

***Gefäßversuche zum mikrobiellen Abbau von PAK
(polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen)
in belasteten Böden***

Im Auftrag des Landesumweltamtes Landes Nordrhein-Westfalen

Essen, 1997

Impressum

Herausgeber: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW)
Wallneyer Straße 6 • 45133 Essen • Telefon (0201) 7995-0

Erscheinungsort/-datum: Essen, 1997

Projektleitung und
Gesamtredaktion: Dipl.-Ing. Michael Odensaß
Dipl.-Ing. Stefan Schroers
Landesumweltamt NRW

Erarbeitung: Prof. Dr. G.W. Brümmer
Dipl.-Ing. Agr. S. Thiele
Institut für Bodenkunde
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Nußallee 13, 53115 Bonn

Das Projekt wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, der folgende Mitglieder angehörten:

Frau Dr. Abel (zeitweise)	StUA Herten
Dr. Barrenstein	Landesumweltamt NRW
Dipl.-Ing. Bömer (zeitweise)	ehemals StUA Münster
Dipl.-Ing. Decher (zeitweise)	StUA Herten
Dipl.-Ing. Küchen (zeitweise)	Landesumweltamt NRW
Frau Dr. Necker	Landesumweltamt NRW
Dipl.-Ing. Odensaß (Obmann)	Landesumweltamt NRW
Dr. Rahm (zeitweise)	StUA Herten
Dipl.-Ing. Schroers	Landesumweltamt NRW

Schutzgebühr: 35,- DM (zzgl. MwSt., Porto und Versandkosten)

Schriftenvertrieb: Gemeinnützige Werkstätten Neuss, Am Krausenbaum 11,
41464 Neuss, Telefax (0 21 31) 4 28 60

Umschlaggestaltung: Werbeagentur Scharke GmbH, Düsseldorf

Druck: Landwirtschaftsverlag GmbH, Hülsebrockstr. 2, 48168 Münster

ISSN: 1432 - 3575

Informationsdienste
des LUA NRW: Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen:
• Internet unter <http://www.lua.nrw.de>
• T-Online unter Landesumweltamt NRW#

Vorwort

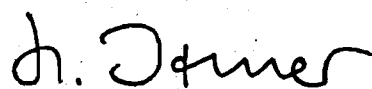
Der Stoffgruppe der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) kommt bei Altlasten eine bedeutende Rolle zu. Größere PAK-Mengen, die früher vorwiegend bei Kohleverschwelungsprozessen in Kokereien und Gaswerken angefallen sind, belasten heute in zum Teil hohen Konzentrationen die Böden dieser Altstandorte und können eine Gefahr für die Umwelt darstellen.

Zur Sanierung dieser Flächen, die oft in Innenstadtbereichen liegen, stehen eine Reihe von unterschiedlichen Verfahren zur Verfügung. Neben der Deponierung und neben Sicherungsverfahren sind als Dekontaminationsverfahren grundsätzlich thermische Verfahren und Waschverfahren geeignet. Mikrobiologische Verfahren zur PAK-Sanierung wurden in der Vergangenheit im Rahmen der Entwicklung von Sanierungskonzepten bei vielen Altlast-Einzelfällen diskutiert, jedoch insbesondere aufgrund der Unsicherheiten bezüglich des Sanierungserfolges nur sehr selten eingesetzt. Obwohl PAK prinzipiell mikrobiologisch abbaubar sind, kann die mikrobiologische Sanierung von PAK-belasteten Böden aufgrund der in vielen Fällen nicht ausreichend vorhandenen Bioverfügbarkeit noch nicht als Stand der Technik bezeichnet werden.

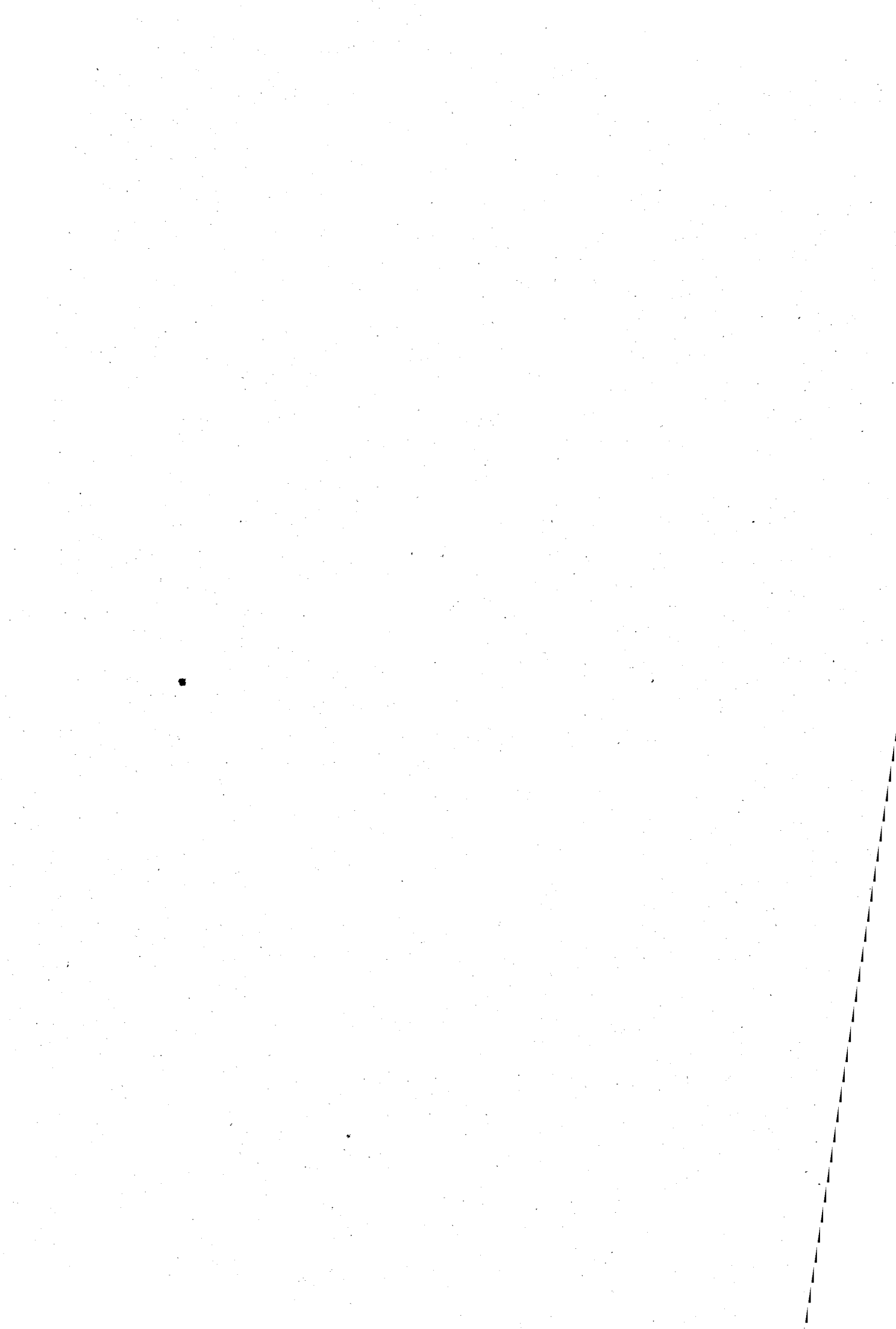
Um die Möglichkeiten und Grenzen des mikrobiologischen PAK-Abbaus in Mieten zu ermitteln, wurden im Auftrag des Landesumweltamtes am Institut für Bodenkunde der Universität Bonn verschiedene Varianten der Optimierung des PAK-Abbaus untersucht. Dazu wurden Gefäßversuche unter Freilandbedingungen mit PAK-belasteten Böden von neun verschiedenen Altstandorten mit Zugaben unterschiedlicher Art und Menge von organischer Substanz, Nährstoffen und Tensiden durchgeführt.

Im vorliegenden Bericht sind diese Versuche, deren Ergebnisse und die Schlußfolgerungen für die Praxis dargestellt. Dabei werden die bislang vorliegenden Einzelerfahrungen beim Einsatz mikrobiologischer Mieten- oder Landfarmingverfahren zum PAK-Abbau durch die hiermit vorliegenden Ergebnisse einer Vielzahl von Vergleichsuntersuchungen bestätigt und die derzeit vorhandenen Grenzen dieser Verfahren aufgezeigt.

Essen, im Juli 1997



Dr.-Ing. Harald Irmer
Präsident des
Landesumweltamtes
Nordrhein-Westfalen



INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	9
2. MATERIAL UND METHODEN	12
2.1 Bodenmaterial.....	12
2.1.1 Auswahl der Bodenproben	12
2.1.2 Allgemeine Kennwerte der Bodenproben	13
2.2 Gefäßversuche	18
2.2.1 Aufbau und Anlage der Gefäßversuche	18
2.2.2 Pflege der Gefäßversuche	20
2.3 Probennahme, Probenlagerung und Probenaufbereitung	22
2.3.1 Bodenproben	22
2.3.2 Sickerwasserproben	22
2.4 Bestimmung der allgemeinen Bodenkennwerte	23
2.5 Bestimmung der mikrobiellen Aktivitäten.....	24
2.6 Bestimmung der PAK-Gehalte.....	25
2.6.1 Bodenproben	25
2.6.2 Sickerwasserproben	28
2.6.3 Messung der PAK an der HPLC und Datenauswertung.....	29
2.7 Güte der Analysen	30
3. BIOLOGISCHE AKTIVITÄT IN DEN BODENPROBEN	32
3.1 Mikrobielle Aktivitäten	32
3.1.1 Veränderungen in den Varianten der Gefäßversuche.....	32
3.1.2 Hemmung der Biolumineszenz	41
3.2 Beeinflussung des Pflanzenaufwuchses in den Versuchsgefäßen durch die Bodenbehandlung.....	44
4. BEURTEILUNG DES ANTEILS DES MIKROBIELLEN ABBAUS AN DER ABNAHME DER PAK-GEHALTE IN DEN BODENPROBEN	48
4.1 Verdünnung durch Zuschlagstoffe.....	48
4.2 Auswaschung.....	50
4.3 Entzug durch Pflanzen	56
4.4 Physikalisch-chemische Prozesse	56
4.5 Mikrobieller Einbau	63

5. VERÄNDERUNG DER PAK-GEHALTE IN DEN BODENPROBEN.....	66
5.1 Unterschiede zwischen den verschiedenen Bodenproben	67
5.2 Unterschiede zwischen den verschiedenen PAK-Einzel- substanzen	72
5.3 Unterschiede zwischen den Varianten der Gefäßversuche.....	77
5.3.1 Einfluß der Art der zugegebenen organischen Substanz	77
5.3.2 Einfluß der Menge der zugegebenen organischen Substanz und der Nitrat-Gabe.....	84
5.3.3 Einfluß der Tensidzugabe	88
5.3.3.1 Extraktionskraft und mikrobielle Toxizität der Tenside.....	88
5.3.3.2 Wirkung der Tenside auf die Abnahme der PAK-Gehalte in den Gefäßversuchen.....	95
5.3.4 Einfluß der Bodenreaktion.....	100
6. VERGLEICH DER IN DEN GEFÄSSVERSUCHEN UND IN BIOLOGISCHEN REAKTORVERFAHREN ABGEBAUTEN PAK-ANTEILE	102
7. ABSCHLIESSENDE BEURTEILUNG DER DURCHGEFÜHRTEN MASSNAHMEN ZUM MIKROBIELLEN ABBAU VON PAK IN BELASTETEN BÖDEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS	106
8. ZUSAMMENFASSUNG	121
9. LITERATURVERZEICHNIS	126
10. ANHANG	136

ABKÜRZUNGEN

PAK = Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe

ACE = Acenaphthen

ANT = Anthracen

BaANT = Benzo[a]anthracen

BaPYR = Benzo[a]pyren

BbFLA = Benzo[b]fluoranthren

BkFLA = Benzo[k]fluoranthren

BghiPER = Benzo[ghi]perylen

CHR = Chrysen

DBahANT = Dibenz[ah]anthracen

FLA = Fluoranthren

FLU = Fluoren

IPYR = Indeno[1,2,3-cd]pyren

NAP = Naphthalin

PHE = Phenanthren

PYR = Pyren

EPA = Environmental Protection Agency

TVO = Trinkwasser-Verordnung

SIR = Substrat-induzierte Respiration

DHA = Dehydrogenaseaktivität

lutro = lufttrocken (300C)

atro = absolut trocken (1050 C)

Variantencode

RaK2T/b

1 2 3 4 5

1 Materialherkunft

Ac = Aachen

Bo = Bochum

Dd = Düsseldorf

Ge = Gelsenkirchen

He = Herne **a** = Oberboden

b = Unterboden

Ko = Kohlscheid

Mi = Minden

Ra = Ratingen

Sh = Schwerte

So = Solingen

Üb = Übach-Palenberg

4 zugesetzte Tenside

G = Genapol UD 080

P = Plantaren 225

S = Synperonic LF/RA 30

T = Triton X-100

2 Art der Zugabe an

organischer Substanz

A = Ackerbohnen/Senf-Stroh

G = kommunaler Grünschnitt

K = Klee gras-Heu

3 Menge der Zugabe an

organischer Substanz

1 = Menge 1 (1,5%)

2 = Menge 2 (3,0%)

5 sonstige Varianten

- = unbehandelte Kontrolle

Hg = Quecksilber sterilisiert

/b = Wiederholung der Gefäßvariante

C = Kalkung (CaCO₃) **0** = ohne

1 = ½ Gabe

2 = volle Gabe

Hinweis: Die Namen der im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten Tenside sind eingetragene Warenzeichen der Firmen Aldrich, Henkel, Hoechst, ICI und Rhône-Poulenc, auch wenn dies im Text nicht weiter kenntlich gemacht ist.

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind aus zwei oder mehr kondensierten Ringsystemen aufgebaute Moleküle. Sie entstehen bei jeder unvollständigen Verbrennung organischer Substanzen und sind daher als ein natürlicher Bestandteil der Biosphäre ubiquitär verbreitet. Bei über hundert bisher bestimmten polycyclischen Verbindungen sind vor allem unter den höherkondensierten Aromaten (mehr als vier Benzolkerne) zahlreiche genotoxische Vertreter, deren bekanntester das Benzo[a]pyren ist (BLUME 1992, SCHACHTSCHABEL et al. 1992). Die US-Umweltbehörde EPA faßte daher 16 PAK als Leitsubstanzen dieser Substanzklasse in der "Priority Pollutant List" zusammen (US-EPA 1979).

Infolge eines zunehmenden Verbrauches fossiler Energieträger hat die unfreiwillige Produktion der PAK wesentlich zugenommen, so daß z.B. die Konzentrationen in Oberböden ländlicher Gebiete in England seit 1850 von 0,3 mg/kg Boden auf das vierfache angestiegen sind (JONES et al. 1989). Ungleich bedeutsamer sind die erheblichen PAK-Mengen, die im Zuge von Kohleverschwelungsprozessen in Kokereien und Gaswerken bzw. nachgelagerten Industriezweigen anfallen und nicht zuletzt mit dem Abriß stillgelegter Anlagen in überaus hohen Konzentrationen auf und in die Böden gelangt sind. Überschreitungen von Prüf- und Grenzwerten sind in den Böden solcher Altstandorte festzustellen (TEBAAY et al. 1993); Bodenbelastungen von mehreren Gramm PAK je kg Boden sind keine Seltenheit.

Zum einen kann aufgrund einer möglichen Gesundheitsgefährdung über die Pfade Luft, Wasser und Pflanzen sowie einer Inhalation von Stäuben oder Ingestion durch spielende Kinder, zum anderen aufgrund des Bedarfes an Flächen für industrielle bzw. gewerbliche Nutzungen oder urbane Wohnbebauung eine Sanierung solcher Standorte erforderlich werden.

Dazu stehen eine Reihe unterschiedlicher Dekontaminationsverfahren zur Verfügung. Meist wird aber auf Deponierungs- und Sicherungsmaßnahmen zurückgegriffen (ODENSAß & SCHROERS 1995). Gründe für die relativ seltene Anwendung der mikrobiologischen Sanierungsverfahren sind u.a.

- Unsicherheiten bzgl. des Sanierungserfolges,
- höhere Restgehalte als bei anderen Dekontaminationsverfahren wie Verbrennung u.a.,
- längere Sanierungszeiten,
- Eignung nur für bestimmtes Stoff- und Materialspektrum.

Im übrigen können bei Gefahrenabwehrmaßnahmen aus Gründen der Verhältnismäßigkeit gegenüber dem Sanierungspflichtigen keine Dekontaminationsverfahren durchgesetzt werden, wenn das Sanierungsziel auch

durch eine kostengünstigere (Sicherungs)maßnahme erreicht werden kann. Unter anderem wurden aus diesen Gründen in Nordrhein-Westfalen biologische Sanierungsverfahren nur in ca. 3,5 % der Sanierungsfälle (Stand vom 31.12.1995) angewendet (ODENSAß & SCHROERS 1995).

Vorteilhaft bei mikrobiologischen Sanierungsverfahren ist insbesondere, daß die Bodenfruchtbarkeit erhalten bleibt, was für die Wiederverwendbarkeit (Multifunktionalität) des Bodens von Bedeutung ist. Bei den Landfarming- und Bodenmietenverfahren sind die laufenden Kosten vergleichsweise günstig und sie sind verfahrenstechnisch sehr einfach gestaltet.

Zwar gelten PAK als prinzipiell biologisch abbaubar (CERNIGLIA 1984, MAHRO & KÄSTNER 1993), doch wird dies durch zahlreiche Einflußgrößen wie z.B. die Eigenschaften des Bodens z.T. erheblich eingeschränkt. Nicht selten sind ausbleibende Sanierungserfolge festzustellen (STEILEN et al. 1993).

Aufgrund dieser bisher bestehenden Unsicherheiten über die Erfolgsaussichten mikrobieller Sanierungsmethoden führte das Institut für Bodenkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn im Auftrag des Landesumweltamtes NRW Gefäßversuche zum mikrobiellen Abbau von PAK in belasteten Böden unter Freilandbedingungen über 74 Wochen durch. Ziel war es, verschiedene Möglichkeiten der Optimierung des mikrobiologischen PAK-Abbaus im Sinne von Landfarming- und Bodenmietenverfahren zu testen, die beobachtete Abnahme der PAK-Gehalte bestimmten Prozessen zuzuordnen und die Ursachen der Grenzen des PAK-Abbaus zu untersuchen.

Es wurden zehn Bodenproben (Mischproben) unterschiedlichen Stoffbestandes und Belastungsgrades von neun Altlastflächen verwendet. Die Bodenproben enthalten neben den PAK weitere organische und anorganische Schadstoffe, deren Gehalte - ebenso wie weitere allgemeine Bodenkennwerte - zu Beginn der Versuche bestimmt wurden.

Um die Aktivität der bodeneigenen Mikroorganismen entscheidend zu erhöhen und damit den (co-)metabolischen Abbau der PAK wesentlich zu steigern, wurden den Bodenproben gut abbaubare organische Substanzen (Ackerbohnen/Senf-Stroh, Klee gras-Heu und kommunaler Grünschnitt), Nährstoffe in Form mineralischer Düngemittel (N, P, K, Mg) und zu sauren Bodenproben Kalk (CaCO_3) in verschiedenen Behandlungsvarianten zugegeben. Die je nach Variante unterschiedlichen Zugaben lagen deutlich über den in der landwirtschaftlichen Praxis üblichen Ausbringungsmengen. Da nur mobile und damit verfügbare PAK einem mikrobiellen Abbau unterliegen, wurden den Proben in einigen Varianten über die vorhandenen pedo- und biogenen Lösungsvermittler hinaus synthetische Tenside zugegeben. Die Auswahl dieser Tenside erfolgte nach Vortests. Über den Verlauf von 74 Wochen

wurden die genannten Zugaben unter Durchmischung des Bodenmaterials drei- bzw. viermal erneuert. Durch die Einsaat von Klee gras wurde ein Bewuchs der Versuchsgefäße erzielt, so daß erste Hinweise zur Toxizitätsveränderung der belasteten Bodenproben während des Versuchsverlaufs und zur Wirkung der Bodenbehandlungen auf das Pflanzenwachstum möglich sind.

Die in bestimmten Zeitabständen entnommenen Bodenproben wurden zum einen mittels bodenmikrobiologischer Tests auf ihre mikrobielle Aktivität, zum anderen nach Extraktion und HPLC-Messung auf ihre Gehalte an 15 PAK der US-EPA-Liste (ohne Acenaphthylen) untersucht. Hierbei handelt es sich um folgende Verbindungen: Naphthalin, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[a]pyren, Dibenz[ah]anthracen, Benzo[ghi]perylen und Indeno[1,2,3-cd]pyren.

Der Anteil physikalisch-chemischer Prozesse insbesondere von Ausgasungseffekten an der Abnahme der PAK konnte mit Hilfe Quecksilber-sterilisierter Bodenproben abgeschätzt werden; der Austrag durch das Sickerwasser wurde durch Extraktion der gelösten sowie an ausgetragene Feststoffe gebundenen PAK und Messung derselben abgeschätzt. Der mikrobielle Einbau und die Festlegung von PAK in bodeneigenen organischen Substanzen (z.B. Huminstoffe) kann bei dieser Versuchskonzeption jedoch nicht von dem mikrobiellen Abbau unterschieden werden, so daß die festgestellte mikrobiell bedingte PAK-Abnahme auf die Wirkung beider Prozesse zurückzuführen ist.

Insgesamt ist es das Ziel der durchgeführten Untersuchungen:

- die mikrobielle Abbaubarkeit von PAK in belasteten Bodenproben zu ermitteln
- die Abnahme der PAK-Gehalte in ihrem zeitlichen Verlauf zu beschreiben und definierten Prozessen und Bodeneigenschaften zuzuordnen
- Möglichkeiten zur Steigerung und Beschleunigung des PAK-Abbaus durch Aktivierung der Mikroorganismen über verschiedene Bodenvorbehandlungen zu erproben
- Aussagen über die Wirkung von Tensidzugaben auf den PAK-Abbau zu treffen
- Hinweise zur Prognose der Erfolgsaussichten mikrobieller Sanierungsmethoden zu geben.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 BODENMATERIAL

2.1.1 Auswahl der Bodenproben

Bestimmte Altlast-Bodenmaterialien sind für die Anwendung von Verfahren der mikrobiellen Sanierung von vornherein ungeeignet; extrem hoch belastete Substrate, Bauschutt mit nur geringem Feinkornanteil und Teer in Phase erfordern eher chemische oder physikalische Sanierungsmethoden wie Bodenwäsche, Verbrennung u.a.. So wurde unter 21 ausgesuchten PAK-belasteten Altstandorten in NRW nach Auswertung von Gutachten und Ortsbegehungen eine Vorauswahl getroffen und von elf Standorten zwölf Bodenmischproben mit Bodenmengen von 100 bis 150 kg entnommen. Bei den ausgewählten Flächen handelt es sich in der Hauptsache um ehemalige Kokerei- und Gaswerkstandorte (Tab.1).

Ein gewachsener Boden konnte nur am Standort Herne beprobt werden. Die hier vorliegende Parabraunerde ist durch technogene Aufschüttungen überprägt. Es wurde Material aus zwei Tiefen des Profiles entnommen, so daß Ober- (Hea) und Unterbodenmaterial (Heb) zur Verfügung stehen.

An den Standorten Aachen (Ac) und Schwerte (Sh) lagen mit Bauschutt vermischte Verfüllungen vor, die als Allopararendzinen angesprochen werden können. Der Probennahmebereich am Standort Aachen war vormals oberflächlich versiegelt. Bei den übrigen Standorten lag das beprobte Material als Haufwerk von Erdaushub vor, welches teilweise bereits großtechnisch auf Partikelgrößen bis zu $\leq 3,3\text{cm}$ vorgesiebt war.

Die Bodenmaterialien wurden auf dem Gelände des Institutes für Bodenkunde (Bonn) im feldfeuchten Zustand auf $<2\text{mm}$ abgesiebt und in Metallfässern zwischengelagert.

Aufgrund der geringen PAK-Belastung des Materials aus Schwerte (Sh) und der v.a. als verharzte Teerklumpen vorliegenden Kontamination in dem Bodensubstrat aus Minden (Mi) wurden die Proben dieser Standorte nicht in die weiteren Untersuchungen einbezogen. Damit standen für die Untersuchungen drei Bodenproben hoher Belastung (959 - 1300 mg/kg^1), eine mittlerer Belastung (318 mg/kg^1), fünf Bodenproben geringerer Kontamination (115 - 177 mg/kg^1) und eine leicht kontaminierte Probe (52,1 mg/kg^1) zur Verfügung (Tab.1).

¹Summe PAK nach US-EPA-Liste (ohne Acenaphthylen)

Tab.1: Charakteristika der beprobten Altlasten-Standorte (Abkürzungen siehe Seite III)

Nr.	Ort	ehem. Nutzung	Nutzung 1992	Ansprache	Entnahmetiefe(m)	Σ-PAK EPA* mg/kg	weitere Schadstoffe
1	Ac	Gaswerk	Industrie	Allopararendzina Bauschutt; Verfüllung	1,5	1286	NH ₃ , Phenole, PCB,BTX,EOX, Mineralöl-KW As,Cd,Pb,Zn
2	Bo	Kokerei	keine	Erdaushub mit Bauschutt	Haufwerk	1300	Cyanide, PCB, As, Cr, Pb
3	Dd	?	?	Erdaushub ?	?	177	PCB, Cd
4	Ge	Kokerei & Gaswerk	keine	Erdaushub; vorgesiebt	Haufwerk	139	Cyanide, Sulfat
5	Ko	Brikettfabrik	Bauplatz	Erdaushub mit Bauschutt; vorgeseibt	Haufwerk	169	Pb, Zn
6	Mi	Gaswerk	Werkshof	Bauschutt, Erdaushub	Haufwerk	175**	CKW
7	Ra	Lagerplatz	keine	Erdaushub; vorgeseibt	Haufwerk	959	Phenole, EOX, PCB, Cd, Pb
8	Sh	Gaswerk	Parkplatz	Allopararendzina Bauschutt	Verfüllung 0,1 - 0,65	29,8**	Pb
9	So	Gaswerk	keine	Erdaushub	Haufwerk	115	PCB, Pb, Ni, Zn
10	Üb	Kokerei	keine	Unterbodenaushub	Haufwerk	318	BTX, Phenole, EOX, Cd, Hg
11	Hea	Kokerei	Ödland	überprägte Para- braunerde, Oberboden	0-0,45	141	PCB, Cyanide, Pb
12	Heb	-"	-"	-"-, Unterboden	0,45-0,80	52,1	Cyanide, Pb

(*Σ-EPA-PAK ohne Acenaphthylen; Extraktion mit Toluol/Aceton)

(** = Extraktion mit n-Hexan)

2.1.2 Allgemeine Kennwerte der Bodenproben

Die allgemeinen Bodenkennwerte sind in Tab. 2 aufgeführt.

Die pH-Werte der Bodenproben liegen vor allem im schwach sauren bis mäßig alkalischen Bereich. Lediglich die Probe Üb wies zu Beginn der Gefäßversuche eine sehr stark alkalische Bodenreaktion auf (pH 10,10), die jedoch bereits innerhalb von 16 Wochen in den schwach alkalischen Bereich zurückging (pH 7,97). Die Proben Hea und Heb sind sehr stark sauer und wurden, wie auch die Bodenprobe Bo, durch Kalkung in den schwach alkalischen Bereich eingestellt. Einige der Bodenmaterialien sind deutlich an Nährstoffen verarmt.

Tab.2: Kennwerte der Feinbodenfraktion der zehn Altlast-Bodenproben der Gefäßversuche (Abkürzungen s.S. III)

Bodenprobe		Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Üb	Hea	Heb
pH (CaCl ₂)		7,7	6,4	8,2	7,5	7,6	7,6	7,4	10,1	3,5	3,7
Corg (%)		5,8	16,6	2,2	5,1	5,8	6,8	4,4	2,2	25,7	3,4
C/N		33	23	33	31	31	36	20	38	32	19
CaCO ₃ (%)		6,3	0,23	5,2	2,4	1,4	2,7	1,2	2,0	n.n.	n.n.
T		SI2	Us3	SI2	SI4	SI4	SI4	SIu	UI4	SI4	UIs
e	gS	25,4	12,5	22,6	17,8	13,2	18,4	5,4	2,9	13,9	1,0
x	mS	27,1	15,8	32,7	34,9	20,7	33,2	18,8	4,3	21,5	12,5
t	fS	20,0	12,3	18,2	23,0	23,5	9,9	13,0	3,7	24,5	19,6
u	gU	10,9	22,7	13,2	6,8	16,9	17,3	28,8	49,2	20,6	40,6
r	mU	6,4	31,0	5,1	4,0	10,4	8,6	13,0	19,7	7,6	12,2
(%)	fU	3,3	1,2	2,8	3,3	3,7	3,8	6,3	4,5	3,2	3,9
	T	6,9	4,5	5,4	10,2	11,6	8,8	14,7	15,7	8,7	10,2
KAK _{pot} mval/100g		8,75	15,1	6,0	8,0	11,3	10,9	14,1	16,2	5,67	5,33
ped	Fe-d	15,6	44,4	8,15	8,93	13,5	12,2	12,6	7,10	12,9	2,84
-	Mn-d	0,642	0,311	0,205	0,083	0,276	0,420	0,335	0,130	0,045	0,021
Oxide	Al-d	1,89	1,80	0,990	0,632	0,951	2,01	1,38	1,40	0,382	0,284
(‰)	Fe-ox	6,78	14,8	2,96	3,88	6,65	6,23	7,95	3,65	3,45	0,597
	Mn-ox	0,554	0,138	0,146	0,102	0,287	0,443	0,340	0,125	0,017	0,003
	Al-ox	2,42	1,16	1,16	0,653	0,807	3,03	1,23	1,23	0,046	n.n.
P (mg/kg)	DL	110	11,0	41,1	63,0	92,5	229	86,3	54,8	11,4	12,5
	CAL	200	7,38	74,7	69,7	86,9	227	82,5	64,2	33,5	30,5
K (mg/kg)	CAL	287	2,00	275	228	116	601	18,5	57,5	91,5	48,0
	aust.	253	19,5	251	252	157	577	30,9	89,9	25,5	12,5
Mg (mg/kg)	CAL	495	81,8	1350	244	289	744	277	303	47,5	36,0
	aust.	117	42,2	168	103	113	346	91,9	48,8	13,0	16,0
Ca (mg/kg)	aust.	2840	5940	2790	2040	2320	1780	2660	5800	53,0	87,0
Na (mg/kg)	aust.	115	8,52	179	78,4	31,8	313	8,43	41,1	24,0	36,5
N-gesamt (‰)		1,39	5,09	0,56	1,17	1,58	1,42	1,78	0,47	4,59	1,48
NO ₃ -N CaCl ₂ (mg/kg)		141	76,0	22,1	32,0	16,4	14,9	6,30	27,4	3,58	1,48

Von der **Textur** sind die Bodenproben als lehmige Sande, Bo als sandiger Schluff, Üb und Heb als lehmige Schluffe anzusprechen. Gemeinhin werden Substrate sandiger Körnung als für eine mikrobiologische Sanierung besser angesehen (z.B. BRYNIOK 1991, HILLER 1992, MACKENBROCK 1992, PESCHLA & TIBERG 1993).

Neben den PAK enthalten die Bodenproben **weitere organische Schadstoffe** (Tab.3) und **potentiell toxische Elemente** (Tab.4).

Tab.3: Ausgangsgehalte (Probennahmetermin 16.06.1993) der für die Gefäßversuche verwendeten Bodenproben an PAK; BTX, EOX, Phenolen, Mineralöl-KW (nur für die Probe Ac bestimmt), Cyaniden und PCB (mg/kg Boden) (THIELE & BRÜMMER 1994)

Substanz	Bodenprobe									
	Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Üb	Hea	Heb
Σ-PAK*	1286	1300	177	139	169	959	115	318	141	52,1
Benzol	0,014	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,013	n.n.	n.n.
Toluol	0,031	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,018	n.n.	n.n.
m,p-Xylol	0,018	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,011	n.n.	n.n.
o-Xylol	0,015	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Ethylbenzol	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,010	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Isopropylbenzol	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
N-Propylbenzol	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
2-Ethyltoluol	0,023	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
3-Ethyltoluol	0,018	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,011	n.n.	0,011	n.n.	n.n.
4-Ethyltoluol	0,018	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,011	n.n.	0,011	n.n.	n.n.
1,3,5-Tri-methylbenzol	0,169	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,017	n.n.	0,017	n.n.	n.n.
1,2,4-Tri-methylbenzol	0,090	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,049	n.n.	0,049	n.n.	n.n.
1,2,3-Tri-methylbenzol	0,100	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,049	n.n.	0,049	n.n.	n.n.
Σ-BTX	0,599	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,147	n.n.	0,179	n.n.	n.n.
Σ-EOX	0,28	0,30	0,78	0,94	0,31	1,23	0,52	1,77	1,79	1,35
Phenole	12	n.n.	1	n.n.	n.n.	1	n.n.	1	n.n.	0,6
KW (Mineralöl)	400									
Cyanide	12,5	111	2,6	0,70	2,7	1,9	3,9	18,2	178	155
PCB**	+	+	+	n.n.	n.n.	+	+	n.n.	+	n.n.

n.n. = nicht nachweisbar: <0,010mg/kg Boden; Phenole <0,5mg/kg Boden

* = Summe PAK nach US-EPA-Liste (ohne Acenaphthylen)

** = Information des Institutes für Hygiene, Ruhr-Universität Essen: PCB nur für die Fraktion 0,1-0,2mm bestimmt: + = Gehalte zwischen 0,050 -

0,250 mg/kg Feinstboden

Tab.4: Nach Königswasseraufschluß und 1M NH₄NO₃-Extraktion ermittelte Gehalte potentiell toxischer Elemente (mg/kg Boden)

	Bodenprobe									
	Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Üb	Hea	Heb
	Gesamtgehalte nach Königswasseraufschluß									
As	111	40,2	13,6	20,1	23,7	18,8	12,0	28,9	25,0	8,38
Cd	3,20	0,983	6,35	0,633	0,983	2,18	1,70	7,52	0,233	0,217
Co	15,5	17,4	6,55	6,55	13,5	13,7	10,8	7,13	2,78	1,43
Cr	29,9	102	16,3	16,6	58,7	36,5	59,9	24,5	11,3	4,59
Cu	143	127	21,1	37,5	66,4	302	83,2	29,5	40,5	36,3
Ni	35,4	33,3	15,8	16,8	38,0	41,2	66,5	18,6	6,96	3,61
Pb	272	206	80,3	86,9	170	167	100	51,8	114	64,3
Zn	1140	274	190	132	340	676	522	135	64,7	37,7
	mobile Anteile nach Extraktion mit 1M NH ₄ NO ₃									
As	0,152	n.n.	0,071	0,053	n.n.	0,055	0,288	0,133	n.n.	n.n.
Cd	0,016	0,007	0,026	0,013	0,006	0,012	0,010	0,040	0,028	0,028
Co	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,061	0,031	n.n.
Cr	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,110	n.n.	n.n.
Cu	1,03	0,069	0,122	0,132	0,268	1,39	0,527	0,499	0,133	0,031
Ni	0,379	n.n.	0,402	0,463	0,436	n.n.	n.n.	n.n.	0,599	0,527
Pb	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,081	n.n.	n.n.	n.n.	4,73	6,19
Zn	1,53	0,087	0,203	0,197	0,225	0,644	0,182	0,588	3,25	2,08

Trotz z.T. erhöhter Gesamtgehalte (aufschließbar durch Königswasser) an potentiell toxischen Elementen sind deren mobile Anteile (extrahierbar durch 1M NH₄NO₃) aufgrund der zumeist hohen pH-Werte und hohen Pufferkapazität der Böden meist gering und mit Ausnahme der Cu-Werte in der Probe Ra als unbedenklich einzustufen.

Die Gehalte an **organischem Kohlenstoff** (Corg) sind durch Beimengungen technogener Substrate z.T. erheblich erhöht. Zu diesen **technogenen Substraten** zählen Bauschutt, Müll, Teerreste, Kohle, Aschen, Granulate und Haldenberge-Material (Tab. 24.1-2, im Anhang). Mit Hilfe der Dichtentrennung nach VAN AFFERDEN et al. (1992a, verändert) konnten in einem Vortest durch Abtrennen der Leichtgutfraktion in KI-Lösung (1,61g/ml) die Corg-Gehalte der Bodenprobe Bo auf 11,2% bzw. Hea auf 14,4% reduziert werden. Dabei ist auch diese Trennung noch unvollständig, wie auch KRAATZ (1995) feststellte.

Tab.5 : Charakteristika der Skelettanteile (X, > 2mm) der Altlast-Bodenproben

Bd.	kg X je 100kg Feinboden	Charakterisierung	organoleptischer Befund	PAK von X n. EPA (mg/kg)	PAK ungesiebte Probe (mg/kg)	PAK Feinboden (mg/kg)
Ac	126	Bauschuttgrus, Teerpartikel, Schlacken, bis 10cm	NH ₃ , Teer	471	833	1286
Bo	57	Bauschutt, Schlacken, z.T. bis 10cm	unauffällig	1560	1390	1300
Dd	133	Kiesel, abgerundeter Bauschuttgrus, z.T. bis 3cm	unauffällig	173	175	177
Ge	57	Kiesel, Bauschutt, z.T. Kohle, bis 3cm	unauffällig	136	138	139
Ko	31	v.a. kleinere Kiesel, wenig Material > 1cm	unauffällig	127	159	169
Mi	35	kleine Kiesel, wenig Bauschutt, Teerklumpen, kaum > 4cm	Teer			175
Ra	58	Kiesel (max. 5cm), Ziegelgrus, Harzbröckchen	unauffällig	978	966	959
Sh	148	gebrochener Bauschutt, Großteil < 5cm	unauffällig			29,8
So	4,4	v.a. Kiesel	unauffällig	61,6	113	115
Üb	51	Kiesel bis ~ 10cm, geringer Anteil kleinerer Bauschuttgrus- und Schlackenstücke	sehr stark BTX und Naphthalin	122	252	318
Hea	43	schwarze Schlacken, Kohlestücke, bis ~ 5cm	unauffällig	145	142	141
Heb	3,1	wenige Steine, kaum > 0,5cm	unauffällig	108	53,8	52,1

Um eine ausreichende Probenhomogenität zu erreichen und die Untersuchungen auf die Feinbodenfraktion zu beschränken wurden die z.T. erheblichen **Skelettanteile** abgesiebt. In diesen findet sich meist eine ca. gleich hohe Konzentration an PAK wie in dem Feinbodenmaterial (vgl. Tab.3 und 5 sowie Tab.25, im Anhang). Höher sind diese lediglich in dem Skelett-Material der Probe Bo und deutlich höher in dem der Probe Heb, was aufgrund der geringen Mengenanteile der Fraktion > 2mm jedoch ohne Auswirkungen ist. Der PAK-Gehalt ungesiebter Proben erhöht sich gegenüber dem des Feinbodens für die Bodenprobe Bo auf 1390 mg/kg, bleibt aber für die übrigen Materialien praktisch gleich. Die PAK-Belastung der Proben Ac, Ko und Üb wird durch den Skelettanteil sogar vermindert; in diesen Substraten sind die Polycyclen in der Feinbodenfraktion angereichert.

2.2 GEFÄSSVERSUCHE

2.2.1 Aufbau und Anlage der Gefäßversuche

Für die Gefäßversuche wurden zehn Bodenproben von neun Standorten ausgewählt. Davon wurden vier in einem großen **Untersuchungsprogramm** mit 14 Varianten, fünf in einem Programm mit sechs Varianten und eine Bodenprobe mit vier Varianten untersucht. Die Gefäßversuche umfassen damit insgesamt 90 Varianten (Tab.6); mit Wiederholungen (.../b) und zwei zusätzlichen Varianten zur Kalkwirkung (C0, C1) sind es 98 Gefäße.

Zur Steigerung der mikrobiellen Aktivität und damit des mikrobiellen PAK-Abbaus wurden den Bodenproben in verschiedenen Varianten organische und mineralische Dünger, Tenside und bei Bedarf Kalk (Bodenproben Bo, Hea und Heb; ohne Kontrollen) zugegeben.

Tab.6: Plan der Versuchsvarianten der Gefäßversuche zum mikrobiellen Abbau von PAK in belasteten Böden (o.S. = organische Substanz, N-Düngung (kg NO₃-N/ha); Tensidzugabe mit 0,1% Aktivsubstanz) (Abkürzungen s.S. III)

Variante	Art der o.S.	Menge o.S.(%)	N-Düngung	Tensid	Variante	Art der o.S.	Menge o.S.(%)	N-Düngung
großes Untersuchungsprogramm					mittleres Untersuchungsprogramm			
-	Kontrolle unbehandelt				-	Kontrolle unbehandelt		
K1	K	1,5	200		K1	K	1,5	200
K1T	K	1,5	200	Triton	K2	K	3,0	400
K2	K	3,0	400		A1	A	1,5	200
K2T	K	3,0	400	Triton	A2	A	3,0	400
A1	A	1,5	200		-Hg	Kontrolle Hg-sterilisiert		
A1T	A	1,5	200	Triton	kleines Untersuchungsprogramm			
A2	A	3,0	400		-	Kontrolle unbehandelt		
A2T	A	3,0	400	Triton	K1	K	1,5	200
K1G	K	1,5	200	Genapol	K2	K	3,0	400
K1P	K	1,5	200	Plantaren	-Hg	Kontrolle Hg-sterilisiert		
K1S	K	1,5	200	Synperonic				
G1	G	1,5	200					
-Hg	Kontrolle Hg-sterilisiert							

Bei der Auswahl der drei verschiedenen **organischen Substanzen** stand ein möglichst enges C/N-Verhältnis als Parameter der biologischen Abbaubarkeit und eine geringe eigene Schadstoffbelastung im Vordergrund. Klee gras-Heu (K) von

einem Weideaufwuchs, ein Gemisch aus Ackerbohnen- und Senfstroh (A) aus einem Zwischenfruchtanbau und kommunaler Grünschnitt (G) von einem Rasenaufwuchs einer Parkanlage wurden von verschiedenen Universitäts-Instituten zur Verfügung gestellt. Die Materialien wurden luftgetrocknet, auf eine Länge von 2cm gehäckselt und den Bodensubstraten in Mengen von 1,5 und 3,0 Gewichts-% Trockenmasse beigemischt. Dies entspricht Mengen von 585 und 1170 dt/ha.

Die Analyseergebnisse der organischen Substanzen in Tab.7 zeigen, daß das Klee gras-Heu gegenüber dem Ackerbohnen/Senf-Stroh und dem kommunalen Grünschnitt ein ca. doppelt so weites C/N-Verhältnis besitzt. Daß der frühe Rasenschnitt einen höheren N-Gehalt hat als der späte, ist auf die naturgemäßen Qualitätsschwankungen im Jahresverlauf zurückzuführen. Material des späten Schnittes fand bei den Erneuerungen der Düngerzugaben Verwendung.

Tab.7: Charakteristika der in den Gefäßversuchen als Zugaben verwendeten organischen Substrate (Abkürzungen s.S.III)

	K	A	G 1	G 2
N(‰)	14,3	28,7	41,5	32,5
C(%)	56,0	55,0	58,0	54,0
C/N	39	19	14	17

(G 1 = Grünschnitt: Schnitt vom 05.04.93; G 2 = Schnitt vom 23.09.93)

Die Zugaben von **mineralischen Düngemitteln** sollten die benötigten Nährstoffe in leicht löslicher Form zur Verfügung stellen. Um gleichzeitig eine zusätzliche Sauerstoffquelle für mikrobielle Abbauvorgänge zu liefern, wurde Stickstoff in der Nitratform als KNO_3 in den Mengen 200kg/ha (= 0,055 ‰) zur einfachen organischen Düngung (1,5%) und 400kg/ha (= 0,11 ‰) zur doppelten organischen Düngung (3,0%) gegeben. Zwar ist zur Spaltung aromatischer Kerne stets O_2 nötig, im Zusammenspiel mit Nitrat als Wasserstoffakzeptor kommt es aber zu einer raschen Umsetzung von Metaboliten (OTTOW 1988). Erforderlich ist Nitrat bei einem möglichen kurzzeitigen Auftreten von anaeroben Bedingungen (BEYER 1991).

Die weiteren verwendeten Düngemittel waren Superphosphat, Magnesiumchlorid und 40er Kali, die in Mengen zur Düngung der Bodenproben entsprechend Versorgungsstufe D-E (LUFA LK Rheinland) eingemischt wurden. Zur **Aufkalkung** der Bodenproben Hea, Heb und der Probe Bo (jeweils ohne die Kontrollen) wurde Calciumcarbonat eingesetzt. Es wurden im Durchschnitt aller Varianten pH-Werte von 6,7 (Bo), 6,8 (Hea) und 7,0 (Heb) eingestellt. Zusätzlich wurden von der Bodenprobe Hea zwei Varianten zur Kalkwirkung, C0 (ohne Kalk) und C1 (mit halber

Kalkmenge) bei gleicher sonstiger Düngung wie in Variante HeaK2 (diese also mit C2) angesetzt. Entsprechend stellten sich über den gesamten Versuchszeitraum gemittelt, durchschnittliche pH-Werte von 5,9 (C0), 6,5 (C1) und 6,8 (C2) ein. Die Zugaben wurden mechanisch mit den feldfeuchten und auf 2mm abgeseibten Bodenproben vermischt.

Die **Tenside** wurden als wässrige Lösungen den Bodenproben in einer Menge von 0,1% Aktivsubstanz je Gewichtseinheit Boden zugegeben. Auch nach der Tensidzugabe erfolgte ein mechanisches Vermischen des Bodenmaterials. Es wurden die Tenside Genapol UD 080[®] (G), Plantaren 225[®] (P), Synperonic LF/RA 30[®] (S) und Triton X-100[®] (T), eingesetzt. Nähere Angaben zur Auswahl der Tenside erfolgen in Kap.5.3.3.1.

Abschließend wurde das Material in **Mitscherlich-Vegetationsgefäße** gefüllt. Dabei handelt es sich um emaillierte Metallgefäße von 6,2 l Inhalt; eine untergesetzte emaillierte Schale erlaubt das Auffangen von Sickerwasser. Zur **Begrünung** der Gefäße wurde ein Gemenge aus Klee und Gras (Weidemischung Typ G2) eingesät. Die für die Hg-sterilisierten Varianten verwendeten **Kleingefäße** sind Glasgefäße von 1,0 l Inhalt, die zur Lichtabschirmung außen lackiert wurden. Anschließend wurden die Gefäße als **Blockanlage im Freiland** aufgestellt, so daß sie den natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt waren.

2.2.2 Pflege der Gefäßversuche

Die Gefäßversuche begannen am 16.06.1993 und endeten nach 74 Wochen am 16.11.1994. Tab.8 gibt einen Überblick über die erfolgten **Probennahmen**. Die Quecksilber-sterilisierten Varianten (Hg-Var.) wurden nur zu ausgewählten Terminen beprobt (+).

Täglich wurden die **Wetterdaten** Lufttemperatur und Niederschlag erfaßt. In Perioden besonders trockener Witterung war es nötig, die Gefäße zu bewässern. Dies erfolgte einheitlich mit 0,5l deionisiertem Wasser je Gefäß.

Das anfallende **Sickerwasser** wurde während des Zeitraumes zwischen den Probennahmeterminen kontinuierlich gesammelt, dessen Volumen bestimmt und parallel zu den Bodenproben auf PAK analysiert. Ab dem 12.01.94 wurde lediglich das angefallene Sickerwasservolumen bestimmt; PAK-Analysen erfolgten nicht mehr. Eine Nährstoffauswaschung und -verlagerung mit dem Sickerwasser wurde nicht untersucht.

Tab.8: Probennahmezeitpunkte und durchgeführte Laboruntersuchungen des Bodenmaterials aus den Gefäßversuchen (PAK = Untersuchung auf PAK-Gehalte; TS = Trockensubstanz; DHA = Dehydrogenaseaktivität; SIR = Substrat-induzierte Respiration)

Probennahme				Laboruntersuchungen				
Nr.	Termin	Abstand	Laufzeit	PAK	TS	DHA	SIR	Hg-Var.
1)	16.06.93		Beginn	1 * 3	1 * 3	1 * 3	1 * 2	
2)	07.07.93	3 Wochen	3 Wochen	1 * 3	1 * 3	1 * 3	1 * 2	
3)	18.08.93	6 Wochen	9 Wochen	1 * 3	1 * 3	1 * 3		+
4)	14.10.93	8 Wochen	17 Wochen	1 * 3	1 * 3	1 * 3	1 * 2	+
5)	12.01.94	13 Wochen	30 Wochen	1 * 3	1 * 3	1 * 3		+
6)	06.04.94	12 Wochen	42 Wochen	1 * 3	1 * 3	1 * 3	1 * 2	+
7)	01.06.94	8 Wochen	50 Wochen	(1 * 3)	1 * 3	1 * 3		
8)	27.07.94	8 Wochen	58 Wochen	1 * 3	1 * 3	1 * 3	1 * 2	+
9)	21.09.94	8 Wochen	66 Wochen					
10)	16.11.94	8 Wochen	74 Wochen	1 * 3	1 * 3	1 * 3	1 * 2	+

Um die mikrobielle Aktivität und damit einen potentiellen PAK-Abbau auf einem hohen Niveau zu halten, ist es notwendig den Mikroorganismen ständig leicht umsetzbare Nährstoffquellen anzubieten. Da bei den vorausgehenden Probennahmen festgestellt werden konnte, daß die zugegebenen organischen Materialien praktisch restlos umgesetzt worden waren, wurden die Zugaben am 20.10.93, 07.06.94 und 08.09.94 entsprechend dem Variantenschema zum Versuchsbeginn (16.06.93) erneuert. Lediglich die N-Düngung zu den Varianten mit Klee gras-Heu (K) wurde am 20.10.93 mit um ein Viertel erhöhter Aufwandmenge durchgeführt, da die Einsaaten dieser Varianten in der Vegetationsperiode 1993 N-Mangel zeigten. Zusätzlich erfolgte am 12.04.94 eine alleinige N-Gabe von 1,98 und 3,94g KNO₃ je Gefäß entsprechend 200 und 400kg N/ha.

Die Freilandversuche begleitend wurde laufend der **Aufwuchs der Klee gras-einsaat** in den Versuchsgefäßen begutachtet. Zur Vereinheitlichung der **subjektiven Bewertung** der Einsaat wurde ein Zehn-Punkte-Schema angewendet, wobei 10 Punkte einen optimalen Aufwuchs charakterisieren, kein sichtbares Pflanzenwachstum hingegen mit 0 Punkten beschrieben wird. Daneben war es zu den Zeitpunkten der Erneuerung der Zugaben nötig, den vorhandenen Aufwuchs abzuschneiden und so gleichzeitig möglich, dessen **Trockenmasse** zu bestimmen. Das Schnittgut wurde nach Trocknung bei 300C und Häckselung auf 2cm den Bodenproben mit der Düngergabe wieder zugemischt. Die Menge an Schnittgut wurde dabei auf die Gabe an organischer Substanz angerechnet.

2.3 PROBENNAHME, PROBENLAGERUNG UND PROBENAUFBEREITUNG

2.3.1 Bodenproben

Unmittelbar nach der Entnahme aus den Versuchsgefäßen wurden die Proben tiefgekühlt gelagert. Für die folgenden Untersuchungen zur mikrobiellen Aktivität der Bodenproben wurden diese in einem mehrtägigen, schonenden Verfahren aufgetaut und im feuchten Zustand auf <2mm gesiebt. Hierdurch werden gröbere Partikel der zugesetzten organischen Materialien und Wurzelstücke der Klee-gras-einsaat abgetrennt, die bei den Tests zur mikrobiellen Aktivität zu erheblichen Verfälschungen der Ergebnisse führen würden. Zudem wird dadurch eine weitere Homogenisierung des Probenmaterials erreicht und ein möglicher Verdünnungs-effekt durch die Zugaben in den Bodenmaterialien vermieden.

Nach der Durchführung der mikrobiologischen Tests wurden die Proben im Umlufttrockenschrank bei 30°C getrocknet. Aggregate, die sich wieder gebildet hatten, wurden schonend zermörsert und die Probe neuerlich durchmischt. Da-durch war für die folgende PAK-Bestimmung eine maximale Homogenität der Bodenproben gewährleistet.

2.3.2 Sickerwasserproben

Die Entnahme und Untersuchung von Sickerwasserproben erfolgte von allen 90 Gefäßen (ohne die Hg-sterilisierten Kontrollen) regelmäßig in den Zeiträumen zum 05.07.93, 22.07.93, 06.08.93, 10.08.93, 04.10.93, 13.10.93 und 10.01.94. Die Sickerwasserproben wurden bis zur Aufbereitung im Labor in Glasgefäßen bei 40C im Dunkeln gelagert.

Zunächst wurde das gesamte in den Auffangschalen der Versuchsgefäße ange-fallene Wasser gesammelt und im Labor aufbereitet. Mit dem Termin vom 04.10.93 wurde nach der Bestimmung der insgesamt angefallenen Sickerwasser-menge jeweils nur noch ein Aliquot von ca. 500ml zur Aufbereitung und Analyse im Labor gesammelt.

Nach dem 12.01.94 wurden lediglich die angefallenen Sickerwassermengen quantifiziert; eine Analyse auf PAK erfolgte nicht mehr.

2.4 BESTIMMUNG DER ALLGEMEINEN BODENKENNWERTE

Zur Bestimmung der allgemeinen Bodenkennwerte wurden die im folgenden aufgeführten Methoden angewendet (1. - 12.: SCHLICHTING et al. 1995):

1. pH-Wert: in 0,01M CaCl_2 ; Boden:Lösungsverhältnis 1:2,5; Messung mit Einstabmeßkette nach Aufschütteln und dreistündiger Reaktionszeit
2. Corg-Gehalt: Bestimmung des Glühverlustes bei 500°C
3. CaCO_3 -Gehalt: Gasvolumetrisch nach SCHEIBLER
4. Textur: Sieb- und Pipettanalyse nach KÖHN und gravimetrische Bestimmung des Skelettanteils
5. Potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}): nach MEHLICH
6. Bestimmung der Gehalte an pedogenen Oxiden mittels der Dithionit-Citrat-Bicarbonat-Methode (d) nach MEHRA und JACKSON und der Oxalatmethode (ox) nach TAMM und SCHWERTMANN
7. Verfügbares Phosphat: mittels DL-Extraktion nach EGNER-RIEHM und CAL-Extraktion nach SCHÜLLER
8. Austauschbares K und Mg: mittels CAL-Extraktion sowie durch Ba^{2+} -Austausch nach MEHLICH (aust.)
9. Austauschbares Ca und Na: mittels Ba^{2+} -Austausch nach MEHLICH (aust.)
10. Stickstoff-Gehalt: Gesamtgehalt nach KJEHLDAHL-Aufschluß und CaCl_2 -löslicher NO_3 -N-Anteil nach HOUBA et al.
11. Elementgehalte: Gesamtgehalte mittels Königswasseraufschluß nach VDLUFA und Bestimmung der mobilen Gehalte mittels 1M NH_4NO_3 -Extraktion nach ZEIEN und BRÜMMER der Elemente Al, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S und Zn (s. DIN-Vornorm 1995)
12. Ermittlung der Bodenfeuchte der feldfeuchten Proben (ff): lufttrocken (lutro = Trocknung bei 300°C) und absolut trocken (atro = Trocknung bei 1050°C)
13. Lichtmikroskopische Untersuchung der Bodenproben: nach MEUSER (1993)
14. Phenole: Gesamtgehalt photometrisch nach DEV H16, DIN 38 409, Teil 16 (NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN 1984a)
15. Kohlenwasserstoffe: Gesamtgehalt IR-spektroskopisch, nach DEV H18, DIN 38 409 (NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN 1982)
16. Leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX): als statische Dampf-raumanalyse, Additionsmethode mit GC-ECD und GC-MS-Messung, VDLUFA
17. EOX: Bestimmung des Summenparameters nach DEV H8, DIN 38 409, Teil 8 (NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN 1984b)

18.Cyanide: Gesamtgehalt nach DEV D14, DIN 38 405, Teil 14 (NORMENAUS-
SCHUSS WASSERWESEN 1988)

2.5 BESTIMMUNG DER MIKROBIELLEN AKTIVITÄTEN

Zur Bestimmung der Aktivität der Mikroorganismen in den Bodenproben der Gefäßversuche wurden der Dehydrogenasetest nach THALMANN (1967, 1968) und die Methode der Substrat-induzierten Respiration nach ANDERSON & DOMSCH (1978) angewandt.

Bei der Ausführung des **Dehydrogenasetests** (DHA) zeigte sich, daß viele Bodenproben aufgrund einer starken Eigenfärbung sehr hohe Blindwerte aufwiesen, so daß trotz hoher Meßwerte keine Aktivitäten mehr bestimmt werden konnten. Teilweise nicht mehr meßbar hohe Aktivitäten wurden gerade in Verbindung mit der Variante K2 festgestellt. Bei einer vorherigen Autoklavierung des Probenmaterials war dagegen keine DHA meßbar. Somit sind rein chemische Ursachen für diese Meßwerte auszuschließen. Das gleiche trat zum Probennahmetermin 16.11.94 bei fast allen Proben auf. Dieses Phänomen wurde auch bei anderen Untersuchungen im Zusammenhang mit Altlastböden beobachtet (NECKER 1994).

Auf die von ALEF (1993) kritisierte Umrechnung auf die Biomasse wurde bei der Auswertung der Ergebnisse der **Substrat-induzierten Respiration** (SIR) verzichtet. Dennoch werden die Begriffe SIR und mikrobielle Biomasse im folgenden synonym verwendet. Bei eigenen Laborexperimenten zeigte sich, daß auch eine Halbierung von Probeneinwaage und Meßdauer die Meßergebnisse nicht verändert.

Bei der Vorauswahl der Tenside für die Gefäßversuche war neben einer guten PAK-Extraktionsleistung auf eine möglichst geringe Mikroorganismen-Toxizität dieser Substanzen zu achten. Hierzu wurde neben der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität der **Fe(III)-Reduktionstest** (WELP & BRÜMMER 1985) angewendet, da dieser insbesondere zur Ermittlung von Dosis-Wirkungsbeziehungen geeignet ist.

Da in der Sanierungspraxis häufig der **Leuchtbakterienhemmtest** zur Dokumentation eines Sanierungserfolges herangezogen wird (z.B. BEYER 1991), wurde dieser exemplarisch an ausgewählten Bodenproben angewendet. Hierzu wurden Bodeneluate nach DEV S4, DIN 38 414, Teil 4 (NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN 1984c) angefertigt, jedoch abweichend von der Vorschrift statt mit 100g Boden auf 1000ml Wasser mit 20g Boden auf 200ml Wasser. Aufgrund der starken Trübung der Eluate war eine nachfolgende Mikrofiltration auf 0,45µm nötig, um Störungen bei der Messung zu vermeiden. Durch eine solche Filtration treten allerdings PAK-Verluste durch Adsorption an das Celluloseacetat-Material

auf. Aus diesem Grunde wird oft, abweichend von der DIN-Vorschrift, auf eine Filtration verzichtet. Die erhaltenen Eluate waren meist deutlich gefärbt. Die Bestimmung der Hemmung der Biolumineszenz erfolgte nach den Richtlinien der DEV-L, DIN 38 412, Teil 34 (NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN 1989); die Durchführung oblag dem LUA NRW, Düsseldorf, Labor Dr. Hälke.

Neben den aufgeführten Methoden wird oft auch die **Keimzahlbestimmung** zur Charakterisierung des Zustandes der Mikroorganismen herangezogen. Hierdurch wird aber weder die Aktivität noch die Zusammensetzung der Population erfaßt. So fand KUTZNER (1989) einen Anstieg der Keimzahlen nach Tensid-Behandlung von Bodenproben, stellte aber mit anderen Methoden gleichzeitig einen Rückgang der Organismenvielfalt fest. HUND et al. (1992) ermittelten im Verlauf von Laborversuchen zum PAK-Abbau nahezu konstante Zahlen kolonienbildender Einheiten, die parallel gemessene Aktivität der verschiedenen Populationen veränderte sich jedoch in Abhängigkeit von der PAK-Abnahme deutlich. Diese Ergebnisse, wie auch eigene Erfahrungen mit Keimzahlbestimmungen, ließen eine Anwendung der Methode als nicht sinnvoll erscheinen.

2.6 BESTIMMUNG DER PAK-GEHALTE

2.6.1 Bodenproben

Zur Bestimmung der PAK-Gehalte der Bodenproben aus den Gefäßversuchen wurde routinemäßig eine Soxhlet-Heißextraktion mit einem Gemisch von Toluol und Aceton (60:40 Volumenanteile) (nach TEBAAY et al. 1993, verändert) durchgeführt. Bei allen Methoden erfolgte eine Dreifachbestimmung der Proben. Da nach KRUMNÖHLER (1990) eine 7-stündige Extraktion die gleichen Ausbeuten wie eine 11-stündige liefert, wurde die kürzere Extraktionsdauer angewandt.

Heißextraktion mit Toluol/Aceton (60:40)

1. 5-15g (lutro) der Bodenprobe (je nach erwartetem PAK-Gehalt) über die gleiche Menge Na_2SO_4 (p.a., gekörnt) in eine Extraktionshülse (Cellulose) einwiegen
2. 50ml eines Gemisches von Toluol/Aceton (60:40) (p.a.) in die Vorlage geben
3. am Soxhlet bei einer Temperatur von 135°C unter Rückflußkühlung 7h extrahieren
4. Probenextrakte quantitativ in 50ml Meßkolben überführen und zur Eichmarke mit Toluol/Aceton auffüllen
5. ein Aliquot des Extraktes wird entsprechend der benötigten Verdünnung weiter aufgereinigt

6. Aufreinigung über Festphase (0,5g Kieselgel 60)
 - a) Konditionierung: 3*3ml Toluol/Aceton
 - b) Elution: 3*2ml Toluol
7. Eluat am Rotationsverdampfer bei 43°C Wasserbadtemperatur zur Trockene einengen
8. Rückstand mit 5ml Acetonitril (HPLC-Qualität) wieder aufnehmen
9. zur besseren Auflösung des Rückstandes Kölbchen für 0,5 - 1min in ein Ultraschallbad halten
10. Probe in Braunglas-Vials abfüllen und bis zur Messung bei 4°C im Dunkeln aufbewahren
- (11. bei ungelösten Feststoffen in der Probe ist diese über Celite zu filtrieren)

Da zu Beginn des Projektes noch keine allgemein anerkannte Methode zur PAK-Extraktion vorlag, wurden vergleichend weitere Methoden getestet:

n-Hexan-Extraktion nach REUPERT (1993)

1. 5g Feinboden (lutro) über die gleiche Menge Na₂SO₄ (p.a., gekörnt) in eine Extraktionshülse (Cellulose) einwiegen und vermischen
2. 50ml n-Hexan (p.a.) in die Vorlage geben
3. am Soxhlet bei einer Temperatur von 87°C unter Rückflußkühlung 7h extrahieren
4. Probenextrakte quantitativ in 50ml Meßkolben überführen und zur Eichmarke mit n-Hexan auffüllen
5. ein Aliquot des Extraktes wird entsprechend der benötigten Verdünnung weiter aufgereinigt
6. Aufreinigung über Festphase (0,5g Kieselgel 60)
 - a) Konditionierung: 10ml eines Gemisches von n-Hexan/Dichlormethan (1:1), anschließend 10ml n-Hexan
 - b) Elution: 2*3ml n-Hexan/Dichlormethan (1:1)
7. Eluat am Rotationsverdampfer bis auf ca. 0,5ml einengen
8. als "Keeper" 2ml internen Standard (200Tg 6-Methyl-Chrysen/l, in Acetonitril) zupipettieren
9. erneut auf ca 0,5ml abrotieren
10. mit Acetonitril auf ca. 4ml auffüllen
11. Probe in Braunglas-Vials abfüllen und bis zur Messung bei 4°C im Dunkeln aufbewahren

Aceton-Heißextraktion

Der Ablauf der Aceton-Heißextraktion lehnt sich an die n-Hexan-Methode nach REUPERT (1993) an. Abweichend werden lediglich zur Extraktion 25ml Aceton und zur Konditionierung und Elution des Kieselgels Aceton eingesetzt.

Aceton-Extraktion nach VDLUFA-Bonn

1. 10-25g lufttrockenen Feinboden (oder entsprechend größere Menge feldfeuchten Boden) in Schüttelgefäß einwiegen
2. mit 100ml H₂O (z. Grad.) befeuchten, bzw. bei feldfeuchten Proben deren Wassergehalt bestimmen und von den 100ml abziehen
3. 200ml Aceton (p.a.) zugeben und 16h im Dunkeln über Kopf schütteln
4. nach Sedimentation (Zentrifugation für 1/2h bei 800 U/min) der Feststoffe Aliquot von 200ml in Scheidetrichter überführen
5. 30g NaCl und 150ml Petrolether bzw. Dichlormethan (alles p.a.) zugeben und 2-5min schütteln, Wasserphase verwerfen
6. obere Phase über Na₂SO₄ trocknen, Aliquot abtrennen
7. Aufreinigung über Festphase (0,5g Kieselgel 60)
 - a) Konditionierung: 3*3ml Dichlormethan
 - b) Elution: 2*3ml Gemisch von Dichlormethan/n-Hexan 1:1
8. Eluat am Rotationsverdampfer zur Trockene einengen und in Acetonitril aufnehmen
9. Probe in Braunglas-Vials abfüllen und bis zur Messung bei 4°C im Dunkeln aufbewahren

Extraktion mit Tensiden

1. Eine 10g atro Boden entsprechende Menge feldfeuchter Boden wird mit 50ml Tensidlösung in einen Glaszentrifugenbecher eingewogen
2. 24h bei 22°C im Dunkeln über Kopf schütteln
3. Zentrifugation bei 1500 U/min für 30min bei 22°C
4. Aufreinigung über Umkehrphase (0,5g C18)
 - a) Konditionierung: 3*3ml Aceton, danach 3*3ml H₂O
 - b) 40ml des Extraktes auf die Säule pipettieren und am Vakuum durchziehen
 - c) C18-Säule im Stickstoffstrom für 15 - 30 min trocknen
 - d) Elution: 3*3ml Aceton

5. Eluat am Rotationsverdampfer bis auf ca. 0,5ml einengen
6. als "Keeper" 2ml internen Standard (200µg 6-Methyl-Chrysen/l, in Acetonitril) zupipettieren
7. erneut auf ca 0,5ml abrotieren
8. mit Acetonitril auf ca. 4ml auffüllen
9. Probe in Braunglas-Vials abfüllen und bis zur Messung bei 4°C im Dunkeln aufbewahren

2.6.2 Sickerwasserproben

Zunächst wurden die in den Auffangschalen der Gefäßversuche kontinuierlich gesammelten Sickerwasserproben durch Festphasenextraktion über C18-Umkehrphasenmaterial aufbereitet. Dieses sehr einfache Verfahren erwies sich jedoch als nachteilig, da die in den Sickerwässern kolloid gebundenen PAK-Anteile hierdurch nicht ausreichend erfaßt werden. Es sind aber in den Sickerwässern durch den Versuchsaufbau bedingt unterschiedlich hohe Gehalte an Feststoffen enthalten, die zudem den höchsten Anteil an der PAK-Gesamtmenge enthalten. Eine Erweiterung der Methode um eine Abfiltration dieser Festsubstanzen über Celite und anschließender Extraktion der Celite in der Soxhlet-Apparatur brachte zwar gute Ergebnisse, mußte aber wegen zu hohen Aufwandes (2tägiger Analysengang) verworfen werden.

Als Methode der Wahl wurde die Flüssig-flüssig-Extraktion mit n-Hexan (REUPERT & BRAUSEN 1991, verändert, REUPERT 1993) angewendet, wie sie auch von GERLICH et al. (1991) für solche Festsubstanz-haltigen Wasserproben empfohlen wird. Diese Methode steht in Anlehnung an den DIN Entwurf 38 407 F 8 (NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN 1991).

Flüssig-flüssig-Extraktion von PAK aus Sickerwasserproben

1. Von der aufgeschüttelten Wasserprobe 400ml Aliquot in einen Scheidetrichter füllen
2. 25ml n-Hexan auf die Probe geben und 2min schütteln
3. Wasser bis auf einen geringen Rest in mehreren Schritten ablassen, danach jeweils die Probe erneut aufschütteln
4. 2g Na₂SO₄ (p.a., gekörnt) zugeben und leicht schütteln
5. 20ml des n-Hexan-Extraktes abpipettieren und in einen 100ml Rundkolben überführen
6. n-Hexan am Rotationsverdampfer auf ca. 2ml einengen

7. Aufreinigung über Kieselgel-Festphase (s. Kap. 2.6.1, n-Hexan-Extraktion)
8. Eluat zur Trockene abrotieren und in 3ml Acetonitril aufnehmen
9. Probe in Braunglas-Vials abfüllen und bis zur Messung bei 4°C im Dunkeln aufbewahren

2.6.3 Messung der PAK an der HPLC und Datenauswertung

Die **Trennung und Quantifizierung der PAK** erfolgte an der HPLC mittels Wasser-Acetonitril-Gradienten unter Verwendung eines externen Standards. Bei Anwendung der Keeper-Technik im Extraktionsverfahren wurde zusätzlich 6-Methyl-Chrysen als interner Standard eingesetzt. Durch einen wellenlängenprogrammierbaren Fluoreszenzdetektor werden die PAK bestimmt, dem zur Absicherung der Ergebnisse ein UV-Detektor vorgeschaltet ist. Es werden 15 der 16 PAK der EPA-Liste ausgewertet; da Acenaphthylen keine Fluoreszenzeigenschaften besitzt und auch nur ein schwaches UV-Signal abgibt, wurde auf die Bestimmung dieser Substanz verzichtet. Wenn im folgenden von "EPA-PAK" die Rede ist oder "Summen der EPA-PAK (Σ -PAK)" aufgeführt werden, so ist Acenaphthylen darin nicht enthalten.

Das für die Untersuchung verwendete chromatographische System bestand aus folgenden Komponenten:

- Degasser: Erma ERC-3512
- zwei Doppelkolbenpumpen: Milton Roy consta Metric I und III
- Injektionssystem: Autosampler Spark Holland SPH 125
- Injektionsschleife: Rheodyne 20 μ l
- Stationäre Phase: Bakerbond PAH 16-Plus, MZ-PAH; 250*3mm
- Mobile Phase: Acetonitril-Wasser (Gradientenelution mit 0,5ml/min)
- UV-Detektor: Milton Roy spectro Monitor 3100
- Fluoreszenzdetektor: Jasco 821-FP
- Integrationssoftware: Milton Roy Axxiom 727

Es zeigte sich, daß neben den 15 PAK der EPA-Liste zahlreiche weitere (Stör-) Peaks in den Chromatogrammen auftreten, die eine automatische, rechnergesteuerte Integration nicht erlaubten.

Die **Verrechnung und Auswertung der Daten** erfolgte mit Hilfe der Statistik-Programmpakete SAS und SPSS sowie den üblichen PC-Programmen zur Tabellenkalkulation, Graphikgestaltung und Textverarbeitung. Die Meßreihen über mehrere

Zeitpunkte wurden mittels repeated measures-Varianzanalyse ausgewertet; die Vergleiche der Mittelwerte wurden mit dem Scheffé-Test berechnet.

2.7 GÜTE DER ANALYSEN

Die Güte eines Analysenverfahrens hängt ab von den erzielbaren Nachweisgrenzen (NWG) und Bestimmungsgrenzen (BG), der Wiederfindungsrate (WFR) sowie der Wiederholbarkeit und Richtigkeit.

Die **Bestimmung von NWG, BG und WFR des angewandten Extraktions- und Clean-up-Verfahrens** erfolgte mittels Additionsversuchen, die nach einem Rechen-schema von FREHSE & THIER (1991) ausgewertet wurden. Bis auf Naphthalin (WFR < 70%) lassen sich alle analysierten PAK bei niedrigen NWG und BG sowie hohen WFR mit der gewählten Methode sicher bestimmen (s. Tab.26, im Anhang). Die dennoch aufgeführten Naphthalin-Werte dienen lediglich einer halbquantitativen Einordnung.

Für die Extraktion der PAK wurde die in Kap.2.6 beschriebene **Soxhlet-Extraktionsmethode mit Toluol/Aceton** verwendet, weil sie im Vergleich zu anderen Verfahren meist höhere PAK-Anteile extrahiert (s. Tab.27 und 29, im Anhang).

Die **Richtigkeit und Reproduzierbarkeit** der Analytik wurde einerseits durch Tests mit **unterschiedlichen Aufschlußapparaturen** (s. Tab.28, im Anhang), andererseits durch die **unabhängige Bestimmung der PAK-Gehalte von drei Bodenproben beim LUA NRW, Düsseldorf und im Institut für Bodenkunde, Bonn** (s. Tab.29, im Anhang) überprüft und bestätigt. Trotz Anwendung unterschiedlicher Methoden - u.a. der für NRW empfohlenen HPLC-Methode (LUA NRW 1994) - weisen die ermittelten PAK-Gehalte eine enge Übereinstimmung auf. Lediglich die Werte von Acenaphthen und Fluoren weichen zwischen den Labors deutlich voneinander ab. Dies ist vermutlich auf eine unterschiedliche Trennung der als Doppelpeak im Chromatogramm erscheinenden Substanzen bei der Integration zurückzuführen.

Bei der **Wiederholung von Extraktion und Messung** der PAK-Gehalte verschiedener Altlastproben im Abstand von mehreren Wochen ergaben sich Variationskoeffizienten von maximal 27,9% für Naphthalin und minimal 3,2% für Benzo[ghi]perylen, im Mittel für alle PAK von 8,28%, so daß die Reproduzierbarkeit nach dem Beurteilungsschema von KOCH & KOCH-DEDIÇ (1974) für Fluoren, Fluoranthren und höherkondensierte PAK als sehr gut bis vorzüglich, für Acenaphthen, Phenanthren und Anthracen als befriedigend und für Naphthalin als ausreichend bezeichnet werden kann.

Das Ansetzen von Wiederholungsversuchen war aufgrund der ohnehin großen Zahl an Versuchsvarianten nur exemplarisch in einem sehr begrenzten Umfang

möglich. Um das **Ausmaß zufälliger und/oder methodischer Fehler bei der Anlage der Gefäßversuche** zu ermitteln, wurden am 14.10.93 die Varianten KoK2 und RaK2 sowie ihre echten Wiederholungen KoK2/b und RaK2/b beprobt, extrahiert und gemessen (s. Tab.30, im Anhang). Die Variationskoeffizienten und damit die **Reproduzierbarkeit der Gefäßversuche** schwankt deutlich in Abhängigkeit vom Bodensubstrat und von der analysierten Substanz. Dies zeigt sich vor allem bei Phenanthren mit einem Variationskoeffizienten von 21,0% bei den Proben Ko gegenüber 2,8% bei den Proben Ra. Bei den höherkondensierten PAK sind diese substratspezifischen Unterschiede geringer, während sie bei den Ergebnissen zur Reproduzierbarkeit der Extraktions-Methode kaum von Bedeutung sind. Für Verbindungen, die ein höheres Molekulargewicht und damit eine geringere Flüchtigkeit als Phenanthren besitzen, und zusätzlich für Acenaphthen ist die Reproduzierbarkeit der Gefäßversuche mit Variationskoeffizienten zwischen 14,5 und 3,5% nach der Klassifizierung von KOCH & KOCH-DEDİÇ (1974) als befriedigend (10-20%) bis sehr gut (5-10%) und vorzüglich (1-5%) zu bewerten, für die übrigen als ausreichend (20-30%). Da in diese Bewertung auch der Fehler aus der Extraktions- und Clean-up-Methode einfließt (s. Variationskoeffizient von Naphthalin bei RaK2 und RaK2/b, Tab.30), kann insgesamt die Wiederholbarkeit der Gefäßversuche als sehr gut bezeichnet werden.

Bei den **Sickerwasserproben** ergab die **Bestimmung von NWG, BG und WFR** mittels Additionsversuchen sehr gute WFR bei niedrigeren NWG und BG als bei der Extraktion von Bodenproben (s. Tab.31, im Anhang). Naphthalin und Acenaphthen sind mit dieser Methode jedoch nicht ausreichend sicher bestimmbar, so daß in den Tabellen aufgeführte Werte nur einer groben Orientierung dienen können. Die höchsten Ausbeuten an PAK aus den Sickerwasserproben erbrachte jedoch nach der Filterung über Celite die getrennte PAK-Extraktion aus den ausgefilterten Festsubstanzen mittels Aceton am Soxhlet und die Anreicherung der gelösten PAK aus der gereinigten Wasserprobe über C18-Umkehrphase. Dies ist den Ergebnissen in Tab.32 (im Anhang) zu entnehmen. Aufgrund des aufwendigen, zweitägigen Analysenganges bei dieser Methode erwies sich aber die genannte Flüssig-flüssig-Extraktion als Methode der Wahl.

3. BIOLOGISCHE AKTIVITÄT IN DEN BODENPROBEN

3.1 MIKROBIELLE AKTIVITÄTEN

3.1.1 Veränderungen in den Varianten der Gefäßversuche

Für den Erfolg einer mikrobiologischen Sanierung PAK-belasteter Substrate ist ein reges Bodenleben unabdingbare Voraussetzung (FILIP 1990). In schon mehrere Jahre belasteten Böden hat sich in der Regel eine an die Schadstoffsituation angepaßte Mikroflora angesiedelt, die insbesondere nach Optimierung der Abbaubedingungen ohne initiale lag-Phase PAK transformieren kann (MAHRO 1994). Die Zugabe speziell gezüchteter Mikroorganismen zu belasteten Böden ist hingegen außerhalb von Reaktorsystemen nicht erfolgversprechend (BRYNIOK 1991, LfU BW 1991).

Die Zielsetzung dieser Untersuchungen war es daher, die mikrobielle Aktivität der autochthonen Bodenmikroorganismen durch verschiedene Behandlungsmaßnahmen entscheidend zu erhöhen, um damit die Voraussetzungen für einen gesteigerten (co-)metabolischen PAK-Abbau zu schaffen. Die Untersuchungen sollten Ergebnisse liefern:

- zur Ausgangssituation der mikrobiellen Aktivitäten
- zum Einfluß unterschiedlicher Zugaben an organischen Substanzen und Nährstoffen
- zur zeitlichen und witterungsabhängigen Veränderung der mikrobiellen Aktivitäten
- zum Einfluß verschiedener Tenside
- zum Einfluß der Bodenreaktion auf die mikrobielle Aktivität

In Vortests zur Darstellung der **Ausgangssituation** vor dem Beginn der Gefäßversuche zeigten einige Bodenproben gar keine mikrobielle Aktivität, andere eine geringe bis mäßige. Verglichen mit der Dehydrogenaseaktivität (DHA) der Oberbodenprobe einer unbelasteten Pararendzina (Ap-Z) lagen die Werte einiger der PAK-belasteten Proben allerdings in der gleichen Größenordnung (Tab.9). In dem Bodenmaterial Ac waren sie sogar um das 1,62fache höher, so daß eine PAK-Kontamination bei manchen Proben keinen oder nur einen geringen Einfluß auf die Mikroorganismenaktivität zu haben scheint.

Diese Ergebnisse werden durch ESCHENBACH et al. (1991) bestätigt, die nach Kontamination einer Bodenprobe mit verschiedenen PAK keine Veränderung der DHA und Substrat-induzierten Respiration (SIR) feststellen konnten.

WELP et al. (1991) und TEBAAY (1994) fanden darüberhinaus nach Applikation von PAK bei geringen Konzentrationen durch einzelne Substanzen (z.B. Fluoranthen) eine Steigerung der Mikroorganismenaktivität, die bei Mischkontaminationen mit verschiedenen PAK zu einer Nivellierung der Effekte führen kann. In der Regel bewirkten die PAK jedoch eine Reduzierung des Bodenlebens, so daß sich ein ED₅₀-Wert¹ von 28,9mg/kg für ein Gemisch von sechs PAK ermitteln ließ (TEBAAY 1994).

Tab.9: Werte der Dehydrogenaseaktivität (DHA) in den Bodenproben nach Vortests zu den Gefäßversuchen in % der Aktivität eines unbelasteten Ackerbodens (Ap-Pararendzina) sowie Absolutwerte der DHA und der Substrat-induzierten Respiration (SIR) zu Beginn (16.06.93) und zum Ende der Gefäßversuche (16.11.94; Median von allen Varianten; n = 3 - 13)

Bodenprobe	DHA % von Ap-Z	DHA (µg TPF/10g Boden)		SIR (mg O ₂ /100g Bd * h)	
		16.06.93	16.11.94	16.06.93	16.11.94
Ac	162	60,0	> 10000	0,406	2,67
Bo	18,8	102	2800	0,231	2,37
Dd	102	56,2	> 10000	0,028	3,37
Ge	72,9	46,2	> 10000	0,113	3,45
Ko	123	260	> 10000	0,328	2,71
Ra	85,4	149	> 10000	0,178	1,89
So	100	306	> 10000	0,544	2,70
Üb	75,0	182	> 10000	0,947	2,31
Hea	n.n.	n.n.	2480	0,022	5,00
Heb	n.n.	63,8	> 10000	0,022	2,76

> 10000µg TPF/10g Boden = Median liegt außerhalb des Meßbereiches

Ein sehr niedriger Wert für die DHA wurde in der Probe Bo mit 18,8% der Aktivität des unbelasteten Oberbodens gemessen; in den beiden Proben Hea und Heb war im Rahmen dieses Vergleiches keine Aktivität nachweisbar. Ursache hierfür könnten neben den Wirkungen der PAK möglicherweise auch die hohen Cyanidgehalte in den Böden sein (s. Kap.2.1.2, Tab.3). Daneben dürften die insbesondere in den Proben Hea und Heb niedrigen pH-Werte und geringen Nährstoffgehalte diesen Befund verursachen. In den anderen Bodenproben sind die Mikroorganismen offenbar an die Belastung durch PAK wie auch der weiteren organischen und anorganischen Schadstoffe adaptiert, wobei die Konzentrationen mobiler Schwer-

¹Effektive Dosis, die zu einer Aktivitätserniedrigung um 50% gegenüber der Kontrolle führt.

metalle, bis auf Cu in der Probe Ra, ohnedies unbedenklich gering sind. So liegen aus dieser Sicht geeignete Voraussetzungen für eine mikrobielle Sanierung vor. Daß die im Vergleich hohe DHA dieser Proben nicht allein auf einer mangelnden Verfügbarkeit der PAK beruht, zeigt die gute Abbaubarkeit und damit Verfügbarkeit der PAK in den Proben Ac und Üb. Nicht zuletzt ist jedoch zu berücksichtigen, daß ein unmittelbarer Vergleich der Aktivitätsparameter unterschiedlicher Bodenmaterialien nur eingeschränkt aussagefähig ist (NECKER 1995). Zum Start der Gefäßversuche (16.06.93) hatten sich diese Werte - v.a. wahrscheinlich durch die Homogenisierung der vorher inhomogenen Proben - z.T. verändert (s. Tab.9).

Durch beide angewendeten bodenmikrobiologischen Testverfahren wird für die Versuchsvarianten in Abhängigkeit von den **unterschiedlichen Zugaben an organischen Substanzen und Nährstoffen** eine deutliche Steigerung der mikrobiellen Aktivität angezeigt. Dies ist in Abb.1 und 2 für die Bodenprobe Bo beispielhaft wiedergegeben. Dabei zeigt die Variante K2 (Klee gras-Heu und Nitrat-Stickstoff in doppelter Menge) für beide Testverfahren bei allen Bodenproben die höchsten Steigerungen. Insgesamt ergibt sich für alle Bodenproben und Varianten am häufigsten folgende Reihung der Aktivitäten:

$$K2 > A2 > K1 > A1 \geq G1 > \text{Kontrolle}$$

Im Durchschnitt des Versuchszeitraumes von 74 Wochen ist die SIR in der Variante K2 gegenüber der unbehandelten Kontrolle um das 3,6fache (Üb) bis zum 13,7fachen (Heb) erhöht, im Mittel der Bodenproben um das 7,6fache. Die Erhöhung der DHA beträgt das 27,5- bis 1620fache, im Mittel das 270fache (Tab.10); die mathematische Beurteilung der DHA-Ergebnisse ist aufgrund des häufigeren Auftretens nicht mehr meßbarer Werte (s. Kap.2.5) nur eingeschränkt möglich.

Tab.10: Erhöhung der Dehydrogenaseaktivität (DHA) und der Substrat-induzierten Respiration (SIR) in der Variante K2 gegenüber der unbehandelten Kontrolle im Durchschnitt der 74-wöchigen Gefäßversuchsdauer

	Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Üb	Hea	Heb
DHA	224	250	113	37,3	27,5	34,9	39,6	307	1620	1400
SIR	5,0	12,2	9,7	8,1	6,0	4,9	3,2	3,6	9,5	13,7

Abb.1 und 2 zeigen, daß im Gegensatz zu den gedüngten Varianten die Aktivitätswerte in der unbehandelten Kontrolle nur geringfügig über das Ausgangsniveau ansteigen. Dies gilt für die übrigen Bodenproben gleichermaßen.

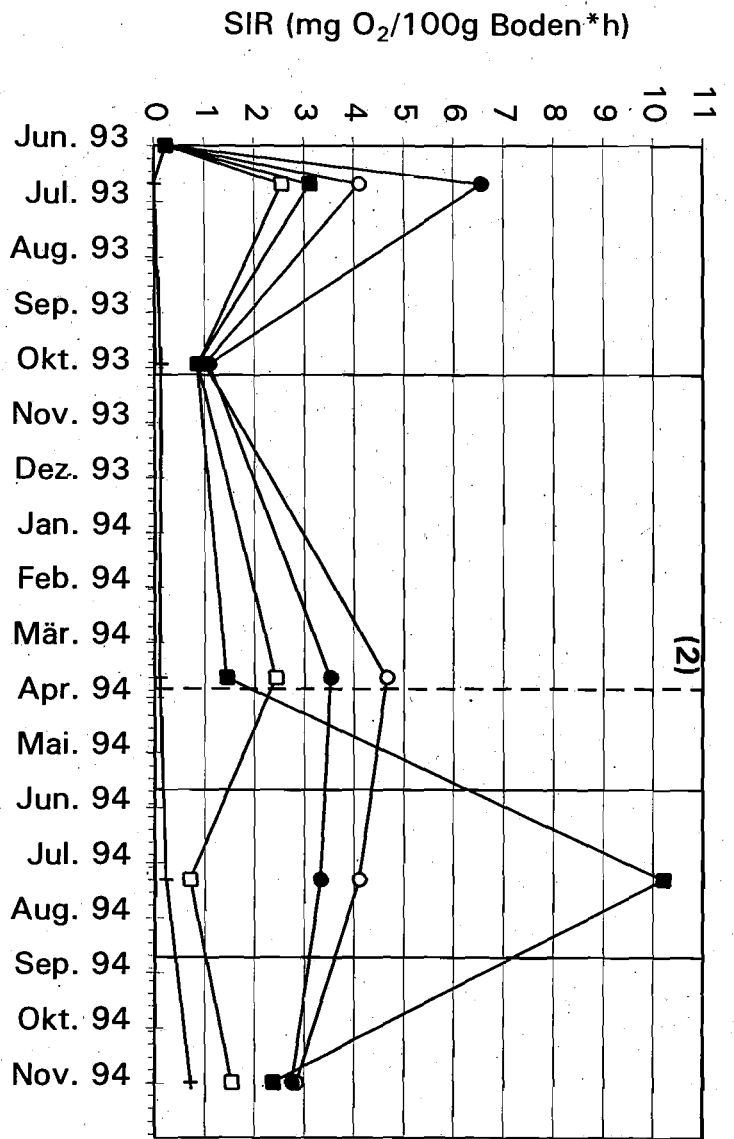
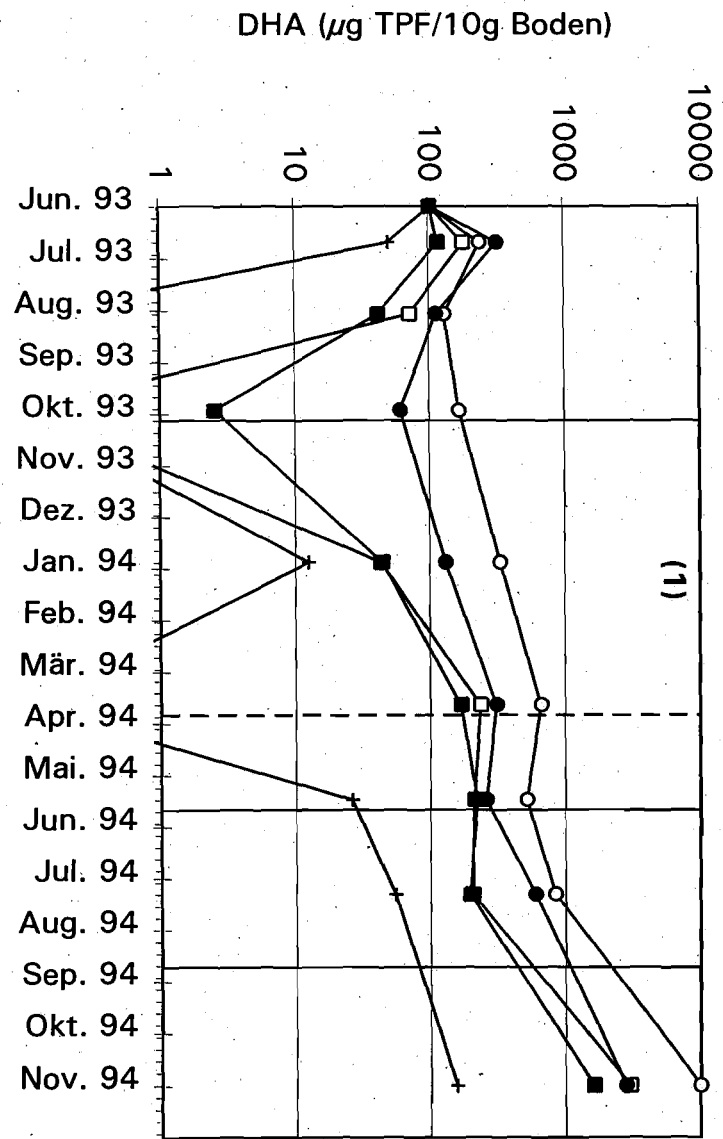


Abb. 1 und 2: Werte der DHA (1) und SIR (2) in den Varianten der Bodenprobe Bo in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (vertikale Striche geben die Zeitpunkte von Erneuerungen der Zugaben, die gestrichelte Linie eine alleinige NO₃-Gabe an)

Damit ist die aktivitätserhöhende Wirkung der zugegebenen Substanzen eindeutig nachgewiesen, während die Durchmischungen und die damit einhergehende Belüftung, die ebenso bei den Kontrollen durchgeführt wurden, nur von geringer Bedeutung sind. Korrelationen der Werte der Aktivitätsparameter zu denen des PAK-Abbaus bestehen indes nicht, wie dies auch STEILEN et al. (1993) bei sanierungsbegleitenden Untersuchungen fanden.

Bei **Betrachtung der zeitlichen und witterungsabhängigen Veränderungen der mikrobiellen Aktivitäten** ist zu erkennen, daß diese nach dem ersten Einmischen der Zugaben zu Versuchsbeginn (24. Woche 1993) zunächst ansteigen, nach der 27. Woche aber wieder zurückgehen (Abb.1 und 2). Diese **initiale Aktivitätsveränderung** erfolgt bei der Bodenprobe Bo so stark, daß in der 33. und insbesondere 41. Woche bei der Mehrzahl der Varianten die Ausgangswerte der 24. Woche unterschritten werden. Ein solcher Effekt der anfänglich starken Aktivierung wird häufig beobachtet (z.B. KRAATZ & SCHRÖDER 1993). Er ist auf die Heterogenität des Pflanzenmaterials zurückzuführen, indem dessen energiereiche und bei der Häckselung stärker aufgeschlossene Bestandteile rasch umgesetzt werden.

Der folgende Aktivitätsabfall wird durch die jahreszeitlich bedingt abnehmenden Luft- und Bodentemperaturen (August $\varnothing 19,5^{\circ}\text{C}$; Oktober $\varnothing 11,2^{\circ}\text{C}$) und den fortschreitenden Verbrauch der untergemischten organischen und mineralischen Nährsubstrate verstärkt.

Auch bei den übrigen Bodenproben ergab sich nach der anfänglichen Aktivitätserhöhung ein Rückgang, so daß eine **Erneuerung der Zugaben** nach der 41. Woche (am 20.10.93) angezeigt war. Dadurch wurde bei sämtlichen Varianten eine nachhaltige Steigerung der DHA und SIR der Mikroorganismen erreicht, obwohl diese über die **Wintermonate** aufgrund der allgemeinen Witterungsbedingungen eher gehemmt werden, was von vielen Autoren als Winterminimum der Biomasse nachgewiesen wurde (z.B. LYNCH & LYNDIA 1980, WARDLE et al. 1993).

Im **Frühjahr** übt die Erwärmung einen zusätzlichen Impuls auf die Mikroorganismen aus, so daß in der 14. Woche (1994) ein zweites, höheres Maximum der DHA erreicht wird. Dieser zweite Anstieg wird durch die SIR als nicht so ausgeprägt wiedergegeben (vgl. Abb.1 und 2). Statistisch stehen die Ergebnisse von SIR und DHA für die Probe Bo mit einem Bestimmtheitsmaß von 66,1 in einem eher schwachen Zusammenhang. Dabei ist zu beachten, daß zum einen die SIR nur zu jedem zweiten Probennahmetermin gemessen wurde, mithin die zeitliche Dynamik nicht so exakt erfaßt wird. Gleichzeitig beruhen diese mikrobiologischen Verfahren auf methodisch unterschiedlichen Ansätzen. So zeigen die in Tab.11 aufgeführten Korrelationen und Regressionen zu den weiteren Böden der Gefäßversuche zum

Teil nur schwache Beziehungen. Für Ac, Dd und Ge ergeben sich hingegen sehr gute Beziehungen.

Tab.11: Statistische Beziehungen zwischen den Ergebnissen der DHA- und SIR-Messungen

Bd	Korrelation	r	Regressionsgleichung	b	n
Ac	log DHA * log SIR	0,872***	log DHA = 1,29 * log SIR + 2,16	93,4	20
Bo	log DHA * log SIR	0,437*	log DHA = 0,670 * log SIR + 2,12	66,1	24
Dd	log DHA * log SIR	0,868***	log DHA = 0,822 * log SIR + 2,43	93,2	14
Ge	log DHA * log SIR	0,810***	log DHA = 0,677 * log SIR + 2,64	90,0	30
Ko	log DHA * log SIR	0,570***	log DHA = 0,501 * log SIR + 2,85	75,5	62
Ra	log DHA * log SIR	0,560***	log DHA = 0,516 * log SIR + 2,67	74,8	65
So	log DHA * log SIR	0,404***	log DHA = 0,631 * log SIR + 2,66	63,6	57
Üb	log DHA * log SIR	0,613***	log DHA = 1,04 * log SIR + 2,44	78,3	21
Hea	log DHA * SIR	0,422*	log DHA = 0,170 * SIR + 1,72	65,0	27
Heb	log DHA * log SIR	0,334***	log DHA = 0,421 * log SIR + 2,27	57,8	55

Im ganzen unterstreichen diese Ergebnisse die Notwendigkeit, die mikrobielle Aktivität von Böden durch mehrere Methoden zu bestimmen. Daß durch beide Methoden die gleiche Rangfolge der Varianten ermittelt wurde (s.S.26), untermauert damit die Richtigkeit der Befunde.

Trotz Stickstoffdüngung am 12.04.94 (15. Woche) nimmt die DHA bei vielen Bodenproben und Varianten nach der 14. Woche ab. Offenbar waren zu diesem Zeitpunkt die zugegebenen organischen Substanzen weitgehend umgesetzt, so daß eine weitere Zugabenerneuerung nach der 22. Woche ratsam erschien. So blieb die mikrobielle Biomasse auch über die **Sommermonate** auf einem hohem Niveau bzw. stieg weiter an, obwohl die Böden zeitweise recht stark austrockneten.

Im wesentlichen bestimmen demnach das **Substratangebot** sowie die **Temperatur** und das **Wasserangebot** die Veränderung der Biomasse im Jahresverlauf; die Auswirkungen der **Standorteinflüsse** treten dahinter zurück (ELSNER 1994). So unterscheiden sich die über den Versuchszeitraum gemittelten SIR-Werte für die Variante K2 zwischen den verschiedenen Bodenproben im Maximum um das 1,53fache (SoK2/ DdK2). Zu Beginn der Gefäßversuche betragen die Unterschiede das 43fache (ÜbK2/HeaK2 bzw. ÜbK2/HebK2; SoK2/DdK2 = 19); sie sind mithin infolge der Bodenbehandlung nivelliert worden. Korrelationen zu den Klimaparametern Temperatur, Niederschlag und Bodenfeuchte bestehen indes nur in Einzelfällen. Durch die Einbindung der Faktoren Temperatur bzw. Niederschlag werden die Bestimmtheitsmaße der Regressionen zwischen DHA und SIR der Böden Ra, So und Heb geringfügig verbessert.

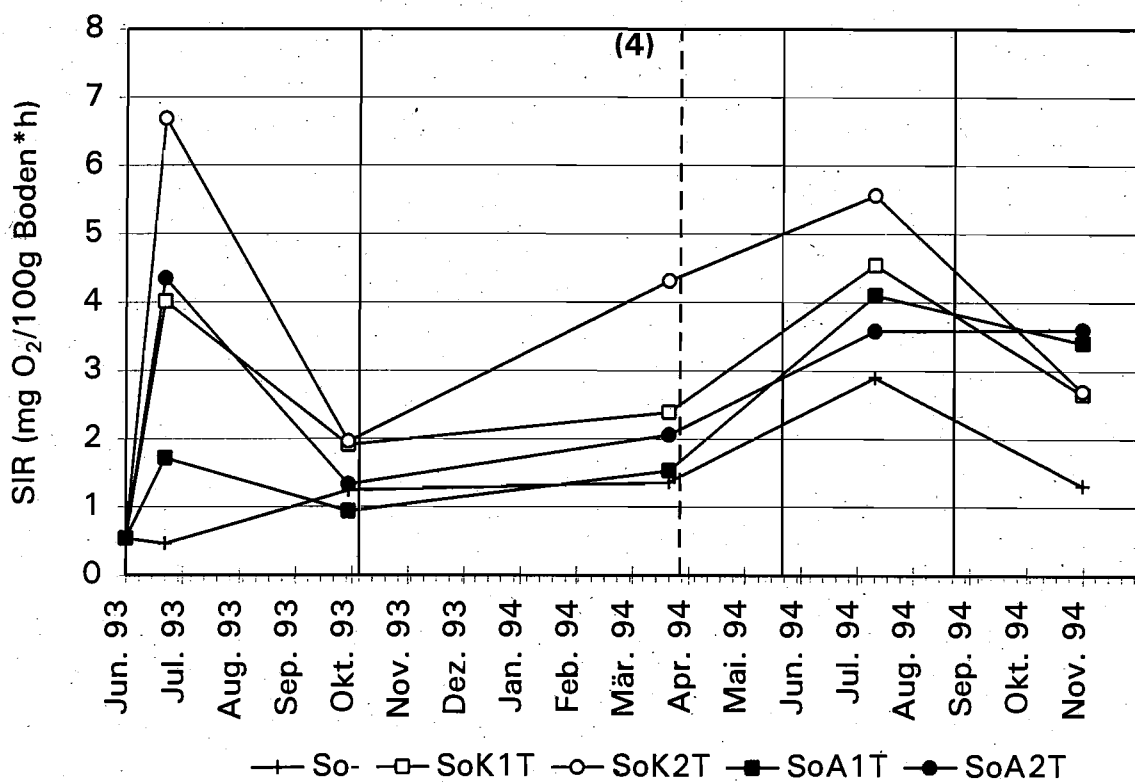
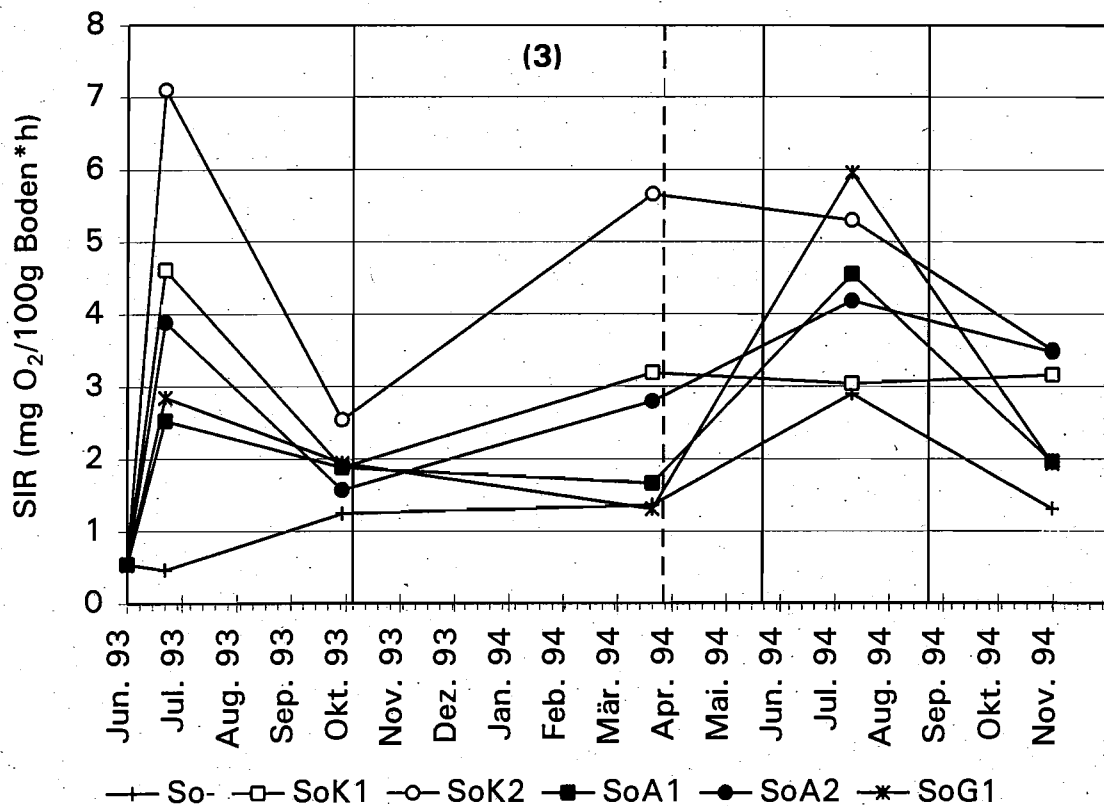


Abb.3 und 4: Werte der SIR in den durch Zugaben von organischen Substanzen und Mineraldünger behandelten Varianten (3) sowie zusätzlich mit Triton X-100 (T) behandelten Varianten (4) der Bodenprobe So in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (vertikale Striche geben die Zeitpunkte von Erneuerungen der Zugaben, die gestrichelte Linie eine alleinige NO₃-Gabe an)

Durch die **Zugabe von Tensiden** zu den Bodenproben Ko, Ra, So und Heb wird die Aktivität der Mikroorganismen beeinflusst, was aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche zur TensidAuswahl auch zu erwarten war. Insbesondere Triton X-100 wirkt meist aktivitätsvermindernd. Dabei bleibt aber die Abfolge der Varianten bezüglich mineralischer und organischer Düngung erhalten, wie dies am Beispiel der Bodenprobe So im Vergleich von Abb.3 und 4 zu sehen ist. Die Hemmung ist aber nie so stark, daß die Aktivitätswerte der unbehandelten Kontrolle signifikant unterschritten würden.

Neben aktivitätsvermindernden Effekten kommt es in der Kombination einiger Tenside mit den Varianten K1 und K2 bei den Bodenproben Ko, So und Heb an einigen Terminen auch zu überaus hohen Aktivitäten der DHA, die z.T. auch nach Verdünnung nicht innerhalb des Meßbereiches des Photometers erfaßbar waren (s. Kap.2.5). Durch eine vorhergehende Sterilisation dieser Proben wurde deren DHA vollkommen ausgelöscht, so daß chemische Ursachen für diese extrem hohen Werte, z.B. ausgelöst durch das Tensid, auszuschließen sind.

Häufiger ist die Aktivität in den mit Genapol UD 080, Plantaren 225 und Synperonic LF/RA 30 behandelten Varianten - insbesondere der Bodenproben So und Heb - gegenüber der nicht mit Tensid behandelten Variante erhöht (Abb.5). Dieser Befund stimmt mit den Ergebnissen der Vorversuche zur TensidAuswahl überein, wo bis zu bestimmten Tensid-Konzentrationen eine Aktivierung der Mikroorganismen gegenüber der unbehandelten Kontrolle erfolgte (s. Kap.5.3.3.1). Diese Aktivitätszunahme ist vor allem auf eine erhöhte Menge an abbaubarer organischer Substanz zurückzuführen. Daneben kann dieses Phänomen nach WELP et al. (1991) auch als Arndt-Schulz-Effekt gedeutet werden.

Für die mit den vier Tensiden behandelten Varianten und die Kontrollen aller Bodenproben kann im Mittel folgende Reihung der Aktivitäten aufgestellt werden:

$$K1S \geq K1P > K1G = K1 > K1T$$

Damit kann die Zugabe der Tenside Synperonic LF/RA 30 (S), Plantaren 225 (P) und Genapol UD 080 (G) im Rahmen biologischer Behandlungen von PAK-Belastungen in der gewählten Konzentration als vorteilhaft betrachtet werden, da sie über die PAK-Solubilisierung hinaus die Aktivität der Mikroorganismen und dadurch einen (co-)metabolischen Abbau anregen. Eine Zugabe von Triton X-100 (T) in der Konzentration von 0,1% wirkt dagegen im Vergleich zur Kontrolle eher negativ auf die mikrobielle Aktivität.

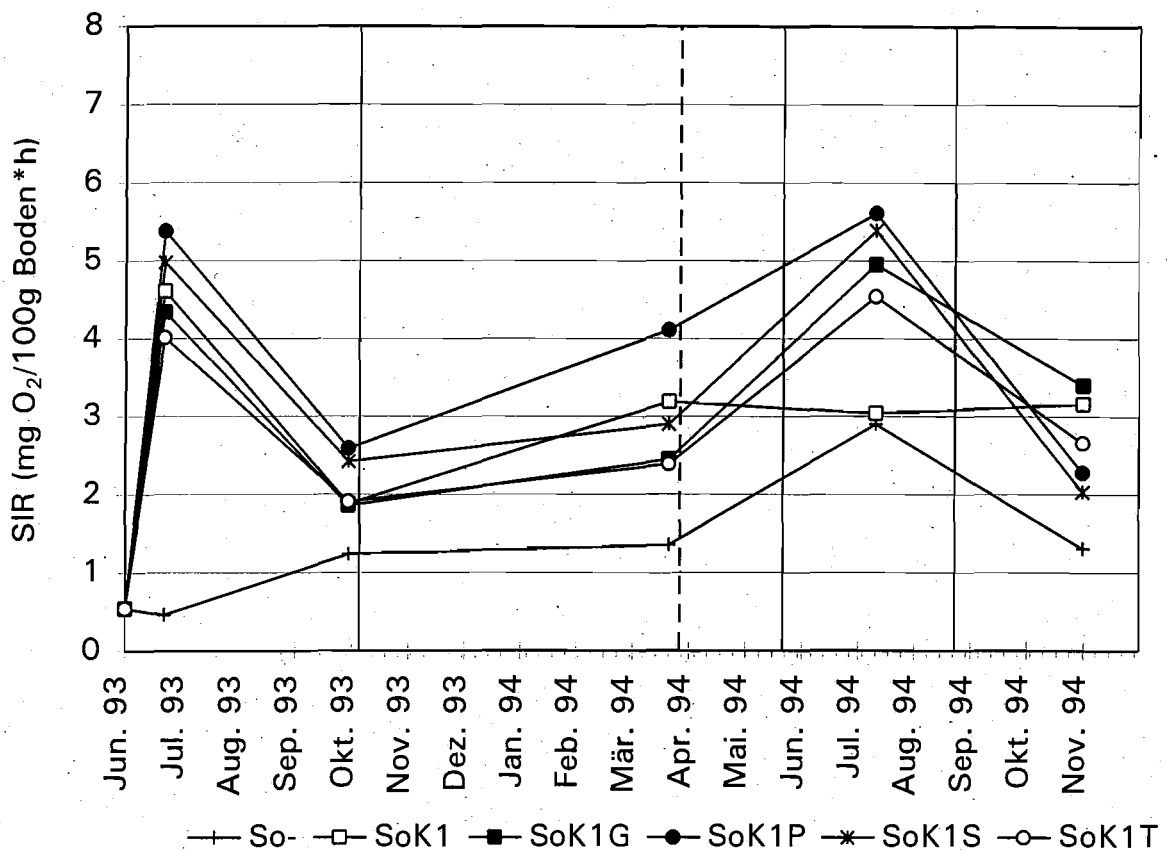


Abb.5: Werte der SIR in den mit den Tensiden Genapol UD 080 (G), Plantaren 225 (P), Synperonic LF/RA 30 (S) und Triton X-100 (T) behandelten Varianten der Bodenprobe So in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (vertikale Striche geben die Zeitpunkte von Erneuerungen der Zugaben, die gestrichelte Linie eine alleinige NO₃-Gabe an)

Während PAK durch die **Bodenreaktion** nicht unmittelbar beeinflusst werden (BLUME 1992), ist für die Mineralisations- und Transformationsvorgänge, denen die PAK unterliegen, ein Bereich von pH 6-7 am günstigsten (OTTOW 1988). Durch die **unterschiedlichen Kalkgaben** von C0 (keine Kalkung), C1 (halbe Kalkmenge) und C2 (volle Kalkmenge) (s.S.12) zur Variante HeaK2 konnte die pH-Wirkung auf die Mikroorganismenaktivität untersucht werden. Die Proben zeigten während der Gefäßversuche im Durchschnitt die folgende Reihung bezüglich der Höhe der DHA und SIR (die zum Ende der Gefäßversuche vorliegenden pH-Werte sind in Klammern angegeben):

HeaK2C2 (7,40) > HeaK2C1 (7,04) > HeaK2C0 (6,03) > Hea-CO (4,05)

Damit werden die Angaben aus der Literatur bestätigt. Im Vergleich der pH-Werte der Varianten HeaK2C0 und Hea-CO wird deutlich, daß auch die Zugabe an organischer Substanz und mineralischen Düngemitteln einen gewissen Kalkeffekt bewirkt.

Durch die Steigerung der Werte von DHA und SIR können natürlich keine Aussagen über die Qualität und PAK-Abbauleistung der so aktivierten Mikroorganismen gemacht werden. FILIP (1990) und BRYNIOK (1991) kritisieren, daß Düngungsmaßnahmen Populationen fördern, die diese leicht umsetzbaren Energiequellen verwerten. Demgegenüber unterliegen Spezialisten dem Selektionsdruck und zum Schadstoffabbau befähigte Organismen schließen zunächst nur die zugesetzten leicht abbaubaren C-Quellen auf. Dies dürfte aber für die Umsetzung von PAK nur sehr beschränkt gelten, da diese nach METZNER (1989) im wesentlichen cometabolisch, 2- und 3-Ring-Aromaten auch metabolisch abgebaut werden.

So zeigen die Ergebnisse der Gefäßversuche, daß die gewählten Behandlungen geeignet sind, die Aktivität der autochthonen Mikroorganismen, unabhängig von den Bodeneigenschaften und der Schadstoffsituation, wesentlich zu erhöhen. Die Aktivitätszunahme hat eine Steigerung des (co-)metabolischen Schadstoffabbaus zur Folge (s. Kap.5.3), ist aber keineswegs mit diesem gleichzusetzen. Dies zeigt sich in geringeren Unterschieden zwischen den Varianten bezüglich der PAK-Abnahme, anderen Reihenfolgen bezüglich der Vorzüglichkeit bestimmter Varianten und fehlenden Korrelationen zwischen den Parametern der mikrobiellen Aktivität und dem PAK-Abbau.

3.1.2 Hemmung der Biolumineszenz

Die Abbaubarkeit von organischen Schadstoffen in Böden wird ganz wesentlich durch deren Verfügbarkeit bestimmt (z.B. VAN AFFERDEN et al. 1992a). Insbesondere bei den PAK kann diese in Abhängigkeit von den physiko-chemischen Eigenschaften der Einzelsubstanzen und ihren Gehalten sowie der Qualität und Quantität der Bodenaustauscher stark variieren. Daher werden unter anderem Biotoxizitätstests zur Charakterisierung der ökologischen Wirksamkeit und damit auch der Verfügbarkeit von Schadstoffen in kontaminierten Böden herangezogen.

WEIßENFELS et al. (1992) wenden zu diesem Zweck den Leuchtbakterienhemmtest an, eine Methode, die in der Praxis auch zur Dokumentation eines Sanierungserfolges Verwendung findet (z.B. HAMBSCH et al. 1990). Aufgrund des extremen Boden/Lösungsverhältnisses (1:10), der durch Zusätze veränderten pH-Werte und

Elektrolytkonzentrationen der Testlösungen und des Einsatzes mariner Testorganismen wird dieser aber aus geologisch-bodenkundlicher Sicht häufig kritisiert (ALEF 1994, WAHLE 1994, WEIß et al. 1995).

Um den Leuchtbakterientest hinsichtlich seiner Aussagekraft zu überprüfen, wurden aus den Gefäßversuchen Bodenproben von vier Standorten mit verschiedenen Zugaben-Varianten ausgewählt und auf ihre Hemmung der Biolumineszenz getestet. Aus den in Tab.12 aufgeführten Daten ist - bei einer sehr guten Reproduzierbarkeit (s. Standardabweichung) - bei einzelnen Varianten eine geringe (G_L3 = Giffaktor Leuchtbakterien) und zumeist keine Hemmung (G_L2) der Leuchtbakterien in den Eluaten der Bodenproben abzuleiten. Jedoch war infolge einer starken Trübung der Eluate zur Durchführung des Testes eine Mikrofiltration erforderlich (s. Kap.2.5), so daß vermutlich Anteile gelöster PAK aus den Eluaten entzogen wurden. Nur für die Probe Heb läßt sich eine Reduzierung von G_L3 auf G_L2 vom 16.06. zum 18.08.93 erkennen. Bei den übrigen Proben zeigen lediglich für den 18.08.93 die mit Triton X-100 behandelten Varianten einen höheren G_L -Wert (3,2), der auf eine erhöhte Verfügbarkeit des bakterizid wirkenden Tensids zurückzuführen sein mag.

Die über den gesamten Verlauf der Gefäßversuche nahezu identischen G_L -Werte zeigen trotz der genannten methodischen Unwägbarkeiten an, daß die in ihren Gehalten und ihrer Abbaubarkeit unterschiedlichen PAK der verschiedenen Bodenproben keinen wesentlichen Einfluß auf die Toxizität der Eluate für *Photobacterium phosphoreum* haben. So unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen den Proben des Standortes Ra mit PAK-Gehalten (mg PAK/kg Boden nach US-EPA-Liste) von 959 (16.06.93) bis 749 (K2T; 16.11.94) nicht von denen des Standortes Ko mit Gehalten von 169 (16.06.93) bis 139 (K2; 16.11.94) oder Ge mit PAK-Gehalten von 139 (16.06.93) bis 96,9 (K2; 16.11.94). So ergeben sich zu den Schadstoffgehalten wie auch zu den Ergebnissen der DHA und SIR keine Korrelationen. Diese undifferenzierten Ergebnisse rühren daher, daß die Toxizität eines Bodeneluates nicht allein durch die Konzentration eines betrachteten Schadstoffes (hier die PAK) sondern durch die Summe der synergistischen und antagonistischen Effekte der weiteren enthaltenen Toxikanten und Nährstoffe bestimmt wird (WELP & BRÜMMER 1989, LÄTSCH & SCHWEDT 1992). Wie BEYER et al. (1991) berichten, wird die Biolumineszenz nicht durch die nach Sanierungsende in den Bodenproben verbleibenden PAK-Restgehalte (hier Proben vom 16.11.94) beeinflusst. Insbesondere die besserlöslichen Nebenbestandteile von Substanzgemischen wie den Teerölen beeinflussen die Zusammensetzung und Toxizität von Wasserauszügen (STEINHÄUSER et al. 1989). So fand SCHULZ-BERENDT (1992) in einem

Sanierungsfall keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den PAK-Gehalten der Bodeneluat und der Luminiszenzhemmung. In diesem Beispiel veränderte eine zusätzliche Phenolkontamination der Proben das Ergebnis erheblich.

Tab.12: Ergebnisse des Tests auf Hemmung der Biolumineszenz von Leuchtbakterien in Bodeneluaten (nach DEV-S4) verschiedener Versuchsvarianten der belasteten Bodenproben Ge, Ko, Ra und Heb (Abkürzungen s.S.III)

Standort	Probennahmetermin	Variante	G _L -Wert*	StdAbw.	Wiederholung	
Ge	16.06.93	K2	2	0,000	2	
		K2T	2	0,000	2	
	18.08.93	K2	2	0,000	5	
		K2T	2,5	1,000	4	
	14.10.93	K2	2	0,000	2	
		K2T	2	-	1	
	16.11.94	K2	2	-	1	
		K2T	2	-	1	
	Ko	16.06.93	K2	2	0,000	2
			K2T	2	0,000	2
18.08.93		K2	2	0,000	6	
		K2T	3,2	1,095	5	
14.10.93		K2	2	-	1	
		K2T	2	-	1	
16.11.94		K2	2	-	1	
		K2T	2	-	1	
Ra		16.06.93	K2	2	0,000	2
			K2T	2	0,000	2
	18.08.93	K2	2	0,000	4	
		K2T	3	1,155	4	
	14.10.93	K2	2	-	1	
		K2T	2	-	1	
	16.11.94	K2	2	-	1	
		K2T	2	-	1	
	Heb	16.06.93	K2	3	1,414	2
			K2T	3	1,414	2
18.08.93		K2	2	0,000	4	
		K2T	2	0,000	4	
14.10.93		K2	2	-	1	
		K2T	2	-	1	
16.11.94		K2	2	-	1	
		K2T	2	-	1	

*G_L-Wert = Gifffaktor-Leuchtbakterien: kleinste Verdünnungsstufe des Testansatzes, bei der die Lichtemission um <20% gehemmt wird
(G_L2 = Eluat-Verdünnung von 1:2 wurde als höchste Konzentration getestet)

Desweiteren steht die Toxizität eines Altlastbodens für Mikroorganismen in keinem Zusammenhang zu dem Gefährdungspotential für Säuger. ROOS et al. (1994) stellten gerade für PAK-belastete Böden mit einer geringen Hemmung der Biolumineszenz eine starke Säugermutagenität fest. Dies beruht darauf, daß Mikroorganismen eher durch die mobileren 2- bis 4-Ring-Aromaten gehemmt werden, während 5- und 6-Ring-PAK das gentoxische Potential bestimmen.

Eine deutliche Hemmung der Biolumineszenz weist auf für Mikroorganismen verfügbare und damit abbaubare organische Schadstoffe (bei Abwesenheit anorganischer Schadstoffe) hin. Die dargestellten Ergebnisse des Biolumineszenz-Tests machen aber deutlich, daß - neben den methodischen Unwägbarkeiten bei der Untersuchung hydrophober Substanzen in wässrigen Systemen - ein Negativergebnis (keine Toxizität) keine zuverlässigen Aussagen über Dekontaminationserfolge mikrobieller Sanierungsverfahren oder über Störungen von Bodenfunktionen zuläßt, wie dies auch DEBUS & HUND (1994) für diesen und weitere Ökotoxizitätstests fanden.

3.2 BEEINFLUSSUNG DES PFLANZENAUFWUCHSES IN DEN VERSUCHSGEFÄßSEN DURCH DIE BODENBEHANDLUNG

Im Rahmen der Gefäßversuche erfolgte die Einsaat von Klee gras zum Zwecke einer Begrünung der Gefäße. Zum einen sollte dies ein direkter Bestandteil der biologischen Behandlung der belasteten Bodenproben sein, zum anderen ermöglicht das Keimen und Wachstum von Pflanzen Aussagen über die Bonität bzw. Toxizität eines belasteten Bodenmaterials. Dabei kann ein schlechtes Pflanzenwachstum sowohl aus Nährstoffmangel als auch aus einer Schadstoffwirkung herrühren. Durch wiederholte quantitative (Messung des Erntertrages) und subjektive Bewertungen (visuelle Abschätzung; s. Kap.2.2.2) des Klee gras aufwuchses der Gefäßversuche war es möglich die Bodentoxizität zu beurteilen.

Die in den Abb.6.1-6.4 dargestellten Erntegewichte des Aufwuchses 12 Wochen nach Versuchsbeginn (in g Trockenmasse je Gefäß) zeigen, daß eine hohe PAK-Belastung des Bodens nicht unbedingt mit einem schlechten Pflanzenwachstum einhergeht. Während die zu Beginn der Gefäßversuche hoch belasteten Bodenproben Bo (1300 mg/kg), Üb (318 mg/kg) und Ra (959 mg/kg) aufgrund toxischer Wirkungen ein nur geringes Pflanzenwachstum ermöglichen, bestätigt sich dieser Zusammenhang für die Varianten der Probe Ac (1290 mg/kg) nicht. Hier ist trotz der sehr starken PAK-Belastung das Wachstum in der unbehandelten Kontrolle im Vergleich zu den anderen Standorten maximal. Entscheidend für das Pflanzen-

wachstum sind offenbar auch das PAK-Muster, die neben den PAK auftretenden weiteren Schadstoffe - bei den Proben Bo, Hea und Heb insbesondere Cyanide - und die Verfügbarkeit aller Schadstoffe.

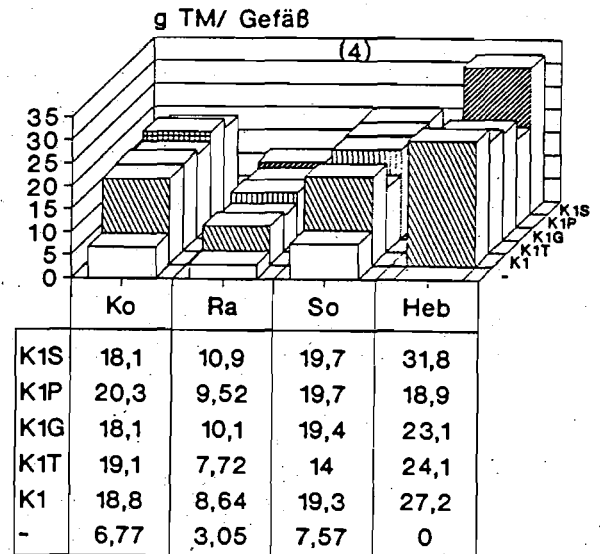
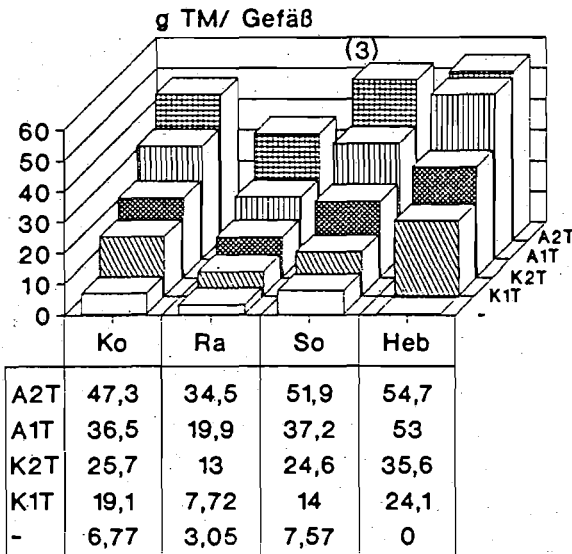
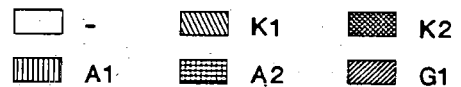
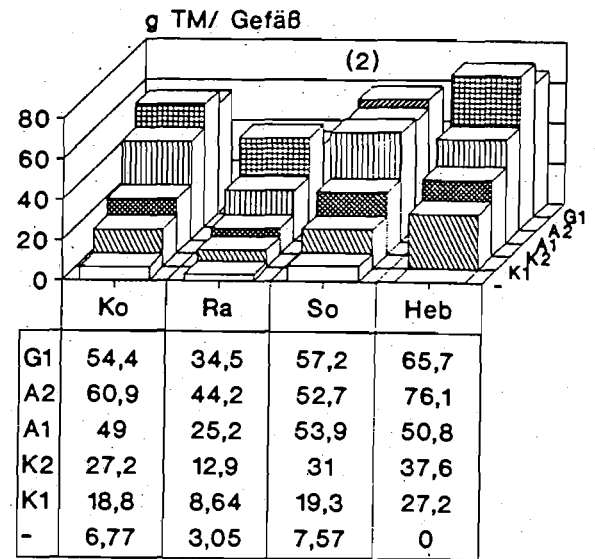
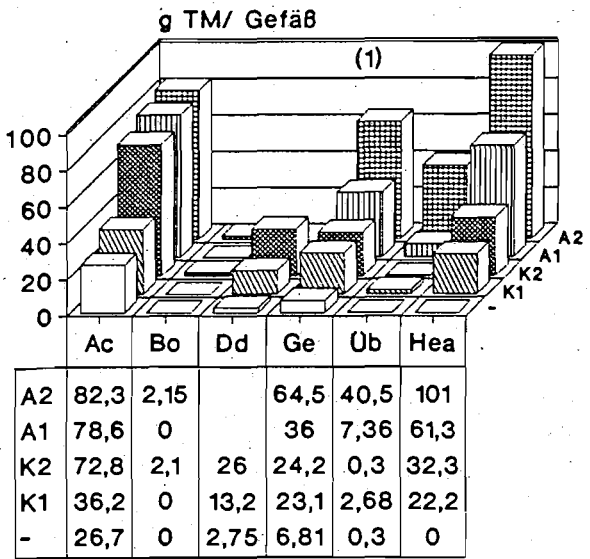


Abb. 6.1 - 6.4: Grasaufwuchs (g TM/Gefäß) in den verschiedenen Behandlungsvarianten der Bodenproben am 07.10.93. (1) und Einfluß unterschiedlicher Zugaben von organischen Substanzen und Mineraldüngern (2); Einfluß einer zusätzliche Gabe von Triton X-100(T) (3) bzw. Genapol UD 080(G), Plantaren 225(P), und Synperonic LF/RA 30(S) (4); (Abkürzungen s.S.III)

CRÖßMANN (1992) führte die bei Versuchen mit künstlich PAK-kontaminierten Bodenproben beobachteten Schädigungen an Keim- und Jungpflanzen auf die Wirkung der leichter flüchtigen und mobileren 3- und 4-Ring-Aromaten zurück. So weist die Probe Üb vor allem eine Belastung durch diese damit auch stärker für Pflanzen verfügbaren PAK auf.

In dem Bodenmaterial Bo treten neben den PAK Cyanide in hoher Konzentration auf; die Pflanzenkeimlinge waren zunächst in allen Varianten, mit zunehmender Versuchsdauer insbesondere noch in der Kontrollvariante, von Berliner-Blau verfärbt und dementsprechend stark geschädigt. In den übrigen Varianten wurde diese toxische Wirkung durch die Zugaben deutlich reduziert bzw. ganz aufgehoben.

Durch die unterschiedlichen Zugaben konnte bei allen Proben eine erhebliche Verbesserung des Pflanzenaufwuchses erzielt werden. Dabei steigt die Menge der gewachsenen Pflanzenmasse mit der Zugabemenge an organischem und mineralischem Dünger an, wobei - im Gegensatz zu den Ergebnissen der mikrobiellen Aktivität - Ackerbohnen/Senf-Stroh gegenüber Klee-gras-Heu eine nochmalige Wuchssteigerung erbringt. Möglicherweise wird in den mikrobiell besonders aktiven Klee-gras-Heu-Varianten der gedüngte Stickstoff durch die Mikroorganismen so umgesetzt, daß er für die Pflanzenaufnahme nicht mehr zur Verfügung steht. Mithin stellen Pflanzen und Mikroorganismen Konkurrenten um die Nährstoffe dar. Dies wird durch den zeitweilig aufgetretenen Stickstoffmangel des Grönaufwuchses dieser Varianten belegt.

Gleichzeitig aber liefern die Pflanzen den Bodenmikroorganismen auch Nährstoffe (VON LÜTZOW & OTTOW 1990) und verbessern durch ihr Wurzelwerk die Struktur und damit den Luft- und Wasserhaushalt der Böden. So beruhen die für die Bodenproben Ac, Bo, Dd, Ge und Hea gefundenen Beziehungen zwischen Pflanzenaufwuchs (Trockenmasse und subjektive Beurteilung des Wachstums; s. Kap.2.2.2) und mikrobieller Aktivität auf schwach bis sehr stark positiven Korrelationen. z.B.:

Ge: SIR * subjektive Beurteilung d. Pfl.aufwuchses: $r = 0,528^{**}$; $n = 27$

Dd: log SIR * Trockenmasse: $r = 0,943^{***}$; $n = 7$

BIRNSTINGL et al. (1990) erwähnen in diesem Zusammenhang Versuche zur gezielten Anregung des biologischen Abbaus von PAK durch den Anbau von Pflanzen; bekannt ist, daß die mikrobiellen Leistungen in der Rhizosphäre erhöht sind (HANCE & FÜHR 1994).

Zu den Zeitpunkten des zweiten und dritten Schnittes (03.06.94 und 02.09.94) ergibt sich ein den Abstufungen zwischen den Varianten nach gleiches Bild, jedoch sind die Unterschiede zwischen den Bodenproben der verschiedenen Standorte nur noch gering. So kann auch über den Pflanzenaufwuchs ausgesagt werden, daß mit

zunehmender Versuchsdauer das Nährstoff- und Wasserangebot wie auch die Witterung als Haupteinflussfaktoren die Auswirkungen der Standortunterschiede und insbesondere der Schadstoffbelastung überdecken, wie ELSNER (1994) dies für die Veränderung der Biomasse feststellte. Dennoch wird dies auch ein Effekt einer Detoxifizierung der Schadstoffe im Zuge des biologischen Abbaus der PAK sein, wie ihn auch PARK et al. (1988) feststellten. Die Ergebnisse der ersten subjektiven Beurteilung des Klee gras-Aufwuchses (am 09.08.93; Punkteschema 1-10) ergaben für die Bodenproben Ac, Bo und Üb mit einem sehr schlechten Pflanzenwachstum im Mittel aller Varianten 2,7 (Ac), 0,9 (Bo) und 0,1 (Üb) Punkte. Zum Ende der Gefäßversuche wurden folgende Bewertungen ermittelt: 6,8 (Ac), 4,8 (Bo), 6,4 (Üb).

Durch die Zugabe von Tensiden zu den Bodenmaterialien wird das Pflanzenwachstum bei einigen Bodenproben und Behandlungsvarianten etwas gehemmt. Dabei unterscheiden sich die verwendeten Tenside nicht wesentlich voneinander, nur Triton X-100 zeigt teilweise deutlichere Hemmwirkungen (Abb.6.4: RaK1T, SoK1T). Dies dürfte eher eine direkte Wirkung der Tenside auf die Pflanzen sein als indirekt eine Folge solubilisierter PAK. Durch Zugabe eines Tensids zu Bodenmaterial konnte KUTZNER (1989) allerdings keine Veränderung beim Aufwuchs von Gras finden, während dasselbe Präparat im Kressetest bei einer Konzentration von 5% phytotoxisch wirkte.

Die durchgeführten Bodenbehandlungen haben damit zu einer ganz wesentlichen Verringerung der Toxizität der Bodenproben für den Wirkungspfad Pflanze und zu einem deutlich verbesserten bis normalen Pflanzenwachstum geführt. Über die Verfügbarkeit der Schadstoffe und ihre Aufnahme in die Pflanzen kann allerdings keine Aussage getroffen werden; es wurden keine Pflanzenanalysen durchgeführt (vgl. Kap.4.3).

Über die dargestellte positive Wirkung auf die Vorgänge im Boden hinaus verhindert eine geschlossene Pflanzendecke den oberflächlichen Abtrag von kontaminiertem Bodenmaterial durch Wasser- und Winderosion. Dadurch kann eine Minderung der menschlichen Belastung durch die Inhalation von Stäuben sowie durch Einträge in Vorfluter erreicht werden, was zur Sicherung des Geländes beiträgt. Nicht zuletzt erhöht sie durch einen günstigen optischen Eindruck die Akzeptanz von Sanierungsmaßnahmen in der Bevölkerung.

4. BEURTEILUNG DES ANTEILS DES MIKROBIELLEN ABBAUS AN DER ABNAHME DER PAK-GEHALTE IN DEN BODENPROBEN

Zahlreiche Untersuchungen belegen, daß PAK von Mikroorganismen abgebaut werden können, wobei die Abbaukinetik im umgekehrten Verhältnis zum Molekulargewicht steht (STIEBER et al. 1990). Während der mikrobielle Abbau für zwei-, drei- und vier-Ring-PAK nachgewiesen wurde, liegen für Benzo[a]pyren (fünf kondensierte Ringe) noch keine gesicherten Erkenntnisse über eine vollständige Mineralisierung vor (MAHRO & KÄSTNER 1993).

Infolge der Behandlung der Altlastbodenproben mit verschiedenen Zugabe-Varianten über einen Zeitraum von 74 Wochen ist zum einen eine Steigerung der mikrobiellen Aktivität (s. Kap.3), zum anderen eine Verminderung der meßbaren PAK-Gehalte festzustellen (s. Kap.5). Damit ist zwar das Potential für einen mikrobiellen PAK-Abbau vorhanden, es kann aber nicht ohne weiteres eine Abnahme der Gehalte mit einem Abbau gleichgesetzt werden. Neben einem biologischen Abbau, der als vollständige Mineralisierung, cometabolische Transformation und unspezifische Oxidation ablaufen kann, führen weitere Prozesse zu einer Abnahme der Gehalte organischer Schadstoffe in Böden:

1. Verdünnung durch Zuschlagstoffe
2. Auswaschung
3. Entzug durch Pflanzen
4. physikalisch-chemische Prozesse
5. mikrobieller Einbau in organische Substanzen

Entgegengesetzt können Vorgänge der Biosynthese, des atmosphärischen Eintrags und der Mobilisierung gebundener Rückstände zu einem Anstieg der extrahierbaren PAK-Gehalte führen.

Um die Abnahme der PAK-Gehalte bestimmten Ursachen zuordnen zu können, wurden die angesprochenen Mechanismen durch die Art der Versuchsanordnung vermieden (1.), unterbunden (3.) oder quantitativ untersucht (2. & 4.) bzw. werden nach Literaturangaben und eigenen Erkenntnissen diskutiert (4. & 5.).

4.1 VERDÜNNUNG DURCH ZUSCHLAGSTOFFE

Zur Steigerung der Aktivität der Mikroflora und damit zur Erhöhung des biologischen Schadstoffabbaus wurden den Bodenproben organische Substanzen und mineralische Düngemittel sowie Tenside an vier Terminen zugegeben. Prinzipiell besteht durch die Untermischung von Zuschlagstoffen die Möglichkeit der einfachen Verdünnung von Schadstoffkonzentrationen (FILIP 1990).

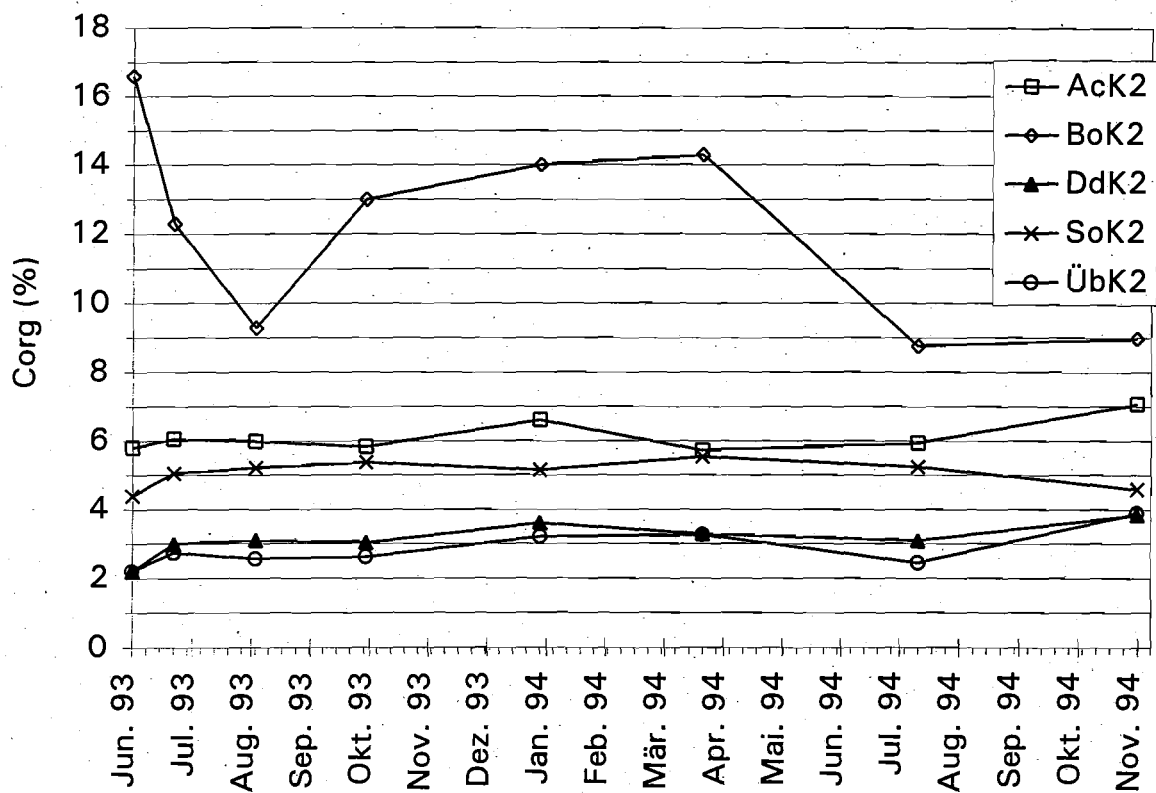


Abb.7: Corg-Gehalte in den Varianten K2 der Bodenproben Ac, Bo, Dd, So und Üb in Abhängigkeit von der Versuchsdauer.

In Bezug auf die Zugaben an organischen Substanzen mit Aufwandmengen von bis zu 3% würde dies aufsummiert eine Verdünnung des Bodenmaterials und damit Reduzierung der PAK-Belastung um 11% bedeuten. Tatsächlich konnte jedoch vor den Erneuerungen der Zugaben festgestellt werden, daß die organischen Materialien makroskopisch vollständig umgesetzt waren. Eventuell vorhandene Reste und Wurzelstücke des Grasaufwuchses wurden durch Absieben entfernt. Eine signifikante Verdünnung durch Veränderung der Corg-Gehalte ist aus den in Abb.7 dargestellten Ergebnissen der Kohlenstoffbestimmung verschiedener Bodenproben ebenfalls nicht abzuleiten; durch die Zugabe von Klee gras-Heu in der doppelten Aufwandmenge (3%) kommt es im Probendurchschnitt zur stärksten Anhebung der Corg-Gehalte. So ändert sich der Prozentanteil in der Probe AcK2 von 5,80 auf 7,08%, in der Probe DdK2 von 2,20 auf 3,90%, in der Probe SoK2 von 4,40 auf 4,59% und in der Probe ÜbK2 von 2,20 auf 3,90%.

Der Corg-Gehalt in den Varianten der Bodenprobe Bo sinkt hingegen, z.B. BoK2 von 16,6 auf 8,98%. In diesem Bodenmaterial müssen relativ gut umsetzbare Substanzen organischen oder technogenen Ursprungs enthalten gewesen sein, die über den Versuchszeitraum abgebaut wurden. Gleichzeitig weisen die zwischen den Terminen stark schwankenden Werte auf eine inhomogene Verteilung von Anteilen

des Kohlenstoffs hin. So kann z.B. das im Bauschutt begleitend enthaltene Holz ursächlich für diese Phänomene sein, das in Partikelgrößen bis 2mm in dem Bodenmaterial auftritt.

Die höchsten Gehalte an organischem Kohlenstoff enthält das Bodenmaterial Bo damit zu Beginn der Gefäßversuche am 16.06.93, während in den anderen Proben zum Versuchsende am 16.11.94 in der Variante K2 die Maximalwerte erreicht werden. Ausnahme ist der Boden So, bei dem der höchste Gehalt am 06.04.94 vorliegt (5,54%). So ergeben sich insgesamt Anhebungen der Kohlenstoffgehalte um 1,14 - 1,70 Prozentpunkte (ohne Probe Bo). Eine daraus resultierende Verdünnung der PAK-Gehalte ist vernachlässigbar; dagegen sind die gewünschten Einflüsse auf die Schadstoffgehalte durch Veränderung der bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Parameter weitaus gravierender.

Auch die **Zufuhr von Mineraldüngern und Tensiden** trägt zu keiner signifikanten Verdünnung der PAK-Gehalte bei, da in der Summe über 74 Wochen maximal zu einigen Varianten der Bodenprobe Heb 64,8g Mineraldünger und Tenside je kg Boden zugegeben wurden. Darin sind bei diesen Varianten 6,9g CaCO₃ und 40,0g Tensid-Aktivsubstanz enthalten. Würden die Düngemittel und Tenside wider Erwarten nicht umgesetzt, käme es zu einer Abnahme der Schadstoffgehalte um weniger als 1%. Insgesamt hat damit keine signifikante Verdünnung der PAK-Gehalte durch die Bodenbehandlungen stattgefunden.

4.2 AUSWASCHUNG

PAK weisen eine äußerst geringe Wasserlöslichkeit von maximal 30mg/l für Naphthalin bis 0,00026mg/l für Benzo[ghi]perylen und für höherkondensierte Verbindungen noch darunter auf (SIMS & OVERCASH 1983). Dennoch ist die Möglichkeit einer Verlagerung mit dem Perkolationswasser in unbelastete Bodenbereiche oder sogar das Grundwasser gegeben (z.B. FELIX-HENNINGSSEN et al. 1993, TEBAAY et al. 1993). Durch pedogene und anthropogene Lösungsvermittler kann die Mobilität hydrophober Substanzen wesentlich erhöht werden. Hierzu zählen gelöste organische Substanzen (DOM; oft angegeben als gelöster organischer Kohlenstoff: DOC), deren Adsorptionpotential für PAK deutlich höher ist als das der festen organischen Substanz (KÖGEL-KNABNER et al. 1990).

Auch Mikroorganismen können direkt als Biokolloide mit von ihnen aufgenommenen Schadstoffmolekülen über weite Strecken transportiert werden und indirekt durch die Ausscheidung von Biotensiden PAK mobilisieren. Darüberhinaus erhöhen anthropogene Lösungsvermittler wie Tenside, Öle, BTX und Phenole die

Löslichkeit und Verlagerbarkeit von Schadstoffen wie den PAK eklatant (z.B. TEBAAY et al. 1991).

Derart in die Bodenlösung transferierte PAK können überaus rasch in tiefere Bereiche verlagert werden, da die gebildeten Komplexe oder Micellen aufgrund ihrer Größe und weiterer Eigenschaften nicht in Mikroporen eindringen können, mithin im Sinne einer Ausschlußchromatographie präferentiell verlagert werden (ENFIELD & BENGTSOON 1988).

Dem widersprechend wiesen GRATHWOHL et al. (1993) eine erheblich verminderte Elution von PAK aufgrund der Hemmung der molekularen Diffusion nach. Möglich ist auch eine Adsorption der ladungstragenden Carriermoleküle an die Bodenaustauscher und dadurch eine Cosorption der PAK, die das Ausmaß der Adsorption wesentlich erhöhen kann (DANZER et al. 1993). Dabei unterliegen auch gelöste organische Substanzen und die mit ihnen assoziierten Schadstoffe einer parallel ablaufenden Degradation durch Mikroorganismen (GRØN et al. 1992). So konnten z.B. RUMP et al. (1988) im Grundwasser eines ehemaligen Gaswerkge­län­des trotz Bodenbelastungen von mehreren Gramm PAK je kg Boden allein Naphthalin in nachweisbaren Mengen detektieren.

Da die Versuchsgefäße im Rahmen dieser Untersuchungen im Freiland aufgestellt und demzufolge über 74 Wochen den natürlichen Niederschlägen von 1070 mm ausgesetzt waren, konnte eine Verlagerung von PAK aus den Gefäßen heraus nicht ausgeschlossen werden, zumal die genannten Lösungsvermittler in unbekanntem Mengen in den Proben enthalten sein dürften und zusätzlich bei einigen Varianten als Tenside zugegeben worden waren. Zum Zwecke einer exakten Bilanzierung der mit den Perkolaten ausgetragenen PAK-Mengen wurden deshalb die in den Auf­fangschalen der Versuchsgefäße angefallenen Sickerwässer zwischen den Proben­nahmeterminen laufend gesammelt und deren Menge sowie PAK-Gehalt bestimmt (s.Kap.2.3.2). Die Summen der ausgetragenen PAK wurden mit den im gleichen Zeitraum aus den Bodenproben verschwundenen PAK-Mengen verglichen.

In 74 Wochen sind bei den 90 Versuchsgefäßen Perkolatmengen von 4070 ml (HebK2/b) bis zu 14766 ml (Ra-) angefallen, wobei sich zwischen den Bodenproben quantitative Unterschiede in der Perkolatbildung zeigen. Diese hängen allerdings nur lose mit der Textur zusammen; wichtig ist auch der Aggregierungszustand des Bodens. So kam es in den biologisch wenig aktiven Kontrollen der Proben Hea und Heb zu einer raschen Dichtlagerung des Materials. Diese verursachte nach Niederschlägen einen zeitweiligen Wasserüberstau mit nachfolgend erhöhten Evaporationsraten und verminderten Sickerwasserspenden.

Tab.13: Austrag von PAK aus den Bodenproben der Gefäßversuche mit dem Sickerwasser einschl. der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile (Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen) ($\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden) sowie durchschnittliche PAK-Konzentration des Sickerwassers (Sw \emptyset Σ -EPA; $\mu\text{g}/\text{l}$ Wasser)

Boden	Ac					Dd			
	Variante	-	K1	K2	A1	A2	-	K1	K2
ml Sw 74 Wo		13667	11823	9962	10799	9933	12943	9788	7481
ml Sw 30 Wo		5147	5323	4992	4849	5113	5131	5023	4451
NAP		0,184	0,099	0,149	0,134	0,585	0,040	n.n.	0,146
ACE		0,129	0,040	0,146	0,193	6,36	0,011	0,012	0,011
FLU		0,022	0,019	0,100	0,022	0,467	0,011	0,014	0,007
PHE		0,218	0,065	0,148	0,279	0,331	0,010	0,016	0,037
ANT		0,271	0,144	0,098	0,469	0,310	0,010	0,003	0,006
FLA		0,344	0,260	0,954	0,923	2,20	0,067	0,026	0,021
PYR		0,428	0,984	0,706	1,99	5,53	0,137	0,030	0,020
BaANT		0,174	0,206	0,324	0,414	1,60	0,015	0,020	0,010
CHR		0,111	0,061	0,087	0,199	0,544	0,028	0,028	0,014
BbFLA		0,196	0,380	0,593	0,567	2,60	0,099	0,030	0,011
BkFLA		0,066	0,119	0,246	0,198	0,854	0,020	0,013	0,005
BaPYR		0,184	0,410	0,552	0,586	2,86	0,036	0,022	0,009
DBahANT		0,085	0,076	0,100	0,109	0,242	0,002	0,003	0,001
BghiPER		0,154	0,235	0,327	0,356	1,25	0,019	0,018	0,009
IPYR		0,114	0,196	0,293	0,337	1,19	0,019	0,022	0,009
Σ -Austrag 30 Wo		2,68	3,29	4,82	6,78	26,9	0,524	0,256	0,315
Sw \emptyset Σ -EPA $\mu\text{g}/\text{l}$		2,81	3,34	5,22	7,55	28,4	0,552	0,275	0,382
Sw \emptyset Σ -TVO $\mu\text{g}/\text{l}$		1,11	1,62	3,21	3,30	11,6	0,273	0,141	0,077

In Tab.13 sind beispielhaft die Werte der im Zeitraum 16.06.93-12.01.94 (30 Wochen) ausgetragenen PAK für die Varianten der Bodenproben Ac und Dd aufgeführt. Weitere Tabellen finden sich im Anhang (Tab.33.1-8). Da infolge der Beprobungen abnehmende Bodenmengen von den Niederschlägen durchflossen wurden, erfolgte eine Umrechnung der gemessenen PAK-Mengen auf mg PAK-Austrag/kg Boden. Zusätzlich sind die PAK-Summen je Liter Wasser aufgeführt, die die durchschnittliche Schadstofffracht der Sickerwässer (Sw \emptyset Σ -EPA) angeben.

Es zeigt sich, daß in einem Zeitraum von sieben Monaten aus den Bodenproben durchaus meßbare Mengen von einigen Mikrogramm PAK pro Kilogramm Boden ausgetragen wurden. Jedoch enthalten die Bodenproben Ac und Dd insgesamt um

den Faktor 10^6 höhere Konzentrationen an PAK (1290 bzw. 173 mg/kg), so daß die ausgetragenen Mengen einen Anteil von maximal 0,02 ‰ (AcA2) nicht übersteigen. Von allen Bodenproben unterliegt die Variante HebA2T mit einem Austrag von 1,64 ‰ der Boden-PAK-Gehalte der stärksten Auswaschung; im Mittel aller Gefäße beträgt der Austrag 0,07 ‰ der Boden-PAK-Gehalte. So fallen die durch das Sickerwasser ausgetragenen PAK-Mengen um ein weites in den Rundungsfehler der PAK-Gehalte der Bodenproben und sind somit für eine Bilanz der abgebauten PAK-Mengen vernachlässigbar.

Tab.14: Vergleich der PAK-Gehalte von zwei Bodenproben (Bd) der Gefäßversuche mit den durch die Sickerwässer einschl. der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile (Sw) ausgetragenen PAK-Mengen (Versuchszeitraum 19.08. - 14.10.93) (Sw-max. = höchster Wert aller Varianten einer Bodenprobe; Bd-min = niedrigster Wert aller Varianten einer Bodenprobe)

		Ac		Dd	
		Sw-max.	Bd-min.	Sw-max.	Bd-min.
PAK-	NAP	0,154	n.n.*	0,000	n.n.*
Austräge	ACE	0,180	10.600	0,010	670
durch	FLU	0,006	13.300	0,014	646
die	PHE	0,199	108.000	0,011	6.050
Sickerwässer	ANT	0,048	45.700	0,000	3.890
und	FLA	0,493	163.000	0,016	25.200
PAK-	PYR	0,565	136.000	0,012	18.400
Gehalte	BaANT	0,128	87.200	0,007	14.300
der	CHR	0,134	93.200	0,000	14.400
Bodenproben	BbFLA	0,323	56.500	0,007	12.50
(µg/kg	BkFLA	0,134	27.900	0,004	6.990
Boden)	BaPYR	0,334	62.800	0,006	9.310
	DBahANT	0,065	12.700	0,000	2.040
	BghiPER	0,177	34.600	0,003	7.000
	IPYR	0,170	49.500	0,006	10.500
	Σ EPA PAK	3,11	901.000	0,097	132.000

*n.n. = <118µg/kg Boden

Dies gibt auch der in Tab.14 aufgeführte Vergleich von PAK-Gehalten im Boden und Sickerwasser plus ausgetragener Feststoffe der Proben Ac und Dd wieder (Untersuchungszeitraum vom 19.08.-14.10.93). Bei den Proben mit dem höchsten PAK-Austrag durch Sickerwasser und Feststoffe (HebA2T) betrug der gesamte gemessene Austrag innerhalb von 30 Wochen (16.06. - 12.01.93) maximal 61,4 µg/kg Boden gegenüber 35,8 mg/kg Boden (Summe von 15 PAK nach US-

EPA). Hierbei ist allerdings zu beachten, daß es sich bei den Proben Ac und Dd um Proben mit einer gegenüber Proben anderer Standorte im Mittel geringen Sickerwasserkonzentration handelt. Bei anderen Bodenproben wurden bei verschiedenen Behandlungsvarianten durch das Sickerwasser und die damit ausgewaschenen Feststoffe zum Teil deutlich höhere PAK-Mengen ausgetragen, wie Abb. 15b zeigt.

Da weitergehende Ergebnisse nicht zu erwarten waren, wurde die Analyse der Perkolate nach dem 12.01.94 eingestellt und während der weiteren Versuchsdauer nur noch die angefallenen Sickerwassermengen erfaßt (in Tab.13 und 33.1-8 für den gesamten Zeitraum von 74 Wochen angegeben: ml Sw 74 Wo).

Tab.15a: PAK-Austräge aus den Bodenproben der Gefäßversuche mit dem Sickerwasser (Sw) in gelöster und kolloid suspendierter Form (l) bzw. mit den ausgetragenen Feststoffen (Fs); (Angaben in µg/kg Boden, ΣEPA-PAK Sw und ΣTVO-PAK Sw in µg/l; Versuchszeitraum 19.08. - 14.10.93)

	DdK1		DdK2		Ge-		GeA1	
	Fs		Fs		Fs		Fs	
ml Sw	354		461		212		120	
* NAP	n.n.	n.n.	0,001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
ACE	n.n.	0,001	n.n.	n.n.	n.n.	0,002	n.n.	n.n.
FLU	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,001	n.n.	0,002
PHE	0,002	0,003	0,002	0,001	n.n.	0,021	n.n.	0,022
ANT	0,003	0,001	0,005	n.n.	n.n.	0,001	n.n.	0,001
FLA	n.n.	0,002	n.n.	0,001	n.n.	0,012	n.n.	0,011
PYR	n.n.	n.n.	n.n.	0,003	n.n.	0,008	n.n.	0,008
BaANT	n.n.	0,001	n.n.	n.n.	n.n.	0,001	n.n.	0,001
CHR	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,001	n.n.	n.n.
BbFLA	n.n.	0,002	n.n.	0,001	n.n.	0,001	n.n.	0,003
BkFLA	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,001
BaPYR	n.n.	0,001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,002
DBahANT	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
BghiPER	n.n.	0,002	n.n.	0,001	n.n.	0,001	n.n.	0,001
IPYR	n.n.	0,002	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,002
Σ-PAK	0,005	0,016	0,008	0,007	n.n.	0,050	n.n.	0,539
ΣEPA-PAK Sw	0,074	0,223	0,097	0,087	0,013	1,36	0,011	2,65
ΣTVO-PAK Sw	0,006	0,143	n.n.	0,034	n.n.	0,382	n.n.	0,971

* = PAK-Austräge mit dem Sickerwasser bezogen auf den Feststoff

Tab.15b: PAK-Austräge aus den Bodenproben der Gefäßversuche mit dem Sickerwasser (Sw) in gelöster und kolloid suspendierter Form und mit den ausgetragenen Feststoffen; (ΣEPA-PAK und ΣTVO-PAK in µg/l; Versuchszeitraum 19.08. - 14.10.93)

	Bo-	BoA1	Ra-	RaK1	RaA2	RaA2T	Üb-	ÜbK2	HeK2C1
ΣEPA-PAK (µg/l)	12,4	17,2	58,1	21,2	15,6	22,9	46,2	60,4	61,8
ΣTVO-PAK (µg/l)	6,66	9,57	29,8	10,3	7,62	10,6	2,12	11,5	24,8

Bezogen auf die PAK-Konzentrationen in den Wässern erreichen und überschreiten die Gehalte oftmals den Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TVO), womit eine Gefährdung des Grundwassers am Standort möglich ist. Signifikante Korrelationen der PAK-Gehalte im Sickerwasser zu den Sickerwassermengen, den PAK-Gehalten der Bodenproben und den Behandlungen der Varianten (z.B. Tensidzugabe) ergeben sich allerdings nicht. Bei den verschiedenen Bodenproben und Behandlungsvarianten weist der PAK-Austrag - methodisch bedingt - große Schwankungen auf. Bei einigen Versuchen steigt er mit der Zugabe von organischer Substanz und von Tensiden an; bei anderen weist die unbehandelte Variante die höchsten Austräge auf. In erster Linie werden die fehlenden Zusammenhänge wie auch die schlechte Reproduzierbarkeit zwischen den Parallelen derselben Variante (s. z.B. Varianten K2/b, Tab.33.3-4, a und b, im Anhang) durch die gewählte Versuchsanstellung zu erklären sein.

Diese ermöglicht zwar eine Erfassung der durchgesickerten Wassermengen, garantiert aber keine vergleichbare Qualität. So sind alle Wässer in unterschiedlichem Maße getrübt und enthalten variierende Mengen an Feststoffen, die aus den Gefäßen ausgetragen wurden. Diese liegen als Sediment, Schweb- oder Schwimmstoffe in den Proben vor. Es wurde daher exemplarisch für vier Proben mit geringen PAK-Gehalten im Sickerwasser und ausgetragenen Feststoffen eine Trennung der Proben in die Feststoff- und Lösungsphase durchgeführt. Gelöste PAK werden durch die Festphasenreinigung nicht retardiert und auch große Moleküle wie DOM mit adsorbierten Schadstoffmolekülen können diese Festphasen-Materialien passieren (LANDRUM et al. 1984), nur stark geladene DOM werden sorbiert. Die Fraktionierung ergab, daß der Hauptteil der PAK in der Regel an die Festsubstanz gebunden ist. Das filtrierte Wasser der untersuchten geringer belasteten Proben DdK1, DdK2, Ge und GeA1 weist bezogen auf die PAK-Belastung Trinkwasserqualität auf (Tab.15a). Eine gesicherte Übertragung dieser Ergebnisse auf andere Bodenproben und Versuchsvarianten ist jedoch nicht möglich.

So können bei einer Übertragung der Ergebnisse dieser Gefäßversuche auf einen Feldmaßstab keine gesicherten Hinweise auf das Ausmaß der Grundwassergefährdung durch den Sickerwasseraustrag an PAK abgeleitet werden.

Da die Sickerwasserentnahme unmittelbar unterhalb der Kontaminationszone erfolgte und zusätzlich, wie beschrieben, bei dem gewählten Versuchsdesign mit methodischen Mängeln behaftet ist, bilden die Untersuchungsergebnisse die "worst-case-Situation" ab. Die dennoch nur äußerst geringen PAK-Mengen, die aus den belasteten Materialien ausgetragen werden, sind für die Abnahme der PAK-

Gehalte in den Bodenproben von minimaler Bedeutung und sind mengenmäßig nicht bilanzierbar. Es ergeben sich für die „worst-case-Situation“ keine statistisch abgesicherten Hinweise auf eine Veränderung der PAK-Austräge durch die verschiedenen Zugaben von organischem Material und insbesondere von Tensiden. So bewirkt in vielen Varianten die Zugabe von Tensiden eine z.T. deutliche Erhöhung des PAK-Austrages mit dem Sickerwasser, z.B. KoK1/KoK1T; RaA2/RaA2T; SoK1/SoK1T; HebK1/HebK1T; HebA2/HebA2T. In anderen Fällen lag dagegen der PAK-Austrag aus den unbehandelten Kontrollvarianten über dem Durchschnitt (z.B. Dd-, Ra-, Üb-, Hea-).

4.3. ENTZUG DURCH PFLANZEN

Die Aufnahme von PAK durch Pflanzen wird allgemein als möglich, jedoch zumeist als gering angesehen. In verschiedenen Untersuchungen mit Nährlösungen und Böden stellten DÖRR (1970), SIEGFRIED & MÜLLER (1978) und CRÖßMANN (1992) nur äußerst geringe Gehalte von Fluoranthen und Benzo[a]pyren in verschiedenen Pflanzen fest. Diese Gehalte waren nicht mit den z.T. stark erhöhten Bodengehalten korreliert und schienen vielmehr über den Luftpfad auf die oberirdischen Pflanzenteile oder durch Kontamination der Proben infolge anhaftender Bodenteilchen verursacht worden zu sein. Gleichzeitig scheint zwar eine Metabolisierung von PAK in den Pflanzen stattzufinden (DÖRR 1970, SIEGFRIED & MÜLLER 1978); die Sanierung eines PAK-belasteten Bodens durch die Aufnahme in angebaute Pflanzen und die Abfuhr des Erntegutes ist jedoch keinesfalls aussichtsreich.

Um dennoch diesen möglichen Austragspfad gänzlich zu eliminieren, wurde der Klee gras-Aufwuchs der Gefäße mehrmals geschnitten und die Pflanzenmasse nach Lufttrocknung den Bodenproben wieder beigemischt. Eine Messung der PAK-Gehalte in dem Pflanzenaufwuchs erfolgte nicht.

Dem biotischen Entzug von PAK aus Böden entgegengesetzt wurde auch eine Biosynthese von PAK durch Mikroorganismen nachgewiesen (SUESS 1976). Quantitativ wird sie in Altlastböden aber bedeutungslos sein.

4.4 PHYSIKALISCH-CHEMISCHE PROZESSE

Das Ausmaß der auf physikalisch-chemischen Prozessen beruhenden PAK-Umsetzungen läßt sich im Vergleich mit den Veränderungen in den durch Zugabe von HgCl₂ sterilisierten Bodenproben ermitteln. In so behandeltem Altlastbodenmaterial konnten BEWLEY & THEILE (1988) keine Reduzierung der PAK-Gehalte feststellen, so daß sie die Abnahmen in Quecksilber-freien Proben auf rein mikrobielle Umset-

Sterilisation erzielt werden, ohne daß die Bodeneigenschaften verändert werden (WOLF et al. 1989). Alle aus sterilen Proben verschwundenen PAK-Mengen müssen volatilisiert, durch Licht oder rein chemische Vorgänge oxidiert, hydrolysiert oder chemisch bzw. physikalisch als "bound-residues" festgelegt worden sein.

Zur Differenzierung zwischen mikrobiellen und abiotischen Einflüssen auf die PAK-Gehalte der Bodenproben wurde jeweils eine Variante (Kleingefäße) durch Zugabe von 1% Quecksilber in Form von $HgCl_2$ sterilisiert. Zugaben von Nährstoffen o.ä. erfolgten wie bei den unbehandelten Kontrollen nicht. Die in Tab.16 aufgeführten DHA-Werte der mit Quecksilber behandelten Varianten (Hg-Varianten) vom Ende der Gefäßversuche zeigen, daß über den gesamten Zeitraum von 74 Wochen nur in den Proben Bo und Üb eine vollständige Sterilisation stattgefunden hat. In allen anderen Proben ist trotz $HgCl_2$ -Zusatz nach 74 Wochen wieder eine geringe bis deutliche Dehydrogenaseaktivität meßbar. Auch Quecksilber unterliegt in Böden einer Entgiftung durch seine starke Affinität zu v.a. organischen Austauschern; ein mikrobieller Abbau durch Bildung volatilen Dimethylquecksilbers wird jedoch nur unter stark reduzierenden Bedingungen auftreten (SCHACHTSCHABEL et al. 1989) und ist bei diesen Versuchen auszuschließen.

Tab.16: Dehydrogenaseaktivität (DHA) in den Quecksilber-sterilisierten Bodenproben vom Ende der Gefäßversuche (16.11.94) in μg TPF/10g Boden und in Prozent der Aktivität in den unbehandelten Kontrollen vom Start (16.06.93) und Ende (16.11.94) der Gefäßversuche

	Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Üb	Hea	Heb
μg TPF/10g Bd	86,0	0,0	14,4	19,2	7,6	28,1	23,4	0,0	65,9	12,7
% der Kontrolle vom										
16.06.93	143	0,0	25,6	41,6	2,9	18,9	7,6	0,0	-	20,1
16.11.94	88,4	0,0	2,1	1,6	1,0	6,1	1,2	0,0	-	343

In den Bodenproben Ac-Hg, Hea-Hg und Heb-Hg werden die - allerdings teilweise äußerst geringen - Werte der DHA der unbehandelten Kontrollen übertroffen, wobei in der Kontrolle Hea- keine Aktivität nachweisbar war, so daß keine Prozentangabe möglich ist. Gemeinsam mit der Probe Ac-Hg erbringt die Probe Hea-Hg die höchsten Meßwerte der DHA. Hier war die Sterilisation offenbar nicht nachhaltig genug, um über 74 Wochen zu wirken. Zu beachten ist aber, daß die erreichten Werte deutlich unter denen der behandelten Varianten liegen und sich die Kurven der PAK-Abnahmen signifikant voneinander unterscheiden. Dennoch bedeutet dieses Ergebnis, daß die Abnahmen der PAK-Gehalte in den Hg-Varianten nicht nur auf physikalisch-chemischen Prozessen sondern zu einem beträchtlichen Teil auch auf biologischen Prozessen beruhen.

In diesem Sinne sind auch die in Abb.8 dargestellten Ergebnisse zu interpretieren. Aufgetragen sind die PAK-Gehalte der Hg-Varianten (steril) am Ende der Gefäßversuche und die über alle übrigen Varianten gemittelten Endgehalte der Bodenproben (aktiv) in Prozent der Ausgangsgehalte. Nur bei den sterilisierten Varianten von Ac und Ko mit PAK-Endgehalten von 97% der Ausgangsgehalte kann das **Ausmaß der abiotischen Abbau- und Festlegungsprozesse** als unbedeutend angesehen werden. Bei den übrigen Proben kann bei Betrachtung der PAK-Summen scheinbar nicht zwischen biotischen und abiotischen Prozessen als Ursache der PAK-Abnahme differenziert werden.

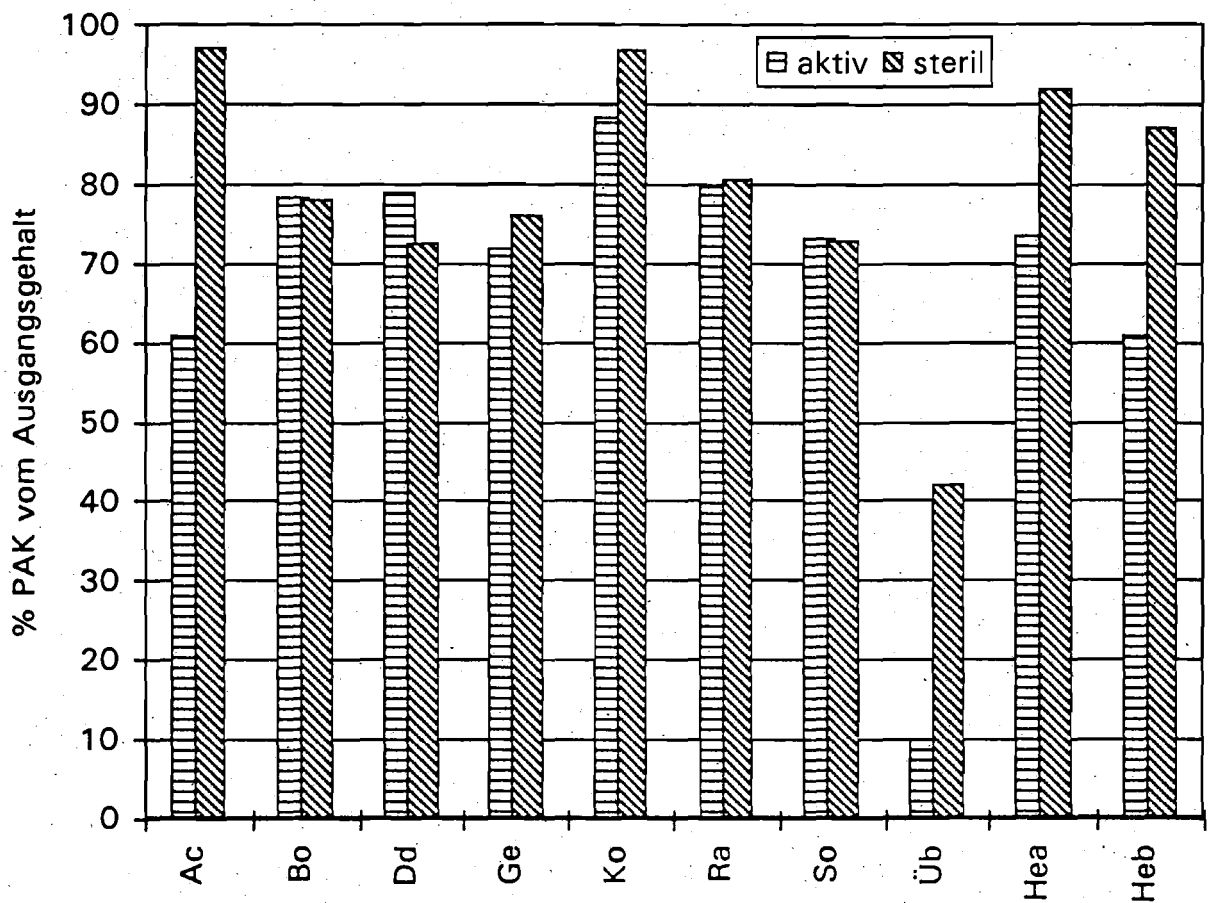


Abb.8: Mittlere Anteile der PAK-Gehalte aller biologisch aktiven Varianten (aktiv) und Anteile der HgCl₂-sterilisierten Varianten (steril) der zehn Bodenproben am Versuchsende (16.11.94) in Prozent der PAK-Ausgangsgehalte (Versuchsdauer 74 Wochen, Summe von 15 PAK nach US-EPA-Liste)

Bezüglich der Gehaltsabnahmen der einzelnen PAK sind aber zwischen den sterilisierten und den mikrobiell aktiven Proben wesentliche Unterschiede festzustellen. In Tab.17 sind die PAK-Restmengen in den biologisch aktiven und den sterilisierten Varianten, zusammengefaßt zu 3-, 4-, 5- und 6-Ring-Aromaten aufgelistet. Daraus ist abzulesen, daß die Abnahme der Gehalte an 3- und 4-Ring-PAK in den meisten Bodenproben wesentlich auf mikrobielle Umsetzungen zurückzuführen ist. 27% (Ge-Hg) und weniger der Ausgangsgehalte an 3-Ring-PAK (Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren und Anthracen) verschwinden aus den sterilen Proben; eine Ausnahme bildet jedoch die Probe Üb-Hg mit einer Abnahme der Gehalte um 64,7%. In den sterilisierten Bodenproben verbleiben im Mittel nach 74 Wochen Versuchsdauer PAK-Mengen von 81,4% (96,8% mit den Proben Ko und Hea), in den mikrobiell aktiven Proben hingegen im Durchschnitt nur 60,8% (75,9% mit den Proben Ko und Hea) der PAK-Anfangskonzentrationen. Diese Differenz ist damit auf mikrobielle Abbauprozesse zurückzuführen.

Ähnliches ergibt sich für die Gruppe der 4-Ring-PAK (Fluoranthen, Pyren, Benzo[a]anthracen, Chrysen). Im Durchschnitt aller Bodenproben werden in den mikrobiell aktiven Proben nach 74 Wochen um 16,6 Prozent niedrigere Konzentrationen erreicht als in den sterilen Varianten mit im Mittel 84,2% der Ausgangsgehalte.

Tab.17: PAK-Anteile der Hg-sterilisierten Varianten (steril) und im Durchschnitt der mikrobiell aktiven Varianten (aktiv) am Versuchsende in % der Ausgangsgehalte

	EPA-PAK		3-Ring-PAK		4-Ring-PAK		5-Ring-PAK		6-Ring-PAK	
	aktiv	steril	aktiv	steril	aktiv	steril	aktiv	steril	aktiv	steril
Ac	60,9	97,2	39,9	100	69,2	103	86,9	94,6	101	99,6
Bo	78,2	78,0	74,1	87,1	77,5	77,1	82,0	73,9	92,2	80,2
Dd	79,0	72,7	81,7	92,0	77,6	79,0	81,6	64,5	94,9	62,2
Ge	71,8	76,1	65,5	73,0	68,0	81,1	80,1	78,6	77,8	78,2
Ko	88,3	97,0	144	180	86,0	96,2	85,1	85,8	72,7	74,1
Ra	79,6	80,7	82,0	92,0	83,2	88,2	88,1	82,7	88,6	67,6
So	73,2	72,8	83,3	92,3	74,2	73,4	66,3	66,1	76,8	71,7
Üb	9,88	42,1	3,82	35,3	17,1	67,7	61,2	60,9	66,4	65,1
Hea	73,6	92,0	128	137	62,3	85,9	84,8	91,5	73,1	80,7
Heb	61,0	87,1	56,3	79,3	60,5	90,6	80,2	87,0	76,4	74,4

Die dennoch nicht unerheblichen Reduzierungen der Gehalte an 3- und 4-Ring-PAK in den Hg-Varianten werden - soweit sie nicht biotisch bedingt sind - zu einem

großen Teil auf **chemische Oxidations- und Hydrolysierungsvorgänge** zurückzuführen sein. Verflüchtigung und Photooxidation spielen zwar bei 2- und 3-Ring-PAK eine Rolle - nicht dagegen bei höherkondensierten Verbindungen -, doch wird das Ausmaß dieser Prozesse als gering angesehen (PARK et al. 1990, STIEBER et al. 1990). Die demgegenüber beträchtlichen Abnahmen der 3-Ring-Aromaten in der Hg-Variante der Probe Üb werden vermutlich durch die hohen Gesamtgehalte an dieser PAK-Gruppe bedingt und können darüberhinaus auch durch die erhöhten Gehalte an weiteren leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen in diesem Boden verursacht sein (s. Tab.3, Kap.2.1.2). Infolge einer Codestillation können PAK von diesen stark ausgasenden Substanzen mitgerissen werden, was zu deutlich erhöhten Austrägen führen kann.

Im Vergleich zu diesen Ergebnissen konnten dagegen HOSLER et al. (1988) in viermonatigen Tracerversuchen für Naphthalin (2-Ringe) nur **gasförmige Verluste** von 0,08% der dotierten Radioaktivität, bei Anthracen (3-Ringe) von lediglich 0,03% detektieren. Bei den höhermolekularen PAK fanden sie für Benzo[a]pyren Verflüchtungsverluste von 0,03% des ^{14}C . SCHNÖDER et al. (1994) wiesen für Fluoranthen in 117 Tagen Ausgasungen von 1% der Ausgangsradioaktivität nach. Bei Benzo[a]pyren konnten sie keine Verflüchtigung feststellen; vielmehr werden höherkondensierte PAK gegenüber den Gehalten in der Luft im Boden relativ angereichert (KLOSTER et al. 1994).

Der **photochemische Abbau** von PAK wird laut EDWARDS (1983) bereits in der Luft infolge Adsorption an Ruß- oder Flugascheteilchen vermindert. Für einen mehrere Dezimeter mächtigen Bodenkörper wie in den Versuchsgefäßen vorliegend wird dieser Abbaupfad keine Bedeutung haben und durch die Pflanzenbedeckung der mikrobiell aktiven Varianten weitgehend ausgeschaltet sein.

Die schwerflüchtigen **5- und 6-Ring-PAK** unterliegen als reaktionsträge, Mesomerie-stabilisierte Moleküle nur zu geringen Anteilen chemischen Oxidations- und Hydrolyse-Reaktionen, die durch pedogene Oxide und Tonminerale katalysiert werden (MORTLAND & HALLORAN 1976, BOLLAG & LOLL 1983). Von Bedeutung ist vor allem die feste Bindung an hydrophobe Austauschere, die als physikalische Adsorption an Huminstoffen sehr rasch und nur bedingt reversibel stattfindet (McCARTHY & JIMINEZ 1985a, TEBAAY 1994). GAUTHIER et al. (1987) bezeichnen diesen durch die geringe Wasserlöslichkeit und Van der Waals-Kräfte forcierten Prozeß als hydrophobe Bindung. Wahrscheinlich werden im wesentlichen durch diese feste Bindung die Gehalte an 5-Ring-PAK (Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Dibenz[ah]anthracen) im Mittel um 21,4% (maximal 39,1% Üb-Hg), die der 6-Ring-PAK (Benzo[ghi]perylen,

Indeno[1,2,3-cd]pyren) um 24,6% (maximal 37,8% Dd-Hg) gegenüber den Anfangsgehalten reduziert.

Auffällig ist dabei, daß die Gehalte dieser Polyaromaten in zahlreichen mikrobiell aktiven Proben zu unterschiedlich vielen Probennahmeterminen z.T. erheblich höher liegen als in den Quecksilber-behandelten Varianten (am Versuchsende maximal 32,7% höhere 6-Ring-PAK-Gehalte im Mittel der Varianten der Probe Dd gegenüber Dd-Hg; s. Tab.17). Da weder eine Neubildung von 5- und 6-Ring-PAK in den mikrobiell aktiven Varianten noch ein erhöhter Abbau in den Hg-Varianten wahrscheinlich ist, werden die höheren Anteile in den mikrobiell aktiven Varianten als mobilisierte "bound residues" gedeutet. Da in den untersuchten Böden die Kontamination mit PAK wenigstens seit den 60er Jahren vorliegt und diese z.T. erheblich erhöhte Corg-Gehalte aufweisen, sind nach UMLAUF & BIERL (1987) günstige Bedingungen für die Bildung von "bound residues" gegeben. Damit lassen sich die oft im Zuge von Sanierungen und auch im Verlauf dieser Untersuchungen beobachteten Anstiege der PAK-Gehalte, z.T. über die Ausgangsgehalte hinaus, erklären. Denn durch die vorgenommenen Bodenbehandlungsmaßnahmen werden die Boden/Lösungsgleichgewichte gestört, die Aktivität und Zusammensetzung von Bodenfauna und -flora manipuliert sowie die Bodeneigenschaften erheblich verändert und damit günstige Bedingungen für eine Mobilisierung gebundener Rückstände geschaffen. Für eine solche Mobilisierung könnte der schon im Zusammenhang mit der Auswaschung (s. Kap.4.2) diskutierte Einfluß gelöster organischer Substanzen verantwortlich sein. Unter dem Einfluß mikrobieller Aktivitäten aus den bodeneigenen und zugegebenen organischen Substanzen gebildet, mobilisieren sie die PAK zumindest soweit, daß sie durch das verwendete Analysenverfahren meßbar werden. Ungewiß ist, ob diese teilsolubilisierten PAK überhaupt einem mikrobiellen Abbau zur Verfügung stehen (KRAATZ & SCHRÖDER 1993). Demgegenüber findet auch eine Readsorption der PAK von den gelösten organischen Substanzen zurück an die Bodenaustauscher statt (McCARTHY & JIMINEZ 1985b), die gerade bei fehlender Neubildung von DOM - in den Gefäßversuchen aufgrund der Sterilisation des Bodens - zunehmen wird.

Durch diese Vorgänge kann es zu den im Vergleich zu den sterilen Varianten erhöhten Mengen an 5- und 6-Ring-PAK in einigen belebten Proben kommen. Denn gerade bei höherkondensierten PAK kann die Sorptionswirkung von Huminstoffen durch den mobilisierenden Effekt gelöster organischer Substanzen kompensiert werden (TEBAAY 1994). Insgesamt nehmen aber in den mikrobiell aktiven wie auch in den Hg-Varianten die Gehalte der hochmolekularen PAK ab (Tab.17). Dies weist darauf hin, daß auch diese Verbindungen keineswegs inert sind.

Ebenso könnte der Anstieg der Konzentrationen der 3-Ring-PAK in den Proben Ko und Hea über die Ausgangsgehalte hinaus (>100%) im wesentlichen auf eine Freisetzung gebundener Rückstände im Verlauf der Gefäßversuche zurückzuführen sein. Durch solche Freisetzungs- und erneute Immobilisierungsprozesse kommt es oft über den Versuchszeitraum zu stark schwankenden PAK-Meßwerten. Deren Ursachen und Wirkungen sind im Zusammenhang mit den Veränderungen der PAK-Gehalte in den verschiedenen Bodenproben eingehender dargestellt (s. Kap.5.3.1). Aufgrund der beschriebenen Gehaltsschwankungen im Versuchsverlauf sollten nicht nur Anfangs- und Endgehalte, sondern **Zeitverläufe der PAK-Gehalte** betrachtet werden (STEILEN et al. 1993). Gerade das augenscheinlich hohe Ausmaß abiotischer Umsetzungen der PAK in der Bodenprobe Üb stellt sich in der Betrachtung als Funktion der Zeit verändert dar (Abb.9).

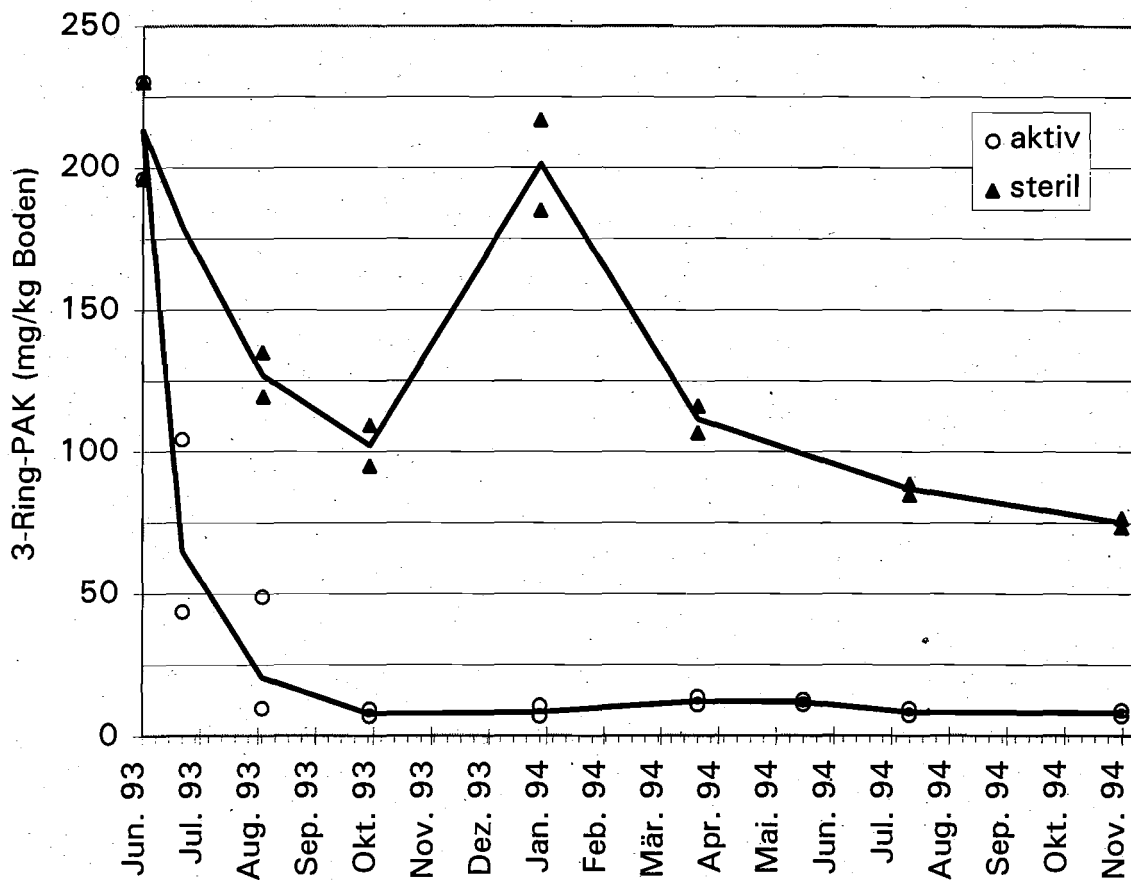


Abb.9: Gehalte an 3-Ring-PAK nach US-EPA-Liste im Mittel aller biologisch aktiven Varianten (aktiv) und in der HgCl₂-sterilisierten Variante (steril) der Bodenprobe Üb in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Die Abnahmen der Gehalte an 3-Ring-PAK bleiben in den sterilisierten Bodenproben zeitlich hinter denen der biotisch aktiven zurück (Abb. 9). Dies gilt bzgl. der 3- und 4-Ring-PAK für alle Bodenproben außer Ko, Ra und So.

Die Vergleiche zwischen HgCl₂-behandelten und mikrobiell aktiven Bodenproben zeigen, daß die z.T. erheblichen Abnahmen der 3- und 4-Ring-Aromaten in der Mehrzahl der Proben zu wesentlichen Anteilen auf mikrobiellen Umsetzungen beruhen. Diese laufen zumeist schneller ab als die abiotisch bedingten PAK-Abnahmen in den sterilisierten Proben. Ohne zu berücksichtigen, daß die Sterilisation nur bei den Proben Bo & Üb über den gesamten Versuchsverlauf vollständig wirksam war, betrug der Anteil der durch abiotische Prozesse bedingten PAK-Abnahme von 3- und 4-Ring-PAK im Mittel ca. 15 %. Liegen hohen Anteile von 2- und 3-Ring-PAK in den Bodenproben vor, so können deren Abnahmen durch abiotische Prozesse auch über 50 % betragen.

Die extrahierbaren Gehalte an 5- und 6-Ring-PAK nehmen in allen untersuchten Proben durchschnittlich ab, doch werden diese in den Hg-Varianten stärker vermindert. Offensichtlich unterliegen diese PAK-Gruppen stärker einer Bildung und Mobilisierung von "bound residues" als Ursache der Gehaltsab- und -zunahmen (s. Kap.4.5 und 5.3.1). Dabei bewirken Mikroorganismen über die Bildung von gelösten organischen Substanzen (DOM) und deren Wirkung als Lösungsvermittler eher eine Mobilisierung von zuvor nicht extrahierbaren PAK. Diese können auch aus Kohle- und Teerpartikeln freigesetzt werden.

4.5 MIKROBIELLER EINBAU

Trotz der in Kap.4.4 diskutierten Phänomene der PAK-Mobilisierung infolge mikrobieller Aktivität können Polycyclen ebenso durch Mikroorganismen eingebaut und in einer nicht mehr extrahierbaren Form als "bound residues" im Boden gebunden werden.

Sorbenten für diese "bound residues" sind die Huminstoffe des Bodens. Mit ihrem hohen Anteil phenolischer und chinoider Strukturen sind Huminstoffe in Teilen den PAK chemisch verwandt oder enthalten selber PAK-Moleküle als natürliche Bauelemente (BOLLAG & LOLL 1983). Die Assoziation zwischen Schadstoff und Humuspolymer beruht aber nicht nur auf Adsorptionsmechanismen oder rein sterischen Inkorporierungen, sondern bei einigen PAK auch auf komplexartigen Bindungen (Elektronen-Akzeptor-Komplexe) mit planaren Randgruppen der Huminstoffe (MAHRO & KÄSTNER 1993). Die bedeutendste Bindungsreaktion ist jedoch die oxidative Kopplung, katalysiert durch extracelluläre Peroxidasen und Phenoloxidasen von Basidiomyceten, durch die covalente Bindungen gebildet werden

(BOLLAG 1992). Durch die Enzymwirkung werden Humusbestandteile äußerst reaktiv und setzen so auch wenig reaktive Verbindungen um (BOLLAG & MYERS 1992), zu denen die 5- und 6-Ring-PAK zählen (vgl. Kap.4.4). Auch andere Mikroorganismen katalysieren die Bildung von "bound residues", indem sie die Schadstoffe bzw. Huminstoffe nach Inkorporierung über Dioxygenasen (Bakterien) oder Monoxygenasen (Pilze) metabolisieren (CERNIGLIA 1984) oder die Bodeneigenschaften (pH, Redoxpotential) verändern (BOLLAG & LOLL 1983).

SCHNÖDER (1995) konnte in Abbaustudien mit radioaktiv markierten PAK nach 117 Tagen etwa 20% der Gesamtaktivität als "bound residues" bestimmen. Bei parallel durchgeführten Lysimeterstudien erwiesen sich 50% des nach 2,5 Jahren verbliebenen ¹⁴C als nicht extrahierbar (SCHNÖDER et al. 1994). Ca. 2/3 dieser PAK-"bound residues" wurden als an Humine, das übrige 1/3 als zu gleichen Teilen an Humin- und Fulvosäuren gebunden bestimmt. Dabei nahm der an die hochmolekularen Humine gebundene Anteil über den Zeitverlauf relativ zu.

Prinzipiell ist damit auch eine Bindung an mobile organische Substanzen und die Möglichkeit zur Verlagerung gegeben. Da die wesentliche Reaktion, die zur Bildung von nicht extrahierbaren Rückständen führt, aber die Polymerisation ist (BOLLAG & LOLL 1983), ist diese Gefahr eher gering. Zudem ist keine Aussage möglich, ob und zu welchen Ausmaßen die Bildung gebundener Rückstände zu einer Strukturveränderung der Schadmoleküle führt. KÄSTNER et al. (1992a) halten aber die Humifizierung und damit Strukturauflösung der Kontaminanten für die entscheidende Reaktion. Gleichwohl ist nach BOLLAG & LOLL (1983) eine Wiederfreisetzung gebundener Schadstoffe unter anderem durch mikrobielle Umsetzungen möglich. Dies wird aus solchen Bindungen möglich sein, die chemisch nicht veränderte PAK betreffen und damit vor allem sterische Inkorporierungen und adsorptive Bindungen umfassen. Ihr Ausmaß wird aber aufgrund nur geringer Desorptionsraten und nachfolgender neuerlicher Umsetzungen vermutlich keine toxikologisch bedenklichen Folgen haben. Deshalb beurteilen BERRY & BOYD (1985), BOLLAG & MYERS (1992), KÄSTNER et al. (1992b) und andere die Bildung von "bound residues" als Möglichkeit der Sanierung von belasteten Böden. Im Rahmen der natürlich ablaufenden Humusumsetzungen werden auch die gebundenen Rückstände letztlich zu CO₂ mineralisiert.

Als untrennbarer Teil biologischer Sanierungsprozesse wird die Bildung von "bound residues" immer stattfinden und in einem ganz wesentlichen Maße zu einer Reduktion der Gehalte von Xenobiotika in Böden beitragen. Wenn also im folgen-

den von einer PAK-Abnahme die Rede ist, so ist damit neben dem mikrobiellen Abbau auch der strukturverändernde Einbau gemeint.

Eine nur annähernd exakte Quantifizierung des Ausmaßes des mikrobiellen Einbaus von PAK in bodeneigene Substanzen ist aber mit dem gewählten Versuchsdesign nicht möglich. Auch kann keine Bewertung der Anteile des strukturauflösenden (irreversiblen) Einbaus einerseits und der Bildung wieder remobilisierbarer "bound residues" andererseits gegeben werden.

5. VERÄNDERUNG DER PAK-GEHALTE IN DEN BODENPROBEN

Zahlreiche Untersuchungen belegen, daß Mikroorganismen prinzipiell in der Lage sind, PAK metabolisch oder cometabolisch abzubauen (z.B. BEYER & KLEIN 1989, MAHRO & KÄSTNER 1993). Es wurde verschiedentlich über erfolgreiche on-site-Sanierungen berichtet (HENKE 1992, PESCHLA & TIBERG 1993, SCHULZBERENDT 1993). Nachvollziehbare Dokumentationen von biologischen PAK-Sanierungen wurden in den meisten Fällen jedoch nicht vorgelegt. Häufig erzielten mikrobielle Sanierungsmaßnahmen nicht den gewünschten Erfolg (z.B. Steilen et al. 1993). Dies liegt im wesentlichen an zwei Faktoren:

1. ungünstige Lebensbedingungen für die Mikroorganismen
2. geringe Verfügbarkeit der Schadstoffe

Im Rahmen der Gefäßversuche sollten deshalb diese zwei Faktoren ganz gezielt durch verschiedene Bodenbehandlungsmaßnahmen beeinflusst werden, wie Zugaben von nach Art und Menge unterschiedlichen organischen Substanzen, von Nitrat, von verschiedenen Tensiden und der Kalkung versauerter Bodenproben. Aus den Ergebnissen der PAK-Abnahmen, die über den Verlauf von 74 Wochen ermittelt wurden, können Rückschlüsse auf die Einflüsse verschiedener Bodenparameter und PAK-Belastungen auf die Abnahme der PAK-Gehalte gezogen werden. Zur Wirkung der durchgeführten Bodenbehandlungsmaßnahmen können Empfehlungen ausgesprochen werden.

Bevor Bodenbehandlungsmaßnahmen zur Anregung und Steigerung des mikrobiellen Schadstoffabbaus erwogen werden, sind einige **Voraussetzungen** zu beachten. So setzen sich Böden ehemaliger Kokerei- und Gaswerksstandorte typischerweise aus Aufschüttungen/Auffüllungen teilweise schadstoffbelasteter, technogener Substrate (Aschen, Bauschutt, Bergematerial, Kohle, Müll, Schlacken) und den durch diese in unterschiedlicher Mächtigkeit überdeckten, ehemaligen Böden zusammen (BURGHARDT 1989, HEIDE & WERNER 1989). Solche technogenen Böden weisen häufig ungünstige pH-Werte und geringe Nährstoffgehalte bei schlechten Nährstoffverhältnissen auf (HILLER 1992). Infolge der heterogenen Verteilung und großtechnischen Aufbringung der Materialien können sehr locker gelagerte Bereiche hoher Skelettanteile mit großen Porenräumen und verdichtete, feintexturierte Zonen neben- oder übereinander vorliegen. Daraus resultieren Bodenbereiche geringer Wasserhaltekapazitäten einerseits und stau- oder haftnasse Reduktionsbereiche andererseits (BULLOCK & GREGORY 1991). Proben dergestalter Böden wurden auch für die vorliegenden Untersuchungen verwendet.

Vor Beginn einer Sanierungsmaßnahme ist es zweckmäßig unbelastete und kontaminierte Substrate zu trennen. Technogen geprägte Materialien und zugleich die Schadstoffverteilung sollten homogenisiert, für Mikroorganismen unzugängliche, jedoch kontaminierte Skelettanteile abgesiebt oder zerkleinert sowie die Nährstoffverhältnisse und die Bodenreaktion optimiert werden, um die Lebensbedingungen für Mikroorganismen und damit das biologische Abbaupotential zu steigern.

5.1 UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEN VERSCHIEDENEN BODENPROBEN

Alle untersuchten Bodenproben erhielten im Rahmen des beschriebenen Variantenschemas (s. Kap.2.2.1, Tab.6) definierte Zugaben an organischen Substanzen, Nitratstickstoff sowie gegebenenfalls Tensiden und wurden über einen Zeitraum von 74 Wochen im Freiland den natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt. So lagen für alle Bodenproben prinzipiell dieselben Abbaubedingungen vor. Dennoch führten die Versuche zu bodenabhängig unterschiedlichen **Abnahmeraten** bzw. **PAK-Restgehalten**. Für die Varianten der Probe Ko ergibt sich im Verlauf von 74 Wochen eine mittlere Abnahme der PAK-Gesamtgehalte von nur 11,7%. Bei sechs der zehn untersuchten Bodenproben liegen diese zwischen 20 und 29%. In den Bodenmaterialien Ac und Heb werden je 39% der PAK-Kontamination eliminiert, in der Probe Üb sogar 90% (Tab.18). Trotz geringerer PAK-Gehalte in einzelnen Varianten muß der Sanierungserfolg für die übrigen Altlastproben mit Restgehalten von bis zu 1085 mg PAK/kg Boden (Bo-) bei einer Bewertung nach den Gesamtgehalten als gering bis mäßig angesehen werden (detaillierte Analysendaten s. Tab.34.1-10 und 35.1-2, im Anhang). Die Orientierungswerte für höchstzulässige PAK-Gehalte bei der Wiederverwertung von Bodenmaterial, die in den technischen Regeln der LAGA (1994) aufgeführt sind, werden nicht erreicht.

Tab.18: Anfangs- (16.06.93) und Endgehalte (16.11.94) der Altlast-Bodenproben an 15 PAK der US-EPA-Liste (-PAK) nach einer 74 wöchigen Behandlungszeit (Mittelwerte über alle mikrobiell aktiven Varianten; mg/kg Boden)

	Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Ub	Hea	Heb
Σ -PAK 16.06.93	1286	1300	176,9	138,5	168,6	959	114,9	317,9	141	52,1
(mg/kg) 16.11.94	783	1017	139,7	99,4	148,9	763	84,1	31,4	103,6	31,8
Abbau (mg/kg)	503	283	37,2	39,1	19,7	196	30,8	286,5	37,3	20,3
Abbau (%)	39,1	21,8	21,0	28,2	11,7	20,4	26,8	90,1	26,4	39,0

Solche nicht abgebauten PAK-Anteile liegen in der Regel in nicht bioverfügbarer Form an die Bodenaustauscher gebunden vor. Sorbenten sind im Falle der PAK vor allem die Huminstoffe der Böden. Z.B. fanden WEIßENFELS et al. (1993) enge positive Korrelationen zwischen dem PAK-Gehalt und dem **organischen**

Kohlenstoffgehalt von Böden. Bei den vorliegenden Untersuchungen mit Bodenproben sehr unterschiedlichen Belastungsgrades ergaben sich solche Beziehungen jedoch nicht. Trotz eines weiten Spektrums mit Corg-Gehalten der Böden von 2,2 bis 25,7% korrelieren diese weder mit den PAK-Ausgangs- noch Endgehalten, noch mit der PAK-Abnahme über 74 Wochen. So werden die PAK-Gehalte in der Bodenprobe Üb um 90,1%, dagegen in der Probe Dd nur um 21,0% vermindert; beide Bodenmaterialien enthalten 2,2% Corg. Die PAK-Reduzierung in den Bodenproben Ac und Ko, die jede 5,8% Corg aufweisen, beläuft sich auf 39,1% (Ac) und 11,7% (Ko) (Tab.18). RUTHERFORD et al. (1992) messen mehr der Qualität als der Quantität der organischen Bodenaustauscher die entscheidende Bedeutung bei. Sie konnten feststellen, daß die Sorption der PAK mit dem Verhältnis polarer zu nicht polaren Gruppen der Huminstoffe $[(O+N)/C]$ negativ korreliert ist.

Durch das C/N-Verhältnis läßt sich die **Qualität der organischen Substanz** eines Bodens grob charakterisieren. Mit Werten zwischen 30 und 40 liegen sieben der zehn Proben in einem Bereich der für stark versauerte Podsole typisch ist (s. Kap.2.1.2, Tab.2). Die organische Bodensubstanz weist die Qualität von Rohhumus auf, was Nährstoffarmut und schlechte Abbaubarkeit (SCHACHTSCHABEL et al. 1989) sowie ausgeprägte hydrophobe Eigenschaften bedeutet. Der geringe Stickstoff-Anteil läßt das Vorkommen von vergleichsweise wenigen Proteinstrukturen, dafür mehr aliphatischen und cyclischen Kohlenstoffketten vermuten. Daneben ist das weite C/N-Verhältnis bei den meisten Proben vor allem auf beträchtliche Anteile an N-armen Kohlen- und Teerresten zurückzuführen (s. Tab.24.1 und 2, im Anhang). Damit sind günstige Bedingungen für eine starke Adsorption und Festlegung hydrophober Substanzen gegeben. Aber auch die Bildung höherer Anteile an niedermolekularen Fulvosäuren ist für solche Huminstoffqualitäten typisch, so daß damit auch eine stärkere Bildung von pedogenen Lösungsvermittlern (Dissolved organic matter = DOM) verbunden sein kann. In den übrigen drei Bodenproben (Bo, So, Heb) liegt bei einem C/N-Verhältnis um 20 eine organische Bodensubstanz in der Qualität von Moder vor. Zu berücksichtigen ist, daß das C/N-Verhältnis nur einen Durchschnittswert angibt. Gerade in den anthropogen stark beeinflussten Altlastböden werden organische Substanzen sehr unterschiedlicher Eigenschaften heterogen verteilt nebeneinander vorliegen.

Auch **pedogene Oxide und Tonminerale** vermögen organische Substanzen zu adsorbieren (LITZ & BLUME 1989), spielen aber bei der Bindung von Polycyclen im wesentlichen nur über die Co-Sorption mit DOM (TOTSCHKE & KÖGEL-KNABNER 1995) eine Rolle. Tonminerale können sogar eine insgesamt verminderte Adsorption organischer Chemikalien in Böden bewirken (z.B. BOLLAG & LOLL 1983). Dem

folgend ergeben sich keine Korrelationen zwischen den PAK-Gehalten der Bodenproben und ihren Gehalten an mineralischen Bodenaustauschern. Auch die häufig geäußerte Ansicht, daß mikrobiologische Sanierungsverfahren für feintexturierte Böden weniger geeignet sind (z.B. BRYNIOK 1991, HILLER 1992, MACKENBROCK 1992, PESCHLA & TIBERG 1993), wird durch die Gefäßversuche nicht bestätigt. Im Gegenteil weist die Probe Üb mit dem höchsten Tongehalt (15,7%) die stärkste PAK-Abnahme auf, während in der Probe Dd mit 73,5% Sand über 74 Wochen nur eine mäßige Verminderung der PAK-Belastung zu verfolgen ist.

Eine **potentielle Kationenaustausch-Kapazität (KAK)** von 16,2 mval/100g in dem Bodenmaterial Üb belegt, daß die Tonminerale in dieser Probe mit relativ niedrigen C_{org} -Gehalten (2,2%) auch quantitativ für die PAK-Bindung von Bedeutung sein dürften. Die geringe Stärke der PAK-Bindung an Tonminerale könnte eine Ursache für den hohen PAK-Abbau in dieser Probe sein. In der Probe Bo ist bei einer KAK ähnlicher Höhe (15,1 mval/100g Boden) aber einem wesentlich höheren C_{org} -Gehalt (16,6%) ein stark gehemmter PAK-Abbau festzustellen; dies deutet auf eine PAK-Festlegung durch organische Substanzen hin. Hohe Gehalte an dithionit- und oxalatlöslichem Eisen können dabei für eine Bildung stabiler mineralorganischer Komplexe verantwortlich sein.

Über die Sorption an pedogenen Bodenaustauschern hinaus sind PAK häufig in **technogenen Substraten** organischen Ursprungs angereichert. VAN AFFERDEN et al. (1992b) und SPRENGER et al. (1994) fanden den Großteil der PAK-Kontamination von Altlastböden in Kohle, Schlacken u.ä. Partikeln sorbiert. Die z.T. erhebliche Anreicherung der PAK in diesen Partikeln ist zum einen in deren Herkunft zu sehen, indem sie unmittelbar PAK-Syntheseprozessen entstammen (z.B. Bitumen, Teer) und zu hohen Anteilen aus Polycyclen bestehen. Zum anderen können sie ein hohes Sorptionsvermögen für Schadstoffe aufweisen. Koks kann rein morphologisch durch seine poröse Struktur, aber auch chemisch durch seine hydrophoben Eigenschaften erhebliche Mengen an Polyaromaten binden. Innerhalb von Jahren bis Jahrzehnten können selbst elementare Kohlenstoffpartikel randlich oxidiert werden und Huminstoffe hoher Aromatizität bilden (HAUMAIER 1993), die hydrophobe Verbindungen besonders gut adsorbieren können.

Ein Großteil der PAK-Belastung und der zum Ende der Gefäßversuche verbleibenden Restkontamination wird an solchen Partikeln sorbiert oder in diesen inkorporiert vorliegen. Optisch konnten **Teerbröckchen, Aschen, Kohlepartikel** u.ä. angesprochen werden. Diese sind nicht zuletzt in den Bodenproben geringer Abnahmeraten enthalten. Für das Material So konnten STEILEN et al. (1993) eine Konzentrierung der PAK um den Faktor 10 in den technogenen Beimengungen nachweisen. Die Bodenmaterialien Üb und Heb weisen bei hohen PAK-Abnahmeraten nur geringe

Mengen technogener Substrate auf. Jedoch zeichnet sich die Probe Ac, bei einer ebenso hohen prozentualen PAK-Abnahme wie für die Probe Heb festgestellt, durch ausgesprochen hohe Mengen solcher Partikel aus. Wenn auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine exakte Quantifizierung der Schlackenteilchen, Kohlepartikel und ähnlicher Substanzen nicht möglich war, so scheint dennoch kein direkter Bezug zu den PAK-Gehalten und deren Abnahmeraten zu bestehen. Auch in diesem Falle dürfte eher die Qualität als die Quantität der technogenen Beimengungen von Bedeutung sein. Derart gebundene hydrophobe Schadstoffe sind auch mittelfristig nicht bioverfügbar (DE KREUK & ANNOKKÉE 1988) und wahrscheinlich auch ökotoxikologisch nicht wirksam, wenn auch Kohle gegen einen mikrobiellen Angriff nicht völlig inert ist und somit langfristig umgesetzt wird (KRAATZ et al. 1993). Dabei wird - so kann unterstellt werden - gleichzeitig ein Abbau der freigesetzten PAK stattfinden.

Lösungsvermittler anthropogenen Ursprungs wie BTX, Öle und Phenole können die Mobilität hydrophober Schadstoffe signifikant anheben (s. Kap.4.2). Sie treten im Zuge der Kohleveredlungsprozesse gemeinsam mit den PAK auf; daher liegen in Altlastböden häufig Mischkontaminationen vor (TEBAAY et al. 1993). Infolge ihrer Löslichkeitserhöhenden Wirkung auf die PAK können sie einerseits deren Abbau forcieren, andererseits ist aber auch eine hemmende Wirkung durch toxische Effekte auf die Bodenmikroben nicht auszuschließen. Insbesondere enthält die Bodenprobe Ac deutlich erhöhte Mengen solcher Verbindungen (s. Kap.2.1.2, Tab.3), z.B. 400 mg Mineralöl-Kohlenwasserstoffe/kg Boden. Die gegenüber der gleich hoch mit PAK belasteten Bodenprobe Bo stärkere PAK-Abnahme (s. Tab.18) mag auch durch Solubilisierungseffekte der Mineralöle mitverursacht sein. Der wesentliche Unterschied beruht jedoch auf den höheren Anteilen an gut abbaubaren 3-Ring-PAK in der Probe Ac. Die Abnahme der schwerflüchtigen 5- und 6-Ring-Aromaten ist hingegen in der Probe Bo stärker.

Neben den Bodeneigenschaften unterscheiden sich die untersuchten Bodenmaterialien ganz wesentlich in ihren **PAK-Ausgangsgehalten**. Bei Konzentrationen von 52,1 mg PAK/kg Boden (Heb) wird das Verhalten der Schadstoffe vor allem durch die Bodeneigenschaften bestimmt, während bei einer Belastung von 1300 mg PAK/kg Boden (Bo) mit Auswirkungen der Polycyclen auf die Bodeneigenschaften zu rechnen ist. Nicht unerhebliche Teile der Austauscheroberflächen - insbesondere Huminstoffe - werden infolge der Belegung mit PAK hydrophobe Eigenschaften aufweisen und damit eine geringere Sorptionskapazität für hydrophile Substanzen annehmen. Gleichzeitig können bei hohen PAK-Belastungen von mehreren hundert Milligramm bereits toxische Wirkungen auf Mikroorganismen auftreten (s. Tab.9 und TEBAAY et al. 1991).

SCHEUNERT (1991) konnte in Bezug auf das Langzeitverhalten von Chemikalien in Böden Grenzkonzentrationen bestimmen, bei denen ein Abbau zum Erliegen kommt. Diese sind nicht nur substanzabhängig, sondern werden auch durch die Ausgangskonzentration der Chemikalien bestimmt.

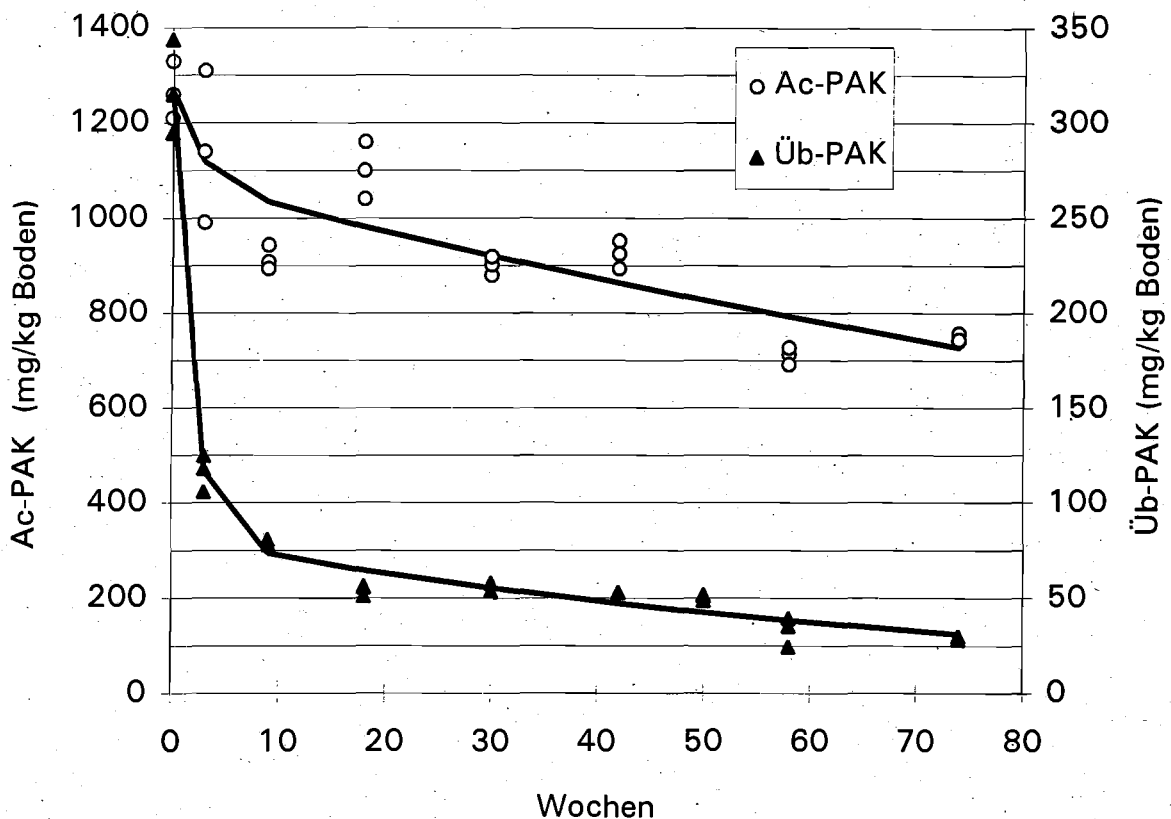


Abb.10: Gehalte der Summe von 15 PAK nach US-EPA-Liste (PAK) in den Varianten K2 der Bodenproben Ac (linke Ordinate) und Üb (rechte Ordinate) in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Abb.10 macht den Einfluß der Ausgangskonzentration am Beispiel der PAK-Gesamtgehalte der Varianten AcK2 und ÜbK2 deutlich. Wenn auch nach 74 Wochen für die stärker PAK-kontaminierte Variante AcK2 das Erreichen eines Abnahmeplateaus noch nicht zu erkennen ist, so klingt doch die Reduzierung der PAK-Gehalte in dieser höher belasteten Probe auf einem ebenfalls höheren Niveau aus als in der Probe ÜbK2. Daß höhere Anfangskonzentrationen in der Regel zu höheren Endkonzentrationen führen, mag darauf beruhen, daß parallel zum Abbau in bestimmten Anteilen immer auch ein mikrobieller Einbau von Substanzen erfolgt (vgl. SCHNÖDER et al. 1994).

Zwar kann keine Aussage über die tatsächlichen Ausgangsgehalte an PAK zum Zeitpunkt der Kontamination der Böden und über die im Zuge der Alterung der Kontamination abgelaufenen Prozesse gemacht werden, doch kann der Effekt der unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen den aus Abb.10 ersichtlichen Befund zumindest teilweise erklären. In seiner Wirkung wird er freilich durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Bodenproben und nicht zuletzt durch das vorhandene PAK-Spektrum modifiziert.

5.2 UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEN VERSCHIEDENEN PAK-EINZELSUBSTANZEN

Die Abbaubarkeit der PAK-Einzelsubstanzen ist sehr unterschiedlich und mit der Anzahl der kondensierten Ringe negativ korreliert (DE KREUK & ANNOKKÉE 1988). Die durch die Gefäßversuche festgestellten geringen und z.T. völlig ausbleibenden Abnahmen der Gehalte an hochkondensierten PAK sind weniger eine Ursache fehlender Abbaufähigkeit der Mikroorganismen als vielmehr durch eine sehr geringe Bioverfügbarkeit bedingt. Zwar konnten bis heute noch keine Spezialisten gefunden werden, die 5- und 6-Ring-PAK als einziges Substrat zu verwerten vermögen (MAHRO & KÄSTNER 1993); die vorliegenden Ergebnisse belegen aber, daß diese Verbindungen keineswegs inert sind. Cometabolische Umwandlungen werden als der entscheidende Abbaupfad für diese Polycyclen angesehen (METZNER 1989). Es wird ein sequentieller Abbau der PAK beschrieben, bei dem die Aromaten in der Reihenfolge ihres Kondensationsgrades eliminiert werden.

Bei den in Tab.19 aufgeführten Prozentanteilen der verschiedenen PAK-Gruppen an der Gesamtbelastung zu Beginn der Gefäßversuche fällt vor allem die Probe Üb mit erhöhten Mengen an 3-Ring-Aromaten auf; hingegen enthält die Probe Ko, in der nach 74 Wochen noch 88,2% der Gesamt-PAK verbleiben, zu 40% 5- und 6-Ring-PAK, während 2- und 3-Ring-Verbindungen nur 9,16% der Ausgangsbelastung ausmachen. Die unterschiedlichen Anteile der PAK-Einzelsubstanzen rühren zum einen von unterschiedlichen Produktionsabschnitten der ehemaligen Kokereien und Gaswerke als Kontaminationsquelle her, zum anderen sind sie durch Alterungsprozesse bedingt. So sind die leichtflüchtigen Aromaten aus der Probe So innerhalb von ca. 50 Jahren weitgehend ausgestrippt (STEILEN et al. 1992).

Im Verlaufe der Gefäßversuche haben sich aufgrund der unterschiedlichen Abbaubarkeit bzw. Verfügbarkeit der verschiedenen PAK die **Mengenverhältnisse** der Einzelverbindungen zueinander verändert. Bei dem Vergleich der in Tab.19 aufgelisteten prozentualen Gehalte zum Beginn und Ende der Gefäßversuche wird deutlich, daß der Anteil von 5- und 6-Ring-PAK an der Gesamtbelastung in fast allen Proben

zunimmt. Dagegen bleibt der Prozentsatz an 4-Ring-Aromaten in den meisten Proben annähernd gleich. Während die Gehalte des 2-Ring-PAK Naphthalin in den meisten Bodenproben stark abnehmen und z.T. nicht mehr nachweisbar sind (Ausnahme Ge), nehmen die Prozentanteile der 3-Ring-PAK in den Proben Dd, Ko, Ra, So und Hea eher zu (Gehalte in mg/kg s. Tab.35, im Anhang). Dies widerspricht zunächst dem Konzept der Abbaubarkeit in Abhängigkeit vom Kondensationsgrad; es wäre eine überproportionale Abnahme gegenüber den höherkondensierten Polycyclen zu erwarten gewesen.

Tab.19: Prozentanteile der PAK-Gruppen (Anzahl der kondensierten Ringe) an der Gesamtbelastung der Bodenproben zu Beginn (16.06.93) und zum Ende (16.11.94) der Gefäßversuche

	(%)	2-Ring-PAK	3-Ring-PAK	4-Ring-PAK	5-Ring-PAK	6-Ring-PAK
Ac	16.06.93	3,28	35,1	42,4	13,0	6,26
	16.11.94	0,0	23,0	48,1	18,5	10,4
Bo	16.06.93	1,48	15,9	51,6	20,9	10,2
	16.11.94	0,01	15,1	51,1	21,9	12,0
Dd	16.06.93	2,50	18,8	48,6	20,2	9,97
	16.11.94	0,0	19,4	47,8	20,8	12,0
Ge	16.06.93	4,78	27,2	42,0	17,8	8,26
	16.11.94	6,62	24,8	39,8	19,9	8,95
Ko	16.06.93	0,570	8,59	50,9	25,7	14,3
	16.11.94	0,0	13,8	49,5	24,8	11,7
Ra	16.06.93	7,55	17,2	46,4	18,8	10,0
	16.11.94	1,74	17,8	48,5	20,8	11,2
So	16.06.93	0,501	11,7	41,6	29,3	16,9
	16.11.94	0,192	13,3	42,3	26,5	17,7
Üb	16.06.93	6,00	67,1	20,9	4,31	1,66
	16.11.94	0,0	26,0	36,2	26,7	11,2
Hea	16.06.93	1,35	12,7	69,5	11,7	4,79
	16.11.94	0,899	22,0	58,9	13,5	4,76
Heb	16.06.93	2,12	19,4	66,3	9,03	3,22
	16.11.94	0,400	17,9	65,8	11,9	4,01

Dabei ist nun aber zu berücksichtigen, daß das Abbauverhalten ganz wesentlich durch die Konzentrationen der einzelnen Verbindungen mitbestimmt wird; laut ROSS et al. (1988) bedingt eine höhere Ausgangskonzentration eine höhere Abbaurrate. Dies wird insbesondere im Vergleich der Proben Üb und Hea deutlich, die einander entgegengesetzt ca. 70% 3-Ring- (Üb) bzw. 4-Ring-PAK (Hea) enthalten.

Während in der Probe Üb v.a. der Anteil der 3-Ring-Aromaten abnimmt, der der 4-Ring-PAK hingegen prozentual ansteigt, ist es in der Probe Hea genau umgekehrt.

Die Grenzkonzentration des Abbaus nach 74wöchiger Versuchsdauer liegt demgegenüber bei höheren Ausgangskonzentrationen auch bei höheren Endgehalten (vgl. Kap.5.1). Der in Abb.11 dargestellte Verlauf der Abnahme der Phenanthren-Gehalte in den Varianten K2 der Bodenproben Ac und Üb verdeutlicht dies.

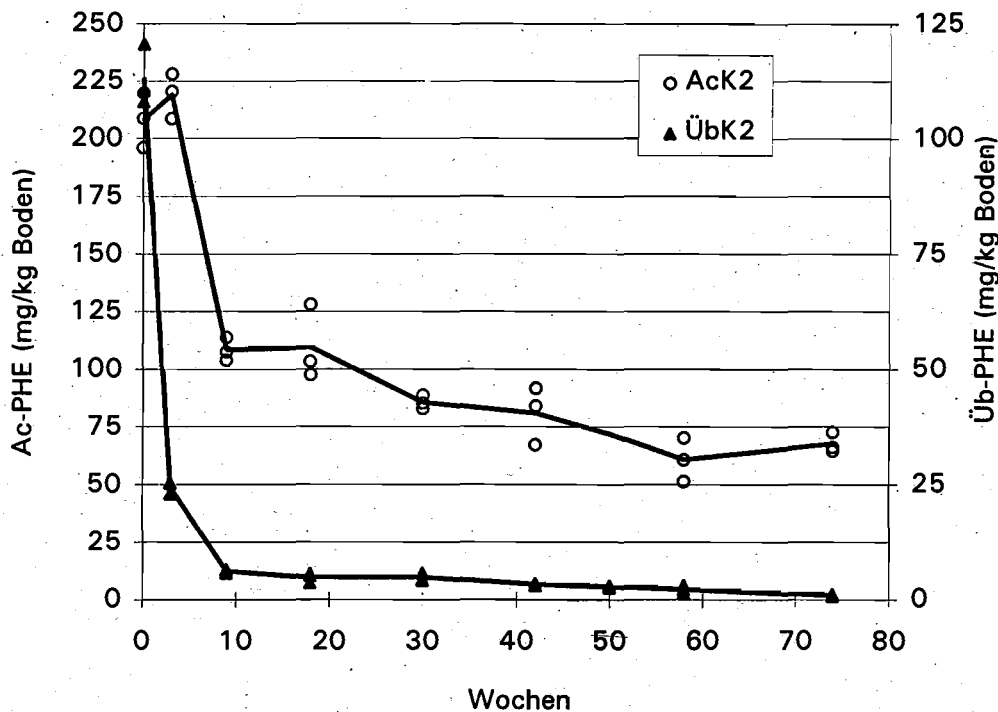


Abb.11: Gehalte von Phenanthren (PHE) in den Varianten K2 der Bodenproben Ac (linke Ordinate) und Üb (rechte Ordinate) in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Ausgehend von einer Phenanthren-Konzentration, die mit 208 mg/kg Boden in der Probe Ac annähernd doppelt so hoch ist wie in der Probe Üb (113 mg/kg Boden), führt die Abnahme nach 74 Wochen zu Gehalten von 67,8 mg (Ac) und 0,944 mg (Üb) je kg Boden. Dabei haben sich die unterschiedlichen Konzentrationsniveaus durch eine Eliminierung von 141 mg Phenanthren/kg Boden in der Probe Ac gegenüber nur 112 mg/kg in der Probe Üb angenähert. Der abgebaute Anteil ist indes mit 99,2% gegenüber 67,5% in dem Bodenmaterial Üb deutlich höher.

Der Einflußgrößenkomplex, der sich aus dem physikochemischem Verhalten der Einzelsubstanz, deren Konzentration und Anteil an der PAK-Gesamtkonzentration sowie den Bodeneigenschaften zusammensetzt, führt zu starken **Variationen des Abbauverhaltens** der PAK zueinander und zwischen den verschiedenen Böden.

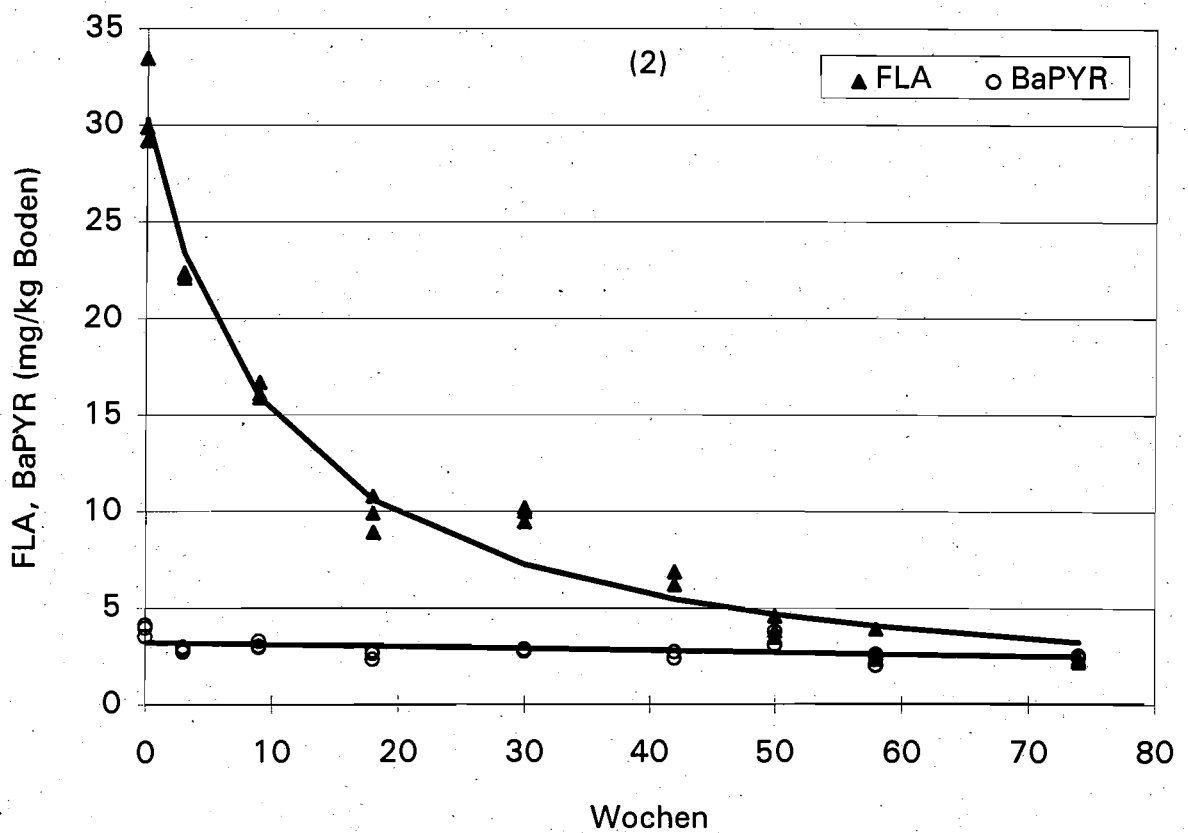
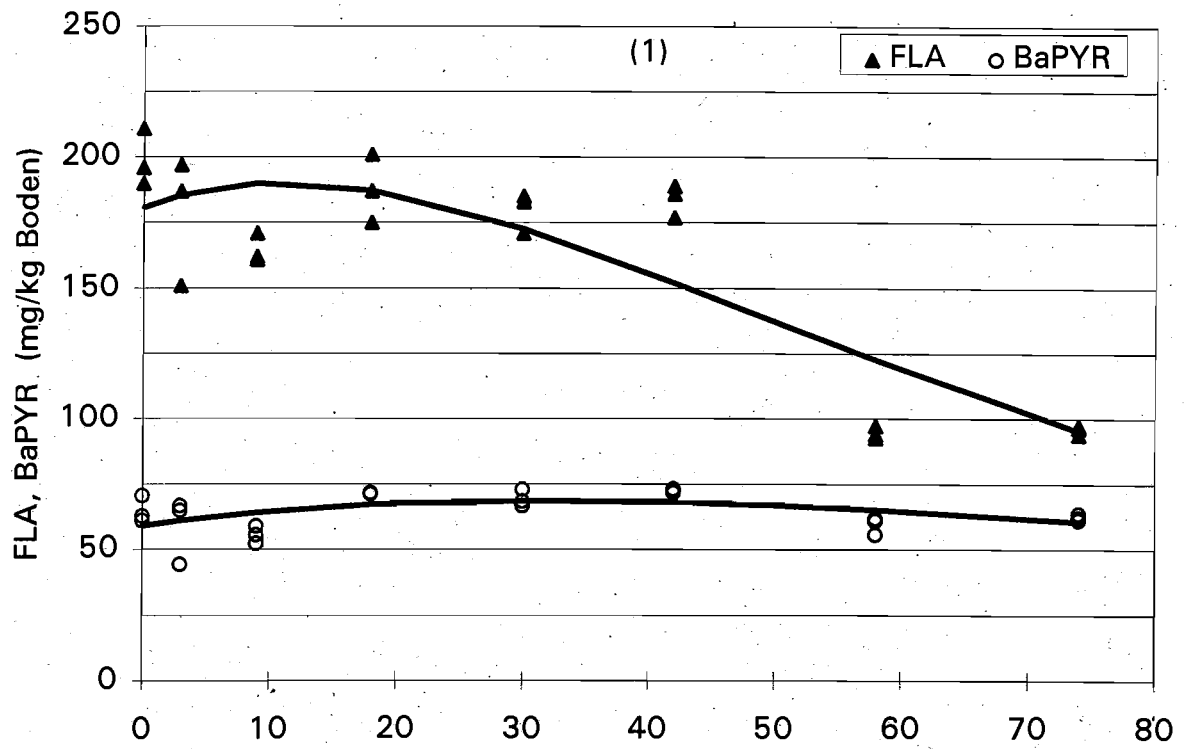


Abb.12.1 und 2: Gehalte von Fluoranthen (FLA) und Benzo[a]pyren (BaPYR) in den Varianten K2 der Bodenproben Ac (1) und ÜB (2) in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Abb.12.1 und 12.2 geben dies am Beispiel von Fluoranthen und Benzo[a]pyren in den Bodenproben Ac und Üb wieder. Während Fluoranthen in beiden Bodenmaterialien eine deutliche Abnahme zeigt, stagnieren die Konzentrationen von Benzo[a]pyren in der Höhe der Ausgangswerte. Der schwache Trend, der auf eine Reduzierung der Gehalte deutet, wird durch die zwischen den Probennahmeterminen stark schwankenden Konzentrationen nahezu verdeckt.

Die Abnahme von Fluoranthen setzt in der Bodenprobe Ac erst nach einer lag-Phase von neun Wochen ein (Abb.12.1); auch nach 74 Wochen ist offenbar noch keine konstante Grenzkonzentration erreicht. Demgegenüber beginnt die Eliminierung von Fluoranthen in dem Material Üb unmittelbar zu Versuchsbeginn mit hohen Raten und nähert sich zum Ende der Gefäßversuche einem Plateau (Abb.12.2). Daraus resultierend lassen sich die Abnahmekurven für Fluoranthen in den beiden Bodenproben am besten durch unterschiedliche Funktionstypen anpassen:

$$\text{FLA-Üb: } c = [(c_0^{(1-n)} + (n-1)k * t)]^{1/(1-n)} \quad (\text{HAMAKER 1972})$$

$$\text{FLA-Ac: } c = c_0 * e^{(-k * t)} + c_0' * e^{(-k' * t)} \quad (\text{LaFLEUR 1980})$$

Die Kennwerte dieser Funktionen sind in Tab.20 aufgeführt. Die Fluoranthen-Abnahme in der Bodenprobe Üb folgt einem Reaktionstyp 1,9ter Ordnung mit einer Zeitdauer von 10 Wochen bis zum Erreichen des halben Ausgangsgehaltes (DT_{50}). Für die Probe des Standortes Ac wird das Abnahmeverhalten von Fluoranthen hingegen am besten durch zwei gekoppelte e-Funktionen beschrieben. Aus diesen gekoppelten e-Funktionen ergibt sich ein graphisch abgeleiteter DT_{50} -Wert von 72 Wochen. Die Anpassungen gekoppelter e-Funktionen (Probe Ac) und einer Funktion 3,7ter Ordnung (Probe Üb) an die Abnahmekinetik von Benzo[a]pyren sind bei beiden Proben hingegen mit Bestimmtheitsmaßen von $r^2 \leq 0,28$ nur ungenügend. Wie aus den Funktionen ersichtlich ist (Abb.12.1 und 2), ist für die Eliminierung von Benzo[a]pyren eher eine Zeitdauer von Jahren bis Jahrzehnten zu erwarten.

Tab.20: Kennwerte der Konzentrations-Abnahmefunktionen von Fluoranthen (FLA) und Benzo[a]pyren (BaPYR) in zwei unterschiedlichen Altlast-Böden (Üb, Ac)

Boden	PAK	n	k; k'	$c_0; c_0'$ (mg/kg)	$DT_{50}; DT_{50}'$ (Wo)	r^2	N
Üb	FLA	1,9	0,0045	30,3	10	0,98	26
	BaPYR	3,7	0,0002	3,30	53	0,28	26
Ac	FLA		0,0262; 0,0267	13320; -13140	26; 26	0,72	27
	BaPYR		0,0137; 0,0143	2480; -2420	51; 48	0,22	27

5.3 UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEN VARIANTEN DER GEFÄSSVERSUCHE

Die biologische Abbaubarkeit einer Verbindung ist eine unveränderbare, substanzspezifische Größe, die im Rahmen der Fähigkeiten der Mikroorganismen von diesen genutzt werden kann. Variabel sind hingegen die Zusammensetzung, Aktivität und Masse der Mikroorganismen (s. Kap.3.1.1) sowie die Bioverfügbarkeit der jeweiligen Verbindung, die durch deren Sorptionseigenschaften und die der Bodenaustauscher bestimmt wird und dementsprechend mit der Zusammensetzung der Böden variieren kann. Beispielsweise erhöhen lösliche organische Substanzen (DOM) aus Grünschnittkomposten die Desorption von 6-Ring-PAK bis zu Konzentrationen über deren Wasserlöslichkeit hinaus, indem sie als Lösungsvermittler agieren (TEBAAY 1994, RABER & KÖGEL-KNABNER 1995) (vgl. Kap.4.2). Solche Lösungsvermittler können biogenen oder pedogenen Ursprungs sein. Deren Bildungsrate wird durch Zugabe abbaubarer organischer Substanzen gesteigert, da sie direkt infolge des mikrobiellen Zersatzes entstehen (WERSHAW 1986). Indirekt bewirkt eine leicht verfügbare Nährstoffquelle über eine Steigerung des Mikrobenbesatzes und der Mikrobenaktivität eine erhöhte Freisetzung von Biotensiden, z.B. Glycolipiden und Fettsäuren (WEST & HARWELL 1992). Nicht zuletzt wird durch die Verschiebung der Boden/Lösungsgleichgewichte infolge der Abnahme gelöster PAK eine erhöhte Rückdiffusion aus Porenräumen und eine Desorption von Polycyclen einsetzen, die allerdings aufgrund der sehr geringen Raten quantitativ gering bleibt.

Um eine Freisetzung hydrophober Verbindungen bei mikrobiellen Sanierungsverfahren zu beschleunigen, werden technische Tenside als Lösungsvermittler eingesetzt (BRYNIOK 1991).

Gelingt es, einerseits die Aktivität der Mikroorganismen entscheidend zu steigern und andererseits die Mobilität und damit Bioverfügbarkeit der Polyaromaten signifikant zu erhöhen, so ist eine Dekontamination durch mikrobiellen Abbau zu erwarten. Weder der hydrophobe Charakter noch das gentoxische Potential der PAK behindern deren biotische Umsetzung in Böden. Aus diesem Grunde wurden den Bodenproben - variiert nach Art und Menge - verschiedene organische Substanzen und Nitrat sowie zu einigen Varianten Tenside zugegeben. Deren Wirkungen und die Wirkung von Kalkzugaben zu einer versauerten Bodenprobe auf die PAK-Abnahme werden im folgenden beschrieben.

5.3.1 Einfluß der Art der zugegebenen organischen Substanz

Die Zufuhr leicht abbaubarer organischer Substanzen führt neben einem Nährstoffeffekt zu einer Verbesserung der Bodenstruktur (BEYER 1991) und kann als Mikroorganismen-Inokulum dienen (BIRNSTINGL et al. 1990). Durch diese Maßnah-

men konnte im Rahmen der Gefäßversuche die Aktivität und Biomasse der bodeneigenen Mikroorganismen und damit deren (co-)metabolisches Abbaupotential nachhaltig um ein mehrfaches gesteigert werden. Aufgrund der Höhe und des Alters der Bodenkontaminationen dürfte eine Adaptation der Mikroflora an die PAK stattgefunden haben (vgl. BRYNIOK 1991). Aufgrund der Wirkung der Zugaben konnten zum Versuchsende in den unterschiedlichen Bodenproben in Abhängigkeit von den Varianten ähnlich hohe mikrobielle Aktivitäten gemessen werden (s. Kap.3.1.1).

Neben einer bedarfsabhängigen Düngung von Phosphor, Kalium und Magnesium wurden in die verschiedenen Varianten der Bodenproben Häcksel von Klee gras-Heu (K), Ackerbohnen/Senf-Stroh (A) oder kommunalem Grünschnitt (G) in zwei verschiedenen Mengen sowie damit gekoppelt Stickstoff in der Nitratform ebenfalls in zwei verschiedenen Mengen eingemischt (s. Kap.2.2.1). Die organischen Substanzen zeichnen sich mit C/N-Verhältnissen von 39 (K), 19 (A) und 15 (G) durch eine gute, wenn auch unterschiedliche Abbaubarkeit aus (s. Kap.2.2.1, Tab.7). Häufig bei biologischen Sanierungsmaßnahmen verwendete Komposte, Rindenmulche oder Strohzugaben haben dagegen C/N-Verhältnisse >40 (z.B. LOTTER et al. 1990, KRAATZ & SCHRÖDER 1993).

Verschiedene Autoren wie z.B. DOMSCH (1985) und FILIP (1990) sehen solche Maßnahmen als weniger sinnvoll an. Durch die Zugabe leicht verwertbarer organischer Substanz würden einerseits die PAK als schlecht umsetzbares Substrat nicht abgebaut, andererseits Mikroorganismen mit wenig spezialisierter Enzymausstattung gefördert, die die PAK-abbauenden Spezialisten verdrängen. Demgegenüber konnten PESCHLA & TIBERG (1993) über die Zufuhr von Nährsalzen und SCHWAB (1991) durch die Zufuhr leicht abbaubarer organischer Substanz die Abnahmen von PAK in Bodenproben deutlich steigern.

Auch durch die vorliegende Untersuchung konnte ein positiver Effekt der Zugaben an leicht abbaubaren organischen Substanzen und Mineraldüngern auf die Reduzierung der PAK-Gehalte in den Bodenproben festgestellt werden. Ein Vergleich der über die gesamte Zeitdauer der Gefäßversuche für alle Probennahmetermine gebildeten Mittelwerte der PAK zeigt nahezu einheitlich für alle Bodenproben, Varianten und PAK-Gruppen (zusammengefaßt nach Anzahl der kondensierten Ringe) geringere PAK-Gehalte in den behandelten Varianten gegenüber der Kontrolle (s. Tab.36.1 - 10, im Anhang). Die Unterschiede sind jedoch meist nur gering und nicht in allen Fällen signifikant. Die im Rahmen der Varianzanalysen als signifikant ermittelten Zugabenvarianten sind in Tab.37.1-7 (im Anhang) aufgelistet. Der Einfluß der verschiedenen Arten an organischer Substanz ist für alle PAK-Gruppen innerhalb einer Bodenprobe gleich.

Dagegen weisen die verschiedenen Arten an zugesetzter organischer Substanz bei den verschiedenen Bodenproben insgesamt unterschiedliche Wirkungen auf den PAK-Abbau auf. Darüberhinaus wechselt die Rangfolge der Varianten innerhalb der 74wöchigen Versuchsdauer des öfteren zwischen den Probennahmeterminen. Dies ist anhand des Verlaufs der Abnahme der 4-Ring-PAK in der Bodenprobe Heb in Abb.13 beispielhaft dargestellt.

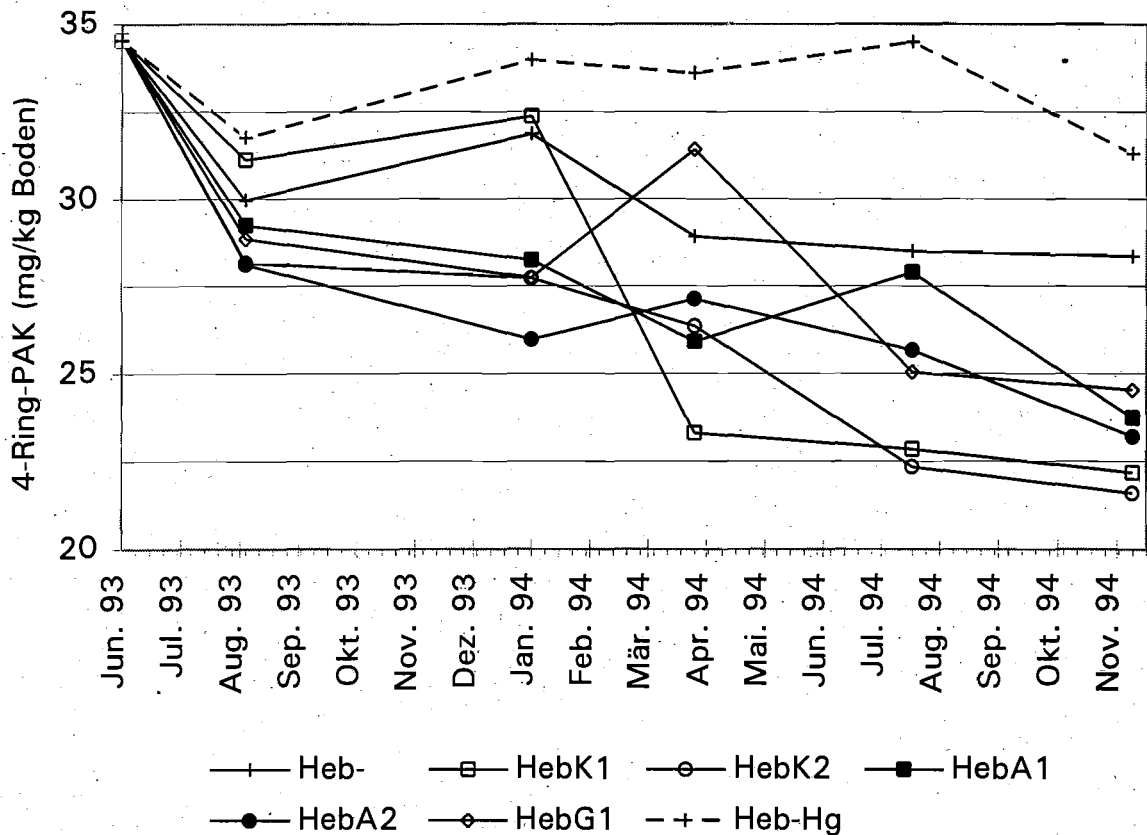


Abb.13: Gehalte der Summe an 4-Ring-PAK nach US-EPA-Liste in den Varianten der Bodenprobe Heb in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

In Abb.13 zeigt sich eine nahezu ideale mikrobielle Abnahme der 4-Ring-PAK, indem sich deren Gehalte in der $HgCl_2$ -behandelten Variante gegenüber den Ausgangsgehalten nur geringfügig verändern, während sie in den mikrobiell aktiven Varianten deutlich abnehmen. Dabei unterscheiden sich bereits nach dem Beginn der Gefäßversuche die Gehalte der 4-Ring-Aromaten in den meisten behandelten Varianten von denen der unbehandelten Kontrolle (Heb-). Nur in der Variante HebK1 finden sich bis zum 12.01.94 und in der Variante HebG1 einmalig am 06.04.94 höhere Konzentrationen. Während in der Kontrolle ab dem 06.04.94 die

Menge der 4-Ring-Polycyclen praktisch konstant bleibt, weist der Kurvenverlauf der Gehalte der übrigen Varianten auf einen weiter abnehmenden Trend. Wie die Ergebnisse für die Bodenprobe Heb zeigen, ergibt sich am Ende der Gefäßversuche folgende Reihung für die verschiedenen Varianten in Abhängigkeit von den abgebauten 4-Ring-PAK-Anteilen (Abnahme in % des Ausgangsgehaltes):

HebK2 (37) > HebK1 (36) > HebA2 (33) > HebA1 (31) > Heb- (18) > Heb-Hg (9)

Diese Reihenfolge ist jedoch bei den verschiedenen Bodenproben unterschiedlich. Wie außerdem die Kurvenverläufe in Abb.13 zeigen, wechselt die Reihenfolge bei derselben Bodenprobe häufig zwischen den verschiedenen Beprobungsterminen. Damit kann keine allgemein gültige Reihenfolge für die Effektivität der Zugabenvarianten auf die PAK-Abnahme abgeleitet werden.

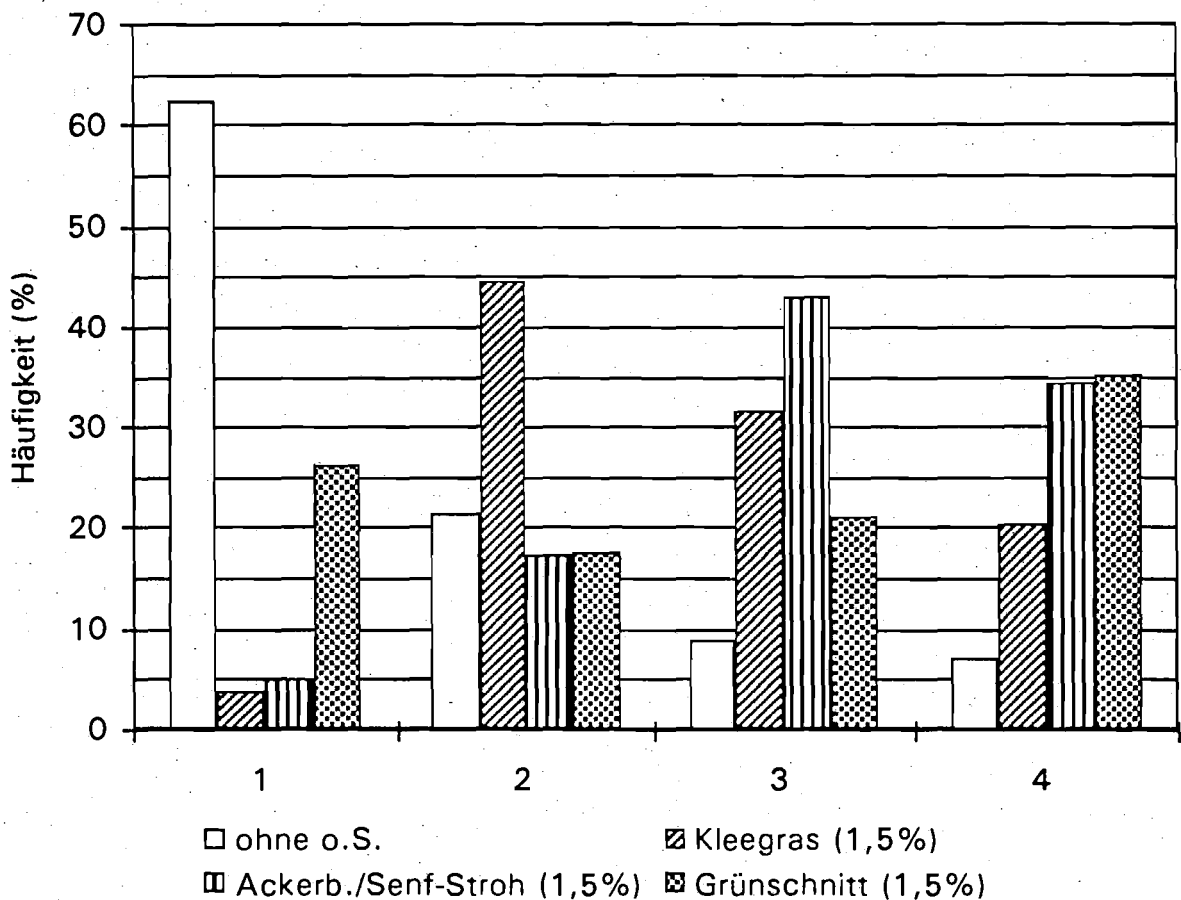


Abb.14: Häufigkeitsverteilung der signifikant auf die PAK-Abnahme einwirkenden Varianten der Einflußgröße "Art der organischen Substanz" in den Rangfolgepositionen 1 bis 4 ($\alpha \leq 0,05$; $n = 84$, Grünschnitt $n = 55$ ($n = 100\%$)) (Wertung: 1 = geringste PAK-Abnahme; 4 = stärkste PAK-Abnahme)

Zur Erfassung des Einflusses der Art an zugesetzter organischer Substanz wurden daher die Fälle signifikanter Mittelwertunterschiede (s. Tab.37.1 - 7, im Anhang) für alle PAK und Bodenproben zusammengefaßt ausgewertet. Nach dem Ausmaß der PAK-Abnahme konnte so fallweise eine Rangfolge der verschiedenen Varianten ermittelt werden. Die Verteilung der Häufigkeiten, mit denen die Varianten bestimmte Ränge belegen, ist in Abb.14 wiedergegeben.

Demnach begünstigen gerade die besonders gut abbaubaren organischen Substanzen Ackerbohnen/Senf-Stroh und kommunaler Grünschnitt eine Reduzierung der Schadstoffgehalte. Die damit behandelten Varianten weisen jeweils in ca. 35% der signifikanten Fälle die stärkste PAK-Abnahme auf. Da der kommunale Grünschnitt aber in 26% der signifikanten Fälle die geringste und damit eine schwächere Abnahme als die unbehandelte Kontrolle zeigt, schneidet das Ackerbohnen/Senf-Stroh insgesamt am besten ab. Dabei ist jedoch zu beachten, daß der kommunale Grünschnitt nur an vier von zehn Bodenproben getestet wurde. Nach der Häufigkeit in den Rangpositionen ergibt sich somit die folgende Reihung bezüglich der Förderung der PAK-Abnahme durch die Art der zugegebenen organischen Substanz:

$$A > G \geq K > \text{Kontrolle}$$

KRAATZ & SCHRÖDER (1993) konnten durch Huminstoffanalysen den Einfluß der Art der zugegebenen organischen Substanz präzisieren. Der in ihren Untersuchungen verwendete Rindenmulch lieferte im Zuge seiner Zersetzung nur wenig niedermolekulare Verbindungen, so daß wenig DOM als Lösungsvermittler und wenig Nährsubstrat zur Steigerung eines (Co-)Metabolismus zur Verfügung standen. In diesem Sinne müßten daher leichter abbaubare Substanzen besser geeignet sein. Dies bestätigen auch die vorliegenden Ergebnisse (s.o.).

Die Wirkung der Zugaben beruht also nicht allein auf der Aktivierung und Vermehrung der Mikroorganismen-Biomasse, denn in dieser Hinsicht ist die Zugabe von Klee gras-Heu am effektivsten; zudem bestehen keine Korrelationen zwischen den mikrobiellen Aktivitätsparametern und der PAK-Abnahme (s. Kap.3.1.1). Nach HANCE & FÜHR (1994) bewirkt gerade der mikrobielle Ab-/Umbau leicht verfügbarer organischer Substanz in Böden eine gesteigerte Bildung gebundener Rückstände. Darüber hinaus halten HAIDER & MARTIN (1988) eine fördernde Wirkung der Einbindung von Xenobiotika in die Humusmatrix auf die Mineralisierung durch Weißfäulepilze für möglich. Demgegenüber konnte MAHRO (1994) nachweisen, daß die Abbau-steigernde Wirkung einer Kompostzugabe zu einer Altlastbodenprobe als Effekt der biologischen Aktivierung zu deuten war. Dieser Befund steht zu dem Vorgenannten nicht im Widerspruch, sondern belegt die Bedeutung des mikrobiellen PAK-Ein-/Um-/Abbaus, der zum einen von der biologischen Aktivität,

zum anderen von der Art der vorliegenden bzw. erst mikrobiell gebildeten organischen Austauscher abhängt.

Liegen die PAK aber wie in der Probe Üb in einer für die Mikroorganismen verfügbaren Form vor, so wird die PAK-Abnahme durch die unterschiedlichen Varianten nur wenig beeinflusst, wie die kaum unterscheidbaren Kurvenverläufe in Abb.15 zeigen. Lediglich in der unbehandelten Kontrolle ist die Abnahmerate der 3-Ring-PAK zu Beginn der Gefäßversuche etwas geringer, so daß erst am 14.10.93 die Gehalte der übrigen Varianten erreicht werden.

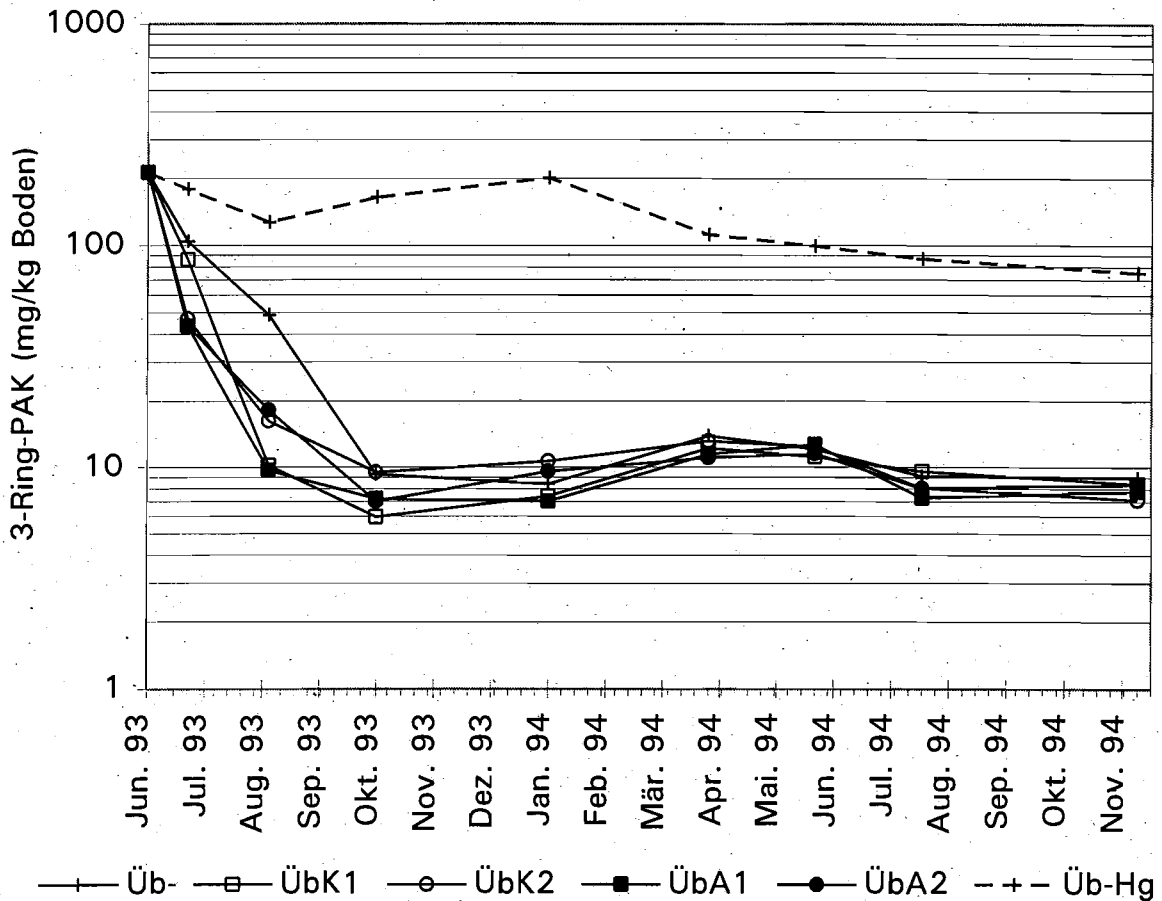


Abb.15: Gehalte der Summe an 3-Ring-PAK nach US-EPA-Liste in den Varianten der Bodenprobe Üb in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Ein im Trend ähnlicher Verlauf der Gehalte an 3-Ring-Aromaten in Abhängigkeit von der Zeit ist aus Abb.16 bei einer geringen PAK-Abnahme am Beispiel der Bodenprobe Ge zu erkennen. Bei einer Eliminierung von nur 34,5% der Ausgangsgehalte an 3-Ring-PAK im Mittel der Varianten kommt die PAK-Abnahme bereits nach dem 07.07.93 praktisch zum Erliegen. Die bis zum 12.01.94 noch höheren Gehalte in der unbehandelten Kontrolle (Ausreißer am 18.08.93) gleichen sich zum 06.04.94 schließlich denen der übrigen Varianten an.

Am Versuchsende (16.11.94) sind in der Variante A2 sogar größere Mengen an 3-Ring-Verbindungen nachweisbar als in der Kontrolle. Ähnliches beobachtete MAHRO (1994) am Ende seiner Versuche, was er mit einer Freisetzung von zuvor nicht extrahierbaren PAK infolge eines weitgehenden Abbaus der zugegebenen organischen Substanz erklärte, die zunächst Bindungsplätze für PAK bereitgestellt hatte.

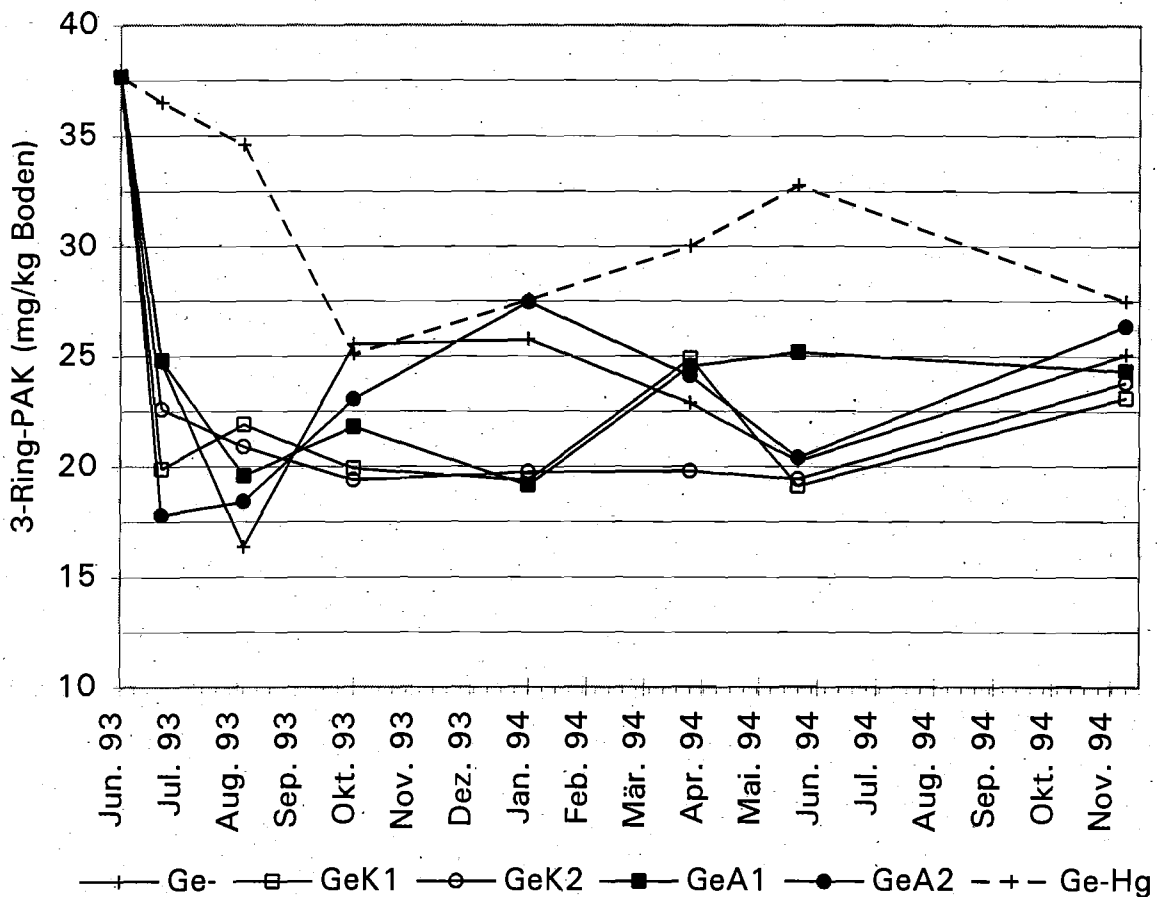


Abb.16: Gehalte der Summe an 3-Ring-PAK nach US-EPA-Liste in den Varianten der Bodenprobe Ge in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Wiederanstiege der PAK-Gehalte durch Freisetzung zuvor nicht extrahierbarer gebundener Rückstände sind auf den Abb.13 (s. S.71) und 16 mehrfach zu erkennen. Bei anderen Bodenproben und PAK-Substanzen treten sie z.T. noch stärker auf, so daß in einigen Fällen die Ausgangsgehalte der PAK überschritten werden. Dieses Phänomen ist insbesondere zu den Terminen 12.01.94 und 16.11.94 festzustellen (s. Tab.34.1 -11, im Anhang). BOCK & MAHMUTOGLU (1992) begründeten die im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme zum Winter erheblich ansteigenden PAK-Gehalte mit dem jahreszeitlich bedingten Abnehmen des mikrobiellen Metabolismus und der sich fortsetzenden solubilisierenden Wirkung freigesetz-

ter Biotenside. Nach dem Winter wieder zunehmende PAK-Gehalte führen DE KREUK & ANNOKKÉE (1988) auf den Frostgareffekt zurück, der Aggregate aufbricht und dadurch frische, PAK-belegte Oberflächen aufschließt. Von wesentlichem Einfluß wird auch die wechselnde Hydrophobie/Hydrophilie der Oberflächen der organischen Austauschere in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte für eine PAK-Mobilisierung/Immobilisierung sein. Nicht zuletzt können durch den Zersetz von Kohle- und Teerpartikeln die darin in hohen Konzentrationen enthaltenen PAK in eine extrahierbare Form überführt werden.

5.3.2 Einfluß der Menge der zugegebenen organischen Substanz und der Nitrat-Gabe

Im Rahmen der Gefäßversuche wurden neben der Art der eingemischten organischen Substanz auch deren Mengen variiert. Klee gras-Heu und Ackerbohnen/Senf-Stroh wurden in zwei verschiedenen Aufwandmengen von 1,5% (Menge 1) und 3,0% (Menge 2) (w/w Trockenmasse) den Bodenproben zugegeben. Bei einer großflächigen Einmischung auf Pflugtiefe - im Sinne einer in-situ-Sanierung - entspräche dies Mengen von 585 und 1170 dt/ha, die deutlich über den in der landwirtschaftlichen Praxis angewendeten Mengen liegt. Im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser ist daher die Möglichkeit der Verlagerung von Nährstoffen ins Grundwasser zu beachten.

Die Einmischung erhöhter Zugabemengen erfolgte ganz gezielt, denn durch eine Steigerung der Zugaben an organischer Substanz nimmt deren Mineralisierung gegenüber der Humifizierung überproportional zu (HERSEMANN 1991), und das Ausmaß eines cometabolischen Schadstoffabbaus wird ganz wesentlich gesteigert (OTTOW 1988).

Die über die Zeitdauer der Gefäßversuche gebildeten Mittelwerte der PAK liegen für die Zugabemenge 1 (1,5%) bis auf zwei Ausnahmen (So 2-Ring-PAK, Üb 4-Ring-PAK) unter den Werten der unbehandelten Kontrollen (s. Tab.36.1 - 10, im Anhang). Die Zeitreihen-Mittelwerte der PAK-Gehalte in den Varianten mit doppelter Aufwandmenge (3,0%) liegen dem Trend nach zwar noch niedriger, häufig sind sie jedoch nicht signifikant von denen der Menge 1 zu unterscheiden. Bei alleiniger Betrachtung der Fälle signifikanter Mittelwertunterschiede wird die Bonität der erhöhten Mengen an organischer Substanz jedoch deutlich (Abb.17).

Bei der Einflußgröße "Menge der organischen Substanz" zeigt sich noch deutlicher als bei der Einflußgröße "Art der organischen Substanz" der positive Effekt der Zugaben auf die Eliminierung der PAK. Keine Zugabe (Menge 0) bewirkt sowohl in der Reihung für den Einfluß von Klee gras-Heu (K) als auch für den von Ackerboh-

nen/Senf-Stroh (A) in ca. 90% aller signifikanten Fälle die geringste PAK-Abnahme, während die Menge 2 in 69% (K) bzw. 60% (A) der Fälle die stärkste PAK-Abnahme erzielt. Wenn auch die Wirkung der erhöhten Zugabemenge beim Ackerbohnen/Senf-Stroh weniger stark ausgeprägt ist als beim Klee gras-Heu, so ergibt sich doch bezüglich der Steigerung der PAK-Abnahme die folgende Reihung:

Menge 2 (3,0%) > Menge 1 (1,5%) > Menge 0 (Kontrolle)

Diese Reihung ist im Gegensatz zum Einfluß der Art der zugegebenen organischen Substanz sowohl für alle PAK-Gruppen als auch für alle Bodenproben gleich.

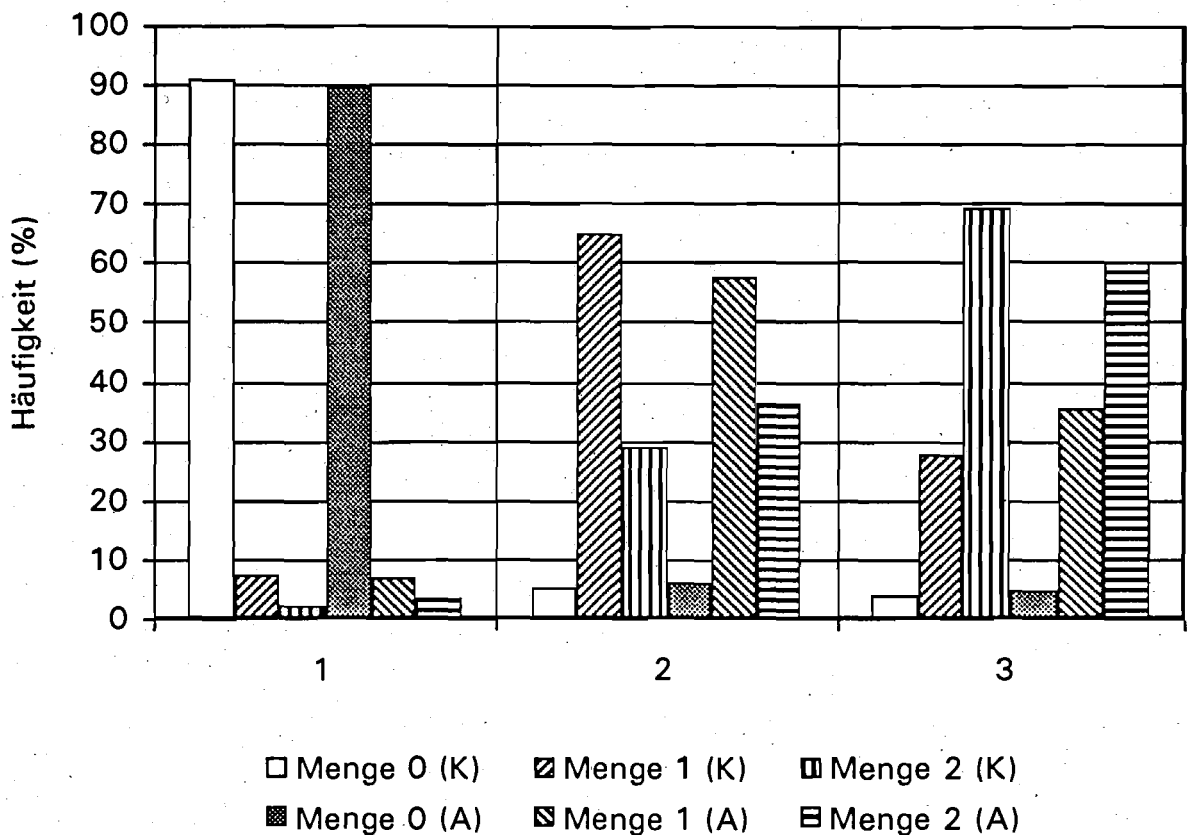


Abb.17: Häufigkeitsverteilung der signifikant auf die PAK-Abnahme einwirkenden Varianten der Einflußgröße "Menge der organischen Substanz und der Nitratdüngung" in den Rangfolgepositionen 1 bis 3 ($\alpha \leq 0,05$; $n = 97$ ($n = 100\%$)) (Wertung: 1 = geringste PAK-Abnahme; 3 = stärkste PAK-Abnahme)

In Abb.18 ist am Beispiel einer Bodenprobe (Dd) und einer PAK-Substanz mit einer geringen Abnahmerate (Benzo[k]fluoranthen) der Effekt der gesteigerten Zugabemengen zu erkennen. An verschiedenen Terminen unterscheiden sich die Kurvenverläufe der Varianten Dd-, DdK1 und DdK2 deutlich. Wenn auch die Benzo[k]fluoranthen-Gehalte in der Variante mit Klee gras-Heu-Zugabe in doppelter

Menge (K2) am 18.08. und 14.10.93 in gleicher Höhe bzw. höher liegen als in der Variante K1, so divergieren sie bei den folgenden Terminen umso deutlicher durch niedrigere Benzo[k]fluoranthren-Konzentrationen in K2. Erst zum Ende der Gefäßversuche werden diese Unterschiede durch einen Wiederanstieg der Benzo[k]fluoranthren-Belastung in dem Bodenmaterial der Variante K2 wieder nivelliert.

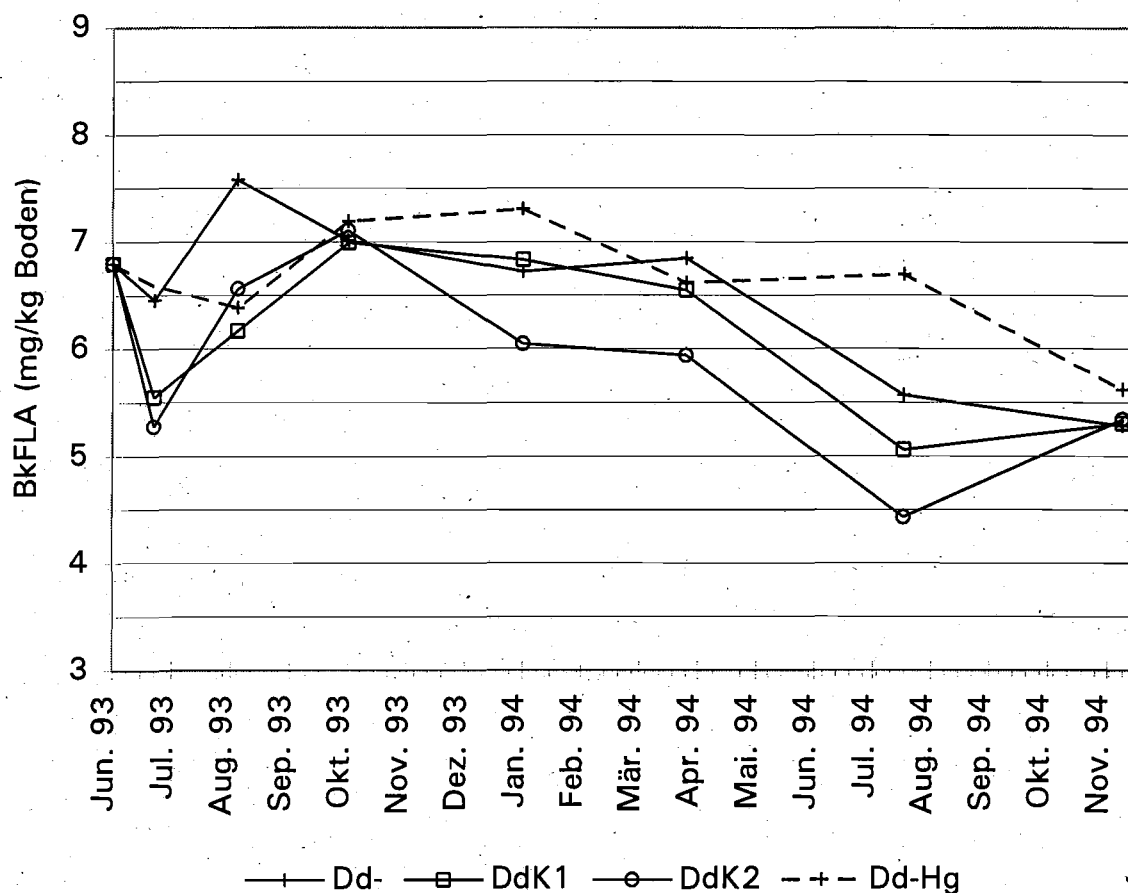


Abb.18: Gehalte von Benzo[k]fluoranthren (BkFLA) in den Varianten der Bodenprobe Dd in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Bei guten Abbaubedingungen der PAK sind hingegen keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Mengenvarianten zu erkennen, wie dies das Beispiel der 3-Ring-Aromaten in der Probe Üb wiedergibt (s. Kap.5.3.1, Abb.15). Darauf ist möglicherweise auch der Befund von LOTTER et al. (1990) zurückzuführen, die durch eine wesentliche Steigerung der Zugabe an Kompost, bei einem allerdings schon sehr hohen Mengenniveau, keine Abbausteigerung von Öl in kontaminierten Bodenproben erzielen konnten. Öl gilt allgemein als in Böden leicht abbaubar.

Es darf nicht außer acht gelassen werden, daß bei den vorliegenden Untersuchungen eine erhöhte Zugabe an organischer Substanz mit einer erhöhten Stickstoffgabe verbunden ist. So führen NORDMEYER & PESTEMER (1995) den von ihnen beobachteten gehemmten Abbau von Pflanzenschutzmitteln nach Zufuhr

leicht abbaubarer organischer Substanz auf die eintretende starke Sauerstoffzehrung infolge des Zersetztes der organischen Substanz zurück. Ein Schadstoffabbau unter anaeroben Bedingungen ist in jedem Falle energetisch ungünstiger und verlangsamt (LUND & GUDEHUS 1990). Den Bodenproben wurde daher Stickstoff - gekoppelt an die Zugaben der organischen Substanz - in Mengen von 200 kg/ha (Menge 1) und 400 kg/ha (Menge 2) in der Nitratform zugeführt. Nitrat kann als Elektronenakzeptor fungieren und dadurch die Wirkung von Sauerstoff unterstützen (SCHWEFER 1988). AL-BASHIR et al. (1990) wiesen sogar die Mineralisation von Naphthalin unter anaeroben Bedingungen unter Verbrauch von Nitrat nach. Da der initiale Schritt zum Abbau von Aromaten durch eine Oxigenase katalysiert wird, hält DOTT (1989) jedoch die Anwesenheit von O₂ für unverzichtbar. Wenngleich die Wirkung der gesteigerten PAK-Abnahmen wahrscheinlich vor allem durch die zugegebenen organischen Substanzen verursacht wird (MAHRO & KÄSTNER 1993), so wird die Nitrat-Gabe in jedem Falle diese positive Wirkung verstärken.

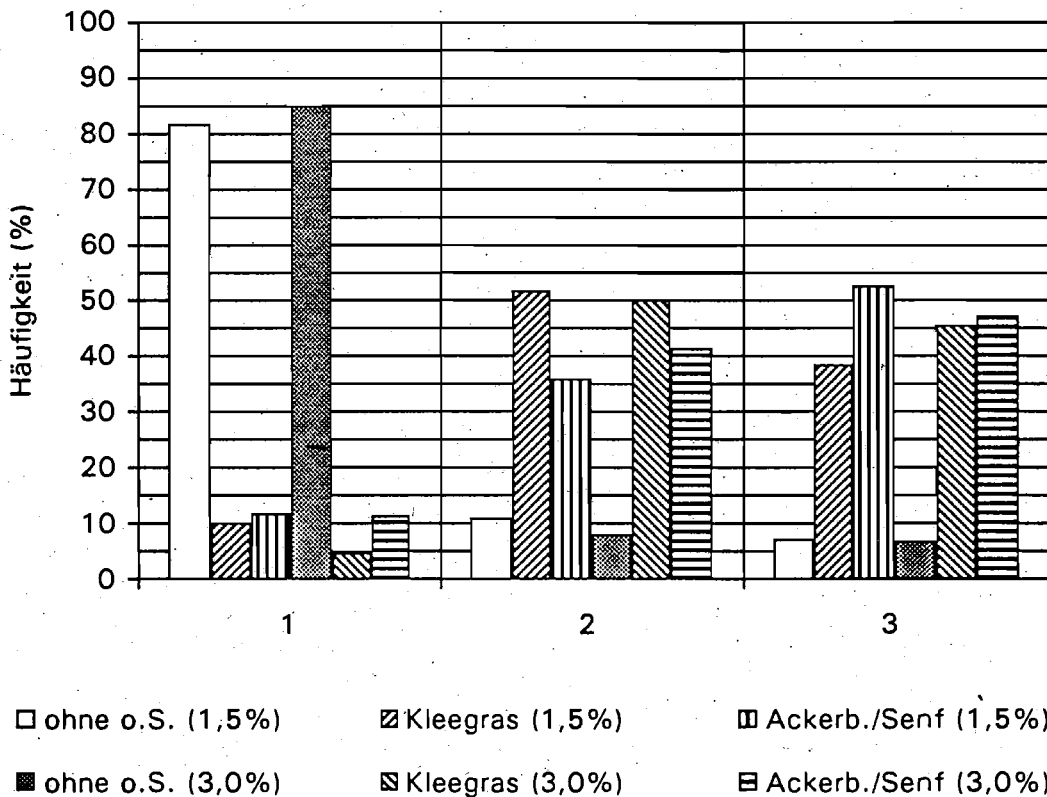


Abb.19: Häufigkeitsverteilung der signifikant auf die PAK-Abnahme einwirkenden Varianten der Einflußgröße "Menge der organischen Substanz und der Nitratdüngung" in Abhängigkeit von der Art der zugegebenen organischen Substanz in den Rangfolgepositionen 1 bis 3 ($\alpha \leq 0,05$; $n = 44$ ($n = 100\%$)) (Wertung: 1 = geringste PAK-Abnahme; 3 = stärkste PAK-Abnahme)

In vielen Fällen stehen die signifikanten Effekte von Art und Menge der zugegebenen organischen Substanz in Wechselwirkung zueinander. Die in Abb.19 dargestellte Häufigkeitsverteilung in den Rangfolge-Positionen 1 bis 3 gibt aber keinen unterschiedlichen Einfluß der Mengensteigerung bei den verschiedenen organischen Substanzen wieder. Unabhängig von der Art der zugegebenen organischen Substanz bewirkt die Menge 2 (3,0%) eine stärkere Abnahme der Polyaromaten. Die bessere Wirkung des Ackerbohnen/Senf-Strohes auf die PAK-Abnahme ist vor allem bei der einfachen Aufwandmenge deutlich; bei der doppelten Aufwandmenge sind die Unterschiede zum Klee gras-Heu nur gering.

5.3.3 Einfluß der Tensidzugabe

Durch den Einsatz von Tensiden kann die Löslichkeit von hydrophoben Substanzen wie den PAK deutlich erhöht werden, was Auswirkungen auf deren Verfügbarkeit u.a. für einen mikrobiellen Abbau hat. GOHLKE et al. (1986) definieren Tenside als "Verbindungen niedriger bis mittlerer Molmasse, deren Moleküle aus einem hydrophilen und hydrophoben Teil bestehen". Durch die daraus resultierenden amphiphilen Eigenschaften reichern sie sich an Grenzflächen an. Sie adsorbieren sowohl an flüssig/gasförmig und flüssig/fest als auch bei nicht ineinander löslichen Flüssigkeiten an flüssig/flüssig Grenzflächen. Dadurch wird die Grenzflächenspannung zwischen den Phasen erniedrigt und die Benetzbarkeit von Feststoffen erhöht (STACHE 1979, GOHLKE et al. 1986).

Oberhalb einer bestimmten Lösungskonzentration assoziieren Tensidmoleküle in Flüssigkeiten zu Micellen. In diese können hydrophobe Moleküle eingelagert und besonders effektiv solubilisiert und in Lösung gehalten werden. Unterhalb dieser Grenzkonzentration sind die Solubilisierungseigenschaften der Tenside nur gering. Die kritische Micellkonzentration (CMC) sowie Größe und Aufbau der Micellen sind je nach Tensid unterschiedlich (GOHLKE et al. 1986, WEST & HARWELL 1992).

Nach dem Charakter des hydrophilen Molekülteils lassen sich ionogene (kationenaktive, anionenaktive und ampholytische) und nichtionogene Tenside unterscheiden (STACHE 1979).

5.3.3.1 Extraktionskraft und mikrobielle Toxizität der Tenside

Für eine Steigerung des mikrobiellen PAK-Abbaus geeignete Tenside müssen verschiedene Anforderungen erfüllen:

1. Gute Lösungseigenschaften für PAK
2. Wirkungsstabilität im Medium Boden bzw. in der Bodenlösung

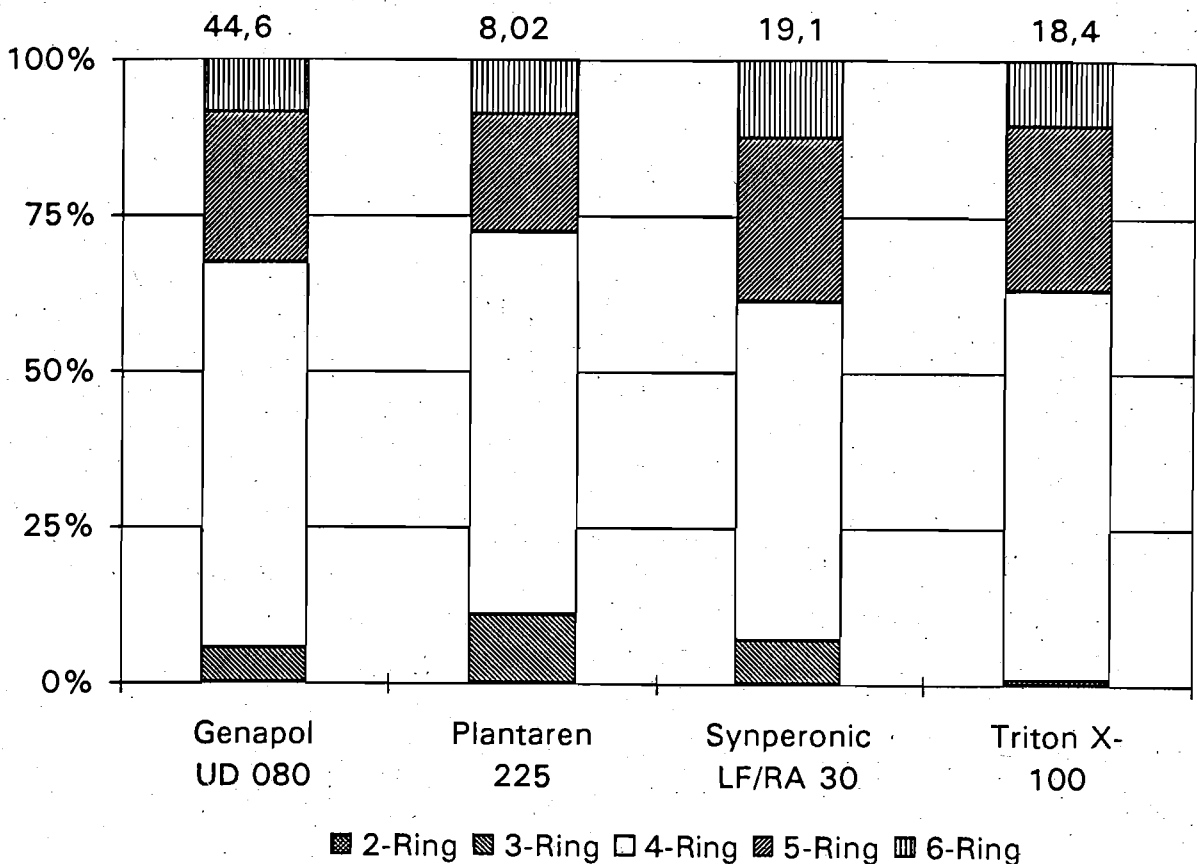
3. Keine oder nur eine geringe Biotoxizität
4. Hohe biologische Abbaubarkeit und damit keine Anreicherung im Grundwasser und Böden

Ob ein Tensid geeignet ist, hydrophobe Substanzen wie PAK in einem hydrophilen Medium wie Wasser zu lösen, kann mit Hilfe des HLB-Konzeptes abgeschätzt werden. Der HLB-Wert (Hydrophilie-Lipophilie-Balance) ist ein aus empirischen Gleichungen ermittelter, dimensionsloser Wert (HURTIG et al. 1988). Tenside mit einer HLB unterhalb des Wendepunktes bei 10 bilden eher Wasser/Öl-Emulsionen, solche mit einer HLB > 10 emulgieren eher Öl in Wasser (STACHE 1979). Für die durchgeführten PAK-Abbauversuche wurden daher von verschiedenen Herstellern gezielt Tenside mit einer HLB > 10 angefordert. Aufgrund des theoretischen Ansatzes und der starken Temperatur- und Elektrolytabhängigkeit der HLB (WEST & HARWELL 1992) kann dieser Wert nur zu einer ersten Vorauswahl dienen und eingehendere eigene Tests nicht ersetzen (VIGON & RUBIN 1989).

Kationische Tenside lagern sich aufgrund ihrer Molekülladung an Bodenaustauscher an und führen dadurch zur Co-Adsorption von Schadstoffmolekülen (SCHWUGER et al. 1991); zudem besitzen sie bakterizide und fungizide Eigenschaften. Anionische Tenside bilden häufig un stabile Emulsionen; darüberhinaus neigen sie zur Schaumbildung und reagieren z.T. mit Erdalkalien zu unlöslichen Salzen (SCHULER 1992). Daher erscheinen insbesondere nichtionische Tenside als die Produkte der Wahl; sie sind unempfindlich gegen Wasserhärte, zeigen geringe Schaumbildungsneigung und sehr gute Dispergierungseigenschaften (BUEREN & GROßMANN 1971). Da sich die ungeladenen Tensidmoleküle bei der Micellbildung gegenseitig nicht abstoßen, genügen geringere Konzentrationen zum Erreichen der CMC als bei ionogenen Tensiden (LANGE 1982).

Obwohl PESTEMER et al. (1991) selbst für die als persistent angesehenen Nonylphenol-Tenside keine Anreicherung im Boden feststellen konnten, wurden für die Gefäßversuche im besonderen biologisch gut abbaubare, auf Basis natürlicher Öle und Fette hergestellte Tenside ausgewählt. Ausnahme ist der Octylphenolpolyglycoether Triton X-100, ein Produkt, das in Laboratorien allgemeine Verwendung findet und bereits Inhalt verschiedener Untersuchungen war (z.B. LAHA & LUTHY 1991).

Um für die Gefäßversuche die Anzahl der Tenside auf vier zu verringern, wurden 20 nichtionische und anionische Produkte auf ihre Eignung, PAK aus einem Altlastbodenmaterial zu mobilisieren, getestet. Die Extraktionsmethode ist in Kap.2.6.1 (Extraktion mit Tensiden) beschrieben; die Schüttellösungen enthielten 2% Aktivsubstanz (w/w). Die Ergebnisse sind in Tab.38 (im Anhang) aufgeführt.



(Zahlenwerte = Tensid-extrahierbare PAK; Summe US-EPA-Liste in mg/kg Boden)

Abb.20: Tensid-extrahierbare PAK-Gehalte und deren Anteile an den verschiedenen PAK-Gruppen der Bodenprobe Ko (16.06.93; 2,0% Tensid-Aktivsubstanz)

Bei der Lösungsvermittlung für PAK zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Tensiden, so daß einige Produkte als für diesen Zweck ungeeignet betrachtet werden müssen. Dabei sollten die zu verwendenden Tenside nicht nur eine hohe Extraktionsleistung für Polyaromaten haben (Gesamtmenge an extrahierten PAK), sondern auch eine ausgeglichene Extraktionsleistung besitzen, indem sie möglichst jedes der 15 detektierten PAK gut solubilisieren. Mit den letztlich für die Gefäßversuche ausgewählten Tensiden wurden mit Material der Bodenprobe Ko (16.06.93) weitere Extraktionsversuche durchgeführt. Die Gesamt-PAK-Gehalte und die Anteile der verschiedenen PAK-Gruppen am PAK-Gehalt der Tensidextrakte sind in Abb.20 dargestellt.

Abweichend von den Ergebnissen der Vorversuche (s. Tab.38, im Anhang) nehmen die aus der Probe Ko (16.06.93) extrahierten PAK-Gehalte in der Reihenfolge Genapol UD 080 (44,6) > Synperonic LF/RA 30 (19,1) > Triton X-100 (18,4) > Plantaren 225 (8,02) ab. Die extrahierten Anteile der verschiedenen PAK-Gruppen

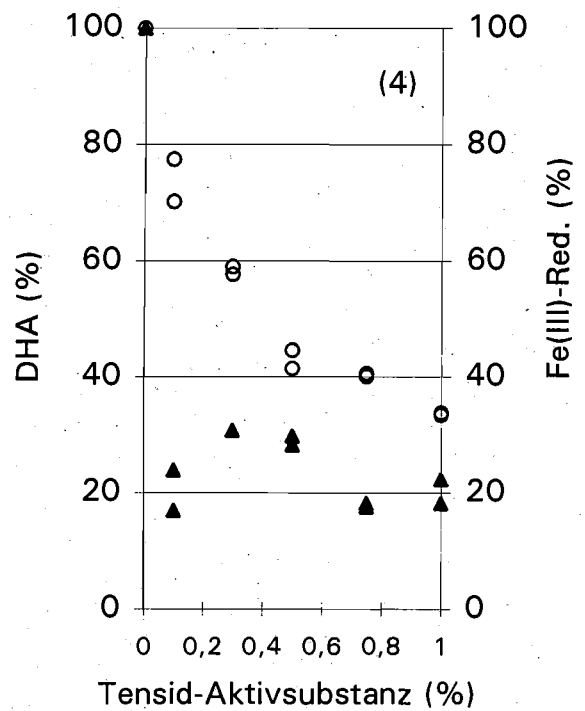
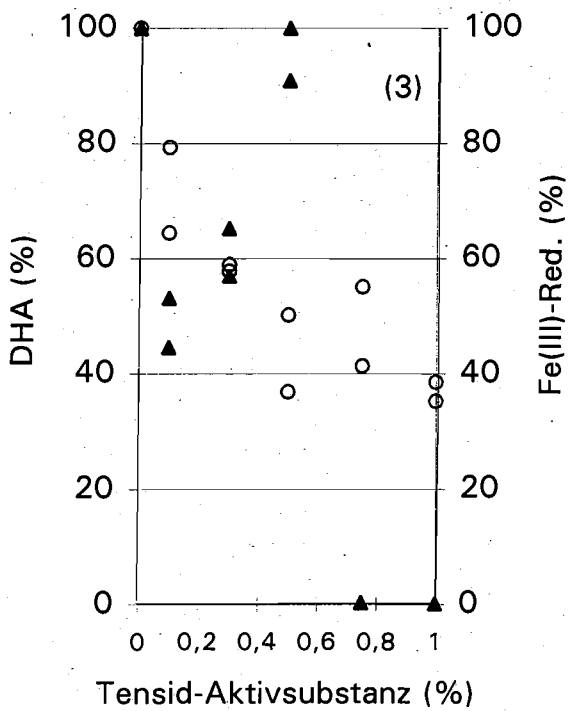
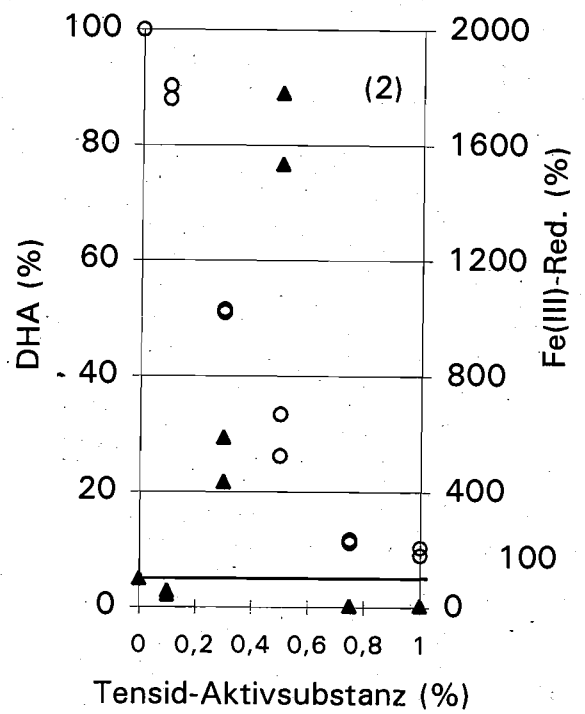
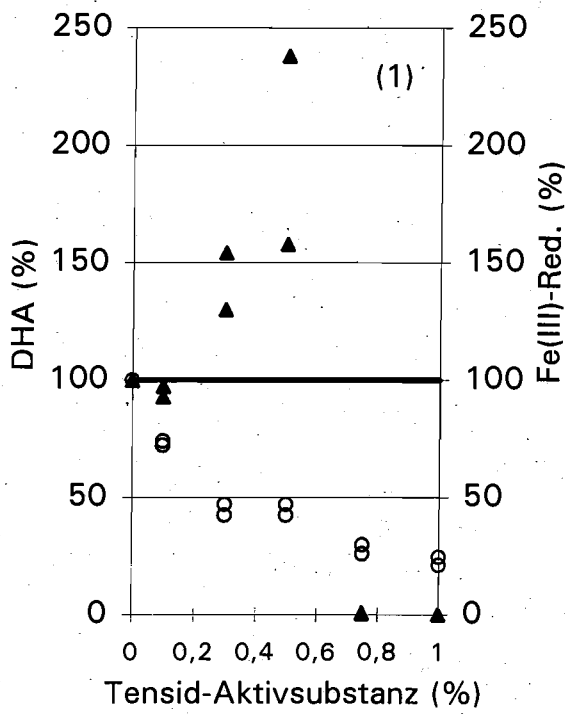
sind bei den vier Tensiden recht ähnlich. Die Zusammensetzung der hier verwendeten Probe Ko mit 0,6% 2-Ring-, 9% 3-Ring-, 50% 4-Ring-, 26% 5-Ring- und 14% 6-Ring-PAK (Toluol/Aceton-extrahierbar) wird annähernd auch von den Tensid-extrahierbaren PAK-Anteilen wiedergegeben. Die Schüttellösung von Syperonic LF/RA 30 kommt dabei mit 0% 2-Ring-, 7% 3-Ring-, 54% 4-Ring-, 26% 5-Ring- und 13% 6-Ring-PAK dieser Zusammensetzung am nächsten. Es werden damit alle PAK in Abhängigkeit von ihrem Gesamtgehalt durch diese Tensidlösung gleich gut extrahiert. Demgegenüber enthalten die Extraktionslösungen der übrigen Tenside die 6-Ring-PAK nur zu 8 - 10,5%. Bei Plantaren 225 machen 5-Ring-PAK nur 18,5% der solubilisierbaren PAK aus; die 3-Ring-PAK werden im Vergleich der vier Tenside durch Plantaren 225 mit einem Anteil an der freigesetzten PAK-Menge von 10,9% relativ am stärksten extrahiert.

Die geringen Extraktausbeuten an 3-Ring-PAK durch Triton X-100 (Abb.20) sind methodisch bedingt; diese Verbindung weist ein ähnliches chromatographisches Verhalten wie Acenaphthen und Fluoren auf. So war es z.T. noch 17 Wochen nach Applikation in den Bodenproben der Gefäßversuche nachweisbar (SoA1T, 14.10.93) und überdeckte die Peaks der genannten PAK in den Chromatogrammen, so daß deren Gehalte als nicht bestimmbar angegeben werden müssen. Die übrigen Tenside erzeugen keine Peaks im Chromatogramm, so daß über ihren Verbleib nach Zugabe zum Boden nur Mutmaßungen angestellt werden können. Es ist jedoch anzunehmen, daß sie weniger persistent sind als Triton X-100.

Nicht zuletzt waren die Handhabbarkeit und Eignung der Tenside für die angewendete Methode Auswahlkriterien. So wurden nach Berücksichtigung der Ergebnisse der Mikroorganismen-Tests die Produkte Genapol UD 080, Plantaren 225, Synperonic LF/RA 30 und Triton X-100 ausgewählt. Einige Kenndaten sind Tab.21 zu entnehmen.

Tab.21: Übersicht über die zur PAK-Solubilisierung in den Gefäßversuchen eingesetzten Tenside (nach Angaben der Hersteller und LAHA & LUTHY 1991; k.A. = keine Angaben; CMC in mol C bei 25°C bzw. * in mg/ml)

Name	chem. Bezeichnung	Hersteller		CMC	HLB
Genapol UD 080	Polyglycoether C11-Oxoalkohol	Hoechst	nichtionisch	0,10*	~ 13
Plantaren 225	Alkylpolyglycoside C8-C10 Fettalkohole	Henkel	nichtionisch	2,2*10 ⁻⁴	~ 18
Synperonic LF/RA 30	Alkohol-Alkoxylat C13/C15-Alkohole	ICI	nichtionisch	k.A.	k.A.
Triton X-100	Octylphenolpolyglycoether	Aldrich	nichtionisch	1,7*10 ⁻⁴	~ 11



○ DHA (%) ▲ Fe(III)-Red. (%)

Abb.21.1-4: Beeinflussung der Dehydrogenaseaktivität (DHA) und der Fe(III)-Reduktion durch die Tenside Genapol UD 080 (1), Plantaren 225 (2), Syneronic LF/RA 30 (3) und Triton X-100 (4) (Angaben in % der Kontrolle)

Neben guten PAK-Lösungseigenschaften sollten die Tenside auch Mikroorganismen-verträglich sein. Als nachteilig erwies sich, daß von den 20 getesteten Produkten insbesondere die gut PAK-lösenden Tenside bei höheren Zugaben eine z.T. erhebliche mikrobielle Toxizität aufweisen, Tenside, die die Mikroorganismenaktivität fördern, hingegen kaum PAK mobilisieren. Möglicherweise werden letztere Substanzen von den Mikroorganismen als Nährsubstrat verwertet. Zur Beurteilung der Tensid-Wirkung auf die mikrobielle Aktivität wurden Proben eines Ackerbodens (Ah-Pararendzina) steigende Konzentrationen der Tenside zugegeben. Die Ergebnisse für die ausgewählten Tenside sind in Abb.21.1-4 dargestellt. Während die Dehydrogenaseaktivität (DHA) bei allen Tensiden bereits durch Zugaben von 0,1% Aktivsubstanz erniedrigt wird, findet bis zu dieser Konzentration noch eine Erhöhung der Fe(III)-Reduktion durch Genapol UD 080 (Abb.21.1) und Plantaren 225 (Abb.21.2) statt. Bei höheren Dosen dieser beiden Tenside sinkt dann die Fe(III)-Reduktion, wie dies auch bei Synperonic LF/RA 30 (Abb.21.3) und Triton X-100 (Abb.21.4) bereits bei Zugaben von weniger als 0,1% der Fall ist.

Die ED₅₀-Werte¹ der DHA weisen mit zunehmender Toxizität der vier Tenside abnehmende Dosen (in % Tensid-Zugabe) in folgender Reihe auf: Synperonic LF/RA 30 (0,51) < Triton X-100 (0,40) < Plantaren 225 (0,33) ≤ Genapol UD 080 (0,30). Bei Zugabe von 1% Tensid sinkt die DHA (in % der Kontrolle) mit zunehmender Tensid-Toxizität in ähnlicher Reihenfolge: Synperonic LF/RA 30 (38) ≤ Triton X-100 (34) < Genapol UD 080 (25) < Plantaren 225 (10). Nach diesen Ergebnissen sollten, um einen sicheren Abbau der solubilisierten PAK zu gewährleisten, möglichst geringe Tensidkonzentrationen eingesetzt werden.

Konzentrationen < 0,1% werden aber nach Ergebnissen von VIGON & RUBIN (1989) fast vollständig am Boden adsorbiert. LAHA & LUTHY (1991) konnten bei Lösungskonzentrationen < 0,1% Tensid keine signifikanten Unterschiede der Extraktgehalte an PAK im Vergleich zu reinen Wasserextrakten finden. Eigene Versuche mit unterschiedlichen Tensidkonzentrationen (0,02%, 0,2%, 2,0% $w_{\text{Tensid}}/w_{\text{Wasser}}$) sind beispielhaft für die Bodenprobe Ko in Abb.22 wiedergegeben.

Es zeigt sich, daß die gelösten Mengen an Polyaromaten bis zu einer Tensidkonzentration von 0,2% steil ansteigen, darüber bis 2% in geringerem Maße zunehmen. Die vier gewählten Tenside unterscheiden sich in dem gewählten Konzentrationsbereich in ihrer Solubilisationskraft nur wenig, erst bei 2,0% Aktivsubstanz extrahiert Genapol UD 080 deutlich mehr PAK als die übrigen Tenside. Die Kurven-

¹ Effektive Dosis, die zu einer Aktivitätserniedrigung um 50% gegenüber der Kontrolle führt.

verläufe der Extraktgehalte anderer Bodenproben sind ähnlich, jedoch ist die Reihenfolge der Tenside bezüglich ihrer PAK-Lösungskraft z.T. eine andere.

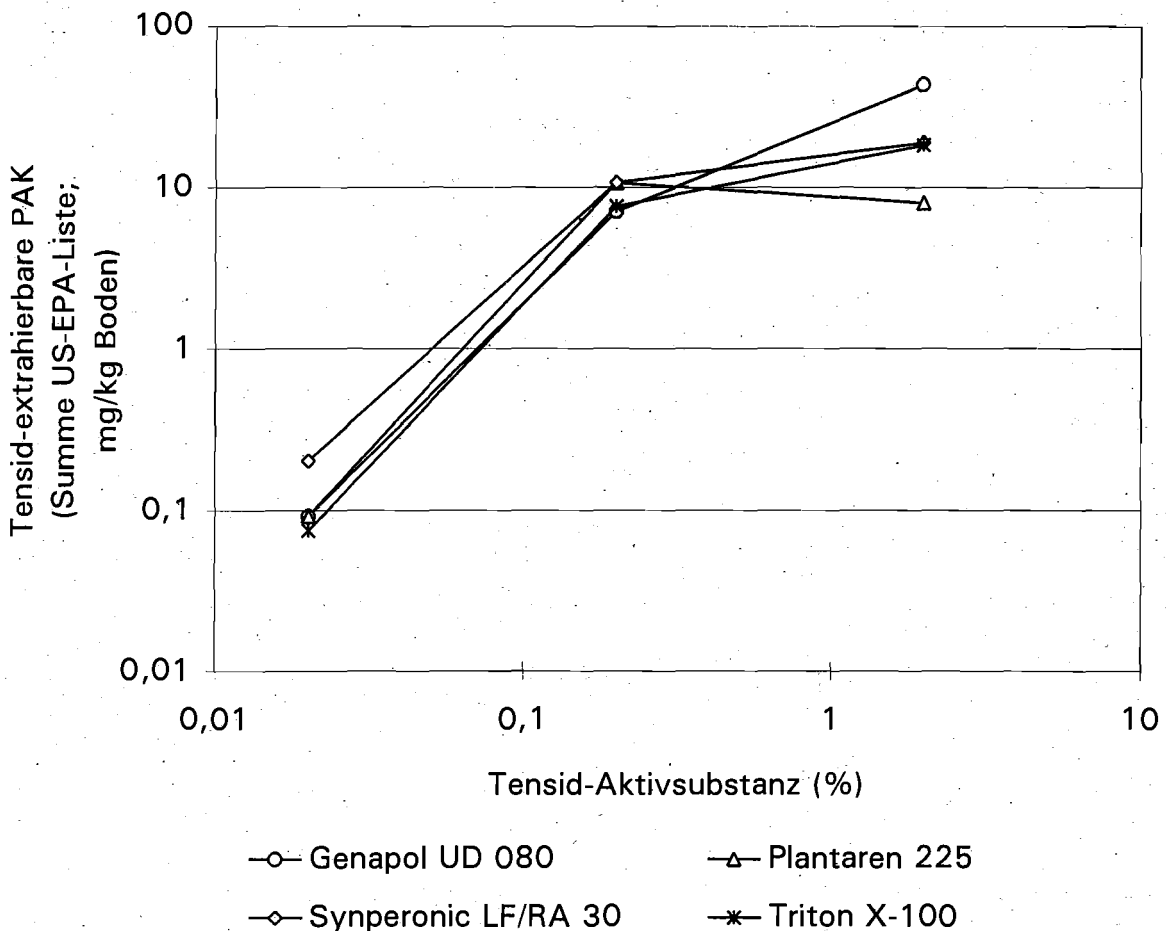


Abb.22: In Abhängigkeit von der Tensidkonzentration extrahierbare PAK-Gehalte der Bodenprobe Ko (Summe der PAK-Gehalte nach US-EPA-Liste; Tensidkonzentration als $\% w_{\text{Tensid}}/w_{\text{Wasser}}$)

Da unter natürlichen Bedingungen in Böden schwankende Wassergehalte auftreten, ist die Beurteilung, in welchen Konzentrationen die Tenside bei auf das Bodengewicht bezogenen Zugaben in der Bodenlösung real vorliegen, nur schwer abschätzbar. Geht man davon aus, daß die Tenside über die Bodenlösung wirken und eine Bodenprobe bei vollständiger Wassersättigung bis zu 50 Gew.-% Wasser aufnehmen kann, so entsprechen in diesem Falle 1 Gew.-% Tensid je Gewichtseinheit Boden maximal 2 Gew.-% Tensid je Gewichtseinheit Bodenlösung. An die Austauscheroberflächen adsorbierte Anteile vermindern diese Konzentration jedoch in unbekanntem Ausmaß. Anhand von Versuchen mit Tensidkonzentrationen in den Extraktionslösungen von 0,02 - 2,0% konnte festgestellt werden, daß trotz teilweiser Hemmung der Mikroorganismenaktivität eine Konzentration von 0,1% Aktivsubstanz je Gewichtseinheit Boden - entsprechend 0,2% in der Bodenlösung - einen tragbaren Kompromiß darstellt.

5.3.3.2 Wirkung der Tenside auf die Abnahme der PAK-Gehalte in den Gefäßversuchen

Die Eignung der vier ausgewählten Tenside Genapol UD 080, Plantaren 225, Synperonic LF/RA 30 und Triton X-100 (s. Kap.5.3.3.1) zur Förderung eines biologischen PAK-Abbaus wurde an Bodenproben der Standorte Ko, Ra, So und Heb geprüft. Dabei wurden den Bodenmaterialien 0,1% Aktivsubstanz ($\% w_{\text{Tensid}}/w_{\text{Boden}}$) zusammen mit 1,5% Klee gras-Heu, 200kg N/ha (Variante K1) und den Standardmengen an weiteren Nährstoffen zugegeben. Im Rahmen der Erneuerungen der Zugaben wurden ebenfalls die Tenside wiederholt eingemischt (s. Kap.2.2.2). Im Verlauf der Gefäßversuche zeigte sich, daß gerade Bodenproben mit geringen mikrobiellen Abbauraten (Ko, Ra, So) ausgewählt worden waren. Dementsprechend lassen sich aus den in Abb.23 beispielhaft für die Bodenprobe Ra dargestellten Ergebnissen kaum eindeutige Schlüsse ziehen.

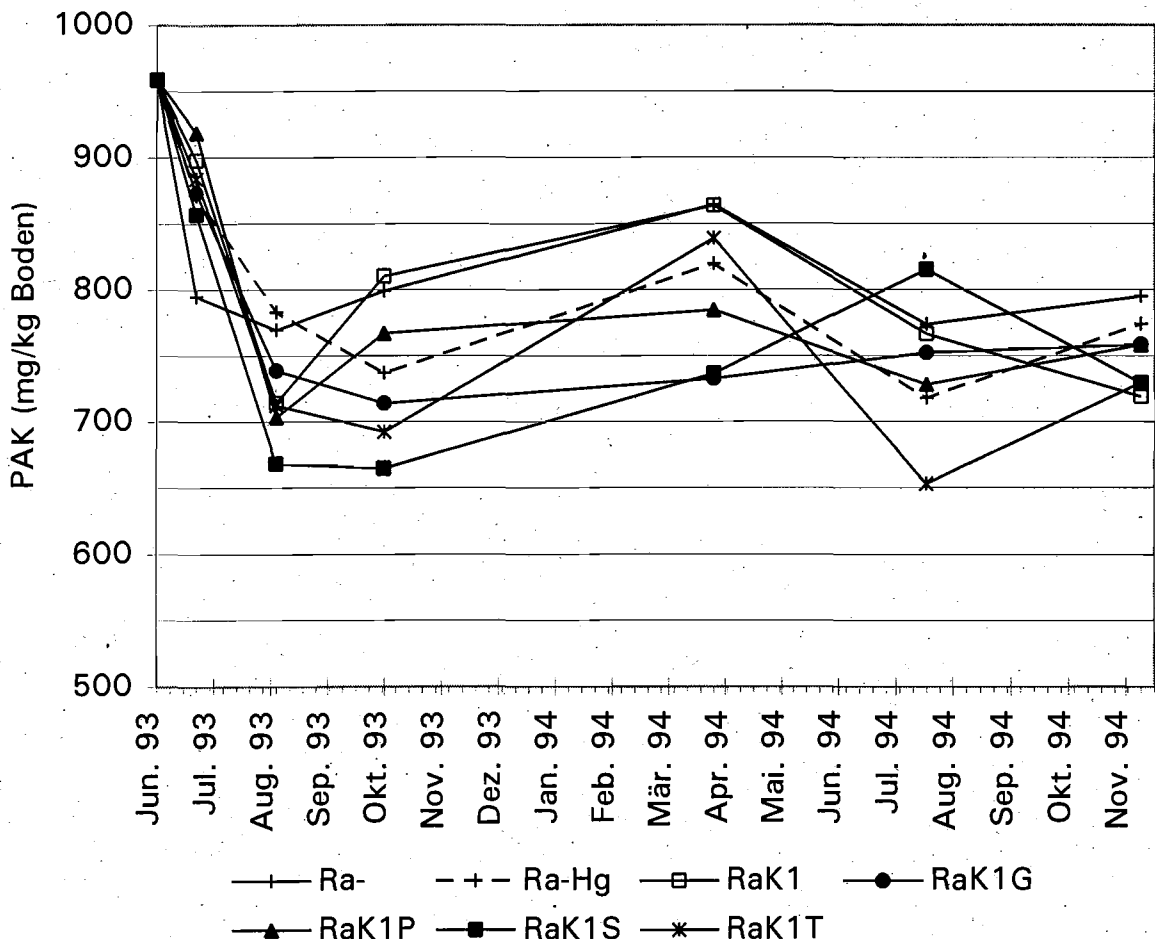


Abb.23: Gehalte der Summe von 15 PAK nach US-EPA-Liste in den Tensid-behandelten Varianten (RaK1G/P/S/T) und den Kontrollvarianten (Ra-, RaK1, Ra-Hg) der Bodenprobe Ra in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Bis zum 18.08.93 nehmen die PAK-Gehalte in allen Tensid-Varianten der Bodenprobe Ra von 959 auf 739 - 668 mg/kg Boden stark ab. Dabei werden vor allem die Gehalte der 3- und 4-Ring-PAK reduziert. Wenn auch in der HgCl₂-sterilisierten Kontrolle am 18.08.93 noch die höchsten Gehalte aller Varianten vorliegen, so sinken diese im weiteren Verlauf der Gefäßversuche unter die der unbehandelten Kontrolle und der Variante K1. Dieses unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Varianten wird vermutlich durch die vergleichsweise hohen Konzentrationen an höherkondensierten PAK verursacht. Offenbar werden die extrahierbaren Gehalte dieser PAK vor allem durch eine wechselnde Mobilisierung und Bildung von gebundenen Rückständen verändert, während die Raten des mikrobiellen Abbaus nur sehr gering sind. Gerade in den mikrobiell aktiven Proben werden die höherkondensierten PAK in verschiedenen Phasen der Gefäßversuche mobilisiert (z.B. aus Teerbröckchen); die Folge sind erhöhte Gehalte an Toluol/Acetonextrahierbaren PAK (s. Kap.4.5). Ähnliches zeigt sich für die Varianten der Bodenproben Ko und So (s. Tab.34.6 und 34.8, im Anhang).

Wenn auch die PAK-Gehalte zwischen den Terminen stark schwanken (Abb.23), so ist doch auffallend, daß sie meist in den Tensid-behandelten Varianten unter denen der allein mit Mineraldünger und organischer Substanz versetzten Variante (RaK1) bzw. der unbehandelten Kontrolle (Ra-) und der sterilisierten Kontrolle (Ra-Hg) liegen. Offenbar haben die Tenside damit eine zwar geringe, aber dennoch positive Wirkung auf die PAK-Abnahme.

Obwohl Lösungsvermittler wie DOM und Tenside hydrophobe Substanzen solubilisieren, scheint die Zugänglichkeit der gebildeten Micellen für Mikroorganismen durch die Molekülstruktur des Solventen bestimmt zu werden. Da die Größe und der Aufbau der Micellen je nach Tensid sehr unterschiedlich sind (GOHLKE et al. 1986, WEST & HARWELL 1992), kann es nicht verwundern, daß zum einen Abbau-fördernde Wirkungen der Tenside beschrieben werden (z.B. SPRENGER et al. 1994), zum anderen aber auch hemmende Effekte (z.B. PETER et al. 1994). Andere Autoren berichten zwar von einer verstärkten Metabolisierung der Schadstoffe; die Metaboliten reicherten sich indes, offenbar geschützt durch die Tensid-Micellen, im Boden an (GUERIN & JONES 1988, TIEHM & ZUMFT 1992). Die von LAHA & LUTHY (1991) festgestellte Hemmung der Phenanthren-Mineralisation durch Triton X-100 kann durch die Ergebnisse der Gefäßversuche jedoch nicht bestätigt werden.

Auch wenn die Unterschiede in den PAK-Gehalten der Tensid-Varianten während des Versuchsverlaufs im Vergleich zu den übrigen Varianten z.T. nur gering sind, so sind sie doch in auffallend vielen Fällen signifikant (s. Tab.37.3, 4, 5 und 7, im Anhang). Werden den Tensid-Varianten mit signifikanten Mittelwertunterschieden

nach dem Ausmaß der PAK-Abnahme Rangpositionen zugeordnet, so ergibt sich unter Zusammenfassung aller dieser Fälle die in Abb.24 abgebildete Häufigkeitsverteilung in den Rängen 1 bis 5. In 46% aller signifikanten Fälle erbringt die Variante ohne Tensidzugabe (K1) die geringste PAK-Abnahme, nur in 6,3% die stärkste. Demgegenüber erweisen sich die Zugaben der Tenside als vorteilhafter. Nach dem folgenden Auswertungsschema zur Häufigkeit in den Rangpositionen:

$((4 * \text{Rang } 5) + (3 * \text{Rang } 4) + (2 * \text{Rang } 3) + (1 * \text{Rang } 2) + (0 * \text{Rang } 1)) / 4$
 ergibt sich die folgende Reihung der positiven Wirkung auf die PAK-Abnahme:
 Triton X-100 > Synperonic LF/RA 30 > Genapol UD 080 > ohne Tensid > Plantaren 225

Plantaren 225 wird nach diesem Schema als die ungünstigste Tensid-Variante bewertet, da es nur in 9,5% der signifikanten Mittelwertunterschiede die Ränge 4 und 5 belegt; allein auf die Häufigkeit in den Rangpositionen 1 bis 3 bezogen schneidet es dagegen deutlich besser ab als die nicht Tensid-behandelte Variante.

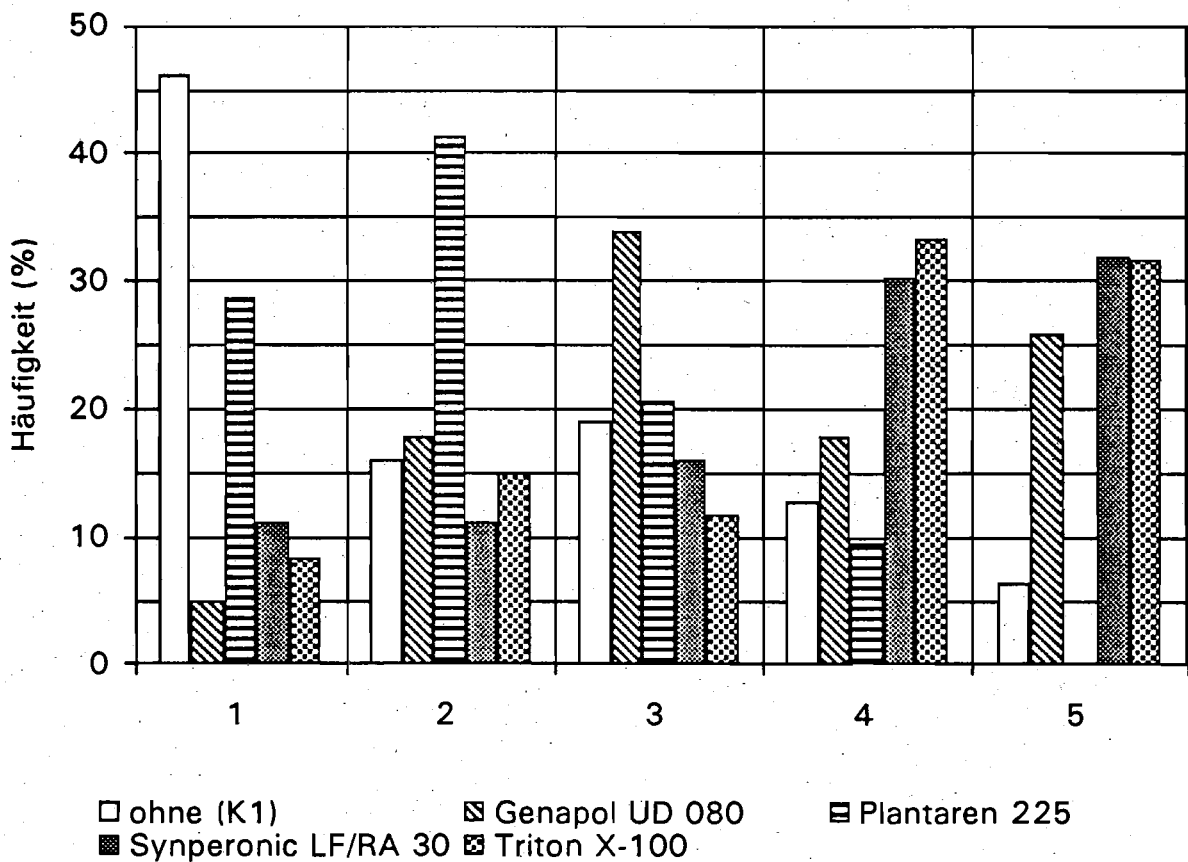


Abb.24: Häufigkeitsverteilung der durch über die Versuchsdauer signifikant verschiedene PAK-Gehalte gekennzeichneten Tensid-Varianten in den Rangfolgepositionen 1 bis 5 ($\alpha \leq 0,05$; $n = 63$ ($n = 100\%$))
 (Wertung: 1 = geringste PAK-Abnahme; 5 = stärkste PAK-Abnahme)

Obwohl die Möglichkeit einer Adsorption von Tensiden an die Oberfläche der Bodenmatrix besteht und dadurch die Verfügbarkeit von Schadstoffen erheblich vermindert werden kann (HUGGENBERGER et al. 1973), ist dies als Ursache für die niedrigeren Meßwerte der PAK auszuschließen. Zum einen ist die Stärke der adsorptiven Bindung zu gering, um die PAK so festzulegen, daß sie für das Toluol/Aceton-Gemisch nicht mehr extrahierbar sind. Zum anderen wirkten die Tenside in den bei den Vorversuchen gewählten Konzentrationen von 0,02 - 2,0% eindeutig löslichkeitserhöhend und damit abbaufördernd.

Zur Erfassung der kombinierten Wirkung von Tensid-Zusätzen zusammen mit der Menge und Art der organischen Substanz wurde Triton X-100 den Bodenproben Ko, Ra, So und Heb jeweils auch zu Varianten mit Zugaben von Ackerbohnen/Senf-Stroh (A) und Klee gras-Heu (K) in einfacher (1) und doppelter Menge (2) an organischer Substanz zugemischt (s. Kap.2.2.1). Die Rangfolge für den Einfluß von Menge und Art der organischen Substanz auf eine PAK-Abnahme wurde durch die Tensid-Zugabe nicht verändert. Bei Auswertung der Fälle signifikanter Wechselwirkungen nach dem oben aufgeführten Schema ergeben sich folgende Reihungen für den kombinierten Einfluß der Menge an organischer Substanz (1, 2) plus Tensid und der Art der organischen Substanz (A, K) plus Tensid:

Menge 2 + Triton X-100 \geq Menge 1 + Triton X-100 > Menge 2 > Menge 1

($\alpha \leq 0,05$; n = 23)

A + Triton X-100 \geq K + Triton X-100 > A \geq K

($\alpha \leq 0,05$; n = 23)

Am Beispiel des Verlaufs der Abnahme der PAK in den Varianten der Bodenprobe Heb wird der fördernde Effekt der Tenside besonders deutlich (Abb.25). Während die PAK-Gehalte in der unbehandelten und Hg-sterilisierten Kontrolle insbesondere nach dem 18.08.93 auf einem hohen Niveau bleiben, nehmen diese in den übrigen Varianten kontinuierlich und deutlich ab, bis zum 16.11.94 in der Variante K1T mit 24,9 mg PAK/kg Boden nur noch weniger als die Hälfte der Ausgangskonzentration vorliegt. Fast stets liegen die PAK-Konzentrationen in den Tensid-behandelten Varianten unter denen der Variante K1, und an den meisten Terminen spiegelt sich die nach der Häufigkeitsverteilung der signifikanten Fälle ermittelte Rangfolge für den Einfluß der vier Tenside wider.

Die Wirkung der Tenside auf die verschiedenen PAK-Gruppen unterscheidet sich allerdings. Bei der Auswertung der über den gesamten Versuchsverlauf gebildeten Mittelwerte, also unter Einschluß der nicht signifikanten Fälle, ergibt sich für die 2-, 3- und 4-Ring-PAK die nachstehende Reihenfolge:

Genapol UD 080 > Synperonic LF/RA 30 > Triton X-100 > Plantaren 225 > ohne Tensid

Die Abnahme der 5- und 6-Ring-Aromaten zeigt jedoch die Reihung:

Triton X-100 > Genapol UD 080 > Synperonic LF/RA 30 > Plantaren 225 > ohne Tensid

Dieses kann nicht durch die Extraktionseigenschaften der Tenside erklärt werden (s. Kap.5.3.3.1); offenbar sind die solubilisierten PAK-Anteile für die Mikroorganismen unterschiedlich zugänglich.

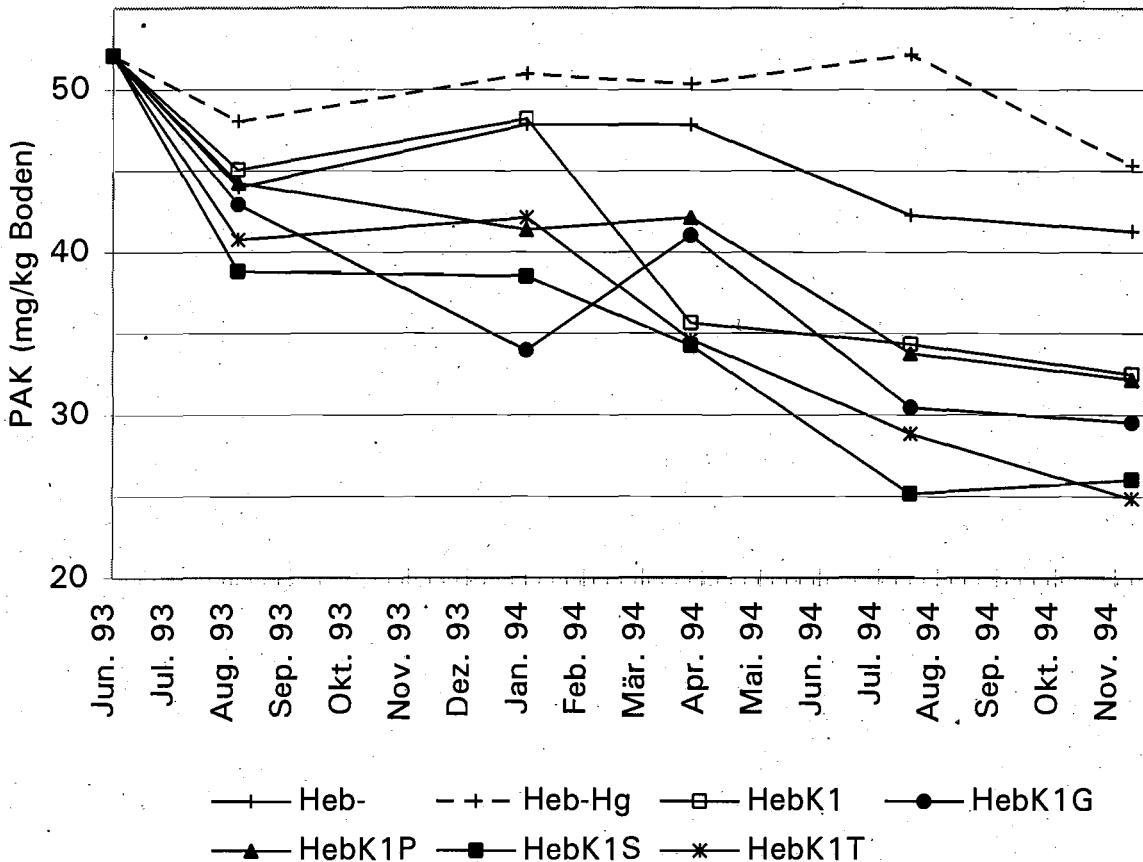


Abb.25: Gehalte der Summe von 15 PAK nach US-EPA-Liste in den Tensid-behandelten Varianten (HebK1G/P/S/T) und den Kontrollvarianten (Heb-, HebK1, Heb-Hg) der Bodenprobe Heb in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Prinzipiell kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse der Einsatz der vier getesteten Tenside empfohlen werden. Bei der Abnahme der Gehalte an 3- und 4-Ring-PAK erbrachte Genapol UD 080 die besten Ergebnisse, während Triton X-100 als für die Abnahme der Gehalte an 5- und 6-Ring-Polycyclen am geeignetsten erscheint. Zu beachten ist jedoch die schlechtere Abbaubarkeit von Triton X-100 (Octylphenolpolyglycolether). Aus den genannten Gründen sollte daher zur Anwendung von Tensiden Schadensfall-spezifisch - je nach Spektrum der vorliegenden

PAK-Verbindungen - durch Vortests das optimale Produkt ermittelt werden (Extraktionsversuche; Abbauversuche im Sapromaten (KLEIN 1992, PFEIFER 1995)). Dagegen fiel die Rangfolge der Tenside für alle vier untersuchten Bodenproben gleich aus, so daß die unterschiedlichen Bodeneigenschaften offenbar von deutlich untergeordneter Bedeutung für die Wirkung der vier Tenside sind.

5.3.4 Einfluß der Bodenreaktion

Zwar übt der pH-Wert keinen unmittelbaren Einfluß auf den Chemismus der PAK aus (Blume 1992), doch hängen zahlreiche indirekt wirkende Faktoren, die die Adsorption und Mobilität der PAK bestimmen, von der Bodenreaktion ab. So werden einerseits mit fallendem pH verstärkt niedermolekulare organische Stoffe gebildet wie z.B. Fulvosäuren, aus denen sich auch die gelösten organischen Substanzen (DOM) zu einem wesentlichen Teil zusammensetzen. Zusätzlich steigt das Ausmaß der Bindung von PAK an die DOM mit absinkendem pH an. Andererseits nimmt aber bei saurer Bodenreaktion die Adsorption organischer Substanzen an Mineraloberflächen und damit auch die Co-Sorption von PAK zu. Im Bodenreaktionsbereich um den und oberhalb des Neutralpunktes flocken hingegen Ca^{2+} -Ionen DOM und damit einhergehend an diese sorbierte PAK aus (TEBAAY 1994).

Auch die Organismen, welche die PAK transformieren, zeigen pH abhängig unterschiedliche Leistungen. Während die meisten Bakterien und Actinomyceten bei pH-Werten zwischen 6 und 8 die besten Lebensbedingungen finden, favorisieren Pilze ein deutlich saureres Milieu (SCHACHTSCHABEL et al. 1989). Da aber die Umsatzleistungen der Bakterien die der Pilze übertreffen, nennt auch OTTOW (1988) für Schadstoffumwandlungsprozesse einen pH-Bereich von 6 bis 7 als am günstigsten. Die für den mikrobiellen Einbau von Polycyclen entscheidende Peroxidase der Basidiomyceten kann jedoch erst bei pH-Werten unter 7 (bis 4) effektiv wirken (BOLLAG & LOLL 1983).

Aufgrund solcher vielschichtiger Wirkungen des Boden-pH auf das Verhalten hydrophober Schadstoffe in Böden verwundert es nicht, daß BRYNIOK et al. (1990) keinen Effekt von pH-Puffern auf den Abbau von PAK fanden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden durch Zugaben an organischer Substanz und gesteigerte Kalkmengen (C0 - C2) mehrere Varianten unterschiedlichen pH-Wertes mit dem Bodenmaterial des Standortes Hea angesetzt. Es stellten sich während der Gefäßversuche im Mittel folgende pH-Werte ein:

Hea-C0 3,7; HeaK2C0 5,9; HeaK2C1 6,5; HeaK2C2 7,1.

Sowohl die mikrobiellen Aktivitäten (s. Kap.3.1.1) als auch der Pflanzenaufwuchs der Gefäße (nicht dargestellt) wurden infolge der pH-Anhebung gesteigert. Bei 11 der 15 bestimmten PAK-Einzelsubstanzen ist die Wirkung der Kalkung auf die PAK-Abnahme signifikant (s. Tab.37.6, im Anhang). Wenn auch die Unterschiede zwischen den behandelten Varianten recht klein und nicht immer durch Mittelwertvergleiche absicherbar sind, so liegen die Gehalte doch stets niedriger als in der unbehandelten Kontrolle. Entgegen den Vermutungen konnte allerdings kein direkter Kalkungseffekt festgestellt werden. Insgesamt ergibt sich die folgende Reihe für die PAK-Abnahme der verschiedenen Varianten (pH in Klammern):

$$\text{HeaK2C0 (5,9)} > \text{HeaK2C1 (6,5)} \geq \text{HeaK2C2 (7,1)} >> \text{Hea-C0 (3,7)}$$

$(\alpha \leq 0,05; n = 12)$

Damit ist die höchste PAK-Abnahme für die mit Kleegras-Heu (Menge 2) und Mineraldüngern behandelte, jedoch nicht mit Kalk versetzte Variante (C0) festzustellen, in der die beschriebenen Behandlungen indes auch zu einem deutlichen pH-Anstieg von 3,7 auf 5,9 geführt haben. Die durch die Kalkzugaben eingestellten pH-Werte von 6,5 und 7,1 haben offenbar zu einer so gravierenden Änderung des Bodenmilieus geführt, daß die zu erwartenden positiven Effekte vermutlich erst nach einer längeren Anpassungsphase erreicht werden können. Zu diesem Ergebnis kann möglicherweise zum einen die flockende und Adsorptionssteigernde Wirkung des Ca^{2+} -Ions beigetragen haben. Zum anderen könnten die an die Schadstoffe adaptierten, säureliebenden Mikroorganismen zugunsten schlechter an die PAK-Kontamination angepaßter, dafür im schwach sauren bis neutralen Milieu umso durchsetzungsfähigerer Mikroorganismen zurückgedrängt worden sein.

6. VERGLEICH DER IN DEN GEFÄßVERSUCHEN UND IN BIOLOGISCHEN REAKTORVERFAHREN ABGEBAUTEN PAK-ANTEILE

Neben den in diesen Gefäßversuchen simulierten Verfahren der biologischen Bodenbehandlung im Mietenverfahren bzw. Landfarmingverfahren existieren auch Reaktorverfahren, die sich jedoch überwiegend noch in der Entwicklung befinden. Diese bieten den Vorteil einer besseren Optimierung, Überwachung und Steuerung der Lebensbedingungen der schadstoffabbauenden Mikroorganismen, wodurch eine Steigerung des PAK-Abbaus erzielt werden soll. Dem stehen ein höherer technischer Aufwand und stark begrenzte Kapazitäten bei der Bodenbehandlung gegenüber.

Um vergleichende Ergebnisse zwischen diesen Verfahren zu erhalten, führte die DMT-FP, Essen, Untersuchungen zum PAK-Abbau in Reaktorsystemen durch (PFEIFER 1995). Hierzu wurde vom Institut für Bodenkunde, Bonn, Probenmaterial der Altlaststandorte Dd, Ge, Ko und Üb zur Verfügung gestellt. Zu beachten ist, daß diese Materialien von nicht homogenisierten Rückstellproben entnommen wurden. So ergeben sich zu den Proben der Gefäßversuche abweichende PAK-Anfangsgehalte (Tab.22).

In einem Sapromatttest mit allen vier Proben und in Abbauversuchen mit den Proben Dd und Üb in einem Bioreaktorsystem wurde das Ausmaß des biologischen PAK-Abbaus bestimmt. Dabei dient eine vierwöchige Inkubation 10%iger Bodensuspensionen im Sapromaten unter Animpfung mit einer PAK-abbauenden Bakterien-Spezialkultur (M1) als Vortest zur mikrobiellen Abbaubarkeit der Polyaromaten und damit zur Abschätzung des Sanierungserfolges bei einer nachfolgenden Behandlung der Altlastböden im Bioreaktor. Eingesetzt wurde ein Suspensionsreaktor mit externer Luftbegasung (Airliftreaktor) nach dem DMT-Biodynverfahren. Der Reaktor mit einem Arbeitsvolumen von 8 Litern wurde jeweils mit einer Bodensuspension mit 2,5 kg Boden befüllt, so daß 25% w/w Feststoffgehalt vorlagen, und mit einer PAK-abbauenden Bakterien-Spezialkultur angeimpft (PFEIFER 1995).

Im Rahmen der Voruntersuchungen (Sapromatttest) war infolge der Behandlung eine erhebliche, wenn auch unterschiedliche Steigerung der mikrobiellen Aktivität - gemessen als O₂-Verbrauch - in allen Bodenproben festzustellen. Hingegen erwiesen sich die PAK in den Bodenproben Dd, Ko und Ge als nicht oder kaum (Ko 0%; Dd 2%) bzw. nur zu geringen Anteilen (Ge 19%) abbaubar, was auf eine zu geringe Bioverfügbarkeit der PAK zurückgeführt wurde. Nur in der Probe Üb waren die Polycyclen mit einer Eliminierung von 85% der PAK-Gesamtgehalte gut abbaubar (PFEIFER 1995) (Tab.22).

Tab.22: Abbau von PAK in belasteten Böden durch verschiedene mikrobiologische Verfahren (Gefäßversuche Inst. f. Bodenkunde, Bonn; Sapromatttest und Biodynreaktor-Versuche DMT-GmbH, Essen, PFEIFER 1995)

Probe	PAK (mg/kg)	Gefäßversuche			Sapromatttest			Biodynreaktor	
		Anfangs- gehalte	End- gehalte	%Abbau	Anfangs- gehalte	End- gehalte	%Abbau	End- gehalte	%Abbau
Dd	NAP	4,42	n.n.	100	1,8	1,2	33	0,9	50
	3-Ring	33,2	27,2	18	15,5	15,9	0	17,0	0
	4-Ring	86,0	66,7	22	58,3	57,0	0	68,1	0
	5-6-Ring	53,3	45,8	14	39,6	38,8	0	41,4	0
	Σ-PAK	176,9	139,7	21	115	113	2	127	0
Ge	NAP	6,62	6,58	0	31,2	19,3	38		
	3-Ring	37,7	24,7	35	35,7	26,5	25		
	4-Ring	58,2	39,5	32	48,9	42,9	12		
	5-6-Ring	36,1	28,6	21	33,3	32,9	1		
	Σ-PAK	138,5	99,4	28,2	149	121	19		
Ko	NAP	0,957	n.n.	100	2,0	1,4	30		
	3-Ring	14,5	20,8	0	10,7	12,2	0		
	4-Ring	85,8	73,7	14	67,9	64,7	4		
	5-6-Ring	67,4	54,3	19	55,7	57,3	0		
	Σ-PAK	168,6	148,9	11,7	136	136	0		
Üb	NAP	19,1	n.n.	100	153	18,6	88	18,3	88
	3-Ring	213	8,15	96,2	219	19,6	91	24,8	89
	4-Ring	66,5	11,3	83,0	46,1	15,8	65	24,7	46
	5-6-Ring	19,0	11,9	37,4	14,8	15,1	0	13,3	10
	Σ-PAK	317,9	31,4	90,1	433	69,0	85	81,1	81

Die Ergebnisse der Vorversuche bestätigten sich bei der Behandlung der hiernach ausgewählten Bodenproben Dd und Üb im Bioreaktor. In der Probe Dd beschränkt sich der Abbau allein auf das Naphthalin (50%), während die Gehalte der weiteren PAK unverändert bleiben oder sogar zunehmen. Dies kann auf eine Mobilisierung gebundener Rückstände in der Suspension zurückzuführen sein, die nicht mit der gleichen Rate eliminiert werden wie sie freigesetzt werden. So zeigt sich bei den Sapromatttests und Reaktorbehandlungen für die Proben Dd und Üb das auch im Rahmen der Gefäßversuche beobachtete Phänomen, daß die Gehalte der 5- und 6-Ring-PAK in den mikrobiell aktiven Varianten zum Behandlungsende höher liegen als in den zur Sterilisation mit HgCl₂-behandelten Varianten (s. Kap.4.4). Hinzu kommt als methodische Fehlerquelle, daß mit der Bodenbehandlung im Airliftreaktor eine gewisse Korngrößenklassierung verbunden ist, die zur Folge haben kann,

daß möglicherweise höherbelastetes Feinkornmaterial in der Analysenprobe überproportional enthalten ist (PFEIFER 1995).

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Gefäßversuche ergibt sich dennoch eine recht gute Übereinstimmung. Die Daten sind mit $r = 0,93$, $n = 30$ sehr eng positiv korreliert, wie dies auch aus Abb.26 zu ersehen ist. Dies läßt darauf schließen, daß das Ausmaß des PAK-Abbaus im wesentlichen durch die Bioverfügbarkeit bestimmt wird. Dennoch sind die abgebauten PAK-Mengen und -prozentanteile bei den Gefäßversuchen in allen Proben größer (außer für Naphthalin in den Proben Ge und Üb); insbesondere werden die Gehalte der höherkondensierten Polyaromaten bei den Gefäßversuchen stärker vermindert als in den Sapromatttests und Reaktorbehandlungen. Dies mag unter anderem an der deutlich kürzeren Behandlungsdauer (Sapromatttest und Bioreaktor 4 Wochen; Gefäßversuche 74 Wochen) liegen, die möglicherweise für eine Umwandlung der reaktionsträgen höherkondensierten PAK nicht ausreicht.

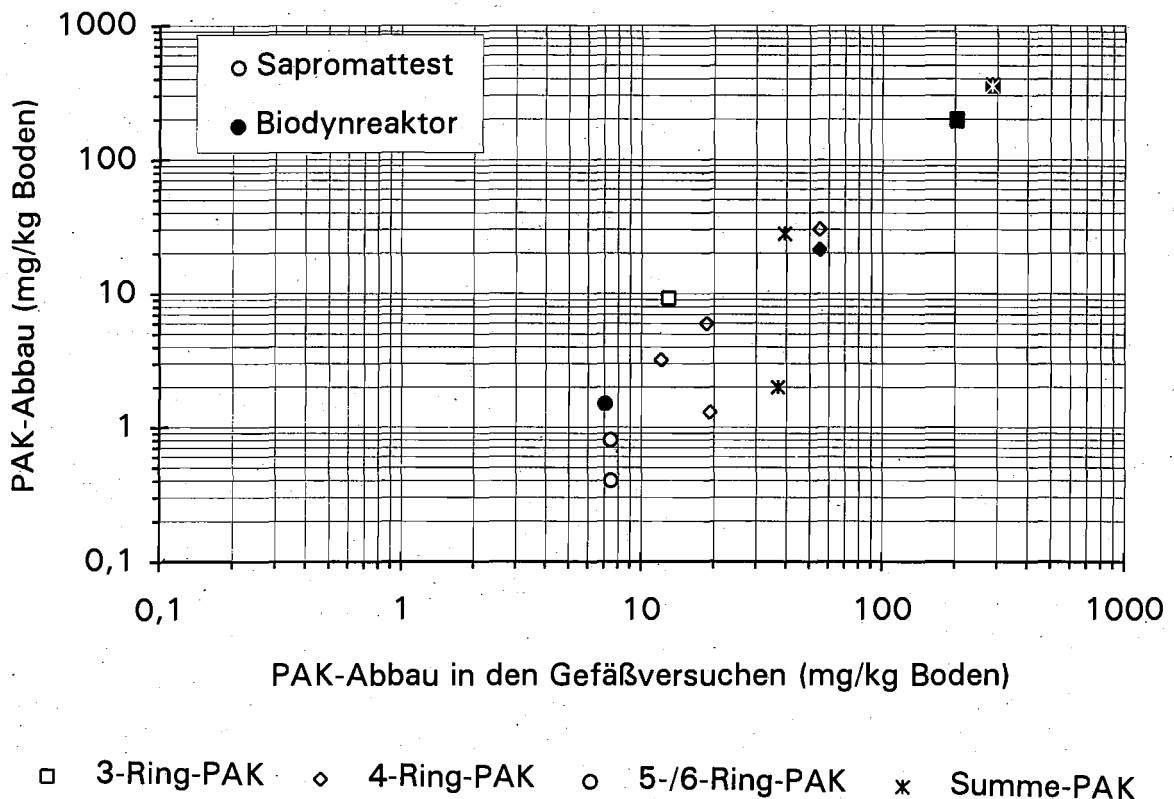


Abb.26: Abnahme der PAK in den belasteten Böden Dd, Ge, Ko und Üb im Sapromatttest sowie Dd und Üb im Biodynreaktor im Vergleich zur PAK-Abnahme in den Gefäßversuchen

Insgesamt zeigt dieser Vergleich, daß der mikrobielle Abbau von PAK in belasteten Böden ganz wesentlich von einer ausreichenden Aktivierung der Mikroflora abhängt. Dies kann ebenso durch Optimierung der Lebensbedingungen in einem Reaktorsystem (Biodynreaktor DMT-GmbH, Essen) wie durch relativ einfache, der landwirtschaftlichen Praxis entlehnte Maßnahmen (Gefäßversuche) erzielt werden. Durch die Zugabe speziell gezüchteter, PAK-abbauender Bakterienkulturen werden gegenüber den Leistungen der vorhandenen Schadstoff-adaptierten Mikroorganismen (Gefäßversuche) keine niedrigeren PAK-Endgehalte erreicht. Doch ist die Optimierung der Aktivität der Mikroorganismen allein noch keine Garantie für einen PAK-Abbau. Ganz wesentlich wird die Abbaubarkeit durch die Bioverfügbarkeit (Mobilität) der PAK bestimmt, die von den Bodeneigenschaften, den PAK-Gesamtgehalten und den Eigenschaften der vorliegenden PAK-Einzelsubstanzen (PAK-Muster) abhängt und nicht zuletzt eine Funktion der Zeit ist.

7. ABSCHLIESSENDE BEURTEILUNG DER DURCHGEFÜHRTEN MASSNAHMEN ZUM MIKROBIELLEN PAK-ABBAU IN BELASTETEN BÖDEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Die durchgeführten Gefäßversuche lieferten Ergebnisse zum zeitlichen Verlauf und Ausmaß des mikrobiellen Abbaus von PAK in zehn belasteten Bodenproben. Dadurch können Aussagen über die untersuchten Bodenproben unterschiedlichen Stoffbestandes und Belastungsgrades von neun verschiedenen Altlaststandorten und über die Wirkung der durchgeführten Bodenbehandlungen bezüglich der Abnahme der PAK-Gehalte getroffen werden. Ergänzt durch Angaben aus der Literatur ergeben sich Hinweise zu den Voraussetzungen, Einflußgrößen und Möglichkeiten zur Steigerung und Beschleunigung der PAK-Abnahme durch eine Aktivierung der Mikroorganismen und eine Erhöhung der PAK-Verfügbarkeit durch Tensidzugaben u.a.. Die Veränderungen der PAK-Gehalte können z.T. quantitativ, zumindest aber qualitativ bestimmten Prozessen zugeordnet werden. Zur Eignung der verschiedenen im Rahmen dieses Projektes angewendeten Labormethoden können Empfehlungen ausgesprochen werden. Insgesamt ermöglichen es die durchgeführten Untersuchungen, Hinweise zum Erfolg/Mißerfolg von mikrobiellen Sanierungsmaßnahmen bei PAK belasteten Böden zu geben. Solche Sanierungsmaßnahmen können als on-site-Behandlungen (z.B. in Form von Bodenmieten) oder in-situ (z.B. durch Landfarmingtechniken) erfolgen. Bewertungsgrundlage für den Sanierungserfolg muß das von den PAK-Restgehalten ausgehende Gefährdungspotential im Hinblick auf die jeweils im Einzelfall relevanten Belastungspfade sein: orale Aufnahme (insbesondere Ingestion durch spielende Kinder), Inhalation, Verlagerung mit dem Sickerwasser in das Grundwasser sowie Aufnahme in Nahrungspflanzen und toxische Wirkungen von PAK auf Pflanzen, Bodentiere und Mikroorganismen. Ziel einer on-site-Behandlung PAK belasteter Böden sollte ein Wiedereinbau des Materials vor Ort sein, wobei keine Gefährdung für die im Einzelfall betroffenen Schutzgüter bestehen darf. Bei off-site-Behandlungen in stationären Anlagen wird der Boden zumeist nicht wieder am Entnahmeort eingebaut, sondern an anderen Stellen verwertet. In einem solchen Falle müssen daher aus Vorsorgegesichtspunkten höhere Anforderungen an das Sanierungsziel gestellt werden. Als Beurteilungsmaßstab für solche Verwertungen werden u.a. die Technischen Regeln für die Verwertung von Boden der LAGA (LAGA, 1994) herangezogen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden weiterhin Teilergebnisse zum PAK-Austrag durch das Sickerwasser sowie zur Toxizität von PAK u.a. Schadstoffen (kumulative Wirkung) gegenüber Pflanzen und Mikroorganismen erhalten. In einem

Folgeprojekt werden darüberhinaus Labormethoden zur Bestimmung des mikrobiell abbaubaren und des für Pflanzen verfügbaren Anteils von PAK in belasteten Böden entwickelt.

Die Gefäßversuche zeigen, daß durch die angewendeten Bodenbehandlungsmaßnahmen eine wesentliche Steigerung der Mikroorganismenaktivität erreicht wird. Zu beachten bleibt, daß eine aktivierte Mikroorganismenpopulation zwar die Voraussetzung für einen beschleunigten mikrobiellen PAK-Abbau ist, jedoch zusätzlich immer eine Bioverfügbarkeit der Schadstoffe gegeben sein muß.

In der Regel macht eine Sanierung durch mikrobiellen Schadstoffabbau und -umbau deutlich längere Behandlungszeiten erforderlich als andere Dekontaminationsverfahren (nicht selten über 12 Monate). Je nach der Ausprägung der Abbau-beeinflussenden Parameter verbleiben unterschiedlich hohe **PAK-Restgehalte** in den Böden (Tab.23).

Tab.23: Anfangs- (16.06.93) und Endgehalte (16.11.94) der Altlast-Bodenproben an 15 PAK der US-EPA-Liste (Σ -PAK) sowie der PAK-Gruppen (Anzahl der kondensierten Ringe) nach einer 74wöchigen Behandlungszeit (Mittelwerte aller mikrobiell aktiven Varianten; mg/kg Boden)

Bodenprobe	Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Üb	Hea	Heb
Σ -PAK 16.06.93	1286	1300	176,9	138,5	168,6	959	114,9	317,9	141	52,1
16.11.94	783	1017	139,7	99,4	148,9	763	84,1	31,4	103,6	32,8
% Abnahme	39,1	21,8	21,0	28,2	11,7	20,4	26,8	90,1	26,4	39,0
2-Ring 16.06.93	42,1	19,3	4,42	6,62	0,957	72,4	0,570	19,1	1,90	1,10
16.11.94	n.n. ¹	n.b. ²	n.n.	n.n.	n.n.	13,3	n.b.	n.n.	0,93	0,13
3-Ring 16.06.93	452	207	33,2	37,7	14,5	165	13,5	213	17,8	10,1
16.11.94	180	153	27,2	24,7	20,8	136	11,2	8,15	22,8	5,68
4-Ring 16.06.93	545	671	86,0	58,2	85,8	445	47,8	66,5	97,9	34,5
16.11.94	377	519	66,7	39,5	73,7	370	35,5	11,4	61,0	20,9
5-Ring 16.06.93	167	271	35,6	24,6	43,3	180	33,7	13,7	16,5	4,71
16.11.94	145	223	29,1	19,7	36,9	159	22,3	8,39	14,0	3,77
6-Ring 16.06.93	80,5	132	17,6	11,4	24,1	96,2	19,4	5,28	6,74	1,67
16.11.94	81,4	122	16,8	8,90	17,5	85,3	14,9	3,51	4,93	1,27

¹n.n. = nicht nachweisbar (Wert kleiner Nachweisgrenze)

²n.b. = nicht bestimmbar (Wert kleiner Bestimmungsgrenze)

Bei den durchgeführten Gefäßversuchen erreichten bzw. unterschritten innerhalb von 74 Wochen nur zwei der zehn untersuchten Bodenproben (im Mittel der einzelnen Versuchsvarianten) Restgehalte von 30mg PAK/kg Boden (Summe von 15 PAK nach US-EPA-Liste, ohne Acenaphthylen). Dabei enthalten diese Bodenproben im Mittel der Varianten noch 2,73 (Üb) und 0,67 (Heb) mg Benzo[a]pyren/kg Boden.

Die prozentuale PAK-Abnahme lag im Durchschnitt aller Bodenproben bei 32,5%, mit einer Spannweite von 11,7 - 90,1% (Tab.23). Die PAK-Restgehalte der Bodenproben betragen im Mittel aller Bodenproben und Varianten 321mg PAK/kg Boden. Die Schwankungsbreite zwischen den einzelnen Bodenproben und Varianten beträgt 24,9 - 1085mg PAK/kg Boden (0,588 - 88,3mg Benzo[a]pyren/kg Boden) (Kap.5.1). Die Orientierungswerte für die höchstzulässigen PAK-Gehalte beim Wiedereinbau von Bodenmaterial (Z0, Z1, Z2), die in den Technischen Regeln der LAGA (LAGA, 1994) aufgeführt sind, werden in allen Proben nicht erreicht.

Bisher erfolgten die Maßnahmen zur Sanierung PAK belasteter Böden in den meisten Fällen in stationären Bodenbehandlungsanlagen. Die so behandelten Böden müssen zur freien bzw. eingeschränkten Verwertung bestimmten Qualitätsstandards genügen. Als Orientierungswerte dienen die Technischen Regeln der LAGA (LAGA, 1994), in denen u.a. tolerierbare Gesamtgehalte für PAK angegeben sind. Im Zusammenhang mit der Beurteilung des Gefährdungspotentials der verbleibenden PAK-Restgehalte stellt sich die Frage nach differenzierten Anforderungen. Denn durch die Anwendung mikrobieller Verfahren wird es häufig nicht gelingen, bestimmte Grenzkonzentrationen an PAK-Gesamtgehalten zu erreichen. So macht zudem neben dem Abbau gerade der **mikrobielle Einbau** in Huminstoffe des Bodens einen ganz wesentlichen Teil der Entgiftung hydrophober Substanzen aus. Nach neueren Erkenntnissen wird u.a. die Ansicht vertreten, daß dieser zu einer echten Dekontamination von Schadstoffen führen kann (z.B. BOLLAG 1992). Die Raten einer möglichen Remobilisierung sind noch nicht bekannt; eine solche Remobilisierung kann auch als sehr langsam ablaufender Nachlieferungsprozeß für einen PAK-Abbau interpretiert werden (Kap.4.5). Es ist anzunehmen, daß die Bioverfügbarkeit von festgelegten PAK geringer ist als deren Löslichkeit in dem zur Extraktion verwendeten, aggressiven Gemisch aus Toluol/Aceton. Auch die Verlagerbarkeit und potentielle Grundwassergefährdung der verbliebenen PAK wird durch eine Toluol-Aceton-Extraktion nicht realitätsnah beschrieben. Im Zuge der PAK-Abnahme durch die mikrobiologische Bodenbehandlung werden gerade die verfügbaren und damit insbesondere die ökologisch relevanten PAK-Anteile eliminiert. Eine genaue Bewertung des Gefährdungspotentials nachweisbarer Restgehalte ist für die verschiedenen Wirkungspfade, vor allem aber bezüglich einer möglichen oralen Aufnahme durch Mensch und Tier, aber auch bezüglich der Grundwasserpfades und der Aufnahme in Nutzpflanzen zur Zeit noch nicht möglich. Die von verschiedenen Forschungsgruppen bearbeiteten Testmethoden zur Beurteilung behandelter Altlastböden befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Die im Rahmen der Gefäßversuche erhaltenen Befunde ergeben keine Anhaltspunkte, daß die nach der mikrobiellen Bodenbehandlung von 74 Wochen

verbliebenen PAK-Restgehalte toxische Wirkungen gegenüber den angebauten Pflanzen (Kap.3.2) und Mikroorganismen (Kap.3.1.1) besitzen.

Ob nach der Behandlung Verlagerungen mit dem Sickerwasser auftreten, kann nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen zumindest nicht ausgeschlossen werden. Die Frage, ob nach dem Abschluß mikrobieller Bodenbehandlungen und dem Abbau bioverfügbarer PAK-Anteile noch Verlagerungen mit dem Sickerwasser auftreten können, war nicht unmittelbar Gegenstand des Untersuchungsauftrages. Die dazu durchgeführten Untersuchungen können aufgrund der Unzulänglichkeiten der Versuchsanordnung nur Anhaltspunkte, jedoch keine abschließenden wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Pfad Boden/Sickerwasser/Grundwasser liefern. Zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser nach einer biologischen Bodenbehandlung wird deshalb ein weiterer Untersuchungsbedarf gesehen.

Zur **analytischen Bestimmung der PAK-Gehalte von Bodenproben** werden durch das LUA NRW (1994) verschiedene Methoden empfohlen. Daneben können weitere Methoden angewendet werden (z.B. ESCHENBACH et al. 1991). Bei den hier durchgeführten Untersuchungen erwies sich die Verwendung eines Gemisches von Toluol/Aceton (60:40 Volumenanteile) in Verbindung mit einer siebenstündigen Soxhlet-Heißextraktion als vorteilhaft (Kap.2.6.1). Im Vergleich mit verschiedenen anderen Methoden liefert sie die höchsten PAK-Ausbeuten bei guter Vergleichbarkeit, Reproduzierbarkeit, Richtigkeit und hohen Wiederfindungsraten sowie niedrigen Nachweis- und Bestimmungsgrenzen (Kap.2.7). Bestimmt wurden 15 PAK der US-EPA-Liste (ohne Acenaphthylen).

Altstandorte ehemaliger industrieller Nutzung weisen häufig **Böden aus Aufschüttungen/Auffüllungen** auf, die den gewachsenen Boden in unterschiedlicher Mächtigkeit überdecken. Diese Aufschüttungen können, ebenso wie die darunter anstehenden natürlichen Böden, unbelastete wie auch belastete Schichten aufweisen. Vor allem Aufschüttungen zeichnen sich meist durch **ungünstige Nährstoffverhältnisse und pH-Werte** sowie **hohe Skelettanteile** aus. Der Wasser- und Lufthaushalt solcher technogener Böden ist aufgrund heterogener Verteilung und partieller Verdichtung der Bodenbestandteile meist schlecht; nicht zuletzt sind auch die PAK und andere Schadstoffe heterogen in den belasteten Bereichen verteilt. Daher ist es notwendig, solche Materialien zum Zwecke einer mikrobiellen Bodensanierung zu **homogenisieren** und für Mikroorganismen unzugängliche kontaminierte **Skelettanteile abzusieben oder zu zerkleinern** (Kap.5). In den untersuchten Skelettfractionen (>2mm) der Bodenproben lagen die PAK-Gehalte in vier Fällen in gleicher und in drei Fällen in niedrigerer Konzentration als in den

Feinbodenfraktionen vor (Kap. 2.1.2), so daß die ungesiebten Proben zwischen 64,6 und 107% (Mittelwert 96,2%) der PAK-Gehalte der Feinbodenproben aufweisen.

Zu beachten ist, daß Materialien wie **Bauschutt mit geringem Feinkornanteil** oder **Teer in Phase** nicht für die Anwendung von Verfahren der mikrobiellen Sanierung geeignet sind. Liegen dagegen am Standort Bedingungen vor, bei denen die Kontamination in einer feinerdereichen Aufschüttung oder unmittelbar in dem gewachsenen, feinerdereichen Boden auftritt oder aus einer geringmächtigen (ca. $\leq 30\text{cm}$) technogenen Auftragsschicht in den natürlichen Boden verlagert wurde (z.B. Standort He), dann wäre prinzipiell eine mikrobielle **in-situ-Sanierung durch Landfarming-Techniken** möglich. Die Tiefenwirkung einer solchen Behandlung wird allerdings vier bis fünf Dezimeter nicht wesentlich überschreiten (LfU BW 1991). Diese Fallgestaltungen mit sanierungsbedürftigen PAK-Belastungen lediglich in dieser Tiefenlage treten in der Praxis relativ selten auf, so daß die Einsatzmöglichkeiten dieser Technik eher als gering angesehen werden müssen.

Bei Betrachtung der Bodeneigenschaften sind die **organischen Substanzen des Bodens** - vor allem die Huminstoffe - die wichtigsten Sorbenten für die PAK; dazu zählen außerdem in den anthropogen beeinflussten Böden **enthaltene Kohlepartikel**, die aufgrund ihrer Struktur aber auch ihrer chemischen Eigenschaften (Kohle besteht zu hohen Anteilen aus Polycyclen) PAK in hohen Mengen zu binden vermögen. Solche Kohlepartikel und darin fixierte Schadstoffanteile sind nur mit sehr geringen Raten einem mikrobiellen Abbau zugänglich (Kap.5.1); Zeiträume zur Dekontamination von mehreren Jahren bis Jahrzehnten sind die Folge. Entscheidend für den Abbau Huminstoff-gebundener PAK ist neben der Quantität der Huminstoffe auch deren Qualität. Eine einfache Kohlenstoffbestimmung reicht zur Kennzeichnung der bodeneigenen organischen Substanz nicht aus. So zeigte eine Bodenprobe mit 25,7% Corg die gleiche prozentuale PAK-Abnahme, wie eine solche mit 4,4%. Genauere Huminstoffanalysen (Bestimmung des C/N-Verhältnisses, Huminstofffraktionierung u.a.) und Bestimmungen der technogenen Beimengungen, z.B. mittels optischer Ansprache nach MEUSER (1993), können hierzu Informationen liefern. Das Auftreten der PAK in Form millimetergroßer, verharzter Teerbröckchen oder Kohlepartikel wird einen Sanierungserfolg durch mikrobielle Verfahren in der Regel in Frage stellen; das Vorliegen von bodeneigener organischer Substanz in Form stabiler hochpolymerer Huminstoffe mit einem hohen C/N-Verhältnis wird einen Abbau erschweren (Kap.5.1).

Offenbar ist hingegen die **Textur** des Bodens für einen mikrobiellen PAK-Abbau von minderer Bedeutung. Im vorliegenden Untersuchungsvorhaben zeigt die Bodenprobe mit dem höchsten Tongehalt (Üb: 15,7%) die stärkste PAK-Abnahme

(90%). Proben mit einem Sandgehalt >70% brachten in einem Falle (Ac) eine Abnahme von über 39%, im anderen Falle (Dd) von nur 21% der PAK-Ausgangskonzentration (Tab.23). In der Literatur wird oft über negative Effekte von hohen Feinstkornanteilen berichtet (u.a. LfU BW 1991). Es werden aber auch förderliche Effekte von **Tonmineralen** auf den Abbau von organischen Schadstoffen beschrieben (z.B. MORTLAND & HALLORAN 1976) (Kap.5.1).

Eine hohe **Kationenaustauschkapazität (KAK)**, die auf organische Austauscher zurückzuführen ist, deutet auf ein hohes Adsorptionspotential auch für komplex gebundene PAK hin, was prinzipiell die Chancen auf einen Abbauerfolg schmälert. Auch **pedogene Oxide** werden als Adsorbenten für PAK in der Literatur genannt. Jedoch ergeben sich nach den vorliegenden Ergebnissen weder zu den genannten noch zu weiteren Bodenparametern verwendbare Korrelationen zu den PAK-Gehalten bzw. der PAK-Abnahme (Kap.5.1).

Von wesentlichem Einfluß scheinen jedoch die **PAK-Gesamtbelastung** (Kap.5.1) und das vorhandene **PAK-Muster** (Kap.5.2) zu sein. Eine gewisse Mindestkonzentration an Polycyclen ist Voraussetzung für eine **Adaptation der Mikroorganismen** und damit für deren Fähigkeit zum PAK-Abbau. Diese Anpassung sollte aber in jeder sanierungsbedürftigen Altlast gegeben sein. In der Regel sind die Schadensfälle so alt, daß die Zeit zur Adaptation ausreichend war. Zu hohe PAK-Gehalte, die eine mikrobielle Aktivierung nicht mehr zulassen, schließen einen Erfolg mikrobieller Sanierungsverfahren aus.

Bei höheren Ausgangsgehalten der PAK ist in der Regel mit einer höheren absoluten PAK-Abnahme, aber auch mit dem Verbleib höherer Restgehalte zu rechnen als bei geringeren Anfangskonzentrationen (Kap.5.1). Wie aus zahlreichen Untersuchungen bekannt ist, sind hochkondensierte Polyaromaten aus fünf und mehr kondensierten Ringen nur schwer mikrobiell abbaubar, was jedoch eher Folge einer starken Festlegung und damit geringen Bioverfügbarkeit als einer zu hohen Persistenz oder zu hohen Toxizität gegenüber Mikroorganismen ist. Die im Rahmen dieser Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse zeigen, daß die PAK dieser Gruppe nicht inert sind (Tab.23), jedoch deutlich längere Abbauzeiten erfordern (Kap.5.2). Damit lassen mikrobielle Sanierungen bei Böden mit hohen Konzentrationen an hochkondensierten Aromaten nur bei sehr langen Behandlungszeiten einen Erfolg erwarten. Zudem zeigte sich bei den vorgestellten Versuchen, daß nach mikrobieller Aktivierung der Böden auch mit einer Mobilisierung von 5- und 6-Ring-PAK zu rechnen ist (Kap.4.4). Die bei hohen Anteilen dieser hochkondensierten Aromaten erforderlichen sehr langen Behandlungszeiten dürften dazu führen, daß biologische on-site Sanierungen in der Praxis häufig nicht zweckmäßig und insbesondere in off-site Anlagen auch zu kostenintensiv sind.

In der Regel sind Mischkontaminationen mit **weiteren Schadstoffen** in Altlastböden anzutreffen (Kap.2.4 und 2.1.2). Hohe Gehalte an anderen Schadstoffen wie Schwermetalle, Cyanide, PCB u.a. können eine mikrobielle Sanierung von PAK-Belastungen sehr erschweren. Hingegen zeichnete sich bei den durchgeführten Abbauversuchen die hohe PAK-Kontamination einer Bodenprobe (Ac), die große Mengen technogener Substrate enthielt und zugleich mit LCKW und Mineralöl-KW belastet war, als den Mikroorganismen gut zugänglich aus. Solche Organika können als Lösungsvermittler offenbar auch einen positiven Effekt auf einen PAK-Abbau ausüben (Kap.5.1).

Um einen mikrobiellen Abbau zu gewährleisten bzw. zu forcieren, ist es in jedem Falle angezeigt, die Nährstoffverhältnisse des Altlastbodens durch **Zufuhr der Hauptnährelemente N, P und K** und eventuell weiterer zu verbessern. Eine Aufdüngung in Bereiche sehr guter Versorgung ist sinnvoll (Kap.2.2.1). Die Optimierung des Angebotes an **Spurennährelementen wie S, Cu, B, Mo, Zn, Fe und Mn** muß von Fall zu Fall geprüft werden, dürfte jedoch meist nicht erforderlich sein.

Durch eine **Zufuhr von zersetzbarer organischer Substanz** wird der geringe Bedarf an den genannten Spurennährelementen gedeckt. Gleichzeitig wird durch eine leicht verfügbare C-Quelle die Aktivität und Vermehrung der Mikroorganismen entscheidend erhöht und der (Co-)Metabolismus zum Abbau der PAK angeregt. Im Verlauf der Gefäßversuche nivellierten sich durch die Bodenbehandlungen die Unterschiede bezüglich der mikrobiellen Aktivität zwischen den Bodenproben der verschiedenen Standorte immer mehr, während die Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten und die Einflüsse der Witterung in den Vordergrund traten (Kap.5.3.1). Zusätzlich liefern die organischen Substanzen bei ihrem Ab-/Umbau lösliche organische Verbindungen (DOM), die als Lösungsvermittler die Verfügbarkeit von PAK ganz entscheidend erhöhen können. In gleicher Weise wirken die von den Mikroorganismen gebildeten Biotenside. Im Gegensatz zu den Berichten anderer Autoren erwiesen sich in diesen Untersuchungen **leicht abbaubare** organische Substanzen als für eine PAK-Eliminierung am effektivsten (C/N < 20; Ackerbohnen/Senf-Stroh); eine weitere getestete organische Substanz mit einem C/N-Verhältnis von 40 (Kleegrass-Heu) erbrachte Bodenproben-abhängig signifikant niedrigere Abbauraten. Darüberhinaus verbessern leicht abbaubare organische Substanzen wie Zwischenfruchtstroh, Wiesenheu oder Grünschnitt (Rasenaufwuchs) die Bodenstruktur. Dabei können den Böden hohe Mengen dieser Substanzen zugemischt werden. Getestet wurden im vorliegenden Falle Mengen von 1,5 und 3,0 % Trockenmasse je Gewichtseinheit Boden, was ca. 585 bzw. 1170 dt/ha entspricht. Bei der Zugabe sollte möglichst gehäckseltes Material verwendet werden, das gründlich einzumischen ist. Vergrabene "Matten" und Reduktionsnester sind zu vermei-

den. Wie die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen, führen **höhere Mengen** an Zuschlagstoffen im Mittel aller Proben zu einer signifikant höheren PAK-Abnahme. Der Unterschied in den PAK-Gesamtgehalten (Σ PAK) zwischen der unbehandelten Kontrollvariante und der Versuchsvariante mit der doppelten Zugabemenge beträgt im Durchschnitt aller Meßtermine bei den verschiedenen Bodenproben lediglich 2,79 bis 13,5%. Mit der Erhöhung der Zugabemenge verminderten sich die Unterschiede zwischen den Arten an zugegebener organischer Substanz (Kap. 5.3.1). Gleichzeitig war die Wirkung dieser Zugaben bei den untersuchten Böden sehr unterschiedlich. Bei Bodenproben mit sehr hohen wie auch sehr niedrigen PAK-Abnahmen im Versuchsverlauf (Bo, Ge, Üb) war die Wirkung nur gering bzw. nicht mehr signifikant (Kap. 5.3.1 und 5.3.2).

Die möglicherweise limitierend wirkende **O₂-Versorgung** der Mikroorganismen kann durch Verwendung von **Nitrat** als Stickstoffform verbessert werden, wenn auch O₂ wahrscheinlich für den enzymatischen Angriff auf die PAK-Moleküle unverzichtbar ist (z.B. DOTT 1989). Ein gelegentliches **mechanisches Wenden des Bodens** (vierteljährlich außer im Winter) erhöht die Belüftung und sorgt gleichzeitig für eine Homogenisierung des Substrates. Die Nitratgabe ist in ihrer Höhe an die zugegebene Menge an organischer Substanz anzupassen; Verlagerungen von Nitrat in das Grundwasser können durch geteilte und termingerechte Düngergaben vermindert werden (Kap.2.2.1 und 2.2.2). Eine mögliche Beeinflussung der Grundwasserqualität durch die Düngung ist in jedem Einzelfall zu prüfen, wobei negative Effekte ausgeschlossen werden müssen. Faustzahlen zur Düngermenge können landwirtschaftlichen Publikationen entnommen werden. Auf Geoinformationssysteme (GIS) gestützte Prognosemodelle erlauben eine Abschätzung der potentiellen Nitratverlagerung. Bei den durchgeführten Gefäßversuchen wurden über 74 Wochen Mengen von umgerechnet 1000 und 2000 kg N/ha verteilt auf fünf Gaben à 200 bzw. 400 kg N/ha ausgebracht. Mit der höheren Nitratdüngung war gleichzeitig eine höhere Gabe an leicht zersetzbarer organischer Substanz verknüpft. Dabei führten die erhöhten Düngergaben - wie schon für die Wirkung der Zugaben an organischen Substanzen beschrieben (s.o.) - zu einer geringen aber signifikant höheren PAK-Abnahme im Versuchsverlauf (Kap.5.3.2).

Eine Anhebung des pH-Wertes und verbesserte Versorgung des Bodens mit Ca²⁺ durch eine **Kalkung** ist bei stark versauerten Böden mindestens bis in einen pH-Bereich um 6 erforderlich. Eine weitere Anhebung des pH-Wertes ergab zwar in den vorliegenden Untersuchungen gegenüber der unbehandelten Kontrolle (pH 3,7) eine signifikant höhere PAK-Abnahme, nicht jedoch gegenüber der Variante mit pH-Werten um 6. Eine hohe Kalkgabe mit einer starken pH-Erhöhung führt offenbar zu

einer erheblichen Veränderung des Bodenmilieus und macht eine längere Anpassungsphase der PAK-abbauenden Mikroorganismen erforderlich (Kap.5.3.4).

Zur Unterstützung der Wirkung natürlich auftretender Lösungsvermittler können den Böden **synthetische Tenside** zugegeben werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden in Vorversuchen Screening-Tests mit 20 verschiedenen Tensiden durchgeführt. Für die Gefäßversuche wurden dann vier nichtionische Tenside verwendet (Genapol UD 080, Plantaren 225, Synperonic LF/RA 30, Triton X-100). Dabei konnte festgestellt werden, daß gerade die Tenside, die PAK in Böden gut solubilisieren, eine erhöhte Hemmwirkung auf Mikroorganismen ausüben. Aufgrund der Konzentrationsabhängigkeit dieser Effekte erschien jedoch eine Aufwandmenge von 0,1% Aktivsubstanz je Gewichtseinheit Boden als praktikabel (Kap.5.3.3.1). Bei dieser Konzentration wirken drei der vier eingesetzten Tenside sogar aktivierend auf die Mikroflora (Genapol UD 080, Plantaren 225, Synperonic LF/RA 30), während Triton X-100 deutliche Hemmwirkungen zeigt (Kap.3.1.1). Bezüglich der Abnahme der PAK-Gehalte zeigten alle vier getesteten Tenside eine zwar geringe, jedoch zusätzliche, signifikant positive Wirkung über die der Mineraldünger und organischen Substanzen hinaus. Diese war bei allen PAK-Gruppen (zusammengefaßt nach der Anzahl der kondensierten Ringe) und für alle mit Tensidzugaben behandelten Bodenproben (vier von zehn) festzustellen. Dabei wiesen die vier Tenside eine unterschiedliche Wirksamkeit gegenüber den verschiedenen PAK-Gruppen auf. Bezüglich der Abnahme der 3- und 4-Ring-PAK ergab sich die Reihung: Genapol UD 080 > Synperonic LF/RA 30 > Triton X-100 > Plantaren 225, für die Abnahme der 5- und 6-Ring-Aromaten jedoch die Reihung: Triton X-100 > Genapol UD 080 > Synperonic LF/ RA 30 > Plantaren 225 (Kap.5.3.3.2). Daher erscheint eine fallbezogene Auswahl der Tenside nach dem jeweils vorliegenden Muster als sinnvoll. Prinzipiell sind nichtionische Tenside guter biologischer Abbaubarkeit wie z.B. Genapol UD 080 und Synperonic LF/RA 30 zu präferieren.

Wiederholte Zugaben an Mineraldüngern, organischen Substanzen und Tensiden sollten erfolgen, nachdem die jeweils vorangegangenen Zugaben biologisch umgesetzt worden sind. Ziel ist die nachhaltige und dauerhafte Anhebung der mikrobiellen Aktivität. Diese kann z.B. durch die eingeführten bodenmikrobiologischen Methoden der **Substrat-induzierten Respiration** (ANDERSON & DOMSCH 1978) und der Bestimmung der **Dehydrogenaseaktivität** (THALMANN 1967, 1968) gemessen werden (Kap.2.5). Da die beiden Verfahren auf methodisch unterschiedlichen Ansätzen beruhen, ist die parallele Anwendung beider Methoden zur Absicherung der Ergebnisse sinnvoll (Kap.3.1.1).

Da die z.T. hohen Mengen an zugegebenen Substanzen in den Gefäßversuchen rasch abgebaut wurden, kann die Abnahme der PAK-Gehalte durch einfache Verdünnungseffekte ausgeschlossen werden (Kap.4.1).

Falls möglich, ist eine sanierungsbegleitende **Begrünung** der belasteten Böden vorteilhaft; hierbei ist die Verwendung von Gräser/Leguminosen-Mischungen zu empfehlen. Wenn auch Pflanzen und Mikroorganismen als Nährstoffkonkurrenten agieren, so ist doch die Wirkung der Pflanzen auf einen PAK-Abbau förderlich. In der Rhizosphäre der Pflanzen ist die Aktivität der Mikroflora erhöht; Leguminosen liefern Stickstoff in mineralisierbarer Form; die Bodenstruktur wird verbessert und damit auch der Luft- und Wasserhaushalt der Böden. Die zur Begrünung verwendeten Pflanzen stellen gleichzeitig Indikatoren für phytotoxische Wirkungen der PAK und anderer Schadstoffe in den belasteten Böden dar. Durch die im Rahmen der Gefäßversuche vorgenommenen Behandlungsmaßnahmen wurde eine deutliche Reduzierung der Schadstoffeffekte erreicht. Bei einigen Bodenproben war eine Begrünung erst nach Durchführung der Bodenbehandlungsmaßnahmen möglich. Mit dem Pflanzenbewuchs wird die Bodenoberfläche stabilisiert und damit einer Abspülung und Verwehung von kontaminiertem Material vorgebeugt. Dadurch kann eine Verminderung der Verfrachtung von PAK in Stäuben sowie eine Verringerung der Einträge in Vorfluter erreicht werden (Kap.3.2). Eine Sanierung von PAK-Belastungen durch Aufnahme in Pflanzen und Abfuhr des Pflanzenmaterials ist aufgrund der sehr geringen PAK-Aufnahme nicht möglich. Dieser Aspekt war jedoch nicht Teil der vorliegenden Untersuchungen, sondern wurde bei anderen Versuchen festgestellt. Durch Einmischung des geernteten Pflanzenmaterials in die Versuchsböden wurde zudem bei der gewählten Versuchskonzeption dieser Abnahmepfad gänzlich unterbunden (Kap.4.3).

Die Anteile **physikalisch-chemischer Prozesse** an der Abnahme der PAK-Gehalte konnten mit Hilfe Quecksilber-sterilisierter Versuchsvarianten abgeschätzt werden. Sie sind je nach Kondensationsgrad der Einzelsubstanz unterschiedlich hoch. Dabei spielt die **Photooxidation** in Böden kaum eine Rolle. Bei den humantoxischen 5- und 6-Ring-Verbindungen ist eine **Ausgasung** als äußerst gering anzunehmen und läßt sich anhand der durchgeführten Versuche nicht nachweisen. Dagegen sind Ausgasungsverluste bei hohen Gehalten niederkondensierter Polycyclen (bis drei Benzolringe) möglich. Solche Verflüchtungsverluste treten dann verstärkt auf, wenn gleichzeitig eine erhöhte Belastung mit leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen vorliegt, die im Zuge einer Codestillation PAK-Moleküle mitreißen. So könnte z.B. bei der Bodenprobe Üb die BTX-, EOX- und Phenol-Belastung zu verstärkten Ausgasungsverlusten von Naphthalin, Acenaphthen, Fluoren und Phenanthren beigetragen haben. Als weitere physikalisch-chemische Prozesse können auch

Hydrolyse, Protolyse, Oxidations- und Festlegungsvorgänge zu PAK-Abnahmen führen. Insgesamt waren bei diesen Untersuchungen Verluste von maximal 78,5 mg 3-Ring-PAK je kg Boden (36,8% des Ausgangsgehaltes) innerhalb von 17 Wochen (Bodenprobe Üb) auf die Wirkung aller genannten abiotischen Prozesse zurückzuführen. Für die Abnahmen der Gehalte an 5- und 6-Ring-PAK können Festlegungsvorgänge durch nur bedingt reversible **hydrophobe Bindungen** von wesentlicher Bedeutung sein. Neben solchen Festlegungen wurden im Verlauf der Gefäßversuche auch immer wieder Mobilisierungsvorgänge höherkondensierter PAK beobachtet. So lagen die Gehalte v.a. der 6-Ring-PAK am Ende der Gefäßversuche bei einigen Bodenproben in den mikrobiell aktivierten Varianten höher als in den sterilisierten Varianten, obgleich sie gegenüber den Anfangsgehalten reduziert waren. Dabei können von dieser mikrobiellen Mobilisierung auch vorher nicht extrahierbare PAK-Fractionen erfaßt worden sein. Der Vergleich zwischen sterilisierten und mikrobiell aktivierten Proben macht insgesamt deutlich, daß die **Zeitspannen der PAK-Abnahmen** bei den 5- und 6-Ring-PAK kaum durch die Optimierung mikrobieller Bedingungen beschleunigt werden. Dagegen sind die Abnahmen der 3- und 4-Ring-PAK bei einigen mikrobiell aktivierten Proben gegenüber den sterilisierten Varianten verkürzt (sieben von zehn) (Kap.4.4).

Das Ausmaß der **Auswaschung** von PAK war selbst bei Zugabe synthetischer Lösungsvermittler und Abbildung der "worst-case-Situation" in den durchgeführten Gefäßversuchen bezogen auf die Gesamtgehalte gering, wobei allerdings erhebliche methodische Mängel bei der Sickerwassergewinnung im Rahmen des gewählten Versuchsaufbaus zu berücksichtigen sind (Kap.4.2). Der geringe Anteil der ausgewaschenen Mengen an der PAK-Abnahme in den Bodenproben ist nicht bilanzierbar (im Maximum 1,64 ‰ der PAK-Ausgangsgehalte).

Die Gehalte gelöster plus kolloid dispergierter und an Feststoffpartikeln sorbierter PAK in den Sickerwässern lagen z.T. deutlich oberhalb der Grenzwerte der TVO. Nach Abtrennung der Feststoffpartikel und Analyse der reinen Lösungsphase ergaben sich dagegen bei den gering belasteten Bodenproben DdK1, DdK2, Ge und GeA1 Konzentrationen deutlich unterhalb des TVO-Grenzwertes. Gesicherte Aussagen über die Verteilung der PAK zwischen Lösungs- und Feststoffphase für die anderen Bodenproben sind jedoch nicht möglich. Eine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch PAK-belastetes Sickerwasser nach einer mikrobiologischen Behandlung kann jedoch in vielen Fällen nicht ausgeschlossen werden.

Zur Dokumentation der Detoxifizierung der PAK in Böden wird derzeit häufig auf **Biotests** mit Organismen unterschiedlicher Trophiestufen zurückgegriffen, wobei der oft benutzte Leuchtbakterientest als nur bedingt geeignet betrachtet werden

muß. Lediglich ein Positivergebnis (Hemmung der Biolumineszenz) gibt einen Hinweis auf eine Schadstoffbelastung; ein Negativergebnis erlaubt keine zuverlässige Aussage. Die im Rahmen dieser Untersuchungen gefundenen negativen Testergebnisse standen in keinem Zusammenhang zu den abgebauten und damit bioverfügbaren PAK-Gehalten (Kap.3.1.2). Bei diesen Ergebnissen muß allerdings auf methodische Schwächen bei der Gewinnung der S4-Eluate für den Biolumineszenztest hingewiesen werden. Infolge einer starken Trübung der Eluate war zur Durchführung des Testes eine Filtration erforderlich. Durch diese wurden vermutlich Anteile gelöster PAK aus den Eluaten entzogen (Kap.2.5).

Eine gute Möglichkeit der **Abschätzung der mikrobiell abbaubaren PAK-Gehalte** bietet ein vierwöchiger Vortest im Sapromaten (PFEIFER 1995). An vier Proben der im vorliegenden Projekt untersuchten Altlastböden konnte deren potentielle Sanierbarkeit abgeschätzt werden. Die ermittelten PAK-Abnahmen wurden dem Trend nach durch die Ergebnisse der Gefäßversuche bestätigt. Die Abnahmen waren bei den Gefäßversuchen jedoch für alle PAK und Bodenproben z.T. deutlich stärker (Kap.6). Von der DECHEMA (KLEIN 1992) werden weitere Tests ähnlichen Versuchsdesigns vorgeschlagen.

Zur Zeit werden **chemische Extraktionsverfahren** erprobt, die möglicherweise mit deutlich geringerem Aufwand eine Bestimmung der potentiell abbaubaren PAK erlauben. Hierzu wird derzeit ein Auftragsprojekt des LUA NRW im Institut für Bodenkunde, Bonn bearbeitet. Ziel dieses Projektes ist es, die mikrobiell abbaubaren und pflanzenverfügbaren PAK-Fractionen mittels chemischer Extraktionsverfahren zu ermitteln.

Beispielhaft konnte gezeigt werden, daß die hier in Form der Gefäßversuche getesteten on-site-Verfahren mit technisch aufwendigeren **Reaktorsystemen** konkurrieren können. Bei einer vergleichenden Behandlung von zwei Bodenproben zum einen in den genannten Gefäßversuchen, zum anderen in einem Suspensionsreaktor mit externer Luftbegasung (Biodyn-Laboranlage; PFEIFER 1995) konnte festgestellt werden, daß die Abbauergebnisse beider Verfahren in der Tendenz vergleichbar waren. Dabei war die Abnahme der PAK-Gehalte im Verlauf der Gefäßversuche meist stärker; die dazu benötigte Behandlungsdauer war jedoch ungleich länger. Die bei den Reaktorsystemen vorgenommene **Zugabe speziell gezüchteter Mikroorganismen** zur Steigerung des PAK-Abbaus brachte in bezug auf die abgebauten PAK-Mengen und die verbleibenden Restgehalte im Vergleich zu den Gefäßversuchen keine besseren Abbauergebnisse (Kap.6).

Die aus den Ergebnissen der Gefäßversuche resultierenden Empfehlungen für die Beurteilung der Erfolgsaussichten mikrobieller Bodenbehandlungen können dem

Beurteilungsschema in Abb.27 und den daraus folgenden Hinweisen für die Sanierungsdurchführung in Abb. 28 entnommen werden.

Abb.27: Kriterien zur Beurteilung der Erfolgsaussichten des mikrobiellen PAK-Abbaus in belasteten Böden

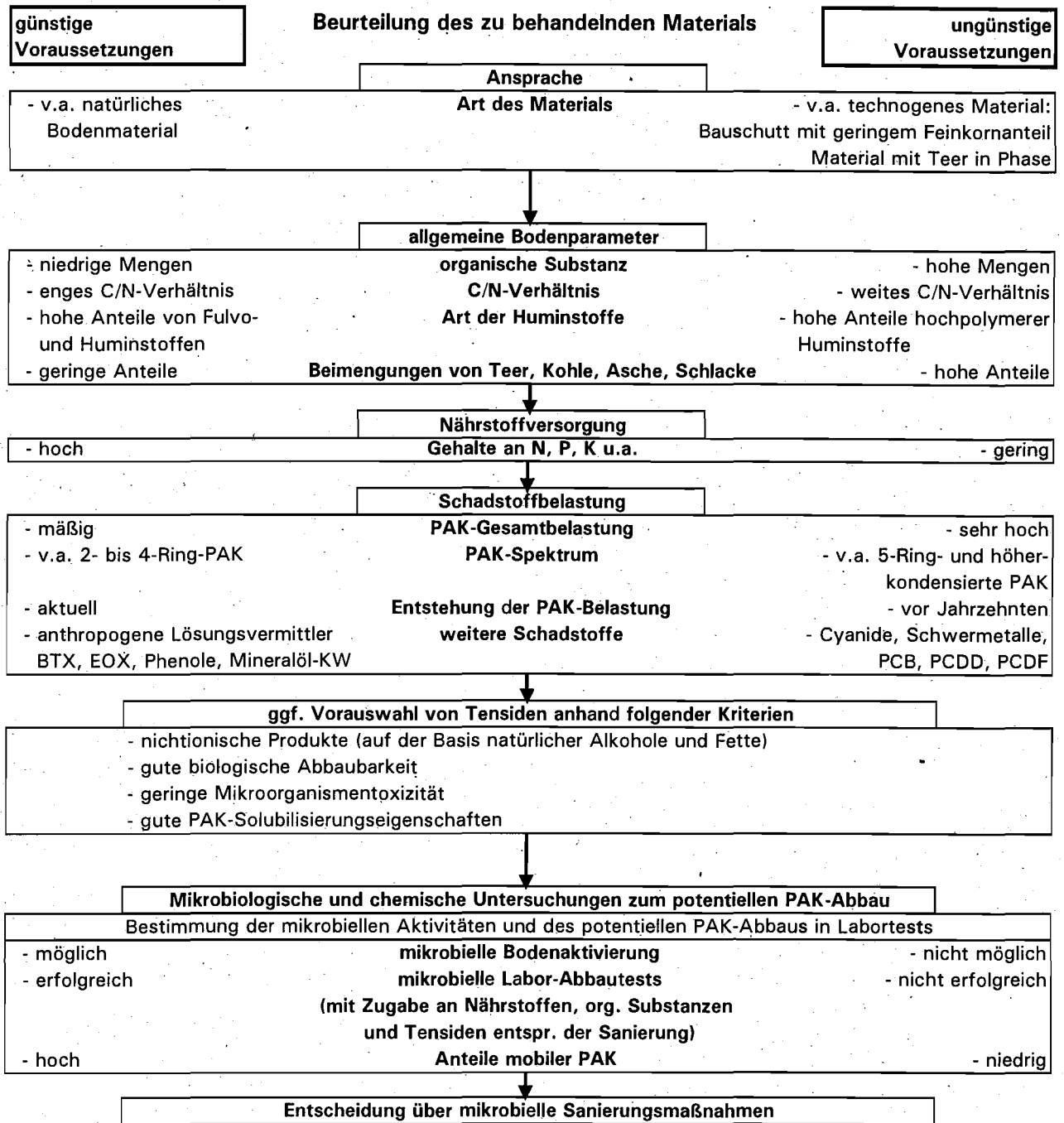
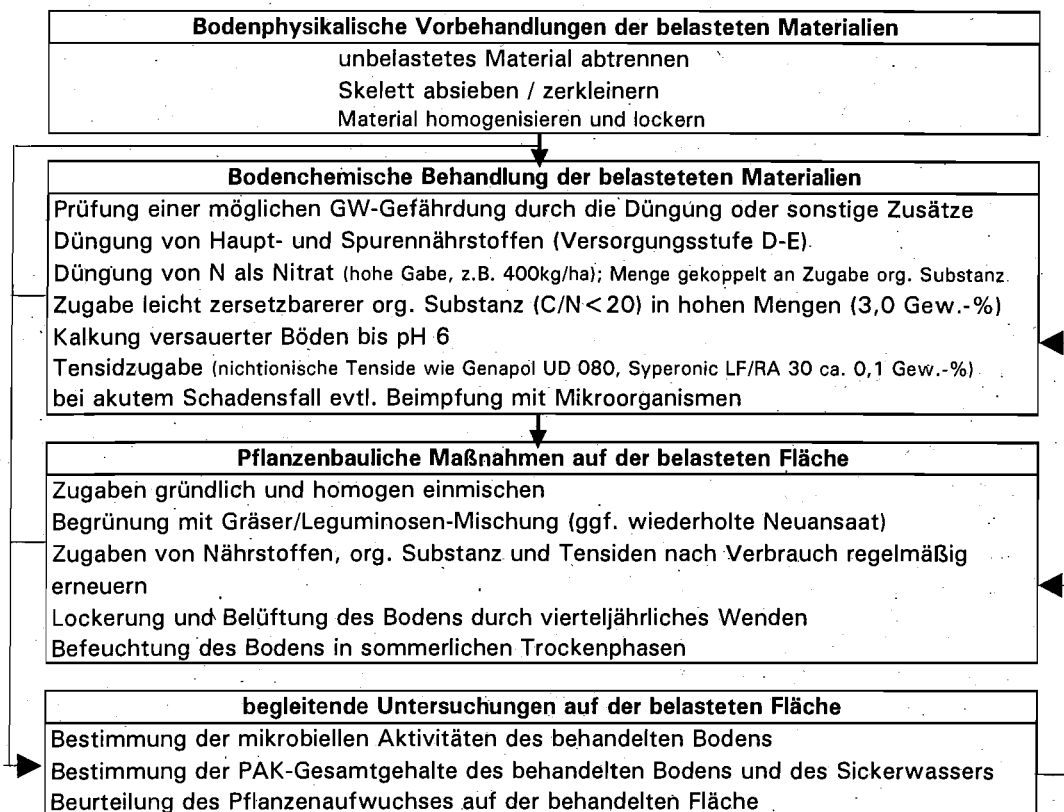


Abb.28: Empfehlungen für die Durchführung mikrobieller Bodenbehandlungen



Insgesamt machen die vorliegenden Untersuchungen deutlich, daß eine Steigerung der mikrobiell bedingten Abnahmen von PAK in bestimmtem Umfang bei geeigneten Altlastmaterialien und sonstigen Voraussetzungen durch relativ einfache Bodenbehandlungsmaßnahmen im Sinne mikrobieller on-site-Verfahren möglich ist. Relativ schnell - meist in wenigen Monaten - können damit Bodenzustände erreicht werden, die eine volle Entfaltung der Mikroorganismenaktivität und des Pflanzenwachstums gestatten. Bei geeigneten Materialien können je nach Einzelfall innerhalb von 1 ½ Jahren geringe bis erhebliche Reduzierungen der PAK-Gehalte erreicht werden. Bestimmte Bodeneigenschaften und Belastungssituationen sind dabei vorteilhaft oder auch nachteilig für einen mikrobiellen PAK-Abbau. Es kann davon ausgegangen werden, daß die von den Mikroorganismen abgebauten Anteile vor allem die mobilen und für die Pfade "Boden-Wasser" und "Boden-Pflanze" relevanten PAK-Fractionen betreffen. Inwieweit von den Restbelastungen noch eine Beeinträchtigung des Wirkungspfades Grundwasser

ausgeht, kann nach den vorliegenden Ergebnissen nicht abschließend beurteilt werden. Mit der Behandlung wurde eine Verbesserung der Böden als Pflanzenstandort erreicht.

Falls bestimmte Gesamtgehalte als Restgehalte gefordert sind (z.B. Z1 oder Z2-Werte der „Technischen Regeln - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen -“ (LAGA, 1994)), werden allerdings boden- und belastungsabhängig mikrobielle Bodenbehandlungen diese Sanierungsziele in der Regel nicht oder nicht in vertretbaren Zeiträumen erreichen. Eine mikrobielle Sanierung wird daher bei den in Altlastfällen häufig ungünstigen Sanierungsvoraussetzungen (Abb.27), eingeschränkten Zeitvorgaben und niedrigen geforderten Rest-Gesamtgehalten nicht zum gewünschten Erfolg führen. Die dargelegten Ergebnisse zeigen, daß demnach die Anwendungsmöglichkeiten biologischer on-site-Verfahren zur Sanierung von PAK-Altlasten - im Sinne eines Erreichens bestimmter Gesamtgehalte - begrenzt sind. Eine Prognose, welche Gesamtgehalte an PAK nach einer bestimmten Zeitdauer mikrobiologischer Behandlungsmaßnahmen in Altlastböden verbleiben, ist nicht möglich.

Erst wenn Verfahren zur Bestimmung der mobilen und mobilisierbaren Anteile anstelle der Gesamtgehalte für eine Gefahrenbeurteilung der verschiedenen Wirkungspfade eingeführt sind, kann sich eine neue und andere Beurteilung der Eignung der mikrobiologischen Bodenbehandlung ergeben.

8. ZUSAMMENFASSUNG

PAK sind prinzipiell mikrobiologisch abbaubar. Mikrobiologische Sanierungsmethoden zeichnen sich insbesondere als bodenschonend sowie durch eine verfahrenstechnisch einfache Durchführung aus. Da jedoch Maßnahmen zur mikrobiellen Sanierung PAK-kontaminierter Altlastböden in der Praxis häufig nicht den gewünschten Erfolg erzielten, führte das Institut für Bodenkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn im Auftrag des Landesumweltamtes NRW Gefäßversuche zum mikrobiellen Abbau von PAK in belasteten Böden unter Freilandbedingungen über 74 Wochen durch. Dabei wurden verschiedene Möglichkeiten der Optimierung des mikrobiellen PAK-Abbaus getestet, die ermittelten Abnahmen der PAK-Gehalte bestimmten Prozessen zugeordnet und die Ursachen für die Grenzen des PAK-Abbaus untersucht. Bestimmt wurden 15 der 16 PAK nach der US-EPA-Liste (1979; ohne Acenaphthylen).

Zehn Altlastbodenproben unterschiedlichen Stoffbestandes und divergierender PAK-Belastung wurden im Sinne von mikrobiologischen on-site-Verfahren (Landfarming- und Bodenmietentechniken) in verschiedenen Behandlungsvarianten gut abbaubare organische Substanzen, mineralische Düngemittel, Tenside als Lösungsvermittler und teilweise Kalk zugemischt. In Vortests wurde die Eignung von 20 synthetischen Tensiden bezüglich ihrer PAK-Solubilisierungseigenschaften, Mikroorganismtoxizität und Handhabbarkeit im Labor geprüft, von denen vier nichtionische Produkte (Genapol UD 080, Plantaren 225, Synperonic LF/RA 30 und Triton X-100) für die Abbauversuche ausgewählt wurden. Insgesamt wurden von den zehn Bodenproben mit ihren unterschiedlichen Behandlungsvarianten 90 Versuchsgefäße angesetzt, die in 3 - 16-wöchigen Abständen untersucht wurden. Zusätzlich wurden von den zehn Bodenproben HgCl₂-sterilisierte Kontrollvarianten ohne weitere Zugaben angesetzt, um zwischen biotischen und abiotischen Prozessen des PAK-Abbaus unterscheiden zu können.

In Abhängigkeit von den verschiedenen Zugaben konnte die teilweise sehr geringe mikrobielle Aktivität in den Bodenproben wesentlich und nachhaltig gesteigert werden. Damit wurde gleichzeitig das (co-)metabolische Abbaupotential der Mikroorganismen entscheidend erhöht. Durch die Behandlungsmaßnahmen wurde eine ganz wesentliche Minderung der Schadstofftoxizität gegenüber Bodenmikroorganismen und den angebauten Pflanzen erzielt. Die Tensid-Zugaben von 0,1 Gewichtsprozent führten in den Gefäßversuchen zumeist zu einer Steigerung der mikrobiellen Aktivität. In Vorversuchen waren höhere Applikationsmengen in den meisten Fällen für die Mikroorganismen toxisch. Zur Charakterisierung der mikrobiellen Aktivitäten erwies sich die kombinierte Bestimmung der Dehydrogenase-

aktivität und der Substrat-induzierten Respiration als gut geeignet. Der exemplarisch an Bodenproben unterschiedlicher PAK-Ausgangsgehalte und -Abnahmeraten durchgeführte Leuchtbakterientest lieferte keine aussagefähigen Ergebnisse, wobei allerdings methodische Mängel bei der Versuchsdurchführung (Filtration trüber Eluate) zu berücksichtigen sind.

Infolge der hohen mikrobiellen Umsatzleistungen wurde bei den zehn Bodenproben und ihren unterschiedlichen Behandlungsvarianten insgesamt eine Abnahme der PAK-Gehalte um 6,8 bis zu 560 mg/kg Boden bzw. um 4,6 bis zu 90,9% der Ausgangsgehalte erzielt (im Mittel der Varianten der einzelnen Bodenproben um 11,7 - 90,1%). Die Reduzierung betrug im Mittel im Verlauf des Behandlungszeitraumes bei den

- 2-Ring PAK: 82,2%
- 3-Ring PAK: 24,2%
- 4-Ring PAK: 32,5%
- 5-Ring PAK: 20,4%
- 6-Ring PAK: 18,0%.

Die Schwankungsbreite der PAK-Restgehalte betrug bei allen zehn Bodenproben und ihren Behandlungsvarianten 24,9 - 1085mg PAK/kg Boden (0,588 - 88,3mg Benzo[a]pyren/kg Boden). Dabei erreichten bzw. unterschritten nur zwei der zehn untersuchten Bodenproben mit einigen Behandlungsvarianten Restgehalte von 30 mg/kg Boden (Summe von 15 PAK). Diese Bodenproben enthielten im Mittel der Varianten noch 2,73 (Probe Üb) und 0,67 (Probe Heb) mg Benzo[a]pyren/kg Boden. Die für einen Wiedereinbau behandelter Böden empfohlenen Orientierungswerte der Technischen Regeln der LAGA (LAGA, 1994) wurden nicht erreicht. Aus dem Verlauf der Abbaukurven ist jedoch abzuleiten, daß über den Versuchszeitraum hinaus bei einigen Proben mit einer weiteren PAK-Abnahme gerechnet werden kann.

Die festgestellten PAK-Abnahmen sind mit Ausnahme von Naphthalin und Acenaphthen (z.T. Verflüchtigung) in erster Linie auf mikrobiellen Abbau zurückzuführen; Effekte wie Verdünnung durch die Zugaben und Entzug durch Pflanzen sind zu vernachlässigen bzw. durch den Versuchsaufbau ausgeschlossen. Durch die Analyse von Sickerwasserproben konnte dargestellt werden, daß der Anteil der Auswaschung an der PAK-Abnahme nicht bilanzierbar gering ist. Exemplarisch wurde gezeigt, daß die meßbaren PAK-Gehalte in den Wässern überwiegend auf einen Austrag von Feststoffen zurückzuführen sind, die methodisch bedingt mit den Perkolaten aus den Versuchsgefäßen ausgewaschen wurden. Die Gehalte gelöster und kolloid suspendierter PAK sowie an Feststoffen sorbierter PAK in den Sickerwässern können z.T. deutlich oberhalb der Grenzwerte der

Trinkwasserverordnung (TVO) liegen. Es ist in diesem Zusammenhang zu beachten, daß bei einer Reihe von Untersuchungsvarianten die Zugabe von organischem Material und insbesondere von Tensiden erhöhte Austräge von PAK mit dem Sickerwasser verursacht hat. In anderen Fällen lagen dagegen die Austräge in der unbehandelten Kontrollvariante über dem Durchschnitt oder waren sogar am höchsten.

Neben dem mikrobiellen Abbau kann bei den 2- und 3-Ring-Aromaten die Gehaltsabnahme insbesondere zu Beginn der Gefäßversuche teilweise auf Verflüchtigung beruhen, während für höherkondensierte Verbindungen eher die Oxidation, Hydrolyse und Festlegung (Bildung gebundener Rückstände) als abiotische Prozesse von Bedeutung sind. Bei den untersuchten Bodenproben dürfte durch diese physikalisch-chemischen Prozesse mit Ausnahme der 2-Ring PAK nur ein relativ geringer Anteil der PAK-Ausgangsgelalte von ca. $\leq 10\%$ eliminiert worden sein.

Wesentlich trägt hingegen neben dem Abbau der mikrobielle Einbau in Huminstoffe zur Abnahme vor allem der höherkondensierten PAK bei; das Ausmaß dieses Prozesses kann jedoch nicht quantifiziert werden. Auch ist eine Abschätzung der Anteile des unter Auflösung der PAK-Struktur stattfindenden (irreversiblen) Einbaus einerseits und der Bildung wieder remobilisierbarer "bound residues" andererseits nicht möglich.

Zwar werden PAK vor allem von der organischen Substanz des Bodens bzw. von organischen Partikeln technogener Beimengungen (z.B. Kohlepartikel) gebunden, signifikante Korrelationen zwischen deren Gehalten und den Gehalten oder Abnahmen der PAK ergeben sich indes nicht. Ein Trend weist jedoch auf einen negativen Zusammenhang zwischen diesen Parametern hin; offenbar ist weniger die Quantität als die Qualität dieser Austauschere entscheidend, so daß die üblicherweise durchgeführte Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs gerade in den technogen überprägten Altlastböden mit meist sehr heterogenem Stoffbestand eine zu ungenaue Information liefert. Auch zwischen weiteren Bodenparametern (pedogene Oxide, KAK, Textur) und den PAK-Gehalten bzw. abgebauten Mengen ergeben sich keine Beziehungen. Jedoch wies, im Widerspruch zu Angaben aus der Literatur, gerade die Bodenprobe mit dem höchsten Tongehalt die stärkste PAK-Abnahme auf.

Über die Bodeneigenschaften hinaus beeinflussen ganz wesentlich der PAK-Gesamtgehalt und das vorliegende PAK-Muster das Sanierungsergebnis. Höhere Gesamtgelalte bedingen relativ größere PAK-Abnahmen; die zu Versuchsende vorhandenen Restgelalte liegen in hoch belasteten Proben dennoch in der Regel höher als in gering belasteten. Niederkondensierte PAK unterliegen einem rascheren und vollständigeren Abbau, der sich durch gängige Abbaufunktionen anpassen

läßt. Die für die Fluoranthen-Abnahme ermittelten DT_{50} -Werte (Zeitraum bis zum Erreichen des halben Ausgangsgehaltes) betragen 10 (Probe Üb) und 72 Wochen (Probe Ac). Die Gehalte der höherkondensierten PAK (\geq fünf kondensierte Ringe) nehmen dagegen wesentlich langsamer ab. Die Anpassung durch Abbaufunktionen ist unbefriedigend; die DT_{50} -Werte liegen im Bereich von mehreren Jahren bis Jahrzehnten. Durch periodisch wechselnde Ad- und Desorptionsprozesse sowie damit verbundene Mobilisierungs- und Festlegungsvorgänge durch Bildung von "bound residues" weisen die Gehalte an höherkondensierten PAK starke Schwankungen im Versuchsverlauf auf. Dafür sind insbesondere Lösungsvermittler pedogenen, biogenen und technogenen Ursprungs verantwortlich, die zwischenzeitlich eine PAK-Mobilisierung über die Ausgangsgehalte oder die Gehalte in sterilisierten Kontrollproben hinaus bewirken können.

Durch Zugaben an organischen Substanzen, Mineraldüngern und Tensiden kann der mikrobielle Abbau insbesondere der niederkondensierten PAK gesteigert werden. Zwar sind die Effekte teilweise nur gering und die erzielten Ergebnisse nicht in allen Fällen signifikant, doch zeigt sich deutlich, daß gerade die Zugabe leicht abbaubarer organischer Substanz (3%; C/N < 20) die PAK-Abnahme am deutlichsten erhöht. Dabei ist eine ausreichende Belüftung der Böden durch regelmäßiges Wenden sicherzustellen; mit der Verwendung von Nitrat als Stickstoffdünger wird den Mikroorganismen eine weitere Sauerstoffquelle geliefert. Durch die zusätzliche Applikation von synthetischen Tensiden (0,1% Aktivsubstanz) zu einigen Altlastproben wird die Elimination der Polycyclen weiter gesteigert.

Die Anhebung des pH-Wertes ist bei bauschutthaltigen Altlastböden in der Regel nicht notwendig. Am Beispiel einer stark sauren Bodenprobe (pH 3,7) zeigte sich die höchste PAK-Abnahme bei pH-Werten um 6. Höhere pH-Werte (6,5; 7,1) führten gegenüber der Kontrolle zwar zu einer signifikanten Steigerung der PAK-Abnahme, ergaben aber etwas niedrigere Abnahmeraten als bei einer Bodenreaktion um pH 6.

Zusammenfassend erlauben die Ergebnisse der Gefäßversuche die Aufstellung von Kriterien zur Beurteilung der Erfolgsaussichten des mikrobiellen PAK-Abbaus in belasteten Böden und zur Vorgehensweise bei der Durchführung von Bodenbehandlungsmaßnahmen zum mikrobiellen PAK-Abbau der Böden (Abb. 27 und 28).

Insgesamt zeigen die erhaltenen Ergebnisse, daß bei geeigneten Altlastmaterialien und entsprechenden Voraussetzungen durch die dargestellten Bodenbehandlungen im Sinne mikrobieller on-site-Verfahren (ex-situ und in-situ) eine Erhöhung der mikrobiell bedingten PAK-Abnahmen in begrenztem Maße möglich ist. Dies bedeutet eine Verringerung des Gefährdungspotentials, was

anhand der Reduzierung der Bodentoxizität gegenüber Mikroorganismen und den angebauten Pflanzen belegt werden konnte. Dabei ist davon auszugehen, daß die von den Mikroorganismen abgebauten Anteile vor allem die mobilen und für die Pfade "Boden-Wasser" und "Boden-Pflanze" relevanten PAK-Fractionen betreffen.

Die Bewertung der z.T. erheblichen PAK-Restgehalte in den Bodenproben bleibt dennoch problematisch. Für die freie bzw. eingeschränkte Verwertung off-site behandelter Altlastböden gelten in Deutschland als orientierende Qualitätsstandards die Werte der Technischen Regeln der LAGA (LAGA, 1994).

Eine Verminderung der PAK-Gesamtgehalte belasteter Böden auf die von der LAGA empfohlenen niedrigen Gehalte (Z1 bzw. Z2-Werte, max. 20 mg/kg Σ EPA-PAK) ist aber durch die dargestellten mikrobiellen Verfahren innerhalb von ein bis zwei Jahren nicht erreichbar und wird, wie gezeigt, überhaupt nur bei wenigen belasteten Materialien unter bestimmten Randbedingungen gelingen.

Erst wenn Verfahren zur Bestimmung der mobilen und mobilisierbaren Anteile anstelle der Gesamtgehalte für eine Gefahrenbeurteilung der verschiedenen Wirkungspfade eingeführt sind, kann sich eine neue und andere Beurteilung der Eignung der mikrobiologischen Bodenbehandlung ergeben.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- AL-BASHIR, B., CSEH, T., LEDUC, R. & SAMSON, R. (1990): Effect of soil/contaminant interactions on the biodegradation of naphthalene in flooded soil under denitrifying conditions.- *Appl.Microbiol. Biotechnol.*, 34, 414-419.
- ALEF, K. (1993): Bestimmung mikrobieller Biomasse im Boden: Eine kritische Betrachtung.- *Z. Pflanzenernähr.Bodenk.*, 156, 109- 114.
- ALEF, K. (1994): *Biologische Bodensanierung*.- 269 S.; VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- ANDERSON, J.P.E. & DOMSCH, K.H. (1978): A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils.- *Soil Biol.Biochem.*, 10, 215-221.
- BERRY, D.F. & BOYD, S.A. (1985): Decontamination of soil through enhanced formation of bound residues.- *Environ.Sci.Technol.*, 19, 1132-1133.
- BEWLEY, R.J.F. & THEILE, P. (1988): Decontamination of a coal gasification site through application of vanguard microorganisms.- In: WOLF, K., VAN DEN BRINK, W.J. & COLON, F.J.: *Contaminated Soil '88*, 739-743; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- BEYER, M. (1991): Altlasten biologisch sanieren.- *Umwelt*, 21/1/2, 40-45.
- BEYER, M. & KLEIN, J. (1989): Mikrobiologischer Abbau von Teeröl- Aromaten.- *BTF.Biotech-Forum*, 6/4, 254-260.
- BEYER, M., VAN AFFERDEN, M. & KLEIN, J. (1991): Möglichkeiten und Grenzen des mikrobiellen PAK-Abbaus in kontaminierten Böden und Konsequenzen für die Praxis der mikrobiologischen Boden-sanierung.- 15. Mülltechnisches Seminar, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, TU München, 108, 99-114.
- BIRNSTINGL, J., WILD, S.R., JONES, K.C. (1990): Steigerung des biologischen Abbaus polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe im Boden.- In: ARENDT, F.: *Altlastensanierung '90*, 579-582; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- BLUME, H.-P. (Hrsg.)(1992): *Handbuch des Bodenschutzes*.- 2.Aufl., 794 S.; ecomed Verlagsgesellsch. mbH, Landsberg/Lech.
- BOCK, H. & MAHMUTOGLU, I. (1992): Biologische Sanierung PAK kontaminierten Bodens im Pilotversuch mit der bakteriellen Mischkultur Mikro-Bak® KW 03.- In: *Zenit: Erfahrungen mit neuen Konzepten zur biologischen Bodensanierung; Seminarveranst. 12.05.92, Mülheim a.d. Ruhr*, 7.1-7.
- BOLLAG, J.-M. (1992): Decontamination of soil with enzymes.- *Environ.Sci.Technol.*, 26, 1876-1881.
- BOLLAG, J.-M. & LOLL, M.J. (1983): Incorporation of xenobiotics into soil humus.- *Experientia*, 39, 1221-1231.
- BOLLAG, J.-M. & MYERS, C. (1992): Detoxification of aquatic and terrestrial sites through binding of pollutants to humic substances.- *Sci.Tot.Envir.*, 117/118, 357-366.
- BRYNIOK, D. (1991): Möglichkeiten und Grenzen biologischer Methoden.- In: *Altlastensanierung - Grundsatzfragen, Gefahrenbeurteilung, Techniken*.- 243. FGU-Seminar, 04.- 05.11.1991, Schwerin, 237-249.

- BUEREN, H. & GROßMANN, H. (1971): Grenzflächenaktive Substanzen.- Chemische Taschenbücher, 14; Verlag Chemie, Weinheim/Bergstraße.
- BULLOCK, P. & GREGORY, P.J. (1991): Soils in the urban environment.- 174 S.; Blackwell Scientific Publications, Oxford u.a.
- BURGHARDT, W. (1989): Bodenbeschaffenheit und Pflanzennährstoffgehalte der Bodenvarianten des Begrünungsversuches Bergehalde Waltrop.- Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 58, 219-225.
- CERNIGLIA, C.E. (1984): Microbial metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons.- Adv.Appl.Microbiol., 30, 31-71.
- CHIOU, C.T., MALCOLM, R.I., BRINTON, T.I. & KILE, D.E. (1986): Water solubility enhancement of some organic pollutants and pesticides by dissolved humic and fulvic acids.- Environ.Sci. Technol., 20, 502-508.
- CRÖßMANN, G. (1992): Untersuchungen zum Transfer ausgewählter PAK bei gärtnerischen und landwirtschaftlichen Nutzpflanzen.- In: LÖLF NRW (Hrsg.): Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten - Beurteilung von PCB und PAK in Kulturböden, 7, 133-146.
- DANZER, J., TOTSCHKE, K.U. & KÖGEL-KNABNER, I. (1993): Cotransport polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) und gelöster organischer Substanz (DOM) in Laborbodensäulen.- Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 72/1, 81-84.
- DEBUS, R. & HUND, K. (1994): Korrelation aquatischer und terrestrischer Ökotoxizitätstests mit terrestrischen Untersuchungen.- In: Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie (Hrsg.): Tätigkeitsbericht 1994, 84-90, Schmallenberg.
- DE KREUK, J.F.D. & ANNOKKÉE, G.J. (1988): Applied biotechnology for decontamination of polluted soils. Possibilities and problems.- In: WOLF, K., VAN DEN BRINK, W.J. & COLON, F. J.: Contaminated Soil '88, 679-685; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- DOMSCH, K.-H. (1985): Funktionen und Belastbarkeit des Bodens aus der Sicht der Bodenmikrobiologie: Materialien zur Umweltforschung.- Rat der Sachverständigen für Umweltfragen (Hrsg.), 13, Verlag Kohlhammer, Stuttgart & Mainz.
- DÖRR, R. (1970): Die Aufnahme von 3,4-Benzopyren durch Pflanzenwurzeln.- Landwirtsch. Forschung, 23, 371-379.
- DOTT, W. (1989): Sanierung von Altlasten im Boden- und im Grundwasserbereich - Grenzen und Möglichkeiten mikrobiologischer Verfahren.- Forum Städte-Hygiene, 40, 326-332.
- EDWARDS, N.T. (1983): Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) in the terrestrial environment - a review.- J.Environ.Qual., 12, 427-441.
- ELSNER, D.-C. (1994): Einflüsse von Bodenbearbeitung und Düngung auf die Mikroorganismen und ihre Leistungen typischer Ackerböden einer norddeutschen Moränenlandschaft.- 107 S.; Diss. Univ. Kiel.
- ENFIELD, C.G. & BENGTTSSON, G. (1988): Macromolecular transport of hydrophobic contaminants in aqueous environments.- Ground Water, 26/1, 64-70.
- ESCHENBACH, A., GEHLEN, P. & BIERL, R. (1991): Untersuchungen zum Einfluß von Fluoranthren und Benzo(a)pyren auf Bodenmikroorganismen und zum mikrobiellen Abbau dieser Substanzen.- Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 63, 91- 94.

- FELIX-HENNINGSSEN, P., WILBERS, A. & CRÖßMANN, G. (1993): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) in den Böden der Rieselfelder der Stadt Münster (Westfalen).- Z.Pflanzenernähr.Bodenk., 156, 115-121.
- FILIP, Z. (1990): Biologische Verfahren.- In: WEBER, H.H.: Altlasten: Erkennen, Bewerten, Sanieren, 301-308; Springer-Verlag, Berlin.
- FRANZIUS, V. (1993): Altlasten-Situation in Deutschland.- In: Ges. für Umweltkompatible Prozeßtechnik mbH: 2. Euroforum Altlasten, am 30.11.-02.12.1993, Saarbrücken, 1, 83-98.
- FREHSE, H. & THIER, H.P. (1991): Die Ermittlung der Nachweisgrenze und Bestimmungsgrenze.- GIT Fachz.Lab., 35/4, 285-291.
- GAUTHIER, T.M., SEITZ, W.R. & GRANT, C.L. (1987): Effects of structural and compositional variations of dissolved humic materials on pyrene Koc values.- Environ.Sci.Technol., 21/3, 243-248.
- GERLICH, W., MARTIN, G. & PANNING, H. (1991): Aufschlußverfahren für die PAH-Bestimmung in Trink- und Grundwasser.- LaborPraxis, 11, 942-944.
- GOHLKE, F.J., LAUX, K. & TÄUBER, G. (1986): Konstitution und Eigenschaften von Tensiden.- In: WINNACKER, KÜCHLER: Chemische Technologie - organische Technologie III, 7, 4.Aufl., 89-99; Carl Hauser Verlag, München, Wien.
- GRATHWOHL, P., GEWALD, T., PYKA, W. & SCHÜTH, C. (1993): Untersuchungen zur Bestimmung der Schadstofffreisetzungsraten aus kontaminiertem Aquifermaterial.- In: ARENDT, F., ANNOKKÉE, G.I., BOSMAN, R. & VAN DEN VAN DEN BRINK, W.J. (Hrsg.): Altlastensanierung '93, 173-182; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- GRØN, C., TØRSLØV, J., ALBRÉCHTSEN, H.-J. & MØLLER-JENSEN, H. (1992): Biodegradability of dissolved organic carbon in groundwater from an unconfined aquifer.- Sci.Tot.Envir., 117/118, 241-251.
- GUERIN, W.F. & JONES, G.E. (1988): Mineralization of phenanthrene by a Mycobacterium sp.- Appl.Environ.Microbiol., 54/4, 937-944.
- HAIDER, K. & MARTIN, J.P. (1988): Mineralization of ¹⁴C-labelled humic acids and of humic-acid bound xenobiotics by Phanerochaete chrysosporium.- Soil Biol.Biochem., 20, 425-429.
- HAMAKER, J.W. (1972): Decomposition: Quantitative aspects.- In: GORING, C.A.I. & HAMAKER, J.W. (Hrsg.): Organic chemicals in the soil environment, 1, 49-143; Verlag Dekker, New York.
- HAMBSCH, B., PELOUIN, C. & WERNER, P. (1990): Der Leuchtbakterienhemmtest als bewertender Summenparameter für raffineriespezifische Schadstoffe.- Vom Wasser, 74, 65-74.
- HANCE, R.J. & FÜHR, F. (1994): Abbau/Mineralisierung, Sorption und Bindung.- In: DFG (Hrsg.): Ökotoxikologie von Pflanzenschutzmitteln; Sachstandsbericht, Mitteilung 1, 53-63; VCH Verlagsgesellsch. mbH, Weinheim.
- HAUMAIER, L. (1993): Elementarer Kohlenstoff - Quelle hocharomatischer Huminstoffe?- Mitteilgn. Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 71, 225-228.
- HEIDE, G. & WERNER, H. (1989): Kokerei Consolidation in Gelsenkirchen-Schalcke - Sanierung stark kontaminierter Böden auf einem ehemaligen Industriegelände.- Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl. Gesellsch., 58, 253-258.

- HENKE, G.A. (1992): Biologische Bodensanierung.- Chemie-Umwelt-Technik, 94-97.
- HERSEMANN, H. (1991): Einfluß von organischer Düngung und Fruchtfolge auf Umsatz und Eigenschaften der organischen Bodensubstanz.- Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 66/2, 657-660.
- HILLER, D.A. (1992): Einfluß chemischer und physikalischer Bodeneigenschaften auf die biologische Sanierbarkeit bei PAK-Belastung.- In: Zenit: Erfahrungen mit neuen Konzepten zur biologischen Bodensanierung; Seminarveranst. 12.05.92, Mülheim a.d. Ruhr, 3.1-8.
- HOSLER, K.R., BULMAN, T.L. & FOWLIE, P.J.A. (1988): The fate of naphthalene, anthracene and benzo(a)pyrene in soil taken from a refinery waste treatment site.- In: WOLF, K., VAN DEN BRINK, W.J. & COLON, F.J.: Contaminated Soil '88, 117-120; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- HUND, K., FLIEDNER, A., SCHENK, B., TRAUNSPURGER, W., JACOB, R. & SCHULZ-BERENDT, V. (1992): Ecotoxicological assessment of a decontamination method for a PAH contaminated site.- In: DECHEMA, VAAM, EFB: Preprints of International Symposium of soil decontamination using biological processes, Karlsruhe, 06.-09.12.92; 176-183, DECHEMA, Frankfurt/M.
- HURTIG, H.-W., KNACKER, T., SCHALLNASS, H. & ARENDT, G. (1988): In-situ mobilisation of residual oil in contaminated soil - development of a method for selecting oil-mobilising surfactants.- In: WOLF, K., VAN DEN BRINK, W.J. & COLON, F.J.: Contaminated Soil '88, 921-927; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- JONES, K.C., STRATFORD, J.A., WATERHOUSE, K.S., FURLONG, E.T., GIGER, W., HITES, R.A., SCHAFFNER, C. & JOHNSTON, A.E. (1989): Increases in the polynuclear aromatic hydrocarbon content of an agricultural soil over the last century.- Environ.Sci.Technol., 23/1, 95-101.
- KÄSTNER, M., MAHRO, B. & WIENBERG, R. (1992a): Biologischer Schadstoffabbau in kontaminierten Böden unter besonderer Berücksichtigung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe.- In: STEGMANN, R. (Hrsg.): Hamburger Berichte, 5, Abfallwirtschaft, TUHH, 180 S.; Economica Verlag, Bonn.
- KÄSTNER, M., SCHAEFER, G., BREUER, M. & MAHRO, B. (1992b): Microbial degradation of PAH in soil - mineralization, biotransformation and formation of bound residues.- In: DECHEMA, VAAM, EFB: Preprints of International Symposium of soil decontamination using biological processes, 06.-09.12.92; 281-283.
- KLEIN, J. (Hrsg.) (1992): Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung. 2. Bericht des interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie - Boden"; ad-hoc-Arbeitsgruppe "Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung".- DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz, 44 S.; Frankfurt/M.
- KLOSTER, G., NIEHAUS, R., MÜLLER, K., BÜKER, I. & DÜRBECK H.W. (1994): Verbleib von atmosphärisch eingetragenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen.- In: AGF: Fremdstoffe in Böden; Tagung der AGF am 12.12.1994, Bonn Bad-Godesberg, 26-27; Theneé-Druck, Bonn.
- KOCH, O.G. & KOCH-DEDIÇ, G.A. (1974): Handbuch der Spurenanalyse.- 2.Aufl., 1232 S.; Springer-Verlag, Berlin u.a.
- KÖGEL-KNABNER, I., KNABNER, P. & DESCHAUER, H. (1990): Verstärkte Auswaschung organischer Umweltchemikalien durch Bindung an gelösten Kohlenstoff?.- In: ARENDT, F.: Altlastensanierung '90, 379-385; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- KRAATZ, M. (1995): Mündliche Mitteilung am 29.06.95.
- KRAATZ, M. & SCHRÖDER, D. (1993): Bodenmikrobiologische und humuschemische Untersuchungen während der mikrobiologischen on-site-Sanierung eines PAH-belasteten Substrates.- Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 72/1, 575-578.

KRAATZ, M., SCHUMACHER, B., EMMERLING, C. & SCHRÖDER, D. (1993): Bodenbiologische und humuschemische Untersuchungen während der mikrobiologischen on-site-Sanierung eines PAK-belasteten Substrates. - In: GES. FÜR UMWELTKOMPATIBLE PROZESSTECHNIK MBH: 2. Euroforum Altlasten, am 30.11.-02.12.1993, Saarbrücken, 1, 257-270.

KRUMNÖHLER, J. (1990): Quantitative Erfassung von PAKs in unterschiedlich belasteten Böden unter Berücksichtigung der Möglichkeiten und Grenzen der HPLC mit Fluoreszenzdetektion.- Dipl.-Arbeit, 96 S., Inst.f.Bodenk.; Bonn.

KUTZNER, H.J. (1989): Vorversuche über den Einfluß von Konsan auf das Wachstum von Mikroorganismen und die Keimung von Pflanzensamen.- 31 S.; Inst.f.Mikrobiologie TH Darmstadt, Darmstadt.

LaFLEUR, K.S. (1980): Loss of pesticides from Congaree sandy loam with time: characterization.- Soil Sci., 130, 83-87.

LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall; Hrsg.)(1994): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. Technische Regeln.- Bund-/Länder-AG "Vereinheitlichung der Untersuchung und Bewertung von Reststoffen", 01.03.1994, 58 S.

LAHA, S. & LUTHY, R.G. (1991): Inhibition of Phenanthrene mineralization by nonionic surfactants in soil-water systems.- Environ.Sci.Technol., 25/11, 1920-1930.

LANDRUM, P.F., NIHART, S.R., EADLE, B.J. & GARDNER, W.S. (1984): Reverse-phase separation method for determining pollutant binding to Aldrich humic acid and dissolved organic carbon of natural waters.- Environ.Sci.Technol., 18/3, 187-192.

LANGE, H. (1982): Tenside: Chemie und physikalische Grundlagen ihrer Anwendungsgebiete.- Vorlesungsscriptum Teil I & II, 219 S., Dt. Wollforschungsinstitut, TH-Aachen.

LÄTSCH, A. & SCHWEDT, G. (1992): Leuchtbakterientest zum Schwermetall-Screening.- TerraTech, 1, 18-19.

LfU BW (Hrsg.) (1991): Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung. - Materialien zur Altlastensanierung, 7, 233 S.

LITZ, N. & BLUME, H.-P. (1989): Verhalten organischer Chemikalien in Böden und dessen Abschätzung nach einer Kontamination.- Z.f.Kulturtechnik und Landentwicklung, 30, 335-364.

LÖLF NRW (Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen; Hrsg.)(1988): Mindestuntersuchungsprogramm Kulturboden.- Düsseldorf.

LOTTER, S., STEGMANN, R. & HEERENKLAGE, J. (1990): Grundlegende Untersuchungen zur Optimierung der biologischen Reinigung ölkontaminierter Böden.- In: ARENDT, F.: Altlastensanierung '90, 1071-1078; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.

LUA NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen; Hrsg.)(1994): Bestimmung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Bodenproben.- Merkblätter, 1, 21 S., Essen.

LUND, N.-C. & GUDEHUS, G. (1990): Laborversuche an ungestörten Grossproben zur biologischen in situ-Sanierung kohlenwasserstoffbelasteter Böden.- In: ARENDT, F.: Altlastensanierung '90, 541-550; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.

LWA NRW (Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen; Hrsg.)(1991): Probenahme bei Altlasten.- LWA-Materialien 1/91, Düsseldorf.

LYNCH, J.M. & LYNDIA, M.P. (1980): Cultivation and the soil biomass.- Soil Biol.Biochem., 12, 29-33.

MACKENBROCK, K. (1992): Ein neues biologisches Verfahren zur Reinigung PAK-belasteter Böden: Grundlagen, Verfahrenskonzept und erste Ergebnisse.- In: Zenit: Erfahrungen mit neuen Konzepten zur biologischen Bodensanierung; Seminarveranst. 12.05.92, Mülheim a.d. Ruhr, 5.1-8.

MAHRO, B. (1994): Vortrag im Forschungszentrum KFA-Jülich am 01.09.94.

MAHRO, B. & KÄSTNER, M. (1993): Der mikrobielle Abbau polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) in Böden und Sedimenten: Mineralisierung, Metabolisierung und Entstehung gebundener Rückstände.- BioEngineering, 1, 50-57.

McCARTHY, J.F. & JIMINEZ, B.D. (1985a): Reduction in bioavailability to bluegills of polycyclic aromatic hydrocarbons bound to dissolved humic materials.- Environ.Toxicol.Chem., 4, 511-521.

McCARTHY, J.F. & JIMINEZ, B.D. (1985b): Interactions between polycyclic aromatic hydrocarbons and dissolved humic material: Binding and dissociation.- Environ.Sci.Technol., 19, 1072-1076.

METZNER, H. (1989): Mikrobieller Abbau polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe im Boden.- Landesausschuß für landwirtschaftliche Forschung, Erziehung und Wirtschaftsberatung beim MURL NRW (Hrsg.), Forschung und Beratung, 46, 197-211.

MEUSER, H. (1993): Technogene Substrate in Stadtböden des Ruhrgebietes.- Z.Pflanzenernähr. Bodenk., 156, 137-142.

MORTLAND, M.M. & HALLORAN, L.J. (1976): Polymerization of aromatic molecules on smectite.- Soil Sci.Soc.Am.J., 40, 367-370.

NECKER, U. (1994): mündliche Mitteilung am 09.03.94.

NECKER, U. (1995): Schadstoffwirkungen auf die Mikroflora - Ermittlung und Bewertung.- In: Landesumweltamt NRW: Jahresbericht '94, 95, Moeker Merkur Druck GmbH, Köln.

NORDMEYER, H. & PESTEMER, W. (1995): Laborabbau und -sorptionsversuche mit Pflanzenschutz-mitteln im Bodenprofil.- Z.f.Kulturtechnik und Landentwicklung, 36, 6-10.

NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DIN E.V. (1982): Kohlenwasserstoffe, Gesamtgehalt IR-spektroskopisch.- DEV H18, DIN 38 409,13. Aufl.; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DIN E.V. (1984a): Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H), Bestimmung des Phenolindex.- DEV H16, DIN 38 409, 13.Aufl.; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DIN E.V. (1984b): Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H), Bestimmung der extrahierbaren organisch gebundenen Halogene (EOX).- DEV H8, DIN 38 409, 13.Aufl.; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DIN E.V. (1984c): Schlamm und Sedimente (Gruppe S) -Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser.- DEV S4, DIN 38 414, 13.Aufl.; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DIN E.V. (1988): Cyanide, Gesamtgehalt.- DEV D14, DIN 38 405, 13.Aufl.; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DIN E.V. (1989): Testverfahren mit Wasserorganismen.- Gruppe L, Entwurf DIN 38 412 Teil 34, 13.Aufl.; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 601-612.

NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DIN E.V. (1991): Bestimmung von 6 polycyclischen aromatischen Wasserstoffen (PAK) in Trink- und Mineralwasser mittels Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC).- DEV F8, Entwurf DIN 38 407, 13.Aufl.; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

ODENSAß, M. & SCHROERS, S. (1995): Stand der Altlastensanierung und der verfügbaren stationären Bodenbehandlungsanlagen in Nordrhein-Westfalen.- In: Landesumweltamt NRW: Jahresbericht '94, 104-105, Moeker Merkur Druck GmbH, Köln.

OTTOW, J.C.G. (1988): Umwandlungen von Xenobiotika durch Bodenmikroorganismen und ihre potentielle Steuerung.- Schr.-Reihe Verein WaBoLu 80, 61; Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

PARK, K.S., SIMS, R.C., DOUCETTE, W.J. & MATTHEWS, J.E. (1988): Biological transformation and detoxification of 7,12-dimethyl benz(a)anthracene in soil systems.- J.Water Poll.Control.Fed., 60, 1822-1825.

PARK, K.S., SIMS, R.C., DUPONT, R.R., DOUCETTE, W.J. & MATTHEWS, J.E. (1990): Fate of PAH compounds in two soil types: Influence of volatilisation, abiotic loss and biological activity.- Environ.Toxicol.Chem., 9, 187-195.

PESCHLA, H. & TIBERG, E. (1993): Gelungene PAK-Sanierung - ein seltener Fall?- TerraTech, 1, 53-55.

PESTEMER, W., GÜNTHER, P. & WIK, B. (1991): Einfluß von Tensiden auf Pflanzenwachstum und Schadstoffverfügbarkeit im Boden.- UBA (Hrsg.): Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - Wirkungen auf Ökosysteme.- 48 S., Forschungsbericht 116 08 079; UBA-FB 90-091.

PETER, H., ESCHNER, C., KNEIFEL, H. & WEBB, L. (1994): Abbau von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von organischen Substanzen.- In: Fremdstoffe in Böden - Vortragsveranstaltung der AGF, 12.12.94, Bonn-Bad Godesberg, 11-14, Theneé-Druck, Bonn.

PFEIFER, F. (1995): Untersuchungen zur biologischen Sanierbarkeit von PAK-belasteten Böden im Sapromaten und in der Biodyn-Laboranlage.- Abschlußbericht im Auftrag des Landesumweltamtes NRW, 23 S., Essen.

RABER, B. & KÖGEL-KNABNER, I. (1995): Desorption von PAK aus Böden unter dem Einfluß von gelöster organischer Substanz.- Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 76/1, 421-424.

REUPERT, R. (1993): mündliche Mitteilungen am 25.02.93 und 11.10.93.

REUPERT, R. & BRAUSEN, G. (1991): .- GIT Fachz.Lab., 11, 1219-1221.

REUPERT, R. & BRAUSEN, G. (1994): Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in Wasser, Sediment, Schlamm und Boden mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie.- Acta hydrochim.hydrobiol., 22/5, 202-215.

ROOS, P.H., VAN AFFERDEN M., STROTKAMP, D., PFEIFER, F. & HANSTEIN, W.G. (1994): Gefährdungspotential kontaminierter Böden: Bioverfügbarkeit bodengebundener PAK für Bakterien und Säuger.- Ecoinforma, 6, 169-182.

ROSS, D., STROO, H.F. & BOURQUIN, A.W. (1988): Bioremediation of hazardous waste sites in the USA: Case histories.- In: WOLF, K., VAN DEN BRINK, W.J. & COLON, F.J.: Contaminated Soil '88, 717-725; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.

RUMP, H.H., HERKLOTZ, K. & CORDT, T. (1988): Investigation of soil and groundwater at former gasworks sites.- In: WOLF, K., VAN DEN BRINK, W.J. & COLON, F.J.: Contaminated Soil '88, 213-215; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.

- RUTHERFORD, D.W., CHIOU, C.T. & KILE, D.E. (1992): Influence of soil organic matter composition on the partition of organic compounds.- *Environ.Sci.Technol.*, 26/2, 336-340.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G., HARTGE, K.-H. & SCHWERTMANN, U. (1989): Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde.- 12.Aufl., 491 S.; Verlag Enke, Stuttgart.
- SCHEUNERT, I. (1991): Langzeitverhalten von Chemikalien in Böden.- *UWSF-Z.Umweltchem. Ökotox.*, 3/1, 28-32.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. & STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum: eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler.- 2.Aufl., 295 S.; Blackwell wiss.Verl., Berlin, Oxford.
- SCHNÖDER, F. (1995): Diss. in Vorbereitung, Univ. Bonn.
- SCHNÖDER, F., MITTELSTAEDT, W. & FÜHR, F. (1994): Das Verhalten von Benzo(a)pyren und Fluoranthen in einer Parabraunerde.- In: Fremdstoffe in Böden - Vortragsveranstaltung der AGF, 12.12.94, Bonn-Bad Godesberg, 28-30, Theneé-Druck, Bonn.
- SCHULER, W. (1992): Schriftliche Mitteilung vom 15.10.92.
- SCHULZ-BERENDT, V. (1992): Erfahrungen mit neuen Konzepten zur biologischen Bodensanierung.- In: Zenit: Erfahrungen mit neuen Konzepten zur biologischen Bodensanierung; Seminarveranst. 12.05.92, Mülheim a.d. Ruhr, 11.1-15.
- SCHULZ-BERENDT, V. (1993): Biologische Reinigung ölkontaminierter Böden.- *Spektrum der Wissenschaft*, 10, 93-97.
- SCHWAB, K. (1991): Mikrobielles Abbauverhalten ausgewählter PAKs in verschiedenen Böden.- Dipl.-Arbeit, 85 S., Inst.f.Bodenk.; Bonn.
- SCHWEFER, H.-J. (1988): Latest development of biological in situ remedial action techniques, portrayed by examples from Europe and USA.- In: WOLF, K., VAN DEN BRINK, W.J. & COLON, F. J.: Contaminated Soil '88, 687-694; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- SCHWUGER, M. J., KLUMPP, E. & NARRES, H.-D. (1991): Synergistische und antagonistische Effekte in Kationensid/Schadstoff-Mischungen an definierten Bodenbestandteilen.- Belastung von Böden und Gewässern, Tagung der AGF am 28.-29.11.1991, Bonn, 53-56; Thenee-Druck, Bonn.
- SIEGFRIED, R. & MÜLLER, H. (1978): Über die 3,4-Benzpyren- Kontamination von Wurzel- und Blattgemüse aus Böden mit unterschiedlichem 3,4-Benzpyrengesamtgehalt.- *Landwirtsch.Forschung*, 31/2-3, 133-140.
- SIMS, R.C. & OVERCASH, M.R. (1983): Fate of polynuclear aromatic compounds (PNA's) in soil plant systems.- *Resid.Rev.*, 88, 1-68.
- SPRENGER, C., HARBORTH, P., HANERT, H.H. & BERGER, W. (1994): Untersuchungen zur Erhöhung der Bioverfügbarkeit von adsorbierten PAK in Böden von ehemaligen Gaswerksgeländen.- *BioEngineering*, 4, 16-22.
- STACHE, H. (1979): Tensid-Taschenbuch.- 581 S.; Carl Hauser Verlag, München.
- STEILEN, N., BULLMANN, H. & ODENSAß, M. (1992): Feldversuche zur mikrobiologischen Sanierung eines PAK-kontaminierten Gaswerkbodens.- *WLB Wasser, Luft und Boden*, 6, 68-72.
- STEILEN, N., HEINKELE, T.H., REINEKE, W., NECKER, U., ODENSAß, M. & WILLERSHAUSEN K.-H. (1993): Ergebnisse von Feldversuchen zur Behandlung eines PAK-belasteten Gaswerkbodens mit verschiedenen mikrobiologischen Mietenverfahren.- *altlasten-spektrum*, 3, 152-163.

STEINHÄUSER, K.G., KUNZ, C., AMANN, W. & SCHLÖBER, H. (1989): Chemische Zusammensetzung und Leuchtbakterientoxizität wäßriger Auszüge von Mineralölprodukten und Teererzeugnissen.- *Vom Wasser*, 72, 93-108.

STIEBER, M., BÖCKLE, K., WERNER, P. & FRIMMEL, F.H. (1990): Abbauverhalten von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Untergrund.- In: ARENDT, F.: Altlastensanierung '90, 551-557; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.

SUESS, M.J. (1976): The environmental load and cycle of polycyclic aromatic hydrocarbons.- *Sci. Tot. Environ.*, 6, 239-250.

TEBAAY, R.H. (1994): Untersuchungen zu Gehalten, zur mikrobiellen Toxizität und zur Adsorption von PAKs und PCBs in verschiedenen Böden Nordrhein-Westfalens.- *Bonner Bodenkundliche Abhandlungen*, 14, 262 S.

TEBAAY, R.H., WELP, G. & BRÜMMER, G.W. (1993): Gehalte an Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und deren Verteilungsmuster in unterschiedlich belasteten Böden.- *Z.Pflanzenernähr.Bodenk.*, 156, 1-10.

THALMANN, A. (1967): Über die mikrobielle Aktivität und ihre Beziehungen zu Fruchtbarkeitsmerkmalen einiger Ackerböden unter besonderer Berücksichtigung der Dehydrogenaseaktivität (TTC-Reduktion).- 227 S.; Diss. Univ. Gießen.

THALMANN, A. (1968): Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität im Boden mittels Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC).- *Landwirtsch.Forsch.*, 21, 249-258.

THIELE, S. & BRÜMMER, G.W. (1994): Untersuchung weiterer organischer und anorganischer Parameter.- 5 S., Abschlußbericht im Auftrag des Landesumweltamtes NRW; Bonn.

TIEHM, A. & ZUMFT, W. (1992): Mobilization and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of technical surfactants.- In: DECHEMA, VAAM, EFB: Preprints of international symposium of soil decontamination using biological processes; 06.-09.12.1992, Karlsruhe, 274-281; DECHEMA, Frankfurt/M.

TOTSCHKE, K.U. & KÖGEL-KNABNER, I. (1995): Alternative Erklärungskonzepte zur Mobilitätsniedrigung in Gegenwart mobiler Sorbenten: Co-Sorption und kumulative Sorption.- *Mitteilgn. Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch.*, 76/1, 465-468.

UMLAUF, G. & BIERL, R. (1987): Distribution of organic micropollutants in different size fractions of sediment and suspended solid particles of the river Rotmain.- *Z.Wasser-Abwasser-Forsch.*, 20, 203-209.

US-EPA (United States-environmental protection agency; Hrsg.)(1979): Federal register, polynuclear aromatic hydrocarbons - method 610, 44, 69514.

VAN AFFERDEN, M., BEYER, M. & KLEIN, J. (1992b): Significance of bioavailability for the microbial remediation of PAH-contaminated soils.- In: DECHEMA, VAAM, EFB: Preprints of International Symposium of soil decontamination using biological processes, 06.-09.12.92; 605-610.

VAN AFFERDEN, M., WEIßENFELS, W.D., BEYER, M., KLEWER, H.J., KLEIN, J. & LANGHOFF, J. (1992a): Einfluß der "Bioverfügbarkeit" auf den mikrobiellen PAK-Abbau in Böden.- In: BEHRENS, D. & WIESNER, J.: Mikrobiologische Reinigung von Böden, 405-412; 9. DECHEMA-Fachgespräch Umweltschutz am 27./28.2.1991, Frankfurt/M.

VIGON, B.W. & RUBIN, A.J. (1989): Practical considerations in the surfactant aided mobilization of contaminants in aquifers.- *Journal WPFC*, 61/7, 1233-1240.

- VON LÜTZOW, M. & OTTOW, J.C.G. (1990): Biomasse-Stickstoff und mikrobielle Aktivität (Dehydrogenase- und Dimethylsulfoxidreduktase-Aktivität) biologisch-dynamisch und konventionell bewirtschafteter Felder auf Parabraunerden in Hessen.- VDLUFA Schriftenr.(Kongreßband), 32, 993-998.
- WAHLE, U. (1994): Extraktionsverfahren zur Erfassung biologisch relevanter Bodenbelastungen.- In: Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie (Hrsg.): Tätigkeitsbericht 1994, 23-32, Schmallenberg.
- WARDLE, D.A., YEATES, G.W., WATSON, R.N. & NICHOLSON, K.S. (1993): Response of soil microbial biomass and plant litter decomposition to weed management strategies in maize and asparagus cropping systems.- Soil Biol.Biochem., 25/7, 857-868.
- WEIß, H., PYKA, W. & GRATHWOHL, P. (1995): Emmissions of PAH's from aged soil contamination at former gasworks.- Fifth international KfK/TNO conference on contaminated soil, 30.10.-03.11.95; Maastricht, Niederlande.
- WEIßENFELS, W. D., KLEWER, H.-J. & LANGHOFF, J. (1992): Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by soil particles: influence on biodegradability and biotoxicity.- Soil decontamination using biological processes; International symposium, preprints, 6.-9.12.1992 Karlsruhe, 136; DECHEMA, Frankfurt/M.
- WEIßENFELS, W. D., KLEWER, H.-J. & LANGHOFF, J. (1993): Adsorption von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs) durch Bodenpartikel: Einfluss auf die Abbaubarkeit und das Gefährdungspotential kontaminierter Standorte.- In: ARENDT, F., ANNOKKÉE, G.I., BOSMAN, R. & VAN DEN BRINK, W.J. (Hrsg.): Altlastensanierung '93, 329-338; Kluwer Academic Publishers, Niederlande.
- WELP, G. & BRÜMMER, G. (1985): Der Fe(III)-Reduktionstest - ein einfaches Verfahren zur Abschätzung der Wirkung von Umweltchemikalien auf die mikrobielle Aktivität in Böden.- Z.Pflanzenernähr.Bodenk., 148, 10 - 23.
- WELP, G. & BRÜMMER, G.W. (1989): Einfluß organischer Chemikalien auf die mikrobielle Aktivität in Böden.- Wissenschaftliche Berichte über Land- und Ernährungswirtschaft in NRW, Forschung und Beratung, Reihe C, 46, 174-196.
- WELP, G., BRÜMMER, G.W. & RAVE, G. (1991): Dosis-Wirkungs- Beziehungen zur Erfassung von Chemikalienwirkungen auf die mikrobielle Aktivität von Böden: 1.Kurvenverläufe und Auswertungsmöglichkeiten.- Z.Pflanzenernähr.Bodenk., 154, 159- 168.
- WERSHAW, R. L. (1986): A new model for humic materials and their interactions with hydrophobic organic chemicals in soil-water or sediment-water systems.- Journal of Contaminant Hydrology, 1, 29-45.
- WEST, C.C. & HARWELL, J.H. (1992): Surfactants and subsurface remediation.- Environ.Sci. Technol., 26/12, 2324-2330.
- WOLF, D.C., DAO, T.H., SCOTT, H.D. & LAVY, T.L. (1989): Influence of sterilization methods on selected soil microbiological, physical and chemical properties.- J.Environ.Qual., 18, 39-44.
- ZEYER, J. (1993): Biologische Sanierung - Illusionen und Realitäten.- Spektrum der Wissenschaft, 10, 90-92.

10. ANHANG

Tab.24.1: Charakteristika der technogenen Partikel <2mm in den Altlasten-Bodenproben (nach MEUSER 1993, 1995)

Probe			Fremdgeruch	anthropogene Partikel		Beurteilung
Ac	CaCO ₃ %	6,4	stark Naphthalin & NH ₃	Farbe/Art	a)Ziegel b)Kalk c)schwarz	a)b) Bauschutt c) verharzte Teerreste
	pHCaCl ₂	7,7		Verfestigung	c)stark	
				Oberfläche	c)matt, kantig-abgerundet, rau	
				Struktur	c)konglomeratisch	
				Körnung	c)-2mm	
Bo	CaCO ₃ %	0,23	schwach Naphthalin	Farbe/Art	a)weißgrau-hellocker b)schwarz	a) Bauschutt b1) verharzte Teerreste, b2)koksartige Aschen, - Cyanid verklebte Bodenaggragate
	pHCaCl ₂	6,4		Verfestigung	b)schwach-mittel	
				Oberfläche	b1) glänzend, glatt, kantig b2) matt, rau, kantig	
				Struktur	b1) glasig	
				Körnung	b1) -2mm	
Dd	CaCO ₃ %	5,2	keiner	Farbe/Art	a) Kalk b) Ziegel c)schwarz	a)b) Bauschutt c) Schmelzkammergranulat
	pHCaCl ₂	8,2		Verfestigung	c) schwach-mittel	
				Oberfläche	c) glänzend, glatt, kantig	
				Struktur	c) glasig	
				Körnung	c) -1mm	
Ge	CaCO ₃ %	2,4	schwach Naphthalin	Farbe/Art	a) Kalk b) Ziegel c) schwarz	a)b) Bauschutt c1) verharzte Teerreste Schmelzkammergranulat c2) Brand schiefer
	pHCaCl ₂	7,5		Verfestigung	c) sehr stark	
				Oberfläche	c) glänzend, glatt, abgerundet	
				Struktur	c1) glasig c2) schieferig	
				Körnung	c1) -2mm c2) -2mm	
Ko	CaCO ₃ %	1,4	keiner, bei HCl-Zugabe sehr schwach H ₂ S	Farbe/Art	a) Kalk b) Ziegel c) schwarz	a)b) Bauschutt, Hausmüll c1) Schmelzkammergranulat, Haldenberge c2) mit Teer verklebter Feinboden
	pHCaCl ₂	7,6		Verfestigung	c1) schwach-mittel c2) schwach	
				Oberfläche	c1)glänzend,glatt,kantig c2)matt abgerundet, rau, bricht kantig	
				Struktur	c1) glasig c2) konglomeratisch	
				Körnung	c1) -1mm c2) -2mm	
Mi	CaCO ₃ %	0,3	Naphthalin	Farbe/Art	a) Kalk b) Gips c) schwarz	a)b) Bauschutt c) verharzte Teerreste bzw. damit verklebter Feinboden
	pHCaCl ₂	7,4		Verfestigung	c) mittel	
				Oberfläche	c)matt,abgerundet,rau,bricht kantig	
				Struktur	c)konglomeratisch,zT. glasige Cutane	
				Körnung	c) -2mm	

Tab.24.2: Charakteristika der technogenen Partikel < 2mm in den Altlasten-Bodenproben (nach MEUSER 1993, 1995)

Probe			Fremdgeruch	anthropogene Partikel		Beurteilung
Ra	CaCO ₃ %	2,7	Naphthalin	Farbe/Art	a)Kalk b)Ziegel c)Gips d)schwarz	a)b)c) Bauschutt, I Hausmül d) Rostasche
	pHCaCl ₂	7,6		Verfestigung	d) stark	
				Oberfläche	d) glatt, glänzend, kantig	
				Struktur	d) glasig, innen porös	
				Körnung	d) -2mm	
Sh	CaCO ₃ %	10,8	keiner	Farbe/Art	a) Kalk b) Ziegel c) schwarz	a)b) Bauschutt c) Teerreste
	pHCaCl ₂	7,9		Verfestigung	c) mittel, z.T. plastisch	
				Oberfläche	c) glänzend, glatt, kantig	
				Struktur	c) glasig	
				Körnung	c) -1mm	
So	CaCO ₃ %	1,2	keiner	Farbe/Art	a) Gips b) schwarz	a) Bauschutt b1) Halden- berge b2) Teerreste
	pHCaCl ₂	7,4		Verfestigung	b1) schwach-mittel b2) stark	
				Oberfläche	b1)matt,rauh,kantig b2)rauh,glän- zend	
				Struktur	b1) schieferig b2) konglomeratisch	
				Körnung	b1) -2mm b2) -2mm	
Üb	CaCO ₃ %	1,8	sehr stark Naphthalin & Benzol, NH ₃	Farbe/Art	a) Kalk b) Ziegel c) schwarz	c1) verharzte Teerreste c2) koksartige Aschen
	pHCaCl ₂	10,1		Verfestigung	c1) mittel c2) schwach-mittel	
				Oberfläche	c1) glatt, abgerundet, glänzend c2) rau, matt, abgerundet	
				Struktur	c1) glasig c2) konglomerat., porig	
				Körnung	c1) -2mm c2) -1mm	
Hea	CaCO ₃ %	-	Naphthalin, muffig	Farbe/Art	a) schwarz b) rötlich-silbrig	a11) Anthra- zitkohle a12) Stein- kohle, Brikettbruch- stücke a2) Rost- aschen b) Ofen- ausbruch
	pHCaCl ₂	3,7		Verfestigung	a1) mittel a2)b) schwach	
				Oberfläche	a1) rau-glatt, glänzend, kantig a2) rau, matt, abgerundet b) abgerundet, glatt, glänzend	
				Struktur	a11) glasig a12) schieferig a2) grobporig b) kugelig, porig	
				Körnung	a11) -2mm a12) -2mm a2) -2mm b) -1mm	
Heb	CaCO ₃ %	-	Naphthalin, muffig	Farbe/Art	a) türkis b) schwarz c) rostrot	a) Cyanid verklebte Bodenaggre- gate b1) Anthra- zitkohle b2) Teerver- klebte Bodenaggre- gate c) Fe-Oxide
	pHCaCl ₂	3,2		Verfestigung	a) sehr schwach b1) mittel b2) schwach c) schwach	
				Oberfläche	a) matt, rau, kantig b1) glänzend, glatt, kantig b2) rau, glänzend c) matt, rau, kantig	
				Struktur	b1) glasig b2) konglomeratisch c) ± schiefrig	
				Körnung	a) -2mm b1) -2mm b2) -2mm c) - 2mm	

Tab.25: PAK-Gehalte der Skelettanteile (X; > 2mm) der Altlastbodenproben (mg/kg Boden)

	Ac	Bo	Dd	Ge	Ko	Ra	So	Üb	Hea	Heb
NAP	1,42	2,52	0,377	3,38	1,37	2,17	0,011	3,06	3,23	1,14
ACE	0,952	4,05	0,636	0,658	0,682	13,4	0,090	1,11	1,23	1,15
FLU	12,5	13,3	3,30	4,02	3,82	7,35	0,434	9,68	2,80	2,12
PHE	83,1	161	20,5	21,3	17,9	120	3,84	44,6	34,3	28,0
ANT	64,2	146	18,2	15,2	11,7	101	2,99	9,92	7,13	3,00
FLA	75,1	275	26,6	21,9	16,4	140	9,84	14,6	34,8	17,8
PYR	83,3	268	32,0	19,4	19,7	171	13,7	13,9	30,5	44,6
BaANT	30,5	134	15,1	10,8	9,83	85,7	6,05	5,52	7,61	2,91
CHR	36,5	136	18,0	13,9	11,9	97,7	3,88	6,43	10,2	3,58
BbFLA	15,9	106	9,19	6,92	9,16	55,4	4,55	4,49	5,14	1,37
BkFLA	11,8	54,7	6,49	3,98	4,83	36,6	3,18	2,24	2,42	0,604
BaPYR	23,9	89,4	8,06	5,56	6,32	63,6	5,75	2,15	1,94	0,518
DBahANT	4,06	19,3	1,59	1,42	1,38	12,1	1,06	0,696	0,565	0,093
BghiPER	15,6	74,1	6,66	3,62	6,15	42,2	3,12	2,08	1,66	0,486
IPYR	12,0	75,1	6,58	4,05	5,53	30,8	3,05	1,92	1,11	0,242
Σ-PAK	471	1560	173	136	127	978	61,6	122	145	108

Tab.26: Nachweisgrenzen (NWG), Bestimmungsgrenzen (BG), Wiederfindungsraten (WFR) und Standardabweichung (StdAbw) der Parallelbestimmungen für 15 PAK (nach US-EPA) sowie für 6-Methyl-Chrysen (6-MCHR) (n = Probenumfang); Datenauswertung nach FREHSE & THIER (1991)

PAK	NWG (µg/kg)	BG (µg /kg)	WFR (%)	n	StdAbw (%)
NAP	118	198	47	11	17,0
ACE	60,0	98,0	78	11	3,50
FLU	43,0	79,0	100	11	4,60
PHE	105	157	73	11	3,40
ANT	41,2	63,2	81	11	11,8
FLA	39,6	59,3	98	11	16,2
PYR	31,1	46,7	103	11	14,6
BaANT	6,27	9,40	97	11	8,26
CHR	6,37	9,55	98	11	7,90
BbFLA	2,08	3,55	100	11	7,51
BkFLA	4,74	7,13	97	11	7,43
BaPYR	4,16	6,37	95	11	7,56
DBahANT	9,22	13,8	96	11	7,50
BghiPER	7,67	11,9	99	11	7,47
IPYR	5,02	7,53	97	11	7,14
6-MCHR	15,9	25,6	90	11	0,292

Tab.27: Vergleich der PAK-Ausbeuten aus einer Bodenprobe des Altlaststandortes Ko bei verschiedenen Extraktionsverfahren (Toluol/Aceton-Heißextraktion (T/A) = 100%; VDLUFA = Aceton-Schüttelmethode; n-Hexan = Heißextraktion nach REUPERT (1993); Aceton = Heißextraktion)

(%)	NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT
T/A	100	100	n.n.	100	100	100	100	100
VDLUFA	75,8	50,1	-	77,6	80,0	58,0	103	74,8
n-Hexan	-	41,2	n.n.	38,4	21,6	69,1	69,8	80,5
Aceton	-	25,0	n.n.	19,5	29,0	37,0	37,2	47,9

(%)	CHR	BbFLA	BkFLA	BaPYR	DBahANT	BghiPER	IPYR	Σ-PAK
T/A	100	100	100	100	100	100	100	100
VDLUFA	78,4	54,9	72,3	64,4	48,6	61,5	42,7	75,0
n-Hexan	81,4	76,0	67,8	74,2	60,3	81,3	67,8	73,9
Aceton	37,9	38,3	33,9	35,9	33,6	39,5	34,3	35,3

Tab.28: Vergleich der analysierten PAK-Gehalte (mg/kg Boden) einer Bodenprobe des Altlaststandortes Ra nach Extraktion mittels Soxtherm- und Soxhlet apparatur

Gerät	Wdh	NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT
Soxtherm	1	86,6	121	6,21	60,3	29,1	138	103	75,5
	2	65,9	113	4,79	59,0	28,8	134	102	71,3
	3	74,5	118	4,52	54,5	25,8	140	108	79,4
	Ø	75,7	117	5,17	57,9	27,9	138	104	75,4
Soxhlet	1	73,7	111	4,35	63,9	19,6	140	104	80,6
	2	67,9	111	3,86	61,9	21,2	140	103	72,8
	3	65,9	113	5,11	61,8	19,8	140	108	86,0
	Ø	69,2	112	4,44	62,5	20,2	140	105	79,8

Gerät	Wdh	CHR	BbFLA	BkFLA	BaPYR	DBahANT	BghiPER	IPYR	Σ-PAK
Soxtherm	1	58,0	62,1	29,1	56,4	16,3	36,3	46,5	
	2	57,3	62,1	30,7	56,3	15,9	34,0	47,4	
	3	60,2	65,7	30,5	63,5	17,0	37,1	49,0	
	Ø	58,5	63,3	30,1	58,7	16,4	35,8	47,6	912
Soxhlet	1	67,4	71,5	30,4	52,5	15,3	36,8	54,0	
	2	68,2	71,1	32,2	57,7	14,7	38,3	56,7	
	3	72,3	74,3	29,0	59,9	14,5	39,2	56,5	
	Ø	69,3	72,3	30,6	56,7	14,9	38,1	55,7	930

Tab.29: Vergleich der PAK-Analysenergebnisse (mg/kg Boden) zweier Labors von drei Altlastbodenproben (Ac, Dd, So) (T/A = Toluol/Aceton-Soxhlet-Extraktion, Institut f. Bodenkunde Bonn; US-THF = Ultraschallextraktion mit Tetrahydrofuran, Sox-T = Toluol-Soxhlet-Extraktion, beide LUA, REUPERT & BRAUSEN 1994)

Bd	Meth.	NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT
Ac	T/A	42,1	116	46,6	208	62,2	199	155	97,7
	US-THF	43	12	90	208	54	195	139	79
	Sox-T	0	8	74	180	60	180	140	72
Dd	T/A	4,42	12,1	0,89	15,0	5,23	29,3	23,3	16,4
	US-THF	2,8	1,5	4,1	16	5	30	21	15
	Sox-T	0	0	2	12	3,8	26	18	13
So	T/A	0,570	6,04	1,03	3,61	2,79	14,1	12,3	10,0
	US-THF	1,4	<0,05	1,2	3,3	<0,05	13	8,4	8,2
	Sox-T	<0,05	<0,05	1,0	2,9	<0,05	11	8,0	7,3
Bd	Meth.	CHR	BbFLA	BkFLA	BaPYR	DBahANT	BghiPER	IPYR	Σ-PAK
Ac	T/A	93,6	57,1	28,0	64,8	17,1	40,1	40,5	1270
	US-THF	82	59	32	45	6	32	31	1107
	Sox-T	77	48	29	59	4	31	22	984
Dd	T/A	16,9	13,3	6,79	13,1	2,44	7,88	9,76	177
	US-THF	16	13	7,6	11	1,7	7,5	9,1	161
	Sox-T	14	11	6,3	9,8	1,4	5,5	7	130
So	T/A	11,5	11,0	5,37	14,0	3,28	8,10	11,3	115
	US-THF	8,9	9,9	5,5	11	1,5	7,4	8,8	88,5
	Sox-T	7,8	8,4	4,7	10	1,4	6,0	7,8	76,3

Tab.30: PAK-Gehalte von zwei Varianten der Gefäßversuche (KoK2, RaK2) und von deren echten Wiederholungen (KoK2/b, RaK2/b)(Mittelwerte von je drei Parallelen) sowie die daraus ermittelten Variationskoeffizienten (V) (Probennahmetermin 14.10.93)

PAK	KoK2 (mg/kg Boden)	KoK2/b (mg/kg Boden)	V (%)	RaK2 (mg/kg Boden)	RaK2/b (mg/kg Boden)	V (%)
NAP	n.n.	n.n.	-	20,8	22,1	23,8
ACE	0,731	0,753	4,3	15,5	12,6	14,5
FLU	1,18	1,18	8,8	9,80	6,55	22,7
PHE	5,37	7,61	21,0	45,5	44,0	2,8
ANT	2,46	2,32	8,6	17,1	15,7	7,1
FLA	22,2	26,3	14,4	117	122	4,8
PYR	17,0	20,0	10,8	98,7	91,3	5,8
BaANT	12,7	13,9	6,8	65,9	67,0	5,2
CHR	12,9	14,7	8,8	62,0	56,8	6,7
BbFLA	16,6	19,0	8,7	64,2	67,6	4,6
BkFLA	6,98	8,30	11,2	26,5	28,7	6,9
BaPYR	11,3	12,4	9,0	58,6	59,9	3,5
DBahANT	2,27	2,14	10,2	13,4	11,3	10,3
BghiPER	8,94	9,52	7,0	32,4	32,5	3,3
IPYR	7,88	9,90	13,7	36,4	38,0	3,5

Tab.31: Nachweisgrenzen (NWG), Bestimmungsgrenzen (BG); Wiederfindungsraten (WFR) und Standardabweichungen (StdAbw) der Meßwerte der PAK (nach EPA) bei Kontamination von Wasser mit Standardlösungen und anschließender Flüssig-flüssig-Extraktion; Datenauswertung nach FREHSE & THIER (1991)

PAK	NWG (µg /l)	BG (µg /l)	WFR (%)	n	StdAbw (%)
NAP	1,166	1,976	10	17	2,29
ACE	0,201	0,373	62	17	0,70
FLU	0,191	0,352	73	17	1,23
PHE	0,183	0,336	103	17	1,92
ANT	0,212	0,391	101	17	2,28
FLA	0,178	0,321	102	17	3,05
PYR	0,198	0,358	104	17	3,39
BaANT	0,163	0,291	106	17	3,15
CHR	0,156	0,279	103	17	2,99
BbFLA	0,170	0,302	103	17	3,23
BkFLA	0,180	0,320	102	17	3,39
BaPYR	0,160	0,289	98	17	2,60
DBahANT	0,162	0,286	92	17	2,80
BghiPER	0,166	0,294	94	17	2,94
IPYR	0,163	0,290	94	17	2,98

Tab.32: Vergleich der PAK-Ausbeuten aus zwei Sickerwasserproben mittels der Flüssig-flüssig-Methode mit n-Hexan (n-H) und der kombinierten C18-Festphasenanreicherung und Soxhletextraktion nach Filterung der Proben über Celite (C18/Sox); % = Anteil n-H gegenüber C18/Sox (100%)

Probe	Summe nach EPA			Summe nach TVO		
	n-H	C18/Sox	%	n-H	C18/Sox	%
DdK1	0,196	0,297	66,0	0,076	0,149	51,0
DdK2	0,044	0,184	23,9	0,024	0,034	70,6

Tab.33.1: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Bo mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile (Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 -12.01.94 = 30 Wochen; µg/kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg/l)

Boden	Bo				
	-	K1	K2	A1	A2
ml Sw 74 Wo	13721	12155	12108	10328	9807
ml Sw 30 Wo	5520	4235	4598	4238	5657
NAP	0,229	0,092	0,088	0,105	0,096
ACE	0,649	0,171	0,250	0,598	0,104
FLU	0,010	0,032	0,005	0,005	0,021
PHE	0,496	0,131	0,381	0,358	0,127
ANT	0,138	0,028	0,044	0,146	0,020
FLA	2,00	0,509	0,768	2,39	0,369
PYR	1,58	0,386	0,566	1,74	0,285
BaANT	1,22	0,250	0,378	1,32	0,189
CHR	1,17	0,182	0,341	1,30	0,131
BbFLA	1,25	0,358	0,497	1,43	0,254
BkFLA	0,572	0,132	0,181	0,521	0,104
BaPYR	1,14	0,203	0,284	1,13	0,157
DBahANT	0,394	0,115	0,144	0,451	0,064
BghiPER	0,878	0,269	0,320	0,940	0,169
IPYR	0,970	0,234	0,314	1,10	0,133
Σ-Austrag	12,7	3,09	4,56	13,5	2,22
Σ-EPA µg /l	12,4	3,94	5,36	17,2	2,12
Σ-TVO µg /l	6,66	2,17	2,78	9,57	1,13

Tab.33.2: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Ge mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 -12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Ge						
	-	K1	K2	A1	A2	K2T	K2/b
ml Sw 74 Wo	12345	10412	8081	9212	8368	8403	8015
ml Sw 30 Wo	5145	4832	4191	4582	3898	3675	3923
NAP	0,124	0,110	0,120	0,131	0,143	0,106	0,176
ACE	0,006	0,003	0,004	0,013	0,030	0,016	0,019
FLU	0,016	0,003	0,006	0,019	0,020	0,009	0,023
PHE	0,041	0,006	0,009	0,066	0,054	0,020	0,057
ANT	0,011	n.n.	0,000	0,002	0,011	0,003	0,011
FLA	0,042	0,008	0,016	0,044	0,034	0,019	0,021
PYR	0,025	0,003	0,007	0,033	0,016	0,006	0,015
BaANT	0,018	0,003	0,005	0,021	0,028	0,012	0,019
CHR	0,034	0,005	0,003	0,024	0,030	0,010	0,015
BbFLA	0,023	0,007	0,014	0,033	0,032	0,022	0,033
BkFLA	0,008	0,002	0,005	0,013	0,014	0,009	0,010
BaPYR	0,018	0,004	0,013	0,025	0,025	0,019	0,023
DBahANT	0,004	0,001	0,002	0,002	0,007	0,002	0,003
BghiPER	0,013	0,004	0,009	0,021	0,022	0,009	0,018
IPYR	0,012	0,003	0,008	0,022	0,025	0,007	0,007
Σ-Austrag	0,395	0,163	0,221	0,472	0,491	0,271	0,452
Σ-EPA µg /l	0,415	0,182	0,285	0,556	0,680	0,398	0,622
Σ-TVO µg /l	0,122	0,030	0,085	0,188	0,209	0,126	0,156

Tab.33.3a: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Ko mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Ko							
	Variante	-	K1	K2	A1	A2	G1	K2/b
ml Sw 74 Wo		10660	9429	8686	8992	8280	7846	8634
ml Sw 30 Wo		4430	4669	4336	4012	3960	3166	4139
NAP		0,004	0,242	0,218	0,239	0,251	0,051	0,188
ACE		0,035	0,042	0,093	0,088	0,121	0,050	0,027
FLU		0,011	0,001	0,014	0,014	0,003	0,009	0,023
PHE		0,090	0,068	0,056	0,127	0,052	0,073	0,082
ANT		0,005	n.n.	n.n.	0,007	0,000	0,000	n.n.
FLA		0,072	0,010	0,110	0,081	0,101	0,056	0,027
PYR		0,056	0,000	0,176	0,036	0,069	0,032	0,019
BaANT		0,048	0,009	0,004	0,047	0,077	0,042	0,008
CHR		0,053	0,005	0,085	0,037	0,062	0,035	0,015
BbFLA		0,101	0,009	0,106	0,058	0,113	0,063	0,024
BkFLA		0,029	0,001	0,033	0,017	0,043	0,020	0,009
BaPYR		0,060	0,003	0,003	0,038	0,093	0,041	0,012
DBahANT		0,034	0,004	0,016	0,013	0,024	0,067	0,029
BghiPER		0,068	0,004	0,057	0,035	0,081	0,096	0,029
IPYR		0,057	0,003	0,004	0,007	0,007	0,022	0,001
Σ-Austrag		0,724	0,401	0,977	0,845	1,10	0,657	0,493
Σ-EPA µg /l		0,882	0,464	1,22	1,14	1,50	1,12	0,643
Σ-TVO µg /l		0,472	0,035	0,392	0,319	0,597	0,510	0,134

Tab.33.3b: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Ko mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; $\mu\text{g} / \text{kg}$) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO ($\mu\text{g} / \text{l}$)

Boden	Ko-Tensidvarianten								
Variante	-	K1T	K2T	A1T	A2T	K1G	K1P	K1S	K2T/b
ml Sw 74 Wo	10660	11721	10920	11274	9397	10481	11330	10470	10092
ml Sw 30 Wo	4430	4911	4710	4799	4667	4821	5260	4270	4382
NAP	0,004	0,587	0,503	0,368	0,171	0,173	0,108	0,179	0,357
ACE	0,035	0,076	0,031	0,032	0,056	0,041	2,56	0,006	0,031
FLU	0,011	0,524	0,284	0,399	0,345	0,003	1,64	0,002	0,648
PHE	0,090	0,054	0,063	0,020	0,107	0,055	2,42	0,073	0,064
ANT	0,005	n.n.	0,002	n.n.	0,010	0,003	0,084	0,005	0,003
FLA	0,072	0,008	0,041	0,032	0,195	0,081	0,730	0,122	0,069
PYR	0,056	0,008	0,022	0,024	0,182	0,077	0,494	0,100	0,066
BaANT	0,048	0,014	0,050	0,036	0,204	0,090	0,462	0,134	0,060
CHR	0,053	0,011	0,047	0,037	0,372	0,140	0,506	0,215	0,095
BbFLA	0,101	0,035	0,099	0,067	0,351	0,120	0,585	0,175	0,109
BkFLA	0,029	0,012	0,034	0,019	0,122	0,035	0,213	0,055	0,039
BaPYR	0,060	0,016	0,042	0,034	0,219	0,076	0,454	0,113	0,053
DBahANT	0,034	0,002	0,015	n.n.	0,057	0,033	0,151	0,114	0,016
BghiPER	0,068	0,016	0,062	0,032	0,224	0,086	0,333	0,162	0,087
IPYR	0,057	0,017	0,052	0,029	0,192	0,030	0,052	0,069	0,044
Σ -Austrag	0,724	1,38	1,35	1,13	2,81	1,04	10,8	1,52	1,74
Σ -EPA $\mu\text{g} / \text{l}$	0,882	1,52	1,55	1,27	3,25	1,17	11,1	1,93	2,15
Σ -TVO $\mu\text{g} / \text{l}$	0,472	0,115	0,379	0,239	1,51	0,480	2,43	0,880	0,493

Tab.33.4a: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Ra mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Ra						
	-	K1	K2	A1	A2	G1	K2/b
ml Sw 74 Wo	14766	12699	12619	11361	10520	12133	11755
ml Sw 30 Wo	6466	5739	6299	5961	5720	5533	5645
NAP	2,75	0,563	0,257	0,381	0,304	0,221	0,298
ACE	4,50	1,49	0,845	1,27	1,09	0,663	0,619
FLU	0,114	0,039	0,012	0,141	0,167	0,082	0,068
PHE	4,15	1,40	0,535	1,01	1,25	0,804	0,757
ANT	0,509	0,217	0,109	0,186	0,149	0,092	0,136
FLA	8,96	3,01	1,56	1,99	2,22	1,47	2,02
PYR	8,33	2,78	1,49	1,79	1,98	1,29	1,68
BaANT	5,36	2,17	0,970	1,31	1,42	0,706	0,966
CHR	6,50	2,58	1,19	1,42	1,76	0,986	1,41
BbFLA	7,44	2,36	1,35	1,45	1,72	1,12	1,32
BkFLA	2,79	0,872	0,530	0,577	0,685	0,409	0,478
BaPYR	6,39	1,79	1,09	1,18	1,41	0,768	0,925
DBahANT	1,75	0,374	0,262	0,334	0,361	0,235	0,242
BghiPER	4,66	1,38	0,291	0,862	0,900	0,585	0,670
IPYR	5,41	1,50	0,971	1,01	1,13	0,657	0,766
Σ-Austrag	69,6	22,5	11,5	14,9	16,6	10,1	12,4
Σ-EPA µg /l	58,1	21,2	9,82	13,5	15,6	9,84	11,8
Σ-TVO µg /l	29,8	10,3	4,96	6,40	7,62	4,89	5,91

Tab.33.4b: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Ra mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Ra-Tensidvarianten								
	Variante	-	K1T	K2T	A1T	A2T	K1G	K1P	K1S
ml Sw 74 Wo	14766	13396	10478	12263	10261	12118	11977	11456	10501
ml Sw 30 Wo	6466	6946	5498	6163	5721	5978	6077	5756	5641
NAP	2,75	0,411	0,227	0,168	0,329	0,585	0,339	0,404	0,068
ACE	4,50	2,00	0,957	0,990	1,08	1,17	1,03	0,908	0,196
FLU	0,114	0,378	0,209	0,136	0,218	0,168	0,170	0,095	0,056
PHE	4,15	2,05	0,955	1,05	1,26	1,10	0,859	0,664	0,305
ANT	0,509	0,266	0,126	0,160	0,227	0,139	0,132	0,133	0,061
FLA	8,96	3,82	1,83	2,33	3,39	2,21	1,90	1,73	0,934
PYR	8,33	3,48	1,68	2,06	3,06	2,02	1,69	1,63	0,802
BaANT	5,36	1,81	1,09	1,21	2,43	1,43	1,10	1,15	0,479
CHR	6,50	2,33	1,32	1,84	3,96	1,69	1,35	1,39	0,652
BbFLA	7,44	3,23	1,62	1,76	2,52	1,95	1,27	1,88	0,799
BkFLA	2,79	1,07	0,558	0,622	0,953	0,719	0,527	0,660	0,282
BaPYR	6,39	2,27	1,25	1,37	1,99	1,43	1,04	1,47	0,535
DBahANT	1,75	0,530	0,253	0,260	0,500	0,398	0,313	0,400	0,148
BghiPER	4,66	1,67	0,849	0,730	1,17	1,02	0,721	1,02	0,424
IPYR	5,41	1,66	0,994	0,873	1,20	1,21	0,852	1,16	0,421
Σ-Austrag	69,6	27,0	13,9	15,5	24,3	17,2	13,3	14,7	6,16
Σ-EPA µg /l	58,1	21,0	13,7	13,6	22,9	15,6	11,8	13,8	5,90
Σ-TVO µg /l	29,8	10,7	6,98	6,73	10,6	7,72	5,61	7,43	3,25

Tab.33.5a: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe So mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	So					
	-	K1	K2	A1	A2	G1
m Sw 74 Wo	9305	9331	8498	6942	7869	6007
ml Sw 30 Wo	3905	4073	3818	3303	4077	2547
NAP	0,052	0,029	0,047	0,062	0,048	0,082
ACE	0,016	0,014	0,002	0,002	0,002	0,003
FLU	0,008	0,005	0,005	0,003	0,017	0,003
PHE	0,112	0,060	0,029	0,018	0,025	0,014
ANT	0,013	0,008	0,007	0,005	0,008	0,004
FLA	0,091	0,017	0,062	0,032	0,092	0,016
PYR	0,072	0,003	0,034	0,016	0,081	0,008
BaANT	0,037	0,008	0,050	0,027	0,079	0,009
CHR	0,068	0,013	0,057	0,001	0,086	0,013
BbFLA	0,115	0,030	0,062	0,046	0,259	0,019
BkFLA	0,038	0,011	0,027	0,013	0,091	0,007
BaPYR	0,102	0,022	0,054	0,038	0,241	0,014
DBahANT	0,082	0,032	0,084	0,058	0,141	0,017
BghiPER	0,143	0,040	0,098	0,085	0,379	0,024
IPYR	0,109	0,028	0,046	0,031	0,386	0,014
Σ-Austrag	1,06	0,318	0,664	0,437	1,94	0,245
Σ-EPA µg /l	1,46	0,422	0,939	0,715	2,56	0,520
Σ-TVO µg /l	0,826	0,195	0,492	0,400	1,92	0,196

Tab.33.5b: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe So mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	So-Tensidvarianten							
	-	K1T	K2T	A1T	A2T	K1G	K1P	K1S
ml Sw 74 Wo	9305	10611	9049	9479	8955	9749	9593	8243
ml Sw 30 Wo	3905	4611	3849	4209	3965	4289	4233	4253
NAP	0,052	0,081	0,070	0,101	0,048	0,048	0,073	0,073
ACE	0,016	0,015	0,001	0,001	0,001	0,013	0,064	0,001
FLU	0,008	3,13	2,59	3,33	4,97	0,005	0,119	0,004
PHE	0,112	0,067	0,056	0,040	0,042	0,027	0,214	0,025
ANT	0,013	0,025	0,016	0,008	0,009	0,009	0,008	0,010
FLA	0,091	0,081	0,000	0,000	0,032	0,007	0,072	0,010
PYR	0,072	0,046	0,011	0,004	0,049	0,009	0,044	0,006
BaANT	0,037	0,018	0,023	0,004	0,086	0,004	0,044	0,007
CHR	0,068	0,024	0,014	0,006	0,108	0,010	0,065	n.n.
BbFLA	0,115	0,085	0,076	0,065	0,213	0,017	0,089	0,016
BkFLA	0,038	0,034	0,030	0,021	0,095	0,011	0,034	0,006
BaPYR	0,102	0,070	0,054	0,038	0,174	0,014	0,080	0,027
DBahANT	0,082	0,058	0,045	0,035	0,094	n.n.	0,039	0,028
BghiPER	0,143	0,136	0,140	0,092	0,288	0,011	0,087	0,034
IPYR	0,109	0,136	0,093	0,062	0,224	0,015	0,099	0,008
Σ-Austrag	1,06	4,01	3,22	3,81	6,43	0,201	1,13	0,255
Σ-EPA µg /l	1,46	4,69	4,52	4,88	8,76	0,253	1,44	0,323
Σ-TVO µg /l	0,826	0,635	0,551	0,357	1,40	0,096	0,588	0,129

Tab.33.6: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Üb mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 -12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Üb				
	-	K1	K2	A1	A2
ml Sw 74 Wo	7335	7988	10385	8766	7320
ml Sw 30 Wo	3135	3977,5	4735	4306	3460
NAP	9,13	1,22	9,85	5,50	1,00
ACE	15,4	3,08	7,10	8,97	2,48
FLU	0,041	0,034	7,88	0,739	0,031
PHE	0,227	0,783	6,61	2,08	0,130
ANT	0,053	0,106	2,40	0,360	0,032
FLA	0,387	0,340	7,62	0,860	0,146
PYR	0,237	0,273	5,25	0,604	0,191
BaANT	0,184	0,100	1,59	0,226	0,070
CHR	0,312	0,136	2,09	0,239	0,075
BbFLA	0,309	0,227	1,10	0,297	0,170
BkFLA	0,139	0,074	0,420	0,080	0,079
BaPYR	0,175	0,169	0,548	0,147	0,119
DBahANT	0,029	0,019	0,055	0,007	0,008
BghiPER	0,093	0,128	0,195	0,072	0,059
IPYR	0,127	0,134	0,248	0,093	0,062
Σ-Austrag	26,8	6,82	53,0	20,3	4,66
Σ-EPA µg /l	46,2	9,26	60,4	25,4	7,27
Σ-TVO µg /l	2,12	1,45	11,5	1,94	0,989

Tab.33.7: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Hea mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Hea						
	-	K1	K2	A1	A2	K2C1	K2C0
ml Sw 74 Wo	11709	7760	5308	6413	5424	2330	
ml Sw 30 Wo	5909	4720	3028	3753	2824	120	
NAP	0,222	0,053	0,148	0,119	0,130	0,015	
ACE	0,322	0,133	0,031	0,078	0,091	0,005	
FLU	0,005	0,004	0,003	0,006	0,005	0,003	
PHE	0,617	0,162	0,036	0,123	0,096	0,016	
ANT	0,060	0,058	0,007	0,011	0,011	0,008	
FLA	3,36	1,40	0,451	0,517	0,256	0,338	
PYR	3,38	1,35	0,411	0,521	0,286	0,297	
BaANT	2,07	0,902	0,234	0,356	0,173	0,231	
CHR	2,84	1,08	0,272	0,407	0,244	0,242	
BbFLA	2,36	0,931	0,197	0,353	0,170	0,107	
BkFLA	1,01	0,404	0,083	0,150	0,076	0,038	
BaPYR	0,291	0,246	0,045	0,093	0,043	0,027	
DBahANT	0,194	0,081	0,029	0,040	0,028	0,005	
BghiPER	0,551	0,233	0,046	0,093	0,047	0,020	
IPYR	0,662	0,264	0,044	0,103	0,048	0,021	
Σ-Austrag	17,9	7,31	2,04	2,97	1,70	1,37	
Σ-EPA µg /l	16,4	8,36	3,63	4,27	3,26	61,8	
Σ-TVO µg /l	7,52	3,98	1,55	1,88	1,22	24,8	

Tab.33.8a: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Heb mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg /kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Heb						
	Variante	-	K1	K2	A1	A2	G1
ml Sw 74 Wo	11688	8288	6630	5347	6057	4711	4070
ml Sw 30 Wo	4478	4138	4060	3217	3727	3211	3000
NAP	0,193	0,158	0,502	0,737	1,57	1,04	0,282
ACE	0,072	0,011	1,34	7,90	1,29	2,63	5,29
FLU	0,001	0,002	0,171	0,108	0,107	0,354	4,42
PHE	0,320	0,027	0,258	0,228	0,023	0,237	0,179
ANT	0,023	0,001	0,042	0,032	0,010	0,059	0,025
FLA	1,42	0,068	0,186	0,047	0,045	0,175	0,113
PYR	1,93	0,072	0,217	0,050	0,016	0,257	0,156
BaANT	1,68	0,063	0,171	0,065	0,035	0,210	0,114
CHR	1,71	0,065	0,219	0,127	0,097	0,292	0,156
BbFLA	0,809	0,075	0,151	0,083	0,054	0,179	0,103
BkFLA	0,356	0,034	0,066	0,039	0,028	0,083	0,051
BaPYR	0,093	0,020	0,034	0,016	0,008	0,036	0,029
DBahANT	0,057	0,003	n.n.	n.n.	n.n.	0,002	0,002
BghiPER	0,138	0,021	0,019	0,016	0,006	0,023	0,019
IPYR	0,191	0,019	0,021	0,021	0,008	0,033	0,025
Σ-Austrag	9,00	0,638	3,39	9,47	3,29	5,61	11,0
Σ-EPA µg /l	10,9	0,833	4,51	15,9	4,76	9,44	19,7
Σ-TVO µg /l	3,63	0,309	0,632	0,372	0,215	0,892	0,613

Tab.33.8b: Austrag von PAK aus den Varianten der Gefäßversuche der Bodenprobe Heb mit dem Sickerwasser einschließlich der an mittransportierte Bodenfeststoffe gebundene PAK-Anteile(Sw) infolge natürlicher Niederschläge (16.06.93 - 12.01.94 = 30 Wochen; µg/kg) und durchschnittliche PAK-Konzentrationen im Sickerwasser nach US-EPA-Liste und TVO (µg /l)

Boden	Heb								
Variante	-	K1T	K2T	A1T	A2T	K1G	K1P	K1S	K2T/b
ml Sw 74 Wo	11688	8638	8852	9203	7171	6967	9730	9088	7385
ml Sw 30 Wo	4478	4218	4362	4506	4373	2937	4590	5318	3255
NAP	0,193	0,565	0,884	0,909	28,3	0,783	1,60	1,26	0,772
ACE	0,072	10,6	0,547	11,2	30,9	0,494	1,15	0,612	9,83
FLU	0,001	9,06	3,62	4,19	0,319	0,007	0,034	0,008	3,57
PHE	0,320	0,364	0,349	0,455	0,103	0,147	0,241	0,112	0,379
ANT	0,023	0,049	0,069	0,068	0,084	0,059	0,035	0,026	0,057
FLA	1,42	0,119	0,146	0,338	0,209	0,462	1,37	0,502	0,071
PYR	1,93	0,138	0,204	0,392	0,216	0,510	1,76	0,603	0,098
BaANT	1,68	0,094	0,164	0,209	0,327	0,346	0,928	0,430	0,066
CHR	1,71	0,130	0,229	0,294	0,519	0,412	1,35	0,606	0,093
BbFLA	0,809	0,127	0,166	0,194	0,240	0,299	0,784	0,311	0,086
BkFLA	0,356	0,058	0,071	0,082	0,109	0,134	0,368	0,123	0,039
BaPYR	0,093	0,025	0,028	0,040	0,038	0,059	0,171	0,063	0,015
DBahANT	0,057	0,004	0,004	0,004	0,004	0,007	0,035	0,010	0,004
BghiPER	0,138	0,024	0,026	0,030	0,023	0,052	0,148	0,055	0,016
IPYR	0,191	0,025	0,028	0,033	0,029	0,059	0,176	0,051	0,020
Σ-Austrag	9,00	21,4	6,54	18,4	61,4	3,83	10,1	4,77	15,1
Σ-EPA µg /l	10,9	27,4	8,09	22,1	75,8	7,04	11,9	4,84	25,1
Σ-TVO µg /l	3,63	0,482	0,576	0,861	0,801	1,96	3,55	1,12	0,410

Tab.34.1:PAK-Gehalte der Bodenproben aller Standorte vom 16.06.93 (Beginn der Gefäßversuche) (mg/kg Boden; Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probé		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac	Mittelw.	42,13	116,38	46,31	208,26	80,69	198,77	154,72	97,66	93,63	57,07	28,05
	StdAbw.	0,466	7,710	1,260	9,754	3,018	8,984	7,706	4,207	4,103	0,563	0,752
Bo	Mittelw.	19,27	87,15	11,88	80,25	27,39	233,96	212,79	108,28	115,50	113,71	42,51
	StdAbw.	3,451	1,858	0,275	4,588	1,179	9,270	7,364	4,334	3,222	3,390	0,333
Dd	Mittelw.	4,42	12,13	0,888	14,99	5,23	29,31	23,33	16,41	16,94	13,27	6,79
	StdAbw.	0,428	1,383	0,047	0,364	0,190	1,596	0,760	0,928	0,714	0,175	0,171
Ge	Mittelw.	6,62	13,55	3,85	13,54	6,73	17,03	11,38	11,35	18,39	9,60	3,96
	StdAbw.	3,931	0,373	0,583	1,104	0,535	1,089	1,169	0,179	0,706	0,282	0,219
Ko	Mittelw.	0,957	1,36	n.n.	8,55	4,58	28,51	21,87	16,21	19,17	18,15	7,25
	StdAbw.	0,152	0,607		0,200	0,682	0,340	0,195	0,333	2,896	1,220	0,608
Ra	Mittelw.	72,38	62,58	5,13	68,48	29,14	147,35	109,65	88,86	98,82	66,73	30,50
	StdAbw.	6,577	3,178	0,964	8,008	4,908	4,166	6,173	3,727	1,047	1,589	0,916
So	Mittelw.	0,570	6,04	1,03	3,61	2,79	14,05	12,26	10,03	11,49	10,98	5,37
	StdAbw.	0,371	1,035	0,243	0,178	0,409	0,536	0,791	0,528	0,938	0,416	0,126
Üb	Mittelw.	19,09	25,89	57,02	113,04	17,39	30,88	16,89	8,58	10,15	6,27	2,59
	StdAbw.	2,177	1,991	5,240	5,439	2,110	1,901	0,859	0,451	0,811	0,415	0,187
Hea	Mittelw.	1,90	1,92	1,49	11,40	3,02	38,91	37,91	9,16	11,94	7,89	3,51
	StdAbw.	0,316	0,074	0,049	0,142	0,236	0,133	0,220	0,072	0,116	0,289	0,096
Heb	Mittelw.	1,10	0,875	0,387	2,60	6,23	10,00	16,22	3,49	4,83	2,44	1,15
	StdAbw.	0,093	0,061	0,041	0,236	0,311	0,160	0,478	0,138	0,115	0,139	0,040
Probe		BaPYR	BahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac	Mittelw.	64,77	17,06	40,06	40,48	42,13	451,63	544,78	166,94	80,54	1286,0	1243,9
	StdAbw.	4,175	1,085	2,869	2,203							
Bo	Mittelw.	93,12	22,07	62,28	69,90	19,27	206,67	670,52	271,40	132,19	1300,1	1280,8
	StdAbw.	4,990	2,958	4,030	1,294							
Dd	Mittelw.	13,14	2,44	7,88	9,76	4,42	33,24	85,99	35,64	17,64	176,93	172,51
	StdAbw.	0,741	0,473	0,596	0,422							
Ge	Mittelw.	8,38	2,69	4,51	6,93	6,62	37,68	58,15	24,63	11,44	138,52	131,90
	StdAbw.	0,141	0,557	0,577	0,387							
Ko	Mittelw.	14,73	3,19	10,18	13,86	0,957	14,49	85,76	43,32	24,05	168,57	167,61
	StdAbw.	1,274	0,066	0,471	1,567							
Ra	Mittelw.	67,49	15,66	38,39	57,80	72,38	165,33	444,68	180,37	96,18	958,94	886,56
	StdAbw.	2,301	2,184	2,694	3,164							
So	Mittelw.	14,02	3,28	8,10	11,25	0,570	13,46	47,84	33,65	19,35	114,87	114,30
	StdAbw.	0,403	0,533	0,727	1,322							
Üb	Mittelw.	3,88	0,957	2,50	2,78	19,09	213,34	66,49	13,70	5,28	317,90	298,81
	StdAbw.	0,252	0,099	0,177	0,250							
Hea	Mittelw.	4,19	0,886	3,98	2,76	1,90	17,83	97,91	16,47	6,74	140,85	138,95
	StdAbw.	0,059	0,041	0,102	0,063							
Heb	Mittelw.	0,902	0,212	1,01	0,660	1,10	10,09	34,54	4,71	1,67	52,10	51,00
	StdAbw.	0,023	0,013	0,033	0,024							

Tab.34.2.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ac vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac-	Mittelw.	29,820	96,775	43,213	235,729	63,501	201,737	163,364	86,092	104,244	54,711	28,538
	StdAbw	3,646	12,348	11,889	35,820	3,822	11,789	7,868	4,905	9,428	4,571	1,461
AcK1	Mittelw.	26,605	94,132	43,191	214,380	59,458	190,869	147,661	84,660	101,968	53,593	28,936
	StdAbw	1,508	1,264	2,516	4,074	1,254	1,780	3,641	3,764	2,744	1,107	0,507
AcK2	Mittelw.	28,058	108,477	48,739	219,061	68,060	209,672	171,210	96,879	118,804	60,458	28,306
	StdAbw	1,005	1,599	1,723	8,053	2,041	5,648	6,129	3,274	7,362	2,676	1,487
AcA1	Mittelw.	34,983	91,707	42,197	236,004	59,806	193,254	151,931	90,915	99,941	59,426	27,691
	StdAbw	2,975	14,423	12,062	33,347	5,353	4,335	0,981	2,218	3,975	2,125	1,774
AcA2	Mittelw.	29,675	78,326	34,223	184,939	61,141	178,312	139,259	83,355	89,021	51,718	25,080
	StdAbw	0,725	13,145	14,870	27,978	14,282	14,344	6,133	9,014	7,138	4,690	1,604
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac-	Mittelw.	66,941	19,126	40,784	42,579	29,820	439,218	555,437	169,315	83,363	1277,152	1247,332
	StdAbw	3,393	0,493	1,513	0,550							
AcK1	Mittelw.	66,040	18,449	38,567	37,975	26,605	411,161	525,158	165,018	76,542	1204,485	1177,880
	StdAbw	1,069	0,976	0,719	1,553							
AcK2	Mittelw.	68,450	20,416	39,827	41,777	28,058	444,338	596,565	177,630	81,603	1328,195	1300,136
	StdAbw	4,454	1,040	1,122	1,933							
AcA1	Mittelw.	62,919	15,760	36,697	42,147	34,983	429,714	536,041	165,796	78,844	1245,378	1210,395
	StdAbw	3,993	2,968	4,641	1,690							
AcA2	Mittelw.	57,906	16,162	35,970	38,449	29,675	358,629	489,947	150,865	74,418	1103,535	1073,860
	StdAbw	5,490	1,203	1,456	2,960							

Tab.34.2.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ac vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac-	Mittelw.	16,368	66,395	19,912	116,729	58,626	170,013	163,702	93,082	88,302	60,037	26,890
	StdAbw	1,450	3,750	2,561	4,673	5,441	6,560	4,264	2,186	3,408	1,527	1,137
AcK1	Mittelw.	10,978	80,285	22,385	140,539	37,085	166,581	150,140	82,823	68,337	56,994	28,705
	StdAbw	3,199	6,026	5,898	11,318	2,686	5,863	2,778	1,234	3,499	0,682	0,315
AcK2	Mittelw.	18,532	58,552	16,606	108,422	38,815	143,718	117,706	61,963	58,743	52,509	23,590
	StdAbw	2,030	3,025	0,792	4,056	2,382	4,036	2,225	3,847	3,211	1,300	1,021
AcA1	Mittelw.	22,097	60,506	16,481	121,213	35,839	164,559	136,503	69,460	64,511	53,315	26,077
	StdAbw	1,037	2,590	1,114	8,088	4,577	4,732	3,286	6,763	4,726	2,308	0,403
AcA2	Mittelw.	18,914	66,460	15,479	131,095	40,400	159,989	132,972	71,561	66,855	54,006	26,178
	StdAbw	3,121	2,448	2,001	4,394	4,056	9,452	7,649	2,316	3,979	1,580	0,615
Ac-Hg	Mittelw.	12,316	63,700	50,438	250,157	166,393	170,691	194,337	80,466	100,863	46,451	31,801
	StdAbw	4,795	3,848	1,535	18,451	7,354	3,394	8,934	5,224	4,653	3,344	1,762
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac-	Mittelw.	69,082	18,217	37,602	45,384	16,368	261,662	515,098	174,226	82,986	1050,341	1033,973
	StdAbw	1,401	0,578	0,677	2,815							
AcK1	Mittelw.	66,006	17,761	41,398	39,160	10,978	280,293	467,881	169,466	80,558	1009,176	998,198
	StdAbw	2,698	1,102	1,918	2,855							
AcK2	Mittelw.	50,906	14,613	33,850	32,064	18,532	222,396	382,130	141,618	65,914	830,589	812,057
	StdAbw	1,714	0,995	1,428	1,314							
AcA1	Mittelw.	55,513	17,249	36,941	34,847	22,097	234,039	435,033	152,154	71,787	915,109	893,013
	StdAbw	2,685	1,951	1,006	0,472							
AcA2	Mittelw.	52,378	16,053	35,817	33,976	18,914	253,435	431,377	148,615	69,793	922,134	903,220
	StdAbw	3,687	0,962	1,688	1,597							
Ac-Hg	Mittelw.	64,431	10,386	41,722	32,360	12,316	530,688	546,356	153,070	74,083	1316,513	1304,197
	StdAbw	5,069	0,651	1,730	1,907							

Tab.34.2.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ac vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac-	Mittelw.	16,225	65,257	16,518	128,742	66,138	190,612	166,527	97,576	101,319	62,223	32,349
	StdAbw	2,609	0,758	0,586	4,349	5,266	3,593	5,337	3,163	0,555	1,114	1,292
AcK1	Mittelw.	13,277	60,835	14,546	117,627	54,249	182,043	156,225	94,850	101,329	57,643	31,778
	StdAbw	2,794	2,322	1,430	5,189	1,323	3,102	2,048	2,358	2,563	2,859	1,761
AcK2	Mittelw.	14,361	62,076	15,728	109,649	57,738	165,239	137,805	88,592	94,673	59,616	30,253
	StdAbw	1,073	5,809	3,092	13,141	2,426	2,669	4,204	1,469	1,435	1,939	1,292
AcA1	Mittelw.	12,797	61,959	13,917	128,617	58,197	188,870	157,334	108,796	110,292	59,893	31,675
	StdAbw	1,147	4,715	0,104	1,124	4,368	7,726	4,389	3,985	0,750	2,402	0,901
AcA2	Mittelw.	n.n.	10,828	13,540	129,072	46,582	178,490	141,083	111,028	121,779	69,494	28,500
	StdAbw		0,197	0,105	2,696	0,278	6,036	0,817	3,490	5,589	1,156	0,832
Ac-Hg	Mittelw.	0,926	6,029	51,196	274,103	154,595	206,910	216,245	83,191	104,037	49,420	32,557
	StdAbw	0,118	0,640	3,614	7,464	1,150	1,311	1,852	0,344	1,221	0,131	0,078
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac-	Mittelw.	78,364	14,299	37,192	52,269	16,225	276,655	556,033	187,235	89,461	1125,609	1109,384
	StdAbw	5,864	1,543	3,490	1,306							
AcK1	Mittelw.	78,092	13,962	36,724	51,016	13,277	247,257	534,447	181,475	87,740	1064,197	1050,920
	StdAbw	2,243	2,844	3,986	2,433							
AcK2	Mittelw.	68,728	12,932	35,194	50,328	14,361	245,191	486,308	171,530	85,522	1002,912	988,551
	StdAbw	2,753	1,337	1,578	2,235							
AcA1	Mittelw.	71,931	14,363	37,525	53,652	12,797	262,690	565,293	177,861	91,177	1109,818	1097,021
	StdAbw	1,631	0,544	1,996	4,009							
AcA2	Mittelw.	64,031	13,606	41,112	56,479	n.n.	200,022	552,380	175,630	97,591	1025,623	1025,623
	StdAbw	5,577	0,597	1,003	1,992							
Ac-Hg	Mittelw.	66,003	10,490	42,617	34,949	0,926	485,924	610,384	158,470	77,566	1333,269	1332,343
	StdAbw	0,309	0,413	1,096	0,133							

Tab.34.2.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ac vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac-	Mittelw.	n.n.	1,402	17,574	89,524	45,204	185,216	153,001	59,910	93,391	70,820	28,227
	StdAbw		0,041	0,493	0,868	1,382	3,850	4,627	0,773	2,462	0,271	0,926
AcK1	Mittelw.	n.n.	1,407	18,697	76,590	47,054	171,931	135,994	58,794	88,457	66,558	26,928
	StdAbw		0,278	1,903	9,009	1,425	3,887	2,838	1,519	2,350	0,976	0,475
AcK2	Mittelw.	n.n.	1,259	20,356	85,617	48,653	175,909	133,533	59,665	98,836	69,541	27,489
	StdAbw		0,110	0,814	2,429	0,326	4,101	3,153	1,150	1,803	1,269	0,561
AcA1	Mittelw.	n.n.	1,709	20,299	84,340	47,636	179,650	142,177	60,669	99,781	71,676	27,220
	StdAbw		0,696	1,876	5,303	22,464	5,870	7,742	1,261	0,832	1,649	0,911
AcA2	Mittelw.	n.n.	1,092	17,243	75,905	42,359	160,166	120,863	56,399	88,972	63,317	25,310
	StdAbw		0,160	1,392	7,240	0,578	1,646	2,108	1,159	1,453	2,047	0,436
Ac-Hg	Mittelw.	4,509	4,443	32,541	236,075	143,449	169,809	172,631	79,056	102,285	46,738	30,961
	StdAbw	0,114	0,467	1,267	8,025	1,898	2,443	4,957	1,987	0,478	0,807	0,330
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac-	Mittelw.	71,001	10,438	40,974	55,655	n.n.	153,704	491,517	180,486	96,629	922,336	922,336
	StdAbw	1,822	0,695	1,942	2,655							
AcK1	Mittelw.	65,547	10,912	39,762	49,533	n.n.	143,747	455,177	169,945	89,296	858,165	858,165
	StdAbw	0,968	1,264	0,421	0,518							
AcK2	Mittelw.	68,910	11,932	42,949	53,343	n.n.	155,885	467,943	177,872	96,291	897,993	897,993
	StdAbw	0,226	1,142	1,016	0,787							
AcA1	Mittelw.	69,348	12,380	41,621	57,747	n.n.	153,984	482,277	180,624	99,368	916,254	916,254
	StdAbw	2,586	0,109	1,094	2,165							
AcA2	Mittelw.	63,275	11,224	37,332	50,476	n.n.	136,598	426,400	163,126	87,808	813,932	813,932
	StdAbw	0,973	0,402	0,785	0,632							
Ac-Hg	Mittelw.	68,147	10,111	48,395	38,696	4,509	416,509	523,782	155,958	87,091	1187,848	1183,339
	StdAbw	2,668	0,271	1,476	0,286							

Tab.34.2.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ac vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac-	Mittelw.	n.n.	0,861	14,276	60,970	43,455	180,892	144,002	58,480	92,307	64,113	29,922
	StdAbw		0,113	1,110	4,978	2,608	5,561	2,463	1,001	2,362	2,131	0,464
AcK1	Mittelw.	n.n.	1,132	19,865	77,861	47,965	180,034	136,671	57,661	93,310	71,347	28,612
	StdAbw		0,119	0,824	3,093	0,501	3,360	1,576	1,229	2,201	1,219	0,339
AcK2	Mittelw.	n.n.	1,315	18,614	80,991	46,346	195,269	148,931	62,353	97,003	70,254	28,189
	StdAbw		0,260	1,637	10,347	0,646	1,210	1,208	1,254	1,619	2,400	0,638
AcA1	Mittelw.	5,679	1,036	19,706	83,566	46,724	184,052	138,095	62,397	101,028	72,797	27,215
	StdAbw	2,677	0,107	2,024	4,495	2,544	4,899	3,262	1,050	2,451	1,026	0,954
AcA2	Mittelw.	n.n.	2,371	33,158	115,890	60,389	198,023	144,907	58,789	83,069	58,033	25,510
	StdAbw		1,119	4,260	12,665	3,386	4,876	3,952	1,294	3,096	1,444	1,019
Ac-Hg	Mittelw.	n.n.	5,654	48,426	235,912	164,087	156,626	186,193	73,265	91,426	44,062	29,013
	StdAbw		0,366	1,895	2,312	4,998	3,395	4,092	2,387	1,985	0,852	0,998
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac-	Mittelw.	64,723	12,640	41,805	55,900	n.n.	119,562	475,680	171,398	97,705	864,345	864,345
	StdAbw	0,630	1,033	0,279	1,195							
AcK1	Mittelw.	76,104	11,629	42,249	45,972	n.n.	146,823	467,676	187,691	88,221	890,411	890,411
	StdAbw	0,994	0,743	0,284	4,817							
AcK2	Mittelw.	69,477	11,695	41,505	55,095	n.n.	147,265	503,556	179,616	96,600	927,037	927,037
	StdAbw	0,975	1,561	0,223	1,171							
AcA1	Mittelw.	72,535	11,673	42,196	58,898	5,679	151,032	485,571	184,219	101,094	927,594	921,916
	StdAbw	0,598	0,161	0,854	2,479							
AcA2	Mittelw.	59,669	10,832	36,198	46,860	n.n.	211,808	484,788	154,044	83,058	933,698	933,698
	StdAbw	0,635	1,002	0,876	2,488							
Ac-Hg	Mittelw.	58,976	7,954	41,019	29,719	n.n.	454,079	507,510	140,005	70,738	1172,332	1172,332
	StdAbw	2,341	0,335	0,802	0,484							

Tab.34.2.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ac vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac-	Mittelw.	n.n.	2,446	13,247	67,137	98,337	107,204	147,223	62,478	88,039	45,935	27,022
	StdAbw		0,433	0,502	2,251	6,117	1,861	2,970	1,724	5,006	1,384	0,823
AcK1	Mittelw.	n.n.	2,307	14,491	70,485	90,503	106,757	136,424	57,496	77,703	47,079	25,518
	StdAbw		0,191	0,270	5,737	2,006	1,186	3,134	1,308	1,213	1,034	0,594
AcK2	Mittelw.	n.n.	1,704	13,609	60,735	88,199	96,777	126,214	55,354	77,104	42,070	23,950
	StdAbw		0,168	1,343	7,673	4,571	4,104	7,657	2,941	3,348	2,217	1,825
AcA1	Mittelw.	n.n.	1,565	10,958	54,491	84,554	94,666	122,644	53,542	74,807	47,650	24,656
	StdAbw		0,213	0,465	3,129	2,583	1,975	1,644	1,215	3,593	1,856	0,711
AcA2	Mittelw.	n.n.	1,682	14,017	66,974	98,999	109,488	144,005	62,788	86,093	52,206	27,898
	StdAbw		0,206	1,474	5,144	1,732	3,629	2,421	0,049	1,043	0,643	0,296
Ac-Hg	Mittelw.	n.n.	3,739	37,904	239,925	162,094	173,918	198,017	86,412	108,717	48,972	33,698
	StdAbw		0,495	1,922	4,074	1,400	1,675	3,107	0,313	0,857	0,604	0,297
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac-	Mittelw.	71,718	10,523	49,802	32,476	n.n.	181,168	404,945	155,198	82,278	823,589	823,589
	StdAbw	4,281	0,266	2,178	1,257							
AcK1	Mittelw.	63,850	9,541	48,090	31,019	n.n.	177,786	378,380	145,988	79,109	781,263	781,263
	StdAbw	1,382	0,133	1,565	0,754							
AcK2	Mittelw.	64,180	9,361	44,894	28,760	n.n.	164,246	355,449	139,561	73,654	732,910	732,910
	StdAbw	2,762	0,294	1,922	1,261							
AcA1	Mittelw.	59,511	9,058	43,545	28,822	n.n.	151,567	345,660	140,874	72,367	710,469	710,469
	StdAbw	2,716	0,347	1,911	0,841							
AcA2	Mittelw.	65,460	9,854	49,423	33,097	n.n.	181,672	402,374	155,418	82,520	821,984	821,984
	StdAbw	1,037	0,347	0,473	0,420							
Ac-Hg	Mittelw.	69,562	9,414	47,353	33,961	n.n.	443,662	567,063	161,646	81,314	1253,685	1253,685
	StdAbw	0,575	0,293	2,395	0,194							

Tab.34.2.7: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ac vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac-	Mittelw.	n.n.	2,171	12,048	72,398	101,916	108,242	140,189	65,014	92,539	51,974	24,691
	StdAbw		0,199	0,565	0,691	0,581	2,735	1,655	1,237	4,718	0,997	2,391
AcK1	Mittelw.	n.n.	1,560	10,378	68,912	93,742	98,607	134,612	61,725	80,741	50,039	21,512
	StdAbw		0,076	0,507	1,921	4,092	7,780	2,779	1,743	1,763	0,942	1,719
AcK2	Mittelw.	n.n.	1,671	12,919	67,769	92,933	93,406	121,867	55,308	75,678	40,479	21,140
	StdAbw		0,128	0,651	3,550	2,739	2,594	4,628	2,248	1,935	1,394	0,547
AcA1	Mittelw.	n.n.	1,288	11,606	65,861	91,055	96,040	129,424	57,585	78,841	42,674	24,072
	StdAbw		0,202	1,068	4,220	1,700	1,457	0,993	0,727	1,381	1,310	0,245
AcA2	Mittelw.	n.n.	1,901	13,711	72,616	104,198	97,864	144,063	63,254	88,855	46,357	24,726
	StdAbw		0,058	0,138	2,027	1,502	4,570	3,824	2,267	2,833	1,451	2,033
Ac-Hg	Mittelw.	n.n.	4,533	36,332	249,795	161,997	166,687	207,052	84,155	101,576	51,304	33,238
	StdAbw		0,277	0,956	3,961	2,196	2,331	2,641	0,915	1,916	1,084	0,451
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac-	Mittelw.	70,829	9,027	52,014	35,782	n.n.	188,534	405,984	156,521	87,796	838,834	838,834
	StdAbw	2,052	0,096	3,144	0,145							
AcK1	Mittelw.	66,283	8,886	51,409	33,888	n.n.	174,592	375,685	146,720	85,297	782,294	782,294
	StdAbw	2,879	0,642	1,039	1,295							
AcK2	Mittelw.	60,039	9,997	44,572	28,176	n.n.	175,291	346,259	131,655	72,748	725,953	725,953
	StdAbw	3,087	0,219	1,558	0,774							
AcA1	Mittelw.	62,401	10,633	46,922	29,192	n.n.	169,811	361,891	139,780	76,113	747,595	747,595
	StdAbw	1,005	0,090	0,472	0,235							
AcA2	Mittelw.	67,753	11,490	52,596	32,297	n.n.	192,425	394,035	150,327	84,894	821,681	821,681
	StdAbw	1,016	0,672	0,990	0,775							
Ac-Hg	Mittelw.	63,617	9,695	47,034	33,153	n.n.	452,657	559,470	157,853	80,187	1250,168	1250,168
	StdAbw	3,111	0,832	2,489	0,730							

Tab.34.3.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Bo vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Bo-	Mittelw.	15,126	87,343	8,462	60,367	32,342	212,902	159,752	107,983	96,764	108,873	43,261
	StdAbw	3,551	4,478	1,184	4,821	5,538	0,849	1,231	3,128	2,328	1,439	1,057
BoK1	Mittelw.	2,413	71,134	6,976	51,800	20,623	179,287	144,189	95,944	88,579	98,341	43,959
	StdAbw	0,949	5,483	1,235	5,407	1,640	10,136	7,893	4,224	2,570	1,912	2,022
BoK2	Mittelw.	1,881	84,640	8,777	70,275	24,487	212,970	165,376	115,515	106,910	115,000	47,566
	StdAbw	0,135	0,761	1,518	3,155	1,664	4,199	0,491	3,438	1,342	6,189	1,505
BoA1	Mittelw.	1,826	77,541	7,371	57,166	21,512	192,228	153,108	104,158	95,656	98,278	43,715
	StdAbw	0,454	1,262	1,095	4,218	1,565	2,811	2,714	2,870	3,183	2,149	1,541
BoA2	Mittelw.	18,783	85,934	8,423	65,465	24,785	185,760	147,292	102,999	92,427	109,204	43,343
	StdAbw	7,736	13,280	1,096	9,311	3,067	11,626	2,708	2,920	2,930	2,882	1,030
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Bo-	Mittelw.	84,045	23,555	67,938	82,389	15,126	188,514	577,400	259,733	150,327	1191,100	1175,974
	StdAbw	0,975	0,033	1,603	1,569							
BoK1	Mittelw.	75,383	22,567	66,353	75,784	2,413	150,532	508,000	240,250	142,138	1043,333	1040,920
	StdAbw	3,450	3,308	0,929	2,799							
BoK2	Mittelw.	90,161	25,012	72,034	85,495	1,881	188,180	600,771	277,738	157,530	1226,099	1224,219
	StdAbw	2,446	0,370	1,171	1,776							
BoA1	Mittelw.	85,455	22,228	66,522	78,983	1,826	163,590	545,150	249,677	145,505	1105,747	1103,921
	StdAbw	2,185	0,922	2,587	3,104							
BoA2	Mittelw.	77,109	23,002	66,338	80,986	18,783	184,608	528,478	252,659	147,324	1131,851	1113,068
	StdAbw	5,439	2,667	4,110	3,800							

Tab.34.3.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Bo vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Bo-	Mittelw.	17,322	80,606	8,517	70,030	30,291	204,558	153,990	112,751	99,105	113,576	43,981
	StdAbw	8,932	12,877	1,927	0,357	0,251	4,069	1,934	10,962	2,431	2,668	0,313
BoK1	Mittelw.	34,461	107,266	15,769	79,968	34,594	226,545	176,222	118,515	113,321	120,507	51,013
	StdAbw	3,198	3,422	0,993	3,885	4,131	7,068	4,383	4,867	3,674	4,451	1,353
BoK2	Mittelw.	19,989	89,242	10,941	68,800	27,142	253,103	153,968	112,836	100,750	109,109	43,440
	StdAbw	4,974	3,456	2,412	0,743	2,059	7,353	1,171	4,279	0,837	2,432	0,796
BoA1	Mittelw.	12,610	68,627	7,883	65,985	30,309	203,156	157,005	110,390	108,370	112,790	46,474
	StdAbw	8,023	4,025	0,274	4,432	2,190	11,204	8,373	8,323	8,499	9,407	2,713
BoA2	Mittelw.	10,624	65,289	7,744	64,016	31,349	208,361	156,497	106,267	106,404	109,597	44,244
	StdAbw	4,658	3,469	0,468	2,492	4,067	6,301	3,164	4,214	2,676	2,211	0,812
Bo-Hg	Mittelw.	7,235	55,363	6,241	61,144	123,440	195,349	187,398	102,440	110,603	93,862	45,264
	StdAbw	0,646	1,063	0,072	3,567	7,738	6,056	2,574	3,780	7,583	2,829	1,435
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Bo-	Mittelw.	80,494	21,023	64,447	79,020	17,322	189,444	570,404	259,074	143,467	1179,711	1162,389
	StdAbw	2,873	3,324	1,350	3,576							
BoK1	Mittelw.	97,337	27,811	77,433	91,098	34,461	237,597	634,603	296,668	168,532	1371,861	1337,400
	StdAbw	4,504	1,167	4,540	3,238							
BoK2	Mittelw.	82,117	25,464	69,026	81,398	19,989	196,126	620,657	260,130	150,425	1247,326	1227,337
	StdAbw	3,236	0,513	1,499	1,924							
BoA1	Mittelw.	88,359	20,666	66,446	89,397	12,610	172,805	578,922	268,290	155,843	1188,469	1175,859
	StdAbw	4,860	0,201	2,052	6,716							
BoA2	Mittelw.	84,606	18,531	59,896	85,473	10,624	168,399	577,529	256,979	145,369	1158,899	1148,275
	StdAbw	4,547	1,704	1,886	5,084							
Bo-Hg	Mittelw.	78,763	13,209	58,972	61,705	7,235	246,188	595,791	231,098	120,677	1200,989	1193,754
	StdAbw	0,696	2,052	1,096	1,220							

Tab.34.3.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Bo vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Bo-	Mittelw.	7,066	66,887	8,610	62,306	26,429	208,028	155,660	107,386	108,427	109,398	45,534
	StdAbw	3,431	1,547	0,753	1,697	0,970	4,032	4,187	2,837	3,523	1,612	1,076
BoK1	Mittelw.	7,062	15,723	4,883	83,733	33,893	200,670	143,808	113,435	115,855	114,558	45,230
	StdAbw	8,432	3,802	0,375	4,959	1,389	1,097	0,036	0,930	1,829	1,090	1,811
BoK2	Mittelw.	7,824	16,183	5,180	86,017	31,621	210,004	149,705	113,776	116,493	111,947	44,289
	StdAbw	4,720	2,201	0,435	10,301	1,565	0,583	1,608	1,436	0,962	1,314	0,701
BoA1	Mittelw.	6,777	13,870	4,677	80,085	28,519	210,378	149,050	115,851	120,094	112,872	46,298
	StdAbw	5,185	3,906	0,822	12,214	1,347	0,374	0,742	2,136	3,074	1,358	2,501
BoA2	Mittelw.	16,855	19,509	5,389	93,022	27,957	196,179	143,674	108,859	109,289	106,464	44,765
	StdAbw	3,496	0,858	0,149	10,079	0,852	3,972	1,761	1,206	2,162	0,396	1,520
Bo-Hg	Mittelw.	11,965	6,785	7,272	72,009	125,538	211,182	199,859	106,636	114,035	94,579	46,038
	StdAbw	7,777	0,610	0,448	2,410	4,528	8,270	6,976	4,051	3,783	3,521	1,399
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Bo-	Mittelw.	88,678	20,527	67,873	86,306	7,066	164,231	579,501	264,136	154,179	1169,114	1162,048
	StdAbw	3,738	1,390	3,536	1,817							
BoK1	Mittelw.	85,681	17,235	65,046	96,810	7,062	138,232	573,768	262,705	161,856	1143,622	1136,561
	StdAbw	4,714	0,264	0,339	2,592							
BoK2	Mittelw.	88,985	18,113	67,129	101,508	7,824	139,000	589,978	263,334	168,637	1168,772	1160,949
	StdAbw	7,740	1,312	1,348	4,442							
BoA1	Mittelw.	84,253	19,670	66,769	95,295	6,777	127,151	595,374	263,093	162,064	1154,459	1147,682
	StdAbw	7,411	1,019	1,954	2,898							
BoA2	Mittelw.	80,345	18,878	65,813	86,231	16,855	145,876	558,001	250,452	152,045	1123,230	1106,375
	StdAbw	4,416	0,314	0,695	3,675							
Bo-Hg	Mittelw.	85,184	15,642	63,560	65,834	11,965	211,604	631,712	241,442	129,394	1226,118	1214,153
	StdAbw	5,260	3,419	1,236	2,585							

Tab.34.3.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Bo vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Bo-	Mittelw.	6,420	6,520	6,439	54,612	47,332	181,580	183,739	97,853	113,636	99,763	45,242
	StdAbw	2,336	0,075	0,237	1,821	2,983	4,389	6,465	3,144	5,020	4,564	1,431
BoK1	Mittelw.	8,965	6,201	5,764	51,609	44,599	178,842	179,761	95,422	108,266	99,389	44,323
	StdAbw	4,937	1,203	0,729	5,166	0,897	3,865	4,835	2,868	4,980	2,426	1,340
BoK2	Mittelw.	13,219	6,239	2,417	52,416	36,052	171,344	176,599	91,427	103,933	94,565	41,065
	StdAbw	2,958	0,301	0,151	3,577	0,628	6,228	7,600	6,666	6,446	7,987	2,507
BoA1	Mittelw.	8,119	5,387	2,205	44,427	32,086	160,802	171,362	88,170	101,208	88,991	39,992
	StdAbw	4,345	0,785	0,320	1,700	4,383	6,960	8,212	3,631	6,601	4,828	1,690
BoA2	Mittelw.	4,014	5,480	5,091	42,880	30,830	170,748	174,306	93,302	106,044	90,770	42,460
	StdAbw	1,861	0,520	0,415	3,063	1,085	3,494	4,951	1,914	2,383	2,428	1,025
Bo-Hg	Mittelw.	1,869	5,267	6,619	79,737	126,817	217,687	210,508	117,876	124,413	108,596	51,299
	StdAbw	1,364	0,369	0,421	5,348	0,501	3,980	2,781	1,637	2,112	2,057	1,104
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Bo-	Mittelw.	79,686	9,875	60,266	68,129	6,420	114,902	576,808	234,566	128,395	1061,091	1054,671
	StdAbw	5,416	0,369	0,536	3,686							
BoK1	Mittelw.	79,058	10,053	65,138	67,869	8,965	108,173	562,291	232,824	133,007	1045,259	1036,294
	StdAbw	2,363	0,451	4,934	2,399							
BoK2	Mittelw.	63,007	9,305	59,645	60,864	13,219	97,125	543,303	207,943	120,509	982,099	968,880
	StdAbw	3,939	0,163	6,215	4,472							
BoA1	Mittelw.	70,118	9,200	59,125	58,222	8,119	84,104	521,542	208,301	117,347	939,414	931,295
	StdAbw	2,183	0,445	3,782	2,965							
BoA2	Mittelw.	74,864	9,608	59,527	61,963	4,014	84,281	544,400	217,703	121,490	971,888	967,874
	StdAbw	2,152	0,314	0,931	1,525							
Bo-Hg	Mittelw.	87,633	13,978	78,315	76,898	1,869	218,441	670,484	261,507	155,214	1307,514	1305,645
	StdAbw	2,393	0,673	1,638	0,763							

Tab.34.3.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Bo vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Bo-	Mittelw.	4,570	7,300	6,532	57,536	39,589	206,815	200,279	110,338	123,274	109,227	49,853
	StdAbw	0,259	0,589	0,426	2,857	3,167	3,090	5,042	2,461	2,587	2,809	1,055
BoK1	Mittelw.	1,321	5,956	5,826	54,528	39,477	188,945	182,724	104,943	119,015	105,213	47,920
	StdAbw	0,386	0,718	0,432	1,101	3,486	5,810	8,268	2,525	3,709	2,341	1,063
BoK2	Mittelw.	1,092	4,989	5,443	50,896	36,182	180,008	181,242	97,130	110,931	100,807	43,953
	StdAbw	0,958	1,415	0,257	3,691	1,479	3,085	6,290	1,064	1,676	1,231	0,710
BoA1	Mittelw.	3,132	6,571	6,412	57,643	39,520	193,096	193,998	104,142	118,364	108,048	47,110
	StdAbw	1,736	0,566	0,419	1,998	1,305	1,207	0,980	0,534	1,604	0,348	0,256
BoA2	Mittelw.	6,133	5,972	6,240	48,618	32,634	180,707	183,630	98,229	110,490	101,887	45,276
	StdAbw	2,902	2,815	2,988	22,919	15,399	85,261	86,674	46,367	52,144	48,147	21,361
Bo-Hg	Mittelw.	2,208	5,779	6,013	68,516	123,187	196,779	196,244	104,270	106,173	96,317	45,987
	StdAbw	1,869	0,665	0,366	3,303	2,609	4,221	3,560	1,059	2,394	1,581	0,176
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Bo-	Mittelw.	85,169	11,012	65,390	73,093	4,570	110,957	640,706	255,261	138,483	1149,977	1145,407
	StdAbw	4,065	0,582	0,851	1,355							
BoK1	Mittelw.	83,248	10,823	67,096	70,400	1,321	105,788	595,628	247,204	137,496	1087,437	1086,116
	StdAbw	0,791	0,349	2,899	1,836							
BoK2	Mittelw.	77,087	9,942	61,935	64,939	1,092	97,509	569,311	231,789	126,874	1026,576	1025,483
	StdAbw	1,578	0,629	0,427	1,199							
BoA1	Mittelw.	78,782	10,533	64,206	67,874	3,132	110,146	609,600	244,474	132,080	1099,432	1096,300
	StdAbw	2,162	0,734	2,270	0,670							
BoA2	Mittelw.	71,798	9,518	63,310	65,504	6,133	93,465	573,056	228,479	128,814	1029,947	1023,814
	StdAbw	33,921	4,545	30,140	30,887							
Bo-Hg	Mittelw.	81,735	11,573	61,415	66,143	2,208	203,495	603,465	235,612	127,559	1172,338	1170,130
	StdAbw	2,390	1,127	2,247	0,777							

Tab.34.3.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Bo vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Bo-	Mittelw.	9,316	6,663	5,201	62,721	81,164	191,841	185,285	105,854	105,897	115,752	44,160
	StdAbw	5,283	0,518	0,288	6,721	3,216	2,476	1,498	2,970	0,957	6,800	1,492
BoK1	Mittelw.	6,490	4,282	3,313	39,847	63,491	137,189	151,444	87,243	94,740	101,117	36,542
	StdAbw	8,607	1,566	0,541	2,236	7,821	10,308	0,529	0,859	6,299	2,940	0,947
BoK2	Mittelw.	6,849	5,723	4,549	49,033	77,189	165,808	169,491	96,632	102,909	109,404	36,612
	StdAbw	7,126	0,912	0,501	3,995	0,715	3,763	3,082	2,001	1,472	1,862	2,843
BoA1	Mittelw.	2,567	4,696	4,223	46,117	88,545	164,521	174,258	103,659	106,518	110,943	40,856
	StdAbw	3,630	0,900	0,704	6,080	5,087	7,448	7,229	4,760	3,605	6,160	2,403
BoA2	Mittelw.	0,000	3,467	3,482	43,751	82,552	158,351	167,114	92,966	102,048	105,996	35,903
	StdAbw	0,000	0,909	0,210	1,980	3,990	2,540	3,016	1,143	5,567	0,914	2,032
Bo-Hg	Mittelw.	13,584	6,559	6,036	70,531	116,410	194,130	183,159	100,456	104,710	91,849	43,536
	StdAbw	5,048	0,709	0,389	1,836	4,047	4,384	0,192	1,807	1,189	0,340	0,606
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Bo-	Mittelw.	94,824	14,926	91,446	70,207	9,316	155,749	588,877	269,662	161,653	1185,257	1175,942
	StdAbw	7,619	0,248	1,102	0,591							
BoK1	Mittelw.	87,335	13,246	75,834	64,185	6,490	110,933	470,616	238,239	140,020	966,299	959,809
	StdAbw	1,704	0,526	1,446	0,481							
BoK2	Mittelw.	92,865	13,581	80,823	66,707	6,849	136,494	534,840	252,462	147,530	1078,175	1071,326
	StdAbw	2,860	0,602	0,455	0,879							
BoA1	Mittelw.	99,181	13,513	81,984	69,995	2,567	143,582	548,957	264,494	151,979	1111,578	1109,011
	StdAbw	1,271	1,150	1,865	1,732							
BoA2	Mittelw.	87,659	13,225	75,154	65,553	0,000	133,251	520,479	242,784	140,707	1037,221	1037,221
	StdAbw	1,940	0,620	0,785	2,039							
Bo-Hg	Mittelw.	72,457	13,187	59,327	58,466	13,584	199,536	582,455	221,028	117,793	1134,396	1120,812
	StdAbw	1,869	2,332	2,272	0,719							

Tab.34.3.7: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Bo vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Bo-	Mittelw.	n.n.	3,389	4,641	46,866	104,714	177,412	171,774	102,683	106,452	91,535	44,814
	StdAbw		0,264	0,224	1,784	3,768	0,281	0,323	0,841	0,941	2,013	0,675
BoK1	Mittelw.	0,501	4,197	4,985	46,383	93,660	155,495	150,084	91,599	94,548	82,377	39,990
	StdAbw	0,421	0,435	0,387	4,029	7,811	5,537	5,058	1,575	2,035	1,717	1,833
BoK2	Mittelw.	n.n.	3,709	4,380	44,494	88,701	162,294	155,960	92,587	94,489	83,950	41,027
	StdAbw		0,442	0,337	2,578	3,040	2,527	2,196	1,382	2,143	0,423	0,478
BoA1	Mittelw.	n.n.	3,857	4,524	41,853	99,280	157,628	152,777	95,112	97,446	85,240	42,769
	StdAbw		0,483	0,371	2,003	7,495	2,591	2,241	1,074	1,283	1,875	0,284
BoA2	Mittelw.	n.n.	4,262	5,358	49,145	107,226	170,707	165,165	100,313	102,876	86,837	44,166
	StdAbw		0,269	0,216	1,559	4,394	2,718	2,753	0,800	0,295	0,412	0,321
Bo-Hg	Mittelw.	10,778	5,694	5,216	64,788	104,237	162,973	173,851	89,129	90,926	81,118	38,494
	StdAbw	6,201	0,786	0,184	2,787	3,191	11,886	5,218	3,126	2,269	3,726	1,259
Bo-2	Mittelw.	7,867	4,861	5,197	48,073	108,692	157,078	157,247	91,568	96,089	82,326	41,290
	StdAbw	3,458	0,146	0,336	2,113	7,900	3,972	4,072	1,882	2,628	0,719	0,496
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Bo-	Mittelw.	88,349	12,047	63,118	67,595	n.n.	159,609	558,322	236,745	130,713	1085,389	1085,389
	StdAbw	2,814	0,961	2,336	1,323							
BoK1	Mittelw.	80,312	10,702	55,661	63,062	0,501	149,226	491,725	213,381	118,723	973,556	973,055
	StdAbw	1,491	1,002	3,261	1,144							
BoK2	Mittelw.	78,247	10,535	56,585	62,555	n.n.	141,285	505,330	213,760	119,141	979,515	979,515
	StdAbw	0,573	0,591	0,742	0,487							
BoA1	Mittelw.	82,334	11,294	56,477	62,694	n.n.	149,514	502,964	221,638	119,172	993,288	993,288
	StdAbw	0,351	0,795	1,901	0,262							
BoA2	Mittelw.	84,144	12,477	57,846	63,865	n.n.	165,990	539,061	227,624	121,711	1054,386	1054,386
	StdAbw	0,309	0,726	1,675	0,891							
Bo-Hg	Mittelw.	70,830	10,216	52,588	53,371	10,778	179,935	516,879	200,659	105,960	1014,211	1003,433
	StdAbw	1,933	0,840	1,074	1,295							
Bo-2	Mittelw.	80,402	10,972	55,155	61,305	7,867	166,822	501,982	214,991	116,460	1008,122	1000,255
	StdAbw	1,831	0,480	1,292	1,527							

Tab.34.4.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Dd vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Dd-	Mittelw.	n.n.	0,656	0,797	10,936	3,690	29,168	20,447	10,323	23,699	14,337	6,454
	StdAbw		0,191	0,104	0,899	0,317	2,311	1,356	0,613	1,873	0,770	0,387
DdK1	Mittelw.	n.n.	0,609	0,701	10,708	3,644	28,629	18,906	9,539	20,374	12,108	5,550
	StdAbw		0,044	0,078	0,631	0,174	3,118	1,940	0,556	0,321	0,358	0,149
DdK2	Mittelw.	n.n.	0,709	0,830	10,935	3,699	27,347	17,492	8,875	20,629	11,568	5,279
	StdAbw		0,070	0,164	1,339	0,426	2,010	1,300	0,543	1,278	1,175	0,411
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Dd-	Mittelw.	11,000	1,695	7,296	10,974	n.n.	16,080	83,637	33,486	18,270	151,473	151,473
	StdAbw	0,601	0,047	0,261	0,299							
DdK1	Mittelw.	9,731	1,547	6,978	10,085	n.n.	15,662	77,448	28,935	17,063	139,108	139,108
	StdAbw	0,514	0,233	0,481	0,243							
DdK2	Mittelw.	9,598	1,521	6,556	9,297	n.n.	16,174	74,343	27,966	15,853	134,335	134,335
	StdAbw	0,992	0,060	0,578	0,460							

Tab.34.4.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Dd vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Dd-	Mittelw.	0,534	1,061	1,602	12,314	4,561	23,539	30,546	13,811	18,812	16,134	7,579
	StdAbw	0,504	0,541	0,776	5,835	2,150	11,133	14,416	6,579	8,928	7,699	3,626
DdK1	Mittelw.	0,222	0,822	2,199	13,853	4,808	20,275	27,872	11,361	15,386	13,509	6,168
	StdAbw	0,125	0,387	1,143	6,702	2,300	9,571	13,213	5,355	7,254	6,380	2,910
DdK2	Mittelw.	n.b.	0,994	1,181	11,388	4,085	21,348	26,586	12,147	16,364	14,637	6,563
	StdAbw	0,079	0,225	0,122	1,636	0,345	3,494	2,853	1,403	1,395	0,564	0,231
Dd-Hg	Mittelw.	1,113	0,911	1,819	12,830	15,257	20,779	25,926	12,160	15,365	9,810	6,384
	StdAbw	0,094	0,011	0,482	1,734	0,526	1,581	2,345	0,757	0,982	0,381	0,297
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Dd-	Mittelw.	11,120	1,811	9,890	8,000	0,534	19,538	86,708	36,645	17,890	161,315	160,780
	StdAbw	5,273	0,861	4,730	3,805							
DdK1	Mittelw.	9,867	1,590	7,694	6,897	0,222	21,681	74,894	31,134	14,591	142,524	142,301
	StdAbw	4,654	0,750	3,631	3,261							
DdK2	Mittelw.	10,272	1,536	8,351	7,185	n.b.	17,648	76,444	33,008	15,537	142,716	142,637
	StdAbw	0,709	0,166	0,328	0,271							
Dd-Hg	Mittelw.	9,137	1,405	6,819	5,720	1,113	30,817	74,230	26,736	12,539	145,435	144,322
	StdAbw	0,569	0,043	0,129	0,182							

Tab.34.4.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Dd vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Dd-	Mittelw.	0,706	0,774	0,646	6,624	4,199	26,025	18,909	14,273	14,795	12,515	7,013
	StdAbw	0,876	0,059	0,104	0,306	0,364	2,056	1,158	0,751	1,161	0,399	0,659
DdK1	Mittelw.	0,744	0,670	0,663	6,054	3,890	25,170	18,428	14,948	14,358	12,711	6,992
	StdAbw	0,351	0,089	0,129	0,464	0,254	1,500	0,416	0,437	0,469	0,334	0,112
DdK2	Mittelw.	1,013	0,847	0,846	6,470	4,813	26,103	20,221	16,218	15,435	13,232	7,108
	StdAbw	0,478	0,183	0,195	0,632	0,741	0,835	0,688	0,753	0,930	0,415	0,456
Dd-Hg	Mittelw.	0,892	0,747	1,196	13,010	22,598	29,715	31,482	15,416	18,287	11,517	7,190
	StdAbw	0,064	0,036	0,170	0,487	2,169	0,124	1,154	0,032	0,387	0,163	0,029
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Dd-	Mittelw.	9,388	1,954	7,113	10,740	0,706	12,244	74,003	30,871	17,852	135,677	134,971
	StdAbw	0,551	0,267	0,359	0,613							
DdK1	Mittelw.	9,313	2,040	7,001	10,468	0,744	11,277	72,905	31,056	17,469	133,450	132,707
	StdAbw	0,239	0,110	0,111	0,786							
DdK2	Mittelw.	10,581	2,161	8,092	10,925	1,013	12,976	77,977	33,081	19,017	144,064	143,051
	StdAbw	0,916	0,249	0,315	0,561							
Dd-Hg	Mittelw.	9,835	1,638	8,602	7,405	0,892	37,552	94,900	30,180	16,007	179,530	178,638
	StdAbw	0,008	0,172	0,709	0,694							

Tab.34.4.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Dd vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Dd-	Mittelw.	n.b.	1,007	1,230	19,722	4,063	29,916	23,069	17,970	18,569	15,332	6,722
	StdAbw	0,087	0,271	0,601	0,468	0,609	1,718	1,453	0,161	0,558	0,343	0,456
DdK1	Mittelw.	n.n.	0,714	0,607	5,975	5,143	26,858	19,425	15,469	15,029	12,773	6,831
	StdAbw		0,054	0,073	0,517	0,301	1,723	0,766	0,798	0,853	0,172	0,409
DdK2	Mittelw.	n.n.	0,675	0,608	12,123	2,752	25,590	19,098	15,902	16,158	13,860	6,046
	StdAbw		0,023	0,099	0,390	0,448	0,743	0,914	0,460	0,673	0,832	0,454
Dd-Hg	Mittelw.	0,261	1,062	0,901	7,479	6,567	31,939	22,621	18,134	17,068	14,647	7,305
	StdAbw	0,124	0,330	0,273	1,022	1,436	4,203	2,664	1,369	0,645	1,002	0,173
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Dd-	Mittelw.	11,485	2,885	8,126	13,465	n.b.	26,022	89,524	36,424	21,591	173,746	173,561
	StdAbw	0,758	0,375	0,336	0,773							
DdK1	Mittelw.	10,092	2,047	7,325	10,605	n.n.	12,438	76,782	31,742	17,930	138,892	138,892
	StdAbw	0,296	0,149	0,212	0,656							
DdK2	Mittelw.	10,039	1,906	6,028	11,899	n.n.	16,158	76,748	31,852	17,927	142,686	142,686
	StdAbw	0,645	0,127	0,079	0,847							
Dd-Hg	Mittelw.	10,617	2,222	7,756	10,857	0,261	16,009	89,762	34,791	18,613	159,436	159,175
	StdAbw	0,878	0,171	0,725	0,553							

Tab.34.4.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Dd vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Dd-	Mittelw.	n.b.	0,898	1,138	11,164	4,044	21,062	26,668	11,945	16,351	14,315	6,847
	StdAbw	0,070	0,067	0,029	0,777	0,161	1,042	1,007	0,355	0,460	0,281	0,055
DdK1	Mittelw.	n.b.	0,954	1,275	10,766	3,819	20,272	26,646	11,337	15,218	14,261	6,548
	StdAbw	0,030	0,119	0,237	1,350	0,256	1,094	1,341	0,284	0,355	0,615	0,145
DdK2	Mittelw.	n.b.	0,734	0,800	9,045	3,230	18,524	22,071	11,236	14,976	13,384	5,937
	StdAbw	0,101	0,099	0,102	0,510	0,481	1,547	0,337	0,548	0,613	0,616	0,266
Dd-Hg	Mittelw.	n.n.	0,711	1,339	12,217	4,559	21,245	25,746	13,060	16,163	10,393	6,616
	StdAbw		0,037	0,265	0,524	0,595	0,763	0,183	0,694	0,972	0,521	0,092
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Dd-	Mittelw.	11,047	1,682	9,313	7,717	n.b.	17,244	76,026	33,891	17,030	144,290	144,192
	StdAbw	0,099	0,039	0,364	0,058							
DdK1	Mittelw.	9,937	1,244	9,013	6,647	n.b.	16,814	73,473	31,990	15,660	137,979	137,938
	StdAbw	0,129	0,071	0,320	0,186							
DdK2	Mittelw.	10,267	1,208	8,713	6,417	n.b.	13,809	66,806	30,796	15,130	126,623	126,542
	StdAbw	0,231	0,123	0,927	0,532							
Dd-Hg	Mittelw.	9,538	1,459	7,753	6,375	n.n.	18,826	76,214	28,006	14,128	137,174	137,174
	StdAbw	0,174	0,117	0,944	0,749							

Tab.34.4.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Dd vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Dd-	Mittelw.	n.n.	0,674	1,056	9,118	13,646	17,609	21,456	11,322	14,170	10,922	5,569
	StdAbw		0,141	0,195	0,847	0,415	0,358	0,470	0,588	0,361	0,136	0,119
DdK1	Mittelw.	n.n.	0,665	0,703	7,261	12,216	15,402	18,418	9,847	12,454	9,475	5,060
	StdAbw		0,133	0,070	0,342	0,565	0,988	0,987	0,631	0,576	0,079	0,149
DdK2	Mittelw.	n.n.	0,439	0,826	6,925	10,795	14,110	16,558	8,475	10,700	8,423	4,434
	StdAbw		0,058	0,244	0,391	0,255	0,860	1,248	0,579	0,595	0,242	0,167
Dd-Hg	Mittelw.	n.n.	0,775	1,608	12,943	10,123	22,440	25,187	12,720	15,599	10,140	6,697
	StdAbw		0,053	0,131	0,461	0,749	1,429	1,328	0,613	0,812	0,515	0,334
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Dd-	Mittelw.	10,029	1,680	9,653	6,966	n.n.	24,493	64,557	28,201	16,619	133,870	133,870
	StdAbw	0,430	0,070	0,567	0,309							
DdK1	Mittelw.	8,762	1,476	8,087	6,264	n.n.	20,845	56,121	24,774	14,350	116,091	116,091
	StdAbw	0,332	0,030	0,350	0,231							
DdK2	Mittelw.	7,379	1,057	7,028	5,174	n.n.	18,985	49,842	21,293	12,201	102,321	102,321
	StdAbw	0,383	0,048	0,171	0,186							
Dd-Hg	Mittelw.	8,942	1,465	7,200	5,952	n.n.	25,449	75,946	27,243	13,152	141,790	141,790
	StdAbw	0,590	0,090	0,428	0,318							

Tab.34.4.7: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Dd vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Dd-	Mittelw.	n.n.	0,705	0,962	7,780	14,882	18,380	22,044	12,146	14,290	11,585	5,285
	StdAbw		0,020	0,031	1,029	0,687	0,676	0,368	0,151	0,211	0,480	0,176
DdK1	Mittelw.	n.n.	0,744	1,055	9,507	15,278	17,196	21,497	11,863	14,249	11,186	5,305
	StdAbw		0,090	0,072	1,013	1,556	0,767	1,615	0,520	0,336	0,122	0,476
DdK2	Mittelw.	n.n.	0,890	1,373	10,502	17,825	19,522	22,676	12,127	14,194	11,494	5,345
	StdAbw		0,120	0,111	2,182	2,620	0,961	1,245	0,220	0,441	0,632	0,320
Dd-Hg	Mittelw.	n.n.	0,622	0,827	9,992	15,274	20,394	22,230	11,468	13,824	9,433	5,621
	StdAbw		0,075	0,073	0,380	1,121	1,019	0,723	0,461	0,442	0,096	0,150
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Dd-	Mittelw.	10,672	1,857	10,371	7,144	n.n.	24,328	66,861	29,398	17,515	138,103	138,103
	StdAbw	0,469	0,047	0,674	0,464							
DdK1	Mittelw.	10,517	1,874	9,509	6,262	n.n.	26,584	64,806	28,881	15,771	136,042	136,042
	StdAbw	0,401	0,129	0,281	0,290							
DdK2	Mittelw.	10,376	1,795	10,249	6,702	n.n.	30,590	68,519	29,011	16,952	145,071	145,071
	StdAbw	0,288	0,136	0,342	0,197							
Dd-Hg	Mittelw.	6,816	1,133	6,173	4,802	n.n.	26,716	67,916	23,003	10,974	128,609	128,609
	StdAbw	0,374	0,107	0,437	0,336							

Tab.34.5.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ge vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ge-	Mittelw.	10,228	0,576	3,146	10,519	10,469	17,276	12,223	10,964	23,395	14,202	4,951
	StdAbw	7,212	0,131	0,299	0,955	2,566	1,265	0,841	0,513	1,700	0,704	0,308
GeK1	Mittelw.	6,120	0,651	2,658	9,548	7,032	14,387	9,643	9,105	18,059	12,666	4,142
	StdAbw	1,559	0,058	0,095	0,703	1,111	0,924	0,438	0,365	1,094	0,090	0,110
GeK2	Mittelw.	7,871	0,580	2,703	9,416	9,900	15,350	10,400	10,148	21,689	12,402	4,369
	StdAbw	6,300	0,145	0,169	1,026	0,406	0,478	0,407	0,135	0,419	0,128	0,132
GeA1	Mittelw.	2,275	0,556	2,726	8,980	12,539	15,843	10,727	9,416	21,086	12,569	4,300
	StdAbw	2,166	0,134	0,573	2,515	7,096	2,683	1,365	1,167	4,044	0,767	0,349
GeA2	Mittelw.	2,725	0,415	1,934	8,002	7,446	12,554	8,786	8,642	17,990	11,600	3,864
	StdAbw	2,292	0,086	0,797	0,016	0,786	0,517	0,264	0,122	0,557	0,269	0,091
GeK2T	Mittelw.	5,267	0,525	2,511	7,924	7,225	12,301	8,491	8,616	18,898	11,595	4,127
	StdAbw	2,774	0,056	0,136	0,802	0,529	1,079	0,674	0,623	1,233	0,596	0,206
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ge-	Mittelw.	10,724	2,107	6,293	7,917	10,228	24,709	63,858	31,984	14,211	144,990	134,762
	StdAbw	0,826	0,326	0,280	0,981							
GeK1	Mittelw.	9,353	1,667	5,283	7,809	6,120	19,889	51,194	27,828	13,092	118,122	112,003
	StdAbw	0,086	0,139	0,128	0,019							
GeK2	Mittelw.	10,397	2,098	5,499	8,081	7,871	22,599	57,588	29,266	13,581	130,904	123,033
	StdAbw	0,222	0,106	0,128	0,085							
GeA1	Mittelw.	9,693	1,938	5,328	7,183	2,275	24,801	57,072	28,500	12,511	125,160	122,885
	StdAbw	0,595	0,174	0,183	0,488							
GeA2	Mittelw.	9,043	1,845	5,202	7,608	2,725	17,797	47,972	26,353	12,810	107,657	104,932
	StdAbw	0,324	0,055	0,096	0,675							
GeK2T	Mittelw.	9,123	1,898	5,226	6,483	5,267	18,185	48,306	26,743	11,709	110,210	104,943
	StdAbw	0,484	0,082	0,135	0,803							

Tab.34.5.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ge vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ge-	Mittelw.	2,875	0,399	2,342	7,138	6,489	13,296	9,101	8,536	16,422	11,500	3,725
	StdAbw	2,210	0,096	0,462	1,263	0,185	1,043	0,684	0,352	0,522	0,128	0,153
GeK1	Mittelw.	18,324	0,672	3,037	10,587	7,612	13,845	9,348	9,420	19,357	11,872	4,239
	StdAbw	2,803	0,115	0,059	0,470	0,133	1,266	0,706	0,427	0,414	0,154	0,099
GeK2	Mittelw.	14,121	0,589	2,919	9,046	8,346	13,130	8,847	8,611	18,321	11,369	4,033
	StdAbw	9,425	0,095	0,223	1,034	0,977	0,666	0,397	0,292	0,216	0,059	0,094
GeA1	Mittelw.	3,597	0,522	2,751	8,949	7,357	16,514	11,201	9,621	19,055	12,732	4,412
	StdAbw	2,764	0,072	0,183	0,831	0,949	1,097	0,604	0,379	0,621	0,138	0,064
GeA2	Mittelw.	8,524	0,518	2,693	8,425	6,786	15,751	10,605	9,490	18,760	12,438	4,219
	StdAbw	5,209	0,046	0,142	0,194	0,276	1,841	0,998	0,577	0,901	0,312	0,248
GeA2T	Mittelw.	4,909	0,649	2,618	6,958	6,785	12,307	8,405	8,043	16,722	10,768	3,645
	StdAbw	2,080	0,082	0,062	0,145	0,191	0,742	0,509	0,427	0,909	0,297	0,095
Ge-Hg	Mittelw.	2,737	6,060	2,945	11,861	13,717	12,758	13,017	10,525	18,725	8,737	4,506
	StdAbw	0,723	0,572	0,112	0,896	1,568	0,413	1,891	1,019	1,852	0,308	0,180
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ge-	Mittelw.	8,389	1,626	5,029	6,595	2,875	16,368	47,354	25,241	11,624	103,462	100,588
	StdAbw	0,138	0,107	0,036	0,599							
GeK1	Mittelw.	9,249	1,827	5,270	7,330	18,324	21,907	51,970	27,187	12,600	131,988	113,664
	StdAbw	0,175	0,024	0,078	0,163							
GeK2	Mittelw.	8,760	1,628	4,950	6,910	14,121	20,899	48,909	25,789	11,861	121,579	107,458
	StdAbw	0,063	0,096	0,082	0,215							
GeA1	Mittelw.	10,562	1,901	5,418	6,924	3,597	19,578	56,390	29,606	12,342	121,513	117,916
	StdAbw	0,482	0,112	0,144	0,122							
GeA2	Mittelw.	10,031	1,890	5,116	6,569	8,524	18,423	54,606	28,578	11,685	121,816	113,293
	StdAbw	0,238	0,159	0,138	0,278							
GeA2T	Mittelw.	8,778	1,649	4,552	6,631	4,909	17,011	45,478	24,839	11,183	103,420	98,511
	StdAbw	0,371	0,083	0,041	0,262							
Ge-Hg	Mittelw.	7,361	2,610	4,807	4,610	2,737	34,584	55,025	23,214	9,417	124,977	122,240
	StdAbw	0,454	0,153	0,106	0,056							

Tab.34.5.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ge vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ge-	Mittelw.	14,042	1,134	3,302	11,458	9,640	9,918	11,706	9,893	18,106	9,091	4,358
	StdAbw	9,125	0,474	0,576	1,462	0,191	0,159	0,451	0,276	0,650	0,211	0,070
GeK1	Mittelw.	7,560	0,973	2,861	8,844	7,236	7,776	10,054	9,084	17,655	9,683	4,278
	StdAbw	3,630	0,462	1,366	4,169	3,451	3,678	4,742	4,283	8,327	4,565	2,017
GeK2	Mittelw.	0,973	0,670	2,490	8,938	7,291	9,977	12,626	10,256	18,232	10,567	4,551
	StdAbw	0,617	0,071	0,216	0,951	0,711	1,379	1,731	0,655	0,892	0,760	0,226
GeA1	Mittelw.	12,195	1,006	2,846	10,689	7,257	9,872	12,411	9,913	19,163	10,282	4,694
	StdAbw	6,304	0,093	0,119	0,241	0,196	0,468	0,345	0,278	0,840	0,294	0,182
GeA2	Mittelw.	3,912	0,674	2,638	10,948	8,789	10,111	12,919	10,389	21,434	10,981	5,038
	StdAbw	2,435	0,194	0,353	0,742	0,956	0,388	0,435	0,213	1,101	0,191	0,080
GeK2T	Mittelw.	2,640	0,674	2,651	8,732	8,131	8,857	11,111	9,294	18,313	9,664	4,608
	StdAbw	1,738	0,195	0,339	0,891	1,109	0,837	0,699	0,512	1,231	0,205	0,120
Ge-Hg	Mittelw.	5,943	0,627	2,836	10,512	11,122	11,322	10,853	8,497	15,706	7,472	4,045
	StdAbw	2,435	0,101	0,206	0,622	1,276	1,351	0,644	0,639	1,705	0,247	0,172
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ge-	Mittelw.	6,486	1,639	5,330	4,416	14,042	25,535	49,623	21,574	9,746	120,521	106,479
	StdAbw	0,620	0,038	0,441	0,309							
GeK1	Mittelw.	6,511	1,680	5,174	4,761	7,560	19,913	44,569	22,152	9,935	104,129	96,569
	StdAbw	3,170	0,794	2,439	2,244							
GeK2	Mittelw.	7,050	1,740	5,710	5,282	0,973	19,389	51,091	23,908	10,992	106,353	105,380
	StdAbw	1,207	0,037	0,378	0,187							
GeA1	Mittelw.	7,570	1,779	5,410	5,043	12,195	21,798	51,358	24,325	10,453	120,130	107,935
	StdAbw	0,416	0,058	0,225	0,312							
GeA2	Mittelw.	9,514	1,867	5,201	5,545	3,912	23,049	54,853	27,399	10,746	119,960	116,047
	StdAbw	0,064	0,039	0,187	0,129							
GeK2T	Mittelw.	7,733	1,790	5,264	4,878	2,640	20,189	47,575	23,795	10,142	104,341	101,701
	StdAbw	0,681	0,075	0,215	0,328							
Ge-Hg	Mittelw.	5,318	1,403	4,354	4,322	5,943	25,097	46,378	18,239	8,675	104,333	98,390
	StdAbw	0,211	0,180	0,043	0,078							

Tab.34.5.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ge vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ge-	Mittelw.	8,290	0,921	3,299	12,707	8,828	11,886	14,126	11,250	20,332	9,140	5,151
	StdAbw	5,088	0,139	0,354	1,341	0,170	0,186	0,219	0,387	1,242	0,281	0,184
GeK1	Mittelw.	12,005	0,768	2,412	8,677	7,515	8,423	10,600	8,609	16,022	8,799	3,925
	StdAbw	7,808	0,258	0,431	1,251	0,788	0,632	0,562	0,475	1,027	0,443	0,137
GeK2	Mittelw.	5,031	0,847	2,666	9,621	6,622	9,740	11,523	9,235	16,711	8,901	4,285
	StdAbw	1,445	0,056	0,272	0,809	0,452	1,286	1,201	0,339	1,029	0,161	0,100
GeA1	Mittelw.	8,792	0,645	2,375	8,939	7,185	9,525	11,874	9,513	18,111	9,974	4,639
	StdAbw	4,228	0,307	0,705	1,448	0,389	0,964	0,682	0,392	1,427	0,304	0,109
GeA2	Mittelw.	6,290	0,641	2,711	9,805	14,307	12,181	9,931	9,347	16,507	7,894	4,381
	StdAbw	3,576	0,302	1,278	4,693	6,807	5,794	4,724	4,441	7,822	3,723	2,072
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ge-	Mittelw.	10,196	1,877	5,810	5,264	8,290	25,755	57,593	26,365	11,074	129,077	120,788
	StdAbw	1,138	0,081	0,473	0,374							
GeK1	Mittelw.	7,058	1,493	4,329	4,252	12,005	19,373	43,654	21,274	8,581	104,886	92,881
	StdAbw	0,722	0,101	0,247	0,429							
GeK2	Mittelw.	5,623	1,596	5,342	4,149	5,031	19,756	47,210	20,405	9,491	101,892	96,861
	StdAbw	0,129	0,064	0,310	0,083							
GeA1	Mittelw.	7,731	1,728	5,337	4,537	8,792	19,143	49,023	24,072	9,874	110,904	102,112
	StdAbw	0,420	0,006	0,390	0,024							
GeA2	Mittelw.	7,702	2,553	4,741	4,944	6,290	27,465	47,965	22,530	9,685	113,935	107,645
	StdAbw	3,645	1,254	2,243	2,333							

Tab.34.5.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ge vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ge-	Mittelw.	3,917	0,776	2,292	9,757	10,049	7,403	10,350	8,761	16,405	8,166	3,950
	StdAbw	1,688	0,116	0,170	1,334	0,506	0,254	0,778	0,530	1,298	0,264	0,221
GeK1	Mittelw.	5,742	0,803	2,238	9,772	12,077	7,812	10,511	8,486	15,283	8,847	3,805
	StdAbw	3,845	0,044	0,115	0,976	1,119	0,565	0,889	0,373	0,584	0,441	0,171
GeK2	Mittelw.	1,564	0,586	1,706	8,223	9,284	7,412	10,149	7,864	13,483	7,940	3,557
	StdAbw	0,669	0,157	0,253	0,527	1,211	0,000	0,155	0,236	0,960	0,981	0,214
GeA1	Mittelw.	9,258	0,911	2,311	9,063	12,260	7,932	10,880	9,027	16,382	9,499	4,072
	StdAbw	1,683	0,008	0,086	0,086	1,031	0,241	0,427	0,357	0,664	0,088	0,120
GeA2	Mittelw.	5,570	0,829	2,212	9,403	11,669	6,892	9,894	8,343	15,512	8,552	3,636
	StdAbw	1,703	0,018	0,044	0,453	0,345	0,503	0,669	0,341	0,871	0,346	0,005
GeK2T	Mittelw.	4,430	0,819	2,323	9,828	12,625	6,947	9,938	8,694	16,812	9,076	3,966
	StdAbw	3,859	0,143	0,157	0,903	0,740	0,212	0,222	0,293	1,017	0,248	0,062
Ge-Hg	Mittelw.	6,427	0,652	2,594	12,363	14,400	13,687	11,906	10,011	18,022	8,077	4,218
	StdAbw	2,405	0,187	0,315	0,907	0,246	0,988	0,564	0,619	1,899	0,170	0,147
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ge-	Mittelw.	7,298	1,886	5,983	4,256	3,917	22,874	42,918	21,301	10,239	101,249	97,332
	StdAbw	0,540	0,105	0,363	0,272							
GeK1	Mittelw.	6,992	1,906	5,974	4,091	5,742	24,891	42,092	21,550	10,065	104,339	98,598
	StdAbw	0,120	0,058	0,163	0,115							
GeK2	Mittelw.	6,273	1,668	5,370	3,703	1,564	19,798	38,908	19,439	9,073	88,782	87,218
	StdAbw	0,421	0,185	0,430	0,380							
GeA1	Mittelw.	7,535	1,994	6,546	4,525	9,258	24,545	44,221	23,100	11,071	112,195	102,938
	StdAbw	0,225	0,021	0,011	0,028							
GeA2	Mittelw.	7,168	1,897	6,000	4,016	5,570	24,113	40,642	21,252	10,016	101,592	96,022
	StdAbw	0,145	0,047	0,118	0,044							
GeK2T	Mittelw.	7,375	2,023	6,321	4,347	4,430	25,595	42,391	22,441	10,668	105,525	101,095
	StdAbw	0,218	0,075	0,147	0,055							
Ge-Hg	Mittelw.	7,147	1,491	4,436	4,474	6,427	30,009	53,625	20,934	8,910	119,905	113,478
	StdAbw	0,080	0,141	0,105	0,079							

Tab.34.5.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ge vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ge-	Mittelw.	5,654	0,789	2,143	7,900	9,417	6,339	8,635	7,957	15,783	9,176	3,524
	StdAbw	3,454	0,104	0,094	0,216	1,302	0,694	0,911	0,758	0,702	1,149	0,291
GeK1	Mittelw.	9,122	0,737	2,053	6,634	9,693	5,601	7,892	7,174	15,244	8,627	3,545
	StdAbw	5,583	0,121	0,216	0,315	0,412	0,351	0,361	0,379	0,372	0,285	0,244
GeK2	Mittelw.	2,956	0,664	1,910	6,607	10,255	5,249	7,652	7,029	15,370	8,293	3,641
	StdAbw	1,674	0,076	0,155	0,167	1,494	0,287	0,419	0,376	0,990	0,302	0,167
GeA1	Mittelw.	5,050	0,696	2,363	8,398	13,731	10,368	9,350	8,439	19,051	8,863	3,990
	StdAbw	2,696	0,048	0,290	0,598	0,473	2,160	1,008	0,685	1,721	0,533	0,331
GeA2	Mittelw.	3,420	0,702	1,989	6,933	10,779	7,941	8,501	7,528	16,248	9,192	3,551
	StdAbw	1,080	0,025	0,032	0,458	0,612	1,817	0,770	0,491	1,077	0,245	0,196
GeK2T	Mittelw.	0,588	0,456	1,711	6,861	10,883	7,561	8,820	7,865	16,645	9,321	3,939
	StdAbw	0,832	0,113	0,157	0,669	1,474	1,092	1,103	0,875	2,333	0,597	0,242
Ge-Hg	Mittelw.	12,354	0,820	2,994	12,980	15,981	16,686	12,812	11,212	19,699	9,028	4,592
	StdAbw	0,487	0,049	0,134	0,644	0,327	0,288	0,948	0,292	0,619	0,386	0,174
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ge-	Mittelw.	7,065	1,888	6,255	4,452	5,654	20,249	38,713	21,654	10,707	96,978	91,324
	StdAbw	0,646	0,068	0,486	0,340							
GeK1	Mittelw.	6,609	1,874	5,907	4,341	9,122	19,117	35,911	20,656	10,247	95,054	85,932
	StdAbw	0,144	0,101	0,113	0,119							
GeK2	Mittelw.	6,339	1,805	5,674	4,069	2,956	19,437	35,300	20,078	9,743	87,513	84,557
	StdAbw	0,200	0,052	0,086	0,117							
GeA1	Mittelw.	7,454	1,984	6,160	4,425	5,050	25,187	47,208	22,291	10,585	110,322	105,272
	StdAbw	0,266	0,148	0,415	0,274							
GeA2	Mittelw.	6,416	1,798	5,300	4,287	3,420	20,403	40,218	20,957	9,586	94,584	91,164
	StdAbw	0,356	0,078	0,203	0,057							
GeK2T	Mittelw.	6,769	1,929	6,049	4,699	0,588	19,910	40,892	21,958	10,747	94,097	93,508
	StdAbw	0,642	0,126	0,350	0,277							
Ge-Hg	Mittelw.	7,621	1,883	5,113	4,743	12,354	32,776	60,409	23,124	9,855	138,517	126,163
	StdAbw	0,190	0,107	0,314	0,296							

Tab.34.5.7: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ge vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ge-	Mittelw.	2,234	0,563	2,320	8,875	13,304	7,490	7,759	8,528	16,499	7,214	3,841
	StdAbw	0,759	0,009	0,093	0,144	0,094	0,216	0,091	0,025	0,067	0,002	0,017
GeK1	Mittelw.	2,288	0,548	2,080	7,529	12,951	7,433	7,571	8,208	15,486	7,275	3,873
	StdAbw	1,968	0,054	0,118	0,702	1,087	0,474	0,395	0,447	1,092	0,190	0,120
GeK2	Mittelw.	8,177	0,648	2,143	8,168	12,847	7,434	7,594	7,898	14,695	6,681	3,725
	StdAbw	4,446	0,113	0,212	0,828	0,318	0,133	0,203	0,111	0,461	0,068	0,026
GeA1	Mittelw.	8,317	0,687	2,330	8,454	12,860	7,667	7,523	8,051	15,421	6,717	3,896
	StdAbw	0,841	0,098	0,191	0,632	0,301	0,424	0,218	0,282	0,828	0,090	0,034
GeA2	Mittelw.	11,615	0,658	2,369	8,439	14,887	8,556	8,946	9,044	15,796	7,580	4,084
	StdAbw	3,107	0,048	0,061	0,658	0,947	1,047	0,876	0,565	0,441	0,304	0,185
GeK2T	Mittelw.	5,775	0,588	2,511	8,488	14,027	8,115	8,334	8,273	15,078	7,273	3,866
	StdAbw	3,274	0,071	0,093	0,791	0,340	1,025	0,875	0,620	1,264	0,487	0,271
Ge-Hg	Mittelw.	2,496	0,442	1,982	11,631	13,436	10,573	11,408	8,945	16,208	7,755	3,961
	StdAbw	0,861	0,029	0,086	0,499	1,059	0,695	0,365	0,218	0,641	0,283	0,108
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ge-	Mittelw.	7,445	1,488	4,736	4,530	2,234	25,062	40,275	19,989	9,266	96,826	94,592
	StdAbw	0,162	0,017	0,300	0,075							
GeK1	Mittelw.	7,308	1,574	4,671	4,565	2,288	23,107	38,698	20,030	9,236	93,359	91,071
	StdAbw	0,191	0,072	0,269	0,234							
GeK2	Mittelw.	6,971	1,420	4,135	4,317	8,177	23,806	37,620	18,798	8,452	96,853	88,676
	StdAbw	0,196	0,060	0,162	0,022							
GeA1	Mittelw.	7,147	1,451	4,152	4,385	8,317	24,332	38,662	19,211	8,537	99,059	90,742
	StdAbw	0,231	0,033	0,261	0,080							
GeA2	Mittelw.	7,701	1,561	4,548	4,385	11,615	26,353	42,342	20,926	8,932	110,167	98,552
	StdAbw	0,273	0,094	0,373	0,237							
GeK2T	Mittelw.	6,918	1,495	4,560	4,505	5,775	25,614	39,800	19,552	9,065	99,805	94,031
	StdAbw	0,491	0,119	0,336	0,436							
Ge-Hg	Mittelw.	6,340	1,319	4,647	4,298	2,496	27,491	47,134	19,374	8,946	105,441	102,945
	StdAbw	0,104	0,010	0,118	0,153							

Tab.34.6.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ko vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ko-	Mittelw.	n.n.	2,084	0,307	7,671	4,162	28,290	23,836	16,556	11,879	18,473	7,332
	StdAbw		0,013	0,005	0,613	0,199	0,970	1,259	1,352	2,275	1,094	0,213
KoK1	Mittelw.	n.n.	0,674	0,099	6,719	2,344	25,567	20,934	15,527	15,967	19,547	6,883
	StdAbw		0,078	0,009	0,274	0,221	1,338	0,960	1,508	0,659	0,498	0,301
KoK1T	Mittelw.	0,733	1,912	0,000	8,555	3,647	21,813	19,897	16,458	17,694	16,302	6,608
	StdAbw	0,043	0,070	0,000	0,291	0,359	0,457	0,824	0,695	1,379	0,646	0,338
KoK2	Mittelw.	n.n.	2,332	0,316	9,131	4,109	25,465	23,485	14,686	9,636	17,938	6,983
	StdAbw		0,084	0,025	0,881	0,223	0,745	0,696	0,093	0,375	0,870	0,053
KoK2T	Mittelw.	n.n.	0,402	0,239	7,629	3,462	20,930	20,077	13,650	18,593	19,522	6,975
	StdAbw		0,138	0,023	0,731	0,111	0,271	0,451	0,288	0,317	0,612	0,229
KoA1	Mittelw.	n.n.	1,658	0,431	6,677	4,462	24,645	21,130	12,869	8,939	16,353	6,419
	StdAbw		0,029	0,036	0,658	0,373	0,374	1,496	0,377	0,244	0,926	0,162
KoA1T	Mittelw.	n.n.	0,268	0,234	6,930	8,866	17,428	18,536	12,869	17,156	17,749	6,593
	StdAbw		0,175	0,129	3,371	4,187	8,249	8,738	6,068	8,088	8,368	3,111
KoA2	Mittelw.	n.n.	0,802	0,103	6,987	2,347	23,895	19,875	13,621	16,979	18,666	6,803
	StdAbw		0,122	0,020	0,703	0,222	1,695	1,361	1,282	1,484	1,343	0,352
KoA2T	Mittelw.	n.n.	1,190	0,822	9,780	2,967	15,898	16,774	11,289	14,895	15,027	5,710
	StdAbw		0,580	0,410	2,903	0,109	0,476	0,373	0,445	0,458	0,356	0,139
KoK1G	Mittelw.	0,286	1,669	0,000	7,861	2,998	19,351	15,910	13,924	15,259	13,441	5,961
	StdAbw	0,064	0,152	0,000	0,121	0,425	1,585	1,201	1,618	1,327	1,204	0,495
KoK1P	Mittelw.	0,269	1,627	0,000	6,528	2,599	19,100	16,483	13,909	14,096	13,944	5,579
	StdAbw	0,082	0,138	0,000	0,951	0,537	2,051	1,004	0,748	0,868	0,940	0,465
KoK1S	Mittelw.	0,286	1,834	0,000	7,193	3,247	22,736	17,682	14,753	14,546	16,012	6,825
	StdAbw	0,028	0,150	0,000	0,519	0,186	0,987	1,289	1,392	1,159	1,366	0,371
KoG1	Mittelw.	n.n.	0,023	0,033	4,874	7,640	17,182	19,342	13,794	18,305	18,636	6,628
	StdAbw		0,033	0,047	0,754	0,679	0,328	0,850	0,828	1,089	1,189	0,271
Probe		BaPYR	DBahAN	BghIPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ko-	Mittelw.	13,064	3,776	10,399	10,686	n.n.	14,224	80,561	42,646	21,085	158,516	158,516
	StdAbw	0,488	0,309	0,279	0,528							
KoK1	Mittelw.	14,078	2,952	9,756	8,797	n.n.	9,836	77,994	43,461	18,552	149,843	149,843
	StdAbw	0,758	0,297	0,683	0,118							
KoK1T	Mittelw.	11,518	3,576	9,343	10,796	0,733	14,115	75,861	38,004	20,138	148,852	148,119
	StdAbw	0,781	0,500	0,345	0,475							
KoK2	Mittelw.	13,802	3,853	10,967	11,237	n.n.	15,888	73,272	42,576	22,204	153,940	153,940
	StdAbw	0,219	0,039	0,323	0,295							
KoK2T	Mittelw.	12,100	2,325	11,100	8,006	n.n.	11,732	73,250	40,923	19,106	145,011	145,011
	StdAbw	0,159	0,045	0,266	0,273							
KoA1	Mittelw.	10,502	3,230	9,745	9,714	n.n.	13,228	67,583	36,504	19,459	136,774	136,774
	StdAbw	0,383	0,269	0,298	0,502							
KoA1T	Mittelw.	11,196	2,229	10,046	7,980	n.n.	16,297	65,990	37,767	18,026	138,081	138,081
	StdAbw	5,280	1,051	4,762	3,763							
KoA2	Mittelw.	12,729	2,546	10,080	8,495	n.n.	10,238	74,369	40,743	18,574	143,924	143,924
	StdAbw	1,170	0,161	0,465	0,699							
KoA2T	Mittelw.	11,116	2,012	9,192	6,971	n.n.	14,758	58,856	33,865	16,163	123,643	123,643
	StdAbw	0,438	0,092	0,364	0,320							
KoK1G	Mittelw.	10,692	3,080	7,926	10,162	0,286	12,528	64,445	33,174	18,088	128,520	128,235
	StdAbw	1,069	0,383	0,970	0,929							
KoK1P	Mittelw.	10,517	2,927	7,610	9,589	0,269	10,754	63,588	32,967	17,199	124,778	124,508
	StdAbw	0,487	0,227	0,699	0,716							
KoK1S	Mittelw.	11,201	3,443	9,112	11,015	0,286	12,274	69,717	37,481	20,127	139,885	139,600
	StdAbw	0,780	0,284	0,761	0,516							
KoG1	Mittelw.	11,839	2,486	10,980	8,248	n.n.	12,570	68,623	39,590	19,228	140,010	140,010
	StdAbw	0,666	0,083	0,219	0,173							

Tab.34.6.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ko vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ko-	Mittelw.	n.n.	0,786	0,137	6,361	1,886	22,193	18,259	12,911	14,730	17,797	6,908
	StdAbw		0,188	0,032	0,588	0,182	0,853	1,230	0,486	0,692	0,390	0,125
KoK1	Mittelw.	n.n.	1,023	0,119	5,554	2,010	23,172	19,186	13,584	15,889	20,353	6,990
	StdAbw		0,175	0,050	0,104	0,108	0,418	0,199	0,263	0,537	1,071	0,121
KoK1T	Mittelw.	n.n.	0,443	0,193	5,082	2,413	18,560	20,366	12,810	16,440	14,515	6,601
	StdAbw		0,051	0,027	0,099	0,109	0,482	0,262	0,250	0,311	0,422	0,243
KoK2	Mittelw.	n.n.	0,696	0,107	5,520	2,160	22,468	17,703	13,214	13,759	18,058	7,170
	StdAbw		0,108	0,017	0,251	0,070	0,291	0,210	0,456	0,163	0,430	0,128
KoK2T	Mittelw.	n.b.	0,237	0,194	5,067	2,449	16,667	18,122	10,251	13,601	13,671	5,264
	StdAbw	0,076	0,041	0,012	0,100	0,090	0,293	0,154	0,290	0,234	0,896	0,045
KoA1	Mittelw.	n.n.	0,690	0,087	5,264	1,862	20,935	18,139	12,465	13,411	16,362	5,747
	StdAbw		0,141	0,022	0,215	0,046	0,616	0,331	0,098	0,296	0,262	0,188
KoA1T	Mittelw.	n.n.	0,495	0,349	7,172	2,971	21,883	19,936	14,050	19,220	17,534	6,590
	StdAbw		0,054	0,038	0,909	0,281	1,718	0,226	0,159	0,292	0,385	0,139
KoA2	Mittelw.	n.n.	0,592	0,100	5,153	2,117	20,526	17,307	13,004	12,027	16,367	5,484
	StdAbw		0,112	0,028	0,397	0,038	0,771	0,928	0,723	0,257	0,562	0,445
KoA2T	Mittelw.	n.n.	0,495	0,408	7,298	3,111	20,045	18,912	13,089	18,330	16,002	6,278
	StdAbw		0,011	0,036	0,155	0,204	1,515	0,343	0,496	0,530	0,169	0,172
KoK1G	Mittelw.	n.n.	0,810	0,000	6,417	3,042	21,456	16,827	14,191	12,592	15,020	6,157
	StdAbw		0,070	0,000	0,771	0,943	2,375	1,674	0,748	2,305	1,502	0,444
KoK1P	Mittelw.	n.n.	0,395	0,242	4,768	2,463	19,508	18,859	12,291	15,752	13,556	6,356
	StdAbw		0,125	0,057	0,577	0,268	2,010	1,694	1,044	1,214	1,006	0,477
KoK1S	Mittelw.	n.n.	0,257	0,174	5,877	2,495	15,987	19,337	11,761	16,106	13,891	5,824
	StdAbw		0,019	0,008	0,338	0,064	0,787	1,284	0,086	0,584	0,591	0,165
KoG1	Mittelw.	n.b.	0,394	0,192	6,081	2,923	18,316	17,400	11,855	16,791	15,230	6,309
	StdAbw	0,095	0,128	0,075	0,126	0,149	0,557	0,496	0,288	0,473	0,473	0,109
Ko-Hg	Mittelw.	n.n.	0,774	0,000	6,270	1,833	19,900	16,400	9,867	11,367	14,600	6,647
	StdAbw		0,142	0,000	1,068	0,188	1,236	0,668	0,478	0,754	0,356	0,578
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ko-	Mittelw.	11,213	2,181	8,682	7,453	n.n.	9,170	68,094	38,100	16,135	131,498	131,498
	StdAbw	0,115	0,056	0,264	0,213							
KoK1	Mittelw.	11,459	2,472	9,658	9,912	n.n.	8,705	71,830	41,274	19,570	141,379	141,379
	StdAbw	0,753	0,095	0,230	0,759							
KoK1T	Mittelw.	10,744	2,351	8,646	8,070	n.n.	8,131	68,176	34,211	16,716	127,234	127,234
	StdAbw	0,059	0,270	0,297	0,361							
KoK2	Mittelw.	11,361	2,423	9,796	7,715	n.n.	8,483	67,145	39,011	17,511	132,151	132,151
	StdAbw	0,320	0,124	0,198	0,379							
KoK2T	Mittelw.	9,155	1,836	8,412	6,209	n.b.	7,946	58,641	29,925	14,621	111,187	111,133
	StdAbw	0,019	0,044	0,430	0,138							
KoA1	Mittelw.	11,488	2,522	8,527	7,499	n.n.	7,903	64,949	36,120	16,026	124,998	124,998
	StdAbw	0,275	0,156	0,187	0,081							
KoA1T	Mittelw.	11,860	2,429	10,928	7,992	n.n.	10,986	75,090	38,414	18,920	143,410	143,410
	StdAbw	0,242	0,062	0,725	0,223							
KoA2	Mittelw.	11,988	2,533	8,710	7,737	n.n.	7,961	62,864	36,372	16,448	123,644	123,644
	StdAbw	1,068	0,079	0,547	0,489							
KoA2T	Mittelw.	11,994	2,316	10,085	7,525	n.n.	11,312	70,376	36,590	17,611	135,889	135,889
	StdAbw	0,223	0,043	0,228	0,357							
KoK1G	Mittelw.	8,349	2,671	9,110	8,061	n.n.	10,269	65,065	32,196	17,171	124,700	124,700
	StdAbw	0,330	0,417	0,711	0,733							
KoK1P	Mittelw.	10,204	1,962	8,063	7,697	n.n.	7,869	66,410	32,078	15,760	122,117	122,117
	StdAbw	0,960	0,212	0,486	0,425							
KoK1S	Mittelw.	10,585	2,387	8,917	9,153	n.n.	8,802	63,192	32,688	18,069	122,751	122,751
	StdAbw	0,016	0,056	0,480	0,382							
KoG1	Mittelw.	11,214	2,269	10,773	8,093	n.b.	9,590	64,361	35,022	18,866	127,907	127,839
	StdAbw	0,400	0,137	1,072	0,684							
Ko-Hg	Mittelw.	9,137	1,933	7,650	7,510	n.n.	8,877	57,533	32,317	15,160	113,887	113,887
	StdAbw	0,634	0,232	0,530	0,659							

Tab.34.6.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ko vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ko-	Mittelw.	n.n.	0,879	0,093	6,103	2,365	24,346	18,219	13,476	13,941	18,097	7,031
	StdAbw		0,061	0,016	0,267	0,075	1,658	1,087	0,365	0,657	1,185	0,454
KoK1	Mittelw.	n.n.	0,788	0,079	5,470	2,187	21,719	18,374	12,432	13,129	16,542	6,549
	StdAbw		0,093	0,013	0,217	0,153	0,889	1,753	0,152	0,299	0,378	0,235
KoK1T	Mittelw.	n.n.	0,235	0,212	5,351	2,668	19,717	20,701	12,971	16,445	14,470	6,621
	StdAbw		0,187	0,100	2,523	1,258	9,297	9,766	6,119	7,754	6,824	3,122
KoK2	Mittelw.	n.n.	0,723	n.b.	5,313	2,431	22,002	16,801	12,528	12,752	16,468	6,905
	StdAbw		0,034	0,004	0,144	0,154	0,532	0,467	0,346	0,123	0,240	0,079
KoK2T	Mittelw.	n.n.	0,372	0,230	6,542	2,968	18,172	18,275	12,708	17,101	16,149	6,112
	StdAbw		0,065	0,032	0,321	0,127	0,441	0,141	0,124	0,065	0,821	0,035
KoA1	Mittelw.	n.n.	0,792	n.b.	6,832	2,717	25,094	19,140	13,861	14,289	18,181	7,326
	StdAbw		0,062	0,010	0,379	0,136	0,326	0,260	0,793	0,532	0,735	0,505
KoA1T	Mittelw.	n.n.	0,405	0,447	6,644	2,972	19,901	17,516	13,070	18,031	16,988	6,649
	StdAbw		0,087	0,031	0,378	0,061	0,732	0,586	0,292	0,384	1,003	0,178
KoA2	Mittelw.	n.n.	0,886	n.b.	6,542	2,578	23,901	17,598	13,470	14,360	18,447	7,667
	StdAbw		0,033	0,016	0,443	0,046	0,844	0,659	0,282	0,454	0,741	0,163
KoA2T	Mittelw.	n.n.	0,450	0,306	7,233	3,263	21,076	20,150	14,562	19,383	17,653	6,921
	StdAbw		0,052	0,033	0,400	0,054	1,719	0,909	0,374	0,618	0,493	0,132
KoK1G	Mittelw.	n.n.	0,771	0,235	5,813	2,195	22,781	17,387	13,032	14,984	18,704	6,786
	StdAbw		0,253	0,121	0,781	0,339	0,971	1,098	0,664	0,588	0,400	0,462
KoK1P	Mittelw.	n.n.	0,359	n.b.	5,076	2,147	22,920	17,222	12,396	12,826	16,931	7,338
	StdAbw		0,120	0,027	0,651	0,107	0,861	0,434	1,342	0,429	0,439	0,130
KoK1S	Mittelw.	n.n.	0,660	0,161	5,533	2,938	21,834	22,316	14,298	18,403	15,564	7,501
	StdAbw		0,224	0,027	0,442	0,130	1,154	1,094	0,653	0,651	0,231	0,055
KoG1	Mittelw.	n.n.	0,456	0,276	7,435	3,294	21,074	20,461	13,865	19,219	18,021	6,697
	StdAbw		0,106	0,059	0,758	0,358	1,582	1,715	1,073	1,458	1,554	0,477
Ko-Hg	Mittelw.	n.n.	0,915	n.n.	5,675	2,758	22,825	18,378	12,058	13,139	17,141	6,667
	StdAbw		0,088		0,567	0,673	0,643	0,725	0,183	0,322	0,523	0,315
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ko-	Mittelw.	11,444	2,471	9,345	7,804	n.n.	9,440	69,982	39,043	17,148	135,613	135,613
	StdAbw	0,967	0,039	0,434	0,582							
KoK1	Mittelw.	10,971	2,369	8,639	6,977	n.n.	8,524	65,654	36,431	15,617	126,226	126,226
	StdAbw	0,634	0,071	0,205	0,045							
KoK1T	Mittelw.	10,414	2,449	8,799	8,188	n.n.	8,466	69,833	33,955	16,987	129,241	129,241
	StdAbw	4,917	1,157	4,149	3,863							
KoK2	Mittelw.	11,132	2,249	8,837	7,793	n.n.	8,541	64,083	36,754	16,629	126,008	126,008
	StdAbw	0,385	0,189	0,167	0,040							
KoK2T	Mittelw.	10,925	2,214	10,351	8,292	n.n.	10,113	66,256	35,400	18,643	130,412	130,412
	StdAbw	0,151	0,061	0,129	0,635							
KoA1	Mittelw.	12,406	2,350	9,752	8,188	n.n.	10,417	72,384	40,263	17,939	141,003	141,003
	StdAbw	0,910	0,237	0,293	0,394							
KoA1T	Mittelw.	11,565	2,284	10,926	8,289	n.n.	10,468	68,517	37,486	19,215	135,686	135,686
	StdAbw	0,524	0,029	0,665	0,714							
KoA2	Mittelw.	11,492	2,332	9,600	8,312	n.n.	10,084	69,329	39,938	17,912	137,263	137,263
	StdAbw	0,321	0,036	0,253	0,516							
KoA2T	Mittelw.	12,544	2,486	11,202	8,909	n.n.	11,251	75,170	39,603	20,112	146,136	146,136
	StdAbw	0,431	0,037	0,555	0,294							
KoK1G	Mittelw.	10,843	2,807	9,228	9,070	n.n.	9,013	68,184	39,139	18,298	134,634	134,634
	StdAbw	0,631	0,103	0,284	0,434							
KoK1P	Mittelw.	11,289	2,717	9,393	8,225	n.n.	7,620	65,364	38,274	17,618	128,877	128,877
	StdAbw	0,639	0,161	0,476	0,273							
KoK1S	Mittelw.	11,481	2,570	9,735	9,766	n.n.	9,293	76,851	37,117	19,501	142,762	142,762
	StdAbw	0,504	0,279	0,073	0,156							
KoG1	Mittelw.	12,093	2,442	11,230	8,149	n.n.	11,460	74,619	39,253	19,379	144,711	144,711
	StdAbw	0,590	0,186	0,442	0,774							
Ko-Hg	Mittelw.	11,804	2,263	8,526	9,268	n.n.	9,348	66,400	37,874	17,794	131,417	131,417
	StdAbw	0,635	0,166	0,199	0,251							

Tab.34.6.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ko vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ko-	Mittelw.	n.n.	0,233	0,169	7,250	13,285	19,995	24,985	14,077	17,862	15,887	6,466
	StdAbw		0,049	0,056	0,475	0,410	0,615	0,465	0,392	0,508	0,501	0,138
KoK1	Mittelw.	n.n.	0,327	0,190	8,204	12,742	21,053	26,245	14,462	18,289	15,815	6,637
	StdAbw		0,094	0,033	1,241	0,630	1,769	1,736	0,795	0,839	0,864	0,348
KoK1T	Mittelw.	n.n.	0,608	0,468	9,664	14,390	20,998	25,992	14,823	18,519	17,065	6,976
	StdAbw		0,088	0,121	1,624	0,546	0,323	0,053	0,126	0,414	0,511	0,055
KoK2	Mittelw.	n.n.	0,436	0,173	6,741	13,183	18,409	23,545	13,446	17,273	16,377	5,703
	StdAbw		0,069	0,011	0,448	1,151	0,852	1,424	0,736	0,878	1,100	0,170
KoK2T	Mittelw.	n.n.	0,417	0,271	5,852	10,310	15,391	19,369	10,830	14,173	12,165	4,868
	StdAbw		0,073	0,047	0,327	0,572	0,909	1,161	0,626	0,707	0,568	0,669
KoA1	Mittelw.	n.n.	0,629	0,206	8,757	13,749	20,570	26,399	14,407	18,470	15,955	6,409
	StdAbw		0,042	0,009	0,555	0,134	0,990	0,848	0,311	0,407	0,538	0,103
KoA1T	Mittelw.	n.n.	0,538	0,652	7,666	13,274	16,070	24,584	13,634	17,629	14,861	6,206
	StdAbw		0,077	0,119	0,075	0,412	3,679	0,955	0,620	0,659	0,250	0,289
KoA2	Mittelw.	n.n.	0,440	0,192	7,742	14,433	19,655	25,258	13,885	17,546	16,185	6,441
	StdAbw		0,176	0,032	0,441	0,231	0,779	1,001	0,571	0,661	0,938	0,286
KoA2T	Mittelw.	n.n.	0,360	0,287	7,471	13,826	18,974	24,025	13,490	17,914	16,282	6,064
	StdAbw		0,042	0,017	0,364	0,477	0,386	0,431	0,218	0,827	0,640	0,503
KoK1G	Mittelw.	n.n.	0,389	0,148	7,284	13,919	18,807	24,497	13,646	18,033	16,921	6,557
	StdAbw		0,136	0,010	0,590	0,068	0,552	1,024	0,353	0,036	1,139	0,213
KoK1P	Mittelw.	n.n.	0,573	0,207	9,327	14,908	23,276	28,954	15,281	20,611	19,068	7,182
	StdAbw		0,048	0,011	0,185	0,412	0,378	0,156	0,187	0,367	0,247	0,108
KoK1S	Mittelw.	n.n.	0,547	0,258	9,280	13,860	21,017	26,686	14,534	19,509	17,966	6,585
	StdAbw		0,089	0,076	1,572	0,683	1,522	1,519	0,559	0,633	0,101	0,395
KoG1	Mittelw.	n.n.	0,474	0,176	6,886	11,755	18,394	22,423	12,929	16,918	15,143	5,406
	StdAbw		0,098	0,020	0,051	0,849	0,895	1,694	0,978	1,212	1,169	0,294
Ko-Hg	Mittelw.	n.n.	0,655	0,227	6,825	15,228	19,036	24,050	14,774	19,192	15,654	7,565
	StdAbw		0,264	0,028	1,161	1,382	0,387	0,942	0,854	0,758	0,169	0,170
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ko-	Mittelw.	12,407	2,624	11,243	9,064	n.n.	20,937	76,919	37,385	20,308	155,548	155,548
	StdAbw	0,412	0,067	0,264	0,545							
KoK1	Mittelw.	13,577	2,663	11,498	9,445	n.n.	21,464	80,049	38,693	20,943	161,149	161,149
	StdAbw	1,059	0,137	0,508	0,908							
KoK1T	Mittelw.	12,963	2,750	11,639	9,843	n.n.	25,130	80,331	39,754	21,482	166,697	166,697
	StdAbw	0,030	0,089	0,133	0,383							
KoK2	Mittelw.	12,053	2,641	10,775	9,216	n.n.	20,532	72,673	36,774	19,991	149,970	149,970
	StdAbw	0,298	0,131	0,487	0,888							
KoK2T	Mittelw.	10,516	2,116	9,054	7,345	n.n.	16,849	59,763	29,665	16,398	122,676	122,676
	StdAbw	0,377	0,090	0,316	0,367							
KoA1	Mittelw.	12,946	2,683	11,373	9,181	n.n.	23,341	79,845	37,993	20,554	161,733	161,733
	StdAbw	0,081	0,059	0,489	0,282							
KoA1T	Mittelw.	13,144	2,593	11,181	8,967	n.n.	22,131	71,917	36,804	20,148	150,999	150,999
	StdAbw	0,846	0,097	0,527	0,624							
KoA2	Mittelw.	12,754	2,655	11,581	9,292	n.n.	22,808	76,344	38,034	20,873	158,059	158,059
	StdAbw	0,862	0,123	0,348	0,547							
KoA2T	Mittelw.	13,132	2,693	10,837	9,306	n.n.	21,944	74,403	38,172	20,143	154,662	154,662
	StdAbw	0,379	0,041	0,190	0,601							
KoK1G	Mittelw.	13,187	2,718	11,299	9,544	n.n.	21,739	74,982	39,384	20,844	156,949	156,949
	StdAbw	0,708	0,052	0,136	0,462							
KoK1P	Mittelw.	14,028	3,005	12,053	10,212	n.n.	25,016	88,121	43,282	22,265	178,684	178,684
	StdAbw	0,184	0,042	0,162	0,756							
KoK1S	Mittelw.	13,111	2,950	11,807	10,609	n.n.	23,946	81,746	40,611	22,416	168,718	168,718
	StdAbw	0,310	0,058	0,198	0,482							
KoG1	Mittelw.	11,276	2,482	9,808	8,286	n.n.	19,291	70,663	34,307	18,094	142,355	142,355
	StdAbw	0,827	0,161	0,813	0,049							
Ko-Hg	Mittelw.	12,905	2,721	9,124	9,068	n.n.	22,936	77,053	38,844	18,192	157,025	157,025
	StdAbw	0,634	0,278	0,181	0,130							

Tab.34.6.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ko vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ko-	Mittelw.	n.n.	0,354	0,176	7,093	14,405	20,491	26,055	14,658	19,154	18,040	6,781
	StdAbw		0,032	0,016	0,575	0,765	0,914	1,482	0,564	0,727	0,390	0,409
KoK1	Mittelw.	n.n.	0,345	0,168	5,972	12,328	17,875	23,275	13,172	16,766	15,873	5,889
	StdAbw		0,208	0,053	1,059	0,945	1,573	1,801	0,989	1,140	1,081	0,494
KoK1T	Mittelw.	0,286	0,534	0,232	7,377	13,072	17,644	23,172	12,602	17,533	15,472	5,714
	StdAbw	0,404	0,111	0,050	0,604	0,816	1,385	1,784	0,710	1,130	1,626	0,300
KoK2	Mittelw.	n.n.	0,452	0,171	5,671	11,532	16,521	21,284	11,871	16,355	16,610	5,724
	StdAbw		0,055	0,015	0,339	0,736	1,124	1,199	0,539	1,029	0,609	0,290
KoK2T	Mittelw.	n.n.	0,400	0,206	6,530	13,641	18,783	24,117	13,669	18,489	17,959	6,779
	StdAbw		0,014	0,009	0,801	0,720	1,639	1,448	0,687	0,964	0,292	0,383
KoA1	Mittelw.	n.n.	0,573	0,181	7,547	13,458	19,518	25,603	13,441	18,520	17,736	6,770
	StdAbw		0,160	0,025	1,057	1,563	1,984	2,408	1,021	1,691	1,792	0,691
KoA1T	Mittelw.	n.n.	0,436	0,234	6,756	10,180	15,306	21,672	11,675	16,236	14,360	5,614
	StdAbw		0,081	0,065	0,834	0,757	0,919	1,350	0,747	0,840	0,354	0,339
KoA2	Mittelw.	n.n.	0,444	0,154	5,758	11,175	15,692	20,626	10,828	15,035	14,558	5,052
	StdAbw		0,029	0,010	0,324	0,269	0,475	0,678	0,467	0,247	0,425	0,097
KoA2T	Mittelw.	0,523	0,464	0,212	5,573	10,723	13,800	18,887	10,196	14,342	13,684	5,236
	StdAbw	0,246	0,131	0,026	0,608	0,410	0,828	1,261	0,677	0,823	0,965	0,203
KoK1G	Mittelw.	n.n.	0,410	0,159	5,601	13,007	14,847	20,751	11,457	15,380	14,764	5,246
	StdAbw		0,077	0,022	0,781	0,570	1,831	1,787	0,978	1,448	0,939	0,403
KoK1P	Mittelw.	n.n.	0,282	0,097	5,277	13,450	16,065	21,391	11,618	16,410	16,836	5,240
	StdAbw		0,201	0,070	0,438	0,998	0,802	0,357	0,208	0,219	0,555	0,255
KoK1S	Mittelw.	n.n.	0,453	0,180	5,754	12,161	13,947	19,898	11,096	16,157	16,155	5,965
	StdAbw		0,065	0,030	0,367	0,208	0,422	1,384	0,729	1,069	0,692	0,360
KoG1	Mittelw.	n.n.	0,391	0,413	7,722	14,327	18,087	23,595	13,447	17,543	16,260	6,579
	StdAbw		0,060	0,214	0,471	1,312	1,452	1,701	0,730	1,071	0,729	0,283
Ko-Hg	Mittelw.	n.n.	0,544	0,273	7,486	14,171	20,228	25,403	14,135	18,337	15,464	7,051
	StdAbw		0,100	0,069	1,091	0,405	1,880	1,476	0,329	0,564	0,538	0,139
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ko-	Mittelw.	13,124	2,743	11,827	9,401	n.n.	22,029	80,358	40,687	21,228	164,302	164,302
	StdAbw	0,893	0,079	0,193	0,287							
KoK1	Mittelw.	11,482	2,453	9,957	8,447	n.n.	18,813	71,088	35,697	18,404	144,002	144,002
	StdAbw	0,736	0,094	0,359	0,443							
KoK1T	Mittelw.	12,087	2,425	9,696	8,024	0,286	21,215	70,951	35,698	17,719	145,869	145,583
	StdAbw	0,957	0,184	0,987	0,738							
KoK2	Mittelw.	10,528	2,367	9,730	8,449	n.n.	17,825	66,031	35,228	18,179	137,263	137,263
	StdAbw	0,696	0,121	0,426	0,506							
KoK2T	Mittelw.	12,504	2,593	10,949	9,234	n.n.	20,776	75,059	39,837	20,183	155,854	155,854
	StdAbw	1,064	0,151	0,457	0,313							
KoA1	Mittelw.	13,252	2,648	10,728	9,308	n.n.	21,759	77,082	40,407	20,037	159,285	159,285
	StdAbw	0,757	0,247	0,743	0,679							
KoA1T	Mittelw.	11,527	2,298	10,251	7,893	n.n.	17,606	64,889	33,799	18,144	134,438	134,438
	StdAbw	0,421	0,076	0,588	0,217							
KoA2	Mittelw.	11,052	2,174	9,299	7,607	n.n.	17,531	62,182	32,836	16,906	129,456	129,456
	StdAbw	0,366	0,029	0,088	0,177							
KoA2T	Mittelw.	10,532	2,147	8,835	7,143	0,523	16,973	57,225	31,599	15,979	122,299	121,776
	StdAbw	0,664	0,102	0,589	0,397							
KoK1G	Mittelw.	11,331	2,387	10,173	8,284	n.n.	19,177	62,435	33,728	18,457	133,797	133,797
	StdAbw	1,259	0,212	0,445	0,560							
KoK1P	Mittelw.	11,618	2,438	10,178	8,017	n.n.	19,106	65,485	36,132	18,195	138,918	138,918
	StdAbw	0,285	0,042	0,247	0,158							
KoK1S	Mittelw.	11,686	2,492	10,900	8,461	n.n.	18,549	61,099	36,299	19,361	135,307	135,307
	StdAbw	0,789	0,055	0,585	0,470							
KoG1	Mittelw.	12,406	2,535	11,036	8,671	n.n.	22,853	72,672	37,781	19,707	153,012	153,012
	StdAbw	1,044	0,080	0,462	0,479							
Ko-Hg	Mittelw.	11,340	2,559	9,005	8,835	n.n.	22,474	78,103	36,414	17,840	154,831	154,831
	StdAbw	0,294	0,282	0,666	0,284							

Tab.34.6.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ko vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ko-	Mittelw.	n.n.	0,451	0,174	5,855	14,474	18,424	25,232	14,625	18,786	16,557	7,133
	StdAbw		0,031	0,008	0,397	0,550	0,197	0,892	0,341	0,506	0,212	0,086
KoK1	Mittelw.	n.n.	0,497	0,169	5,782	14,429	17,598	23,470	13,457	17,634	15,004	6,524
	StdAbw		0,049	0,011	0,561	0,374	1,105	0,751	0,597	0,491	0,481	0,141
KoK1T	Mittelw.	n.n.	0,438	0,228	6,022	14,543	19,314	23,228	13,630	17,939	15,379	6,774
	StdAbw		0,082	0,011	0,427	0,461	0,911	0,636	0,353	0,474	0,193	0,112
KoK2	Mittelw.	n.n.	0,282	0,156	4,476	13,958	18,888	21,293	12,507	16,625	14,320	6,325
	StdAbw		0,061	0,040	0,108	0,492	1,026	1,212	0,617	0,919	0,788	0,336
KoK2T	Mittelw.	n.n.	0,487	0,227	5,714	15,333	21,446	24,764	14,656	19,136	16,283	7,216
	StdAbw		0,086	0,008	0,462	0,773	1,152	1,321	0,749	0,960	0,565	0,292
KoA1	Mittelw.	n.n.	0,430	0,154	5,838	15,411	20,910	25,532	14,745	19,232	16,772	7,348
	StdAbw		0,068	0,034	0,684	0,188	0,261	0,774	0,366	0,397	0,139	0,075
KoA1T	Mittelw.	n.n.	0,453	0,257	5,124	13,933	18,792	21,790	12,813	16,657	13,787	6,511
	StdAbw		0,047	0,020	0,412	0,258	0,456	0,488	0,416	0,363	0,268	0,270
KoA2	Mittelw.	n.n.	0,341	0,184	5,324	14,819	20,080	23,338	13,463	17,316	14,272	6,940
	StdAbw		0,039	0,016	0,352	0,187	0,139	0,212	0,229	0,255	0,213	0,131
KoA2T	Mittelw.	n.n.	0,453	0,345	6,017	15,440	19,890	23,026	13,523	17,094	14,549	6,753
	StdAbw		0,049	0,089	1,168	0,673	0,818	0,723	0,280	0,144	0,395	0,214
KoK1G	Mittelw.	n.n.	0,352	0,168	5,138	13,851	19,225	21,448	12,560	16,780	14,422	6,687
	StdAbw		0,067	0,007	0,585	0,769	1,245	1,153	0,579	0,658	0,487	0,150
KoK1P	Mittelw.	n.n.	0,513	0,205	6,078	15,987	21,751	24,571	13,707	18,308	15,213	7,255
	StdAbw		0,077	0,021	0,296	0,373	0,994	0,962	0,506	0,477	0,232	0,145
KoK1S	Mittelw.	n.n.	0,334	0,145	4,675	12,671	13,918	19,645	12,044	16,006	14,834	6,698
	StdAbw		0,010	0,011	0,513	0,594	1,428	0,945	0,571	0,660	0,531	0,244
KoG1	Mittelw.	n.n.	0,559	0,242	6,151	15,023	19,600	25,455	14,162	18,215	16,077	7,365
	StdAbw		0,140	0,083	1,460	0,945	0,293	1,720	0,580	0,618	0,557	0,280
Ko-Hg	Mittelw.	n.n.	0,640	0,367	8,934	16,146	20,611	27,180	15,329	19,382	15,681	7,317
	StdAbw		0,108	0,117	1,396	0,753	2,224	1,227	0,493	0,551	0,327	0,011
Probe		BaPYR	DBahAN	BghIPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ko-	Mittelw.	13,147	2,816	9,219	9,313	n.n.	20,954	77,067	39,653	18,531	156,205	156,205
	StdAbw	0,145	0,248	0,601	0,025							
KoK1	Mittelw.	12,334	2,571	8,323	8,458	n.n.	20,877	72,159	36,433	16,781	146,249	146,249
	StdAbw	0,503	0,272	0,052	0,339							
KoK1T	Mittelw.	12,796	2,492	8,492	8,572	n.n.	21,231	74,110	37,441	17,064	149,845	149,845
	StdAbw	0,357	0,140	0,239	0,061							
KoK2	Mittelw.	12,202	2,297	8,292	7,635	n.n.	18,871	69,313	35,145	15,927	139,257	139,257
	StdAbw	0,697	0,084	0,700	0,402							
KoK2T	Mittelw.	13,975	2,685	9,126	8,555	n.n.	21,760	80,003	40,159	17,681	159,602	159,602
	StdAbw	0,680	0,192	0,692	0,302							
KoA1	Mittelw.	13,609	2,843	9,151	8,859	n.n.	21,833	80,420	40,571	18,010	160,834	160,834
	StdAbw	0,243	0,312	0,313	0,080							
KoA1T	Mittelw.	10,318	2,585	8,330	8,187	n.n.	19,766	70,052	33,201	16,517	139,537	139,537
	StdAbw	1,007	0,407	0,161	0,438							
KoA2	Mittelw.	11,641	2,757	8,727	8,848	n.n.	20,668	74,197	35,609	17,575	148,048	148,048
	StdAbw	0,157	0,285	0,328	0,260							
KoA2T	Mittelw.	12,485	2,924	8,908	8,530	n.n.	22,255	73,532	36,712	17,438	149,937	149,937
	StdAbw	0,249	0,719	0,502	0,219							
KoK1G	Mittelw.	10,453	2,536	8,310	8,474	n.n.	19,509	70,013	34,098	16,785	140,405	140,405
	StdAbw	0,396	0,238	0,571	0,165							
KoK1P	Mittelw.	11,365	2,866	8,922	9,104	n.n.	22,783	78,338	36,698	18,027	155,846	155,846
	StdAbw	0,490	0,310	0,220	0,119							
KoK1S	Mittelw.	10,681	2,842	8,875	9,264	n.n.	17,825	61,613	35,055	18,139	132,632	132,632
	StdAbw	0,593	0,327	0,389	0,360							
KoG1	Mittelw.	12,049	2,960	9,340	9,354	n.n.	21,974	77,432	38,451	18,693	156,551	156,551
	StdAbw	0,114	0,464	0,111	0,200							
Ko-Hg	Mittelw.	11,954	2,232	9,238	8,571	n.n.	26,087	82,502	37,185	17,809	163,583	163,583
	StdAbw	0,208	0,091	0,138	0,165							

Tab.34.7.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ra vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ra-	Mittelw.	37,646	18,120	3,953	49,376	17,068	139,117	106,611	92,402	70,934	72,551	29,050
	StdAbw	1,132	0,752	0,189	3,658	2,349	3,664	4,146	1,504	2,137	2,014	1,089
RaK1	Mittelw.	51,410	43,201	11,176	81,558	22,110	150,272	116,535	82,061	74,004	72,300	30,895
	StdAbw	12,547	0,990	0,537	3,261	4,360	11,468	7,895	6,311	8,468	4,387	2,384
RaK1T	Mittelw.	56,263	95,645	4,849	58,878	20,715	127,754	100,764	91,750	73,556	66,403	28,569
	StdAbw	9,637	0,547	0,287	4,984	3,237	5,381	3,372	0,983	1,832	2,166	1,165
RaK2	Mittelw.	45,208	90,363	1,784	42,612	26,618	140,845	116,596	84,704	67,023	71,949	29,424
	StdAbw	8,122	1,582	0,059	0,915	0,822	1,506	2,361	3,288	1,641	1,952	0,545
RaK2T	Mittelw.	13,954	10,658	5,232	50,220	25,248	125,989	126,688	69,792	81,435	59,389	29,637
	StdAbw	2,255	0,397	0,306	3,964	1,094	6,363	5,308	3,808	4,040	3,569	0,675
RaA1	Mittelw.	43,541	35,962	9,803	66,815	21,232	144,206	117,132	87,956	74,531	73,554	34,744
	StdAbw	15,244	4,048	3,171	2,494	2,135	10,876	8,327	5,955	6,511	5,267	2,264
RaA1T	Mittelw.	26,260	11,642	3,760	54,184	18,627	138,186	136,572	82,802	95,186	63,777	36,807
	StdAbw	10,675	0,219	0,202	1,682	0,506	3,982	3,521	2,052	1,837	1,614	2,176
RaA2	Mittelw.	33,208	33,145	13,330	71,669	23,868	141,872	118,061	85,109	72,173	72,172	32,759
	StdAbw	8,609	0,647	1,456	2,802	1,031	3,097	2,627	2,453	2,983	4,523	1,068
RaA2T	Mittelw.	17,528	9,639	5,129	51,648	25,357	136,036	136,206	72,172	84,252	61,173	31,254
	StdAbw	7,103	0,782	0,967	4,942	2,045	8,408	7,390	4,840	6,061	3,020	1,921
RaK1G	Mittelw.	39,893	96,950	1,948	57,502	21,242	126,619	97,606	91,634	76,704	69,854	28,100
	StdAbw	4,440	4,514	0,257	3,183	3,123	9,394	6,635	5,331	3,921	2,593	2,282
RaK1P	Mittelw.	40,567	97,428	4,237	58,018	25,853	139,777	110,687	97,694	83,730	67,300	29,011
	StdAbw	3,381	3,482	0,535	6,016	0,696	6,919	5,398	6,082	3,578	4,855	1,008
RaK1S	Mittelw.	42,970	96,194	3,084	49,617	23,469	128,126	98,628	87,676	78,851	66,488	29,555
	StdAbw	7,954	0,246	0,715	5,999	2,623	4,041	2,364	2,343	6,551	1,230	1,572
RaG1	Mittelw.	15,987	10,271	4,583	49,847	26,195	125,959	142,831	69,123	81,728	60,923	30,620
	StdAbw	6,020	0,401	0,474	2,420	0,648	2,054	0,881	2,007	1,952	2,462	0,475
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ra-	Mittelw.	66,717	14,002	37,311	40,039	37,646	88,517	409,065	182,320	77,350	794,898	757,252
	StdAbw	2,389	1,043	1,968	1,487							
RaK1	Mittelw.	63,335	18,830	40,613	39,628	51,410	158,046	422,872	185,361	80,241	897,930	846,520
	StdAbw	4,978	0,879	3,058	0,991							
RaK1T	Mittelw.	56,108	16,949	37,689	48,266	56,263	180,087	393,824	168,028	85,955	884,157	827,894
	StdAbw	1,248	0,419	1,012	1,392							
RaK2	Mittelw.	59,255	16,680	38,426	46,054	45,208	161,377	409,168	177,309	84,479	877,540	832,333
	StdAbw	1,222	0,373	0,128	1,619							
RaK2T	Mittelw.	59,878	9,260	41,130	28,340	13,954	91,358	403,905	158,165	69,470	736,851	722,898
	StdAbw	3,414	0,552	3,472	4,041							
RaA1	Mittelw.	69,253	18,779	42,330	35,594	43,541	133,812	423,826	196,329	77,925	875,433	831,892
	StdAbw	4,815	1,953	2,631	2,322							
RaA1T	Mittelw.	69,873	11,954	38,399	36,921	26,260	88,214	452,747	182,412	75,321	824,953	798,693
	StdAbw	2,885	1,085	1,135	0,266							
RaA2	Mittelw.	64,347	17,520	45,209	36,358	33,208	142,012	417,215	186,798	81,566	860,799	827,591
	StdAbw	2,985	0,387	9,238	1,064							
RaA2T	Mittelw.	62,633	9,397	42,740	29,215	17,528	91,773	428,666	164,457	71,955	774,378	756,850
	StdAbw	4,034	0,656	2,773	1,779							
RaK1G	Mittelw.	54,014	16,524	37,135	57,493	39,893	177,642	392,563	168,492	94,628	873,218	833,325
	StdAbw	2,372	1,032	2,715	4,506							
RaK1P	Mittelw.	54,690	17,066	38,672	53,970	40,567	185,536	431,888	168,067	92,641	918,699	878,132
	StdAbw	2,681	0,764	1,233	2,824							
RaK1S	Mittelw.	50,574	15,920	36,033	49,838	42,970	172,364	393,281	162,537	85,870	857,023	814,052
	StdAbw	1,288	0,639	1,052	2,383							
RaG1	Mittelw.	62,062	9,278	41,289	27,287	15,987	90,896	419,641	162,884	68,575	757,983	741,996
	StdAbw	1,176	0,193	0,989	0,569							

Tab.34.7.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ra v+B1382om 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ra-	Mittelw.	32,500	14,333	7,443	43,800	19,167	135,667	113,333	76,067	62,800	83,000	30,567
	StdAbw	18,332	0,525	0,445	0,374	1,389	2,625	8,498	4,028	4,465	5,386	1,147
RaK1	Mittelw.	33,376	15,827	3,415	48,013	17,060	124,886	102,450	71,587	57,322	69,594	28,754
	StdAbw	4,526	1,124	0,197	1,926	0,718	0,594	0,970	1,591	3,711	1,358	1,871
RaK1T	Mittelw.	30,998	10,508	3,283	40,143	27,119	124,898	91,383	72,165	56,482	65,428	28,181
	StdAbw	1,384	1,403	0,402	3,407	2,087	2,455	3,596	0,511	1,272	1,863	0,386
RaK2	Mittelw.	16,303	14,419	3,324	49,363	15,242	154,266	114,884	78,838	66,391	77,243	30,339
	StdAbw	7,980	2,355	0,579	12,022	2,864	29,978	21,624	12,012	16,270	13,543	6,009
RaK2T	Mittelw.	24,923	10,760	4,579	49,884	25,520	120,393	133,547	67,327	80,855	59,390	30,347
	StdAbw	2,200	0,525	0,574	3,041	1,386	5,384	1,050	2,800	3,178	2,605	1,240
RaA1	Mittelw.	30,680	17,534	3,635	54,637	12,832	131,464	107,489	73,758	63,166	74,426	30,870
	StdAbw	4,634	2,073	0,520	3,226	2,496	7,495	5,076	6,339	29,799	2,780	1,968
RaA1T	Mittelw.	16,172	10,238	5,050	50,066	25,037	126,400	132,708	67,155	80,442	57,860	29,881
	StdAbw	2,798	0,801	0,375	3,648	0,743	2,334	3,735	1,201	1,770	0,738	0,961
RaA2	Mittelw.	20,946	16,908	3,946	54,266	15,715	144,933	114,600	79,713	67,094	77,398	31,055
	StdAbw	8,106	0,998	0,154	2,599	2,560	0,778	2,263	1,874	1,489	1,783	0,418
RaA2T	Mittelw.	23,091	10,726	4,940	51,942	27,695	133,700	158,606	72,972	84,944	67,301	30,563
	StdAbw	8,667	0,952	0,480	3,952	1,568	3,439	1,829	1,979	2,398	1,569	1,454
RaK1G	Mittelw.	24,786	11,728	4,378	47,530	31,873	117,182	120,432	71,131	82,196	56,241	33,792
	StdAbw	3,697	1,863	0,466	1,792	0,646	1,142	4,201	1,694	2,077	1,729	0,955
RaK1P	Mittelw.	20,016	9,805	3,535	44,042	30,392	112,454	113,060	69,321	79,031	55,728	32,752
	StdAbw	4,564	0,130	0,163	0,795	0,573	0,564	1,862	1,753	1,930	1,673	0,578
RaK1S	Mittelw.	n.n.	9,334	4,256	47,005	22,870	98,771	116,725	66,473	78,442	55,941	28,737
	StdAbw		1,774	0,423	4,878	1,287	3,248	3,761	1,664	1,638	3,052	0,715
RaG1	Mittelw.	23,790	11,795	5,025	54,704	25,991	133,036	149,928	70,097	81,585	63,341	30,513
	StdAbw	4,609	0,571	0,591	1,741	12,255	3,029	4,575	1,242	2,040	1,635	0,364
Ra-Hg	Mittelw.	42,333	19,400	10,157	64,700	15,300	138,000	100,433	73,000	66,600	72,233	31,467
	StdAbw	3,775	1,838	0,455	5,494	2,673	8,287	6,581	3,082	3,374	3,831	1,884
Probe		BaPYR	DBahAN	BghIPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ra-	Mittelw.	58,033	13,967	39,133	39,700	32,500	84,743	387,867	185,567	78,833	769,510	737,010
	StdAbw	2,819	1,466	2,240	2,209							
RaK1	Mittelw.	59,264	12,264	33,684	36,704	33,376	84,315	356,244	169,876	70,388	714,199	680,823
	StdAbw	1,452	0,795	0,673	1,517							
RaK1T	Mittelw.	58,748	17,438	39,227	46,259	30,998	81,052	344,928	169,795	85,486	712,259	681,261
	StdAbw	0,727	0,488	0,132	0,609							
RaK2	Mittelw.	72,637	14,680	39,645	38,076	16,303	82,349	414,378	194,899	77,721	785,650	769,346
	StdAbw	14,193	3,010	7,713	6,334							
RaK2T	Mittelw.	61,567	9,247	42,891	27,694	24,923	90,744	402,123	160,551	70,585	748,925	724,002
	StdAbw	2,486	0,337	2,400	1,741							
RaA1	Mittelw.	64,071	14,780	37,409	36,006	30,680	88,638	375,876	184,147	73,415	752,755	722,075
	StdAbw	5,314	1,710	3,159	1,976							
RaA1T	Mittelw.	60,079	9,323	44,032	26,811	16,172	90,391	406,705	157,144	70,844	741,256	725,084
	StdAbw	2,984	0,210	0,798	1,236							
RaA2	Mittelw.	69,270	14,167	37,933	41,087	20,946	90,836	406,340	191,890	79,020	789,031	768,086
	StdAbw	3,637	0,650	1,410	1,702							
RaA2T	Mittelw.	64,789	9,558	44,242	29,467	23,091	95,304	450,222	172,211	73,709	814,536	791,446
	StdAbw	2,216	0,349	1,089	0,906							
RaK1G	Mittelw.	60,218	11,516	34,252	31,645	24,786	95,509	390,942	161,767	65,897	738,900	714,114
	StdAbw	0,626	1,533	0,711	0,370							
RaK1P	Mittelw.	57,633	11,652	32,833	30,925	20,016	87,773	373,867	157,765	63,759	703,179	683,164
	StdAbw	1,104	0,599	0,075	0,319							
RaK1S	Mittelw.	48,432	9,792	43,229	37,920	n.n.	83,464	360,412	142,902	81,149	667,927	667,927
	StdAbw	5,568	0,864	2,282	5,162							
RaG1	Mittelw.	60,961	9,293	43,253	28,222	23,790	97,515	434,646	164,108	71,475	791,534	767,744
	StdAbw	1,667	0,150	0,440	0,452							
Ra-Hg	Mittelw.	59,967	11,900	37,500	40,167	42,333	109,557	378,033	175,567	77,667	783,157	740,823
	StdAbw	4,686	0,993	2,140	1,891							

Tab.34.7.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ra v+B1482om 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ra-	Mittelw.	24,833	18,781	3,868	57,076	20,315	135,003	113,867	76,374	70,874	77,460	32,473
	StdAbw	13,517	3,957	0,630	4,130	1,650	1,738	0,741	1,681	0,902	0,823	0,664
RaK1	Mittelw.	25,968	19,004	3,967	52,042	20,603	142,102	118,854	76,556	74,855	78,403	30,501
	StdAbw	10,674	1,955	0,910	4,615	2,037	2,829	1,450	1,506	0,779	0,526	2,146
RaK1T	Mittelw.	7,212	11,110	3,650	52,100	12,140	132,016	94,516	68,704	68,101	69,961	29,315
	StdAbw	0,584	2,005	0,324	6,178	2,107	5,562	1,728	2,857	4,741	4,192	1,371
RaK2	Mittelw.	21,574	15,839	3,424	46,670	17,531	120,305	101,085	67,506	63,514	65,801	27,160
	StdAbw	7,522	0,696	0,076	0,926	0,420	2,622	1,509	2,116	1,377	0,752	0,923
RaK2T	Mittelw.	3,442	7,915	3,185	40,998	30,129	106,754	110,652	68,260	78,200	55,886	32,918
	StdAbw	3,442	0,479	0,201	2,343	0,940	4,771	2,118	1,566	1,723	1,199	0,618
RaA1	Mittelw.	31,479	17,246	3,582	47,149	18,961	126,177	102,823	73,587	65,270	71,014	28,657
	StdAbw	4,109	1,964	0,086	2,346	1,457	2,917	3,124	1,879	2,501	2,046	2,686
RaA1T	Mittelw.	12,041	7,898	3,471	42,054	32,722	120,685	119,424	74,125	84,825	59,885	35,292
	StdAbw	1,067	0,743	0,085	0,488	1,058	6,098	3,054	1,637	2,455	0,545	1,141
RaA2	Mittelw.	17,701	17,855	3,501	49,878	21,696	149,831	121,898	80,321	74,920	81,184	36,014
	StdAbw	5,717	0,879	0,097	1,078	1,141	2,770	2,187	2,368	1,785	1,036	0,690
Ra A2T	Mittelw.	15,900	10,718	5,260	54,254	23,182	123,519	144,544	72,632	83,263	65,552	32,990
	StdAbw	1,689	0,780	0,116	1,771	10,929	2,310	9,722	3,342	3,290	3,659	0,759
RaK1G	Mittelw.	7,666	10,124	3,541	48,121	31,610	112,414	117,005	71,226	82,523	57,242	34,240
	StdAbw	3,069	0,711	0,046	2,542	1,716	13,681	5,064	3,132	3,634	1,929	1,448
RaK1P	Mittelw.	4,102	10,205	4,007	55,343	21,076	130,750	100,397	83,759	73,746	84,721	33,916
	StdAbw	0,875	1,661	0,361	1,137	0,911	3,927	2,932	3,184	2,369	3,481	1,366
RaK1S	Mittelw.	5,178	10,457	2,727	41,859	18,005	121,830	83,781	68,465	71,391	73,672	26,227
	StdAbw	1,580	0,491	0,297	2,503	0,550	1,320	1,779	2,719	6,773	1,198	1,556
Ra G1	Mittelw.	12,193	10,577	4,624	49,364	21,271	119,426	144,231	67,678	79,240	57,748	30,558
	StdAbw	4,589	0,703	0,819	0,343	0,949	2,608	2,277	0,797	1,934	1,178	0,309
Ra-Hg	Mittelw.	36,674	17,973	9,620	52,164	14,697	128,772	98,685	68,621	61,717	69,881	29,969
	StdAbw	2,858	1,344	0,198	1,478	0,256	3,003	2,280	2,832	2,352	0,791	1,044
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ra-	Mittelw.	67,512	16,609	39,495	44,545	24,833	100,040	396,118	194,053	84,040	799,085	774,251
	StdAbw	4,687	0,463	0,314	3,056							
RaK1	Mittelw.	71,495	15,921	38,575	41,532	25,968	95,616	412,367	196,320	80,107	810,378	784,410
	StdAbw	4,218	0,473	0,621	2,249							
RaK1T	Mittelw.	54,182	15,579	40,192	33,484	7,212	78,999	363,337	169,036	73,676	692,262	685,049
	StdAbw	1,444	1,320	0,978	1,054							
RaK2	Mittelw.	60,200	13,736	33,227	37,354	21,574	83,465	352,410	166,896	70,581	694,926	673,352
	StdAbw	3,480	0,166	0,108	2,094							
RaK2T	Mittelw.	57,541	10,365	34,551	31,167	3,442	82,227	363,866	156,711	65,718	671,964	668,522
	StdAbw	1,049	0,721	0,572	0,452							
RaA1	Mittelw.	65,814	14,794	35,776	37,759	31,479	86,938	367,857	180,278	73,535	740,087	708,607
	StdAbw	1,655	0,379	1,725	0,784							
RaA1T	Mittelw.	62,640	11,455	36,544	33,808	12,041	86,145	399,059	169,273	70,353	736,871	724,829
	StdAbw	1,950	1,066	1,446	0,436							
RaA2	Mittelw.	71,323	16,072	39,326	38,583	17,701	92,931	426,969	204,593	77,909	820,102	802,401
	StdAbw	5,449	0,121	0,530	1,710							
Ra A2T	Mittelw.	69,713	9,842	45,733	31,180	15,900	93,414	423,959	178,097	76,913	788,283	772,383
	StdAbw	3,670	0,378	1,318	1,183							
RaK1G	Mittelw.	57,265	12,572	35,820	32,651	7,666	93,395	383,168	161,319	68,471	714,019	706,353
	StdAbw	4,642	0,771	1,393	0,609							
RaK1P	Mittelw.	66,494	16,954	42,084	39,638	4,102	90,631	388,653	202,085	81,722	767,193	763,091
	StdAbw	2,784	1,457	1,230	0,720							
RaK1S	Mittelw.	54,440	14,400	35,788	36,350	5,178	73,048	345,468	168,739	72,138	664,571	659,392
	StdAbw	0,878	0,432	0,853	0,415							
Ra G1	Mittelw.	63,068	8,579	41,412	27,679	12,193	85,837	410,575	159,953	69,091	737,650	725,456
	StdAbw	1,531	0,102	0,887	0,785							
Ra-Hg	Mittelw.	61,043	11,591	34,386	41,411	36,674	94,454	357,795	172,485	75,796	737,205	700,530
	StdAbw	0,601	0,210	1,238	0,488							

Tab.34.7.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ra vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ra-	Mittelw.	37,379	16,015	3,850	76,156	19,815	161,254	115,151	89,921	66,637	76,798	33,893
	StdAbw	7,449	3,492	0,205	1,193	2,167	7,579	5,992	4,015	2,397	3,327	2,756
RaK1	Mittelw.	33,496	15,797	3,990	57,557	19,668	154,603	118,316	92,051	72,834	81,708	32,681
	StdAbw	5,828	3,035	0,142	2,776	1,062	3,930	1,797	1,362	0,915	0,573	2,896
RaK1T	Mittelw.	29,238	16,494	5,123	61,614	17,514	155,322	116,546	89,306	72,819	80,041	35,401
	StdAbw	2,611	3,337	0,375	3,090	0,769	3,112	1,749	0,499	3,193	0,655	1,431
RaK2	Mittelw.	12,329	10,597	3,191	51,646	14,593	144,695	111,129	85,203	67,719	75,907	34,765
	StdAbw	5,932	1,590	0,084	6,384	0,957	3,356	3,447	2,405	2,203	2,468	1,309
RaK2T	Mittelw.	8,943	10,107	4,072	43,927	10,849	143,236	105,697	86,431	65,999	75,642	32,403
	StdAbw	8,270	0,939	0,331	2,928	3,043	5,903	2,180	3,634	13,760	1,836	0,975
RaA1	Mittelw.	13,743	10,081	3,311	49,607	7,918	154,967	103,204	85,547	67,363	72,058	31,498
	StdAbw	11,380	1,957	0,252	6,149	0,614	10,885	5,225	2,057	9,579	2,038	1,080
RaA1T	Mittelw.	9,101	9,990	4,493	50,696	7,119	139,996	105,032	87,736	61,836	73,253	30,933
	StdAbw	1,665	1,800	0,259	6,013	0,578	7,209	4,061	2,558	2,308	4,147	1,573
RaA2	Mittelw.	10,344	10,148	3,165	50,787	12,372	157,486	113,926	90,215	80,200	75,207	32,211
	StdAbw	5,007	0,795	0,289	2,115	4,054	4,305	2,064	1,936	10,148	1,984	1,607
RaA2T	Mittelw.	10,852	9,247	3,848	45,572	13,025	129,599	100,198	82,741	76,380	69,510	30,745
	StdAbw	2,120	0,916	0,049	4,032	1,726	7,486	5,452	4,473	4,454	3,018	3,232
RaK1G	Mittelw.	14,776	9,707	2,946	49,068	13,752	137,173	100,254	83,752	75,573	70,333	31,677
	StdAbw	7,076	1,131	0,297	2,277	1,400	2,644	1,228	1,553	2,445	0,918	2,023
RaK1P	Mittelw.	4,738	9,574	3,640	47,263	19,246	151,008	109,592	91,288	82,695	76,263	33,139
	StdAbw	5,324	1,151	0,371	0,290	0,824	16,031	9,547	6,656	7,004	5,347	1,855
RaK1S	Mittelw.	7,584	8,553	3,418	42,099	11,347	129,387	88,617	58,780	130,801	74,424	27,948
	StdAbw	6,498	1,626	0,320	1,410	0,359	1,504	0,221	0,455	3,625	1,260	0,423
RaG1	Mittelw.	9,176	10,426	3,766	52,367	15,194	165,673	104,906	68,148	152,810	82,629	31,356
	StdAbw	6,287	0,468	0,230	2,540	0,876	9,395	2,919	2,950	9,705	3,037	1,276
Ra-Hg	Mittelw.	39,267	17,133	11,200	60,200	20,100	142,667	109,333	75,633	70,467	75,967	33,967
	StdAbw	9,578	1,236	0,294	3,465	1,424	1,700	2,867	1,528	4,988	2,108	1,357
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ra-	Mittelw.	59,160	13,461	40,562	54,311	37,379	115,836	432,963	183,312	94,873	864,364	826,984
	StdAbw	3,859	0,863	2,348	4,765							
RaK1	Mittelw.	68,607	14,562	39,594	58,362	33,496	97,013	437,804	197,557	97,956	863,826	830,329
	StdAbw	0,715	1,933	0,728	6,358							
RaK1T	Mittelw.	65,379	13,199	40,464	40,505	29,238	100,745	433,993	194,020	80,969	838,966	809,727
	StdAbw	1,252	0,695	0,396	7,825							
RaK2	Mittelw.	62,156	12,108	38,941	57,275	12,329	80,027	408,746	184,936	96,217	782,256	769,927
	StdAbw	1,145	0,119	0,649	3,861							
RaK2T	Mittelw.	59,516	12,529	38,210	48,784	8,943	68,956	401,363	180,090	86,994	746,346	737,403
	StdAbw	3,471	0,193	0,289	5,301							
RaA1	Mittelw.	62,183	13,553	39,218	33,967	13,743	70,917	411,082	179,292	73,185	748,219	734,476
	StdAbw	5,841	2,575	2,981	2,648							
RaA1T	Mittelw.	62,644	13,721	39,170	35,748	9,101	72,298	394,601	180,551	74,918	731,470	722,368
	StdAbw	1,798	0,233	1,933	4,654							
RaA2	Mittelw.	63,281	11,185	40,412	41,112	10,344	76,471	441,827	181,884	81,524	792,050	781,706
	StdAbw	0,951	1,307	1,404	3,925							
RaA2T	Mittelw.	60,958	11,246	36,810	49,168	10,852	71,692	388,918	172,460	85,978	729,901	719,049
	StdAbw	4,776	0,887	2,439	3,099							
RaK1G	Mittelw.	58,178	11,215	37,333	37,005	14,776	75,473	396,752	171,403	74,339	732,743	717,967
	StdAbw	1,186	0,325	1,235	3,877							
RaK1P	Mittelw.	64,573	10,789	39,761	41,345	4,738	79,724	434,583	184,763	81,106	784,914	780,176
	StdAbw	4,070	0,554	2,544	1,417							
RaK1S	Mittelw.	51,405	11,483	36,495	54,357	7,584	65,417	407,585	165,260	90,852	736,698	729,114
	StdAbw	1,794	0,691	0,793	3,243							
RaG1	Mittelw.	65,433	10,809	38,455	50,011	9,176	81,753	491,538	190,227	88,466	861,160	851,984
	StdAbw	3,943	0,931	2,316	2,785							
Ra-Hg	Mittelw.	70,333	12,700	38,367	42,400	39,267	108,633	398,100	192,967	80,767	819,733	780,467
	StdAbw	3,271	0,163	2,500	2,570							

Tab.34.7.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ra vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ra-	Mittelw.	6,703	8,272	2,732	42,981	81,273	114,250	132,295	73,586	83,459	59,916	32,378
	StdAbw	5,665	0,327	0,218	4,043	1,036	3,587	1,908	0,854	0,837	0,788	0,421
RaK1	Mittelw.	17,239	9,318	4,028	52,431	70,838	97,406	125,263	65,919	78,548	64,051	28,133
	StdAbw	2,075	0,550	1,017	2,519	3,570	2,860	2,056	1,465	1,873	1,257	0,462
RaK1T	Mittelw.	14,728	7,940	3,040	45,190	55,388	83,037	110,210	57,340	65,554	52,259	23,605
	StdAbw	12,121	1,373	0,650	3,598	4,375	2,738	5,868	2,168	2,164	2,708	0,881
RaK2	Mittelw.	22,581	1,091	3,389	48,321	59,996	89,875	117,276	61,670	69,053	54,702	25,407
	StdAbw	2,706	0,078	0,532	1,800	6,239	6,623	9,238	3,593	3,323	3,254	0,658
RaK2T	Mittelw.	10,350	7,011	3,643	40,224	63,441	84,122	107,310	57,694	67,451	56,182	25,092
	StdAbw	2,538	0,467	0,827	3,373	5,329	3,098	5,337	2,617	3,944	4,454	1,670
RaA1	Mittelw.	10,852	8,075	3,054	42,767	60,272	93,146	118,881	60,846	72,148	54,849	25,476
	StdAbw	1,593	0,439	0,279	2,764	4,556	3,762	3,145	2,622	2,864	1,723	1,299
RaA1T	Mittelw.	4,684	6,685	3,112	42,006	62,814	87,245	111,992	58,337	70,565	60,178	26,522
	StdAbw	3,262	0,624	0,171	1,222	2,140	1,813	2,375	1,830	2,734	1,947	1,227
RaA2	Mittelw.	23,718	8,457	3,482	45,667	65,789	90,874	118,736	60,882	72,520	57,418	26,668
	StdAbw	25,035	1,466	0,767	7,595	1,691	3,721	4,532	2,053	3,079	3,238	1,823
RaA2T	Mittelw.	7,239	7,821	3,413	47,257	64,212	92,521	121,417	66,547	75,272	56,021	26,002
	StdAbw	1,332	0,548	0,348	0,978	3,255	2,365	3,472	1,965	2,014	1,219	0,859
RaK1G	Mittelw.	13,587	9,617	4,137	56,939	67,123	99,550	115,720	68,600	76,941	60,231	26,529
	StdAbw	2,298	1,426	0,756	9,759	4,263	7,386	3,422	4,047	4,395	2,963	1,480
RaK1P	Mittelw.	9,635	8,951	3,395	51,161	62,299	93,952	124,670	65,737	77,029	60,685	28,020
	StdAbw	1,289	1,328	0,275	5,664	5,850	11,280	11,414	7,263	8,415	4,809	2,740
RaK1S	Mittelw.	9,005	9,804	4,466	60,444	73,183	107,671	127,063	73,564	85,288	66,672	32,694
	StdAbw	4,386	0,944	0,231	4,126	2,383	6,425	3,780	5,159	6,030	6,114	2,327
RaG1	Mittelw.	10,534	9,069	3,619	49,774	62,998	99,880	116,581	67,887	77,825	59,969	28,844
	StdAbw	0,954	0,881	0,399	4,741	2,654	4,045	4,814	3,252	3,782	2,346	0,992
Ra-Hg	Mittelw.	17,569	9,693	3,029	48,285	82,140	106,543	116,585	63,491	74,687	51,117	27,808
	StdAbw	5,194	0,144	0,329	2,086	2,645	3,638	3,681	2,490	2,202	1,607	0,767
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ra-	Mittelw.	57,510	11,343	36,731	30,430	6,703	135,259	403,590	161,149	67,161	773,861	767,158
	StdAbw	0,874	0,814	0,460	0,426							
RaK1	Mittelw.	60,458	10,459	45,355	37,211	17,239	136,615	367,136	163,101	82,566	766,658	749,419
	StdAbw	0,626	0,360	0,694	0,835							
RaK1T	Mittelw.	53,430	9,499	40,373	31,311	14,728	111,558	316,141	138,793	71,684	652,905	638,177
	StdAbw	3,020	0,627	1,382	1,178							
RaK2	Mittelw.	58,267	9,891	40,632	31,631	22,581	112,797	337,874	148,267	72,262	693,781	671,200
	StdAbw	1,982	0,761	1,719	1,619							
RaK2T	Mittelw.	50,914	9,339	40,024	31,854	10,350	114,319	316,577	141,527	71,878	654,653	644,302
	StdAbw	0,929	0,189	2,052	0,856							
RaA1	Mittelw.	59,008	9,979	40,523	30,980	10,852	114,168	345,020	149,313	71,503	690,856	680,004
	StdAbw	1,257	0,526	1,761	1,324							
RaA1T	Mittelw.	50,343	9,160	43,099	33,209	4,684	114,617	328,139	146,204	76,308	669,951	665,267
	StdAbw	2,173	1,062	2,802	1,123							
RaA2	Mittelw.	55,974	9,828	40,580	30,959	23,718	123,394	343,011	149,887	71,540	711,550	687,831
	StdAbw	1,856	0,123	1,452	0,958							
RaA2T	Mittelw.	63,543	11,033	46,099	33,080	7,239	122,703	355,757	156,599	79,179	721,476	714,237
	StdAbw	1,944	0,222	0,912	1,986							
RaK1G	Mittelw.	61,415	11,181	45,028	35,731	13,587	137,816	360,811	159,355	80,759	752,329	738,742
	StdAbw	3,232	0,536	1,942	2,308							
RaK1P	Mittelw.	55,194	10,446	44,020	32,913	9,635	125,807	361,388	154,346	76,933	728,108	718,473
	StdAbw	5,180	0,752	4,488	0,603							
RaK1S	Mittelw.	66,449	12,429	50,287	36,274	9,005	147,897	393,586	178,245	86,561	815,294	806,289
	StdAbw	2,038	0,857	2,526	1,398							
RaG1	Mittelw.	61,001	10,755	44,734	32,858	10,534	125,459	362,173	160,570	77,592	736,328	725,794
	StdAbw	4,084	0,473	1,083	2,862							
Ra-Hg	Mittelw.	50,341	9,140	29,892	27,523	17,569	143,147	361,307	138,405	57,415	717,842	700,274
	StdAbw	2,492	0,312	0,977	0,532							

Tab.34.7.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Ra vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ra-	Mittelw.	19,025	10,231	3,606	46,401	79,403	94,507	130,862	71,558	84,016	64,825	29,536
	StdAbw	2,216	0,968	0,286	3,191	3,724	3,230	1,252	2,936	2,732	2,491	2,679
RaK1	Mittelw.	16,594	9,080	3,104	43,805	66,248	92,017	120,492	64,384	75,919	58,563	26,761
	StdAbw	3,109	0,566	0,307	4,631	1,279	4,208	5,265	2,769	3,092	3,499	1,738
RaK1T	Mittelw.	17,350	9,230	3,712	49,488	68,253	85,787	119,405	64,572	75,731	62,709	26,903
	StdAbw	6,412	0,470	0,524	2,293	0,772	2,407	3,056	1,220	2,133	2,420	1,099
RaK2	Mittelw.	11,039	9,625	3,593	56,158	74,439	91,631	135,264	68,357	78,345	66,306	29,722
	StdAbw	3,131	0,726	0,467	5,963	1,328	1,981	5,620	1,076	1,482	1,833	1,219
RaK2T	Mittelw.	11,631	9,319	3,887	48,394	73,509	96,844	124,092	66,763	75,246	61,037	26,775
	StdAbw	4,225	0,400	0,601	0,699	6,598	3,846	7,785	4,108	4,356	2,378	0,975
RaA1	Mittelw.	7,190	8,581	3,205	45,023	68,039	96,772	116,652	64,150	72,468	57,478	26,009
	StdAbw	1,289	0,324	0,207	1,893	2,073	5,696	6,964	2,959	3,280	4,544	1,481
RaA1T	Mittelw.	16,695	10,730	4,406	55,631	89,937	104,909	151,141	75,455	84,705	68,397	31,298
	StdAbw	0,240	0,397	0,843	2,911	5,092	3,636	1,553	2,393	2,327	3,987	0,813
RaA2	Mittelw.	5,701	8,462	3,746	46,424	74,034	100,555	133,762	69,884	79,417	64,552	28,199
	StdAbw	0,240	0,250	0,095	1,419	2,413	2,538	3,198	1,295	1,544	0,367	0,477
RaA2T	Mittelw.	14,283	9,282	3,200	54,283	74,170	98,213	139,560	70,141	82,210	61,579	28,637
	StdAbw	7,059	1,178	0,265	4,661	2,182	2,406	9,894	1,983	3,403	2,086	1,948
RaK1G	Mittelw.	13,378	6,827	2,868	46,468	69,270	90,090	134,375	68,698	79,456	62,231	23,876
	StdAbw	4,516	4,273	0,322	0,772	1,990	2,054	8,346	1,727	0,694	1,119	1,826
RaK1P	Mittelw.	13,691	9,769	3,372	54,996	74,321	90,691	129,458	66,904	75,227	61,440	26,012
	StdAbw	1,116	0,476	0,464	1,649	3,919	2,299	6,554	0,867	0,934	0,348	1,374
RaK1S	Mittelw.	7,946	8,284	2,899	42,013	72,588	83,805	121,807	63,526	77,296	63,560	28,422
	StdAbw	1,439	0,947	0,241	4,582	4,539	7,218	2,361	0,670	1,615	1,548	0,226
RaG1	Mittelw.	19,943	9,625	2,892	50,672	77,071	94,253	131,732	69,309	79,324	61,566	26,041
	StdAbw	0,968	0,324	0,053	3,196	0,690	2,581	0,665	3,384	3,129	3,501	2,921
Ra-Hg	Mittelw.	15,864	10,753	3,671	55,835	81,815	111,979	130,541	69,323	80,301	55,130	29,968
	StdAbw	1,577	0,667	0,270	2,266	1,699	0,108	0,198	0,249	0,991	0,706	0,318
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ra-	Mittelw.	61,737	11,673	49,189	38,715	19,025	139,641	380,943	167,772	87,903	795,284	776,259
	StdAbw	2,781	0,618	1,201	0,640							
RaK1	Mittelw.	53,527	10,204	43,726	34,658	16,594	122,237	352,813	149,055	78,384	719,083	702,488
	StdAbw	1,586	0,744	1,437	0,753							
RaK1T	Mittelw.	56,588	9,938	44,300	35,740	17,350	130,683	345,494	156,138	80,040	729,706	712,356
	StdAbw	0,547	0,051	0,619	0,606							
RaK2	Mittelw.	58,496	10,552	45,966	37,846	11,039	143,815	373,597	165,076	83,813	777,340	766,301
	StdAbw	1,205	0,263	0,386	0,324							
RaK2T	Mittelw.	57,932	9,842	46,211	37,691	11,631	135,110	362,945	155,586	83,902	749,172	737,542
	StdAbw	3,050	0,324	2,480	1,869							
RaA1	Mittelw.	56,424	9,607	42,242	35,916	7,190	124,847	350,042	149,518	78,158	709,755	702,565
	StdAbw	2,076	0,452	2,014	1,933							
RaA1T	Mittelw.	66,450	11,495	50,087	42,551	16,695	160,704	416,210	177,640	92,638	863,887	847,192
	StdAbw	1,543	0,308	0,541	1,023							
RaA2	Mittelw.	60,932	9,832	46,933	39,097	5,701	132,666	383,618	163,515	86,030	771,530	765,829
	StdAbw	0,255	0,129	1,157	0,213							
RaA2T	Mittelw.	63,865	1,440	50,126	39,534	14,283	140,936	390,124	153,521	89,660	788,524	774,241
	StdAbw	2,684	0,083	1,391	1,955							
RaK1G	Mittelw.	62,905	9,642	48,988	39,590	13,378	125,432	372,619	158,654	88,578	758,661	745,283
	StdAbw	1,523	0,282	1,242	2,239							
RaK1P	Mittelw.	59,296	9,047	46,678	37,458	13,691	142,459	362,281	155,795	84,136	758,361	744,670
	StdAbw	2,183	0,560	0,924	0,770							
RaK1S	Mittelw.	57,485	9,966	49,735	40,069	7,946	125,783	346,435	159,433	89,804	729,400	721,454
	StdAbw	1,160	0,237	1,466	1,281							
RaG1	Mittelw.	56,151	9,679	47,896	37,415	19,943	140,261	374,618	153,438	85,310	773,570	753,627
	StdAbw	1,360	0,845	2,020	1,760							
Ra-Hg	Mittelw.	55,329	8,722	35,247	29,764	15,864	152,074	392,143	149,148	65,011	774,240	758,376
	StdAbw	0,777	0,598	2,136	0,033							

Tab.34.8.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe So vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
So-	Mittelw.	n.n.	4,023	0,299	2,428	2,416	11,534	9,974	7,303	6,667	9,376	4,421
	StdAbw		0,552	0,027	0,422	0,245	1,567	0,255	0,371	0,893	0,673	0,367
SoK1	Mittelw.	n.n.	4,647	0,317	3,082	3,128	12,747	11,241	8,059	7,707	9,535	5,183
	StdAbw		0,157	0,047	0,146	0,243	0,657	0,501	0,085	0,319	0,213	0,180
SoK1T	Mittelw.	n.n.	5,126	0,864	3,191	1,876	11,529	10,831	7,983	10,504	9,862	5,018
	StdAbw		1,232	0,489	0,068	0,289	1,135	0,529	0,379	0,708	0,461	0,137
SoK2	Mittelw.	n.n.	4,659	0,409	3,269	2,683	10,683	9,845	7,527	6,662	9,857	4,896
	StdAbw		0,217	0,037	0,107	0,012	0,950	0,465	0,475	0,163	0,228	0,035
SoK2T	Mittelw.	n.n.	0,214	0,900	2,521	7,846	8,859	13,018	6,444	8,550	6,835	4,541
	StdAbw		0,024	0,064	0,072	0,846	0,375	0,244	0,188	0,298	0,109	0,164
SoA1	Mittelw.	n.n.	4,556	0,339	3,135	2,686	9,988	10,131	7,466	6,602	9,435	4,493
	StdAbw		0,283	0,100	0,160	0,069	0,963	0,631	0,646	0,768	0,568	0,224
SoA1T	Mittelw.	n.n.	0,188	0,953	2,827	8,838	10,678	14,184	6,997	9,200	7,231	4,773
	StdAbw		0,012	0,049	0,174	0,531	0,363	0,072	0,018	0,101	0,271	0,040
SoA2	Mittelw.	n.n.	4,322	0,336	4,537	1,670	12,573	10,964	9,106	6,617	11,486	4,621
	StdAbw		0,211	0,023	0,246	0,030	0,459	0,102	0,063	0,137	0,073	0,184
SoA2T	Mittelw.	n.n.	0,188	0,726	1,797	8,354	8,943	12,850	6,387	8,863	7,599	4,370
	StdAbw		0,010	0,042	0,280	0,201	0,294	0,194	0,149	0,150	0,038	0,022
SoK1G	Mittelw.	n.n.	4,487	0,330	2,945	1,625	9,210	8,372	7,419	10,695	9,478	4,473
	StdAbw		0,105	0,107	0,060	0,017	0,309	0,357	0,533	0,315	0,433	0,294
SoK1P	Mittelw.	n.n.	4,541	0,337	2,908	2,642	10,261	9,778	7,951	11,132	9,440	5,434
	StdAbw		0,168	0,122	0,124	0,527	0,493	0,599	0,384	0,589	0,519	0,315
SoK1S	Mittelw.	n.n.	3,718	0,119	1,324	2,966	9,120	8,139	6,932	10,242	9,278	4,800
	StdAbw		0,261	0,019	0,370	0,159	0,348	0,178	0,171	0,885	0,107	0,020
SoG1	Mittelw.	n.n.	0,240	1,087	3,004	9,485	10,008	1,513	6,595	9,059	7,456	4,354
	StdAbw		0,047	0,112	0,605	0,252	0,645	0,081	0,339	0,271	0,415	0,119
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
So-	Mittelw.	9,633	1,907	7,864	7,656	n.n.	9,165	35,477	25,337	15,520	85,499	85,499
	StdAbw	1,585	0,278	0,596	0,641							
SoK1	Mittelw.	10,382	2,296	8,486	9,288	n.n.	11,174	39,755	27,397	17,773	96,100	96,100
	StdAbw	0,347	0,138	0,366	0,466							
SoK1T	Mittelw.	10,227	2,686	7,954	8,697	n.n.	11,058	40,847	27,792	16,651	96,349	96,349
	StdAbw	0,737	0,132	0,354	0,263							
SoK2	Mittelw.	9,349	2,315	7,851	8,455	n.n.	11,020	34,717	26,417	16,307	88,460	88,460
	StdAbw	0,263	0,052	0,159	0,380							
SoK2T	Mittelw.	10,528	1,441	8,617	5,478	n.n.	11,482	36,870	23,346	14,095	85,793	85,793
	StdAbw	0,890	0,042	0,722	0,115							
SoA1	Mittelw.	9,964	2,248	7,987	9,131	n.n.	10,716	34,188	26,140	17,119	88,162	88,162
	StdAbw	0,507	0,166	0,296	0,506							
SoA1T	Mittelw.	12,511	1,500	9,756	5,743	n.n.	12,806	41,059	26,015	15,499	95,379	95,379
	StdAbw	0,153	0,023	0,263	0,016							
SoA2	Mittelw.	11,536	2,219	8,377	7,434	n.n.	10,864	39,260	29,863	15,812	95,798	95,798
	StdAbw	0,469	0,097	0,382	0,614							
SoA2T	Mittelw.	10,844	1,453	8,845	5,489	n.n.	11,065	37,043	24,266	14,333	86,707	86,707
	StdAbw	0,102	0,017	0,274	0,147							
SoK1G	Mittelw.	10,112	2,532	7,424	8,733	n.n.	9,387	35,697	26,595	16,157	87,835	87,835
	StdAbw	0,331	0,311	0,421	0,536							
SoK1P	Mittelw.	10,012	3,319	8,385	9,351	n.n.	10,428	39,122	28,205	17,736	95,491	95,491
	StdAbw	0,369	0,061	0,073	0,210							
SoK1S	Mittelw.	9,435	3,041	7,725	8,659	n.n.	8,126	34,433	26,553	16,384	85,497	85,497
	StdAbw	0,099	0,176	0,135	0,213							
SoG1	Mittelw.	10,884	1,488	9,005	5,372	n.n.	13,816	27,175	24,181	14,377	79,550	79,550
	StdAbw	0,218	0,047	0,219	0,059							

Tab.34.8.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe So vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
So-	Mittelw.	32,500	14,333	7,443	43,800	19,167	135,667	113,333	76,067	62,800	83,000	30,567
	StdAbw	18,332	0,525	0,445	0,374	1,389	2,625	8,498	4,028	4,465	5,386	1,147
SoK1	Mittelw.	33,376	15,827	3,415	48,013	17,060	124,886	102,450	71,587	57,322	69,594	28,754
	StdAbw	4,526	1,124	0,197	1,926	0,718	0,594	0,970	1,591	3,711	1,358	1,871
SoK1T	Mittelw.	30,998	10,508	3,283	40,143	27,119	124,898	91,383	72,165	56,482	65,428	28,181
	StdAbw	1,384	1,403	0,402	3,407	2,087	2,455	3,596	0,511	1,272	1,863	0,386
SoK2	Mittelw.	16,303	14,419	3,324	49,363	15,242	154,266	114,884	78,838	66,391	77,243	30,339
	StdAbw	7,980	2,355	0,579	12,022	2,864	29,978	21,624	12,012	16,270	13,543	6,009
SoK2T	Mittelw.	24,923	10,760	4,579	49,884	25,520	120,393	33,547	67,327	80,855	59,390	30,347
	StdAbw	2,200	0,525	0,574	3,041	1,386	5,384	1,050	2,800	3,178	2,605	1,240
SoA1	Mittelw.	30,680	17,534	3,635	54,637	12,832	131,464	107,489	73,758	63,166	74,426	30,870
	StdAbw	4,634	2,073	0,520	3,226	2,496	7,495	5,076	6,339	29,799	2,780	1,968
SoA1T	Mittelw.	16,172	10,238	5,050	50,066	25,037	126,400	132,708	67,155	80,442	57,860	29,881
	StdAbw	2,798	0,801	0,375	3,648	0,743	2,334	3,735	1,201	1,770	0,738	0,961
SoA2	Mittelw.	20,946	16,908	3,946	54,266	15,715	144,933	114,600	79,713	67,094	77,398	31,055
	StdAbw	8,106	0,998	0,154	2,599	2,560	0,778	2,263	1,874	1,489	1,783	0,418
SoA2T	Mittelw.	23,091	10,726	4,940	51,942	27,695	133,700	158,606	72,972	84,944	67,301	30,563
	StdAbw	8,667	0,952	0,480	3,952	1,568	3,439	1,829	1,979	2,398	1,569	1,454
SoK1G	Mittelw.	24,786	11,728	4,378	47,530	31,873	117,182	120,432	71,131	82,196	56,241	33,792
	StdAbw	3,697	1,863	0,466	1,792	0,646	1,142	4,201	1,694	2,077	1,729	0,955
SoK1P	Mittelw.	20,016	9,805	3,535	44,042	30,392	112,454	113,060	69,321	79,031	55,728	32,752
	StdAbw	4,564	0,130	0,163	0,795	0,573	0,564	1,862	1,753	1,930	1,673	0,578
SoK1S	Mittelw.	n.n.	9,334	4,256	47,005	22,870	98,771	116,725	66,473	78,442	55,941	28,737
	StdAbw		1,774	0,423	4,878	1,287	3,248	3,761	1,664	1,638	3,052	0,715
SoG1	Mittelw.	23,790	11,795	5,025	54,704	25,991	133,036	149,928	70,097	81,585	63,341	30,513
	StdAbw	4,609	0,571	0,591	1,741	12,255	3,029	4,575	1,242	2,040	1,635	0,364
So-Hg	Mittelw.	42,333	19,400	10,157	64,700	15,300	138,000	100,433	73,000	66,600	72,233	31,467
	StdAbw	3,775	1,838	0,455	5,494	2,673	8,287	6,581	3,082	3,374	3,831	1,884
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
So-	Mittelw.	58,033	13,967	39,133	39,700	32,500	84,743	387,867	185,567	78,833	769,510	737,010
	StdAbw	2,819	1,466	2,240	2,209							
SoK1	Mittelw.	59,264	12,264	33,684	36,704	33,376	84,315	356,244	169,876	70,388	714,199	680,823
	StdAbw	1,452	0,795	0,673	1,517							
SoK1T	Mittelw.	58,748	17,438	39,227	46,259	30,998	81,052	344,928	169,795	85,486	712,259	681,261
	StdAbw	0,727	0,488	0,132	0,609							
SoK2	Mittelw.	72,637	14,680	39,645	38,076	16,303	82,349	414,378	194,899	77,721	785,650	769,346
	StdAbw	14,193	3,010	7,713	6,334							
SoK2T	Mittelw.	61,567	9,247	42,891	27,694	24,923	90,744	302,123	160,551	70,585	648,925	624,002
	StdAbw	2,486	0,337	2,400	1,741							
SoA1	Mittelw.	64,071	14,780	37,409	36,006	30,680	88,638	375,876	184,147	73,415	752,755	722,075
	StdAbw	5,314	1,710	3,159	1,976							
SoA1T	Mittelw.	60,079	9,323	44,032	26,811	16,172	90,391	406,705	157,144	70,844	741,256	725,084
	StdAbw	2,984	0,210	0,798	1,236							
SoA2	Mittelw.	69,270	14,167	37,933	41,087	20,946	90,836	406,340	191,890	79,020	789,031	768,086
	StdAbw	3,637	0,650	1,410	1,702							
SoA2T	Mittelw.	64,789	9,558	44,242	29,467	23,091	95,304	450,222	172,211	73,709	814,536	791,446
	StdAbw	2,216	0,349	1,089	0,906							
SoK1G	Mittelw.	60,218	11,516	34,252	31,645	24,786	95,509	390,942	161,767	65,897	738,900	714,114
	StdAbw	0,626	1,533	0,711	0,370							
SoK1P	Mittelw.	57,633	11,652	32,833	30,925	20,016	87,773	373,867	157,765	63,759	703,179	683,164
	StdAbw	1,104	0,599	0,075	0,319							
SoK1S	Mittelw.	48,432	9,792	43,229	37,920	n.n.	83,464	360,412	142,902	81,149	667,927	667,927
	StdAbw	5,568	0,864	2,282	5,162							
SoG1	Mittelw.	60,961	9,293	43,253	28,222	23,790	97,515	434,646	164,108	71,475	791,534	767,744
	StdAbw	1,667	0,150	0,440	0,452							
So-Hg	Mittelw.	59,967	11,900	37,500	40,167	42,333	109,557	378,033	175,567	77,667	783,157	740,823
	StdAbw	4,686	0,993	2,140	1,891							

Tab.34.8.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe So vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
So-	Mittelw.	n.n.	0,700	0,219	2,391	1,965	13,354	10,727	8,322	9,768	10,190	4,793
	StdAbw		0,032	0,011	0,100	0,071	0,990	0,358	0,185	0,304	0,310	0,055
SoK1	Mittelw.	n.n.	0,596	0,197	2,166	2,252	14,053	11,362	9,455	11,974	12,918	6,377
	StdAbw		0,055	0,022	0,216	0,261	0,627	0,205	0,146	0,243	0,070	0,280
SoK1T	Mittelw.	n.n.	0,183	0,162	3,048	0,606	13,082	9,617	8,137	10,716	10,503	4,916
	StdAbw		0,078	0,096	1,068	0,013	0,220	0,095	1,026	0,219	0,650	0,231
SoK2	Mittelw.	n.n.	0,441	0,164	1,868	1,561	12,091	9,015	8,017	9,439	10,385	5,364
	StdAbw		0,008	0,013	0,085	0,209	0,218	0,233	0,079	0,013	0,033	0,161
SoK2T	Mittelw.	n.b.	0,124	0,509	1,877	8,138	8,502	11,725	5,894	8,260	7,396	4,277
	StdAbw	0,055	0,006	0,004	0,091	0,691	0,158	0,560	0,231	0,185	0,243	0,087
SoA1	Mittelw.	n.n.	0,380	0,144	1,722	1,612	11,078	8,354	7,534	9,179	10,550	5,343
	StdAbw		0,029	0,005	0,054	0,141	0,091	0,115	0,258	0,165	0,066	0,266
SoA1T	Mittelw.	n.n.	n.b.	n.b.	2,052	9,152	8,604	12,416	6,025	8,381	7,319	4,357
	StdAbw				0,049	0,045	0,194	0,059	0,113	0,217	0,203	0,159
SoA2	Mittelw.	n.n.	0,488	0,176	1,903	1,858	11,551	8,786	7,981	9,549	10,684	5,418
	StdAbw		0,141	0,057	0,266	0,180	0,339	0,203	0,199	0,412	0,229	0,213
SoA2T	Mittelw.	n.n.	n.b.	n.b.	1,755	8,983	8,259	12,555	6,097	8,593	7,441	4,373
	StdAbw				0,283	0,273	0,435	0,198	0,226	0,104	0,060	0,129
SoK1G	Mittelw.	n.n.	0,184	n.b.	2,489	1,013	12,149	9,531	8,062	10,992	10,116	4,835
	StdAbw		0,023	0,012	0,376	0,182	0,261	0,572	0,377	0,642	0,475	0,222
SoK1P	Mittelw.	0,855	0,883	0,439	5,161	1,485	14,822	11,030	8,841	12,306	11,964	5,601
	StdAbw	0,425	0,307	0,055	0,996	0,277	0,920	0,786	0,177	0,358	0,135	0,071
SoK1S	Mittelw.	n.b.	0,192	0,334	3,190	9,526	8,755	11,110	6,368	8,883	6,592	4,791
	StdAbw	0,109	0,011	0,029	0,190	0,016	0,525	0,183	0,777	0,562	0,279	0,178
SoG1	Mittelw.	n.n.	0,166	0,543	2,222	9,436	9,636	13,663	6,310	8,881	7,659	4,309
	StdAbw		0,006	0,014	0,303	0,172	0,250	0,505	0,101	0,159	0,225	0,054
So-Hg	Mittelw.	n.n.	0,665	n.n.	2,967	2,363	13,133	10,633	8,590	10,200	10,867	5,287
	StdAbw		0,042		0,416	0,172	0,741	0,759	0,476	0,082	0,249	0,137
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
So-	Mittelw.	10,741	2,126	8,406	7,352	n.n.	5,275	42,171	27,850	15,758	91,055	91,055
	StdAbw	0,189	0,152	0,095	0,415							
SoK1	Mittelw.	12,279	2,609	9,735	8,618	n.n.	5,211	46,844	34,183	18,353	104,590	104,590
	StdAbw	0,396	0,132	0,058	0,080							
SoK1T	Mittelw.	8,658	3,074	8,427	6,878	n.n.	3,998	41,552	27,150	15,304	88,005	88,005
	StdAbw	1,148	0,224	0,857	0,535							
SoK2	Mittelw.	10,036	2,086	7,528	6,847	n.n.	4,034	38,562	27,871	14,375	84,842	84,842
	StdAbw	0,187	0,028	0,074	0,118							
SoK2T	Mittelw.	10,476	1,417	7,863	5,147	n.b.	10,649	34,381	23,565	13,011	81,644	81,605
	StdAbw	0,320	0,047	0,297	0,108							
SoA1	Mittelw.	9,839	2,108	7,443	7,145	n.n.	3,859	36,144	27,840	14,588	82,431	82,431
	StdAbw	0,217	0,141	0,073	0,050							
SoA1T	Mittelw.	10,146	1,427	8,517	5,216	n.n.	11,204	35,426	23,249	13,732	83,611	83,611
	StdAbw	0,356	0,010	0,127	0,179							
SoA2	Mittelw.	10,413	2,045	7,697	7,258	n.n.	4,426	37,867	28,561	14,954	85,808	85,808
	StdAbw	0,220	0,050	0,206	0,136							
SoA2T	Mittelw.	10,484	1,453	8,247	5,355	n.n.	10,738	35,505	23,752	13,602	83,597	83,597
	StdAbw	0,278	0,023	0,193	0,041							
SoK1G	Mittelw.	10,544	3,117	8,944	7,808	n.n.	3,744	40,734	28,612	16,752	89,841	89,841
	StdAbw	1,240	0,080	0,205	0,176							
SoK1P	Mittelw.	10,470	3,062	8,754	7,978	0,855	7,968	46,999	31,097	16,732	103,651	102,796
	StdAbw	0,458	0,270	0,455	0,238							
SoK1S	Mittelw.	9,292	1,604	7,747	7,363	n.b.	13,242	35,117	22,278	15,109	85,855	85,746
	StdAbw	0,098	0,147	0,136	0,113							
SoG1	Mittelw.	10,903	1,521	8,707	5,195	n.n.	12,367	38,489	24,392	13,902	89,150	89,150
	StdAbw	0,380	0,007	0,133	0,117							
So-Hg	Mittelw.	11,433	2,327	7,183	6,943	n.n.	5,995	42,557	29,913	14,127	92,592	92,592
	StdAbw	0,340	0,045	0,184	0,252							

Tab.34.8.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe So vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
So-	Mittelw.	n.n.	n.b.	0,254	1,067	11,376	8,452	12,314	6,755	9,525	6,599	4,719
	StdAbw		0,004	0,046	0,243	0,249	0,314	0,458	0,151	0,192	0,242	0,062
SoK1	Mittelw.	0,857	0,116	0,289	1,497	10,420	7,861	11,402	6,038	8,435	6,572	4,308
	StdAbw	0,190	0,036	0,051	0,190	0,082	0,376	0,334	0,027	0,013	0,013	0,055
SoK1T	Mittelw.	0,382	n.b.	n.b.	1,765	11,102	7,985	12,223	6,759	9,229	7,414	4,677
	StdAbw	0,115			0,069	0,254	0,153	0,377	0,183	0,327	0,141	0,075
SoK2	Mittelw.	0,310	n.b.	0,239	1,568	12,145	8,535	12,506	6,934	9,610	7,341	4,881
	StdAbw	0,009	0,014	0,001	0,294	0,260	0,701	0,699	0,241	0,367	0,288	0,078
SoK2T	Mittelw.	0,323	n.b.	n.b.	1,312	11,087	7,516	11,136	6,515	9,017	6,833	4,442
	StdAbw	0,127			0,038	0,212	0,082	0,013	0,059	0,130	0,000	0,253
SoA1	Mittelw.	0,395	n.b.	0,274	1,506	11,700	8,036	11,640	6,569	9,264	6,800	4,634
	StdAbw	0,121	0,011	0,017	0,395	0,158	0,455	0,248	0,167	0,185	0,028	0,041
SoA1T	Mittelw.	0,372	n.b.	n.b.	1,193	12,279	7,120	10,782	6,297	8,847	6,721	4,533
	StdAbw	0,053			0,106	1,403	0,432	0,328	0,177	0,262	0,105	0,283
SoA2	Mittelw.	0,473	0,098	0,267	1,167	12,111	7,456	10,848	6,028	8,500	6,374	4,296
	StdAbw	0,226	0,007	0,003	0,032	1,140	0,510	0,538	0,215	0,309	0,153	0,096
SoA2T	Mittelw.	0,420	n.b.	n.b.	1,434	11,433	8,476	11,918	6,842	9,465	7,308	4,857
	StdAbw	0,018			0,179	0,201	0,572	0,483	0,203	0,229	0,128	0,028
SoK1G	Mittelw.	0,303	n.b.	0,235	1,134	10,025	6,527	9,576	5,654	7,844	6,422	4,262
	StdAbw	0,031	0,006	0,019	0,016	0,435	0,342	0,597	0,417	0,369	0,365	0,224
SoK1P	Mittelw.	0,376	n.b.	0,250	1,111	10,755	7,411	11,327	6,407	8,955	7,308	4,594
	StdAbw	0,142	0,002	0,003	0,051	0,268	0,271	0,562	0,308	0,390	0,424	0,208
SoK1S	Mittelw.	0,521	n.b.	0,238	1,110	8,727	5,653	9,178	5,577	7,937	6,778	4,335
	StdAbw	0,003	0,007	0,019	0,058	0,139	0,528	0,123	0,197	0,150	0,278	0,042
SoG1	Mittelw.	0,420	n.b.	0,260	1,084	11,581	8,022	12,180	6,930	9,616	7,558	4,887
	StdAbw	0,120	0,007	0,019	0,246	0,145	0,219	0,286	0,143	0,143	0,148	0,037
So-Hg	Mittelw.	n.n.	n.b.	0,249	1,452	11,211	7,760	12,495	6,725	9,859	7,023	4,979
	StdAbw		0,013	0,002	0,238	0,441	0,438	0,329	0,210	0,275	0,194	0,100
Probe		BaPYR	DBaHAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
So-	Mittelw.	9,803	1,733	7,510	6,224	n.n.	12,740	37,045	22,854	13,734	86,372	86,372
	StdAbw	0,020	0,213	0,094	0,199							
SoK1	Mittelw.	8,947	1,624	6,817	5,609	0,857	12,322	33,735	21,452	12,426	80,792	79,935
	StdAbw	0,073	0,211	0,111	0,023							
SoK1T	Mittelw.	9,635	1,776	7,503	6,207	0,382	12,867	36,195	23,503	13,710	86,658	86,276
	StdAbw	0,203	0,036	0,013	0,069							
SoK2	Mittelw.	10,219	1,762	7,601	6,481	0,310	14,020	37,585	24,203	14,081	90,199	89,889
	StdAbw	0,266	0,181	0,209	0,312							
SoK2T	Mittelw.	9,544	1,753	7,009	6,391	0,323	12,399	34,185	22,572	13,400	82,878	82,556
	StdAbw	0,230	0,210	0,405	0,026							
SoA1	Mittelw.	9,809	1,927	7,022	6,362	0,395	13,566	35,509	23,170	13,384	86,024	85,629
	StdAbw	0,196	0,040	0,127	0,084							
SoA1T	Mittelw.	9,249	1,658	6,855	6,603	0,372	13,472	33,047	22,161	13,458	82,509	82,137
	StdAbw	0,039	0,117	0,334	0,177							
SoA2	Mittelw.	9,097	1,588	6,273	5,902	0,473	13,642	32,831	21,356	12,175	80,477	80,004
	StdAbw	0,039	0,162	0,385	0,221							
SoA2T	Mittelw.	9,791	1,810	7,492	6,443	0,420	12,868	36,702	23,766	13,935	87,691	87,271
	StdAbw	0,314	0,132	0,064	0,149							
SoK1G	Mittelw.	8,368	1,517	6,158	5,688	0,303	11,463	29,601	20,570	11,846	73,783	73,480
	StdAbw	0,484	0,064	0,222	0,173							
SoK1P	Mittelw.	9,817	1,616	6,621	5,909	0,376	12,197	34,100	23,334	12,530	82,537	82,161
	StdAbw	0,349	0,127	0,271	0,298							
SoK1S	Mittelw.	8,595	1,582	6,797	5,855	0,521	10,141	28,344	21,291	12,653	72,949	72,429
	StdAbw	0,146	0,084	0,080	0,064							
SoG1	Mittelw.	10,276	1,793	7,346	6,282	0,420	13,007	36,747	24,514	13,628	88,317	87,896
	StdAbw	0,284	0,081	0,182	0,041							
So-Hg	Mittelw.	10,094	1,592	7,233	6,685	n.n.	12,995	36,839	23,688	13,918	87,439	87,439
	StdAbw	0,463	0,090	0,246	0,118							

Tab.34.8.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe So vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
So-	Mittelw.	n.b.	0,135	0,501	2,207	8,686	8,998	14,963	7,255	9,596	8,077	4,846
	StdAbw	0,211	0,008	0,043	0,197	0,102	0,561	0,679	0,329	0,421	0,110	0,250
SoK1	Mittelw.	n.b.	0,129	0,493	2,012	8,977	8,993	14,404	6,971	9,110	7,665	4,486
	StdAbw	0,127	0,012	0,030	0,211	0,287	0,185	0,756	0,230	0,061	0,295	0,031
SoK1T	Mittelw.	0,410	n.b.	n.b.	2,172	7,731	7,855	12,013	5,902	8,199	6,458	4,180
	StdAbw	0,120			0,261	0,111	0,030	0,097	0,058	0,041	0,367	0,097
SoK2	Mittelw.	0,232	0,119	0,485	1,949	8,884	7,472	13,519	6,378	8,509	7,249	4,447
	StdAbw	0,173	0,005	0,021	0,085	0,260	0,264	0,608	0,327	0,341	0,562	0,115
SoK2T	Mittelw.	n.b.	n.b.	n.b.	2,460	7,989	6,816	13,274	6,273	8,032	6,742	4,253
	StdAbw	0,082			0,439	0,957	0,302	1,029	0,391	0,376	0,266	0,135
SoA1	Mittelw.	n.n.	0,137	0,579	3,147	9,509	9,218	14,618	6,724	8,794	7,725	4,608
	StdAbw		0,017	0,098	1,025	0,575	0,516	0,227	0,120	0,115	0,167	0,215
SoA1T	Mittelw.	0,330	n.b.	n.b.	1,707	8,606	8,227	12,402	6,267	8,152	6,920	3,823
	StdAbw	0,081			0,199	0,028	0,488	0,497	0,111	0,034	0,091	0,026
SoA2	Mittelw.	n.b.	n.b.	0,316	1,436	9,817	8,101	13,227	6,363	8,489	7,262	4,426
	StdAbw	0,205	0,009	0,038	0,285	0,357	0,513	0,298	0,079	0,116	0,254	0,037
SoA2T	Mittelw.	0,396	n.b.	n.b.	1,763	8,610	7,238	11,684	5,757	7,699	6,434	3,990
	StdAbw	0,059			0,175	0,341	0,359	0,455	0,229	0,331	0,154	0,218
SoK1G	Mittelw.	n.b.	0,176	0,484	2,942	8,979	6,979	13,259	6,430	8,915	7,160	4,039
	StdAbw	0,236	0,040	0,077	0,411	0,212	1,975	0,329	0,150	0,066	0,460	0,260
SoK1P	Mittelw.	n.n.	0,122	0,485	1,679	9,409	8,054	12,938	6,202	8,213	7,396	4,390
	StdAbw		0,008	0,039	0,064	0,222	0,306	0,325	0,179	0,180	0,139	0,043
SoK1S	Mittelw.	n.n.	n.b.	0,347	1,763	7,332	5,320	9,307	4,842	6,926	6,623	4,145
	StdAbw		0,018	0,017	0,095	0,244	0,131	0,175	0,122	0,071	0,230	0,122
SoG1	Mittelw.	n.n.	0,101	0,326	1,520	9,411	8,476	13,532	6,229	8,528	6,909	4,008
	StdAbw		0,000	0,012	0,009	0,540	0,373	0,487	0,223	0,270	0,006	0,215
So-Hg	Mittelw.	n.n.	0,098	0,267	1,301	10,754	7,388	12,071	6,376	9,293	6,992	4,688
	StdAbw		0,008	0,036	0,032	0,314	0,331	0,168	0,076	0,083	0,093	0,014
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
So-	Mittelw.	10,769	1,714	10,314	6,308	n.b.	11,530	40,811	25,405	16,622	94,517	94,368
	StdAbw	0,552	0,045	0,025	0,156							
SoK1	Mittelw.	10,263	1,588	9,572	5,539	n.b.	11,612	39,477	24,002	15,112	90,293	90,203
	StdAbw	0,640	0,053	0,189	0,286							
SoK1T	Mittelw.	9,291	1,478	8,841	5,474	0,410	9,903	33,970	21,408	14,314	80,005	79,595
	StdAbw	0,700	0,027	0,289	0,151							
SoK2	Mittelw.	9,868	1,562	8,706	5,566	0,232	11,436	35,879	23,125	14,271	84,944	84,711
	StdAbw	0,359	0,026	0,354	0,251							
SoK2T	Mittelw.	9,605	1,507	8,896	5,389	n.b.	10,449	34,396	22,107	14,284	81,293	81,235
	StdAbw	0,492	0,041	0,300	0,183							
SoA1	Mittelw.	10,097	1,622	9,398	5,537	n.n.	13,371	39,354	24,052	14,935	91,713	91,713
	StdAbw	0,656	0,044	0,349	0,207							
SoA1T	Mittelw.	8,975	1,487	9,102	5,622	0,330	10,313	35,048	21,206	14,724	81,621	81,292
	StdAbw	0,287	0,055	0,304	0,200							
SoA2	Mittelw.	9,233	1,553	9,037	5,465	n.b.	11,664	36,180	22,474	14,502	85,011	84,820
	StdAbw	0,496	0,028	0,128	0,111							
SoA2T	Mittelw.	8,474	1,437	9,160	5,393	0,396	10,373	32,378	20,336	14,553	78,035	77,639
	StdAbw	0,351	0,045	0,277	0,146							
SoK1G	Mittelw.	9,261	1,561	9,594	5,604	n.b.	12,581	35,583	22,021	15,198	85,550	85,383
	StdAbw	0,080	0,032	0,082	0,128							
SoK1P	Mittelw.	8,174	1,499	8,900	5,470	n.n.	11,695	35,406	21,458	14,370	82,930	82,930
	StdAbw	0,042	0,005	0,270	0,150							
SoK1S	Mittelw.	8,261	1,464	9,913	5,539	n.n.	9,520	26,395	20,493	15,452	71,859	71,859
	StdAbw	0,128	0,045	0,685	0,069							
SoG1	Mittelw.	9,547	1,487	9,380	5,444	n.n.	11,358	36,766	21,951	14,824	84,898	84,898
	StdAbw	0,379	0,064	0,082	0,104							
So-Hg	Mittelw.	9,143	1,408	7,527	6,346	n.n.	12,421	35,129	22,231	13,873	83,653	83,653
	StdAbw	0,483	0,054	0,675	0,066							

Tab.34.9.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	7,117	2,720	22,558	70,400	8,697	22,173	12,108	7,666	7,984	5,101	2,226
	StdAbw	1,412	0,344	0,848	2,039	0,275	0,926	0,282	0,238	0,200	0,149	0,139
ÜbK1	Mittelw.	3,506	1,934	17,112	60,200	7,197	20,426	11,075	7,446	7,974	4,859	2,131
	StdAbw	1,045	0,069	0,527	2,865	0,214	0,754	0,563	0,175	1,366	0,069	0,106
ÜbK2	Mittelw.	5,688	1,300	13,982	24,573	7,133	22,278	10,812	7,001	8,253	4,970	2,368
	StdAbw	3,852	0,368	2,095	1,123	0,137	0,128	0,506	0,310	0,604	0,208	0,067
ÜbA1	Mittelw.	3,966	0,897	11,754	24,145	6,792	20,044	10,036	6,826	6,674	4,708	2,122
	StdAbw	1,111	0,080	0,871	1,436	1,211	1,347	0,676	0,320	0,131	0,223	0,169
ÜbA2	Mittelw.	2,503	1,049	10,822	24,066	7,746	21,468	11,099	7,519	8,241	5,455	2,654
	StdAbw	2,828	0,451	1,185	0,409	0,695	0,090	0,063	0,393	1,101	0,144	0,199
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	2,714	0,684	2,170	2,214	7,117	104,374	49,931	10,725	4,384	176,532	169,415
	StdAbw	0,113	0,068	0,136	0,084							
ÜbK1	Mittelw.	2,634	0,689	1,995	2,155	3,506	86,443	46,921	10,314	4,150	151,334	147,828
	StdAbw	0,057	0,010	0,117	0,063							
ÜbK2	Mittelw.	2,866	0,793	2,147	2,358	5,688	46,988	48,344	10,998	4,504	116,522	110,834
	StdAbw	0,106	0,034	0,144	0,283							
ÜbA1	Mittelw.	2,382	0,583	1,861	2,178	3,966	43,587	43,580	9,796	4,039	104,968	101,002
	StdAbw	0,083	0,044	0,117	0,181							
ÜbA2	Mittelw.	3,123	0,755	2,468	2,714	2,503	43,684	48,327	11,987	5,181	111,682	109,179
	StdAbw	0,176	0,079	0,193	0,112							

Tab.34.9.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	2,156	0,672	5,131	36,367	6,673	22,548	13,001	8,640	9,608	6,168	2,408
	StdAbw	0,971	0,319	1,128	0,459	0,485	0,182	0,175	0,409	0,566	0,178	0,127
ÜbK1	Mittelw.	2,022	0,563	3,060	4,429	2,152	11,792	11,368	7,765	7,838	5,845	2,603
	StdAbw	0,987	0,091	0,290	0,319	0,330	0,763	0,452	0,163	0,553	0,277	0,218
ÜbK2	Mittelw.	0,948	0,740	5,482	6,263	3,772	16,244	12,355	7,882	8,855	5,256	2,535
	StdAbw	0,598	0,280	0,757	0,323	0,238	0,363	0,139	0,047	0,508	0,082	0,170
ÜbA1	Mittelw.	0,708	0,490	2,767	4,410	2,004	11,721	11,473	8,537	8,607	5,827	2,792
	StdAbw	0,439	0,192	0,222	0,965	0,240	0,424	0,288	0,406	0,281	0,194	0,169
ÜbA2	Mittelw.	0,877	0,655	2,556	11,547	3,464	12,177	8,841	6,130	7,595	6,016	2,186
	StdAbw	0,506	0,126	0,140	1,143	0,946	1,026	0,182	0,227	0,044	0,034	0,051
Üb-Hg	Mittelw.	2,944	4,501	28,884	76,987	16,596	20,800	15,180	5,851	7,493	4,073	2,055
	StdAbw	0,370	0,501	1,725	4,012	0,637	0,744	0,539	0,059	0,432	0,077	0,031
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	3,733	0,739	1,905	3,758	2,156	48,843	53,797	13,049	5,662	123,507	121,351
	StdAbw	0,227	0,100	0,214	0,023							
ÜbK1	Mittelw.	3,132	0,935	2,334	2,653	2,022	10,204	38,764	12,515	4,987	68,492	66,470
	StdAbw	0,176	0,102	0,184	0,177							
ÜbK2	Mittelw.	3,089	0,921	2,260	3,320	0,948	16,257	45,336	11,801	5,579	79,921	78,973
	StdAbw	0,139	0,052	0,042	0,106							
ÜbA1	Mittelw.	3,196	0,962	2,514	3,119	0,708	9,671	40,337	12,776	5,634	69,126	68,418
	StdAbw	0,160	0,056	0,129	0,062							
ÜbA2	Mittelw.	3,679	1,182	2,521	3,885	0,877	18,222	34,744	13,063	6,406	73,312	72,435
	StdAbw	0,110	0,012	0,067	0,179							
Üb-Hg	Mittelw.	2,389	0,617	1,858	1,794	2,944	126,967	49,324	9,134	3,652	192,021	189,077
	StdAbw	0,071	0,018	0,032	0,051							

Tab.34.9.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	3,105	0,606	2,549	4,003	2,157	8,241	6,011	6,766	7,089	5,575	2,604
	StdAbw	1,018	0,069	0,152	0,422	0,456	0,482	0,403	0,302	0,214	0,173	0,118
ÜbK1	Mittelw.	0,696	0,332	1,941	2,163	1,535	10,477	7,083	5,148	5,999	5,233	2,152
	StdAbw	0,495	0,044	0,159	0,393	0,211	0,139	0,145	0,104	0,458	0,134	0,147
ÜbK2	Mittelw.	0,205	0,480	3,195	4,892	0,926	9,881	7,881	5,231	5,660	5,532	2,326
	StdAbw	0,149	0,279	0,373	0,885	0,210	0,761	0,237	0,579	1,154	0,196	0,119
ÜbA1	Mittelw.	0,309	0,498	2,410	2,712	1,600	11,031	8,170	4,954	5,294	5,523	2,316
	StdAbw	0,222	0,137	0,145	0,411	0,178	0,489	0,248	0,115	0,147	0,149	0,050
ÜbA2	Mittelw.	3,670	0,434	1,991	2,808	1,788	8,591	6,136	4,276	5,740	5,478	2,260
	StdAbw	1,821	0,015	0,127	0,494	0,159	0,794	0,197	0,309	0,761	0,176	0,104
Üb-Hg	Mittelw.	3,546	2,894	20,887	66,634	11,816	18,818	13,671	4,930	6,530	3,861	1,913
	StdAbw	1,564	0,491	2,378	3,060	0,243	0,856	0,652	0,230	0,130	0,201	0,100
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	2,895	0,688	2,421	2,550	3,105	9,315	28,107	11,761	4,971	57,258	54,153
	StdAbw	0,263	0,095	0,305	0,260							
ÜbK1	Mittelw.	2,797	0,640	2,228	2,433	0,696	5,972	28,706	10,822	4,661	50,857	50,161
	StdAbw	0,028	0,011	0,069	0,026							
ÜbK2	Mittelw.	2,571	0,708	2,404	2,696	0,205	9,493	28,653	11,138	5,100	54,589	54,384
	StdAbw	0,181	0,015	0,094	0,164							
ÜbA1	Mittelw.	2,639	0,653	2,182	2,713	0,309	7,219	29,450	11,131	4,894	53,002	52,693
	StdAbw	0,071	0,038	0,046	0,100							
ÜbA2	Mittelw.	2,377	0,645	2,200	2,918	3,670	7,020	24,743	10,760	5,118	51,312	47,642
	StdAbw	0,089	0,071	0,264	0,263							
Üb-Hg	Mittelw.	1,568	0,421	1,588	1,617	3,546	102,230	43,950	7,764	3,205	160,694	157,148
	StdAbw	0,154	0,029	0,040	0,077							

Tab.34.9.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	5,548	0,585	2,368	4,156	1,291	8,847	6,592	5,129	6,084	5,885	2,363
	StdAbw	1,340	0,039	0,201	0,280	0,123	0,249	0,134	0,026	0,458	0,045	0,044
ÜbK1	Mittelw.	2,432	0,308	2,180	3,172	1,752	8,647	6,133	4,468	6,898	5,098	2,096
	StdAbw	1,677	0,104	0,211	0,658	0,479	0,222	0,618	0,292	1,064	0,947	0,407
ÜbK2	Mittelw.	1,431	0,514	3,534	4,858	1,760	9,894	7,002	5,412	5,340	5,386	2,023
	StdAbw	0,939	0,120	0,318	0,746	0,123	0,310	0,304	0,089	0,107	0,214	0,088
ÜbA1	Mittelw.	1,085	0,412	2,080	2,868	1,662	9,960	7,481	5,304	6,359	5,449	2,126
	StdAbw	1,303	0,041	0,328	0,977	0,326	0,268	0,291	0,247	0,307	0,120	0,032
ÜbA2	Mittelw.	1,406	0,503	2,956	3,616	2,516	11,140	8,378	5,381	5,853	6,308	2,436
	StdAbw	0,852	0,120	0,504	0,158	0,747	0,807	0,687	0,582	0,533	0,182	0,112
Üb-Hg	Mittelw.	16,783	94,279	35,864	65,182	6,005	21,940	12,291	7,891	7,641	5,145	2,056
	StdAbw	1,136	8,127	3,154	4,496	0,534	0,474	1,469	1,091	0,421	0,061	0,110
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	2,683	0,804	3,373	3,471	5,548	8,400	26,650	11,735	6,844	59,177	53,629
	StdAbw	0,420	0,169	1,059	0,894							
ÜbK1	Mittelw.	2,978	0,686	2,949	2,558	2,432	7,412	26,145	10,858	5,507	52,355	49,923
	StdAbw	0,616	0,267	1,324	0,777							
ÜbK2	Mittelw.	2,811	0,707	2,340	2,037	1,431	10,666	27,647	10,928	4,377	55,049	53,618
	StdAbw	0,036	0,137	0,197	0,110							
ÜbA1	Mittelw.	3,209	0,883	2,320	2,660	1,085	7,022	29,104	11,667	4,980	53,858	52,773
	StdAbw	0,036	0,049	0,084	0,014							
ÜbA2	Mittelw.	3,545	0,893	2,773	3,197	1,406	9,590	30,753	13,182	5,971	60,902	59,495
	StdAbw	0,108	0,102	0,198	0,147							
Üb-Hg	Mittelw.	2,110	0,757	2,091	2,227	16,783	201,329	49,763	10,069	4,318	282,262	265,479
	StdAbw	0,002	0,202	0,062	0,168							

Tab.34.9.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	0,548	0,602	2,219	3,231	7,802	6,173	8,605	3,886	5,466	4,482	1,942
	StdAbw	0,121	0,039	0,024	0,313	0,494	0,300	0,137	0,120	0,508	0,104	0,050
ÜbK1	Mittelw.	n.b.	0,545	2,058	2,902	6,719	6,441	8,165	3,325	5,467	4,118	1,728
	StdAbw	0,022	0,014	0,023	0,051	0,209	0,076	0,083	0,047	0,159	0,117	0,008
ÜbK2	Mittelw.	3,280	0,819	2,595	3,404	6,325	6,560	8,843	3,580	5,373	3,741	1,790
	StdAbw	0,909	0,033	0,023	0,235	0,006	0,326	0,347	0,102	0,171	0,140	0,101
ÜbA1	Mittelw.	0,311	0,574	1,872	2,978	6,059	6,776	8,124	3,630	5,360	3,804	1,698
	StdAbw	0,421	0,178	0,450	0,656	1,337	1,582	1,881	0,897	1,323	0,879	0,375
ÜbA2	Mittelw.	0,368	0,572	1,771	2,984	5,731	6,818	8,470	3,096	4,574	4,126	1,666
	StdAbw	0,290	0,038	0,097	0,449	0,108	0,099	0,220	0,120	0,071	0,203	0,013
Üb-Hg	Mittelw.	1,613	2,117	20,959	70,973	17,560	19,814	15,031	5,731	7,340	4,059	2,028
	StdAbw	0,206	0,307	0,859	1,496	1,525	1,266	0,246	0,038	0,374	0,061	0,015
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	2,833	0,660	2,675	1,743	0,548	13,854	24,131	9,917	4,418	52,869	52,320
	StdAbw	0,078	0,025	0,044	0,020							
ÜbK1	Mittelw.	2,672	0,633	2,396	1,650	n.b.	12,225	23,397	9,151	4,046	48,840	48,818
	StdAbw	0,127	0,005	0,108	0,043							
ÜbK2	Mittelw.	2,565	0,582	2,218	1,501	3,280	13,144	24,356	8,678	3,719	53,177	49,897
	StdAbw	0,168	0,013	0,028	0,040							
ÜbA1	Mittelw.	2,530	0,551	2,165	1,542	0,311	11,484	23,890	8,583	3,707	47,975	47,664
	StdAbw	0,500	0,109	0,503	0,295							
ÜbA2	Mittelw.	2,662	0,578	2,403	1,564	0,368	11,059	22,959	9,032	3,967	47,385	47,018
	StdAbw	0,058	0,011	0,212	0,060							
Üb-Hg	Mittelw.	2,185	0,546	1,639	1,744	1,613	111,610	47,915	8,818	3,383	173,339	171,726
	StdAbw	0,036	0,029	0,044	0,039							

Tab.34.9.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 01.06.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	2,460	0,859	1,687	2,612	6,937	4,077	5,635	2,943	4,582	4,667	1,728
	StdAbw	1,175	0,324	0,331	0,460	0,549	0,664	0,533	0,076	0,460	0,292	0,016
ÜbK1	Mittelw.	0,314	0,590	1,522	2,553	6,501	4,157	6,011	3,182	5,168	5,109	1,660
	StdAbw	0,445	0,051	0,062	0,510	0,095	0,223	0,037	0,206	0,637	0,522	0,155
ÜbK2	Mittelw.	0,344	0,625	1,744	2,866	7,177	3,967	6,752	3,834	7,157	5,001	1,715
	StdAbw	0,260	0,179	0,353	0,187	0,431	0,468	0,471	0,270	0,461	0,184	0,123
ÜbA1	Mittelw.	2,274	0,817	1,718	2,832	7,315	4,567	6,971	3,900	5,631	5,200	1,686
	StdAbw	0,323	0,062	0,050	0,347	0,488	0,056	0,235	0,035	0,205	0,245	0,095
ÜbA2	Mittelw.	0,866	0,548	1,257	2,815	6,928	3,628	6,107	3,538	8,594	5,008	1,745
	StdAbw	0,462	0,128	0,146	0,196	0,573	0,742	0,259	0,405	0,323	0,153	0,123
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	3,224	0,749	2,921	2,388	2,460	12,096	17,237	10,368	5,309	47,471	45,011
	StdAbw	0,052	0,069	0,050	0,134							
ÜbK1	Mittelw.	3,394	0,866	3,035	2,305	0,314	11,167	18,519	11,029	5,340	46,369	46,054
	StdAbw	0,085	0,046	0,154	0,124							
ÜbK2	Mittelw.	3,344	0,877	2,928	2,251	0,344	12,411	21,710	10,937	5,179	50,580	50,237
	StdAbw	0,320	0,062	0,077	0,053							
ÜbA1	Mittelw.	3,508	0,842	3,066	2,384	2,274	12,681	21,069	11,236	5,449	52,709	50,435
	StdAbw	0,047	0,050	0,060	0,056							
ÜbA2	Mittelw.	3,161	0,840	2,893	2,237	0,866	11,548	21,867	10,754	5,130	50,166	49,300
	StdAbw	0,091	0,051	0,095	0,124							

Tab.34.9.7: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	1,945	0,367	1,182	2,072	5,509	2,501	3,901	2,052	4,203	3,673	1,514
	StdAbw	1,595	0,109	0,159	0,303	0,595	0,114	0,063	0,127	0,838	0,152	0,036
ÜbK1	Mittelw.	1,674	0,495	1,402	2,266	5,411	2,949	4,584	2,442	5,042	3,864	1,590
	StdAbw	1,195	0,028	0,099	0,119	0,646	0,379	0,489	0,311	0,817	0,404	0,103
ÜbK2	Mittelw.	0,799	0,407	1,275	2,241	4,137	2,978	4,268	2,097	3,774	3,335	1,461
	StdAbw	0,609	0,159	0,404	0,719	0,773	0,687	0,806	0,451	0,842	0,384	0,194
ÜbA1	Mittelw.	n.b.	0,285	0,960	1,635	4,392	2,942	4,616	2,439	3,919	4,012	1,652
	StdAbw	0,078	0,084	0,159	0,085	0,124	0,088	0,022	0,035	0,187	0,122	0,004
ÜbA2	Mittelw.	0,823	0,447	1,181	1,529	4,852	2,849	4,540	2,609	3,948	3,640	1,535
	StdAbw	0,611	0,053	0,082	0,065	0,461	0,318	0,205	0,113	0,202	0,151	0,012
Üb-Hg	Mittelw.	3,597	0,845	11,757	61,651	12,667	20,002	14,486	5,604	6,761	4,164	2,067
	StdAbw	0,722	0,058	0,312	1,080	0,736	0,579	0,125	0,268	0,121	0,059	0,095
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	2,705	0,601	2,407	1,702	1,945	9,130	12,657	8,493	4,110	36,335	34,390
	StdAbw	0,025	0,016	0,030	0,040							
ÜbK1	Mittelw.	2,789	0,642	2,472	1,695	1,674	9,575	15,017	8,885	4,167	39,318	37,644
	StdAbw	0,185	0,045	0,216	0,103							
ÜbK2	Mittelw.	2,404	0,522	2,101	1,463	0,799	8,060	13,116	7,723	3,565	33,263	32,464
	StdAbw	0,255	0,078	0,263	0,167							
ÜbA1	Mittelw.	2,584	0,606	2,484	1,773	n.b.	7,272	13,916	8,853	4,257	34,370	34,298
	StdAbw	0,020	0,030	0,074	0,113							
ÜbA2	Mittelw.	2,648	0,564	2,342	1,614	0,823	8,009	13,947	8,387	3,956	35,122	34,299
	StdAbw	0,032	0,016	0,116	0,061							
Üb-Hg	Mittelw.	2,295	0,637	1,995	1,822	3,597	86,920	46,853	9,164	3,817	150,351	146,754
	StdAbw	0,248	0,089	0,129	0,134							

Tab.34.9.8: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Üb vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Üb-	Mittelw.	n.n.	0,202	1,479	1,644	5,648	1,815	2,655	1,929	3,472	3,703	1,487
	StdAbw		0,044	0,139	0,212	0,236	0,209	0,012	0,018	0,092	0,026	0,044
ÜbK1	Mittelw.	n.n.	0,326	1,559	1,155	5,397	2,257	2,789	2,218	4,634	3,570	1,413
	StdAbw		0,005	0,116	0,108	0,201	0,041	0,072	0,149	0,258	0,030	0,084
ÜbK2	Mittelw.	n.n.	0,236	1,251	0,944	4,710	2,308	2,801	1,898	3,742	3,356	1,404
	StdAbw		0,051	0,159	0,173	0,109	0,072	0,039	0,076	0,182	0,031	0,011
ÜbA1	Mittelw.	n.n.	0,282	1,228	0,999	5,310	2,646	3,206	2,306	3,927	3,678	1,616
	StdAbw		0,093	0,187	0,146	0,134	0,033	0,024	0,065	0,091	0,017	0,010
ÜbA2	Mittelw.	n.n.	0,283	1,235	1,108	5,761	2,447	2,838	2,287	4,571	3,348	1,453
	StdAbw		0,007	0,095	0,079	0,103	0,178	0,121	0,135	0,214	0,050	0,040
Üb-Hg	Mittelw.	1,638	0,506	5,808	58,230	10,730	19,217	13,565	5,285	6,935	4,008	1,911
	StdAbw	0,321	0,055	0,164	1,232	0,087	0,496	0,418	0,070	0,492	0,116	0,034
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Üb-	Mittelw.	2,771	0,774	1,875	1,971	n.n.	8,973	9,872	8,735	3,846	31,426	31,426
	StdAbw	0,060	0,113	0,067	0,054							
ÜbK1	Mittelw.	2,858	0,734	1,846	1,880	n.n.	8,436	11,899	8,575	3,726	32,635	32,635
	StdAbw	0,081	0,096	0,164	0,047							
ÜbK2	Mittelw.	2,526	0,569	1,593	1,640	n.n.	7,140	10,749	7,855	3,233	28,978	28,978
	StdAbw	0,041	0,017	0,081	0,020							
ÜbA1	Mittelw.	2,965	0,618	1,658	1,852	n.n.	7,819	12,085	8,878	3,510	32,292	32,292
	StdAbw	0,016	0,005	0,044	0,009							
ÜbA2	Mittelw.	2,548	0,546	1,550	1,670	n.n.	8,387	12,143	7,894	3,220	31,644	31,644
	StdAbw	0,155	0,042	0,125	0,022							
Üb-Hg	Mittelw.	1,931	0,492	1,780	1,658	1,638	75,274	45,002	8,341	3,438	133,694	132,056
	StdAbw	0,051	0,025	0,098	0,033							

Tab.34.10.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe
Hea vom 07.07.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Hea-	Mittelw.	2,564	1,872	2,506	14,642	3,225	29,300	29,749	9,632	13,464	8,413	3,974
	StdAbw	1,591	0,448	0,829	1,381	0,069	1,104	1,171	0,379	0,278	0,804	0,145
HeaK1	Mittelw.	1,970	1,717	1,107	11,072	2,644	26,745	27,972	8,609	11,426	8,716	3,626
	StdAbw	0,429	0,119	0,092	0,956	0,277	0,999	0,962	0,387	0,361	0,144	0,211
HeaK2	Mittelw.	2,953	1,941	1,412	12,018	2,647	30,964	29,039	9,396	11,962	9,461	3,715
	StdAbw	0,461	0,096	0,456	0,483	0,109	1,420	0,580	0,307	0,418	0,206	0,084
HeaA1	Mittelw.	1,662	1,893	1,209	12,674	2,876	30,976	30,587	9,635	13,647	9,324	4,139
	StdAbw	0,308	0,445	0,162	1,851	0,233	1,532	0,898	0,297	0,468	0,647	0,089
HeaA2	Mittelw.	1,415	1,628	1,016	10,631	2,859	32,944	30,733	9,264	12,948	9,087	4,026
	StdAbw	0,461	0,121	0,017	0,454	0,059	1,384	0,847	0,344	0,388	0,443	0,085
HeaK2C1	Mittelw.	1,901	1,920	1,489	11,398	3,022	38,912	37,909	9,155	11,935	7,889	3,507
	StdAbw	0,316	0,074	0,049	0,142	0,236	0,133	0,220	0,072	0,116	0,289	0,096
HeaK2C0	Mittelw.	1,901	1,920	1,489	11,398	3,022	38,912	37,909	9,155	11,935	7,889	3,507
	StdAbw	0,316	0,074	0,049	0,142	0,236	0,133	0,220	0,072	0,116	0,289	0,096
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Hea-	Mittelw.	5,003	0,875	4,056	3,069	2,564	22,246	82,145	18,265	7,125	132,345	129,780
	StdAbw	0,775	0,047	0,442	0,256							
HeaK1	Mittelw.	4,036	0,739	3,694	3,095	1,970	16,540	74,752	17,118	6,789	117,168	115,198
	StdAbw	0,323	0,098	0,119	0,172							
HeaK2	Mittelw.	4,317	0,668	4,053	3,110	2,953	18,018	81,361	18,161	7,163	127,656	124,703
	StdAbw	0,397	0,028	0,153	0,165							
HeaA1	Mittelw.	4,743	0,848	4,057	3,509	1,662	18,652	84,845	19,054	7,565	131,778	130,116
	StdAbw	0,257	0,087	0,439	0,173							
HeaA2	Mittelw.	4,536	0,879	3,790	3,424	1,415	16,133	85,890	18,529	7,214	129,180	127,766
	StdAbw	0,203	0,092	0,415	0,251							
HeaK2C1	Mittelw.	4,188	0,886	3,981	2,761	1,901	17,830	97,911	16,470	6,742	140,854	138,953
	StdAbw	0,059	0,041	0,102	0,063							
HeaK2C0	Mittelw.	4,188	0,886	3,981	2,761	1,901	17,830	97,911	16,470	6,742	140,854	138,953
	StdAbw	0,059	0,041	0,102	0,063							

Tab.34.10.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe
Hea vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Hea-	Mittelw.	0,837	1,199	0,840	9,263	2,310	27,480	26,614	7,858	11,199	7,334	3,142
	StdAbw	0,251	0,063	0,039	0,290	0,084	1,266	1,212	0,427	0,636	0,333	0,265
HeaK1	Mittelw.	0,808	1,465	0,826	8,887	2,265	27,103	25,373	7,887	11,253	7,973	3,328
	StdAbw	0,419	0,129	0,112	0,679	0,070	0,499	0,312	0,110	0,249	0,296	0,254
HeaK2	Mittelw.	0,747	1,282	0,822	9,153	2,426	25,801	25,493	7,877	11,025	8,095	3,192
	StdAbw	0,162	0,086	0,050	0,650	0,160	1,194	0,876	0,064	0,250	0,256	0,214
HeaA1	Mittelw.	1,059	1,424	0,804	9,262	2,402	25,053	26,953	8,199	11,210	8,306	3,244
	StdAbw	0,420	0,196	0,076	0,308	0,171	2,423	1,350	0,569	0,846	1,014	0,049
HeaA2	Mittelw.	1,048	1,203	0,760	9,499	2,245	25,128	24,751	7,940	10,735	7,154	3,394
	StdAbw	0,417	0,066	0,017	0,036	0,157	0,982	0,746	0,254	0,182	0,186	0,131
HeaK2C1	Mittelw.	0,517	1,270	0,752	8,331	2,292	26,684	27,320	8,121	11,499	8,446	3,594
	StdAbw	0,154	0,034	0,000	0,582	0,103	1,811	1,202	0,132	0,308	0,465	0,190
HeaK2C0	Mittelw.	0,630	1,242	0,756	7,887	2,385	28,832	27,091	8,095	11,199	8,038	3,463
	StdAbw	0,597	0,159	0,064	1,233	0,011	0,254	1,176	0,099	0,177	0,169	0,136
Hea-Hg	Mittelw.	2,862	1,871	2,603	16,128	17,568	34,854	36,301	10,493	13,118	8,542	4,235
	StdAbw	1,057	0,213	0,406	0,499	0,808	0,806	0,409	0,458	0,268	0,155	0,122
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Hea-	Mittelw.	3,779	0,655	3,490	2,695	0,837	13,612	73,152	14,911	6,185	108,696	107,859
	StdAbw	0,323	0,086	0,219	0,193							
HeaK1	Mittelw.	3,866	0,724	3,426	2,889	0,808	13,443	71,616	15,891	6,314	108,072	107,264
	StdAbw	0,127	0,035	0,172	0,178							
HeaK2	Mittelw.	3,524	0,681	3,454	2,856	0,747	13,684	70,196	15,491	6,310	106,428	105,681
	StdAbw	0,058	0,020	0,126	0,038							
HeaA1	Mittelw.	3,504	0,628	3,555	2,868	1,059	13,892	71,414	15,683	6,423	108,471	107,412
	StdAbw	0,136	0,021	0,262	0,081							
HeaA2	Mittelw.	3,769	0,754	3,328	2,793	1,048	13,707	68,553	15,071	6,121	104,500	103,452
	StdAbw	0,141	0,047	0,034	0,022							
HeaK2C1	Mittelw.	3,504	0,707	3,595	2,938	0,517	12,645	73,624	16,250	6,533	109,569	109,052
	StdAbw	0,159	0,047	0,186	0,156							
HeaK2C0	Mittelw.	3,581	0,775	3,308	2,837	0,630	12,270	75,217	15,857	6,145	110,118	109,488
	StdAbw	0,123	0,023	0,073	0,044							
Hea-Hg	Mittelw.	3,766	0,797	3,260	2,866	2,862	38,169	94,766	17,339	6,126	159,262	156,401
	StdAbw	0,472	0,017	0,290	0,122							

Tab.34.10.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Hea vom 14.10.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Hea-	Mittelw.	1,051	1,483	0,807	9,999	2,848	29,799	29,918	8,536	12,709	9,204	3,764
	StdAbw	0,182	0,088	0,035	0,441	0,136	1,959	1,434	0,195	0,379	0,023	0,101
HeaK1	Mittelw.	0,702	1,073	0,852	8,548	2,448	24,779	22,591	7,317	10,362	8,333	3,104
	StdAbw	0,545	0,103	0,115	0,432	0,187	0,387	0,512	0,059	0,380	0,467	0,113
HeaK2	Mittelw.	1,508	1,620	0,896	10,939	2,652	26,828	27,965	8,361	12,179	8,814	3,457
	StdAbw	0,383	0,230	0,096	0,908	0,142	0,222	0,574	0,385	0,480	0,300	0,085
HeaA1	Mittelw.	0,781	1,214	0,731	9,644	2,689	28,386	26,844	8,034	11,515	8,224	3,271
	StdAbw	0,320	0,088	0,006	0,561	0,182	0,334	0,282	0,101	0,256	0,343	0,255
HeaA2	Mittelw.	1,282	1,385	0,902	9,556	2,471	29,442	30,032	8,452	11,586	9,142	3,749
	StdAbw	0,511	0,156	0,088	0,743	0,303	0,660	0,809	0,219	0,183	0,320	0,102
HeaK2C1	Mittelw.	0,529	0,955	0,647	7,892	2,232	26,600	25,476	8,042	11,593	8,444	3,448
	StdAbw	0,388	0,183	0,106	0,746	0,090	0,789	1,044	0,135	0,198	0,074	0,132
HeaK2C0	Mittelw.	0,951	1,101	0,721	8,150	2,071	24,247	23,800	6,940	9,860	7,189	3,075
	StdAbw	0,379	0,045	0,049	0,175	0,104	1,034	0,932	0,198	0,178	0,496	0,104
Hea-Hg	Mittelw.	2,376	1,295	1,126	12,638	14,966	30,817	30,424	9,384	11,741	7,769	3,717
	StdAbw	0,442	0,079	0,126	0,223	0,004	0,086	0,600	0,136	0,307	0,201	0,088
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Hea-	Mittelw.	3,485	0,774	3,668	2,897	1,051	15,137	80,962	17,226	6,566	120,943	119,892
	StdAbw	0,173	0,039	0,108	0,121							
HeaK1	Mittelw.	3,703	0,647	3,276	2,447	0,702	12,922	65,049	15,787	5,723	100,183	99,481
	StdAbw	0,108	0,020	0,226	0,161							
HeaK2	Mittelw.	3,909	0,782	3,805	2,891	1,508	16,107	75,334	16,961	6,696	116,607	115,098
	StdAbw	0,205	0,049	0,155	0,116							
HeaA1	Mittelw.	3,810	0,611	3,676	2,837	0,781	14,279	74,779	15,915	6,513	112,267	111,486
	StdAbw	0,133	0,041	0,177	0,150							
HeaA2	Mittelw.	3,503	0,669	3,527	2,922	1,282	14,313	79,511	17,063	6,449	118,618	117,336
	StdAbw	0,143	0,063	0,189	0,063							
HeaK2C1	Mittelw.	3,757	0,703	3,320	2,852	0,529	11,727	71,712	16,351	6,172	106,491	105,962
	StdAbw	0,156	0,052	0,196	0,008							
HeaK2C0	Mittelw.	2,958	0,577	3,031	2,411	0,951	12,043	64,847	13,800	5,442	97,084	96,133
	StdAbw	0,052	0,008	0,254	0,011							
Hea-Hg	Mittelw.	2,743	0,887	2,750	2,398	2,376	30,025	82,366	15,117	5,149	135,032	132,657
	StdAbw	0,176	0,007	0,063	0,087							

Tab.34.10.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Hea vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Hea-	Mittelw.	1,907	1,521	1,134	11,532	2,606	32,138	32,709	9,594	13,479	9,151	4,084
	StdAbw	1,044	0,213	0,023	1,529	0,075	1,226	1,348	0,282	0,068	0,133	0,048
HeaK1	Mittelw.	1,898	1,682	1,174	12,406	2,921	31,644	32,684	10,292	14,486	11,350	4,569
	StdAbw	0,156	0,231	0,258	0,820	0,154	1,600	1,326	0,337	0,370	0,202	0,044
HeaK2	Mittelw.	1,229	1,260	0,725	8,672	2,100	25,052	25,387	7,599	10,614	8,142	3,138
	StdAbw	0,109	0,075	0,025	0,493	0,037	1,062	0,648	0,096	0,159	0,303	0,166
HeaA1	Mittelw.	0,838	1,221	0,740	8,579	2,245	27,845	28,057	8,268	11,786	8,674	3,666
	StdAbw	0,339	0,040	0,018	0,576	0,074	0,513	0,609	0,145	0,249	0,342	0,099
HeaA2	Mittelw.	1,221	1,197	0,670	7,919	2,198	25,108	25,439	7,350	10,439	7,913	3,285
	StdAbw	0,181	0,050	0,022	0,218	0,036	0,974	0,974	0,125	0,106	0,118	0,034
HeaK2C1	Mittelw.	0,989	1,423	0,768	10,067	2,488	32,480	29,737	9,601	13,425	10,218	4,143
	StdAbw	0,365	0,001	0,038	0,209	0,111	1,819	0,957	0,198	0,277	0,458	0,266
HeaK2C0	Mittelw.	1,305	1,228	0,790	7,678	2,008	22,890	21,385	6,301	8,923	6,588	2,729
	StdAbw	0,990	0,346	0,184	1,340	0,212	0,701	0,864	0,200	0,277	0,141	0,056
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Hea-	Mittelw.	4,279	0,841	3,701	3,188	1,907	16,794	87,919	18,355	6,889	131,864	129,957
	StdAbw	0,050	0,017	0,018	0,091							
HeaK1	Mittelw.	5,235	1,008	4,709	3,688	1,898	18,183	89,107	22,161	8,397	139,745	137,847
	StdAbw	0,171	0,066	0,068	0,038							
HeaK2	Mittelw.	3,185	0,610	3,180	2,509	1,229	12,756	68,652	15,074	5,689	103,401	102,171
	StdAbw	0,295	0,053	0,191	0,164							
HeaA1	Mittelw.	3,702	0,789	3,304	2,705	0,838	12,785	75,955	16,831	6,009	112,419	111,581
	StdAbw	0,129	0,018	0,107	0,067							
HeaA2	Mittelw.	3,122	0,628	2,913	2,498	1,221	11,984	68,336	14,948	5,410	101,899	100,679
	StdAbw	0,086	0,022	0,067	0,058							
HeaK2C1	Mittelw.	4,385	0,916	3,975	3,508	0,989	14,745	85,243	19,661	7,482	128,120	127,131
	StdAbw	0,028	0,049	0,430	0,116							
HeaK2C0	Mittelw.	2,889	0,546	2,601	2,203	1,305	11,704	59,499	12,752	4,803	90,063	88,759
	StdAbw	0,173	0,051	0,131	0,084							

Tab.34.10.5: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Hea vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Hea-	Mittelw.	1,083	0,421	0,350	5,859	0,959	24,761	17,739	7,593	9,238	6,982	3,068
	StdAbw	0,884	0,133	0,008	0,165	0,229	1,380	0,787	0,267	0,532	0,462	0,166
HeaK1	Mittelw.	0,271	0,236	0,681	7,505	1,790	25,315	17,533	8,168	9,089	7,191	3,154
	StdAbw	0,134	0,124	0,151	2,408	0,217	1,458	0,827	0,299	0,895	0,238	0,133
HeaK2	Mittelw.	2,580	0,506	0,694	8,699	2,825	27,208	18,253	8,740	10,305	7,611	3,359
	StdAbw	1,717	0,133	0,071	1,517	0,041	1,172	0,554	0,430	0,283	0,031	0,027
HeaA1	Mittelw.	2,759	0,622	1,184	10,114	5,110	29,451	21,089	9,175	11,009	8,661	3,805
	StdAbw	1,177	0,078	0,406	0,828	1,156	2,766	2,671	0,973	1,812	0,743	0,196
HeaA2	Mittelw.	1,472	0,351	0,542	5,487	1,786	25,381	17,316	8,863	9,022	7,346	2,972
	StdAbw	0,797	0,018	0,055	0,331	0,372	0,907	0,490	0,416	0,403	0,298	0,106
HeaK2C1	Mittelw.	2,442	0,254	0,598	6,196	1,634	25,903	17,687	7,680	9,220	6,664	3,039
	StdAbw	0,207	0,041	0,006	0,563	0,186	0,709	0,264	0,430	0,420	0,285	0,115
HeaK2C0	Mittelw.	1,190	0,308	0,425	5,184	0,787	25,481	17,761	7,698	8,900	7,427	3,014
	StdAbw	0,663	0,055	0,090	0,889	0,041	0,406	0,079	0,086	0,330	0,179	0,073
Hea-Hg	Mittelw.	2,085	1,382	0,983	11,788	12,752	25,570	29,981	8,737	11,152	7,167	3,518
	StdAbw	0,845	0,159	0,093	1,167	0,605	1,982	0,602	0,148	0,259	0,303	0,135
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Hea-	Mittelw.	3,006	0,953	2,502	2,727	1,083	7,588	59,331	14,008	5,229	87,240	86,156
	StdAbw	0,050	0,040	0,075	0,131							
HeaK1	Mittelw.	3,616	1,079	2,733	3,048	0,271	10,212	60,105	15,040	5,781	91,408	91,137
	StdAbw	0,347	0,114	0,176	0,146							
HeaK2	Mittelw.	3,531	1,129	2,663	3,096	2,580	12,723	64,506	15,630	5,758	101,198	98,618
	StdAbw	0,217	0,093	0,111	0,098							
HeaA1	Mittelw.	4,286	1,156	3,157	3,584	2,759	17,030	70,724	17,908	6,741	115,161	112,402
	StdAbw	0,124	0,075	0,179	0,077							
HeaA2	Mittelw.	3,036	0,889	2,365	2,446	1,472	8,166	60,581	14,244	4,811	89,274	87,802
	StdAbw	0,157	0,044	0,085	0,160							
HeaK2C1	Mittelw.	3,196	0,937	2,469	2,445	2,442	8,681	60,490	13,836	4,914	90,363	87,921
	StdAbw	0,252	0,154	0,122	0,244							
HeaK2C0	Mittelw.	3,342	0,915	2,594	2,719	1,190	6,704	59,840	14,698	5,314	87,746	86,556
	StdAbw	0,129	0,084	0,092	0,186							
Hea-Hg	Mittelw.	3,142	0,728	2,871	2,402	2,085	26,905	75,440	14,554	5,273	124,257	122,172
	StdAbw	0,214	0,152	0,301	0,114							

Tab.34.10.6: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Hea vom 27.07.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Hea-	Mittelw.	0,756	1,053	0,834	8,735	14,323	24,085	25,350	10,298	12,040	8,752	4,247
	StdAbw	0,517	0,041	0,081	0,885	0,304	0,200	0,577	0,147	0,127	0,077	0,069
HeaK1	Mittelw.	0,618	0,832	0,717	7,635	12,801	20,676	22,416	8,184	9,677	6,844	3,316
	StdAbw	0,352	0,036	0,054	0,504	0,507	0,997	1,413	0,497	0,678	0,460	0,181
HeaK2	Mittelw.	1,516	0,951	0,782	8,538	12,041	22,583	24,565	8,588	10,149	6,880	3,393
	StdAbw	0,468	0,094	0,067	0,828	0,383	0,830	0,915	0,345	0,240	0,280	0,068
HeaA1	Mittelw.	0,603	0,977	0,786	8,917	14,059	22,345	25,932	8,866	10,912	7,188	3,599
	StdAbw	0,457	0,104	0,076	1,671	0,291	0,012	0,629	0,255	0,250	0,151	0,088
HeaA2	Mittelw.	0,865	0,994	0,747	7,513	13,403	22,235	24,249	8,729	10,821	7,239	3,518
	StdAbw	0,361	0,048	0,077	1,077	0,512	0,488	0,786	0,421	0,409	0,447	0,254
HeaK2C1	Mittelw.	0,761	0,866	0,702	7,450	13,293	20,840	23,718	8,345	10,252	6,867	3,418
	StdAbw	0,148	0,034	0,016	0,263	0,217	0,172	0,230	0,320	0,384	0,176	0,123
HeaK2C0	Mittelw.	0,976	1,149	0,628	6,481	14,257	11,616	24,622	9,159	11,082	7,937	3,186
	StdAbw	0,117	0,182	0,085	0,543	1,078	0,277	0,242	0,322	0,157	0,378	0,277
Hea-Hg	Mittelw.	0,465	1,051	1,078	9,632	11,441	29,832	28,757	8,948	11,021	7,284	3,530
	StdAbw	0,484	0,160	0,144	0,382	0,512	0,582	1,439	0,219	0,264	0,218	0,092
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Hea-	Mittelw.	5,092	0,887	3,464	2,859	0,756	24,945	71,774	18,979	6,323	122,779	122,022
	StdAbw	0,302	0,038	0,072	0,119							
HeaK1	Mittelw.	3,892	0,797	2,832	2,351	0,618	21,985	60,952	14,849	5,183	103,587	102,969
	StdAbw	0,237	0,064	0,064	0,125							
HeaK2	Mittelw.	3,862	0,741	2,942	2,323	1,516	22,312	65,885	14,876	5,265	109,854	108,338
	StdAbw	0,290	0,056	0,111	0,114							
HeaA1	Mittelw.	3,965	0,774	3,015	2,405	0,603	24,738	68,055	15,526	5,420	114,341	113,739
	StdAbw	0,287	0,066	0,075	0,102							
HeaA2	Mittelw.	3,857	0,744	2,886	2,338	0,865	22,657	66,035	15,358	5,224	110,137	109,273
	StdAbw	0,290	0,072	0,246	0,120							
HeaK2C1	Mittelw.	3,744	0,719	2,892	2,234	0,761	22,311	63,154	14,749	5,126	106,102	105,341
	StdAbw	0,251	0,009	0,178	0,089							
HeaK2C0	Mittelw.	3,859	0,878	4,006	2,511	0,976	22,516	56,479	15,860	6,517	102,348	101,372
	StdAbw	0,220	0,063	0,120	0,134							
Hea-Hg	Mittelw.	2,768	0,769	2,748	2,285	0,465	23,204	78,557	14,352	5,033	121,611	121,145
	StdAbw	0,236	0,049	0,154	0,124							

Tab.34.10.7: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Hea vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Hea-	Mittelw.	1,088	0,952	0,822	9,633	16,405	22,990	27,994	9,319	11,309	7,711	3,897
	StdAbw	0,742	0,074	0,018	1,330	0,307	0,914	0,258	0,054	0,248	0,117	0,005
HeaK1	Mittelw.	0,896	0,829	0,688	7,928	11,567	20,429	21,217	7,570	9,247	6,386	3,050
	StdAbw	0,175	0,029	0,013	0,215	0,070	0,139	0,626	0,067	0,108	0,038	0,109
HeaK2	Mittelw.	0,854	0,886	0,657	7,101	12,411	19,573	20,954	7,528	9,074	6,009	3,036
	StdAbw	0,358	0,075	0,033	0,361	0,662	1,921	0,727	0,313	0,316	0,070	0,143
HeaA1	Mittelw.	0,856	0,884	0,675	7,850	13,838	22,352	23,315	8,297	10,222	6,887	3,363
	StdAbw	0,322	0,089	0,052	0,836	0,346	0,567	0,498	0,201	0,286	0,060	0,072
HeaA2	Mittelw.	1,091	0,888	0,640	6,927	12,252	19,722	21,023	7,261	8,961	5,900	3,033
	StdAbw	0,146	0,037	0,016	0,547	0,162	0,323	0,230	0,064	0,073	0,088	0,024
HeaK2C1	Mittelw.	0,612	0,732	0,690	7,515	13,552	19,565	20,789	7,717	9,426	6,596	3,289
	StdAbw	0,534	0,059	0,114	0,734	0,452	1,641	0,841	0,418	0,341	0,179	0,147
HeaK2C0	Mittelw.	1,126	0,939	0,640	7,681	14,139	20,319	22,633	8,060	9,921	6,897	3,331
	StdAbw	0,628	0,070	0,024	0,538	0,239	0,322	0,439	0,178	0,182	0,073	0,063
Hea-Hg	Mittelw.	0,535	0,923	0,737	11,575	11,223	31,432	31,856	9,002	11,781	8,234	3,730
	StdAbw	0,296	0,073	0,071	1,234	1,174	0,246	0,455	0,211	0,148	0,036	0,059
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Hea-	Mittelw.	4,027	0,854	3,043	2,655	1,088	27,812	71,612	16,488	5,698	122,697	121,610
	StdAbw	0,086	0,106	0,273	0,043							
HeaK1	Mittelw.	3,238	0,686	2,441	2,195	0,896	21,012	58,463	13,360	4,636	98,367	97,471
	StdAbw	0,131	0,048	0,184	0,066							
HeaK2	Mittelw.	3,192	0,706	2,542	2,226	0,854	21,055	57,130	12,943	4,768	96,749	95,896
	StdAbw	0,268	0,082	0,222	0,128							
HeaA1	Mittelw.	3,555	0,756	2,686	2,361	0,856	23,247	64,186	14,561	5,048	107,897	107,041
	StdAbw	0,079	0,082	0,252	0,066							
HeaA2	Mittelw.	2,828	0,576	2,449	2,066	1,091	20,706	56,968	12,337	4,515	95,618	94,527
	StdAbw	0,167	0,023	0,131	0,060							
HeaK2C1	Mittelw.	3,366	0,694	2,697	2,330	0,612	22,489	57,497	13,945	5,028	99,570	98,958
	StdAbw	0,341	0,024	0,043	0,163							
HeaK2C0	Mittelw.	3,205	0,661	2,574	2,244	1,126	23,400	60,932	14,094	4,818	104,369	103,244
	StdAbw	0,143	0,006	0,135	0,064							
Hea-Hg	Mittelw.	2,457	0,641	2,936	2,506	0,535	24,457	84,070	15,062	5,443	129,567	129,032
	StdAbw	0,218	0,013	0,039	0,073							

Tab.34.11.1: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Heb vom 18.08.93 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BKFLA
Heb-	Mittelw.	0,869	0,488	0,213	2,462	4,501	8,726	13,694	3,106	4,436	2,228	1,076
	StdAbw	0,192	0,013	0,010	0,078	0,127	0,173	0,013	0,001	0,008	0,039	0,010
HebK1	Mittelw.	0,293	0,519	0,229	1,737	5,308	8,912	13,869	3,661	4,688	2,329	1,121
	StdAbw	0,055	0,024	0,012	0,143	0,094	0,152	0,065	0,026	0,037	0,101	0,015
HebK1T	Mittelw.	0,475	0,549	0,298	1,860	4,880	7,803	12,139	3,246	4,158	2,141	1,035
	StdAbw	0,083	0,015	0,028	0,017	0,102	0,122	0,111	0,017	0,028	0,039	0,002
HebK2	Mittelw.	n.b.	0,400	0,161	1,495	5,006	7,853	12,770	3,323	4,212	2,060	1,041
	StdAbw	0,018	0,017	0,016	0,119	0,059	0,328	0,203	0,055	0,089	0,022	0,020
HebK2T	Mittelw.	0,794	0,637	0,304	2,027	4,825	7,779	12,316	3,274	4,136	2,020	1,044
	StdAbw	0,101	0,009	0,028	0,067	0,105	0,087	0,092	0,042	0,048	0,017	0,012
HebA1	Mittelw.	n.b.	0,424	0,147	1,537	5,111	8,373	13,318	3,314	4,232	2,006	1,057
	StdAbw	0,077	0,021	0,006	0,250	0,136	0,364	0,472	0,151	0,145	0,100	0,045
HebA1T	Mittelw.	0,316	n.b.	n.b.	1,772	5,351	7,891	12,258	3,214	4,043	2,079	1,069
	StdAbw	0,061			0,133	0,214	0,131	0,455	0,098	0,091	0,073	0,028
HebA2	Mittelw.	0,260	0,395	0,131	1,368	4,808	8,142	12,739	3,170	4,059	2,052	0,981
	StdAbw	0,141	0,024	0,017	0,273	0,164	0,337	0,429	0,119	0,133	0,081	0,036
HebA2T	Mittelw.	0,615	0,608	0,463	1,836	5,075	8,331	12,809	3,195	4,170	2,115	1,034
	StdAbw	0,071	0,020	0,060	0,155	0,145	0,162	0,398	0,107	0,141	0,089	0,038
HebK1G	Mittelw.	0,481	0,514	0,130	2,028	5,425	7,771	13,039	3,546	4,466	2,228	1,105
	StdAbw	0,052	0,016	0,026	0,018	0,034	0,177	0,189	0,049	0,036	0,072	0,032
HebK1P	Mittelw.	0,819	0,548	0,183	2,332	5,417	8,368	13,380	3,487	4,493	2,028	1,037
	StdAbw	0,280	0,032	0,011	0,138	0,202	0,178	0,241	0,105	0,092	0,125	0,032
HebK1S	Mittelw.	0,283	0,458	0,142	1,595	5,210	6,831	11,386	3,286	4,347	2,001	1,067
	StdAbw	0,124	0,009	0,023	0,091	0,123	0,080	0,079	0,036	0,067	0,062	0,023
HebG1	Mittelw.	0,817	0,517	0,128	2,101	4,968	8,174	12,958	3,366	4,349	2,029	1,041
	StdAbw	0,089	0,005	0,003	0,158	0,034	0,099	0,202	0,056	0,055	0,055	0,011
Heb-Hg	Mittelw.	1,423	0,606	0,310	2,965	5,758	10,663	13,651	3,147	4,310	2,482	1,082
	StdAbw	0,184	0,031	0,022	0,102	0,033	0,264	0,437	0,099	0,069	0,047	0,027
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Heb-	Mittelw.	0,733	0,153	0,718	0,590	0,869	7,663	29,961	4,191	1,309	43,993	43,124
	StdAbw	0,017	0,008	0,026	0,014							
HebK1	Mittelw.	0,760	0,181	0,857	0,617	0,293	7,794	31,129	4,391	1,474	45,081	44,788
	StdAbw	0,023	0,009	0,028	0,005							
HebK1T	Mittelw.	0,719	0,163	0,736	0,585	0,475	7,587	27,346	4,058	1,321	40,787	40,312
	StdAbw	0,027	0,009	0,034	0,018							
HebK2	Mittelw.	0,697	0,134	0,691	0,561	n.b.	7,063	28,159	3,933	1,252	40,565	40,407
	StdAbw	0,018	0,006	0,030	0,022							
HebK2T	Mittelw.	0,714	0,155	0,664	0,584	0,794	7,793	27,506	3,934	1,248	41,275	40,481
	StdAbw	0,029	0,005	0,030	0,005							
HebA1	Mittelw.	0,739	0,138	0,640	0,571	n.b.	7,219	29,237	3,940	1,211	41,796	41,607
	StdAbw	0,056	0,004	0,026	0,012							
HebA1T	Mittelw.	0,773	0,183	0,770	0,643	0,316	7,124	27,406	4,105	1,412	40,362	40,046
	StdAbw	0,013	0,021	0,077	0,069							
HebA2	Mittelw.	0,665	0,157	0,639	0,559	0,260	6,702	28,110	3,855	1,198	40,126	39,866
	StdAbw	0,027	0,005	0,037	0,018							
HebA2T	Mittelw.	0,659	0,166	0,746	0,580	0,615	7,982	28,504	3,974	1,326	42,401	41,786
	StdAbw	0,053	0,005	0,034	0,035							
HebK1G	Mittelw.	0,789	0,141	0,682	0,614	0,481	8,097	28,822	4,263	1,296	42,959	42,478
	StdAbw	0,064	0,024	0,030	0,027							
HebK1P	Mittelw.	0,689	0,154	0,723	0,604	0,819	8,481	29,728	3,908	1,327	44,262	43,444
	StdAbw	0,059	0,009	0,040	0,017							
HebK1S	Mittelw.	0,710	0,176	0,766	0,592	0,283	7,405	25,850	3,953	1,358	38,848	38,565
	StdAbw	0,017	0,007	0,016	0,015							
HebG1	Mittelw.	0,690	0,156	0,704	0,567	0,817	7,713	28,848	3,917	1,271	42,566	41,749
	StdAbw	0,010	0,013	0,065	0,020							
Heb-Hg	Mittelw.	0,330	0,148	0,692	0,501	1,423	9,639	31,770	4,042	1,193	48,067	46,644
	StdAbw	0,010	0,012	0,034	0,022							

Tab.34.11.2: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Heb vom 12.01.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Heb-	Mittelw.	0,302	0,465	0,206	3,059	5,990	9,463	14,751	3,313	4,342	2,662	1,167
	StdAbw	0,133	0,026	0,017	0,175	0,257	0,478	0,200	0,058	0,131	0,146	0,039
HebK1	Mittelw.	n.b.	0,464	0,207	2,934	5,891	9,745	14,580	3,487	4,562	2,695	1,239
	StdAbw	0,028	0,032	0,027	0,155	0,210	0,340	0,688	0,166	0,066	0,092	0,046
HebK1T	Mittelw.	0,761	0,661	0,392	2,834	4,987	8,131	12,101	2,959	3,984	2,288	1,067
	StdAbw	0,492	0,054	0,074	0,016	0,314	0,459	0,796	0,153	0,213	0,116	0,064
HebK2	Mittelw.	1,068	0,579	0,243	3,331	5,181	8,276	12,328	2,906	4,206	2,315	1,050
	StdAbw	0,611	0,154	0,089	0,671	0,123	0,331	0,326	0,085	0,226	0,110	0,044
HebK2T	Mittelw.	0,541	0,556	0,330	2,356	4,690	7,569	11,585	2,728	3,767	2,130	1,018
	StdAbw	0,231	0,020	0,009	0,089	0,166	0,061	0,102	0,030	0,074	0,077	0,013
HebA1	Mittelw.	0,840	0,506	0,261	2,560	5,174	8,730	12,643	2,824	4,043	2,320	1,071
	StdAbw	0,567	0,120	0,079	0,214	0,158	0,228	0,417	0,109	0,182	0,078	0,036
HebA1T	Mittelw.	0,417	n.b.	n.b.	2,169	4,319	7,050	10,913	2,349	3,133	1,989	0,912
	StdAbw	0,244			0,097	0,123	0,281	0,433	0,079	0,117	0,078	0,027
HebA2	Mittelw.	0,475	0,429	0,208	2,366	4,665	7,710	11,784	2,759	3,716	2,108	0,991
	StdAbw	0,402	0,118	0,083	0,184	0,176	0,397	0,516	0,043	0,193	0,070	0,015
HebA2T	Mittelw.	0,493	n.b.	n.b.	2,391	4,610	6,753	10,986	2,509	3,388	1,968	0,944
	StdAbw	0,572			0,084	0,604	0,351	0,545	0,120	0,156	0,114	0,041
HebK1G	Mittelw.	n.b.	0,365	0,158	2,025	4,194	6,080	10,383	2,572	3,542	2,016	0,924
	StdAbw	0,089	0,029	0,013	0,107	0,122	0,140	0,150	0,029	0,017	0,033	0,015
HebK1P	Mittelw.	0,500	0,552	0,275	2,116	4,589	7,575	12,634	2,981	4,335	2,623	1,100
	StdAbw	0,005	0,010	0,059	0,047	0,126	0,604	0,146	0,016	0,043	0,096	0,011
HebK1S	Mittelw.	0,713	0,572	0,213	1,956	4,832	6,556	10,897	2,827	4,272	2,495	1,044
	StdAbw	0,059	0,017	0,002	0,178	0,053	0,094	0,166	0,035	0,055	0,024	0,029
HebG1	Mittelw.	0,505	0,533	0,231	1,810	4,904	8,099	12,462	2,943	4,238	2,312	0,976
	StdAbw	0,080	0,016	0,016	0,109	0,019	0,096	0,087	0,037	0,050	0,088	0,112
Heb-Hg	Mittelw.	0,800	0,625	0,305	2,935	6,529	10,333	15,456	3,531	4,642	2,511	1,157
	StdAbw	0,344	0,070	0,000	0,351	0,237	0,234	0,228	0,025	0,032	0,098	0,009
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Heb-	Mittelw.	0,735	0,163	0,631	0,606	0,302	9,720	31,869	4,726	1,237	47,855	47,553
	StdAbw	0,131	0,008	0,040	0,030							
HebK1	Mittelw.	0,804	0,170	0,644	0,661	n.b.	9,496	32,374	4,907	1,305	48,204	48,082
	StdAbw	0,061	0,014	0,023	0,044							
HebK1T	Mittelw.	0,716	0,148	0,552	0,542	0,761	8,873	27,174	4,219	1,095	42,123	41,362
	StdAbw	0,101	0,012	0,031	0,025							
HebK2	Mittelw.	0,725	0,163	0,559	0,564	1,068	9,333	27,716	4,254	1,124	43,495	42,426
	StdAbw	0,045	0,009	0,071	0,024							
HebK2T	Mittelw.	0,640	0,141	0,491	0,517	0,541	7,932	25,649	3,929	1,007	39,058	38,518
	StdAbw	0,020	0,010	0,022	0,010							
HebA1	Mittelw.	0,679	0,151	0,545	0,536	0,840	8,501	28,240	4,221	1,081	42,883	42,043
	StdAbw	0,025	0,003	0,030	0,020							
HebA1T	Mittelw.	0,584	0,116	0,427	0,468	0,417	6,482	23,444	3,602	0,896	34,840	34,423
	StdAbw	0,018	0,006	0,023	0,017							
HebA2	Mittelw.	0,705	0,140	0,501	0,526	0,475	7,667	25,969	3,943	1,027	39,081	38,606
	StdAbw	0,074	0,014	0,008	0,031							
HebA2T	Mittelw.	0,603	0,129	0,498	0,496	0,493	6,995	23,636	3,644	0,994	35,762	35,269
	StdAbw	0,059	0,013	0,052	0,009							
HebK1G	Mittelw.	0,544	0,116	0,401	0,463	n.b.	6,743	22,577	3,600	0,864	33,930	33,783
	StdAbw	0,064	0,011	0,012	0,010							
HebK1P	Mittelw.	0,709	0,151	0,675	0,584	0,500	7,532	27,526	4,583	1,259	41,399	40,900
	StdAbw	0,041	0,002	0,113	0,016							
HebK1S	Mittelw.	0,788	0,140	0,632	0,583	0,713	7,573	24,551	4,467	1,214	38,518	37,805
	StdAbw	0,020	0,018	0,083	0,017							
HebG1	Mittelw.	0,735	0,098	0,615	0,563	0,505	7,478	27,742	4,121	1,178	41,024	40,519
	StdAbw	0,026	0,011	0,021	0,027							
Heb-Hg	Mittelw.	0,628	0,155	0,752	0,602	0,800	10,394	33,963	4,451	1,355	50,963	50,162
	StdAbw	0,001	0,011	0,023	0,008							

Tab.34.11.3: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Heb vom 06.04.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Heb-	Mittelw.	0,680	4,925	0,200	3,125	4,960	8,329	13,199	3,029	4,364	2,217	1,059
	StdAbw	0,063	0,678	0,035	0,089	0,009	0,828	0,200	0,036	0,150	0,097	0,017
HebK1	Mittelw.	0,385	0,454	0,171	2,326	4,313	6,302	10,596	2,696	3,713	2,048	0,949
	StdAbw	0,060	0,023	0,005	0,225	0,028	0,550	0,154	0,002	0,056	0,041	0,010
HebK1T	Mittelw.	n.b.	0,508	0,292	2,087	4,373	6,516	10,341	2,503	3,343	1,923	0,910
	StdAbw	0,090	0,036	0,044	0,150	0,461	0,468	0,269	0,043	0,069	0,030	0,025
HebK2	Mittelw.	0,647	0,412	0,176	2,394	4,778	8,117	11,751	2,748	3,737	2,081	0,989
	StdAbw	0,274	0,028	0,019	0,122	0,232	0,130	0,260	0,090	0,090	0,081	0,032
HebK2T	Mittelw.	0,549	0,739	0,489	2,848	3,945	7,912	10,892	2,731	3,689	2,181	1,065
	StdAbw	0,340	0,034	0,056	0,695	0,192	0,440	0,583	0,092	0,004	0,023	0,071
HebA1	Mittelw.	0,595	0,411	0,167	2,206	4,690	7,472	11,840	2,680	3,922	1,999	0,963
	StdAbw	0,287	0,040	0,017	0,260	0,340	0,749	0,154	0,035	0,141	0,035	0,021
HebA1T	Mittelw.	n.b.	0,932	0,330	2,101	4,032	6,495	10,456	2,343	3,297	1,928	0,906
	StdAbw	0,080	0,046	0,039	0,230	0,264	0,066	0,745	0,140	0,239	0,156	0,065
HebA2	Mittelw.	n.b.	0,448	0,176	2,069	5,386	7,254	12,859	2,867	4,150	2,257	1,068
	StdAbw	0,191	0,008	0,022	0,220	0,361	0,526	0,163	0,045	0,065	0,022	0,006
HebA2T	Mittelw.	n.b.	1,702	n.b.	2,036	5,282	8,845	14,136	3,054	4,346	2,412	1,147
	StdAbw	0,034	0,066		0,324	0,091	0,754	0,457	0,098	0,226	0,075	0,034
HebK1G	Mittelw.	0,321	0,427	0,197	2,582	5,230	6,834	12,624	3,115	4,203	2,322	1,125
	StdAbw	0,206	0,008	0,015	0,010	0,456	0,407	0,338	0,074	0,083	0,135	0,031
HebK1P	Mittelw.	n.b.	0,445	0,201	2,465	5,188	7,624	13,289	3,095	4,217	2,347	1,097
	StdAbw	0,057	0,052	0,030	0,319	0,418	0,616	0,394	0,062	0,076	0,133	0,029
HebK1S	Mittelw.	0,231	0,360	0,154	2,139	4,733	5,458	10,407	2,534	3,523	2,092	0,959
	StdAbw	0,125	0,029	0,004	0,145	0,587	0,300	0,661	0,165	0,155	0,163	0,062
HebG1	Mittelw.	n.b.	0,520	0,188	2,726	5,811	9,518	13,866	3,249	4,795	2,453	1,162
	StdAbw	0,059	0,030	0,021	0,207	0,192	0,059	0,757	0,227	0,432	0,146	0,063
Heb-Hg	Mittelw.	1,377	0,674	0,435	3,159	5,302	10,545	15,033	3,433	4,585	2,432	1,125
	StdAbw	0,371	0,062	0,042	0,289	0,262	0,844	0,791	0,228	0,314	0,165	0,066
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Heb-	Mittelw.	0,673	0,136	0,461	0,503	0,680	13,211	28,922	4,085	0,964	47,861	47,181
	StdAbw	0,024	0,008	0,057	0,012							
HebK1	Mittelw.	0,686	0,117	0,415	0,481	0,385	7,264	23,307	3,801	0,896	35,654	35,269
	StdAbw	0,103	0,009	0,030	0,021							
HebK1T	Mittelw.	0,593	0,112	0,513	0,472	n.b.	7,260	22,703	3,539	0,985	34,619	34,486
	StdAbw	0,072	0,012	0,095	0,016							
HebK2	Mittelw.	0,628	0,119	0,505	0,472	0,647	7,760	26,353	3,817	0,977	39,554	38,907
	StdAbw	0,011	0,014	0,021	0,010							
HebK2T	Mittelw.	0,875	0,160	0,579	0,628	0,549	8,021	25,224	4,280	1,207	39,281	38,731
	StdAbw	0,247	0,046	0,085	0,137							
HebA1	Mittelw.	0,626	0,122	0,439	0,476	0,595	7,473	25,914	3,710	0,915	38,606	38,011
	StdAbw	0,032	0,010	0,020	0,015							
HebA1T	Mittelw.	0,615	0,118	0,447	0,469	n.b.	7,394	22,592	3,567	0,916	34,631	34,470
	StdAbw	0,015	0,007	0,063	0,014							
HebA2	Mittelw.	0,741	0,144	0,534	0,512	n.b.	8,079	27,130	4,209	1,046	40,643	40,464
	StdAbw	0,019	0,005	0,024	0,008							
HebA2T	Mittelw.	0,663	0,158	0,555	0,550	n.b.	9,020	30,381	4,380	1,105	44,949	44,886
	StdAbw	0,044	0,005	0,020	0,013							
HebK1G	Mittelw.	0,726	0,160	0,623	0,564	0,321	8,436	26,775	4,333	1,187	41,052	40,732
	StdAbw	0,110	0,017	0,045	0,032							
HebK1P	Mittelw.	0,844	0,142	0,530	0,544	n.b.	8,299	28,225	4,430	1,074	42,136	42,029
	StdAbw	0,011	0,008	0,018	0,003							
HebK1S	Mittelw.	0,549	0,121	0,503	0,484	0,231	7,387	21,921	3,720	0,987	34,247	34,016
	StdAbw	0,028	0,012	0,020	0,029							
HebG1	Mittelw.	0,789	0,163	0,659	0,556	n.b.	9,245	31,429	4,567	1,215	46,558	46,456
	StdAbw	0,060	0,009	0,065	0,016							
Heb-Hg	Mittelw.	0,620	0,161	0,860	0,591	1,377	9,570	33,596	4,337	1,452	50,332	48,954
	StdAbw	0,071	0,017	0,043	0,045							

Tab.34.11.4: PAK-Gehalte und deren Standardabweichungen (StdAbw) der Varianten der Bodenprobe Heb vom 16.11.94 (Durchschnittswerte aus 3 Parallelen)

Probe		NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Heb-	Mittelw.	0,294	0,483	0,168	2,057	4,367	7,863	12,910	3,420	4,155	2,297	1,081
	StdAbw	0,032	0,016	0,004	0,168	0,682	0,124	0,140	0,065	0,034	0,034	0,025
HebK1	Mittelw.	n.b.	0,288	0,131	1,348	3,373	6,584	9,547	2,739	3,309	2,046	0,973
	StdAbw	0,020	0,050	0,001	0,127	0,020	0,211	0,227	0,039	0,045	0,022	0,007
HebK1T	Mittelw.	n.b.	n.b.	n.b.	1,517	2,336	5,191	7,080	1,976	2,359	1,757	0,762
	StdAbw	0,022			0,232	0,109	0,529	0,733	0,208	0,229	0,287	0,072
HebK2	Mittelw.	n.b.	0,349	0,147	1,815	3,373	6,503	9,257	2,607	3,223	1,972	0,934
	StdAbw	0,045	0,011	0,022	0,078	0,126	0,149	0,203	0,050	0,073	0,028	0,007
HebK2T	Mittelw.	n.b.	n.b.	n.b.	1,493	2,952	5,572	7,813	2,123	2,663	1,705	0,799
	StdAbw	0,030			0,104	0,090	0,130	0,176	0,050	0,065	0,024	0,010
HebA1	Mittelw.	n.b.	0,384	0,138	1,394	4,898	6,818	10,472	2,875	3,571	2,085	1,002
	StdAbw	0,012	0,025	0,018	0,118	0,238	0,093	0,337	0,102	0,102	0,027	0,022
HebA1T	Mittelw.	n.b.	n.b.	n.b.	1,558	3,381	5,614	8,578	2,128	2,651	2,101	0,905
	StdAbw	0,048			0,069	0,077	0,334	0,315	0,052	0,091	0,058	0,017
HebA2	Mittelw.	n.b.	0,392	0,119	1,317	4,424	6,443	10,400	2,841	3,521	2,032	0,963
	StdAbw	0,095	0,024	0,003	0,118	0,133	0,253	0,076	0,014	0,022	0,009	0,000
HebA2T	Mittelw.	0,198	n.b.	n.b.	1,394	4,166	5,707	8,420	2,173	2,713	1,870	0,873
	StdAbw	0,069			0,112	0,251	0,257	0,557	0,125	0,130	0,091	0,038
HebK1G	Mittelw.	n.b.	0,315	0,137	1,323	3,793	5,015	7,986	2,545	3,194	2,104	0,964
	StdAbw	0,036	0,024	0,005	0,123	0,384	0,051	0,039	0,006	0,011	0,019	0,004
HebK1P	Mittelw.	n.b.	0,358	0,153	1,561	3,956	5,880	9,317	2,812	3,278	2,035	0,933
	StdAbw	0,045	0,025	0,009	0,160	0,319	0,349	0,101	0,037	0,045	0,047	0,008
HebK1S	Mittelw.	n.b.	0,300	0,138	1,328	3,685	4,136	6,481	1,973	2,511	2,246	0,979
	StdAbw	0,138	0,009	0,014	0,053	0,049	0,058	0,070	0,019	0,008	0,046	0,007
HebG1	Mittelw.	n.b.	0,426	0,155	1,551	4,822	7,184	10,739	2,976	3,637	2,163	1,013
	StdAbw	0,032	0,023	0,026	0,219	0,092	0,261	0,323	0,120	0,121	0,097	0,035
Heb-Hg	Mittelw.	0,724	0,422	0,145	2,658	4,776	9,338	14,508	3,125	4,328	2,332	1,073
	StdAbw	0,083	0,022	0,005	0,319	0,309	0,572	0,467	0,095	0,142	0,038	0,022
Probe		BaPYR	DBahAN	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Heb-	Mittelw.	0,711	0,145	0,824	0,532	0,294	7,075	28,348	4,234	1,357	41,308	41,014
	StdAbw	0,006	0,005	0,042	0,014							
HebK1	Mittelw.	0,679	0,134	0,767	0,522	n.b.	5,141	22,179	3,832	1,289	32,490	32,441
	StdAbw	0,011	0,006	0,027	0,016							
HebK1T	Mittelw.	0,626	0,118	0,671	0,448	n.b.	3,853	16,606	3,263	1,120	24,883	24,843
	StdAbw	0,031	0,013	0,072	0,048							
HebK2	Mittelw.	0,678	0,131	0,782	0,513	n.b.	5,684	21,591	3,714	1,295	32,475	32,285
	StdAbw	0,020	0,005	0,058	0,004							
HebK2T	Mittelw.	0,588	0,119	0,706	0,470	n.b.	4,445	18,171	3,212	1,176	27,097	27,003
	StdAbw	0,024	0,005	0,038	0,013							
HebA1	Mittelw.	0,680	0,139	0,791	0,522	n.b.	6,813	23,735	3,906	1,314	35,824	35,768
	StdAbw	0,028	0,003	0,021	0,006							
HebA1T	Mittelw.	0,691	0,141	0,792	0,523	n.b.	4,938	18,972	3,837	1,315	29,215	29,063
	StdAbw	0,018	0,006	0,020	0,013							
HebA2	Mittelw.	0,663	0,130	0,746	0,493	n.b.	6,253	23,205	3,788	1,238	34,611	34,485
	StdAbw	0,017	0,003	0,023	0,001							
HebA2T	Mittelw.	0,677	0,132	0,764	0,521	0,198	5,560	19,014	3,552	1,285	29,609	29,411
	StdAbw	0,018	0,006	0,050	0,013							
HebK1G	Mittelw.	0,708	0,136	0,768	0,516	n.b.	5,569	18,740	3,913	1,284	29,542	29,506
	StdAbw	0,001	0,002	0,015	0,005							
HebK1P	Mittelw.	0,656	0,131	0,738	0,498	n.b.	6,028	21,086	3,755	1,236	32,168	32,105
	StdAbw	0,009	0,004	0,043	0,003							
HebK1S	Mittelw.	0,653	0,136	0,796	0,510	n.b.	5,450	15,101	4,014	1,306	26,041	25,872
	StdAbw	0,034	0,003	0,027	0,009							
HebG1	Mittelw.	0,728	0,145	0,803	0,534	n.b.	6,954	24,536	4,049	1,337	37,047	36,876
	StdAbw	0,059	0,003	0,008	0,025							
Heb-Hg	Mittelw.	0,545	0,141	0,671	0,569	0,724	8,002	31,299	4,091	1,240	45,356	44,632
	StdAbw	0,064	0,002	0,051	0,012							

Tab.35.1: Ausgangs- (16.06.1993 = 0 Wochen) und Endgehalte (16.11.94 = 74 Wo.: Mittelwert aller aktiven Varianten) der Altlastbodenproben an 15 PAK der US-EPA-Liste bei Behandlung in den Gefäßversuchen (mg/kg Boden; max. = Variante mit dem höchsten PAK-Endgehalt, min. = Variante mit dem geringsten PAK-Endgehalt) sowie PAK-Abbau (mg/kg Boden und %) im Mittel der mikrobiell aktiven Varianten (Mittelwerte aus 3 Parallelen)

Probe	NAP	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaANT	CHR	BbFLA	BkFLA
Ac 0 Wo.	42,13	116,38	46,31	208,26	80,69	198,77	154,72	97,66	93,63	57,07	28,05
74 Wo.	n.n.	1,72	12,13	69,51	96,77	98,83	134,03	60,58	83,33	46,30	23,23
max.:Ac-	n.n.	2,17	12,05	72,40	101,92	108,24	140,19	65,01	92,54	51,97	24,69
min.:AcK2	n.n.	1,67	12,92	67,77	92,93	93,41	121,87	55,31	75,68	40,48	21,14
Abbau	42,13	114,66	34,17	138,75	-16,08	99,94	20,69	37,08	10,30	10,77	4,82
Abbau%	100,00	98,52	73,80	66,62	-19,93	50,28	13,37	37,97	11,00	18,87	17,18
Bo 0 Wo.	19,27	87,15	11,88	80,25	27,39	233,96	212,79	108,28	115,50	113,71	42,51
74 Wo.	n.b.	3,88	4,78	45,75	98,72	164,71	159,15	96,46	99,16	85,99	42,55
max.:Bo-	n.n.	3,39	4,64	46,87	104,71	177,41	171,77	102,68	106,45	91,54	44,81
min.:BoK1	0,501	4,20	4,99	46,38	93,66	155,50	150,08	91,60	94,55	82,38	39,99
Abbau	19,27	83,27	7,11	34,50	-71,33	69,25	53,63	11,82	16,33	27,72	-0,05
Abbau%	100,00	95,54	59,80	42,99	-260,46	29,60	25,21	10,92	14,14	24,38	-0,11
Dd 0 Wo.	4,42	12,13	0,89	14,99	5,23	29,31	23,33	16,41	16,94	13,27	6,79
74 Wo.	n.n.	0,78	1,13	9,26	15,99	18,37	22,07	12,05	14,24	11,42	5,31
max.:DdK2	n.n.	0,89	1,37	10,50	17,83	19,52	22,68	12,13	14,19	11,49	5,35
min.:DdK1	n.n.	0,74	1,06	9,51	15,28	17,20	21,50	11,86	14,25	11,19	5,31
Abbau	4,42	11,35	-0,24	5,73	-10,77	10,94	1,25	4,36	2,70	1,85	1,48
Abbau%	100,00	93,57	-27,22	38,21	-205,86	37,34	5,38	26,59	15,93	13,91	21,82
Ge 0 Wo.	6,62	13,55	3,85	13,54	6,73	17,03	11,38	11,35	18,39	9,60	3,96
74 Wo.	6,58	0,62	2,29	8,30	13,49	7,80	7,96	8,33	15,45	7,12	3,88
max.:GeA2	11,62	0,66	2,37	8,44	14,89	8,56	8,95	9,04	15,80	7,58	4,08
min.:GeK1	2,29	0,55	2,08	7,53	12,95	7,43	7,57	8,21	15,49	7,28	3,87
Abbau	0,03	12,93	1,56	5,24	-6,75	9,23	3,42	3,03	2,93	2,48	0,08
Abbau%	0,52	95,44	40,48	38,71	-100,28	54,22	30,04	26,68	15,96	25,80	2,04
Ko 0 Wo.	0,96	1,36	0,00	8,55	4,58	28,51	21,87	16,21	19,17	18,15	7,25
74 Wo.	n.n.	0,43	0,20	5,55	14,61	19,22	23,29	13,53	17,67	15,19	6,89
max.:KoA1	n.n.	0,43	0,15	5,84	15,41	20,91	25,53	14,75	19,23	16,77	7,35
min.:KoK1S	n.n.	0,33	0,15	4,68	12,67	13,92	19,65	12,04	16,01	14,83	6,70
Abbau	0,96	0,93	-0,20	2,99	-10,03	9,29	-1,42	2,68	1,50	2,96	0,36
Abbau%	100,00	68,48		35,02	-219,20	32,60	-6,51	16,53	7,81	16,31	4,99
Ra 0 Wo.	72,38	62,58	5,13	68,48	29,14	147,35	109,65	88,86	98,82	66,73	30,50
74 Wo.	13,29	9,15	3,43	49,18	73,88	93,84	129,86	67,95	78,39	62,66	27,43
max.:RaA1	16,70	10,73	4,41	55,63	89,94	104,91	151,14	75,46	84,71	68,40	31,30
min.:RaA1	7,19	8,58	3,21	45,02	68,04	96,77	116,65	64,15	72,47	57,48	26,01
Abbau	59,09	53,43	1,69	19,30	-44,74	53,50	-20,21	20,91	20,43	4,07	3,07
Abbau%	81,64	85,38	33,03	28,18	-153,51	36,31	-18,43	23,53	20,67	6,10	10,08
So 0 Wo.	0,57	6,04	1,03	3,61	2,79	14,05	12,26	10,03	11,49	10,98	5,37
74 Wo.	n.b.	n.b.	0,31	2,06	8,76	7,83	13,01	6,28	8,40	7,12	4,28
max.:So-	n.b.	0,14	0,50	2,21	8,69	9,00	14,96	7,26	9,60	8,08	4,85
min.:SoK1S	n.n.	n.b.	0,35	1,76	7,32	5,32	9,31	4,84	6,93	6,62	4,15
Abbau	0,57	6,04	0,72	1,55	-5,97	6,23	-0,75	3,76	3,09	3,86	1,09
Abbau%	100,00	100,00	69,93	42,99	-214,12	44,31	-6,15	37,44	26,92	35,14	20,26
Ub 0 Wo.	19,09	25,89	57,02	113,04	17,39	30,88	16,89	8,58	10,15	6,27	2,59
74 Wo.	n.n.	0,27	1,35	1,17	5,37	2,29	2,86	2,13	4,07	3,53	1,47
max.:ÜbK1	n.n.	0,33	1,56	1,16	5,40	2,26	2,79	2,22	4,63	3,57	1,41
min.:ÜbK2	n.n.	0,24	1,25	0,94	4,71	2,31	2,80	1,90	3,74	3,36	1,40
Abbau	19,09	25,63	55,67	111,87	12,02	28,58	14,03	6,45	6,08	2,74	1,12
Abbau%	100,00	98,97	97,63	98,97	69,14	92,57	83,08	75,19	59,90	43,68	43,12
Hea 0 Wo.	1,90	1,92	1,49	11,40	3,02	38,91	37,91	9,16	11,94	7,89	3,51
74 Wo.	0,93	0,87	0,69	7,80	13,45	20,71	22,56	7,96	9,74	6,63	3,29
max.:Hea-	1,09	0,95	0,82	9,63	16,41	22,99	27,99	9,32	11,31	7,71	3,90
min.:HeaA2	1,09	0,89	0,64	6,93	12,25	19,72	21,02	7,26	8,96	5,90	3,03
Abbau	0,97	1,05	0,80	3,59	-10,43	18,20	15,35	1,19	2,20	1,26	0,22
Abbau%	50,98	54,55	53,84	31,52	-345,11	46,78	40,49	13,00	18,42	16,00	6,32
Heb 0 Wo.	1,10	0,88	0,39	2,60	6,23	10,00	16,22	3,49	4,83	2,44	1,15
74 Wo.	0,13	0,25	0,10	1,52	3,81	6,06	9,18	2,54	3,14	2,03	0,94
max.:Heb-	0,29	0,48	0,17	2,06	4,37	7,86	12,91	3,42	4,16	2,30	1,08
min.:HebK1	n.b.	n.n.	n.n.	1,52	2,34	5,19	7,08	1,98	2,36	1,76	0,76
Abbau	0,97	0,62	0,29	1,08	2,42	3,94	7,04	0,96	1,69	0,41	0,22
Abbau%	88,40	71,16	74,58	41,72	38,81	39,41	43,42	27,39	35,00	16,74	18,74

Tab.35.2: Ausgangs- (16.06.1993 = 0 Wochen) und Endgehalte (16.11.94 = 74 Wo.: Mittelwert aller aktiven Varianten) der Altlastbodenproben an 15 PAK der US-EPA-Liste bei Behandlung in den Gefäßversuchen (mg/kg Boden; max. = Variante mit dem höchsten PAK-Endgehalt, min. = Variante mit dem geringsten PAK-Endgehalt) sowie PAK-Abbau (mg/kg Boden und %) im Mittel der mikrobiell aktiven Varianten (Mittelwerte aus 3 Parallelen)

Probe	BaPYR	DBahANT	BghiPER	IPYR	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK	ohne NAP
Ac 0 Wo.	64,77	17,06	40,06	40,48	42,13	451,63	544,78	166,94	80,54	1286,02	1243,89
74 Wo.	65,46	10,01	49,50	31,87	n.n.	180,13	376,77	145,00	81,37	783,27	783,27
max.:Ac	70,83	9,03	52,01	35,78	n.n.	188,53	405,98	156,52	87,80	838,83	838,83
min.:AcK2	60,39	10,00	44,57	28,18	n.n.	175,29	346,26	131,66	72,75	725,95	725,95
Abbau	-0,69	7,05	-9,45	8,62	42,13	271,50	168,01	21,94	-0,83	502,75	460,62
Abbau%	-1,07	41,33	-23,58	21,28	100,00	60,12	30,84	13,14	-1,03	39,09	37,03
Bo 0 Wo.	93,12	22,07	62,28	69,90	19,27	206,67	670,52	271,40	132,19	1300,05	1280,78
74 Wo.	82,68	11,41	57,94	63,95	n.n.	153,12	519,48	222,63	121,89	1017,23	1017,13
max.:Bo	88,35	12,05	63,12	67,60	n.n.	159,61	558,32	236,75	130,71	1085,39	1085,39
min.:BoK1	80,31	10,70	55,66	63,06	0,501	149,23	491,73	213,38	118,72	973,56	973,06
Abbau	10,44	10,66	4,35	5,95	19,27	53,55	151,04	48,77	10,29	282,82	263,65
Abbau%	11,21	48,30	6,98	8,51	100,00	25,91	22,53	17,97	7,79	21,75	20,59
Dd 0 Wo.	13,14	2,44	7,88	9,76	4,42	33,24	85,99	35,64	17,64	176,93	172,51
74 Wo.	10,52	1,84	10,04	6,70	n.n.	27,17	66,73	29,10	16,75	139,74	139,74
max.:DdK2	10,38	1,80	10,25	6,70	n.n.	30,59	68,52	29,01	16,95	145,07	145,07
min.:DdK1	1,52	1,87	9,51	6,26	n.n.	26,58	64,81	28,88	15,77	136,04	136,04
Abbau	2,62	0,60	-2,16	3,05	4,42	6,07	19,26	6,55	0,89	37,19	32,77
Abbau%	19,95	24,45	-27,38	31,29	100,00	18,27	22,40	18,37	5,07	21,02	19,00
Ge 0 Wo.	8,38	2,69	4,51	6,93	6,62	37,68	58,15	24,63	11,44	138,52	131,90
74 Wo.	7,24	1,50	4,46	4,44	6,58	24,70	39,54	19,74	8,90	99,45	92,87
max.:GeA2	7,70	1,56	4,55	4,39	11,62	26,35	42,34	20,93	8,93	110,17	98,55
min.:GeK1	7,31	1,57	4,67	4,57	2,29	23,11	38,70	20,03	9,24	93,36	91,07
Abbau	1,15	1,19	0,06	2,48	0,03	12,98	18,61	4,89	2,54	39,06	39,03
Abbau%	13,66	44,31	1,26	35,86	0,52	34,45	32,01	19,87	22,21	28,20	29,59
Ko 0 Wo.	14,73	3,19	10,18	13,86	0,96	14,49	85,76	43,32	24,05	168,57	167,61
74 Wo.	12,08	2,71	8,77	8,70	n.n.	20,79	73,71	36,86	17,47	148,84	148,84
max.:KoA1	13,61	2,84	9,15	8,86	n.n.	21,83	80,42	40,57	18,01	160,83	160,83
min.:KoK1S	10,68	2,84	8,88	9,26	n.n.	17,83	61,61	35,06	18,14	132,63	132,63
Abbau	2,65	0,48	1,41	5,16	0,96	-6,31	12,05	6,45	6,57	19,72	18,77
Abbau%	17,99	15,15	13,87	37,22	100,00	-43,54	14,05	14,90	27,33	11,70	11,20
Ra 0 Wo.	67,49	15,66	38,39	57,80	72,38	165,33	444,68	180,37	96,18	958,94	886,56
74 Wo.	59,43	9,45	47,07	38,19	13,29	135,65	370,05	158,96	85,26	763,21	749,91
max.:RaA1T	66,45	11,50	50,09	42,55	16,70	160,70	416,21	177,64	92,64	863,89	847,19
min.:RaA1	56,42	9,61	42,24	35,92	7,19	124,85	350,04	149,52	78,16	709,76	702,57
Abbau	8,05	6,21	-8,68	19,61	59,09	29,68	74,63	21,41	10,93	195,74	136,65
Abbau%	11,94	39,64	-22,61	33,92	81,64	17,95	16,78	11,87	11,36	20,41	15,41
So 0 Wo.	14,02	3,28	8,10	11,25	0,57	13,46	47,84	33,65	19,35	114,87	114,30
74 Wo.	9,37	1,54	9,29	5,57	n.b.	11,22	35,51	22,31	14,86	84,05	83,90
max.:So	10,77	1,71	10,31	6,31	n.b.	11,53	40,81	25,41	16,62	94,52	94,37
min.:SoK1S	8,26	1,46	9,91	5,54	n.n.	9,52	26,40	2,49	15,45	71,86	71,86
Abbau	4,65	1,74	-1,20	5,69	0,57	2,25	12,32	11,34	4,49	30,82	30,40
Abbau%	33,16	53,15	-14,76	50,54	100,00	16,70	25,76	33,70	23,21	26,83	26,60
Üb 0 Wo.	3,88	0,96	2,50	2,78	19,09	213,34	66,49	13,70	5,28	317,90	298,81
74 Wo.	2,73	0,65	1,70	1,80	n.n.	8,15	11,35	8,39	3,51	31,40	31,40
max.:ÜbK1	2,86	0,73	1,85	1,88	n.n.	8,44	11,90	8,58	3,73	32,64	32,64
min.:ÜbK2	2,53	0,57	1,59	1,64	n.n.	7,14	10,75	7,86	3,23	28,98	28,98
Abbau	1,15	0,31	0,79	0,98	19,09	205,19	55,14	5,31	1,77	286,51	267,42
Abbau%	29,61	32,24	31,71	35,25	100,00	96,18	82,93	38,79	33,58	90,12	89,49
Hea 0 Wo.	4,19	0,89	3,98	2,76	1,90	17,83	97,91	16,47	6,74	140,85	138,95
74 Wo.	3,34	0,70	2,63	2,30	0,93	22,82	60,97	13,96	4,93	103,61	102,68
max.:Hea	4,03	0,85	3,04	2,66	1,09	27,81	71,61	16,49	5,70	122,70	121,61
min.:HeaA2	2,83	0,58	2,45	2,07	1,09	20,71	56,97	12,34	4,52	95,62	94,53
Abbau	0,84	0,18	1,35	0,46	0,97	-4,99	36,94	2,51	1,81	37,24	36,28
Abbau%	20,14	20,50	33,85	16,83	50,98	-27,97	37,73	15,23	26,88	26,44	26,11
Heb 0 Wo.	0,90	0,21	1,01	0,66	1,10	10,09	34,54	4,71	1,67	52,10	51,00
74 Wo.	0,67	0,13	0,77	0,51	0,13	5,68	20,91	3,77	1,27	31,76	31,63
max.:Heb	0,71	0,15	0,82	0,53	0,29	7,08	28,35	4,23	1,36	41,31	41,01
min.:HebK1T	0,63	0,12	0,67	0,45	n.b.	3,85	16,61	3,26	1,12	24,88	24,84
Abbau	0,23	0,08	0,24	0,15	0,97	4,41	13,63	0,93	0,39	20,35	19,37
Abbau%	25,52	37,19	24,02	23,04	88,40	43,73	39,47	19,84	23,63	39,05	37,98

Tab.36.1: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Ac über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Ac-	13,07	259,02	493,68	170,17	87,59	1023,53
AcK1	11,62	254,16	468,65	166,66	83,41	984,50
AcK2	12,89	250,78	460,37	160,80	81,61	966,45
AcA1	14,71	250,56	469,57	163,53	83,91	982,28
AcA2	11,34	248,28	465,76	158,12	82,58	966,08
Ac-Hg	10,32	431,08	548,82	160,79	80,01	1231,02

Tab.36.2: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Bo über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Bo-	9,89	161,26	595,32	256,32	142,43	1165,21
BoK1	10,06	150,89	563,39	250,33	141,74	1116,43
BoK2	8,77	150,30	579,34	247,32	140,35	1126,08
BoA1	6,79	144,70	571,63	248,92	139,52	1111,55
BoA2	9,46	147,82	563,94	243,51	136,21	1100,93
Bo-Hg	10,18	195,56	621,76	245,72	130,13	1203,36

Tab.36.3: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Dd über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Dd-	0,743	21,65	78,41	33,07	18,05	151,92
DdK1	0,678	19,82	72,80	30,52	16,31	140,13
DdK2	0,699	19,95	72,08	30,33	16,28	139,34
Dd-Hg	1,18	27,58	80,63	29,60	14,77	153,76

Tab.36.4: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Ge über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Ge-	6,73	24,78	49,81	24,09	11,04	116,45
GeK1	8,47	23,23	45,78	23,16	10,65	111,30
GeK2	5,91	22,92	46,85	22,79	10,58	109,05
GeA1	7,01	24,63	50,26	24,47	10,85	117,23
GeA2	6,08	24,41	48,34	24,08	10,61	113,53
GeK2T	4,22	23,38	45,95	23,39	10,67	107,61
Ge-Hg	5,93	31,41	53,41	21,63	9,56	121,94

Tab.36.5: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Ko
über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Ko-	n.b.	13,90	67,34	35,10	17,31	133,78
KoK1	n.b.	12,84	65,57	34,41	16,74	129,68
KoK1T	0,247	14,10	65,63	32,80	16,77	129,54
KoK2	n.b.	13,08	62,28	33,60	16,81	125,89
KoK2T	n.b.	12,96	62,34	32,40	16,33	124,16
KoA1	n.b.	14,12	66,00	34,40	17,01	131,65
KoA1T	n.b.	13,97	62,78	32,60	16,88	126,34
KoA2	n.b.	12,97	63,13	33,36	16,54	126,12
KoA2T	n.b.	14,12	61,92	32,48	16,44	125,14
KoK1G	n.b.	15,15	61,36	31,88	16,71	125,26
KoK1P	n.b.	13,45	64,13	32,84	16,64	127,22
KoK1S	n.b.	13,15	62,50	32,82	17,71	126,33
KoG1	n.b.	14,03	64,27	33,47	17,25	129,14
Ko-Hg	n.b.	14,49	64,87	32,97	16,31	128,82

Tab.36.6: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Ra
über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Ra-	28,81	103,67	356,90	156,82	73,29	719,49
RaK1	31,31	107,40	349,24	155,21	73,23	716,38
RaK1T	28,52	106,06	330,30	147,02	71,75	683,65
RaK2	25,18	103,64	342,61	152,22	72,66	696,30
RaK2T	18,20	93,51	341,09	141,63	68,09	662,53
RaA1	26,23	98,08	339,80	152,41	67,99	684,51
RaA1T	19,67	97,21	355,27	149,20	69,57	690,92
RaA2	23,00	102,95	357,96	157,37	71,72	713,00
RaA2T	20,16	97,64	360,29	147,21	71,70	697,01
RaK1G	23,31	108,82	342,69	145,17	71,11	691,10
RaK1P	20,64	109,66	349,67	150,40	72,06	702,42
RaK1S	18,13	104,16	336,43	144,69	75,32	678,73
RaG1	20,50	98,38	367,23	146,44	69,59	702,15
Ra-Hg	35,18	113,83	342,93	148,36	67,47	707,77

Tab.36.7: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe So
über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
So-	n.b.	10,09	40,02	26,86	15,98	93,08
SoK1	0,253	10,61	41,16	28,02	16,51	96,55
SoK1T	0,227	9,54	39,07	26,28	15,79	90,90
SoK2	n.b.	10,38	37,96	26,88	15,45	90,86
SoK2T	n.b.	11,58	37,36	24,80	14,69	88,60
SoA1	n.b.	10,64	38,40	26,78	15,71	91,70
SoA1T	0,212	11,96	37,75	24,63	14,89	89,45
SoA2	0,206	10,41	39,65	27,53	15,41	93,21
SoA2T	0,231	11,55	37,71	24,94	14,94	89,37
SoK1G	n.b.	9,65	37,87	26,54	15,98	90,20
SoK1P	0,301	10,48	39,62	27,69	16,37	94,46
SoK1S	0,201	10,29	35,13	25,41	16,10	87,13
SoG1	0,31	12,98	37,99	25,72	14,97	91,97
So-Hg	n.b.	10,24	43,06	29,83	16,23	99,50

Tab.36.8: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Üb
über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Üb-	4,66	47,59	32,10	10,94	4,98	100,28
ÜbK1	3,31	40,53	30,65	10,65	4,65	89,79
ÜbK2	3,53	37,50	31,82	10,42	4,50	87,78
ÜbA1	3,09	35,57	31,10	10,74	4,64	85,13
ÜbA2	3,29	36,76	30,66	10,97	4,91	86,60
Üb-Hg	7,61	135,91	50,89	9,87	3,99	211,50

Tab.36.9: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Hea
über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Hea-	1,40	18,25	78,10	16,84	6,34	120,93
HeaK1	1,13	16,52	72,24	16,33	6,20	112,42
HeaK2C2	1,66	16,81	72,62	15,70	6,05	112,84
HeaA1	1,31	17,81	75,98	16,49	6,31	117,90
HeaA2	1,29	15,69	72,97	15,50	5,81	111,26
HeaK2C1	1,21	16,03	75,94	15,97	6,09	115,24
HeaK2C0	1,25	15,54	71,58	15,00	5,82	109,18
Hea-Hg	1,85	27,13	86,04	15,58	5,68	136,29

Tab.36.10: Mittelwerte der PAK-Gehalte der Varianten der Bodenprobe Heb
über die Zeitdauer der Gefäßversuche (16.06.93 - 16.11.94)

Variante	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	PAK
Heb-	0,639	9,24	30,36	4,36	1,31	45,90
HebK1	0,401	7,59	27,73	4,27	1,32	41,31
HebK1T	0,471	7,11	24,54	3,88	1,23	37,23
HebK2	0,616	7,61	26,78	4,02	1,26	40,29
HebK2T	0,575	7,27	25,16	3,91	1,25	38,16
HebA1	0,529	7,88	28,26	4,11	1,25	42,02
HebA1T	0,445	7,03	24,55	3,91	1,23	37,17
HebA2	0,447	7,61	27,44	4,06	1,24	40,80
HebA2T	0,511	7,44	26,27	3,97	1,26	39,45
HebK1G	0,407	7,33	25,26	4,10	1,24	38,34
HebK1P	0,442	7,66	27,37	4,20	1,29	40,97
HebK1S	0,481	7,17	22,80	4,09	1,28	35,82
HebG1	0,548	7,93	28,69	4,19	1,31	42,67
Heb-Hg	1,10	9,73	33,28	4,35	1,37	49,83

Tab.37.1: Signifikanz des Einflusses der verschiedenen Zugaben bzw. ihrer Kombinationen auf die PAK-Gehalte in den Bodenproben der Standorte Ac und Bo (Signifikanzniveau: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001)

	Ac (n = 99)			Bo (n = 104)		
	o.S.	Menge	o.S.*Menge	o.S.	Menge	o.S.*Menge
NAP			***			
ACE	***	**	*	***		
FLU				**		*
PHE						
ANT		**				
FLA					*	**
PYR		**	*			
BaANT	**		*			
CHR						
BbFLA		*				
BkFLA		**				
BaPYR	**	**			**	
DBahANT						
BghiPER				**	*	
IPYR	*		*			
PAK						

Tab.37.2: Signifikanz des Einflusses der verschiedenen Zugaben bzw. ihrer Kombinationen auf die PAK-Gehalte in den Bodenproben der Standorte Dd und Ge (Signifikanzniveau: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001)

	Dd (n = 63)			Ge (n = 114)		
		Menge		o.S.	Menge	o.S.*Menge
NAP						
ACE						
FLU						
PHE		**				
ANT						
FLA		*				
PYR		***		*		
BaANT		***				
CHR		***				
BbFLA		**				
BkFLA		***				
BaPYR		*		**		
DBahANT		***				
BghiPER		***				
IPYR		**				
PAK		***			*	

Tab.37.3: Signifikanz des Einflusses der verschiedenen Zugaben bzw. ihrer Kombinationen auf die PAK-Gehalte in den Bodenproben des Standortes Ko (Signifikanzniveau: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001)

Ko (n = 229)						
	o.S.	Menge	Tensid	o.S.*Menge	o.S.*Tensid	Menge*Tensid
NAP		*	*	**	*	*
ACE	**					
FLU	***		***		***	
PHE						
ANT	***	*		*		
FLA	***	***	***		*	
PYR	*	***	***		**	*
BaANT		***	***			
CHR	***	***	***	**		
BbFLA			***			
BkFLA		**	**			
BaPYR	**		***			**
DBahANT			*			
BghiPER	***			**	*	
IPYR		**	***			
PAK		***	***			

Tab.37.4: Signifikanz des Einflusses der verschiedenen Zugaben bzw. ihrer Kombinationen auf die PAK-Gehalte in den Bodenproben des Standortes Ra (Signifikanzniveau: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001)

Ra (n = 226)						
	o.S.	Menge	Tensid	o.S.*Menge	o.S.*Tensid	Menge*Tensid
NAP	***	***	***	*		
ACE	***	*	*			
FLU	*		**			
PHE		**	***	***		
ANT	*		**		**	
FLA	*		***	*		
PYR	***	*	**	***	***	
BaANT	***		***	**		**
CHR	***		***		**	
BbFLA	**		***	***		*
BkFLA	*					
BaPYR	***		***		**	
DBahANT	***	***	***		***	***
BghiPER	***			**		
IPYR	***		***	***	**	**
PAK			***	***	***	

Tab.37.5: Signifikanz des Einflusses der verschiedenen Zugaben bzw. ihrer Kombinationen auf die PAK-Gehalte in den Bodenproben des Standortes So (Signifikanzniveau: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001)

	So (n = 181)					
	o.S.	Menge	Tensid	o.S.*Menge	o.S.*Tensid	Menge*Tensid
NAP						
ACE	***	***	***	***	**	**
FLU	***		***	***	**	**
PHE			***		**	
ANT	***	***	***	***	***	***
FLA	***	***	***	***		*
PYR			***		***	***
BaANT	***	**	***	***	**	***
CHR		***	***	***		
BbFLA	***	**	***	***	***	**
BkFLA	***		***			
BaPYR			*			
DBahANT	***	***	***	***	**	***
BghiPER	**		**		**	**
IPYR	***	***	***	***	*	
PAK	*	*	***	***		

Tab.37.6: Signifikanz des Einflusses der verschiedenen Zugaben bzw. ihrer Kombinationen auf die PAK-Gehalte in den Bodenproben der Standorte Üb und Hea (Signifikanzniveau: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001)

	Üb (n = 117)			Hea (n = 144)			
	o.S.	Menge	o.S.*Menge	o.S.	Menge	Kalk	o.S.*Menge
NAP	**				*	*	*
ACE	*					*	*
FLU	***		*			**	
PHE	***	***	***		*	**	**
ANT		*		***	**	**	***
FLA		**	**	*			
PYR			**	**		*	*
BaANT						**	
CHR					*	**	*
BbFLA			*		**		
BkFLA				*	**	***	
BaPYR					***	*	
DBahANT					*		
BghiPER				***			*
IPYR	*				***	*	
PAK	**			*	**	*	**

Tab.37.7: Signifikanz des Einflusses der verschiedenen Zugaben bzw. ihrer Kombinationen auf die PAK-Gehalte in den Bodenproben des Standortes Heb (Signifikanzniveau: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001)

	Heb (n = 153)					
	o.S.	Menge	Tensid	o.S. *Menge	o.S. *Tensid	Menge *Tensid
NAP						
ACE						
FLU						
PHE	***		*			
ANT	***		***			*
FLA			***			***
PYR	**		***	**		***
BaANT	***		***	***		***
CHR	***		***	*		***
BbFLA			**	*	*	
BkFLA			***			***
BaPYR						
DBahANT						
BghiPER	**				*	
IPYR						
PAK	*		***			***

Tab.38: Durch Tensidlösungen (2% Aktivsubstanz) extrahierbare PAK-Gehalte einer Altlast-Bodenprobe (mg/kg Boden) (Mittelwerte aus drei Wiederholungen)

	2-Ring	3-Ring	4-Ring	5-Ring	6-Ring	Σ-PAK
Genapol UD 030	0,206	2,57	6,24	2,26	2,41	13,7
Genapol UD 050	0,144	2,85	20,9	7,39	7,83	39,1
Genapol UD 080	0,459	4,36	22,9	7,88	8,32	43,9
Genapol ZRO Paste	0,135	2,19	9,44	2,74	2,85	17,3
Geronol V/87-E	1,62	1,47	7,86	3,39	3,39	17,7
Hostapur OS	0,126	0,315	4,42	1,25	1,26	7,37
Hostapur SAS	0,099	0,918	4,10	1,32	1,36	7,79
KE 2642	n.n.	0,757	3,320	0,943	0,975	5,99
Plantaren 225	n.n.	24,2	4,14	9,77	13,5	51,7
Plantaren 600CS UP*	n.n.	0,859	2,98	0,767	0,774	5,37
Rhodonat CO 11	mit der angewendeten Methode nicht aufzuarbeiten					
Rhodonat LMO	n.n.	0,022	0,037	0,023	0,026	0,107
Soprophor OR/36	n.n.	4,86	5,03	5,12	5,16	20,2
Soprophor PA/23	0,466	4,06	10,4	4,18	4,44	23,5
Synperonic LF/B 26	0,339	0,658	12,3	5,62	5,91	24,8
Synperonic LF/D 25	0,076	0,735	12,3	5,30	5,52	23,9
Synperonic LF/RA 30	n.n.	1,70	15,3	7,73	8,31	33,0
Synperonic LF/RA 43	0,230	3,62	18,8	9,40	10,1	42,2
Texapon N70	n.n.	2,31	7,51	2,40	2,47	14,7
Triton X-100	n.n.	1,90	21,8	11,9	12,9	48,5

(*mit 10% Texapon N-70 als Co-Emulgator)

Die Sachgebiete „Altlasten“ und „Bodenschutz“ umfassen zu einem gewissen Anteil artverwandte Themen und Fragestellungen. Es bietet sich daher an, Publikationen des Landes Nordrhein-Westfalen zu diesen Themenkreisen zukünftig in einer gemeinsamen Schriftenreihe herauszugeben. Die eingeführte Reihe „Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten“ (MESA) wurde daher für Beiträge zum Bodenschutz geöffnet und gleichzeitig in „Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz“ (MALBO) umbenannt.

In der Reihe werden

- **Schlußberichte über Untersuchungsvorhaben**, die im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen zu Altlastenfragen und zum Bodenschutz durchgeführt worden sind, sowie
- **ausgewählte Ergebnisse sonstiger wissenschaftlicher Arbeiten** und Beratungen zu diesen Themenfeldern veröffentlicht, um sie der praktischen Anwendung, der fachlichen Diskussion und der interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Bisher sind erschienen in der Reihe „**Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten**“ (MESA):

- Band 1** Untersuchungen über ein Konzept zur Ermittlung von Grundwassergefährdungen durch Altablagerungen und Altstandorte
- Band 2** Anwendbarkeit von Richt- und Grenzwerten aus Regelwerken anderer Anwendungsbereiche bei der Untersuchung und sachkundigen Beurteilung von Altablagerungen und Altstandorten
- Band 3** Verdachtsflächen rüstungs- und kriegsbedingter Altlasten in Nordrhein-Westfalen (Schwerpunkt 1930 – 1950)
- Band 4** Erfassung und Auswertung der Hintergrundgehalte ausgewählter Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens
- Band 5** Verdachtsflächen rüstungs- und kriegsbedingter Altlasten in Nordrhein-Westfalen (Schwerpunkt 1900 – 1930)
- Band 6** Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden und Deponien: Entwicklung eines aussagefähigen Elutionsverfahrens
- Band 7** Beurteilung von PCB und PAK in Kulturböden
- Band 8** Feststoffuntersuchungsprogramme für Altstandorte der Metallbearbeitung
- Band 9** Hinweise für die einzelfallbezogene Erfassung von Verdachtsflächen rüstungs- und kriegsbedingter Altlasten
- Band 10** Feldversuche zur mikrobiologischen Sanierung eines PAK-belasteten Bodens (ehemaliger Gaswerksstandort) in Solingen-Ohligs
- Band 11** Anforderungen an Gutachter, Untersuchungsstellen und Gutachten bei der Altlastenbearbeitung
- Band 12** Konversion militärischer Liegenschaften: Altlasten / Bodenbelastungen. Lösungsansätze aus der Praxis
- Band 13** Lysimeterversuche zum Verhalten persistenter organischer Schadstoffe im System Boden/Pflanze

in der Reihe „**Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz**“ (MALBO):

- Band 1** Erhebungen über Altlast-Verdachtsflächen auf militärischen Liegenschaften
- Band 2** Mobilität anorganischer Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens
- Band 3** Auswertung der Erfahrungen aus durchgeführten Sicherungsmaßnahmen bei Altlasten
- Band 4** Gefäßversuche zum mikrobiellen Abbau von PAK (polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen) in belasteten Böden