kg	<b>1,37</b>	0,95	0,74
Chrom	mg/kg	<b>96</b>	<b>74</b>	55
Kupfer	mg/kg	<b>42</b>	<b>32</b>	20
Nickel	mg/kg	<b>87</b>	<b>57</b>	45
Quecksilber	mg/kg	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<0,1
Zink	mg/kg	<b>150</b>	<b>143</b>	120
Benzo[a]pyren	mg/kg	<b>0,567</b>	<b>0,373</b>	0,127
Σ PAK nach EPA	mg/kg	<b>6,993</b>	<b>4,96</b>	1,54
Σ PCB nach DIN	mg/kg	<0,001	<0,001	<0,001
Monobutylzinn-Kation	µg/kg	<b>7,8</b>	<2	<2
Dibutylzinn-Kation	µg/kg	<b>8,4</b>	<5	<5
Tributylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2
Tetrabutylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2
Monooctylzinn-Kation	µg/kg	<2	<2	<2
Diocetylzinn-Kation	µg/kg	<3	<3	<3
Tricyclohexylzinn-Kation	µg/kg	<4	<4	<4
Triphenylzinn-Kation	µg/kg	<1	<1	<1
LAS		0,6	<b>1,2</b>	0,5
4-Nonylphenol	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1
4-Nonylphenol mono- + -diethoxylat	mg/kg	<2	<2	<2
DBT	µg/kg	<100	<100	<100
DnBT	µg/kg	<100	<100	<100
DEHP	µg/kg	200	<b>220</b>	127
HHCB	µg/kg	<0,2	<b>0,31</b>	<0,2
ATHC	µg/kg	<0,2	<b>0,38</b>	<0,2

fett = die mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte  
 fett und kursiv = die nicht mit Klärschlamm beaufschlagte Fläche zeigt höhere Kontaminanten-Gehalte

Der Flächenvergleich zeigt auf den Klärschlammflächen für die Metalle, für BaP und Summe PAHs, für MBT und DBT, für LAS und DEHP (jeweils nur eine der Flächen) sowie für die polycyclischen Moschusverbindungen erhöhte Gehalte gegenüber der Kontrollfläche.

### II.3.2.2 Schlussfolgerungen zur Flächen-bezogenen Auswertung

Um Schlussfolgerungen hinsichtlich eines „Fingerprints“ typischer Schadstoffe in mit Klärschlamm beaufschlagten Böden ziehen zu können, wird eine Verallgemeinerung der oben dargestellten Ergebnisse durchgeführt. Dazu werden die Schadstoffe identifiziert, die in der Mehrzahl der betrachteten Flächenvergleiche auf den Klärschlammflächen in höheren Gehalten im Vergleich zu den Kontrollflächen auftraten. Dies wird zur Verbesserung der Übersicht tabellarisch dargestellt. Eine weitere Spalte identifiziert die Schadstoffe, bei denen entweder der Gehalt in der Kontrollfläche höher oder vergleichbar zur mit Klärschlamm applizierten Fläche war.

Tabelle II.18: Flächen-bezogene Auswertung: organische Schadstoffe

Stoff	in der Mehrzahl der betrachteten Flächenvergleiche: Gehalt KS > Kontrolle	in der Mehrzahl der betrachteten Flächenvergleiche: Gehalt Kontrolle $\approx$ KS
B(a)P/ $\Sigma$ PAK nach EPA		X
<b>Mono- und Dibutylzinn-Kation</b>	X	
Monooctylzinn-Kation		X
Dioctylzinn-Kation		X
LAS		X
Phthalate		X
<b>Moschusverbindungen</b>	X	

Berücksichtigt man die Zielvorgabe der Flächenauswahl sowie die Charakteristik der untersuchten Stoffe, dann können die Aussagen dieser Gegenüberstellung plausibel erläutert werden.

Ziel der Flächenauswahl war der Vergleich von mit Klärschlamm gedüngten Flächen mit anderen landwirtschaftlichen Nutzflächen in räumlicher Nähe. Diese anderen landwirtschaftlich genutzten Flächen, die als Kontrollflächen bezeichnet werden, können mit Gülle oder Stallmist gedüngt worden sein; mit zusätzlichem Mineraldünger wurden alle Flächen versehen. Betrachtet man die Kontaminatengehalte verschiedener SERO-Dünger und vorliegende Vorsorge- bzw.  $PNEC_{\text{Boden}}$ -Werte, wird folgendes in Bezug auf die organischen Kontaminanten deutlich:

- Die Gehalte an ubiquitär vorkommenden Kontaminanten wie PCBs liegen in Klärschlämmen nicht wesentlich über den für Böden abgeleiteten Vorsorgewerten, die für PAKs im Mittelwert doppelt so hoch wie die Vorsorgewerte nach BBodSchV. Für PCB wurden keine erhöhten Gehalte im Boden bei den mit Klärschlamm gedüngten Flächen gefunden, für PAK teilweise höhere Gehalte als bei den Kontrollflächen.
- Die Gehalte von im Boden abbaubaren Stoffen unterscheiden sich im Gegensatz zu den Stoffgehalten der Klärschlämme (siehe Tabelle II. 19) nicht signifikant voneinander, da nur in einem Fall die Probenahme relativ zeitnah nach der Klärschlamm-Ausbringung erfolgen konnte. Die Kontaminanten waren also bereits abgebaut. Dies betrifft die Detergentien LAS und NP/NPEO sowie die Phthalate

- Als im Boden nach Düngung mit Klärschlamm nachweisbare Stoffe konnten nur persistente Kontaminanten identifiziert werden, die bisher nicht ubiquitär in Böden verteilt sind. Dies sind die Projekt bestätigten Stoffe aus den Gruppen der Zinnorganika und Moschusverbindungen.

Zur Verdeutlichung der Aussagen werden Stoffgehalte und Referenzwerte wie folgt gegenübergestellt:

Tabelle II.19: Stoffgehalte in SERO-Düngern und Referenzwerte

Parameter	Stoffgehalte in SERO-Düngern (mg/kg TM)						Referenzwerte (mg/kg TM)		
	Mineraldünger	Gülle	Kompost	Gärrückstände	Klärschlamm Mittelwert	Klärschlamm Maximum	Vorsorge-wert Boden	PNEC <sub>Boden</sub>	EU-Vor-schlag für KS*-Grenz-wert
PCB	0,001	0,004	0,02	0,01	0,05	0,1	0,05		0,8
PAK (EPA)	0,26	0,20	3,01	1,43	5,5	16,0	3,0		6,0
NP/NPEO	0,03	0,17	0,03	4,77	17,0	35,0		0,43	50
LAS	138	164	42	877	1390	2290		4,6	2600
Galaxolid, Tonalid					12,8 4,0	17,1 5,3		0,31 0,31	
DEHP	0,86	1,79	30,1	29,7	27,0	56,0		10,0	100
DBP	0,05	0,07	0,20	0,81	0,25	0,69		2,0	
OZV	< BG	0,21	0,13	0,43	0,7	1,95		0,008	
MKW	0,5	k.A.**	0,5	4,6	3816	6986			

\* KS = Klärschlamm

\*\* k.A. = keine Angabe

### II.3.2.3 Zusammenfassung: Flächenbezogene Auswertung

Neben der Chemikalien-bezogenen Auswertung ist eine Flächen-bezogene Auswertung sinnvoll mit dem Ziel, Kontaminanten im Sinne eines „Fingerprints“ zu identifizieren, die typisch für Klärschlammapplikationen sind. Beprobt wurden insgesamt 32 verschiedene Flächen. Dabei handelte es sich um mit Klärschlamm gedüngte Flächen mit verschiedenem Anbau sowie entsprechende Kontrollflächen ohne Klärschlammaufbringung, jedoch mit anderen Düngevarianten. Kontrollflächen im strengen Sinn, das heißt Flächen komplett ohne Düngeraufbringung, standen nicht zur Verfügung. Die gewählten Kontrollflächen zeichneten sich durch räumliche Nähe zur mit Klärschlamm gedüngten Fläche sowie durch vergleichbare Bodeneigenschaften aus, wurden jedoch mit Gülle und Stallmist beaufschlagt.

Auf diese Weise ließen sich „Cluster“ bilden, die Flächenvergleiche ermöglichten.

Aus der Auswertung und Gegenüberstellung ging hervor, dass

- Mono- und Dibutyzzinn-Kation
- polycyclische Moschusverbindungen

typischerweise in den Böden nachgewiesen werden, die mit Klärschlamm beaufschlagt sind. Bei allen anderen untersuchten Schadstoffen dürfte die konkrete Herkunft des Düngers und weniger der Dünger-Typ das Schadstoffspektrum bestimmen. Sie sollten von daher nicht als „Fingerprint“-Chemikalien angesehen werden.

Aussagen zu typischen „Fingerprint“-Chemikalien aus anderen SERO-Düngern lassen sich in dieser flächenbezogenen, auf experimentellen Vorhabensdaten beruhenden Auswertung nicht treffen, da nicht systematisch Flächen untersucht wurden, die beispielsweise mit Komposten oder Gärrückständen beaufschlagt worden sind. Ausgehend von den oben in den SERO-Düngern angegebenen Stoffgehalten und unter Berücksichtigung der Abbaubarkeit der Chemikalien liegt die Vermutung nahe, dass Organozinverbindungen auch hier eine Rolle spielen dürften.

## **II.4 Zusammenfassung: Schadstofffrachten und resultierende typische Konzentrationen in landwirtschaftlichen Böden unter verschiedenen Düngerregimen**

### **Frachten (an)organischer Schadstoffe bei verschiedenen Düngemittelanwendungen**

Unter Berücksichtigung der Düngeregime sowie der in den verschiedenen Düngemitteln gemessenen Schadstoffkonzentrationen (Basis: Tabellen I.3 und I.4) können Frachten (an)organischer Chemikalien abgeschätzt werden. Diese Frachten sollten sich in den Chemikalienkonzentrationen in den landwirtschaftlichen Böden unter den verschiedenen Düngeregimen widerspiegeln. Eine detaillierte Frachtenermittlung ist jedoch nicht Gegenstand dieses Vorhabens, sondern wurde in der UBA-Studie „Vergleichende Betrachtung von Stoffeinträgen über verschiedene Eintragspfade“ durchgeführt.

### **Gehalte von Schadstoffen in landwirtschaftlichen Böden unter verschiedenen Düngeregimen**

Für die Auswertung sind grundsätzlich zwei Ansätze möglich: Zum einen kann eine Chemikalien-bezogene Auswertung durchgeführt werden. Diese kann beispielsweise zum Ziel haben, mittlere und maximale Konzentrationen der betreffenden Chemikalie auf der Gesamtheit der untersuchten Flächen zu bestimmen und diese Konzentrationen wiederum Triggerwerten gegenüber zu stellen.

Daneben kann die Auswertung Flächen-bezogen erfolgen, das heißt durch Vergleich von mit und ohne Klärschlamm gedüngten Flächen. Hierbei sollten sich die verschiedenen Stofffrachten (s.o.) in den entsprechenden Schadstoffkonzentrationen in den landwirtschaftlichen Böden unter unterschiedlichen Düngeregimen widerspiegeln. Weiterhin sollten sich im Sinne eines „Fingerprints“ diejenigen Chemikalien identifizieren lassen, die für die verschiedenen Düngemittel, hier Klärschlamm, über die sie eingetragen werden, typisch sind. Diese Stoffe könnten dann als Indikatorsubstanzen angesehen werden.

### **Chemikalien-bezogene Aussagen**

Generell lässt sich für die analysierten Metalle und ihre Verbindungen aussagen, dass die Boden-Beaufschlagungen mit Klärschlämmen in einigen Fällen zu einer geringfügigen Erhöhung der Mittelwerte gegenüber den größtenteils mit Wirtschaftsdüngern beaufschlagten Kontrollflächen geführt haben. Entsprechend den Ergebnissen der Stoffgehaltsermittlung in Kapitel I können Wirtschaftsdünger durchaus auch hohe Gehalte an Schwermetallen enthalten, insbesondere Kupfer und Zink. Die Bodenbeaufschlagungen mit Klärschlamm führten bisher nur in Bezug auf vereinzelte Maximalwerte zu einer solchen Erhöhung der Stoffgehalte, dass Belastungen oberhalb der Vorsorgewerte entstanden. Bei den beobachteten Überschreitungen der Vorsorgewerte handelte es sich meistens um eine Fläche, die offenbar mit relativ hoch kontaminiertem Klärschlamm beaufschlagt worden war.

Aus dem analysierten Stoffspektrum konnten für die Verbindungen Benzo(a)pyren,  $\Sigma$  PAK nach EPA, Organozinnverbindungen und Moschusverbindungen Anreicherungen nach Klärschlamm-Aufbringung gefunden werden. Die gefundenen Maximalwerte für Benzo(a)pyren und  $\Sigma$  PAK nach EPA liegen oberhalb der Vorsorgewerte der BBodSchV. Damit führt die Klärschlamm-Aufbringung nachweislich zu einer Anreicherung dieser organischen Schadstoffe im Boden, wenngleich größtenteils auf niedrigem Niveau. Bezieht man die Persistenz einer Kontaminanten als wesentliches Element in die Beurteilung mit ein, so wird deutlich, dass das Anreicherungspotential eines Stoffes in Böden zur entscheidenden Größe wird. Nur eine Persistenz der in den Böden nachgewiesenen Organika kann zu einer signifikanten Anreicherung bei wiederholter Applikation führen. Bei den im Vorhaben erhobenen Daten wird dies am Beispiel der Moschusverbindungen deutlich. Bei einer Nutzung von Bioabfällen und Klärschlämmen als Sekundärrohstoffdünger sollte demnach die Persistenz von mengenmäßig wichtigen Stoffen, die über den jeweiligen Pfad (z.B. Kläranlage) entsorgt werden, getestet und in die Betrachtung einbezogen werden.

### **Flächen-bezogene Aussagen**

Neben der Chemikalien-bezogenen Auswertung ist eine Flächen-bezogene Auswertung sinnvoll mit dem Ziel, Kontaminanten im Sinne eines „Fingerprints“ zu identifizieren, die typisch für das jeweilige Düngemittel sind. Beprobte wurden insgesamt 32 verschiedene Flächen. Dabei handelte es sich um mit Klärschlamm gedüngte Flächen mit verschiedenem Anbau sowie entsprechende Kontrollflächen ohne Klärschlammaufbringung, jedoch mit anderen Düngevarianten. Kontrollflächen im strengen Sinn, das heißt Flächen komplett ohne Düngeaufbringung, standen nicht zur Verfügung. Die gewählten Kontrollflächen zeichneten sich durch räumliche Nähe zur mit Klärschlamm gedüngten Fläche sowie durch vergleichbare Bodeneigenschaften aus. Mit diesem Versuchsdesign lassen sich solche Chemikalien identifizieren, die typischerweise über den Klärschlamm auf die landwirtschaftlich genutzten Böden gelangen und dort nachgewiesen werden können.

Aus der Auswertung und Gegenüberstellung ging hervor, dass

Mono- und Dibutyzzinn-Kation und polycyclische Moschusverbindungen typischerweise in den Böden nachgewiesen werden, die mit Klärschlamm beaufschlagt sind.
---

Bei allen anderen untersuchten Schadstoffen dürfte die konkrete Herkunft des Klärschlammes und weniger der Dünger-Typ das Schadstoffspektrum bestimmen bzw. die eingebrachten Schadstoffe sind im Boden gut abbaubar. Sie sollten von daher nicht als „Fingerprint“-Chemikalien angesehen werden.

Diese Aussage deckt sich indirekt – so man die Abbaubarkeit von organischen Chemikalien in Böden berücksichtigt – mit der Aussage zu den Schadstofffrachten, die über die verschiedenen Dünger in die landwirtschaftlichen Böden eingebracht werden.

Da die organischen Schadstoffe, die in hohen Mengen in den verschiedenen Düngern vorliegen (LAS, NP + NPEOs, Phthalate) im Boden relativ leicht abbaubar sind, werden sie nicht oder nur in sehr geringen Mengen in den landwirtschaftlichen Böden nach Düngerapplikation nachgewiesen. OZVs – aber auch polycyclische Moschusverbindungen, die in den Düngern nicht analysiert worden waren – sind in Böden soweit stabil, dass sie als „Fingerprint“-Chemikalien für Klärschlamm-applizierte Böden und (darüber hinaus auch die OZVs für mit anderen SERO-Düngern gedüngte Böden) geeignet sind.

### III. Literaturverzeichnis

- Abdel-Haleem, A.S., Sroor, A., El Bahi, S.M., Zohny, E. (2001) Heavy metals and rare earth elements in phosphate fertilizer components using instrumental neutron activation analysis. *Applied Radiation and Isotopes* 55 (4), 569-573.
- AgroTop (2002) Klärschlamm. <http://home.t-online.de/home/Agrotop-/dlink.html>? 8-11-2002.
- Aichberger, K., Tauber, K. (1996) Vergleich der Stoffgehalte von Naß- und Preßschlamm und der daraus resultierenden Frachten beim Einsatz in der Landwirtschaft. In: *Sekundärrohstoffe im Stoffkreislauf der Landwirtschaft*. 108. VDLUFA-Kongress in Trier vom 16. bis 21. September 1996. VDLUFA-Schriftenreihe 44, 265-268. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Alcock, R.E. et al.: Persistence and fate of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sewage sludge-amended agricultural soils. *Environmental Pollution* 93 (1), 83-92 (1996)
- Alvarez-Munoz, D., Sáez, M., Lara-Martín, P. A., Gómez-Parra, A., González-Mazo, E. (2004): New extraction method for the analysis of linear alkylbenzene sulfonates in marine organisms. Pressurized liquid extraction versus Soxhlet extraction. *J. of Chrom A* 1052, 33-38
- Aly, M.M., Mohammed, N.A., 1999. Recovery of lanthanides from Abu Tartur phosphate rock, Egypt 18. *Hydrometallurgy* 52 (2), 199-206.
- Amlinger et al. (2004) Heavy metals and organic compounds from wastes used as organic fertilizers. Final report – July 2004.
- Anders, L., Bertz, M. (1995) Eine Auswertung von Untersuchungen der LUFA Potsdam: Klärschlamm - Dünger oder Schadstoff? *Neue Landwirtschaft* [6], 40-42.
- Asche, N., Nolte, N. (1997) Waldkalkung mit Asche. *AFZ/Der Wald: allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 52[1], 16-18.
- Autorenkollektiv (2001) Untersuchungen zur Kompostqualität im Land Brandenburg. *Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg* [65], 1-77.
- Bannick, C.G. et al.: Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden, UBA-Texte 59/01, Berlin. Oktober 2001
- Bartels, R. und Scheffer B.: Langzeituntersuchungen des Verhaltens von Schadstoffen im Boden am Beispiel der Anwendung von Siedlungsabfällen, Teilvorhaben 1, Niedersächs. Landesamt für Bodenforschung, Bodentechnologisches Institut Bremen (1993)
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2003). Auszug Klärschlammbericht Bayern 2001 und Sonderuntersuchungen. Schriftliche Mitteilung.
- Berrer, T., Krieglstein, B. (1996) Verwertung und Lagerung von Obstrestern auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. *Flüssiges Obst: Fachzeitschrift der Fruchtsaft-, Gemüsesaft- und Fruchtwine-Schönborn Flüssiges Obst GmbH* 63[6], 311-312.
- Berset, J.D. et al.: organic micropollutants in swiss agriculture: distribution of PAH and PCB in soil, liquid manure, sewage sludge and compost samples; a comparative study. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 59, 145-165 (1995)
- Berti, W.R. et al.: Heavy metals in the environment. Distribution of trace elements in soil from repeated sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.* 27, 1280-1286 (1998)
- Bischoff, R.: Langzeituntersuchungen des Verhaltens von Schadstoffen im Boden am Beispiel der Anwendung von Siedlungsabfällen, Teilvorhaben 2, Lufa Speyer (1993)

- Bittl, Th. (2002) Schadstoffgehalte in Grüngutkomposten. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Ed.) Abfallvermeidung und -verwertung bei der Landschafts- und Gartenpflege. Fachtagung in Augsburg am 01./02. Oktober 2002, pp. 31-38.
- BL-AG Dioxine, Dioxine-Daten aus Deutschland, Daten zur Dioxin-Belastung der Umwelt und Dioxin-Referenzmessprogramm, 3. und 4. Bericht der BL-AG Dioxine (2002)
- Bödeker, H., Schlaak, M., Siefert, E., Vries, J.D. (1994) Elution von Schwermetallen aus Biomüll und Kompost durch schwache organische Säuren. Müll und Abfall 26[12], 816-827.
- Bodenuntersuchungsinstitut Koldingen (2003) Datenbankauszug. Schriftliche Mitteilung.
- Boguslawski, von, E.: Langzeituntersuchungen des Verhaltens von Schadstoffen im Boden am Beispiel der Anwendung von Siedlungsabfällen, Teilvorhaben 4, Universität Gießen (1993)
- Boisch, A.: Auswirkung der Biokompostanwendung auf Boden, Pflanzen und Sickerwasser an sechs Ackerstandorten in Norddeutschland, Dissertation (1997)
- Boysen, P. (1992) Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln - Literaturschau und Analysen. [55/92], 1-54. Berlin. UBA-Texte. Umweltbundesamt.
- Boysen, P. (2002) Ergebnisse der Klärschlammuntersuchungen gemäß AbfKlärV von 2001 in Schleswig-Holstein. Schriftliche Mitteilung.
- Boysen, P. (2002) Untersuchungsreihe über die Belastung von Klärschlämmen und Abwässern aus Schleswig-Holstein. (1-44 pp.). Schriftliche Mitteilung.
- Brandt, K.K., Krogh, P.H., Cassani, G., Sorensen, J. (2000) Does LAS affect the soil ecosystem in sludge-amended soil? Results from a field trial with well defined strings of LAS-amended sludge in soil. CESIO - Comité Européen des Agents de Surface et leurs Intermédiaires Organiques; Federchimica Assobasse - P.I.T.I.O. (Ed.) 5th World Surfactants Congress, May 29 - June 2, 2000, Fortezza da Basso, Firenze, pp. 1590-1597.
- Brigden, K., Stringer, R., Santillo, D. (2002) Heavy metal and radionuclide contamination of fertilizer products and phosphogypsum waste produced by the Lebanese Chemical Company, Lebanon. Greenpeace Research Laboratories. Technical Note 13/2002.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Ed.) (1991) Schwermetalle und Fluor in Mineräldüngern. Bericht Nr. 162 (1-44 pp.). Bern.
- Bursch, W. et al.: Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Niederösterreich. Erhebung und Bewertung des Gefährdungspotentials ausgewählter organischer Schadstoffe in Böden und Klärschlämmen. Wpa - Beratende Ingenieure. Wien Dezember 2001
- Bursch, W., Fürhacker, M., Pollak, M. (2001) Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Niederösterreich - Erhebung und Bewertung des Gefährdungspotenzials ausgewählter organischer Schadstoffe in Böden und Klärschlämmen. wpa - Beratende Ingenieure GmbH (1-50 pp.).
- Canet, R., Pomares, F., Tarazona, F. (1997) Chemical extractability and availability of heavy metals after seven years application of organic wastes to a citrus soil. Soil Use and Management 13 (3), 117-121.
- Carlsen, L., Metzger, M.-B., Kjelsmark, J. (2002) Linear alkylbenzene sulfonates (LAS) in the terrestrial environment. The Science of the Total Environment 290[1-3], 225-230.
- Cavalli, L. et al.: Surfactants in sludge-amended soil. The CLER Review, Vol 5 (1), 4 - 13 (1999)
- Charter, R.A., Tabatabai, M.A., Schafer, J.W. (1993) Metal contents of fertilizers marketed in Iowa. Communications in Soil Science and Plant Analysis 24, 961-972.

- Charter,R.A., Tabatabai,M.A., Schafer,J.W. (1995) Arsenic, molybdenum, selenium, and tungsten contents of fertilizers and phosphate rocks. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26 (17-18), 3051-3062.
- Crößmann,G. (1995) Klärschlämme aus Kleinkläranlagen landwirtschaftlicher Betriebe und deren Bewertung nach der Klärschlammverordnung (AbfKlärV). In: Grünland als Produktionsstandort und Landschaftselement. Kongressband zum 107. VDLUFA-Kongress vom 18.-23. September 1995 in Garmisch-Partenkirchen, VDLUFA-Schriftenreihe 40, 337-340. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Danish Environmental Protection Agency (1997): Standard method for Determination of environmental contaminants in sludge- PAH, DEHP, NPE and LAS.
- De Simone,C., Tomati,U., Galli,E., Owczarek,M., De Marco,A., D'Ambrosio,C., Alianiello,F., Cortellini,L. (2000) Evaluation of toxic and genotoxic activity of some composts from different origin. *Fresenius Environmental Bulletin* 9 (9-10), 683-690.
- Diercxsens, P. and J. Tarradellas: Soil contamination by some organic micropollutants related to sewage sludge spreading. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 28, 143-159 (1987)
- Diez,T., Krauss,M. (1994) Landwirtschaftliche Verwertung von Bioabfallkompost - Schadstoff- und Nährstoffproblematik. *Schule und Beratung* [4/94], 9-11.
- Diez,T., Müller,C. (1997) Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) Teil II, Stoffeinträge, Stoffausträge, Schwermetall-Bilanzierung verschiedener Betriebstypen Freising-München. *Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP)* [5/97].
- Döhler,H. (1994) Schriftliche Mitteilung. Zitiert nach: Wilcke, W., Döhler, H. (1995)
- Döhler,H., Schultheiß,U., Eckel,H., Roth,U. (2002) Schwermetallgehalte von Wirtschaftsdüngern in Deutschland und der EU. *Wasser und Boden* 54[6], 4-9.
- Dreher, P. et al.: Schadstoffe in klärschlammgedüngten Ackerböden Baden-Württembergs. *Bodenschutz* 14, LfU Baden-Württemberg (Hrsg.) (2003)
- Düring, R.-A. und S. Gäth: Organische Siedlungsabfälle auf differenziert bearbeiteten Böden - Verhalten organischer Schadstoffe -. In: *Mitteilungen der DBG*, Band 91, Heft 3, 1193-1196 (1999)
- Ebertseder,Th. (1993) Qualität von Bioabfallkomposten und Anwendung in der Landwirtschaft - aktuelle Versuchsergebnisse. pp. 79-89.
- Ebertseder,Th. (1995) Grundlagen der landwirtschaftlichen Kompostverwertung. In: *Komposte in der Landwirtschaft*. Darmstadt, pp. 87-91.
- Eckel et al. (2005) *KTBL-Schrift 432: Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems*
- Eissa, E.A., Rofail,N.B., Ali,R.A., Hassan,A.M. (1996) Investigation of an Egyptian phosphate ore sample by neutron activation analysis technique. *Radiation Physics and Chemistry* 47[5], 705-708.
- El Arabi, A.E.M., Khalifa,I.H. (2002) Application of multivariate statistical analyses in the interpretation of geochemical behaviour of uranium in phosphatic rocks in the Red Sea, Nile Valley and Western Desert, Egypt. *Journal of Environmental Radioactivity* 61 (2), 169-190.
- El Bahi, S.M., El Dine,N.W., El Shershaby,A., Sroor,A. (2004) Elemental analysis of Egyptian phosphate fertilizer components. *Health Physics* 86 (3), 303-307.
- El Ghawi,U., Patzay,G., Vajda,N., Bodizs,D. (1999) Analysis of selected fertilizers imported to Libya for major, minor, trace and toxic elements using ICP-OES and INAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 242 (3), 693-701.

- Ellinghaus, R. (1990) Schwermetalle in Böden und Komposten aus hessischen Kleingärten. In: VDLUFA-Kongressband 1990, VDLUFA-Schriftenreihe 32, 769-775. Darmstadt, VDLUFA-Verlag.
- Entsorgungsverband Saar (2001) Grenzwerte für "neue" organische Schadstoffe - Untersuchungen zur Risikoabschätzung (Prüfbericht).
- Fehrenbach, H. (2001) Ökobilanzielle Betrachtung der Klärschlammverwertung. In: Thomé-Kozmiensky, K.J., (Ed.), Verantwortungsbewusste Klärschlammverwertung. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, pp. 261-281
- Figge, K. et al.: LAS and the application of sewage sludge in agriculture. *Tenside Surfactants Detergents* 26, 122-128 (1989)
- Fischer, P., Jauch, M. (1991) Schwermetallgehalte von Grüngutkomposten. *Müll und Abfall* 23[6], 357-365.
- Fleckenstein, J., Haneklaus, S., Schnug, E. (1998) Phosphordüngung mit Klärschlammaschen im Gefäßversuch. In: VDLUFA Kongressband 1998, 111-114. Darmstadt, VDLUFA-Verlag.
- Förstner, U., van Raaij, E., Bruhn, G. (1996) Kompostanwendung. Qualitätsverbesserung/ Schadstoffabbau/ Analytik. *Neue Techniken der Kompostierung Teil 6 und 12.* (1-83 pp.). Umweltbundesamt Fachgebiet III 3.6 Projektträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung (PT AWAS).
- Fricke, K., Nießen, H., Vogtmann, H., Hangen, H.O. (1991) Die Bioabfallsammlung und -kompostierung in der Bundesrepublik Deutschland - Situationsanalyse 1991. *Schriftenreihe des Arbeitskreises für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen (ANS) e.V.* [20], 1-205.
- Friedrich, H., Fragemann, H.-J. (2004) Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen Teil D: Organische Schadstoffe in Klärschlämmen aus der kommunalen Abwasserbehandlung. *Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW.* (1-151 pp.). Düsseldorf.
- Frieß, H. (1999) Aschequalität von Biomasse-Heizkraftwerken - Ausbringung in der Land- und Forstwirtschaft. <http://www.bayern.de/LFU/luft/aschequal/aschequal.html> . 21-7-2004.
- Gabe, U., Rodella, A.A. (1999) Trace elements in Brazilian agricultural limestones and mineral fertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30 (5-6), 605-620.
- Gangl, M., Sattelberger, R., Scharf, S., Kreuzinger, N. (2001) Hormonell wirksame Substanzen in Klärschlämmen. *Umweltbundesamt Wien.* [136], 1-73. Wien.
- Gäth, S. et al.: Anwendung organischer Abfälle auf differenziert bearbeitete Böden - Auswirkungen auf den Haushalt ausgewählter Schwermetalle. In: *Mitteilungen der DBG, Band 96, Heft 2, 607-608* (2001)
- Gäth, S.: Verhalten ausgewählter Schwermetalle im Boden nach langjähriger Anwendung von Müllkompost als Grundlage für die Entwicklung einer nachhaltigen Verwertung von Bioabfällen. *Z.f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 39, 75-80 (1998)
- Gejlsbjerg, B. et al.: Mineralisation of organic contaminants in sludge-soil mixtures. *The CLER Review, Vol 7 (1), 4 - 16* (2002)
- Genevini, P.L., Adani, F., Borio, D., Tambone, F., Pinamonti, F., Stringari, G., Gasperi, F., Zorzi, G. (1997) Heavy metal content in selected European commercial composts. The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Compost Science & Utilization* 5 (4), 31-39.
- Gesellschaft für die Aufbereitung und Verwertung von Reststoffen mbH (GFR) (2003) Analysendaten von Mineräldüngern aus industriellen Nebenprodukten. *Schriftliche Mitteilung.*

- Godinez, M.D., Iturbe, J.L., Ordonez, E., Solache Rios, M. (1997) Determination of radium-226 in phosphate fertilizers and gypsum by gamma-ray spectrometry. *International Journal of Environment and Pollution* 8 (1-2), 195-200.
- Gräper, G. (1995) Untersuchungen von Schwermetallgehalten in Rinder- und Schweinegülle. Diss. Fachhochschule Osnabrück.
- Greenway, G.M., Song, Q.J. (2002) Heavy metal speciation in the composting process. *Journal of Environmental Monitoring* 4 (2), 300-305.
- Gsponer, R. (1990) Rohdaten zu Schwermetalle in Düngemitteln: Ein Diskussionsbeitrag. Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich.
- Gunreben, M. (2000) Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Niedersachsen. Ein Beitrag zur umweltgerechten Stoffstrombewirtschaftung. Endbericht. 1[10]. Hildesheim. Nachhaltiges Niedersachsen - Dauerhaft umweltgerechte Entwicklung. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Gutser, R., Prinz, S. (1987) Müllkomposte aus getrennter Sammlung. *Deutscher Gartenbau* 41[18], 1099-1103.
- Guzman, E.T.R., Rios, M.S., Garcia, J.L.I., Regil, E.O. (1995) Uranium in phosphate rock and derivatives. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry-Articles* 189 (2), 301-306.
- Hackenberg, S., Wegener, H.-R. (1998) Schwermetallgehalte von Inputmaterialien zur Herstellung von Biokompost. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landesentwicklung* 39[2], 60-63.
- Hamamo, H., Landsberger, S., Harbottle, G., Panno, S. (1995) Studies of radioactivity and heavy metals in phosphate fertilizer. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry-Articles* 194 (2), 331-336.
- Hand, V.C., Glenwood, K.V. 1987. Structure Activity Relationships for Sorption of Linear Alkylbenzenesulfonates. *Environ. Sci. Technol.* 21(3): 370-373.
- Hartmann, E. et al.: Untersuchungen von Klärschlamm auf ausgewählte Schadstoffe und ihr Verhalten bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung, UBA-Abschlußbericht (UFO-Plan Nr.: 298 33 757), Dezember 2001
- Hartmann, E.; Schneider, J. und A. Wenzel: Schadstoffe in klärschlammgedüngten Ackerböden Baden-Württembergs, LfU (Hrsg.), Karlsruhe 2003
- Hayumbu, P., Haselberger, N., Markowicz, A. (1995) Analysis of rock phosphates by X-ray-fluorescence spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* 46[10], 1003-1005.
- Heiland, K. (1986) Spurenelementuntersuchungen von Rohphosphaten verschiedener Lagerstätten und industriell bearbeiteten Rohphosphaten mittels der instrumentellen Neutronenaktivierungsanalyse. Diss. 1-122. Fachbereich Chemie, Universität Hamburg.
- Henning, K., Gerth, H., Kruse, H. (1995) Klärschlamm im Landbau - Position der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein. *Betriebswirtschaftliche Mitteilungen* [478], 1-49. Kiel.
- Herrmann, R., Vorkamp, K., Taube, J. (1999) Verhalten von Pestiziden während der kombinierten anaerob-aeroben Bioabfallbehandlung. Endbericht BAYFORREST Forschungsvorhaben 82 (Bayerischer Forschungsverbund Abfallforschung und Reststoffverwertung). (1-219 pp.).
- Holzner, H. (1999) Die Verwendung von Holzaschen aus Biomassefeuerungen zur Düngung von Acker- und Grünland. Diss. 1-109. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität für Bodenkultur, Wien.

- Holzwarth, F. et al.: Bundes-Bodenschutzgesetz / Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Handkommentar. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, ESV Erich Schmidt Verlag, Berlin (2000), ISBN 3 503 05823 0
- Honsel,U., Janßen,E., Schaumberg,G. (1995) Schwermetalle in Düngemitteln. VDLUFA- Kongressband 1995, VDLUFA-Schriftenreihe 40, 757-760. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Humintech (2004) Perlhumus - Granulierte Humusstoffe für Boden und Pflanze.  
<http://www.humintech.com/049/agriculture/products/perlhumus.html>. 16-7-2004.
- Jensen, J. 1999. Fate and Effects of Linear Alkylbenzene Sulphonates (LAS) in the Terrestrial Environment. *Sci. Total Environ.* 226(2-3): 93-111.
- Jobst,H. (1995) Chlorphenole und Nonylphenole in Klärschlämmen. Teil I: Vorkommen in Klärschlämmen westdeutscher Kläranlagen aus den Jahren 1987 bis 1989. *Acta hydrochimica et hydrobiologica* 23[1], 20-25.
- Jobst,H. (1998) Chlorphenole und Nonylphenole in Klärschlämmen. Teil II: Hat die Belastung mit Pentachlorphenol und Nonylphenolen abgenommen? *Acta hydrochimica et hydrobiologica* 26[6], 344-348.
- Kaiser, T. et al: Evaluierung des Gefährdungspotentials bisher wenig beachteter Stoffeinträge in Böden, UBA-Texte 60/98
- Kampe, W. et al.: Potentielle organische Schadstoffe in Böden und Pflanzen nach intensiver Klärschlammanwendung. VDLUFA Schriftenreihe 23, Kongreßband 1987, 507-532
- Kehres,B. (2002) Überblick: Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Kompost. In: Hösel,G., Bilitewski,B., Schenkel,W., Schnurer,H., (Eds.), Müll-Handbuch. Erich Schmidt Verlag, Berlin Bielefeld München.
- Keller,T., Desales,A. (1997) Flächenbezogene Bodenbelastung mit Schwermetallen durch Klärschlamm. Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL) 23. (1-82 pp.).
- Kelly, J.J. et al.: Effects of the land application of sewage sludge on soil heavy metal concentrations and soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 1467-1470 (1999)
- Kharikov,A.M., Smetana,V.V. (2000) Heavy metals and radioactivity in phosphate fertilizers: short term detrimental effects. [http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/2000\\_biblio\\_126.pdf](http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/2000_biblio_126.pdf) , 1-10. 1-11-2002.
- Klasink,A., Haase,R. (1994) Klärschlamm - Nur gering mit organischen Schadstoffen belastet. *Landwirtschaftsblatt Weser-Ems* 141[33], 37-39.
- Kluge,R. (1994) Direktverwertung von Grünguthäcksel im Pflanzenbau - Alternative zur Kompostierung. AID-Informationen für die Agrarberatung (Germany) 2[10], 19-22.
- Kluge,R. (2002) Direktverwertung von Grünguthäcksel im Ackerbau - Ergebnisse aus vier Jahren Praxisforschung in Baden-Württemberg. <http://www.mr-kraichgau.de/gruengut.htm>. 16-12-0002.
- Kollotzek D., Hartmann E., Kassner W., Kurrle J., Lemmert-Schmitt E., Beck A. 1998. Technische, analytische, organisatorische und rechtliche Massnahmen zur Verminderung der Klärschlammbelastung mit relevanten organischen Schadstoffen, Band 1. Forschungsbericht 103 50 123 UBA-FB 98-037. Berlin: Umweltbundesamt, Berlin.
- Kongshaug,G., Bockman,O.C., Kaarstad,O., Morka,H. (1992) Inputs of trace elements to soils and plants. Norsk Hydro (Ed.) Proc. Chemical Climatology and Geomedical Problems. Oslo, Norway.
- Kpombekou A.K., Tabatabai,M.A. (1994) Metal contents of phosphate rocks. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25[17&18], 2871-2882.

- Kratz,S., Paulsen,H.M., Schnug,E. (2005) Nährstoff- und Schwermetallgehalte in ökologischen Wirtschaftsdüngern - Erhebung der FAL in 167 deutschen Praxisbetrieben. Unveröffentlicht.
- Kratz,S., Rogasik,J., Schnug,E. (2002) Nährstoff- und Schwermetallgehalte in Broilermist und -kot - Untersuchung in 15 Praxisbetrieben mit verschiedenen Haltungssystemen. Unveröffentlicht.
- Kratz,S., Schnug,E. (2005) 23 Rinder- und Schweinegülle aus dem Landkreis Gifhorn (Niedersachsen). Unveröffentlicht.
- Kratz,S., Schnug,E. (2005) Schwermetallgehalte in 65 europäischen Mineraldüngermustern (Sammlung FAL-PB). Unveröffentlicht.
- Krause,O., Leiterer,M., Zorn,W. (1995) Sind Verkehrskontrollen bei Klärschlamm sinnvoll? In: Grünland als Produktionsstandort und Landschaftselement [Grassland as production location and landscape element]. Kongressband zum 107. VDLUFA-Kongress vom 18.-23. September 1995 in Garmisch-Partenkirchen. VDLUFA-Schriftenreihe 40, 345-348. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Krauß,P., Wilke,M., Mahnke,K., Wallenhorst,T. (1995) Bioabfallkompostierung IV: Eintragspfade von Schadstoffen in Komposte. Luft Boden Abfall [39/95]. Umweltministerium Baden-Württemberg. Stuttgart.
- Krogh,P.H., Holmstrup,M., Jensen,J., Petersen,S.O. (1997) Ecotoxicological Assessment of Sewage Sludge in Agricultural Soil. Ministry of Environment and Energy,Denmark - Danish Environmental Protection Agency. Working Report 69 (1-53 pp.).
- Kühnen,V., Bien,B., Goldbach,H.E. (2001) Schwermetallbilanzen (Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei, Zink) auf einem Veredlungsbetrieb mit Sauenhaltung. In: Kongressband zum 113. VDLUFA-Kongress vom 17.-21. September 2001 in Berlin (CD-ROM), VDLUFA-Schriftenreihe 57/II, 768-775. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Kühnen,V., Goldbach,H.E. (2004) Schwermetallbilanzen verschiedener Betriebstypen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn (Ed.) Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes "Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft" 118 (1-212 pp.).
- Kukowski,H., Dammann,E. (1996) Landwirtschaftliche Nutzung von Kalkschlamm aus der Trinkwasserenthärtung. In: Sekundärrohstoffe im Stoffkreislauf der Landwirtschaft. 108. VDLUFA-Kongress in Trier vom 16. bis 21. September 1996. VDLUFA-Schriftenreihe 44, 505-508. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Kummer,V. (1992) Organische Schadstoffe in Komposten. 2. Internationales Dioxin-Symposium und 2. fachöffentliche Anhörung des Bundesgesundheitsamtes und des Umweltbundesamtes zu Dioxinen und Furanen in Berlin vom 9. bis 13. November 1992.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2000) Organische / mineralische Abfälle und Wirtschaftsdünger - Datenbank (CD-ROM). Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), VDLUFA, und Gütegemeinschaft Bodenverbesserung e.V. [1.0]. Darmstadt.
- La Guardia, M.J. et al.: Alkylphenol Ethoxylate degradation products in land-applied sewage sludge (biosolids). Environ. Sci. Technol. 35, 4798-4804 (2001)
- Landesamt für Umweltschutz Saarbrücken (2003) Auszug aus dem offiziellen Klärschlammkataster des Saarlandes (BMU-Daten 1991-2002). Schriftliche Mitteilung.

- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (1999) Untersuchungen zur Hintergrundbelastung von kommunalen Klärschlämmen im Land Sachsen-Anhalt. Fachinformation Nr. 1/1999 (1-12 (+ Anhang) pp.).
- Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (LVL) (2003) Auszug aus dem Klärschlammkataster des Landes Brandenburg für 2001. Schriftliche Mitteilung.
- Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft Frankfurt/Oder (2002) Bericht zur Klärschlammverwertung im Land Brandenburg im Zeitraum 1994 - 2001.  
Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft Frankfurt /Oder. Informationen aus dem Referat Acker- und Pflanzenbau.
- Landolt, W. (2002) Optimale Ernährung und Holzascherecycling im Wald (HARWA), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Forschungsbereich Wald.  
<http://www.wsl.ch/forest/wus/harwa/aqualitaet/aqualitaet-de.html>. 20-11-2002.
- Landwirtschaftliche Beratung (2000) Thomasdünger. Ökotoxikologische Relevanz von Schwermetallen in Kalkdüngemitteln aus Eisenhüttenschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Chromgehalte. Unveröffentlicht.
- Langenkamp, H., Part, P., Erhardt, W., Prüeß, A. (2001) Organic contaminants in sewage sludge for agricultural use. (1-67 pp.).
- Lau, S.S.S., Wong, J.W.C. (2001) Toxicity evaluation of weathered coal fly ash-amended manure compost. *Water Air and Soil Pollution* 128 (3-4), 243-254.
- Leifeld, J., Rohde, D., Held, T. (1996) Untersuchungen zur Grünabfallkompostierung der Stadt Witten. *Wasser und Boden* 48[11], 17-23.
- Lernhardt, U., Kleiner, J. (2000): SQS 2000, Software für die statistische Kontrolle analytischer Daten, Individuelle Software und Schulung, 78345 Moos
- Loipfänger, A. (1994) Untersuchung von Bioabfallkomposten, Grüngutkomposten und Komposten aus der Hausgarten- und Gemeinschaftskompostierung auf ihren Gehalt an Schwermetallen, PCDD/F, PCB und AOX. Berichte aus dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz. (1-58 pp.).
- Machelett, B., Grün, M., Bergmann, H. (1994) Schwermetallgehalte in Phosphatdüngemitteln, Klärschlämmen und Böden der ehemaligen DDR. In: Alternativen in der Flächennutzung, der Erzeugung und Verwertung landwirtschaftlicher Produkte. 106. VDLUFA-Kongress vom 19.-24.09.1994 in Jena. VDLUFA-Schriftenreihe 38, 649-652. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Mackay D., Shiu W.Y., Ma K.C. 1995. Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, IV Oxygen, Nitrogen, and Sulfur Containing Compounds. Michigan: Lewis Publishers.
- Mackay, D., W. Y Shiu, and K. C. Ma, 1992. Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals I Monoaromatic Hydrocarbons, Chlorobenzens and PCBs. Michigan: Lewis Publishers.
- Mackay, D., W. Y Shiu, and K. C. Ma, 1992. Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, II Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Polychlorinated Dioxins and Dibenzofurans. Michigan: Lewis Publishers.
- Madsen, T., Winther-Nielsen, M., Samsoe-Petersen, L. (1998) Effects of Organic Chemicals in Sludge Applied to Soil. Ministry of Environment and Energy, Denmark - Danish Environmental Protection Agency – Report. (1-35 pp.).

- Makweba, M.M., Holm, E. (1993) The natural radioactivity of the rock phosphates, phosphatic products and their environmental implications. *Science of the Total Environment* 133 (1-2), 99-110.
- Malone, G.W. (1992) Nutrient enrichment in integrated broiler production systems. *Poultry Science* 71, 1117-1122.
- Marb, C., Dietrich, G., Köbernik, M. (1997) Vergleichende Untersuchungen zur Kompostierung von Bioabfällen in Reaktoren und auf Mieten. *Müll und Abfall* 29[10], 609-620.
- Marb, C., Riedel, H. (1992) Das Verhalten von Schwermetallen bei der thermischen Klärschlamm-trocknung. *Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz* [117], 226-228.
- Marb, C., Riedel, H. (1997) Schadstoffverhalten bei der Klärschlamm-trocknung: Ergebnisse der Untersuchungen an einem Kaltluft-trockner. *Korrespondenz Abwasser* 44[8], 1386-1393.
- Marb, C., Scheithauer, M., Köhler, R. (2001) Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen - Teil A: Untersuchung von Bio- und Grünabfallkomposten auf ihren Gehalt an Schwermetallen und anderen organischen Schadstoffen - Zwischenbericht zum 30.04.2001. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg. (1-66 pp.).
- Marcomini, A. et al.: Behaviour of Aromatic Surfactants and PCBs in sludge-treated soil and landfills. *J. Environ. Quality*. 18, 523-528 (1989)
- Marcomini, A. et al.: Fate of organic pollutants in sludge-amended soil and sludge-only landfills: linear alkylbenzenesulphonates, nonylphenols and PCBs, *J. Environ. Quality*. 19, 331-342 (1989)
- Mattes, Th. (2002) Dezentrale Kompostierung im Landkreis Kronach - Vor- und Nachteile, neue Aspekte. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Ed.) *Abfallvermeidung und -verwertung bei der Landschafts- und Gartenpflege*, Fachtagung in Augsburg am 01./02. Oktober 2002, pp. 14-30.
- McBride, M.B. et al.: Long-term leaching of trace elements in a heavily sludge-amended silty clay loam soil. *Soil Science*, 164 (9), 613-623 (1999)
- McBride, M.B. et al.: Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after application. *Soil Science*. 162 (7), 487-500 (1997)
- McBride, M.B. et al.: Trace metal solubility and speciation in a calcareous soil 18 years after no-till sludge application. *Soil Science* 165 (8), 646-656 (2000)
- McBride, M.B., Spiers, G. (2001) Trace element content of selected fertilizers and dairy manures as determined by ICP-MS. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32[1&2], 139-156.
- McLachan, M.S. et al.: Persistence of PCDD/Fs in a sludge-amended soil. *Environ. Sci. Technol.* 30, 2567-2571 (1996)
- Meisch, H.U., Ewen, A. (1996) Untersuchungen zur Belastung saarländischer Klärschlämme mit PCB, PAK, Phenolen, Arsen, Selen und Zinn - Zusammenfassung der Ergebnisse 1992-1995. (9-19 pp.).
- Menzi, H., Haldemann, C., Kessler, J. (1993) Schwermetalle in den Hofdüngern - ein Thema mit Wissenslücken. *Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung* 32[1/2], 159-167.
- Menzi, H., Kessler, J. (1998) Heavy metal contents of manures in Switzerland. In: Martinez, J.; Maudet, M.-N. (Eds.) *Proceedings of the 8th International Conference on the FAO Escorena Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture*. Rennes, France, 26-29 May 1998, pp. 495-506.
- Menzi, H., Shariatmadari, H., Wiedmer, H. (1997) Nähr- und Schadstoffbelastung von Geflügelausläufen. *Agrarforschung* 4[9], 361-364.

- Merkel, D. et al.: Untersuchungen von Klärschlämmen und Böden auf Di-(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP). Korrespondenz Abwasser 43, 578-585 (1996)
- Merkel, D., Matter, Y. (1993) Pflanzennährstoff- und Schwermetallgehalte niedersächsischer Klärschlämme. I. Untersuchungen auf Pflanzennährstoffe und Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg und Zn 1983 bis 1991. Korrespondenz Abwasser 40, 1942-1945.
- Merkel, D., Matter, Y. (1994) Klärschlammuntersuchungen aus Niedersachsen. II. Untersuchungen chlorierter Kohlenwasserstoffe 1990-1991. Korrespondenz Abwasser 41[1], 76-81.
- Merkel, D., Matter, Y. (2003) Klärschlamm-Analysedaten aus Niedersachsen (unveröffentlicht). Schriftliche Mitteilung.
- Merkel, D., Matter, Y., Appuhn, H. (1994) Klärschlammuntersuchungen aus Niedersachsen. III. Multielementanalysen und Untersuchungen auf PAK und Mineralöl 1990-1991. Korrespondenz Abwasser 41[2], 264-267.
- Merrington, G. and Madden, C.: Changes in Cadmium and Zink Phytoavailability in Agricultural Soil After Amendment with Papermill Sludge and Biosolids. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 31 (5&6), 759-776 (2000)
- Ministerium für Umwelt (2000) Abfallwirtschaftsplan Schleswig-Holstein, Teilplan Klärschlamm 2000-2010. 1-62.
- Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg (1997) Hohe Kompostqualität ist möglich. Begleituntersuchungen zum Kompostierungserlass des Landes Baden-Württemberg: Räumliche und zeitliche Variabilität der Inhaltsstoffe von Komposten. [wysiwyg://111/http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/rb2/rb2.htm](http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/rb2/rb2.htm). 16-12-2002.
- Mönicke, R., Kühn, I. (2002) Klärschlammverordnung - Aufbringungsplan 2001 des Freistaates Sachsen. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Moore Jr., P.A., Daniel, T.C., Gilmour, J.T.S.B.R., Edwards, D.R., Wood, B.H. (1998) Decreasing metal runoff from poultry litter with aluminum sulfate. Journal of Environmental Quality 27, 92-99.
- Mortvedt, J.J., Beaton, J.D. (1996) Heavy metal and radionuclide contaminants in phosphate fertilizers. In: Tiessen, H., (Ed.), SCOPE 54 - Phosphorus in the global environment - transfers, cycles and management. Wiley, U.K., pp. 93-106.
- Müller, C., Ebert, T. (2002) Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger von 1986 bis heute - Ergebnisse aus dem bayrischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramm. In: Kongressband zum 114. VDLUFA-Kongress vom 16.-20.9.2002 in Leipzig (CD-ROM), VDLUFA-Schriftenreihe 58. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Müller, D.H., Heil, M. (1997) Weinbauabwasser: Wohin damit? Das Deutsche Weinmagazin 19, 22-26. 1997. 13-9-1997.
- MUNLV des Landes NRW (2004) NIKLAS Klärschlamm Datenbank des Landes Nordrhein-Westfalen 1997-2003. Schriftliche Mitteilung.
- MUNLV des Landes NRW (2005) Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Teil E: Organische Schadstoffe in Klärschlämmen – Bewertung und Ableitung von Anforderungen an die landwirtschaftliche Verwertung. ISBN 3-9810063-3-X
- Nicholson, F.A., Chambers, B.J., Williams, J.R., Unwin, R.J. (1999) Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. Bioresource Technology 70 (1), 23-31.

- Niederberger, J., Schäffer, J., von Wilpert, K. (2002) Nährelement- und Schwermetallgehalte von Holzaschen. *AFZ/Der Wald: allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 57[16], 826-828.
- Obernberger, I. (1997) Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung. Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz.
- Oehmichen, J., Gröblichhoff, F.F., Reinders, A., Dörendahl, A. (1995) Untersuchung über die Verwendung von Bio-Kompost als Kreislaufdünger im Landbau. *Müll und Abfall* [2], 74-82.
- Ogunleye, P.O., Mayaki, M.C., Amapu, I.Y. (2002) Radioactivity and heavy metal composition of Nigerian phosphate rocks: possible environmental implications. *Journal of Environmental Radioactivity* 62[1], 39-48.
- Pantelica, A.I., Salagean, M.N., Georgescu, I.I., Pincovschi, E.T. (1997) INAA of some phosphates used in fertilizer industries. 23. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 216 (2), 261-264.
- Paulsrud, B., Wien, A., Nedland, K.T. (2000) A survey of toxic organics in Norwegian sewage sludge, compost and manure. Aquateam, Norwegian Water Technology Centre ASOSLO.
- Pinamonti, F. et al.: compost use in viticulture: effects on heavy metal levels in soil and plants. *Commun. Soil sci. Plant anal.* 30 (9&10), 1531-1549 (1999)
- Pinamonti, F. et al.: Heavy metal levels in apple orchards after the application of two composts. *Commun. Soil sci. Plant anal.* 28 (15&16), 1403-1419 (1997)
- Planquart, P. et al.: Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings. *The Science of the Total Environment* 241, 161-179 (1999)
- Popp, L., Fischer, P. (1995) Beurteilung der Kompostqualität. In: *Komposte in der Landwirtschaft*. KTBL-Arbeitspapier 223, 36-41. Darmstadt.
- Qureshi, A.A., Khattak, N.U., Sardar, M., Tufail, M., Akram, M., Iqbal, T., Khan, H.A. (2001) Determination of uranium contents in rock samples from Kakul phosphate deposit, Abbotabad (Pakistan), using fission-track technique. 12. *Radiation Measurements* 34 (1-6), 355-359.
- Rappaport, B.D. et al.: Metal availability in sludge-amended soils with elevated metal levels. *J. Environn. Qual.*, 17(1), 42-47 (1988)
- Rasp, H. (1996) Kompostierung von Klärschlamm. *Wasser und Boden* 48[4], 37-40.
- Rasp, H., Scholl, W. (1987) Der Einsatz von Industrieabfällen pflanzlicher Herkunft im Landbau. Abfallstoffe als Dünger. In: *VDLUFA-Kongressband 1987*. VDLUFA-Schriftenreihe 23, 49-62. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Raven, K.P., Loeppert, R.H. (1997) Trace element composition of fertilizers and soil amendments. *Journal of Environmental Quality* 26 (2), 551-557.
- Reinhold, J. (2004) Neubewertung von Kompostqualitäten - Regionale Auswertung der Daten von Bioabfallkompostierungsanlagen. Teilbericht zum vorliegenden UBA-Projekt 202 33 305/02.
- Ries, G., Oetjen-Dehne, R. (1998) Feldversuch zur Kompostanwendung in der Landwirtschaft. *Abfallwirtschaftsjournal: Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen* [7-8], 20-24.
- Rieß, P. (1992) Schriftliche Mitteilung. Zitiert nach: Wilcke, W., Döhler, H. (1995)

- Rieß,P., Schramm,K.-W., Klages-Haberkern,S. (1993) Der Einfluß der Inputmaterialien auf die Kompostqualität. In: Kompostierung und landwirtschaftliche Kompostverwertung. KTBL-Arbeitspapier 191, 86-108. Darmstadt.
- Rietz, E.: Langzeituntersuchungen des Verhaltens von Schadstoffen im Boden am Beispiel der Anwendung von Siedlungsabfällen, Teilvorhaben 6, FAL Braunschweig (1993)
- Roslev,P., Madsen,P.L., Thyme,J.B., Henriksen,K. (1998) Degradation of phthalate and di-(2-ethylhexyl)phthalate by indigenous and inoculated microorganisms in sludge-amended soil. Applied and Environmental Microbiology 64[12], 4711-4719.
- Saad,A.F., Talaat,T.M., Atwa,S.T., Espinosa,G., Fujii,M. (2003) Determination of the uranium content of Egyptian phosphate ores by passive and active detectors. Radiation Measurements 36 (1-6), 561-565.
- Sarich,W., Krawielitzki,H., Schweder,P. (1998) Beitrag zum Cd-Status der Rapsproduktion. In: VDLUFA-Kongressband 1998. VDLUFA-Schriftenreihe 49, 329-332. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Sauerbeck, D.R.: Plant, element and soil properties governing uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge. Water, Air, and Soil Pollution, 57-58, 227-37 (1991)
- Saxer,M., Herter,U., Kupper,T. Schwermetall- und Nährstoffgehalte in potentiellen Abfalldüngern, Interner Bericht FAL-Reckenholz (unveröffentlicht).
- Schaaf,H. (1993) Klärschlamm und Kompost. Einsatz in der Landwirtschaft. Deutsche Zuckerruebenzeitung 29[6], 5.
- Schaaf,H. (1995) Anwendung von Bioabfallkompost in Hessen - Ergebnisse aus hessischen Feldversuchen. Hessisches Landesamt für Regionalentwicklung (Ed.) Kolloquium über die Verwertung von Komposten im Pflanzenbau.
- Schaaf,H. (1995) Verwerterorganisation von Landwirten: das hessische Modell. In: Komposte in der Landwirtschaft. KTBL-Arbeitspapier 223, pp. 92-100. Darmstadt.
- Schaaf,H., Janßen,E. (2000) Schwermetallgehalte von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern sowie Schwermetallfrachten bei Anwendung nach den anerkannten Regeln der guten fachlichen Praxis. In: VDLUFA-Kongressband 2000, VDLUFA-Schriftenreihe 55/VI, 144-150. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Schaecke, W. et al.: behaviour of heavy metals from sewage sludge in a Chernozem of the dry belt in Saxony-Anhalt/Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci., 165, 609-617 (2002)
- Schaecke,B., Gans,I. (2003) Klärschlammbericht des Landes Mecklenburg-Vorpommern 2001. Schriftliche Mitteilung.
- Scheithauer,M. (2001) Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen. [http://www.bayern.de/lfu/tat\\_bericht/tb\\_200x/tb\\_2000/kompostierung.pdf](http://www.bayern.de/lfu/tat_bericht/tb_200x/tb_2000/kompostierung.pdf) (1-12 pp.).
- Schildbach,R., Ritter,W. (1995) Brauerei-Kieselgur. Verwertung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen als Bodenhilfs-/Pflanzennährstoff. Gesellschaft für Öffentlichkeitsarbeit der Deutschen Brauereiwirtschaft e.V. (1-43 pp.).
- Schmid,R., Eckstein,B. (1991) Kompostverwertung und Bodenschutz. Inhaltsstoffe von Komposten und deren Beurteilung beim Eintrag in den Boden. Taspo-Magazin 18[5], 26-27.
- Schmoll,H., Held,T. (1997) Zum Einsatz von Grünschnittkomposten in stadtnahen Forsten 219. Forst und Holz 52[9], 245-249.
- Schultheiß,U., Döhler,H., Eckel,H., Uihlein,A., Wilcke,W. (2001) Praxiserhebungen zu Schwermetalleinträgen in Tierhaltungsbetrieben. In: Kongressband zum 113. VDLUFA-Kongress

- vom 17.-21. September 2001 in Berlin (CD-ROM), VDLUFA-Schriftenreihe 57/II, 761-767. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Schwab, A. (1996) Bio-Abfallkomposte zur Düngung und Humusversorgung. *Rebe und Wein* 49[1], 26-29.
- Senator für Bau und Umwelt der Freien Hansestadt Bremen (2002) EG-Klärschlammbericht gemäß Richtlinie 86/278/EWG des Bundeslandes Bremen. Schriftliche Mitteilung.
- Senesi, N., Padovano, G., Brunetti, G. (1988) Scandium, titanium, tungsten and zirconium content in commercial inorganic fertilizers and their contribution to soil. *Environmental Technology Letters* 9 (9), 1011-1020.
- Severin, K., Köster, W., Matter, Y. (1990) Zufuhr von anorganischen Schadstoffen in Agrarökosysteme mit mineralischen Düngemitteln, Wirtschaftsdüngern, Klärschlamm und Komposten. In: VDLUFA-Kongressband 1990, VDLUFA-Schriftenreihe 32, 387-391. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Sims, J.T., Wolf, D.C. (1994) Poultry waste management: agricultural and environmental issues. *Advances in Agronomy* 52, 1-83.
- Staples, C.A., Peterson, D.R., Adams, W.J. 1997. The environmental fate of phthalate esters: a literature review. *Chemosphere* 35(4): 667-749.
- Stephenson, A.H., McCaskey, T.A., Ruffin, B.G. (1990) A survey of broiler litter composition and potential as a nutrient resource. *Biological Wastes* 34, 1-9.
- Syers, J.K., Mackay, A.D., Brown, M.W., Currie, L.D. (1986) Chemical and physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 37[11], 1057-1064.
- The Weinberg Group Inc. 2003. Iuclid Datasheet, Linear Alkylbenzene (LAB) Sulfonic Acids (LABSA). Anonymous.
- Thomé-Kozmiensky, K.J. (2001) Verantwortungsbewusster Umgang mit dem Boden. In: Thomé-Kozmiensky, K.J., (Ed.), Verantwortungsbewusste Klärschlammverwertung. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, pp. 3-201.
- Thormann, A. (1991) Zur Belastung organischer Materialien durch Schadstoffe - stoffstrombezogene Betrachtung landwirtschaftlicher Ernterückstände und Gülle. *Loccumer Protokolle* 31, 118-122.
- Timmermann, F., Kluge, R., Stahr, K., Zauner, G. (1999) Projekt Wasser Abfall Boden (PWAB) - Erarbeitung von Grundlagen für Anwendungsrichtlinien zur Verwertung geeigneter Rest- und Abfallstoffe im landwirtschaftlichen Pflanzenbau (Ackerbau). *PW* 95 171.
- Uihlein, A. (2001) Stallbilanzen von Schwermetallen am Beispiel ausgewählter Milchviehbetriebe. Diss. Universität Bayreuth.
- Ulen, B. (1997) Leaching of plant nutrients and heavy metals during the composting of household wastes and chemical characterization of the final product. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 47 (3), 142-148.
- Umweltbundesamt Berlin (2003) EU-Klärschlammbericht 2001-2003. Schriftliche Mitteilung.
- Umweltbundesamt Berlin (2004) Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. UBA-Texte 06/04. ISSN 0722-186X.
- Untersuchungszentrum Münster - LUFA - Referat 42. (2001) Ergebnisse der Kompostuntersuchungen nach Richtlinien der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe. Schriftliche Mitteilung.

- Untersuchungszentrum Münster - LUFA - Referat 42. (2002) Hausklärschlämme überwiegend unbelastet. Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe. Mitteilungen 4/1/02.
- Untersuchungszentrum Münster - LUFA - Referat 42. (2002) Schwermetalle in Wirtschaftsdüngern. Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe. Schriftliche Mitteilung.
- Untersuchungszentrum Münster - LUFA - Referat 42. (1996) Wirtschaftsdünger in Westfalen-Lippe: Untersuchungsergebnisse von Gülle und Mist. Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe. Schriftliche Mitteilung.
- van der Watt, H., Sumner, M.E., Cabrera, M.L. (1994) Bioavailability of copper, manganese and zinc in poultry litter. *Journal of Environmental Quality* 23, 43-49.
- Van Kauwenbergh, S.J. (1997) Cadmium and other minor elements in world resources of phosphate rock. The Fertiliser Society, London, Proceedings No. 400. York, UK.
- Vandepopuliere, J.M., Lyons, J.J., Fulhage, C.D. (1992) Broiler litter sampling reveals needed information. *Poultry digest* 51[8], 14-18.
- Viisimaa, L., Veiderma, M., Hodrejarv, H. (1991) Trace elements in phosphate rocks and fertilizers. *Analytical Sciences. The International Journal of the Japan Society for Analytical Chemistry* 7[Supplemental Part], 1161-1163.
- Vikseloe, J. et al.: Phthalates and nonylphenols in profiles of differently dressed soils. *The Science of the Total Environment* 296 105-116 (2002)
- Weissberg, B.G., Singers, W.A. (1982) Trace elements and provenance of phosphate rocks. *New Zealand Journal of Science* 25 (2), 149-154.
- Wenzel A.: Kreislaufwirtschaft – Stoffstrommanagement: Ermittlung und Auswertung von Daten zur Beurteilung prioritärer organischer Schadstoffe in Abfalldüngern (niedrig belastete Klärschlämme aus ländlichen Regionen und Kompost) sowie in organischen Wirtschaftsdüngern (Gülle und Jauche) für eine Risikobewertung (FKZ: 299 33 314)
- Werner, W. et al.: Ecological evaluation of long-term application of sewage sludge according to the legislative permissions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 43, 1047-1049 (1997)
- Werner, W. und J. Warnusz: Langzeituntersuchungen des Verhaltens von Schadstoffen im Boden am Beispiel der Anwendung von Siedlungsabfällen, Teilvorhaben 3, Universität Bonn (1993)
- Wesley Wood, C., Cummins, K.A., Williams, C.C., Wood, B.H. (2004) Impact of diet and age on element excretion from dogs. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35[9&10], 1263-1270.
- Wilcke, W., Döhler, H. (1995) Schwermetalle in der Landwirtschaft. KTBL-Arbeitspapier 217, 1-98. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag GmbH.
- Wild, S.R. et al.: Organic Chemicals in the Environment. Polynuclear aromatic hydrocarbon uptake by carrots grown in sludge amended soil. *J. Environ. Qual.* 21, 217-225 (1992)
- Wilson, S.C. et al.: Organic Chemicals in the Environment; persistence of organic contaminants in sewage sludge-amended soil: a field experiment, *J. Environ. Qual.* 26, 1467-1477 (1997)
- Witte, H. et al.: Untersuchungen zum Eintrag von organischen Schadstoffen in Boden und Pflanze durch die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung, UBA-Texte 26/89
- Witte, H., Langenohl, T., Keding, M., Rieß, P., Mönicke, R. (1996) Literaturstudie zur Bilanzierung von Schadstoffeinträgen auf Ackerböden. IWB Gemeinnütziges Institut Wasser und Boden e.V. 1-41. Bonn.

- Wood,C.W., Hall,B.M. (1991) Impact of drying method on broiler litter analyses. Communications in Soil Science and Plant Analysis 22, 1677-1688.
- Yamazaki,I.M., Geraldo,L.P. (2003) Uranium content in phosphate fertilizers commercially produced in Brazil. 10. Applied Radiation and Isotopes 59 (2-3), 133-136.
- Zethner,G., Götz,B. (1997) Kompostqualität in Österreich. In: VDLUFA-Kongressband 1997, VDLUFA-Schriftenreihe 46, 811-814. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Zethner,G., Götz,B., Amlinger,F. (2000) Qualität von Komposten aus der getrennten Sammlung. Umweltbundesamt Wien. (1-363 pp.). Wien.
- Zethner,G., Pfundtner,E., Humer,J. (2002) Qualität von Abfällen aus Biogasanlagen. Umweltbundesamt Wien. (1-50 pp.). Wien.
- Zorn,W., König,V. (1996) Wert- und Schadstoffgehalt Thüringer Teichschlämme und Gewässersedimente - Konzept zur umweltverträglichen Verwertung in der Landwirtschaft. In: Sekundärrohstoffe im Stoffkreislauf der Landwirtschaft. 108. VDLUFA-Kongress in Trier vom 16. bis 21. September 1996. VDLUFA-Schriftenreihe 44, 541-544. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.