

E N D B E R I C H T
Feldversuche zur mikrobiologischen
Sanierung eines PAK-belasteten Bodens
(ehemaliger Gaswerkstandort)
in Solingen-Ohligs

von

Dipl.-Ing. Norbert Steilen

seinerzeit:

GERTEC GmbH-Beratende Ingenieure, Essen

Dr. rer.nat. Thomas Heinkele

seinerzeit:

Hermann Trautmann Garten- und Landschaftsbau GmbH, Essen

Prof. Dr. rer.nat. Walter Reineke

Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal

Chemische Mikrobiologie

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des
Landes Nordrhein-Westfalen, vertreten durch den Regierungspräsidenten Düsseldorf.

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

Dipl.-Ing. Haimo Bullmann	Stadt Solingen
Dr. Ursula Necker	Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung NW
Dipl.-Ing. Michael Odensaß	Landesamt für Wasser und Abfall NW
Dipl.-Ing'in Ingeborg Rennebaum-Schulte	Staatliches Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft Düsseldorf
Chem.-Ing.'in Birgit Wiele (zeitweise)	Regierungspräsidium Düsseldorf
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Willershausen (Vorsitzender)	Regierungspräsidium Düsseldorf

Herausgeber und
Bezugsquelle: Landesumweltamt
Wallneyer Straße 6
45133 Essen

Erarbeitung: Projektleitung
Dipl.-Ing. Norbert Steilen
M.B. geosphere Ltd.
Carl-Zeiss-Ring 13, 85737 Ismaning
vormals: GERTEC GmbH-Beratende Ingenieure, Essen

unter Mitarbeit von
Dr. rer.nat. Thomas Heinkele
Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung
Postfach 101344, 01313 Cottbus
vormals: Hermann Trautmann Garten- und Landschaftsbau GmbH, Essen

Prof. Dr. rer.nat. Walter Reineke
Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal
Chemische Mikrobiologie
Gaußstraße 20, 42097 Wuppertal 1

Umschlaggestaltung: Werbeagentur Scharke GmbH, Düsseldorf

Druck: P & W Druck u. Verlag GmbH, Bamler Str. 61, 45141 Essen

Gedruckt auf 100% Altpapier ohne Chlorbleiche

Vorwort

Ehemalige Gaswerk- und Kokereistandorte sind aufgrund ihres Schadstoffinventars i.d.R. sanierungsbedürftige Altstandorte. Die maßgebenden Stoffe, die Sanierungsmaßnahmen für den Schutz von Menschen und Umwelt erforderlich machen, sind bei diesen Standorten insbesondere die polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK).

Als Dekontaminationsverfahren werden neben Waschverfahren, den thermischen Verfahren und einigen großtechnisch bisher wenig erprobten bzw. eingesetzten Neuentwicklungen (Vakuumdestillation, Wasserdampfdesorption, Gasphasenextraktion, Ozonisierung) insbesondere mikrobiologische Verfahren angeboten. Diese wurden bisher allerdings zumeist als Mietenverfahren für den Abbau von Mineralölkohlenwasserstoffen erfolgreich eingesetzt.

Da für die Stoffgruppe der PAK hinsichtlich der mikrobiologischen Abbaubarkeit bisher großtechnisch nur geringe Erkenntnisse vorlagen, wurden die im folgenden beschriebenen Feldversuche mit dem Ziel durchgeführt, beispielhaft den Stand der Technik in diesem Bereich zu ermitteln.

Für die Versuche wurde ein Standort ausgewählt, der aufgrund seiner Randbedingungen (Bodenart, Belastungsniveau) durchaus vergleichbar mit anderen Standorten in NRW ist, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die im folgenden dargestellten wenig erfolgreichen Ergebnisse lassen sich aufgrund der im Einzelfall sehr unterschiedlichen Bodenzusammensetzung und Bioverfügbarkeit dennoch nicht verallgemeinern. Sie zeigen jedoch, daß mikrobiologische PAK-Sanierungen von Koke- rei- und Gaswerkböden noch nicht als Stand der Technik bezeichnet werden können, bevor nicht weitergehende wissenschaftliche Erkenntnisse insbesondere über eine Bilanzierung des Abbaus, Adsorptions- und Desorptionseffekte bei der Humifizierung bzw. Biofixierung der PAK im Boden sowie geeignete Toxizitätstests vorliegen. Weiterhin zeigte sich, daß die durchzuführenden Voruntersuchungen zur Beurteilung der biologischen Sanierbarkeit höhere Anforderungen erfüllen müssen als die von den Firmen i.d.R. durchgeführten Untersuchungen. Entsprechende Empfehlungen dazu werden in diesem Bericht gegeben.



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

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. Kurzfassung	7
0.1 Einleitung	7
0.2 Auswahl der Versuchsteilnehmer	8
0.3 Bodenbeschaffenheit	10
0.4 Vorbereitung des Versuchsbodens	12
0.5 Vorbereitung der Versuchsfläche	13
0.6 Probenahme	13
0.7 Untersuchungsprogramm	14
0.8 Bindung und Mobilität von PAK in Böden	15
0.9 Ergebnisse	16
0.10 Zusammenfassung der Ergebnisse	23
0.11 Empfehlungen	24
1. Einleitung	29
2. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	31
2.1 PAK als Umweltchemikalien	31
2.2 Verteilung und Verbleib von PAK in der Umwelt	32
2.2.1 Physiko - chemische PAK-Daten	35
2.3 Bindung und Mobilität von PAK in Böden	36
2.4 Mikrobieller Abbau von Einzel-PAK	39
2.5 Abbausequenzen für einzelne PAK mit Reinkulturen	39
2.6 Mischkulturen/Mischsubstrate für den PAK-Abbau	43
2.7 Mikrobieller Abbau von PAK-Gemischen im Boden	44
3. Vorbereitende Untersuchungen und Maßnahmen für die Durchführung der Feldversuche	47
3.1 Belastungssituation am ehemaligen Gaswerkstandort in Solingen-Ohligs	47
3.2 Bodenbeschaffenheit	48
3.3 Auswahl der Versuchsteilnehmer	48
3.4 Vorbereitung des Versuchsbodens	50
3.5 Klima- und Wettersituation	52
4. Durchführung der Feldversuche	53
4.1 Vorbereitung der Versuchsfläche	53
4.2 Mietenaufbau	54
4.3 Betrieb der Mieten	58
5. Versuchsbegleitende Untersuchungen	66
5.1 Probennahme	66
5.2. Untersuchungsprogramm und -methodik	68

5.2.1	Schadstoffanalytische Untersuchungen	68
5.2.1.1	Im Boden	68
5.2.1.2	Im Sickerwasser	69
5.2.1.3	Bodenluftmessungen	69
5.2.2.	Bodenkundliche Untersuchungen	69
5.2.2.1	Im Boden	69
5.2.2.2	Im Eluat	70
5.2.3	Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit	71
5.2.4	Weitere PAK-Analytik	71
5.2.4.1	Firmeneigene Analytik	71
5.2.4.2	Ringanalytik	71
5.2.4.3	Analytik der eingefrorenen Rückstellproben	73
5.2.4.4	Aktivkohlefilter PNW	73
6.	Darstellung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse	73
6.1	Bewertung der schadstoffanalytischen Untersuchungen	73
6.1.1	Bewertung der PAK-Gehalte im Boden	73
6.2	Bewertung der Untersuchungsergebnisse auf PAK-Abbauprodukte (Metabolite)	86
6.3	Bewertung der Bioverfügbarkeit	86
6.4	Bewertung der Schwermetallgehalte	87
6.5	Bewertung des BTX-, EOX-, Cyanid- und Kohlenwasserstoffgehaltes	87
6.6	Bewertung der PAK-Konzentrationen im Sickerwasser	87
6.7	Bewertung der Bodenluftmessung	88
6.8	Bewertung der bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften	88
6.8.1	Pflanzenverfügbare Nährstoffe im Boden	88
6.8.2	Gehalte an Corg und Nt, C/N-Verhältnis im Boden	92
6.8.3	Bodenmikrobiologische Untersuchungen	96
6.8.3.1	Aktivitätsparameter	96
6.8.3.2	Populationsdichten	106
6.8.4	Nährstoffgehalte im Eluat	110
6.8.5	Gehalte an Corg, Nt und C/N-Verhältnis im Eluat	113
6.8.6	Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungsergebnisse	117
7.	Schlußfolgerung und Empfehlung	119
	Literaturverzeichnis	124
	Anlagen	133
	Bilderverzeichnis	149
	Abbildungsverzeichnis	150
	Tabellenverzeichnis	151
	Abkürzungsverzeichnis	152

0. Kurzfassung

0.1 Einleitung

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung für ein ehemaliges Gaswerksgelände in Solingen-Ohligs wurde im Jahre 1988 im Auftrag der Stadt Solingen eine Recherche über Sanierungsverfahren durchgeführt, die für die Behandlung eines mit polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) belasteten Bodens geeignet sein könnten.

Danach waren verfügbar

- thermische Anlagen in den Niederlanden und
- mikrobiologische Verfahren von etwa 40 Anbietern.

Für die Sanierung bzw. Reinigung der gering belasteten Böden Σ EPA-PAK < 200 mg/kg TS (vorwiegend Oberböden) aus dem Randbereich des Gaswerks Ohligs schienen aus damaliger Sicht aus ökonomischen und ökologischen Gründen insbesondere die mikrobiologischen Verfahren geeignet zu sein. Es war anzunehmen, daß diese on-site-Verfahren preisgünstiger sein würden als eine thermische Behandlung. Die Anbieter stellten aufgrund ihrer Vorversuchsergebnisse die Sanierung als einfach und unproblematisch dar, obwohl aussagefähige Sanierungsergebnisse für die Sanierung PAK-verunreinigter Böden damals nicht vorlagen. Daher sollte untersucht werden, welche und in welchem Maße mikrobiologische Sanierungsverfahren geeignet sind, gering belasteten PAK-kontaminierten Boden zu reinigen. Von den Landesbehörden wurde die Anregung der Stadt Solingen aufgegriffen, einen Feldversuch durchzuführen, um diese Frage zu klären.

Auftraggeber für die Feldversuche war das Land Nordrhein-Westfalen, vertreten durch den Regierungspräsidenten Düsseldorf. Die Gesamtkosten der Feldversuche in Höhe von 1,4 Mio DM wurden vom Land NRW getragen. Die Stadt Solingen stellte das Versuchsgelände und den kontaminierten Boden zur Verfügung. Die Projektleitung lag beim Ingenieurbüro GERTEC GmbH, Essen.

Zielsetzung des Projektes aus Sicht des Landes war es,

- betroffenen Kommunen in fachlicher Hinsicht bei der Auswahl von mikrobiologischen Sanierungsverfahren Hilfestellung leisten zu können,
- Prüfung der Erreichbarkeit von Sanierungszielen für eine "empfindliche Nutzung",
- den Finanzbedarf für ähnliche Sanierungen abzuschätzen,
- Defizite und positive Aspekte bei den vorhandenen mikrobiologischen Sanierungsverfahren festzustellen,
- Kommunen praktische Hilfestellung bei der Planung, Ausschreibung und Überwachung mikrobiologischer Sanierungsverfahren zu geben,
- den Entwicklungsbedarf im Zusammenhang mit mikrobiologischen PAK-Sanierungen aufzuzeigen,

aus Sicht der Stadt Solingen

- für die Sanierung des ehemaligen Gaswerks Ohligs ein geeignetes Verfahren/Unternehmen zu finden.

Die Sanierungszielwerte (10 mg/kg TS für die Σ EPA-PAK (16 Einzelsubstanzen) und 1 mg/kg TS für Benzo(a)pyren) wurden so festgelegt, daß sensible Nutzungen, z.B. als Spielflächen, gefahrlos möglich sind. Alternativ sollte eine 70 %-Reduktion der Σ EPA-PAK-Konzentration als Sanierungserfolg gewertet werden.

Das Projekt wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, bestehend aus Vertretern von folgenden Behörden und Fachdienststellen des Landes NRW sowie der Kommune:

- Landesamt für Wasser und Abfall NRW (LWA),
- Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung NRW (LÖLF),
- Staatliches Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft, Düsseldorf (StAWA),
- Regierungspräsident Düsseldorf (RP),
- Stadt Solingen.

Sanierungsverlauf und Sanierungskontrolle wurden fortlaufend wissenschaftlich begleitet von

- Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, Chemische Mikrobiologie,
- H. Trautmann GmbH, Abteilung für Bodenökologie und Umweltbewertung, Essen.

Die Bearbeitung der sanierungsbegleitenden Analytik erfolgte durch

- Claytex Consulting GmbH, Bergheim.

Für einzelne Fragestellungen wurden die

- Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Geologie und Geochemie,
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH), Münster-Roxel,
- DMT (Deutsche Montan Technologie für Rohstoff, Energie und Umwelt, Institut für Chemische Umwelttechnologie), Essen

hinzugezogen.

0.2 Auswahl der Versuchsteilnehmer

Im Sommer 1989 wurden alle zur damaligen Zeit bekannten Anbieter mikrobiologischer Sanierungsverfahren angeschrieben, vom geplanten Forschungsvorhaben unterrichtet und aufgefordert, Unterlagen bezüglich ihres Leistungsspektrums einzusenden. 13 der angeschriebenen Unternehmen bekundeten darauf hin ihr Interesse an der Teilnahme der Feldversuche. Im November 1989 wurden diese Unternehmen zur Angebotsabgabe aufgefordert. Dazu erhielten

sie Bodenproben, um Versuche im Labormaßstab durchführen zu können. Die Laborversuche wurden allen Ausschreibungsteilnehmern pauschal mit 3.000 DM vergütet, ausgenommen den Unternehmen, die später den Zuschlag zur Teilnahme am Feldversuch erhielten. Nach 2 Monaten machten dann 8 Firmen ein Angebot (Tabelle 0.1).

Tabelle 0.1: Vorversuche der 8 Firmen mit Darstellung der vergleichbaren Untersuchungsparameter

Firmenname	AnaKat	Lobbe Xenex	UN	CB (ehem. ESTE)	PNW (ehem. KRC)	BGT	Terra	Klößner Oecotec
Bodenbeschreibung	dunkler humusreicher Boden, kein Geruch nach Erdölbestandteilen (Steinkohlenteer)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	es wurde kein Laborbericht über die Vorversuche zur Verfügung gestellt
pH-Wert	7,6	7,0	6,8	7,7	7,3	7,1	7,1	
Trockensubstanz in %	85,0	79,1	79,0	78,6	72,1	76,0	78,7	
KBE/g TS	$2,8 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^4$	k.A.	$6,65 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^6$	k.A.	
Versuchsdurchführung	<ul style="list-style-type: none"> • Schüttelkultur • Umlaufsäule • Blasensäule 	Schüttelschrank	Wärmeschrank (30°C)	Säulenversuche	Säulenversuche	<ul style="list-style-type: none"> • nährstoffbeschleunigtes Testsystem • natürliches Testsystem • inhibiertes Testsystem 	k.A.	
Analyseverfahren	GC	HPLC	GC-MS	GC-MS	k.A.	HPLC	GC-MS	
Anfangskontaminationen Σ EPA-PAK (mg/kg) TS	36,4	k.A.	57,0	101,1	159,9	106,2	k.A.	
Laboregebnisse								
Abbau Σ EPA-PAK in %	92,0	99,0	31,5	94,0	35,0	52,9	k.A.	
Abbau BaP in %	99,0	99,0	36,7	90,0	37,0	61,8		
Zeit (d)	56,0	28,0	28,0	42,0	41,0			

Die Art und die Angaben zu den Vorversuchen waren wenig aussagekräftig, um eine exakte Bewertung durchführen zu können. Meist fehlten nähere Angaben zur Analysenmethode, zum Teil wurde die Ausgangs-PAK-Belastung nicht angegeben. Daher erfolgte die Auswahl der Versuchsteilnehmer im Frühjahr 1990 mit der Maßgabe, möglichst unterschiedliche Verfahren in das Projekt einzubinden.

Weitere Kriterien bei der Auswahl der Versuchsteilnehmer waren

- die Erfolgsaussichten einer großmaßstäblichen Sanierung anhand der Ergebnisse der Laborversuche sowie einer fachtechnischen Einschätzung der Verfahrenstechnik,
- der Platzbedarf der Verfahren,
- die Kosten der Verfahren.

Nach Prüfung der vorliegenden Unterlagen und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Finanzmittel wurden 3 Mietverfahren ausgewählt. Ein dynamisches Reaktorverfahren wurde nicht angeboten. Die Stadt Solingen beteiligte sich zusätzlich mit einem eigenen Verfahren. Als 5. Miete wurde eine Kontrollmiete errichtet. Die Verfahren lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Caro Biotechnik GmbH (CB, ehemals ESTE)

ca. 0,8 m hohe nicht überdachte Miete (22 m x 11 m). Der Boden (ca. 200 m³) wurde unter Zugabe von ca. 2,5 Gew.-% Strukturmaterial (im wesentlichen Kiefernborke) eingebaut. Im Sanierungszeitraum erfolgte eine wöchentliche Lockerung des Bodens. Über die Sanierungszeit von Januar bis November 1991 erfolgte eine impulsweise Begasung mit Sauerstoff.
- Preussag Noell Wassertechnik GmbH (PNW, ehemals KRC)

ca. 1 m hohe mit einem Folientunnel überdachte Miete (20 m x 7 m). Die Miete (ca. 140 m³ Boden) wurde unter Zugabe von ca. 13 Gew.-% Stroh/Pilz-Substrat aufgebaut und mit 15 cm Rindenmulch überdeckt. Die Belüftung erfolgte über ein Saugzuggebläse mit Ableitung der Mietenluft über einen Aktivkohlefilter.
- Umweltschutz Nord GmbH (UN)

ca. 1,5 m hohe mit einer Zeltkonstruktion überdachte Miete (18 m x 7 m). Der Boden (ca. 200 m³) wurde unter Zuhilfenahme eines "Maulwurfs" unter gleichzeitiger Zugabe von 10 Gew.-% Strukturmaterial (hauptsächlich bestehend aus Rindenmulch), homogenisiert. Bei der Homogenisierung wurden ca. 7 % des Einsatzmaterials, wie Steine, Holz etc., als nicht verarbeitbar abgeschieden. Die Belüftung erfolgte durch Wenden des Bodens mit einem speziellen Wendegerät.
- Stadt Solingen (SO)

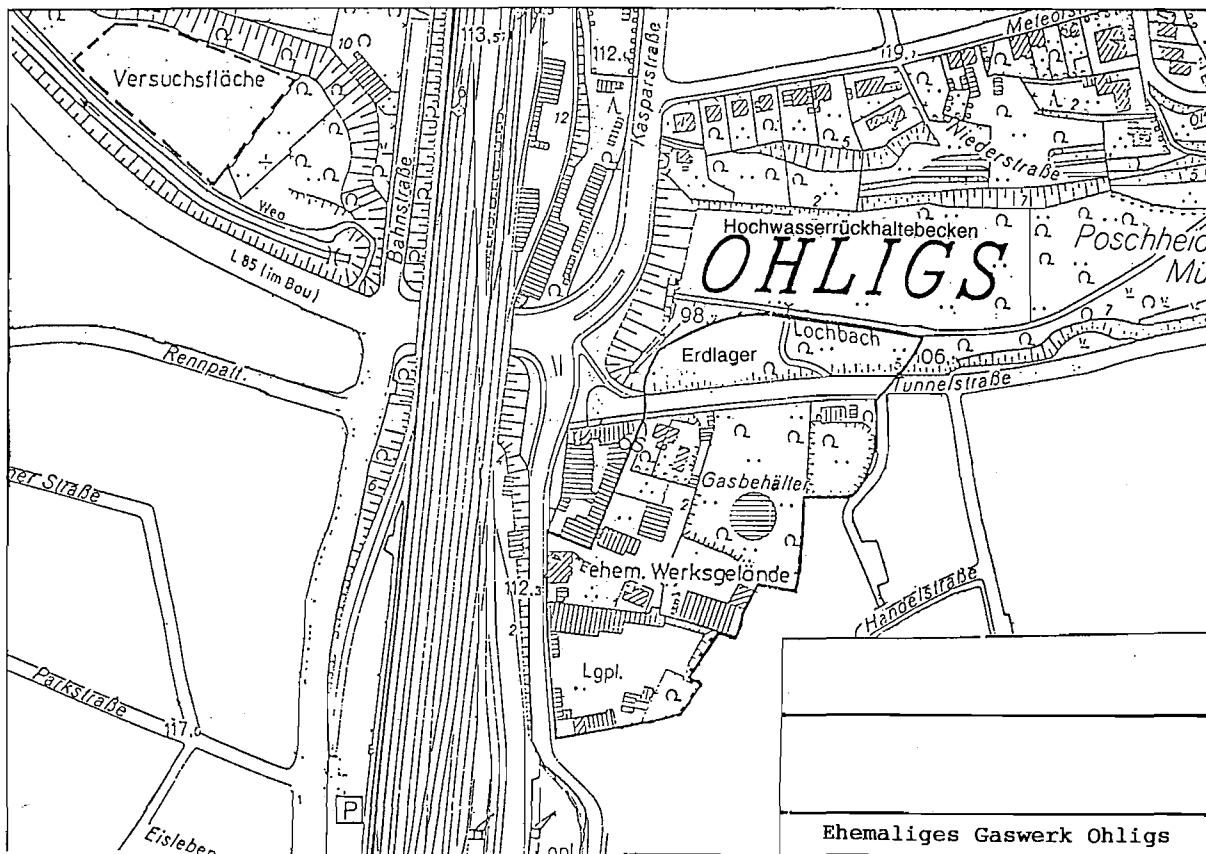
Ca. 0,6 m hohe, nicht überdachte Miete (15 m x 11 m). Aufbau des Bodens (ca. 100 m³) unter Zugabe von ca. 30 Vol.-% Kompost aus Grünschnitt und Biomüll aus der stadteigenen Kompostierungsanlage. Anschließend wurde die Miete mit tiefwurzelndem Klee eingesät. Die Miete wurde während der Sanierungszeitdauer von 17 Monaten einmal gewendet.
- Kontrollmiete (KO)

Es handelt sich um eine ca. 0,6 m hohe, nicht überdachte Miete (15 m x 11 m, ca. 100 m³ Boden). Es wurde kein Strukturmaterial zugesetzt. Ebenso fand keine Bearbeitung der Miete statt.

0.3 Bodenbeschaffenheit

Bei dem zu behandelnden Boden handelt es sich um anstehenden, schluffig-lehmigen Sand, der im Bereich der ehemaligen Kläranlage z.T. mit Bauschutt aufgefüllt ist. Dieser Bereich liegt im heutigen Hochwasserrückhaltebecken und gehörte zum ehemaligen Gaswerkgelände (Bild 0.1).

Bild 0.1: Übersicht ehemaliges Gaswerk Solingen-Ohligs



Die Auffüllungsschicht nimmt näherungsweise ein Volumen von 200 m³ ein und wurde, teilweise durch die Auskoffnung bedingt, mit dem Versuchsboden vermischt. Der Versuchsboden hatte folgende Korngrößenverteilung:

	S	gU	mU	FU	Uges	T	Bodenart	Corg %	pH (/)
%	37,3	27,4	13,9	7,5	48,8	13,9	ulS	3,0 – 6,0	6,8 – 7,7

Die Korngrößenverteilung kann als repräsentativ für viele andere Gaswerk- und Kokerei-standorte im Ruhrgebiet angesehen werden.

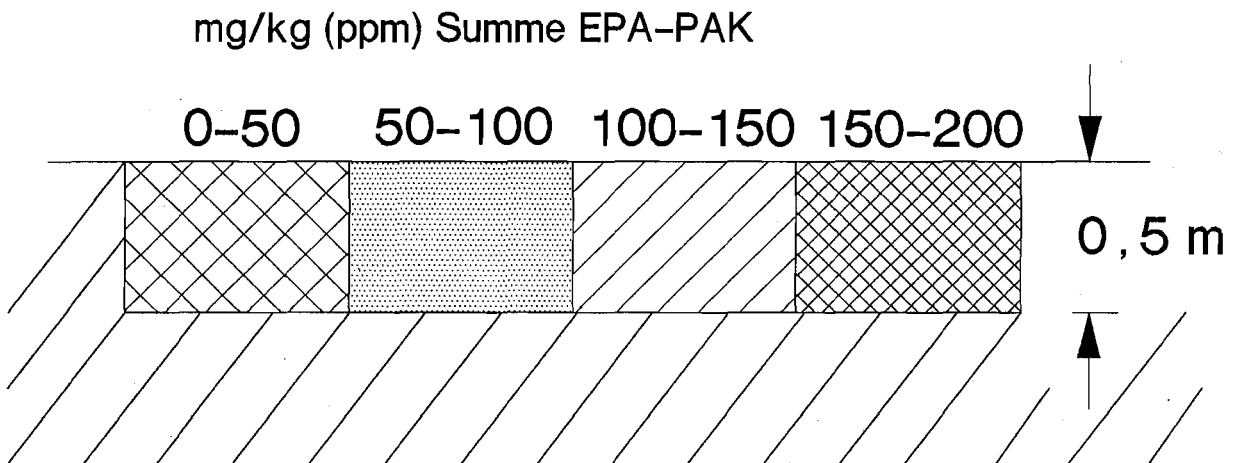
Die den Firmen überlassenen Bodenproben zur Durchführung der Vorversuche (notwendig für Angebotserstellung) wiesen zum Teil geringere Schluff- und Tonanteile auf.

Die Belastung des für eine mikrobiologische Sanierung vorgesehenen Materials im Außenbereich (Hochwasserrückhaltebecken) betrug ca. 190 mg/kg TS Σ EPA-PAK. Auf dem ehemaligen Werksgelände (Kernbereich) wurden Σ EPA-PAK-Höchstwerte bis zu 36.000 mg/kg TS festgestellt.

0.4 Vorbereitung des Versuchsbodens

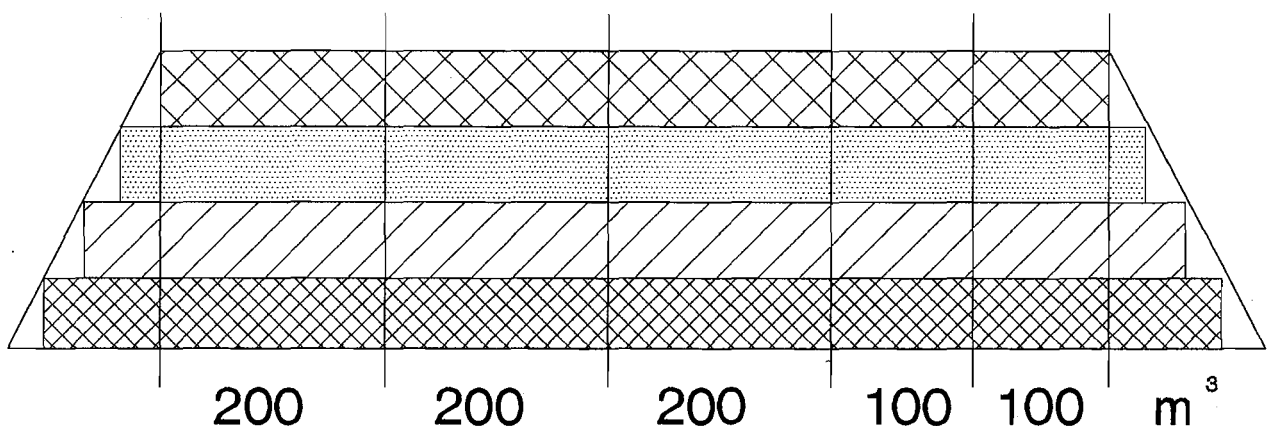
Im Hochwasserrückhaltebecken (ehemalige Kläranlage) mit einer Kontamination von Σ EPA-PAK < 200 mg/kg TS wurde im Oktober 1989 ein Teilbereich mit einer Belastung von 17 bis 189 mg/kg TS bis zu einer Tiefe von 0,5 m ausgekoffert und in einem Erdlager zwischengelagert. Der ausgekofferte Bereich befindet sich außerhalb des Geländes mit den ehemaligen Produktionsanlagen. Die Sanierungsuntersuchungen ergaben, daß er räumlich in vier verschiedene Kontaminationsbereiche aufgeteilt werden konnte (Bild 0.2).

Bild 0.2: Cirkawerte der Kontaminationsbereiche, idealisiert



Diese Bereiche wurden im Erdlager übereinandergeschichtet. Bei der Zuteilung der Bodenpartien für die Versuchsdurchführung wurde der Boden seitlich entnommen, so daß jedem Teilnehmer Boden aus allen Bereichen zur Verfügung gestellt werden konnte (Bild 0.3). Diese Vorgehensweise wurde unter der Maßgabe gewählt, möglichst einheitliche Versuchsbedingungen bzw. Ausgangsbelastungen zu gewährleisten. Die Bodenaufbereitung, d.h. Einmischung der Substrate, Auslese von Störstoffen, fand im Hochwasserrückhaltebecken statt. Anschließend wurde der für die Versuchsdurchführung aufbereitete Boden im Zeitraum Ende Juni/Anfang Juli 1990 im angefeuchteten und abgedeckten Zustand zur nahegelegenen Versuchsfläche transportiert und dort den Behandlungstechniken entsprechend aufgebaut.

Bild 0.3: Aufschüttung des Aushubs in Lagen nach Auskoffierung der einzelnen Kontaminationssegmente



0.5 Vorbereitung der Versuchsfläche

Alle Versuchspartellen wurden mit einer Untergrundabdichtung versehen. Als Abdichtungsmaterial wurde eine 2,5 mm HDPE-Folie verwendet, die den Anforderungen der "Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen des Landes NRW" entspricht. Zum Schutz der Dichtungsfolie vor mechanischer Zerstörung wurde vorher eine 10 cm starke Sandausgleichsschicht aufgebracht. Die nicht überdachten Mieten der Stadt Solingen, der Caro Biotechnik GmbH und der Kontrollmiete waren mit einem 2 %igen Gefälle hergestellt worden. Über dieses Gefälle wurden die Versuchspartellen in einem auf der Schmalseite der Miete angeordneten Sickerwassersammelgraben entwässert. Die Sickerwassersammelgräben hatten ein Fassungsvermögen von je ca. 60 m³.

0.6 Probenahme

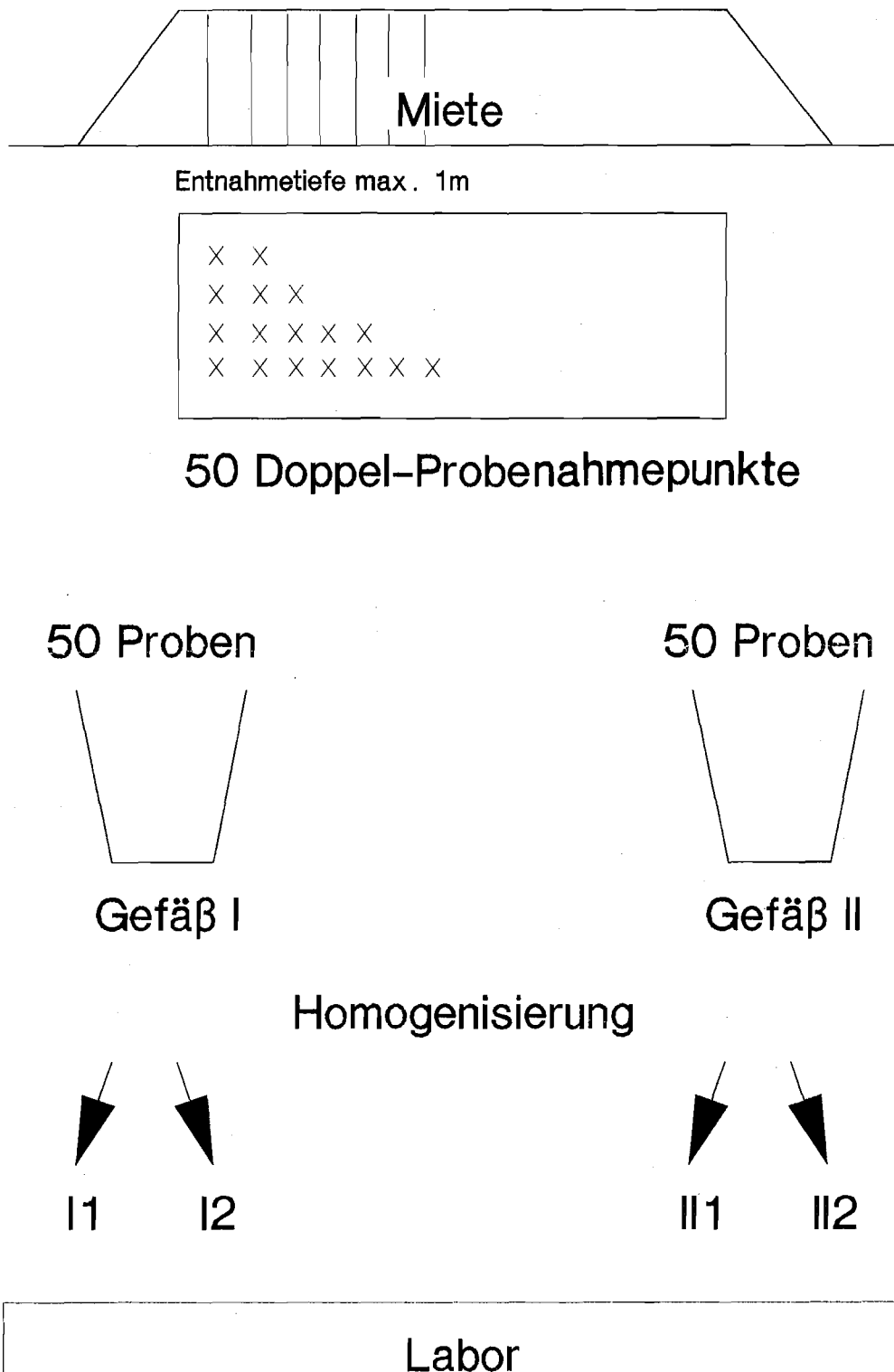
Bevor die einzelnen am Versuch beteiligten Firmen dem Boden ihr Substrat beimischten, wurden die Nullproben (P0) zur Ermittlung der Ausgangsbelastung gezogen. Die 1. Probenahme (P1) erfolgte dann mit Ausnahme der Kontrollmiete direkt nach Aufbau der Mieten. Im i.d.R. zweimonatigen Abstand wurde dann die weitere Beprobung durchgeführt. Insgesamt wurden im Sanierungszeitraum von Juli 1990 bis Ende November 1991 11 Beprobungen vorgenommen.

Bei der Probenahme wurden jeder Miete über die gesamte Fläche 100 Einzelproben entnommen. Der Probenehmer orientierte sich dabei an einem imaginären Raster mit 50 Doppelprobennahmepunkten. Jeweils 50 Proben wurden in einem Gefäß I und II mit Hilfe eines Rührwerkes zu einer Mischprobe homogenisiert. Dabei standen je Miete 2 Mischproben zur Verfügung, denen wiederum je 2 Proben für die chemische Analyse entnommen wurden. Somit wurden pro Probenahmetermin und je Miete 4 Proben chemisch analysiert. Die Proben wurden in einem 750 ml-Glas mit Schraubdeckel verschlossen und verschlüsselt an das Labor geliefert (Bild 0.4).

Nach Entnahme der Proben für die chemische Analytik wurde eine Mischprobe aus Gefäß I und Gefäß II erstellt und ebenfalls mit einem Rührgerät homogenisiert. Es wurden anschließend je Miete eine Probe für die bodenkundliche Untersuchung und Bestimmung der mikrobiellen Aktivität sowie eine Probe für die Keimzahlbestimmung gezogen.

Ab April 1991 wurden zusätzlich je Miete 3 Rückstellproben für die bodenchemische und -physikalische Untersuchung bei -25°C eingefroren.

Bild 0.4: Probenahme, Homogenisierung, Kodierung für das Labor



0.7 Untersuchungsprogramm

Die Proben wurden auf die 16 Einzel-PAK entsprechend der EPA-Liste quantitativ bestimmt. Untersuchungen auf andere Schadstoffe wie Cyanide, Halogenkohlenwasserstoffe, Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle zu Beginn der Versuche ergaben keine für die Versuchsdurchführung relevanten Belastungen des Bodens. Die Belastungen an BTX-Aromaten und leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen lagen unterhalb der Nachweisgrenze.

Es wurden bodenphysikalische (Korngrößenanalyse, Bodentemperatur, Bodenfeuchte), bodenchemische (pH-Wert, Nährstoffgehalte im Boden, Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes, Bestimmung des Stickstoffgehaltes und C/N-Verhältnisses) sowie bodenmikrobiologische Untersuchungen (Dehydrogenaseaktivität, Bodenatmung, substratinduzierte Atmung und koloniebildende Einheiten auf verschiedenen Nährböden) durchgeführt. Im Sickerwasser der drei offenen Mieten wurden die PAK-Gehalte nach TVO (6 Einzelsubstanzen) bestimmt.

Zur Klärung des unzureichenden PAK-Abnahmeverhaltens im Sanierungszeitraum von 17 Monaten wurden gegen Ende der Versuchsdauer von der DMT mit im Labor vorhandenen speziellen PAK-Abbauern im Sapromaten die Bioverfügbarkeit der PAK sowie die Toxizität der Bodeneluat mit Hilfe des Leuchtbakterientests untersucht.

0.8 Bindung und Mobilität von PAK in Böden

Die Bindung bzw. Sorption und die Mobilität der PAK werden von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Einzelsubstanzen und insbesondere von zahlreichen bodeneigenen Merkmalen bestimmt. Im allgemeinen nimmt die Adsorption der einzelnen PAK mit abnehmender Wasserlöslichkeit und abnehmender Polarität zu (Litz, 1990, Means et al., 1980). Die organische Substanz im Boden bestimmt dabei ganz wesentlich die Sorptionskapazität von PAK (Litz 1990, Scheffer & Schachtschabel, 1989).

Das Ausmaß der Sorption von PAK in Böden wird dabei nicht nur vom Gesamtgehalt an organischer Substanz bestimmt, sondern auch ganz maßgeblich von deren Qualität. Mit zunehmendem Alter der Belastung nimmt die Sorption unpolarer organischer Chemikalien im allgemeinen zu.

Bei der geringen Wasserlöslichkeit der PAK sowie der starken Adsorption an Böden, insbesondere in humusreichen, wird im allgemeinen auch eine geringe Mobilität der PAK vorausgesetzt. In Einzelfällen ist jedoch eine Verlagerung von PAK im Boden bis in das oberflächennahe Grundwasser bzw. in tiefere Bodenhorizonte beobachtet worden (z.B. Means et al., 1980; Bierl et al., 1984; Eiceman et al., 1986; Tebaay et al., 1991).

Die Löslichkeit und Mobilität der PAK im Boden kann durch Tenside und Öle sowie durch die Bindung an gelösten Fulvosäuren (Gauthier et al., 1986) sowie an andere wasserlösliche, organische Substanzen des Bodens (DOC) erhöht werden (Kögel-Knabner & Knabner, 1991; Magee et al., 1991). In Form von Gemischen, z.B. dem Anthracenöl, das auf Kokereistandorten weit verbreitet ist, kann die Löslichkeit von PAK stark erhöht sein.

In der Praxis ist u.a. auch der Aggregatzustand der Verunreinigung von erheblicher Bedeutung, d.h. konkret, ob die PAK in Phase, gebunden, z.B. als Teerklumpen immobil oder an Kohlepartikeln adsorbiert, vorliegen.

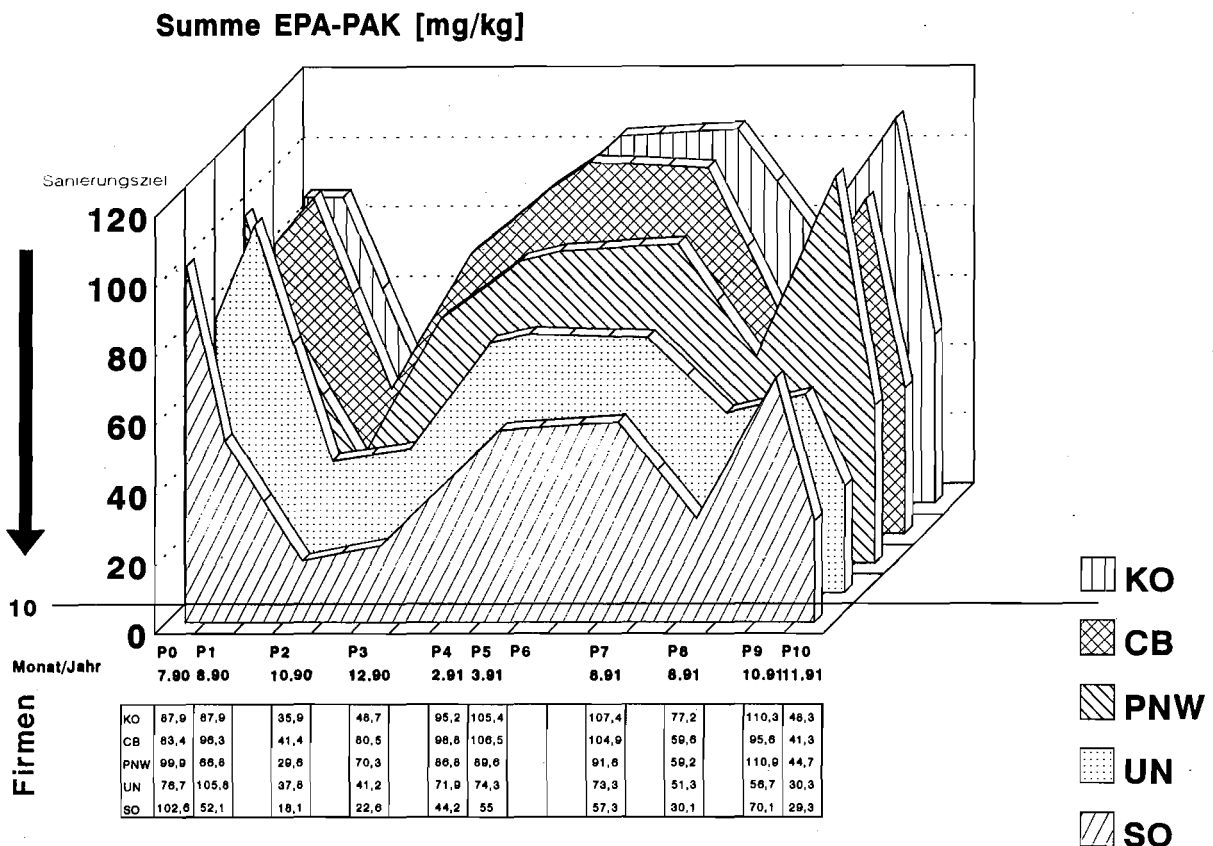
0.9 Ergebnisse

PAK-Gehalte

Die Mittelwerte der chemischen Analyseergebnisse (Σ EPA-PAK = 16 Einzelsubstanzen) der einzelnen Versuchsteilnehmer sind in Bild 0.5 dargestellt. Bild 0.6 zeigt im Überblick die Benzo(a)pyren-Konzentration der fünf Versuchsmieten über den Sanierungszeitraum von 17 Monaten mit Markierung des geforderten Sanierungsziels von 1 mg/kg TS B(a)P. Die B(a)P-Konzentrationen verlaufen annähernd parallel zu den Σ EPA-PAK-Konzentrationen im Verhältnis von im Mittel 1 : 8. Bei den PAK-Einzelsubstanzen unter den EPA-PAK's dominieren die vier- und fünfringigen PAK's deutlich, die 2 und 3ringigen machen insgesamt nur einen Anteil von ca. 20 % aus.

Die Analyseergebnisse sind insofern überraschend, als die PAK-Gehaltskurve in der Kontrollmiete nahezu parallel mit den entsprechenden Kurven für die zum Teil aufwendig biotechnologisch behandelten Mieten verläuft. Zunächst fällt auf, daß die Zugabe der Zuschlagsstoffe im Zuge der Aufbereitung des Materials bei zwei Mieten (SO, PNW) zu einer Konzentrationsminderung der Schadstoffe führt, wohingegen es bei Umweltschutz Nord und Caro Biotechnik zu einem Konzentrationsanstieg der PAK kommt. Deutlich zu erkennen ist, daß bereits schon 4 Monate nach Sanierungsbeginn bei allen Mieten eine sehr geringe PAK-

Bild 0.5: Ergebnisse der chemischen Analyse Σ EPA-PAK der fünf Versuchsmieten über die Sanierungsdauer von 17 Monaten. (Die Werte zwischen den Probenahmeterminen sowie der Wert P6 sind interpoliert.)

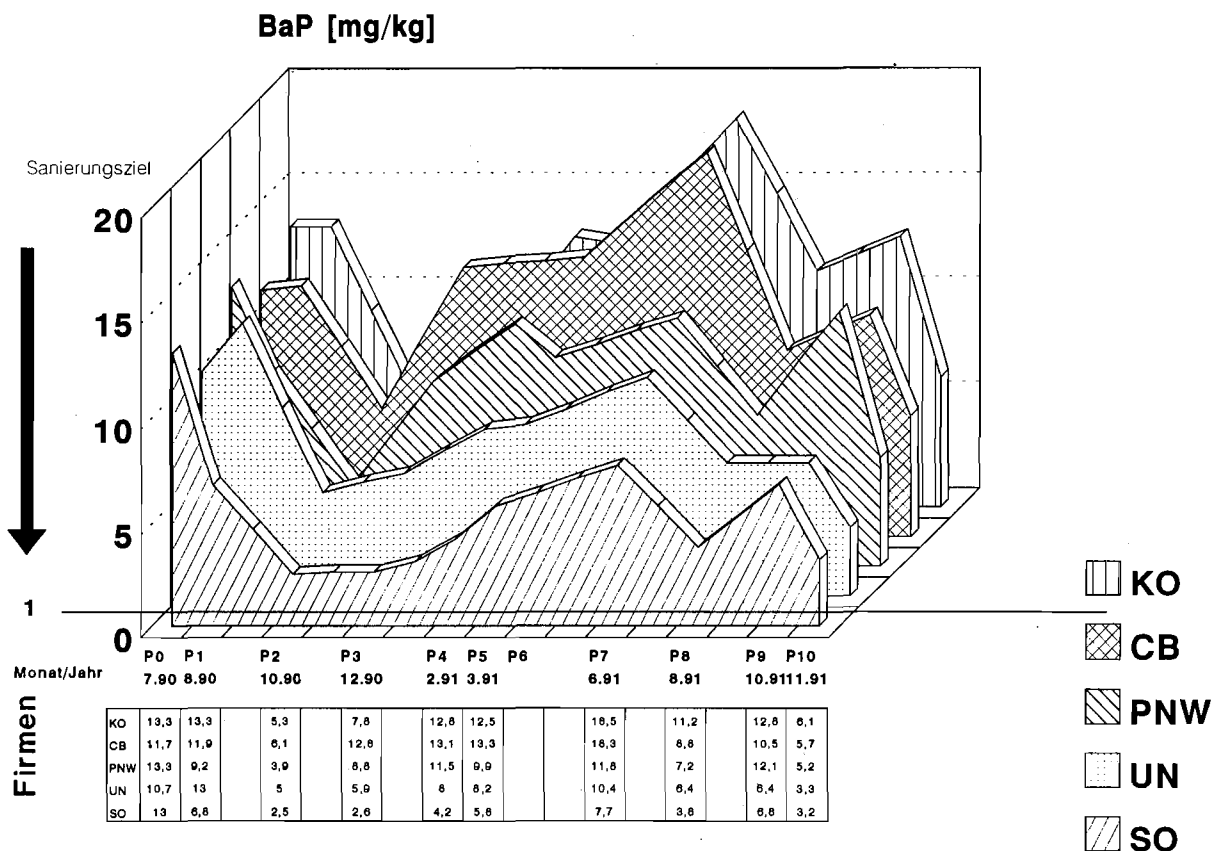


Konzentration gemessen wird. So werden bei UN beispielsweise bereits bei der zweiten Probe (P2) über 60 % weniger EPA-PAK gegenüber der 1. Probe (P1) analytisch nachgewiesen. Im allgemeinen sind über den Sanierungszeitraum von 17 Monaten zum Teil starke Schwankungen der PAK-Konzentrationen zu erkennen. Inhomogenitäten der Probe, Ungenauigkeiten bei der Probenvorbereitung im Labor und analytische Fehler sind nicht eindeutig als Ursache hierfür anzusehen, da diese Schwankungen bei allen Mieten synchron verlaufen.

Bild 0.6 zeigt im Überblick die Benzo(a)pyren-Konzentration der fünf Versuchsmieten über den Sanierungszeitraum von 17 Monaten mit Markierung des geforderten Sanierungsziels von 1 mg/kg TS B(a)P.

In diesem Zusammenhang treten Fragen nach dem Einfluß des Probennahmefehlers und des analytischen Fehlers auf. Inwieweit diese Schwankungen mit chemischen und/oder mikrobiologischen Prozessen (z.B. Ad-/Desorption) in den Mieten zu erklären sind, bleibt unklar. Ein möglicher Probennahmefehler wird jedoch nahezu ausgeschlossen, da über jede Mietenfläche 100 Einzelproben gezogen und diese dann in 2 Gefäßen homogenisiert wurden (s. Kapitel 0.6). Daher wurden die methodischen Aspekte untersucht. Beim chemischen Labor des Auftraggebers (Claytex GmbH) fand keine Homogenisierung bzw. Absiebung der Probe statt. Mit einem Hohlspatel wurde Bodenmaterial direkt aus dem Probenglas entnommen. Die Trocknung der Probe erfolgte dann über Zugabe von Natriumsulfat (Na₂SO₄). Nach der Trocknung

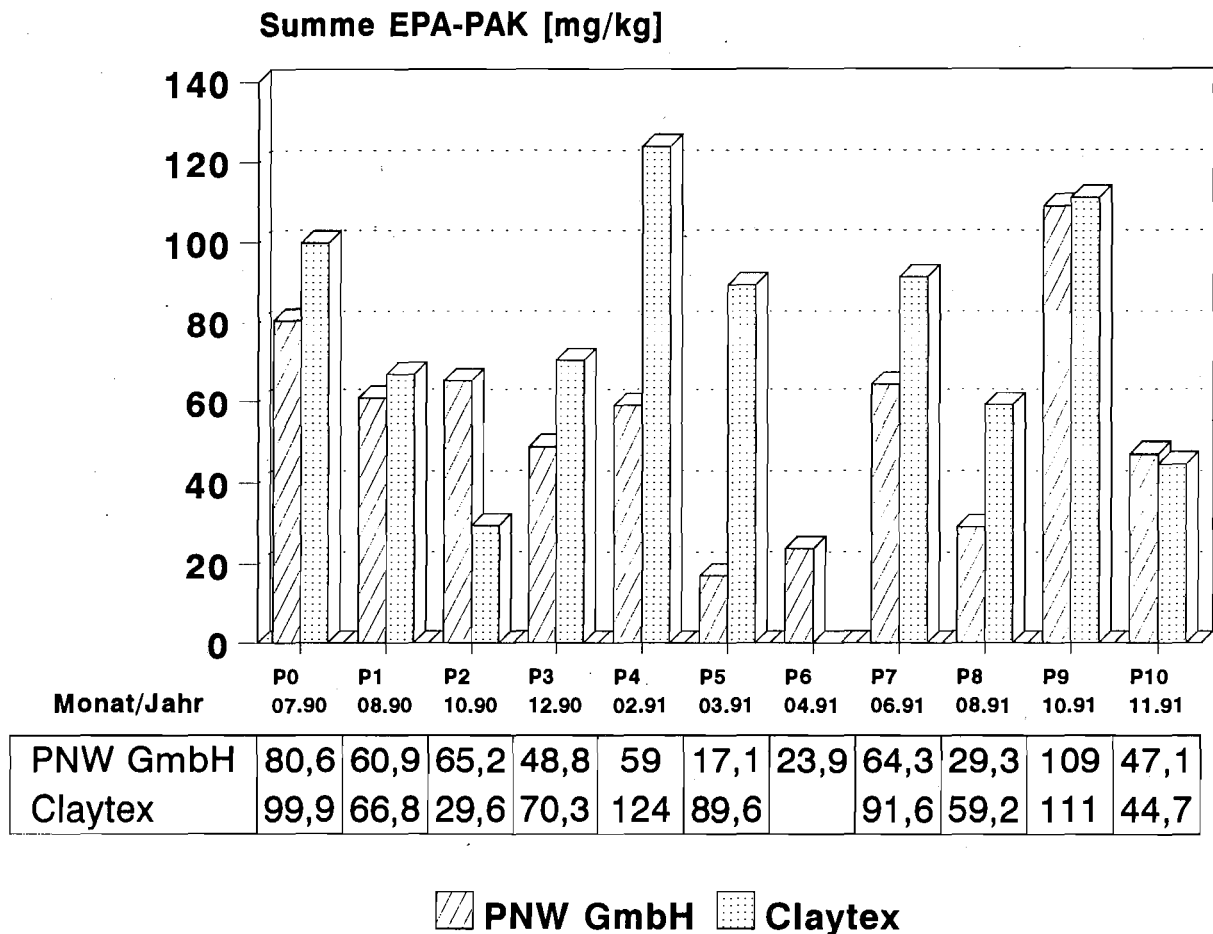
Bild 0.6: Benzo(a)pyren-Konzentration der fünf Versuchsmieten über den Sanierungszeitraum von 17 Monaten (Die Werte zwischen den Probenahmeterminen sowie der Wert P6 sind interpoliert.)



wurde die Bodenprobe (20 bis 50 g) mit 100 ml Dichlormethan (CH₂Cl₂) extrahiert und dann 15 min im Ultraschallbad behandelt. Die Reinigung des Extraktes geschah durch Filtration des Feststoffanteils über einen Membranfilter. Nach dem Reinigen der Analysenlösung im Rotationsverdampfer ohne Vakuum wurde der Gehalt der PAK-Einzelsubstanzen mit einem Gaschromatographen (GC) und Flammenionisationsdetektor (FID) bestimmt.

Am Beispiel von Preussag Noell Wassertechnik GmbH zeigt Bild 0.7 die mit 2 verschiedenen analytischen Methoden gemessenen PAK-Konzentrationen über den gesamten Sanierungszeitraum. Die gepunkteten Balken zeigen die von Claytex gemessenen Σ EPA-PAK-Konzentrationen. Die gestrichelten Balken geben die vom Versuchsteilnehmer ermittelten Σ EPA-PAK-Konzentration wieder. Preussag Noell Wassertechnik beauftragte ein externes Labor, das als Extraktionsmittel Cyclohexan verwandte und das Probenmaterial 8 Stunden im Heißsoxhlet behandelte. Die PAK-Konzentration wurde mit einem HPLC (High pressure liquid chromatograph) ermittelt. Beide Methoden zeigen einen nicht linearen Verlauf der PAK-Konzentration über den gesamten Sanierungszeitraum. Vergleichbare Unterschiede wurden auch bei den anderen Versuchsteilnehmern, die durch ihrerseits beauftragte Labors die PAK-Konzentrationen in ihren Mieten messen ließen, festgestellt. Zu erwähnen ist, daß über den gesamten Sanierungszeitraum von 17 Monaten das Labor von Preussag Noell Wassertechnik die gleichen Proben wie Claytex erhielt.

Bild 0.7: Vergleich der Ergebnisse zweier Analysenmethoden



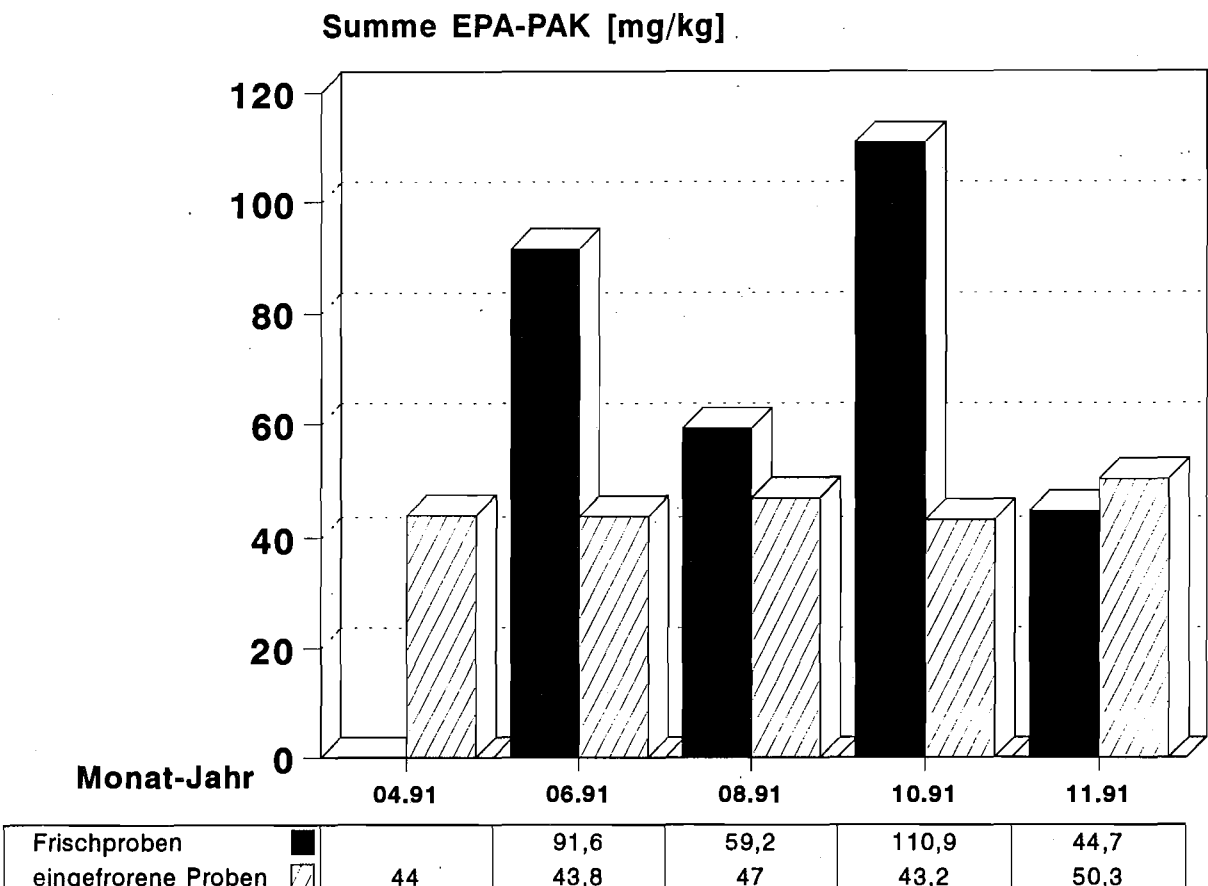
Um den Einfluß des analytischen Fehlers auf die Ergebnisse zu ermitteln, wurden ab April 1991 jeweils 3 Rückstellproben je Miete direkt nach der Beprobung bei -25°C eingefroren und bis Dezember 1991 aufbewahrt. Diese Proben wurden dann Ende Dezember von Claytex zur gleichen Zeit analysiert. Das Ergebnis ist exemplarisch für PNW in Bild 0.8 dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist, daß für die eingefrorenen Proben eine annähernd gleiche Konzentration über die dargestellte Zeitspanne von Juni 1991 bis November 1991 zu erkennen ist. Im Kontrast dazu zeigen die Konzentrationen an den Frischproben das bekannte Bild der Schwankungen. Dieses Ergebnis zeigt, daß bei der PAK-Analytik an Feststoffproben noch erhebliche methodische Unsicherheiten bestehen. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch beim Vergleich mit den anderen Versuchsteilnehmern und der Kontrollmiete.

PAK-Abbauprodukte

Die Zuordnung der vorgefundenen polycyclischen aromatischen Verbindungen bzw. deren Abbauprodukte in den untersuchten Extrakten erfolgte durch Vergleich der Retentionszeiten sowie des Fragmentierungsmusters mit beim Labor (GfA mbH) vorhandenen Referenzsubstanzen und in der Literatur zu findenden Massenspektren solcher Substanzen. Die vorgefundenen Verbindungen konnten grob in vier Gruppen (PAK-Ketone, PAK-Chinone, stickstoffhaltige PAK, Methyl-derivate der PAK-Ketone) unterteilt werden. Eine abschließende Bewertung der Metabolitenuntersuchungen ist wegen methodischer Unsicherheiten nicht möglich.

Bild 0.8: Vergleich der Analyseergebnisse "frischer" und "eingefrorener" Proben einer Miete (PNW)



Bioverfügbarkeit

Eine aus 50 Einzelproben bestehende Bodenmischprobe aus der Kontrollmiete wurde mit einer bakteriellen Mischkultur, die nachweislich PAK abbauen kann, in einem Sapromaten 27 Tage lang bei DMT behandelt. Dieser Versuchsansatz erbrachte zwei wesentliche Ergebnisse:

1. Trotz Zufuhr der nachweislich PAK-abbauenden Mischkultur (Firmenangabe) und der Einstellung optimaler Bedingungen ist nach 27 Behandlungstagen die Σ EPA-PAK-Konzentration unverändert gegenüber den Ausgangsgehalten geblieben.
2. Die Sauerstoffzehrung im Boden deutet auf geringe Stoffumsetzungen hin. Nach Zufuhr von Glucose und Nährstoffen ist eine erhebliche Steigerung der Atmungsaktivitäten zu verzeichnen. Eine Hemmung durch die Schadstoffe wurde nicht festgestellt.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß im untersuchten Bodenmaterial die PAK in einer für den mikrobiellen Abbau nicht verfügbaren Form vorliegen.

Zur Klärung der mangelnden Bioverfügbarkeit wurde der Versuchsboden einer Sink-/Schwimmscheidung unterzogen. Lichtmikroskopische Untersuchungen an der Leichtgutfraktion zeigen, daß diese im wesentlichen aus Kohle-, Koks- und Holzpartikeln besteht. Chemische Analysen zeigen ferner, daß in dieser Fraktion die Σ EPA-PAK-Konzentration im Vergleich zur Gesamtprobe um den Faktor 10 (!) erhöht vorliegt. Aus diesen Erkenntnissen läßt sich schlußfolgern, daß die PAK in starkem Maße an die hydrophobe Matrix des Bodens adsorbiert sind. Die Ergebnisse des Leuchtbakterienhemmtests bestätigen die geringe Bioverfügbarkeit der PAK. Dieser Umstand scheint maßgebend zu sein für den mangelnden PAK-Abbau in den Versuchsmieten.

Bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften

Es wurde eine Bewertung der Nährstoffuntersuchungen auf der Grundlage der Gehaltsklasseneinteilung landwirtschaftlich genutzter Böden nach VDLUFA angewandt, um eine größenordnungsmäßige Nährstoffversorgung angeben zu können. Die Nährstoffversorgung der Mieten ist danach als ausreichend bis gut zu bezeichnen. Ammonium und Nitrat unterliegen im Versuchszeitraum erwartungsgemäß einer stärkeren zeitlichen Dynamik, demgegenüber verhalten sich die Gehalte an Phosphor, Kalium und Magnesium zwischen der ersten und letzten Beprobung verhältnismäßig konstant. Dieser Tatbestand wird durch die gemessenen Nährstoffgehalte im Eluat unterstrichen. Die abschließende Beprobung im November 1991 zeigt für alle Mieten einen deutlichen Rückgang der pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte, was am ehesten mit einer K-Fixierung in den Zwischenschichten von Tonmineralen erklärt werden kann.

Die pflanzenverfügbaren Magnesium-Gehalte bewegen sich bei allen Mieten und sämtlichen Beprobungen auf einem sehr ähnlichen Niveau zwischen knapp unter 10 mg/100 g TS und 15 mg/100 g TS. Für keine der Mieten kann eine größere Zufuhr von Magnesium durch organische und/oder anorganische Dünger auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse nachvollzogen werden.

Die Phosphor-Versorgung wird als ausreichend bis gut bezeichnet. Sie bewegte sich zwischen P_2O_5 -Gehalten von knapp unter 15 mg/100 g TS bis 30 mg/100 g TS.

Zu Beginn der Versuche im Juli 1990 liegen die N_{\min} -Vorräte in den Substraten aller Mieten auf einem ausreichenden Niveau. Am Ende des Winters 1990/91 sind die N_{\min} -Gehalte sämtlicher Mieten deutlich geringer. Am Ende der Vegetationsperiode 1991 war bei allen Mieten wiederum ein Anstieg der N_{\min} -Gehalte zu verzeichnen.

Die gemessenen pH-Werte lagen bei allen Beprobungsterminen und bei allen Mieten im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Weder die geringfügigen Unterschiede zwischen einzelnen Mieten, noch die ebensowenig ausgeprägten Unterschiede an den einzelnen Beprobungsterminen ließen eindeutige Tendenzen erkennen.

Bodenmikrobiologie

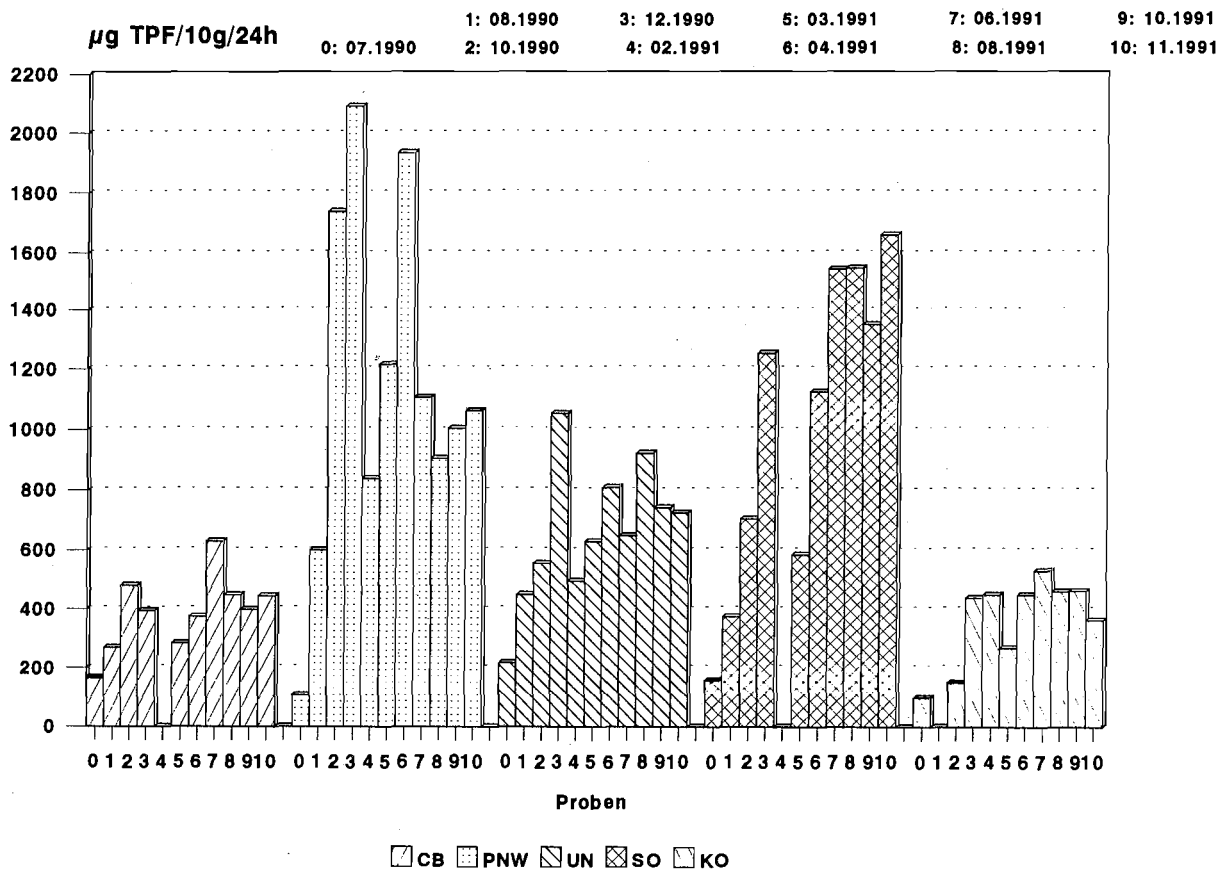
Die Untersuchungen der bodenmikrobiologischen Parameter anhand genereller Summenparameter der bodenbiologischen Aktivität sowie der Populationsdichten (Bodenatmung, substratinduzierte Atmung, Dehydrogenaseaktivität, koloniebildende Einheiten) verfolgten das Ziel, die durch das Mietenmanagement (Bodenbearbeitung, Zufuhr von Nährstoffen und organischen Zuschlagstoffen) zu erwartenden Steigerungen der mikrobiellen Aktivität zu verfolgen und zu belegen, und nach Möglichkeit das Ausmaß der mikrobiellen Aktivität der einzelnen Mieten in Beziehung zu dem gemessenen PAK-Abbau zu setzen.

Die gemessenen bodenmikrobiologischen Parameter zeigen deutlich, daß die Behandlung der Böden durch die Versuchsteilnehmer zu einer Erhöhung der mikrobiologischen Gesamtaktivität geführt hat. Das Ausmaß der Steigerung der mikrobiologischen Gesamtaktivität fällt jedoch unterschiedlich stark aus. Die Dehydrogenase läßt dabei eine erheblich stärkere Differenzierung der einzelnen Versuchsmieten erkennen als Bodenatmung und substratinduzierte Atmung (Bild 0.9). Die zeitliche Differenzierung der Dehydrogenase-Aktivität (DHA) ist jahreszeitlich bedingt. Sie spiegelt mit einer gewissen Zeitverzögerung den Temperaturverlauf wider. Die unterschiedlich hohe DHA der einzelnen Mieten dürfte durch den Eintrag unterschiedlicher organischer Stoffe in unterschiedlichen Mengen durch die einzelnen Versuchsteilnehmer bei der Errichtung der Mieten sowie durch das unterschiedliche Mietenmanagement verursacht worden sein.

Bei allen Mieten, so auch der Kontrollmiete, zeigt sich auf den Medien Nutrient Broth (NB) sowie Plate Count (PC) ein in etwa konstanter Titer, der sich im Bereich 10^7 und 10^8 Zellen pro g getrockneter Boden bewegt. Es fällt auf, daß nach der Aufstellung der Mieten ein merklicher Anstieg der Populationsdichte (Faktor 10) auftritt. Beim Malzextrakt-Agar (ME), auf dem vorrangig Pilze erfaßt werden, liegen die Werte erwartungsgemäß immer um den Faktor 100 tiefer als die auf den beiden Komplettmedien.

Der Zusatz von Mikroorganismen durch die Firmen wird an den nachfolgenden Beprobungsterminen anhand der NB- oder PC-Werte nicht sichtbar, mit Ausnahme der Firma PNW auch nicht anhand der ME-Werte.

Bild 0.9: Dehydrogenase-Aktivität im Vergleich der fünf Mieten



Der Zusatz von mikrobiellen Populationen wird einzig an der Miete der Firma PNW deutlich, wo ein kurzzeitiger Anstieg um 2 Zehnerpotenzen auf dem Malzextrakt-Agar neben dem in allen Mieten sichtbaren Anstieg um den Faktor 10 auftritt. Es kann kein Unterschied in NB-, PC- und ME-Titer als Folge der jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen festgestellt werden. Dies hätte sich besonders stark bei den nicht überdachten Mieten CB, SO und KO bemerkbar machen müssen. Der Nachweis von Naphthalin-Abbauern zeigt, daß Organismen im Boden vorhanden sind, die Aromaten als Kohlenstoff- und Energiequelle verwerten können.

Die bodenmikrobiologischen Untersuchungen zeigen, daß in den Mieten generell ein für mikrobielle Abbauprozesse ausreichend günstiges Milieu vorhanden ist. Demnach sind die allgemeinen Nährstoff- und Wachstumsbedingungen sowie toxischen Verhältnisse als Ursachen für den fehlenden PAK-Abbau auszuschließen.

Eine Beziehung zwischen den ermittelten bodenmikrobiologischen Parametern und der Abnahme der PAK war nicht zu erkennen. Auch die Bestimmung der koloniebildenden Einheiten ließ keinen Zusammenhang zum mikrobiellen Abbau von PAK erkennen.

Nährstoffgehalte im Eluat

Die Untersuchung der Nährstoffgehalte im Eluat sollte zeigen, inwieweit eine Nährstofffreisetzung aus den zugeführten Zuschlagsstoffen sowie den zum Teil in recht hohen Gaben verabreichten mineralischen Düngern stattfindet, und ob davon bei einem eventuellen Wiedereinbau der Versuchsböden eine Gefährdung für das Grundwasser, insbesondere durch die Freisetzung von wasserlöslichen mineralischen Stickstoffverbindungen, ausgehen könnte.

Von den gemessenen Nährstoffkonzentrationen geht keine Gefährdung für das Grundwasser aus.

0.10 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Sanierungsziel von 10 mg Σ EPA-PAK (16 Einzelsubstanzen)/kg TS bzw. 1 mg BaP/kg TS wurde von keinem der Versuchsteilnehmer erreicht. Die Schwankungen der PAK-Konzentrationen lassen keinen Trend erkennen, der eindeutig auf einen erfolgversprechenden PAK-Abbau schließen läßt. Es ist zur Ermittlung der Abbauraten daher nicht zulässig, die Analysergebnisse aus der ersten und letzten Probenahme zu vergleichen. Auch die eigenständige Weiterführung der Versuche durch die Firmen um ein weiteres Jahr bis November 1992 (insgesamt drei Vegetationsperioden) zeigte keinen Erfolg. Die wesentlichen Erkenntnisse aus den Feldversuchen Solingen-Ohligs können daher wie folgt zusammengefaßt werden:

- Der Boden, der für den Feldversuch verwendet wurde, war für eine mikrobiologische Sanierung mit dem Ziel, PAK abzubauen, nicht geeignet, da die PAK's mikrobiell nicht verfügbar waren.
- Die biologische Grundlagenforschung mit Reinkulturen zeigt, daß PAK bis vier Ringe prinzipiell biologisch abbaubar sind. Jedoch sind solche Laborergebnisse nicht ohne weiteres auf jede Standortsituation übertragbar.
- Die Voruntersuchungen der Firmen haben sich als nicht ausreichend herausgestellt.
- Vor dem Einsatz mikrobiologischer Verfahren sind Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit und repräsentative Voruntersuchungen (Laborversuche, Pilotversuche im halbtechnischen Maßstab unter Berücksichtigung der Bedingungen vor Ort (Scale up)) zur Beurteilung der Eignung mikrobiologischer Verfahren durchzuführen.
- Es ist erforderlich, eine standardisierte Methode für die PAK-Analytik in Böden zu entwickeln.

Für den Versuchsboden aus dem Feldversuch wird eine geeignete Entsorgungsmöglichkeit gesucht.

0.11 Empfehlungen

Für die Bodensanierung sind vertiefende geochemische, mikrobiologische, bodenkundliche, hydrogeologische und verfahrenstechnische Fachkenntnisse notwendig. Die sehr komplexe Herausforderung der Altlastensanierung ist daher nur noch von qualifizierten Teams und nicht mehr von einzelnen Fachdisziplinen zu bewältigen. Darüber hinaus hängt der Erfolg einer Sanierung, insbesondere mikrobiologische, in starkem Maße vom Bodentyp, der Schadstoffzusammensetzung und deren Einbindung in die Bodenmatrix ab.

Beispielsweise sind die Erfolgsaussichten einer mikrobiologischen Sanierung bei Mineralölkohlenwasserstoffen vergleichsweise aussichtsreicher, auch wenn es hierbei Unterschiede im Abbauverhalten zwischen leichten und schweren Mineralölen gibt.

Die mikrobiologische Sanierungstechnik kann i.d.R. als ökologisch verträglichste Methode im Vergleich zu chemisch/physikalischen und thermischen Sanierungsmethoden betrachtet werden.

Aufgrund der Erfahrungen im Feldversuch zur mikrobiologischen Sanierung von PAK-kontaminierten Böden in Solingen lassen sich folgende Empfehlungen an die Kommunen und andere Sanierungspflichtige, die eine mikrobielle Sanierung erwägen, geben:

- a) Die PAK gelten als schwer abbaubare Schadstoffklasse und gehören somit zu den problematischen Verbindungen für biologische Sanierungsverfahren. Eine mikrobiologische PAK-Sanierung auf Gaswerk- oder Kokereistandorten kann z.Z. noch nicht als Stand der Technik gelten. Die Erfolgsaussichten biologischer Sanierungsverfahren steigen grundsätzlich für schwerer abbaubare Verbindungen mit Wahl der Verfahren in folgender Reihenfolge
 - in situ (kommt bei PAK kaum in Frage, nur in sehr durchlässigen Böden mit hoher Schadstoff-Verfügbarkeit sinnvoll)
 - on site (Miete)
 - statischer Bioreaktor (Feststoff)
 - dynamischer Bioreaktor (Suspension)

Die Reaktorverfahren sind großtechnisch bislang noch nicht ausgereift. Versuche im Technikumsmaßstab sind z.T. jedoch erfolgversprechend, auch wenn die Abbaugrade für PAK's mit höherer Ringzahl (≥ 4) noch nicht zufriedenstellend sind.

Vor dem Hintergrund der von den beteiligten Firmen vor Beginn der Feldversuche dargestellten Einschätzung, das Bodenmaterial sei mit den jeweiligen firmeneigenen Verfahren problemlos und innerhalb recht kurzer Zeit mikrobiologisch zu reinigen, lassen sich folgende Forderungen aufstellen:

- b) Der Sanierungspflichtige sollte zur Kontrolle normierte Vorversuche von einem unabhängigen Labor durchführen lassen.
- c) Soweit nicht aus der Gefährdungsabschätzung bekannt, sind genaue Erhebungen der Standortbedingungen erforderlich (Korngrößenverteilung, Corg, pH-Werte etc.).

- d) Die Bioverfügbarkeit am Standort ist unter optimalen Verhältnissen zu untersuchen.
- e) Wenn danach positive Erfolgsaussichten bestehen, müssen die anbietenden Firmen umfangreiche Voruntersuchungen durchführen (z.B. empfohlenes Mindestprüfschema, Bild 0.10).
- f) Abbau-Studien im Labormaßstab (z.B. Perkolationsverfahren), halbtechnischen Maßstab und ggf. Feldversuch sollten vor einer großtechnischen Sanierung vorgeschrieben werden.
- g) Die Vorversuche benötigen eine Mindestdauer von 2 bis 3 Monaten. Hochrechnungen von wenigen Tagen auf Langzeitverhalten sind nicht aussagekräftig.
- h) Eine Garantiepflcht der Sanierungsfirmlen für das Erreichen der Sanierungszielwerte ist erforderlich.
- i) Detaillierte Ausschreibung.
- j) Intensive Sanierungsüberwachung mit einer den Sanierungserfolg nachweisbaren detaillierten Kontrollanalytik.
- k) Während und insbesondere nach Beendigung der Sanierung sollten mit dem sanierten Material Toxizitätstests durchgeführt werden, hierzu existieren derzeit allerdings nur Testverfahren für Bodeneluate, deren Aussagekraft zudem umstritten sind.
- l) Aufgrund des längeren Zeitbedarfs von mikrobiologischen Sanierungsverfahren gegenüber anderen Techniken (chemisch-physikalisch, thermisch) ist diese Verfahrenstechnik für Sanierungsfälle mit kurzfristiger Standortnutzung ungeeignet.

Dieser Feldversuch hat gezeigt, daß es dringend erforderlich ist, eine Standard-PAK-Analytik für Feststoffproben zu entwickeln. Ferner muß den bodenkundlichen Aspekten wesentlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden als bisher. Eine breitere sichere Anwendung der mikrobiologischen Verfahren zur Behandlung PAK-haltiger Böden/Materialien erfordert insbesondere noch tiefergehende wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich Humifizierung/Biofixierung von PAK's in Böden im Zusammenhang mit dem Ad- und Desorptionsverhalten.

Auch wenn in Laboren der mikrobiologische Abbau von Vierring-Aromaten einwandfrei nachgewiesen wurde, und Fünfring- und Mehringaromate derzeit nicht nachweislich mikrobiologisch zu mineralisieren sind, ist eine mikrobiologische Behandlung von PAK-belastetem Bodenmaterial nicht generell auszuschließen. Dies kann insbesondere dann gelten, wenn nur der Wirkungspfad Grundwasser betroffen ist und die höherringigen PAK's in immobilierter Form vorliegen. Denn unterschiedliche Nutzungen der behandelten Fläche bzw. des behandelten Bodens, d.h. unterschiedlich betroffene Wirkungspfade und Schutzgüter (z.B. orale Aufnahme, Pflanzenaufnahme, Grundwasser) erfordern eine differenzierte Betrachtung bei der Festlegung der Sanierungszielwerte, insbesondere auch für PAK-Einzelkomponenten.

Toxizitätstest können zusätzliche Erkenntnisse über mögliche Gefährdungen liefern. Die verfügbaren Untersuchungsmethoden, z.B. der Leuchtbakterientest, sind auf Bodeneluate ausgerichtet und decken nur ein begrenztes Wirkungsspektrum ab. Für die Wirkungen von Schadstoffen im Boden sind diese Testmethoden noch weiterzuentwickeln.

Bild 0.10: Empfohlenes Mindestprüfschema zur Beurteilung der Erfolgsaussichten einer mikrobiologischen Sanierung, verändert und ergänzt nach DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz, Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung, 2. Bericht des interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie Boden"

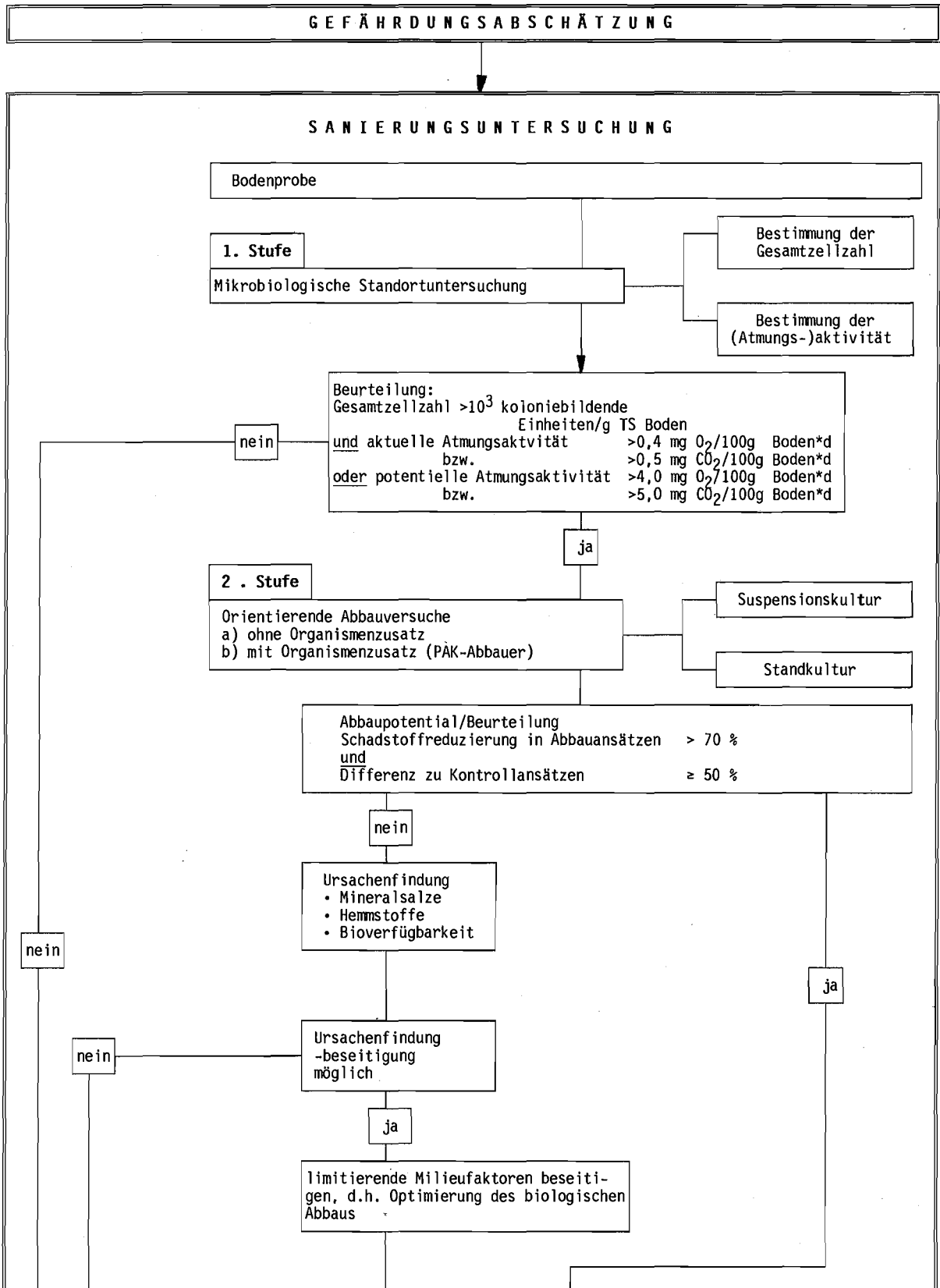
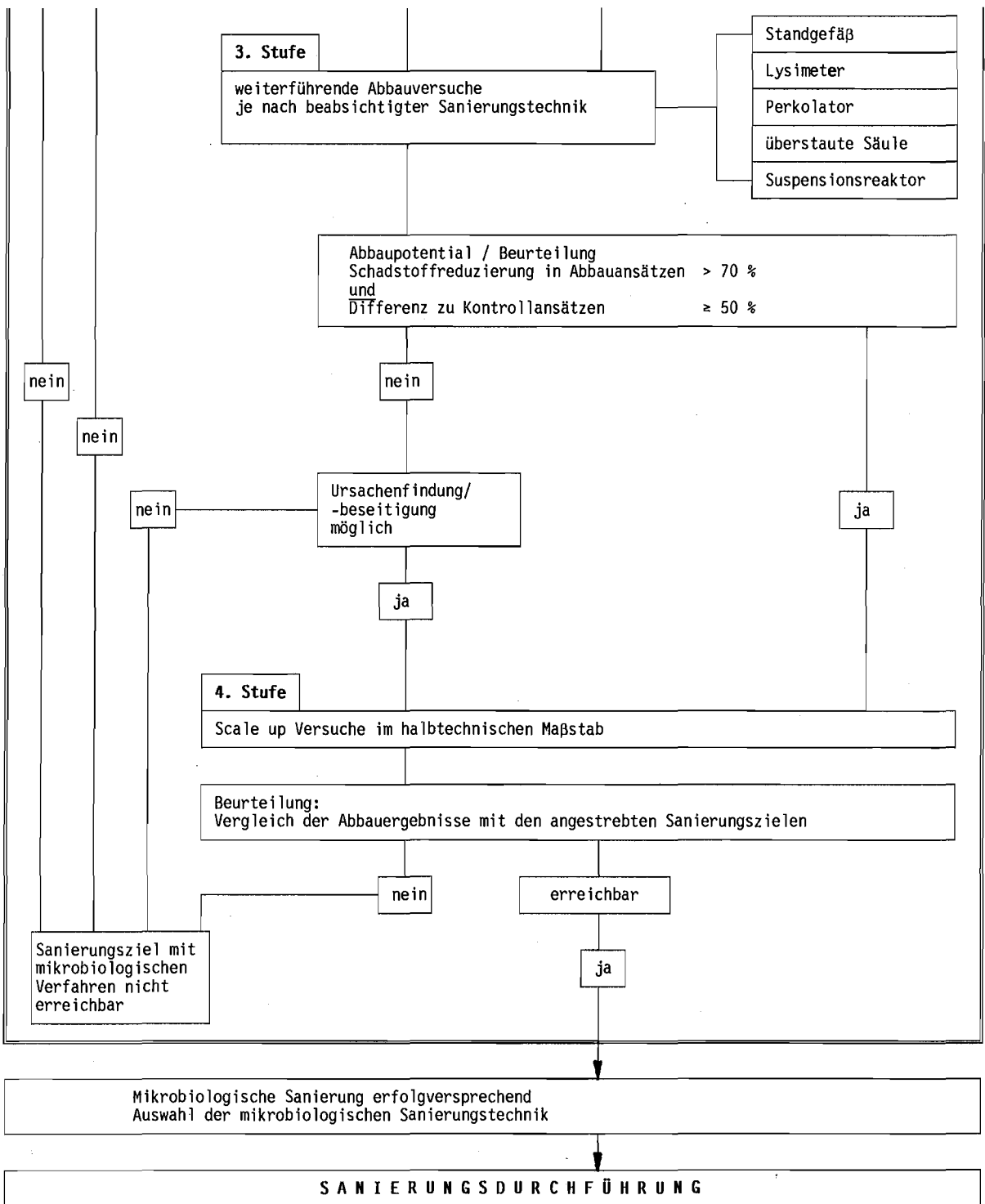


Bild 0.10: Fortsetzung



Zur Klärung der Frage, ob mikrobiologische Sanierungsmethoden für PAK-belastete Böden u.a. erfolgversprechend sind, wurde anhand der Erkenntnisse des Sanierungsprojektes Solingen-Ohligs in Anlehnung an das Fließschema für praxisorientierte Voruntersuchungen (DECHEMA-Arbeitskreis, Umweltbiotechnologie und den Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung, DECHEMA-Fachgespräche, Umweltschutz) ein Mindestprüfschema zusammengestellt (Bild 0.10).

Literaturverzeichnis

(zum Kapitel "0.", Auszug aus dem Gesamtverzeichnis)

- BIERL, R., KAA, W. & THOMAS, W. 1984. Spatial and temporal concentration gradients of PAH (Fluoranthene, Benzo(a)pyrene), BHC and 2,4 D in samples of soil, soil water and groundwater in an agricultural research area. *Fres. Z. Anal. Chem.* 319,172- 179.
- DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz 1991. Einsatzmöglichkeiten und Grenzen mikrobiologischer Verfahren zur Bodensanierung. 1. Bericht des interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie-Boden". Hrsg.: Klein, Jürgen. Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, Frankfurt am Main.
- DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz 1992. Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung; 2. Bericht des interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie - Boden"; Ad-hoc-Arbeitsgruppe "Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung". Hrsg.: Klein, Jürgen. Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, Frankfurt am Main.
- EICEMAN, G. A., DAVANI, B. & INGRAM, J. 1986. Depth profiles for hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons in soil beneath waste disposal pits from natural gas production. *Environ. Sci. Technol.* 20,508-512.
- GAULTHER, T.D., SHAME, E.C., GUERIN, W.F., SEITZ, W.R. & GRANT, C.L. 1986. Fluorescence quenching method for determining equilibrium constants for polycyclic aromatic hydrocarbons binding to dissolved humic materials. *Environ. Sci. Technol.* 20,1162-1166.
- KÖGEL-KNABNER, I. & KNABNER, P. 1991. Einfluß von gelöstem Kohlenstoff auf die Verlagerung organischer Umweltchemikalien. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 63,119-122.
- MAGEE, B. R., LION, L. W. & LEMLEY, A. T. 1991. Transport of Dissolved Organic Macromolecules and Their Effect on the Transport of Phenanthrene in Porous Media. *Environ. Sci. Technol.* 25,323-331.
- LITZ, N. 1990. Organische Verbindungen, in: BLUME, H.-P. (Hg.): *Handbuch des Bodenschutzes (Bodenökologie und -belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen)*, Landsberg: Ecomed Verlagsgesellschaft, 340-367.
- MEANS, J. L., WOOD, S., HASSETT, J. J. & BANWART, W. L. 1980. Sorption of polynuclear aromatic hydrocarbons by sediments and soils. *Environ. Sci. Technol.* 14,1524-1528.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. 1989. *Lehrbuch der Bodenkunde (13. Auflage)*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- TEBAAY, R. H., WELP, G. & BRÜMMER, G. W. 1991. Gehalte an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in Böden unterschiedlicher Belastung. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 63,157-160.

1. Einleitung

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung für ein ehemaliges Gaswerksgelände in Solingen-Ohligs wurde im Jahr 1988 im Auftrag der Stadt Solingen eine Recherche durchgeführt über Sanierungsverfahren, die für die Behandlung mit polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) belastetem Boden geeignet sein könnten. Danach waren verfügbar

- thermische Anlagen in den Niederlanden und
- mikrobiologische Verfahren von etwa 40 Anbietern.

Für die Sanierung bzw. Reinigung der gering belasteten Böden (vorwiegend Oberböden) aus dem Randbereich des Gaswerks Ohligs schienen aus damaliger Sicht aus ökonomischen und ökologischen Gründen insbesondere die mikrobiologischen Verfahren geeignet zu sein. Es war anzunehmen, daß diese on-site-Verfahren preisgünstiger sein würden als eine thermische Behandlung. Die Anbieter stellten aufgrund positiver Laborvorversuche die Sanierung als einfach und unproblematisch dar, obwohl aussagefähige Sanierungsergebnisse für die Sanierung PAK-verunreinigter Böden damals nicht vorlagen.

Um zu klären, welche der angebotenen Technologien für die mikrobiologische Sanierung des Bodens vom Gaswerksgelände Ohligs am besten geeignet sind, hielt die Stadt Solingen einen praxisorientierten Vergleich der angebotenen Verfahren für erforderlich. Weil ein derartiger "Wettbewerb" der Sanierungsfirmen zum einen die finanziellen Möglichkeiten der Stadt überstiegen hätte und zum anderen die Ergebnisse auch für zahlreiche andere Gaswerkstandorte von Interesse sind, hatte die Stadt Solingen angeregt, das Land NRW möge vergleichende Feldversuche mit verschiedenen Verfahrensvarianten am Beispiel des ehemaligen Gaswerks in Solingen-Ohligs durchführen und wissenschaftlich begleiten. Damit sollte geklärt werden, ob und in welchem Maße mikrobiologische Sanierungsverfahren geeignet sind, den geringer mit PAK belasteten Boden zu reinigen.

Die Randbedingungen des Standortes in Solingen-Ohligs sind mit weiteren Gaswerkstandorten in NRW vergleichbar. Die Belastung am Gaswerkstandort in Solingen-Ohligs ist im Außenbereich (Hochwasserrückhaltebecken) bis zu ca. 200 mg/kg TS Σ EPA-PAK gegeben und auf dem ehemaligen Produktionsgelände (Kernbereich) bis zu 36.000 mg/kg TS Σ EPA-PAK (GERTEC, 1989). Beim Boden handelt es sich um schluffig, lehmigen Sand.

Auftraggeber für die Feldversuche war das Land NRW, vertreten durch den Regierungspräsidenten Düsseldorf. Das Ingenieurbüro GERTEC erhielt den Auftrag, die Projektleitung zu übernehmen. Die Stadt Solingen stellte das Versuchsgelände.

Zielsetzung des Projekts war

- aus Sicht des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW),
 - betroffenen Kommunen in fachlicher Hinsicht bei der Auswahl von mikrobiologischen Sanierungsverfahren Hilfestellung leisten zu können,
 - Prüfung der Erreichbarkeit von Sanierungszielen für eine "empfindliche Nutzung",
 - den Finanzbedarf für ähnliche Sanierungen abzuschätzen,
 - Defizite und positive Aspekte bei den vorhandenen mikrobiologischen Sanierungsverfahren festzustellen,

- Kommunen praktische Hilfestellung bei der Planung, Ausschreibung und Überwachung mikrobiologischer Sanierungsverfahren zu geben,
 - den Entwicklungsbedarf im Zusammenhang mit mikrobiologischen PAK-Sanierungen aufzuzeigen.
- aus Sicht der Stadt Solingen,
- für die Sanierung des ehemaligen Gaswerkgeländes Ohligs ein geeignetes Verfahren/ Unternehmen zu finden.

Das Land NRW beabsichtigte mit dem Feldversuch, technisch wirksame und kostengünstige Verfahren für die mikrobiologische Sanierung von gering PAK-belasteten Boden zu ermitteln. Für diesen Feldversuch wurde der Boden aus dem Hochwasserrückhaltebecken mit einer Ausgangsbelastung bis zu 200 mg/kg TS Σ EPA-PAK verwandt.

Als Sanierungsziele wurden 10 mg/kg TS Σ EPA-PAK (16 Einzelsubstanzen) und 1 mg/kg TS Benzo[a]pyren (BaP) festgelegt, um auch eine sensible Nutzung, z.B. als Spielfläche, gefahrlos zu ermöglichen. Alternativ sollte eine 70 % Reduktion der Σ EPA-PAK-Konzentration als Sanierungserfolg gewertet werden.

Die Feldversuchszeitdauer wurde auf 2 Vegetationsperioden angesetzt (06/1990 bis 11/1991).

Ziel des Landes war es in diesem Fall nicht, Grundlagenforschung im Zusammenhang mit dem PAK-Abbau zu betreiben. Außerdem ging man 1989 aufgrund positiver Vorversuchsergebnisse davon aus, daß ein PAK-Abbau durch die anbietenden Firmen möglich ist.

Das Projekt wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, der Vertreter von folgenden Behörden und Fachdienststellen des Landes NRW sowie der Kommune angehörten.

- Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung NRW (LÖLF)
- Landesamt für Wasser und Abfall NRW (LWA)
- Regierungspräsident Düsseldorf (RP)
- zeitweise: Staatliches Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft, Düsseldorf (StAWA)
- Stadt Solingen

Sanierungsverlauf und Sanierungskontrolle wurden fortlaufend wissenschaftlich begleitet von

- Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, Chemische Mikrobiologie,
- H. Trautmann GmbH, Abteilung für Bodenökologie und Umweltbewertung, Essen.

Die Bearbeitung der sanierungsbegleitenden Analytik erfolgte durch

- Claytex Consulting GmbH, Bergheim.

Für einzelne Fragestellungen wurden die

- Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Geologie und Geochemie,
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH), Münster-Roxel,
- DMT (Deutsche Montan Technologie für Rohstoff, Energie und Umwelt, Institut für Chemische Umwelttechnologie), Essen

hinzugezogen.

2. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

2.1 PAK als Umweltchemikalien

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) werden dann gebildet, wenn organisches Material, welches Kohlenstoff und Wasserstoff enthält, pyrolytischen Prozessen und unvollständigen Verbrennungen ausgesetzt wird. Wenn das Startmaterial auch Heteroaromate wie Stickstoff, Sauerstoff oder Schwefel enthält, werden zusätzlich Heteroatome gebildet. Die Vielzahl der bei pyrolytischen Prozessen gebildeten Verbindungen wird am Bei-Produkt der Verkokung, dem Teeröl, deutlich. Neben einer Vielzahl von verschiedenen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen und Heteroaromaten kommt es zur Bildung von phenolischen Verbindungen. Den Anteil der Verbindungen an bei der Vergasung von Steinkohle entstandenem Teeröl zeigt beispielhaft die Tabelle 1.

Tabelle 1: Beispiel für vorherrschende polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe eines Teeröls (Mueller et al., 1989)

Verbindung	Prozentanteil (Gew.)
Naphthalin	13
2-Methylnaphthalin	13
Phenanthren	13
Anthracen	13
1-Methylnaphthalin	8
Biphenyl	8
Fluoren	8
2,3-Dimethylnaphthalin	4
2,6-Dimethylnaphthalin	4
Acenaphthen	4
Fluoranthren	4
Chrysen	2
Pyren	2
Anthrachinon	1
2-Methylanthracen	1
2,3-Benzo[b]fluoren	1
Benzo[a]pyren	1
Gesamt = 17	

In Solingen-Ohligs stellt sich jedoch ein anderes Bild als im Beispiel dargestellt dar, da die höher kondensierten PAK im Boden relativ angereichert vorliegen.

Daß neben den genannten Quellen auch andere anthropogene Einflüsse an der ubiquitären Verbreitung der PAK in der Umwelt beteiligt sind, zeigt Tabelle 2. Aber auch natürliche Quel-

len haben ihren Anteil am Eintrag der genannten Stoffe in die Umwelt. Heute lassen sich die PAK in jeder Umweltmatrix, Luft, Wasser, Boden nachweisen. In besonders hoher Konzentration kommen die PAK als Verunreinigung in Böden von Standorten ehemaliger Kokereien, Gaswerke, Teerdestillationen oder Imprägnierwerke vor.

Aufgrund ihres Gefährdungspotentials (die Verbindungskategorie enthält karzinogene Vertreter) hat die amerikanische Umweltbehörde (Environmental Protection Agency, EPA) die PAK in die Liste der "Priority Pollutants" mit aufgenommen und einige mehrringige Aromaten als Leitsubstanzen benannt. Die 16 Einzel-PAK der EPA-Liste sind in Bild 1 zusammengestellt.

Tabelle 2: Geschätzte PAK-Emissionen der Hauptquellen für die Bundesrepublik Deutschland in kg/a (verändert nach Hofmann-Kamensky, 1992)

	Groß- feuerung ¹⁾	Kokereien ²⁾	Abfall- verbr. ³⁾	Metall- erzeug. ⁴⁾	Haus- brand ⁵⁾	Kraft- fahrzeug ⁶⁾	Flug- zeuge ⁷⁾	Gesamt (kg/a)
Naphthalin	-	-	-	-	280.000	10.350	-	290.350,0
Acenaphthylen	-	-	-	-	-	-	-	-
Acenaphthen	-	-	-	-	-	3.735	-	3.735,0
Fluoren	156,5	-	-	-	37.800	18.900	-	56.856,5
Phenanthren	469,5	833	-	-	99.000	4.850	-	105.152,5
Anthracen	-	354	-	-	25.200	12.600	-	38.154,0
Fluoranthren	252,5	2.669	-	-	34.800	9.225	-	46.946,5
Pyren	82,5	2.295	-	-	27.000	9.720	-	39.097,5
Benzo(a)anthracen	15,5	1.377	-	-	12.000	1.935	-	15.327,5
Chrysen	43,5	1.462	-	-	26.400	1.800	-	29.705,5
Benzo(b)fluoranthren	10,0	315	-	-	150	1.080	-	1.555,0
Benzo(k)fluoranthren	4,5	315	-	-	150	1.080	-	1.549,5
Benzo(a)pyren	15,0	1.054	20	500	3.000	2.980	2.000	9.569,0
Dibenzo(ah)anthracen	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo(ghi)perylene	-	-	-	-	-	3.960	-	3.960,0
Indeno(1,2,3-cd)pyren	-	442	-	-	-	450	-	892,0

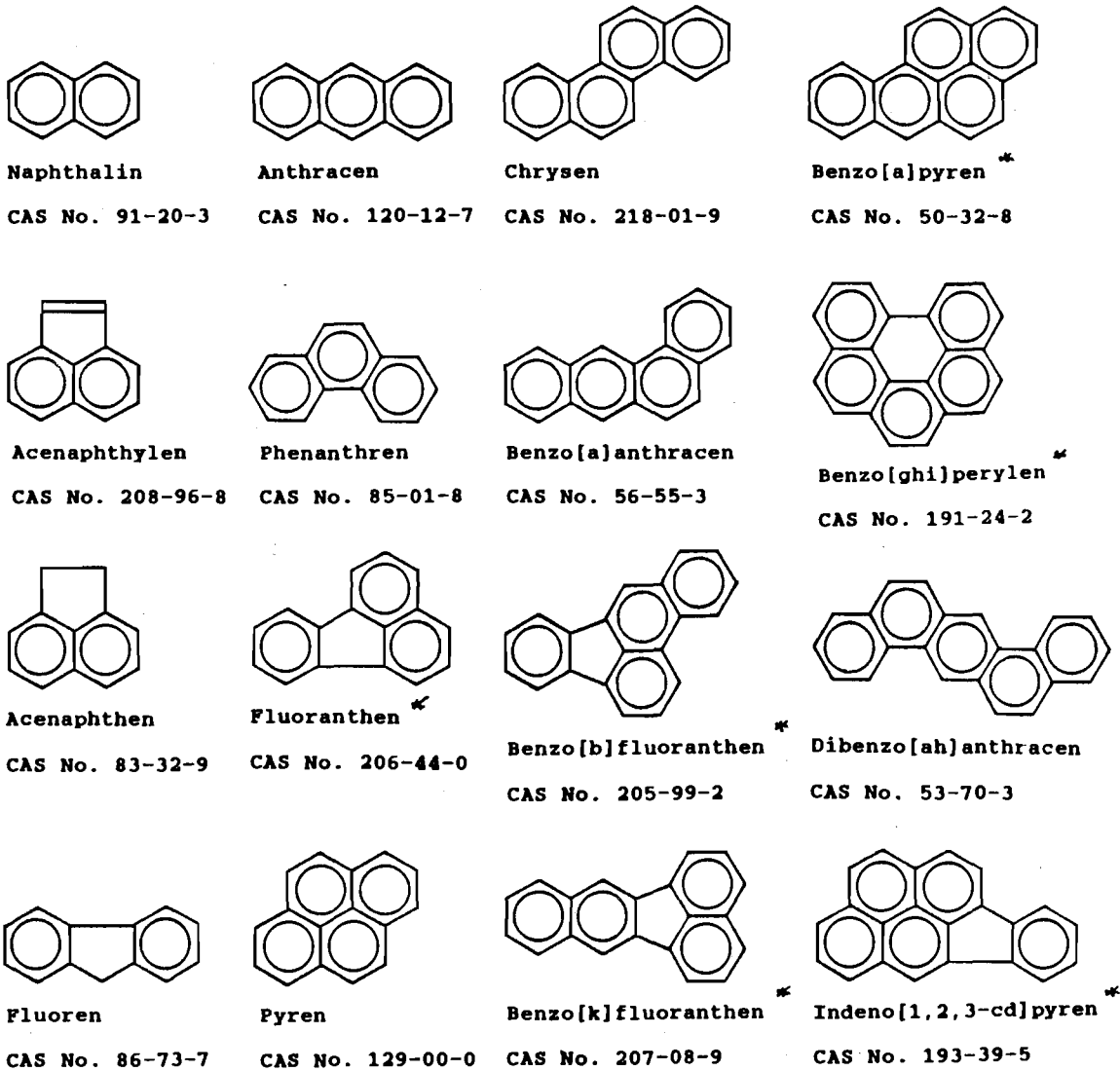
1) 50 Mio t/a Steinkohle, Emissionswerte nach Masclet et al., 1987
2) 17 Mio t/a Kokerzeugung, Emissionswerte nach Björseth et al., 1978
3) 9,3 Mio t/a Abfall, 2 mg/t BAP
4) 70 Mio t/a Roheisen und Stahl, 17 Mio t/a Steinkohlenkoks
5) 6 Mio t/a Kohleprodukte und Brennholz, Emissionsfaktoren nach Truésdale u. Cleland, 1982
6) 30 Mio Kfz, 15.000 km/a, 10 l/km Emissionsfaktoren nach Westerholm et al., 1988
7) 500.000 Jet-Starts pro Jahr, 4.000 mg BAP pro Start
-, keine Literaturangabe

2.2 Verteilung und Verbleib von PAK in der Umwelt

Die Verteilung und der Verbleib von organischen Chemikalien in verschiedenen Umweltkompartimenten ist von Transport - wie auch Ab- und Umbauprozessen abhängig (schematisch dargestellt in Bild 2). Für organische Chemikalien lassen sich sechs bekannte Prozesse aufzählen:

1. Absorption, Exsudation (Ausscheidung) und Retention an Pflanzen- und Pflanzenrückständen,
2. Abfluß im gelösten oder sorbierten Zustand (Oberflächenwasserabfluß)
3. Sorption und Desorption an organischem Material und mineralischen Oberflächen
4. Dampfphasen-Diffusion
5. Transport mit dem Sickerwasser (in Phase, partikelgebunden, gelöst)
6. Transport mit dem Grundwasser (in Phase, partikelgebunden, gelöst)

Bild 1: Die 16 Einzel-PAK nach EPA sowie die 6 PAK nach der Trinkwasserverordnung (TVO)*



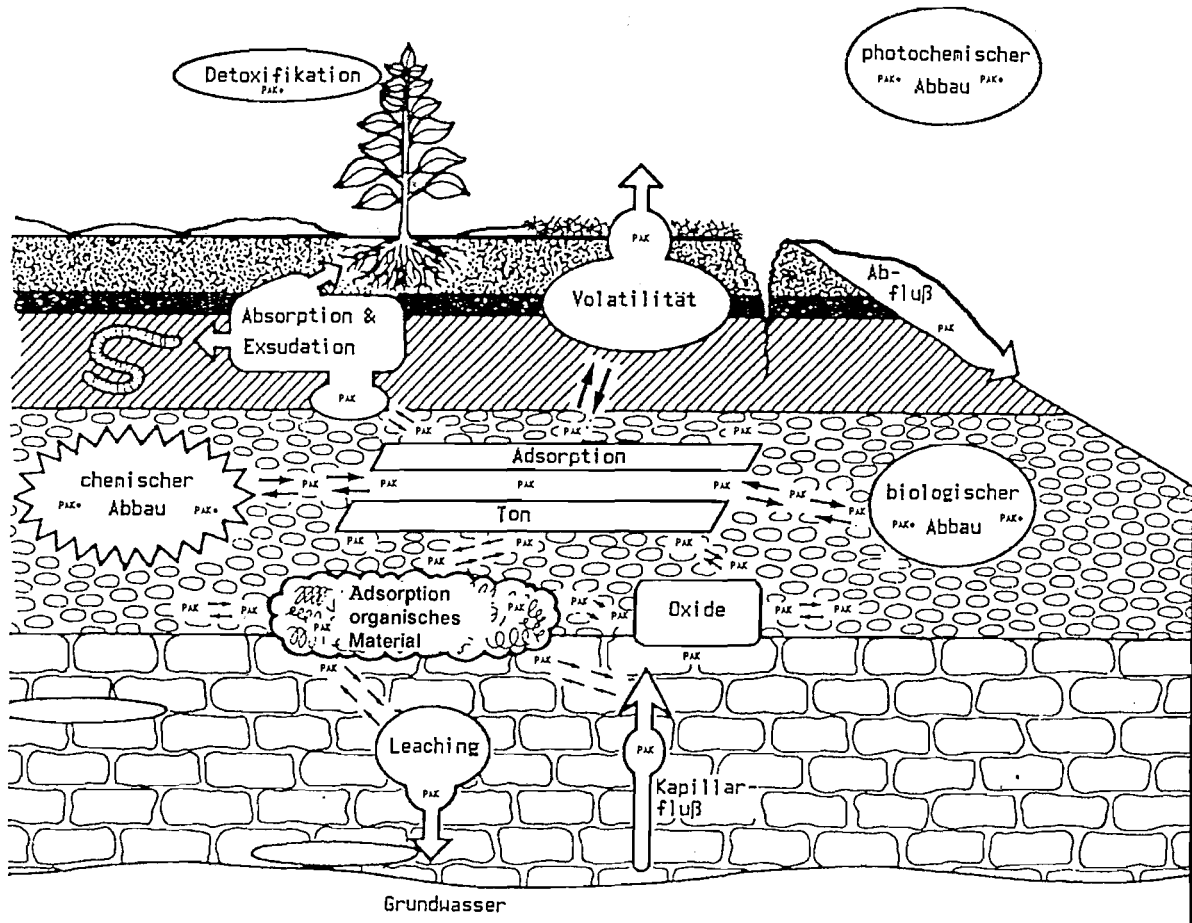
Organische Stoffe können durch drei bekannte Prozesse im oberflächennahen Umweltbereich abgebaut werden:

1. Biologischer Abbau, welcher zu organischen Metaboliten oder als komplette Mineralisation zu anorganischen Bestandteilen führen kann
2. Chemischer Abbau
3. Photochemischer Abbau

Die relative Bedeutung von jedem der beschriebenen Transport- und Transformationsprozesse hängt von drei Faktoren ab:

1. den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Stoffe
2. den Eigenschaften des Bodens und der Bodenlösung, mit dem die Stoffe in Kontakt kommen
3. den vorherrschenden klimatischen Bedingungen

Bild 2: Schematische Darstellung der Prozesse, die für die Verteilung und den Verbleib von PAK in der Umwelt verantwortlich sind (verändert nach Weber & Miller, 1989). Abbauprozesse sind charakterisiert, indem die PAK-Moleküle markiert (PAK*), während bei Transferprozessen die PAK-Moleküle ohne Markierung dargestellt sind.



Die physiko-chemischen Eigenschaften der Stoffe, die über die Verteilung sowie deren Verbleib im Boden entscheiden, sind im wesentlichen die folgenden:

1. Hydrophilie (Löslichkeit im Wasser)
2. Ionisierbarkeit
3. Langlebigkeit (Zugänglichkeit zu Abbaureaktionen)
4. Volatilität (Dampfdruck, Henry's Konstante)
5. Lipophilie (Fettlöslichkeit), charakterisiert durch den Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten
6. Viskosität

Das Verhalten der Stoffe im Boden wird durch die biologischen und die nachfolgenden physiko-chemischen Eigenschaften des Bodens nachhaltig beeinflusst:

1. Bodentextur (Korngrößenverteilung, insbesondere Tongehalt)
2. Bodenstruktur (Porenvolumen, Porengrößenverteilung, Substratschichtung, Verdichtungs-horizonte etc.)
3. Gehalt an organischen Materialien und deren Qualität

4. mineralogisch-tonmineralogische Zusammensetzung, Gehalt und Art von Oxiden und Hydroxiden
5. pH-Wert der Lösung an der Fest-Flüssig-Grenzfläche
6. Bodenfeuchte

Für die Verteilung und den Verbleib der Stoffe sind die folgenden klimatischen Einflußfaktoren bedeutend:

1. Niederschlagsmenge und jahreszeitliche Verteilung
2. Evapotranspiration (Wasser-Verdunstung)
3. Temperatur

2.2.1 Physiko - chemische PAK-Daten

Tabelle 3 zeigt einige relevante physiko-chemische Daten für PAK. Damit können Aussagen über die Stoffmobilität gemacht werden. Der n-Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizient und die Henry's Konstante ermöglichen Aussagen zum Verteilungsverhalten zwischen wäßriger und organischer Phase (Bodenwasser und organische Substanz im Boden) bzw. zwischen wäßriger und gasförmiger Phase. Hohe n-Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten ($>10^4$) sind mit einer relativ hohen Akkumulationstendenz der Stoffe in Lebewesen und Boden verbunden.

Tabelle 3: Physiko-chemische Eigenschaften von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen der EPA-Liste

Substanz	Molekulargewicht	Schmelzpunkt (°C)	Siedepunkt (°C)	Dampfdruck (Torr, bei 20 °C)	Löslichkeit in Wasser (mg/l, bei 25 °C)	Log Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizient	Henry's Konstante (Pam ³ /mol)	Log Sorptions Koeffizient
Naphthalin	128,19	80,55	218	0,0492	34,4	3,37	24	
Acenaphthylen	152,21	92	265	2,9x10 ⁻²	3,93	4,07	148	
Acenaphthen	154,21	96	278-280	2,0x10 ⁻²	3,42	4,33	119	3,8
Fluoren	166,15	116-117	293	1,3x10 ⁻²	1,98	4,18	144	
Anthracen	178,23	216	314	1,95x10 ⁻⁴	0,073	4,45	63	
Phenanthren	178,23	101	340	6,8x10 ⁻⁴	1,29	4,46	12	4,1
Fluoranthren	202,26	111	375	6,0x10 ⁻⁶	0,26	5,33	0,6	4,3
Pyren	202	150	360	6,85x10 ⁻⁷	0,14	5,32	0,13	4,8
Chrysen	228,28	256		6,3x10 ⁻⁷	0,002	5,61	9	
Benzo[a]anthracen	228,28	155-157	435	5x10 ⁻⁹	0,014	5,61	0,01	4,8
Benzo[b]fluoranthren	252,32	167-168		5,0x10 ⁻⁷	0,0012	6,57	13,8	6,2
Benzo[k]fluoranthren	252,32	217	480	5,0x10 ⁻⁷	0,00055	6,84	30	5,6
Benzo[a]pyren	252	179	496	5x10 ⁻⁹	0,0038	6,04	0,04	
Benzo[ghi]perylen	276	222		-10 ⁻¹⁰	0,00026	7,23		
Indeno[1,2,3-cd]pyren	276,34	162,5-164		-10 ⁻¹⁰	0,062	7,66		6,2
Dibenzo[a,h]anthracen	278,36	270		-10 ⁻¹⁰	0,0005	5,97		

Henry's, Konstante $H=P_s$ (Dampfdruck fest, Pa)/ C_s (Löslichkeit fest im Wasser, mol/m³); berechnet nach Shiu & Mackay (1986), wenn exakte Daten für Dampfdruck angegeben

Sorptionskoeffizient, S_c ; bezogen auf einen organischen Kohlenstoffgehalt von Böden von etwa 2 %, Daten aus Koch (1991) sonstige Daten aus Callahan et al. (1979), Mackay & Shiu (1977), Koch (1991) und Starke et al. (1988)

Es zeigt sich deutlich ein vom Molekulargewicht abhängiges Umweltverhalten der PAK. Während sich die zwei- und dreikernigen PAK durch relativ gute Wasserlöslichkeit und eine mittlere Flüchtigkeit, aber geringe Sorptionstendenz auszeichnen (mit Naphthalin als Extremwert), ist es bei den 5-ring PAK i.d.R. umgekehrt. Extrem niedrige Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit, aber hohe Sorptionstendenz wird z.B. bei Benzo[ghi]perylen gefunden.

Der chemische Abbau von PAK wird, da sie keine Substituenten tragen, allgemein als unbedeutend angesehen (Radding et al., 1976). Ein photochemischer Abbau findet ebenfalls nicht im nennenswerten Umfang statt.

Zur Aufnahme von PAK in Pflanzen sowie zum Transport und zur Metabolisierung liegen folgende Daten vor. Nach Untersuchungen von Siegfried (1975), Müller (1976), Linne und Martens (1978) sowie Harms und Sauerbeck (1984) ist der Gehalt an PAK - selbst bei hohen PAK-Gehalten im Substrat - in oberirdischen Pflanzenorganen sehr gering und abhängig von dem jeweiligen Substrat (Boden). Die Gehalte an Aromaten in den oberirdischen Teilen der Pflanzen sind meist immissionsbedingt. Die Aufnahme und Verteilung von PAK durch Pflanzen ist nach Harms (1981) von der Molekülgröße und der Struktur abhängig. Höher kondensierte Ringsysteme wie Benzo[a]pyren und Dibenzo[a,h]anthracen werden nur in sehr geringem Maße aufgenommen und in der Pflanze transportiert. Mit abnehmender Molekülgröße - Benzoanthracen, Anthracen - findet man einen höheren Anteil in den oberirdischen Organen. Ein Abbau bzw. eine Umwandlung von PAK im Pflanzenstoffwechsel ist möglich. Nach Harms (1975, 1983) und Harms et al. (1977) wird Benzo[a]pyren im pflanzlichen Stoffwechsel metabolisiert und in oxidierte Derivate wie Benzo[a]pyren-3,6-chinon und -1,6-chinon überführt. Crößmann (1992) stellte eine Beziehung zwischen PAK-Konzentrationen in Böden und Pflanzen fest insofern, als mit steigenden Gehalten im Boden auch die Gehalte in Pflanzen zunahmten. Es konnten jedoch stoff- und pflanzenartspezifische Unterschiede festgestellt werden.

Im folgenden werden die Bindung von PAK an Bodenbestandteile sowie der biologische Abbau näher diskutiert.

2.3 Bindung und Mobilität von PAK in Böden

Die Bindung bzw. Sorption und die Mobilität der PAK werden von den physiko-chemischen Eigenschaften der Einzelsubstanzen und insbesondere von zahlreichen bodeneigenen Merkmalen bestimmt (s. Kap. 2.2). In der Praxis ist u.a. auch der Aggregatzustand der Verunreinigung von erheblicher Bedeutung, d.h. konkret, ob die PAK in Phase, gebunden, z.B. als Teerklumpen immobil oder an Kohlepartikeln adsorbiert, vorliegen.

Im allgemeinen nimmt die Adsorption der einzelnen PAK mit abnehmender Wasserlöslichkeit und abnehmender Polarität zu (s.o., Litz, 1990, S. 342, siehe auch Means et al., 1980). Die organische Substanz im Boden bestimmt dabei ganz wesentlich die Sorptionskapazität für PAK (Zus.-fass.: Litz, 1990, S. 342-343, Scheffer & Schachschabel, 1989, S. 341-343). Means et al. (1980) fanden, daß die Sorption verschiedener PAK zu den Gehalten an organi-

scher Substanz von 14 untersuchten Sedimenten korrelierte, demgegenüber keinerlei Beziehung zwischen Korngrößenverteilung und tonmineralogischer Zusammensetzung der untersuchten Böden und Sedimente und der Sorption von PAK bestand. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten Karickhoff et al. (1979). Sie ermittelten für unterschiedliche Sedimente einen über einen weiten Konzentrationsbereich konstanten Verteilungskoeffizienten K (im Rahmen der hier zitierten Untersuchung als K_p bezeichnet) zwischen gelöstem und an der Bodenmatrix adsorbiertem Pyren. Nach quantitativer Fraktionierung der Sedimente in Sand, Grob-, Mittel-, Feinschluff und Ton konnten sie ferner eine sehr starke Abhängigkeit der Sorption von dem Gehalt an organischem Kohlenstoff der jeweiligen Korngrößenfraktionen feststellen. Nachdem die K_p -Werte der einzelnen Korngrößenfraktionen über die Ermittlung der K_{oc} -Werte (" K_{oc} " = K_p/C_{org}) in Beziehung zu den jeweiligen Gehalten an organischem Kohlenstoff gesetzt worden waren, zeigten sich für die Mittelschluff-, Feinschluff- und die Tonfraktionen der drei unterschiedlichen Sedimente fast identische K_{oc} -Werte. Die K_{oc} -Werte der Grobschluff- und Sandfraktionen lagen demgegenüber deutlich niedriger. Diese Ergebnisse verdeutlichen, daß über einen weiten Korngrößenbereich von Böden und Sedimenten die Sorptionskapazität wesentlich von der organischen Substanz bedingt wird. Der Befund, daß die Sorption der PAK im wesentlichen nicht durch die Korngrößenverteilung des Bodens bestimmt wird, bestätigten auch Untersuchungen von Hellmann (1982). Voice & Weber (1983), Weber et al. (1983) und Hasset & Banwart (1989) betonten ebenfalls die herausragende Rolle der organischen Substanz für die Bindung von PAK in Böden und Sedimenten.

Das Ausmaß der Sorption von PAK in Böden wird nicht nur von den Gesamtgehalten an organischer Substanz bestimmt, sondern auch ganz maßgeblich von deren Art, Struktur und elementarer Zusammensetzung. Gauthier et al. (1987) untersuchten die Adsorption von Pyren an 14 unterschiedlichen organischen Substanzen (Humin- und Fulvosäuren). Sechs Huminsäure-Proben wurden aus marinen bzw. ästuarinen Sedimenten, fünf Huminsäure- und drei Fulvosäure-Proben aus verschiedenen Böden extrahiert. Die an den verschiedenen Humin- und Fulvosäuren ermittelten Sorptionskonstanten für Pyren unterschieden sich um einen Faktor von bis zu 10 (!). Die Untersuchungen zeigten eine deutliche Zunahme der Sorption bei abnehmenden H/C-Verhältnissen und zunehmenden Anteilen aromatischer Gruppen in den organischen Testsubstanzen. Grathwol (1990) konnte zeigen, daß mit zunehmendem Alter der organischen Substanz bzw. zunehmender Inkohlung organogener Sedimente und ansteigenden H/O-Verhältnissen der organischen Substanz die Sorptionskapazität für hydrophobe organische Stoffe anstieg. Rutherford et al. (1992) fanden eine Erhöhung der Sorptionskapazität für organische Chemikalien bei abnehmenden Verhältnissen von polaren zu unpolaren Gruppen in der organischen Substanz. Garbarini & Lion (1986) konnten zeigen, daß mit zunehmender Hydrophobizität der organischen Substanz die Sorptionskapazität gegenüber organischen Stoffen anstieg.

Auch wenn die drei letztgenannten Arbeiten keine PAK, sondern andere hydrophobe organische Stoffe als Testsubstanzen verwendeten, so können die Ergebnisse wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung auch auf die Stoffgruppe der PAK Anwendung finden. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, daß mit zunehmendem Alter, zunehmenden Anteilen aromatischer und unpolarer Gruppen und zunehmender Hydrophobizität der organischen Substanz die Sorption unpolarer organischer Stoffe zunimmt.

Wenn auch die organische Substanz von Böden und Sedimenten im wesentlichen die Bindung von PAK bedingt, so ist die mineralische Komponente doch nicht ganz außer Acht zu lassen. Rogers et al. (1980), Chiou & Shoup (1985), Zielke et al. (1989), Sawhney & Gent (1990), Smith et al. (1990) und Aochi et al. (1992) beschrieben die Sorption unpolarer, volatiler organischer Stoffe an Bodenton- bzw. Lagerstättentonmineralen. Besonders Chiou & Shoup (1985) konnten zeigen, daß das Ausmaß der Sorption an mineralischen Bodenbestandteilen maßgeblich vom Wassergehalt des Bodens abhing und bei abnehmendem Wassergehalt zunahm. Die Ergebnisse der o.g. Untersuchungen sind insbesondere im Hinblick auf das Verhalten der stärker volatilen, niedriger kondensierten PAK bedeutsam, die sich in der Gasphase mit der Bodenluft in der ungesättigten Bodenzone bewegen, und in diesem Zustand an die Oberflächen mineralischer Bodenbestandteile gebunden werden können.

Bei der geringen Wasserlöslichkeit der PAK sowie der starken Adsorption an Böden, insbesondere humusreichen, wird i. allg. auch eine geringe Mobilität der PAK vorausgesetzt. In Einzelfällen ist jedoch eine Verlagerung von PAK im Boden bis in das oberflächennahe Grundwasser beobachtet worden (z.B. Means et al., 1980, Bierl et al., 1984). Eiceman et al. (1986) beschrieben Belastungen mit Anthracen, Fluoren und Pyren zwischen 30 und 537 mg/kg in 1 m Tiefe. Tebaay et al. (1991) konnten zeigen, daß in dem BtSw-Horizont (173-207 cm unter Geländeoberfläche) eines gewachsenen Bodens unter PAK belasteten Y-Horizonten eines ehemaligen Kokereistandortes der Gehalt an Fluoranthen im Vergleich zu den darüber liegenden Horizonten (RAhf und BtSw-Horizonte, 90-173 cm unter Geländeoberfläche) deutlich anstieg. Walther et al. (1986) fanden demgegenüber in einer Löß-Parabraunerde, daß die größten PAK-Mengen im Oberboden festgelegt worden waren, und in 100 cm Tiefe die Konzentration noch 0,8 µg PAK/kg TS betrug im Vergleich zu 30 µg/kg TS im Oberboden. In zwei Forstökosystemen des Sollings war die überwiegende Masse der über die Atmosphäre (trockene, feuchte und nasse Deposition) eingetragenen PAK in dem Auflagehumus festgelegt worden und nur sehr geringe Mengen bis in den mineralischen Boden eingedrungen (Matzner et al., 1981). Daraus wurde abgeleitet, daß in nicht stark belasteten Gebieten unter Böden mit Humusaufgaben Grundwasserkontaminationen durch PAK nicht zu erwarten seien.

Die Löslichkeit und Mobilität der PAK im Boden können durch Tenside und Öle sowie durch die Bindung an gelöste Fulvosäuren (Gauthier et al. 1986) sowie an andere wasserlösliche organische Substanz des Bodens erhöht werden (Kögel-Knabner & Knabner, 1991, Magee et al., 1991). In Form von Gemischen, z.B. dem Anthracenöl, das auf Kokereistandorten weit verbreitet ist, kann die Löslichkeit einzelner PAK stark erhöht werden. Tebaay et al. (1991) fanden, daß in dem Ap-Horizont einer Parabraunerde die Adsorption von Benzo[a]pyren, das als Komponente eines Anthracenöls zugegeben wurde, bei Vorliegen in diesem Gemisch wesentlich geringer ist als bei Zugabe der Einzelsubstanz. Sie ermittelten für Benzo[a]pyren, das als Einzelsubstanz einer Bodenprobe zugeführt worden war, ein K_F -Wert von 18.800 µg/kg, demgegenüber betrug der K_F -Wert für Benzo[a]pyren, das als ein Bestandteil eines dem Boden zugesetzten Anthracenölgemisches zugesetzt wurde, nur 980 µg/kg.

2.4 Mikrobieller Abbau von Einzel-PAK

Bisher sind in der Fachliteratur überwiegend Daten zum aeroben mikrobiellen Abbau von PAK als Einzelsubstrate publiziert worden. Die vorhandenen Erkenntnisse beruhen auf Laborergebnissen. Praxisorientierte Untersuchungen sind nicht bekannt. Der mikrobielle Abbau von PAK mit niederem Molekulargewicht wie Naphthalin (Davies & Evans, 1964; Jeffrey et al., 1975; Ohmori et al., 1973) ist schon seit langer Zeit bekannt, wobei die Organismen die Substanzen als Kohlenstoff- und Energiequelle nutzen. Auch über die Biotransformation der 3-Ring Verbindungen Anthracen (Herbes & Schwall, 1978; Jerina et al., 1976) und Phenanthren (Cerniglia & Yang, 1984) wurde berichtet. Es konnte kein Hinweis auf die mikrobielle Verwertung von solchen PAK gefunden werden, die vier oder mehr aromatische Ringe besaßen. Jedoch beschrieben mehrere Publikationen den Cometabolismus, d.h. die Umsetzung durch mikrobielle Reinkulturen in Gegenwart eines anderen Wachstumssubstrates von PAK wie Benzo[a]anthracen (Gibson et al., 1975; Barnsley, 1975; Mahaffey et al., 1988), Benzo[a]pyren (Cerniglia & Gibson, 1979; Gibson et al., 1975; Heitkamp & Cerniglia, 1988), Fluoranthren (Barnsley, 1975; Heitkamp et al., 1988a) und Pyren (Heitkamp et al., 1988b). Ein geringer Metabolismus von verschiedenen PAK durch den lignolytischen Pilz, *Phanerochaete chrysosporium*, gewachsen unter definierten Bedingungen, wurde ebenfalls berichtet (Bumpus, 1989).

Kürzlich wurde die Mineralisierung von Phenanthren, Anthracen, Fluoren, Fluoranthren, Pyren und Chrysen durch bakterielle Reinkulturen nachgewiesen (Walter et al., 1991; Weissenfels et al., 1990, 1991; Mueller et al., 1990; Keuth & Rehm, 1991).

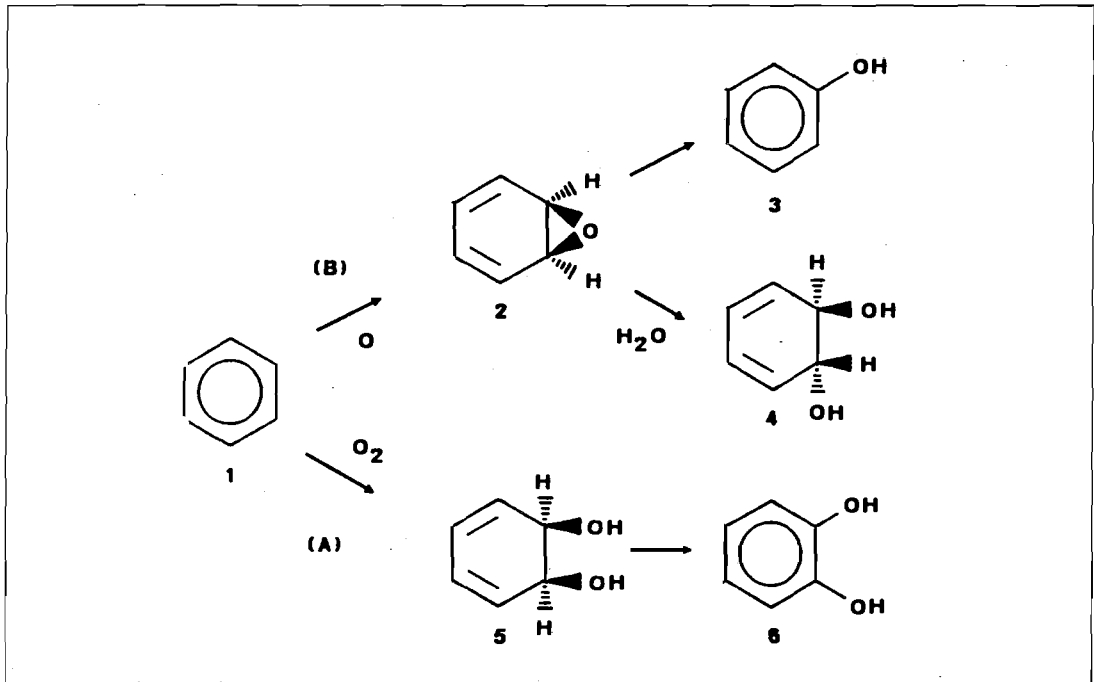
Organismen, die die Fähigkeit besitzen, PAK als Kohlenstoff- und Energiequelle zu nutzen oder sie zumindest zu transformieren, gehören einer Vielzahl von Genera an.

Im Vergleich zu der Fülle an Daten, die für den mikrobiellen Abbau von PAK beschrieben wurde, ist nur relativ wenig über Biotransformationsprozesse von Heterocyclen bekannt.

2.5 Abbausequenzen für einzelne PAK mit Reinkulturen

Grundsätzlich beginnt der Aromaten-Abbau mit einer Erhöhung der Reaktivität des aromatischen Moleküls, indem auf enzymatischem Wege OH-Gruppen eingeführt werden. Dabei benutzen Bakterien (Prokaryonten) und Pilze (Eukaryonten) unterschiedliche Reaktionen für die einleitenden Schritte (Bild 3). Der bakterielle Abbau wird durch eine Dioxygenase - ein Enzym, das molekularen Sauerstoff, also O₂, auf das Aromatenmolekül überträgt - initiiert. So wird der reaktionsträge Aromat zu einem cis-Dihydrodiol (Nr. 5 in Bild 3) aktiviert. Dehydrogenasen rearomatisieren die Dihydrodirole zu 1,2-Diphenolen (Nr. 6 in Bild 3), die dann durch ringspaltende Dioxygenasen weiter abgebaut werden. Die einleitende Umsetzung von Aromaten durch niedere Pilze erfolgt über mischfunktionelle Monooxygenasen (Cytochrom P₄₅₀), die den Einbau jeweils nur eines Sauerstoffatoms in das Aromatenmolekül bewirken. Das so entstandene Epoxid (Nr. 2 in Bild 3) wird weiter durch enzymatische Wasseranlagerung (Hydratisierung) zu trans-Dihydrodiol (Nr. 4 in Bild 3) bzw. durch nichtenzymatische innermolekulare (Isomerisierung) Umlagerung zu Phenol (Nr. 3 in Bild 3) umgewandelt.

Bild 3: Schematische Darstellung der einleitenden Schritte im Abbau von Aromaten durch Prokaryonten (A) und Eukaryonten (B) (nach Cerniglia, 1984) am Beispiel des Benzols



1, Aromat; 2, Arenepoxid; 3, Phenol; 4, trans-Dihydrodiol; 5, cis-Dihydrodiol; 6, Brenzcatechin.

Die prinzipiellen Abbauwege von Naphthalin, Phenanthren und Anthracen in Reinkulturen sind unter Laborbedingungen weitgehend aufgeklärt, soweit es sich um den bakteriellen Abbau handelt. Die Abbausequenzen sind exemplarisch für Naphthalin und Phenanthren bis zur Stufe der Dihydroxyverbindungen (Brenzcatechin und Protocatechuat) dargestellt (Bilder 4 und 5). Die Ringspaltung (extradiol oder intradiol) leitet den weiteren Abbau ein, der zur Bildung von Biomasse und Endoxidation zum CO_2 führt. Eine vergleichbare Reaktionsfolge läßt sich auch für die höherkernigen PAK vermuten. Erste Ansätze zur Aufklärung der Abbausequenz für Fluoranthren sind vorhanden, da kürzlich Intermediate isoliert und charakterisiert werden konnten (Weissenfels et al., 1991).

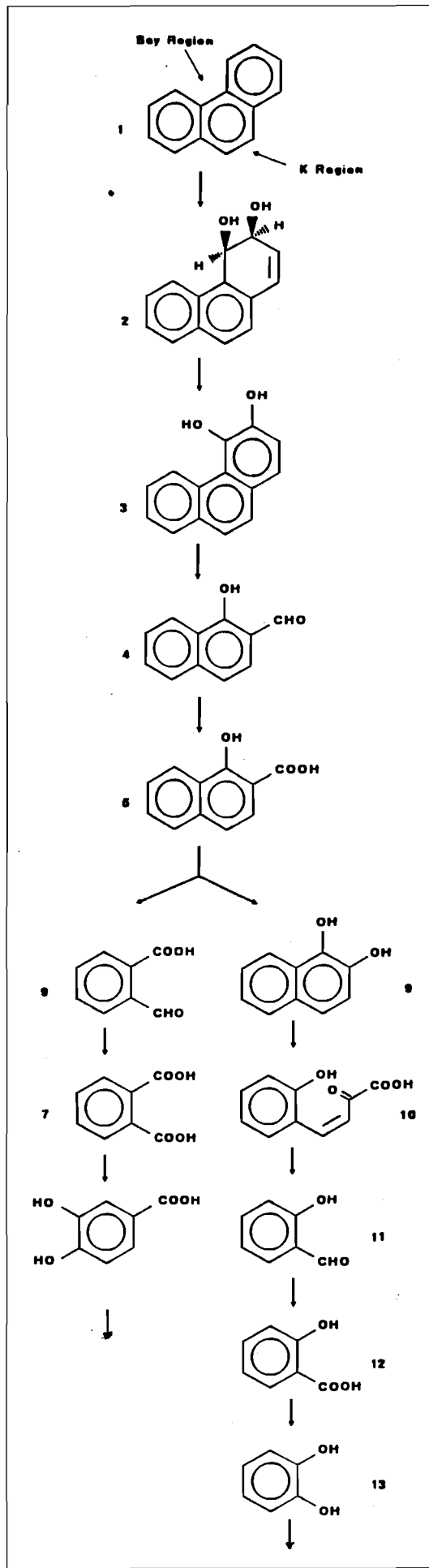
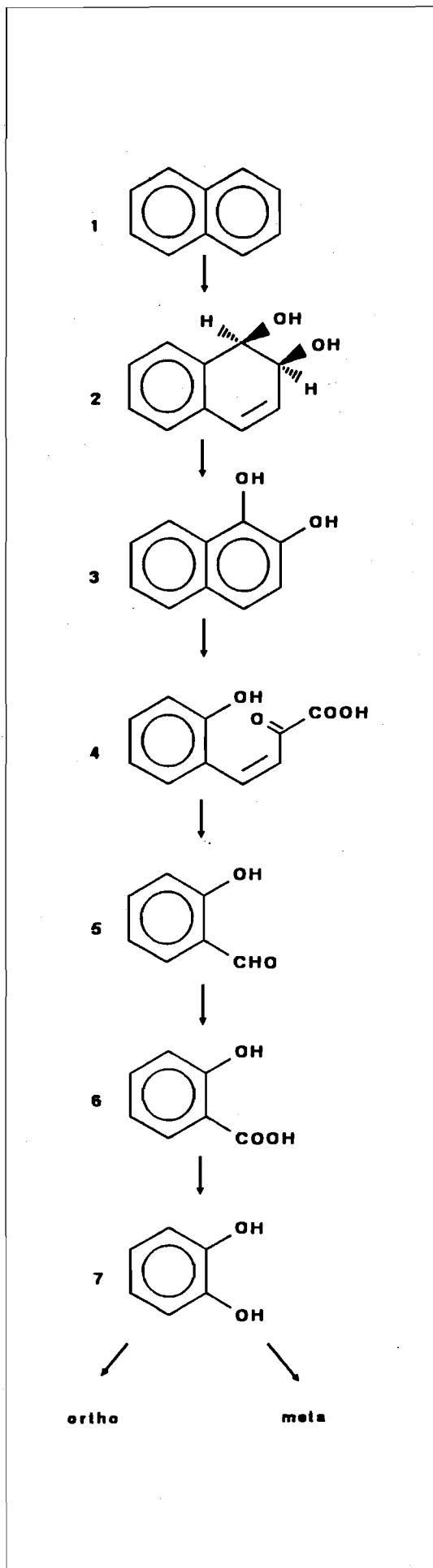
Bild 4: (Seite 41 links) Sequenz des bakteriellen Abbaus von Naphthalin zum Brenzcatechin (nach Cerniglia, 1984). Der weitere Abbau erfolgt über einen meta- oder ortho-Weg und führt zum Totalabbau unter Bildung von Biomasse

1, Naphthalin; 2, cis-1,2-Dihydro-1,2-dihydroxynaphthalin; 3, 1,2-Dihydroxynaphthalin; 4, cis-o-Hydroxybenzalpyruvat; 5, Salicylaldehyd; 6, Salicylat; 7, Brenzcatechin.

Bild 5: (Seite 41 rechts) Sequenz des bakteriellen Abbaus von Phenanthren (vereinfacht nach Cerniglia, 1984). Der Abbau von Brenzcatechin bzw. Protocatechuat erfolgt über den ortho- oder meta-Weg (wie in Bild 4)

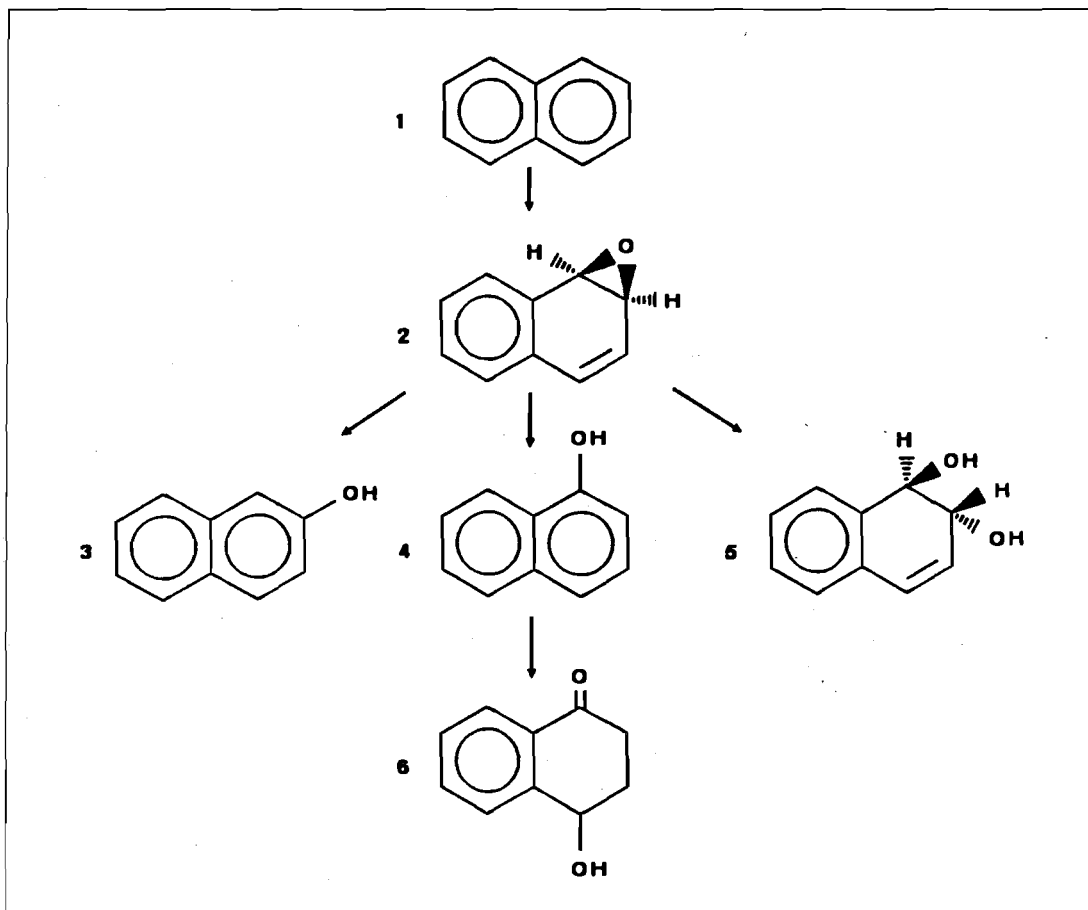
1, Phenanthren; 2, cis-3,4-Dihydro-3,4-dihydroxynaphthalin; 3, 3,4-Dihydroxynaphthalin; 4, 1-Hydroxy-2-naphthaldehyd; 5, 1-Hydroxy-2-naphthoat; in *Aeromonas*: 6, 2-Carboxybenzaldehyd; 7, o-Phthalat; 8, Protocatechuat; in *Pseudomonas*: 9, 1,2-Dihydroxynaphthalin; 10, cis-o-Hydroxybenzalpyruvat; 11, Salicylaldehyd; 12, Salicylat; 13, Brenzcatechin.

Nur bisher identifizierte Metabolite sind dargestellt, einzelne Reaktionspfeile beinhalten also mehrere Enzymschritte.



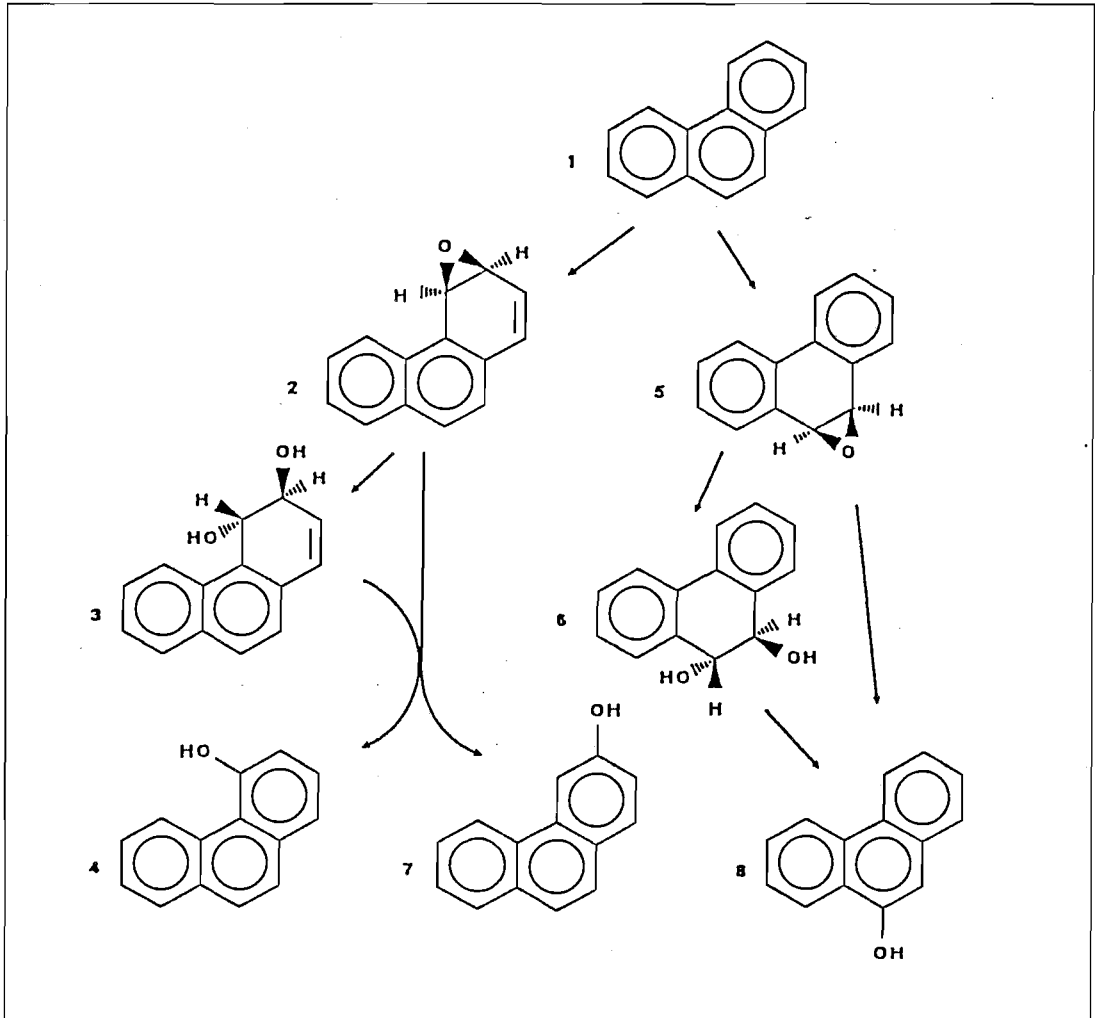
Die Bilder 6 und 7 zeigen die beim Umsatz von Naphthalin und Phenanthren durch *Phanerochaete chrysosporium* gebildeten Transformationsprodukte. Einige der dargestellten Substanzen sind als säure-katalysierte Folgeprodukte der Primärprodukte anzusprechen. Es wird insgesamt deutlich, daß es sich, neben dem oben aufgeführten Unterschied bezüglich der Ringaktivierungsreaktion, bei dem Abbau durch die niederen Pilze nur um eine Transformation handelt, während Bakterien die Substanzen vollständig abbauen.

Bild 6: Reaktionsschritte der Oxidation von Naphthalin durch Pilze
(vereinfacht nach Cerniglia, 1989)



1, Naphthalin; 2, Naphthalin-1,2-oxid; 3, 2-Naphthol; 4, 1-Naphthol; 5, trans-1,2-Dihydro-1,2-dihydroxynaphthalin; 6, 4-Hydroxy-1-tetralon

Bild 7: Reaktionsschritte der Oxidation von Phenanthren durch *Phanerochaete chrysosporium* (nach Sutherland et al., 1991)



1, Phenanthren; 2, Phenanthren-3,4-oxid; 3, trans-3,4-Dihydro-3,4-dihydroxyphenanthren; 4, 4-Phenanthrol; 5, Phenanthren-9, 10-oxid; 6, trans-9, 10-Dihydro-9, 10-dihydroxyphenanthren; 7, 3-Phenanthrol; 8, 9-Phenanthrol

2.6 Mischkulturen/Mischsubstrate für den PAK-Abbau

Eine vollständige Metabolisierung von PAK-Gemischen ist wesentlich schwerer zu erzielen als ein Abbau definierter Einzelsubstanzen und kann in der Regel nur in einer Mischkultur von Mikroorganismen mit unterschiedlichsten StoffwechsellLeistungen erfolgen (Walter et al., 1989).

Die Abbauraten einzelner Polycyclen (Naphthalin, Phenanthren, Anthracen, Naphthacen) konnten als eine Funktion der Löslichkeit beschrieben werden (Wodzinski & Johnson, 1968; Wodzinski & Bertilini, 1972; Wodzinski & Coyle, 1974).

Ein Aufheben der Substratlimitierung für Mikroorganismen durch Verwendung von lipophilen Flüssigkeitsphasen (z.B. Heptamethylnonan), die das Nachlösen des Substrates in die wäs-

srige Phase beschleunigen, oder Emulgatoren erbrachte eine deutliche Steigerung des Abbaus von Phenanthren durch eine Reinkultur in Flüssigkeitskultur (Bryniok et al., 1990; Köhler et al., 1990).

2.7 Mikrobieller Abbau von PAK-Gemischen im Boden

Um die Grenzen und Möglichkeiten des mikrobiellen Abbaus im Boden aufzuzeigen, sollen nur wenige Arbeiten der letzten drei Jahre diskutiert werden, die aufgrund der untersuchten Meßparameter geeignet erscheinen, eine detaillierte Beurteilung zu erlauben. Die erste Arbeit beinhaltet ein Mietenverfahren, wobei der Abbau von PAK in zwei Böden unterschiedlicher Textur untersucht wurde (Stieber et al., 1990), während die beiden Arbeiten von Mueller et al. (1991a, b) die Möglichkeit der Reinigung eines Bodens im Landfarming-/Mietenverfahren und Bioreaktor vergleichend untersuchten. Eschenbach et al. (1991) beschäftigten sich mit dem Abbau und dem Verhalten von PAK, die einem Boden zugesetzt worden waren. Die Möglichkeit der Reinigung von kontaminierten Böden von zwei Industriestandorten wurde von Weissenfels et al. (1992) geprüft.

Nach Stieber et al. (1990) führte die Behandlung von Sandboden im Laborperkolator (Füllmenge 2 kg Boden) bei Zusatz einer PAK-adaptierten Mischkultur zu einer deutlichen Reduktion des dem Boden zugesetzten PAK-Gemisches (Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Fluoranthren, Phenanthren, Pyren: jeweils etwa 359 mg/kg Boden; Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[a]pyren; jeweils etwa 50 mg/kg Boden). Es erfolgte eine Abnahme von 85 % in 90 Tagen.

Bei dem zweiten Boden, einem kiesig-sandigen Gaswerkboden (die Konzentrationen der Einzel-PAK lag im Bereich 200-300 mg/kg Boden), zeigte die PAK-Analytik, daß die vergleichbare Behandlung weniger erfolgreich verlief. Hierbei wurde auf die im Boden schon vorhandenen Organismen gesetzt. In 55 Tagen wurden 33 % der Schadstoffe eliminiert. Eine Verlängerung der Versuchsdauer erbrachte keine weitere Reduktion der Schadstoffe aus dem Gaswerkboden, was auf den größeren Anteil der höhermolekularen PAK zurückgeführt wurde. Ferner wurde eine - nicht durch Untersuchungen gestützte - starke Adsorption der PAK an den Boden für dieses Ergebnis verantwortlich gemacht. Chrysen, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[a]pyren, Dibenz[a,h]anthracen, Benzo[g,h,i]perylen und Indeno[1,2,3-cd]pyren waren persistent. Es wurden Hinweise auf die Entstehung von Metaboliten angeführt, die aber als wenig aussagekräftig angesehen werden müssen.

Die Möglichkeit der biologischen Reinigung von Bodenmaterial und Sediment, die mit 1 % Teeröl kontaminiert waren, wurde von Mueller et al. (1991a, b) im Labormaßstab untersucht, indem die autochthonen (bodenständigen mikrobiellen) Populationen genutzt wurden. Zwei Verfahrensvarianten - ein simuliertes Landfarming-/Mietenverfahren (3 kg Boden) und ein Bioreaktorverfahren (1,5 l Suspension) - wurden daraufhin geprüft, Böden¹⁾ und die liegenden Sedimente zu reinigen. Es handelt sich hierbei um einen extremen Rohboden aus Quarzsand. Die Gesamtkontamination an PAK (S = 100 %) läßt sich in drei Gruppen einteilen.

Die Verlusten für PAK durch Verdampfen im Modellandfarming-Verfahren waren für den Boden zu vernachlässigen. Beim gleichen Verfahren trat aus dem Sediment, bedingt durch die höheren Gehalte an leicht flüchtigen PAK (vgl. Tabelle 4), eine stärkere Ausgasung auf. Die Abbauraten der Versuchsvarianten mit und ohne Zusatz von Mineralsalzen²⁾ zeigt Tabelle 5. Auffällig ist die deutlich höhere prozentuale Abbauleistung im Boden im Vergleich zu dem Sediment, obwohl die 3- und mehr-Ring-Aromaten (Gruppe 3) zu Beginn des Versuchs im Boden um ein vielfaches höher als im Sediment waren.

Tabelle 4: Gruppeneinteilung der PAK-Kontaminationen der Böden und der liegenden Sedimente für die Landfarming-Methode

Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
<ul style="list-style-type: none"> • Naphthalin • 1 - Methylnaphthalin • 2 - Methylnaphthalin • 2,3 - Dimethylnaphthalin • 2,6 - Dimethylnaphthalin • Biphenyl 	<ul style="list-style-type: none"> • Acenaphthylen • Acenaphthen • Fluoren • Phenanthren • Anthracen • 2 - Methylanthracen • Anthrachinon 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluoranthen • Pyren • Benzo(b)fluoren • Chrysen • Benzo(a)pyren • Benzo(a)anthracen • Indeno (1,2,3 - cd)pyren • Benzo(b,k)fluoranthen
Anteil an Σ PAK Boden: 3,5 % Sediment: 30,6 %	Anteil an Σ PAK Boden: 23,4 % Sediment: 52,3 %	Anteil an Σ PAK Boden: 73,1 % Sediment: 17,1 %

Tabelle 5: Prozentualer PAK-Abbau im Boden und Sediment mit und ohne Zugabe von Mineralsalzen beim Landfarming-Verfahren nach 12 Wochen

	Gruppe 1		Gruppe 2		Gruppe 3	
	ohne Zusatz	mit Zusatz	ohne Zusatz	mit Zusatz	ohne Zusatz	mit Zusatz
Boden (%)	95	81	74	62	47	34
Sediment (%)	85	60	25	20	25	26

1) Typic Quartzipsammet ca. 80% Quarzsand, pH 7,1, 35% Wasserspeicherkapazität, 6,6% Feuchte, Lakaeland serie and Psammettic Paleudult, Eustis series

2) 1.000 mg/l K_2HPO_4 , KH_2PO_4 und $(NH_4)NO_3$; 200 mg/l $MgSO_4 \cdot 7H_2O$; 30 mg/l $CaCl_2 \cdot xH_2O$; 50 mg/l $FeCl_3$

Vergleichend dazu wurde ein Bioreaktor mit einer Bodenaufschlammung des Versuchsbodens von 2,1 % suspendierter Festsubstanz (1,1 l Nennvolumen) bei 28,5°C betrieben, wobei kontinuierlich der pH-Wert auf 7,1 und der gelöste Sauerstoff durch Belüften bei 90 % Sauerstoffsättigung gehalten wurde. Verluste über ein Verdampfen waren zu vernachlässigen. Die PAK der *Gruppe 1* verschwanden aus dem Boden innerhalb weniger Tage, während der Abbau der PAK der *Gruppe 2 und 3* bis zum Zeitpunkt von 14 Tagen mit langsamer, linearer Rate erfolgte. Eine Verlängerung der Inkubationsdauer auf 30 Tage erbrachte nur noch geringfügig erhöhten Abbau. Die geringsten Abbauraten wurden für Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren und Indeno[1,2,3-cd]pyren beobachtet.

Es zeigte sich in diesem Fall (sandiger Rohboden), daß mit beiden Verfahren ähnliche Ergebnisse ermittelt wurden. Die Behandlung mit dem Landfarming-Verfahren nahm jedoch erheblich längere Zeit in Anspruch als mit dem Bioreaktor.

Ebenfalls im Labormaßstab untersuchten Eschenbach et al. (1991) den Abbau von Fluoranthren und Benzo[a]pyren sowie die Inkorporation der Substanzen in die organische Substanz des Bodens. Dem Ap-Horizont einer Pseudogley-Parabraunerde (16,4 % Ton; 66,7 % Schluff; 16,9 % Sand; 0,85 % organischer Kohlenstoff; pH-Wert 6,5; Kationenaustauschkapazität 12,1 meq/100g) wurden in Konzentrationen von 5 ppm und 100 ppm Fluoranthren sowie 1 ppm und 10 ppm Benzo[a]pyren zugesetzt. Der Verbleib dieser Substanzen wurde über einen Versuchszeitraum von 56 Tagen beobachtet. Die PAK-Konzentrationen wurden nach sequentieller Extraktion ermittelt. Der erste Schritt umfaßte eine flüssig/fest-Extraktion mit Aceton im Ultraschall, von der angenommen wird, daß sie auch Anteile der an die Bodenmatrix sorbierten PAK erfaßt. In einem anschließenden Schritt wurden nach basischer Verseifung in methanolischer Kalium-Lauge und einer flüssig/flüssig-Extraktion mit Hexan auch diejenigen Anteile der PAK erfaßt, die im Versuchsverlauf in die organische Substanz des Bodens inkorporiert worden waren.

Die Ergebnisse zeigten, daß bei den Ansätzen mit 5 ppm Fluoranthren nur noch 35 % der ursprünglichen Gesamtgehalte durch eine Aceton-Extraktion nachzuweisen waren. Der Anteil der nach basischer Verseifung zu extrahierenden Gehalte betrug jedoch noch 80 % der ursprünglichen Gesamtgehalte. Das heißt, daß nur ca. 20 % des Fluoranthrens tatsächlich abgebaut, hingegen größere Anteile in die organische Substanz des Bodens inkorporiert worden waren. Bei einer Konzentration von 100 ppm Fluoranthren wurden in 56 Versuchstagen 22 % abgebaut und 17,5 % in die organische Substanz des Bodens inkorporiert. Bei den Versuchsansätzen mit 10 ppm Benzo[a]pyren war nach 56 Versuchstagen kein signifikanter Rückgang der Gesamtgehalte (Extraktion nach basischer Verseifung der organischen Substanz) festzustellen. Demgegenüber war der Anteil des mit der Aceton-Extraktion nachweisbaren Benzo[a]pyrens deutlich zurückgegangen. Dieser Rückgang hätte bei Nichterfassung der schwer zu extrahierenden Fraktion (Extraktion nach basischer Verseifung der organischen Substanz) leicht als Abbau des Benzo[a]pyrens mißinterpretiert werden können.

Weissenfels et al. (1992) untersuchten die Möglichkeit der biologischen Reinigung von mit PAK kontaminiertem Material von zwei verschiedenen Standorten. Der Boden A stammte von einer Holzimprägnierungsanlage und hatte die folgenden Charakteristika: 1.800 mg PAK/kg Boden; überwiegend Sand; pH 6,7; 1 % Anteil organisches Material.

Bei dem Boden B handelte es sich um ein heterogenes Material (Schutt, Steine, Lehm) einer Teer-Öl-Raffinerie mit einem hohen Anteil an organischem Material (13,6 %), einem pH-Wert von 7,8 und einer PAK-Kontamination von 1.030 mg/kg Boden.

Während nach 8 Wochen Inkubation in einem Laborperkolator (Füllmenge 200 g Boden) eine 62%ige Abnahme der PAK-Konzentrationen im Boden A (überwiegend Sand) durch die bodenständige Mikroflora gezeigt werden konnte, blieb die Kontamination des Bodens B (Schutt, Steine, Lehm) unter den gleichen Versuchsbedingungen auf dem Ausgangsniveau. Die höchsten Abbauraten aus Boden A wurden für Phenanthren, Fluoren, Fluoranthren und Pyren ermittelt, während Dibenzo[ah]anthracen und Benzo[a]pyren sehr viel langsamer abgebaut wurden. Auch der Zusatz einer bakteriellen Mischkultur mit der Fähigkeit des Abbaus der PAK bewirkte keine Eliminierung der PAK aus Boden B. Wurde jedoch das PAK-Gemisch aus Boden B extrahiert und auf Sand adsorbiert, so fand in Gegenwart einer bakteriellen Mischkultur ein Abbau statt. Dies spricht für eine fehlende Zugänglichkeit der PAK für die Bakterien in Boden B. Für diesen Befund wurde der hohe Anteil an organischem Material in Boden B verantwortlich gemacht.

3. Vorbereitende Untersuchungen und Maßnahmen für die Durchführung der Feldversuche

3.1 Belastungssituation am ehemaligen Gaswerkstandort in Solingen-Ohligs

Kernbereich

Der Kernbereich besteht aus den ehemaligen Gaswerksanlagen; das sind die Teer- und Ammoniakwassergruben, die Ammoniakfabrik, die Gasbehälterstandorte, das Ofenhaus, die Gasaufbereitung, die Kohlekoksagerplätze, der Kokslöscherplatz, der Ölbehälterstandort und ein alter Teich. Die in diesem Bereich auftretenden Bodenbelastungen werden durch PAK, Cyanide, Phenole und untergeordnet Arsen und BTX-Aromate hervorgerufen. Die Verunreinigungen befinden sich sowohl oberflächennah als auch in Tiefen bis zu ca. 5 m unter Geländeoberkante (GOK). In diesem Bereich wurde eine Konzentration Σ EPA-PAK (16 Einzelsubstanzen) von ca. 56 mg/kg TS bis zu 36.000 mg/kg TS gemessen (GERTEC, 1988).

Weiterhin traten geringere Konzentrationen von BTX-Aromaten in der Bodenluft und der Raumluft in Kellerräumen von Gebäuden auf. Eine Belastung des Grundwassers aus diesem Bereich mit kokereitypischen Schadstoffen ist nicht nachgewiesen worden.

Hochwasserrückhaltebecken

Im Jahre 1989 wurde im Hochwasserrückhaltebecken bei einer Gefährdungsabschätzung entlang der Böschung an der Tunnelstraße eine Belastung an B(a)P von 2,3 mg/kg TS bis zu 48,6 mg/kg TS und im Bereich der ehemaligen Kläranlage von 1,1 mg/kg TS bis zu

50,2 mg/kg TS B(a)P festgestellt. An SEPA-PAK wurden im Bereich der ehemaligen Kläranlage Konzentrationen von 3,8 mg/kg TS bis 189 mg/kg TS gemessen (GERTEC, 1989).

Die oberflächennahen PAK-Verunreinigungen (bis 0,5 m unter GOK) treten flächendeckend im südwestlichen Teilbereich auf. Das Vorkommen wird dadurch erklärt, daß sich in diesem Bereich 1925 eine mechanische Kläranlage mit zwei Absatzbecken zur Aufnahme der Abwässer aus dem Gaswerk befand. Unsachgemäßer Transport von Kokereimaterial könnte in diesem Bereich zusätzlich zur Belastungssituation beigetragen haben. Eine Abgrenzung des oberflächennahen Bereiches mit Konzentrationen des Leitparameters Benzo(a)pyren von mehr als 1 mg/kg TS erfolgte aufgrund der Analyseergebnisse der Rammkernsondierungen.

Grundwasseranalysen an den Pegeln haben gezeigt, daß keine Grundwasserverunreinigungen durch PAK auftreten.

3.2 Bodenbeschaffenheit

Bei dem zu behandelnden Boden handelt es sich um anstehenden, schluffig-lehmigen Sand, der im Bereich der ehemaligen Kläranlage z.T. Bauschuttanteile enthält und folgende Korngrößenverteilung aufweist:

	S	gU	mU	FU	Uges	T	Bodenart	Corg %	pH (/)
%	37,3	27,4	13,9	7,5	48,8	13,9	ulS	3,0 – 6,0	6,8 – 7,7

Die Auffüllungsschicht nimmt dabei ein Volumen von näherungsweise 200 m³ ein und wurde, teilweise durch die Auskofferung bedingt, mit dem Versuchsboden vermischt.

Die den Firmen überlassenen Bodenproben zur Durchführung der Voruntersuchung wiesen zum Teil geringere Schluffanteile auf.

3.3 Auswahl der Versuchsteilnehmer

Im Sommer 1989 wurden alle zur damaligen Zeit bekannten Anbieter mikrobiologischer Sanierungsverfahren (ca. 40 Firmen) angeschrieben, von dem geplanten Untersuchungsvorhaben unterrichtet und aufgefordert, Unterlagen bezüglich ihres Leistungsspektrums einzusenden.

Von den angeschriebenen Firmen bekundeten 13 Unternehmen daraufhin ihr Interesse an der Teilnahme der Versuche. Im November 1989 wurden diese Unternehmen zur Angebotsabgabe aufgefordert.

In der Ausschreibung wurde neben dem Ausfüllen der Ausschreibungsunterlagen eine detaillierte Verfahrensbeschreibung sowie die Durchführung und Dokumentation von Versuchen im

Labormaßstab verlangt. Die Versuche wurden allen Ausschreibungsteilnehmern pauschal mit 3.000 DM vergütet, ausgenommen den Unternehmen, die später den Zuschlag zur Versuchsdurchführung erhielten. Zwei Monate nach Eingang der Bodenproben in den Firmenlabors offerierten 8 Firmen ein Angebot, wobei einige eine Sanierungsdauer von nur 6 Monaten als notwendig erachteten.

Tabelle 6: Vorversuche der 8 Firmen mit Darstellung der vergleichbaren Untersuchungsparameter

Firmenname	AnaKat	Lobbe Xenex	UN	CB (ehem. ESTE)	PNW (ehem. KRC)	BGT	Terra	Klößner Decotec
Bodenbeschreibung	dunkler humusreicher Boden, kein Geruch nach Erdölbestandteilen (Steinkohlenteer)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	es wurde kein Laborbericht über die Vorversuche zur Verfügung gestellt
pH-Wert	7,6	7,0	6,8	7,7	7,3	7,1	7,1	
Trockensubstanz in %	85,0	79,1	79,0	78,6	72,1	76,0	78,7	
KBE/g TS	$2,8 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^4$	k.A.	$6,65 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^6$	k.A.	*
Versuchsdurchführung	<ul style="list-style-type: none"> • Schüttelkultur • Umlaufsäule • Blasensäule 	Schüttelschrank	Wärmeschrank (30°C)	Säulenversuche	Säulenversuche	<ul style="list-style-type: none"> • nährstoffbeschleunigtes Testsystem • natürliches Testsystem • inhibiertes Testsystem 	k.A.	
Analyseverfahren	GC	HPLC	GC-MS	GC-MS	k.A.	HPLC	GC-MS	
Anfangskontaminationen Σ EPA-PAK (mg/kg) TS	36,4	k.A.	57,0	101,1	159,9	106,2	k.A.	
<u>Laborergebnisse</u>								
Abbau Σ EPA-PAK in %	92,0	99,0	31,5	94,0	35,0	52,9	k.A.	
Abbau BaP in %	99,0	99,0	36,7	90,0	37,0	61,8		
Zeit (d)	56,0	28,0	28,0	42,0	41,0			

Die Angaben zu den Vorversuchen waren nicht ausreichend und die Versuche nicht repräsentativ genug, um eine Bewertung vornehmen zu können. Meist fehlten nähere Angaben zum Analyseverfahren und zum verwendeten Extraktionsmittel. Auf die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Großtechnik wurde ebenfalls nicht eingegangen. Daher erfolgte die Auswahl der Versuchsteilnehmer im Frühjahr 1990 mit der Maßgabe, möglichst unterschiedliche Verfahren in das Projekt einzubinden.

Weitere Kriterien bei der Auswahl der Versuchsteilnehmer waren

- die Erfolgsaussichten einer großmaßstäblichen Sanierung, anhand
 - der Ergebnisse der Laborversuch
 - einer fachtechnischen Einschätzung der Verfahrenstechnik,
- der Platzbedarf der Verfahren,
- die Kosten der Verfahren.

Nach einer Prüfung der vorliegenden Unterlagen und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Geldmittel wurden Mietverfahren ausgewählt. Die Stadt Solingen beteiligte sich zusätzlich mit einem eigenen Verfahren. Als fünfte Mieta wurde eine Kontrollmieta errichtet.

Als einziges Unternehmen bot die Firma AnaKat zusätzlich zu einem Mietenverfahren ein biologisches, statisches Festbettreaktorverfahren an. Aufgrund der Ähnlichkeit zu Mietenverfahren wurde dieses nicht als alternative Technik bewertet und auch aufgrund höherer Kosten nicht ausgewählt.

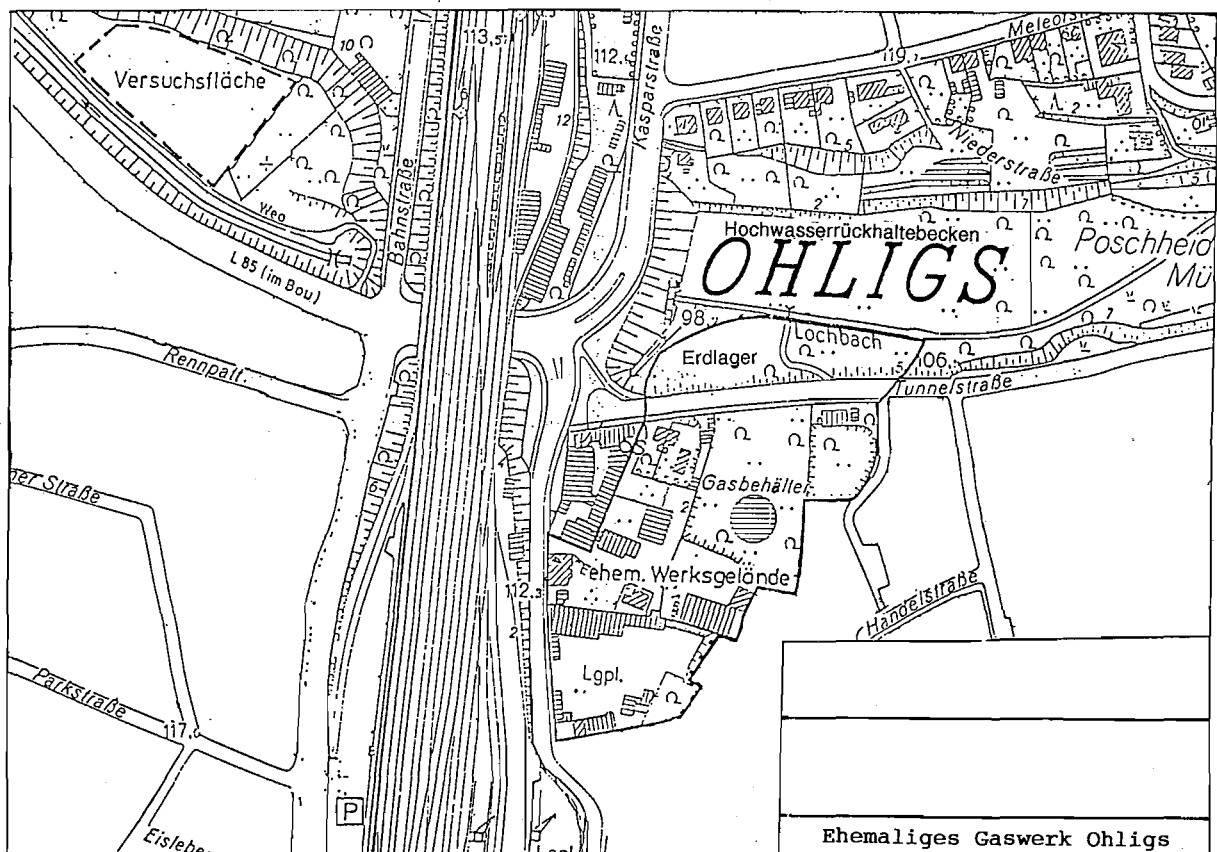
Eine Firma gab kein Angebot ab mit u.a. folgenden Begründungen:

1. "Der Boden ist relativ gering belastet.
2. Der Boden ist schwach belebt.
3. Die vorkommenden PAK gehören im wesentlichen zu den länger-kettigen (Anm. richtig: mehrringige) PAK, die praktisch wasserunlöslich sind und somit einem mikrobiologischen Abbau nicht bzw. nur schwer zur Verfügung stehen.
4. Eine mikrobiologische Reinigung wird u.E. unverhältnismäßig lange dauern."

3.4 Vorbereitung des Versuchsbodens

Im Hochwasserrückhaltebecken (ehemalige Kläranlage) mit einer Kontamination von Σ EPA-PAK <200 mg/kg wurde im Oktober 1989 ein Teilbereich mit einer Belastung von 17 bis 189 mg/kg bis zu einer Tiefe von ca. 0,5 m ausgekoffert. Das abgetragene Material (etwa 1.200 m³) wurde im südlichen Bereich der Teilfläche zu einem Erdlager aufgeschichtet, aus dem von der Seite der Boden für die Versuchsteilnehmer entnommen wurde (Bild 8).

Bild 8: Übersicht ehemaliges Gaswerk Solingen-Ohligs



Die Sanierungsuntersuchung ergab, daß der Boden räumlich in vier verschiedene Kontaminationsbereiche aufgeteilt werden konnte (Bild 9). Auskoffern und Ausschachtung erfolgten auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchungen.

Nach Aufbau des Erdlagers wurden mittels Rammkernsondierung 6 Mischproben aus der Miete gewonnen und auf PAK und BTX analysiert. Eine Mischprobe aus den 6 entnommenen Bodenproben wurde zusätzlich auf Cyanide, Phenol_(ges)Index, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom und Quecksilber untersucht. Die Ergebnisse wiesen eine PAK-Belastung zwischen 65,7 und 105,7 mg/kg TS auf. Die festgestellte Benzo(a)pyren-Belastung lag zwischen 7,8 und 16,1 mg/kg TS. Die anderen Belastungen waren nicht relevant.

Bei der Zuteilung der Bodenpartien für die Versuchsdurchführung wurde der Boden seitlich entnommen, so daß jedem Teilnehmer Boden aus allen Bereichen zur Verfügung gestellt wurde (Bild 10). Durch dieses Verfahren wurden die bestmögliche Homogenisierung und Vereinheitlichung der Schadstoffbelastung für alle Versuchsteilnehmer erreicht.

Die Bodenaufbereitung, d.h. Einmischung der Substrate, Auslesen von Störstoffen fand im Hochwasserrückhaltebecken statt. Anschließend wurde der für die Versuchsdurchführung aufbereitete Boden im Zeitraum Ende Juni und Anfang Juli 1990 im angefeuchteten Zustand und z.T. unter Planen abgedeckt zur ca. 1 km entfernten Versuchsfläche transportiert und dort der Behandlungstechnik entsprechend aufgebaut (Bild 11).

Während der Bodenaufbereitung wurde ein Teil des Stroh/Pilz-Substrates der Firma Preussag Noell Wassertechnik GmbH nach Angaben der Firma durch starke Regenfälle beschädigt, so daß die Firma nur noch ca. 140 m³ Boden anstelle der zugeteilten 200 m³ Boden für den Versuch einsetzen konnte.

Als einzige Firma sortierte die Firma Umweltschutz Nord bindige Bodenanteile und Steine weitgehend aus, so daß lediglich ca. 93 % des ursprünglich zur Verfügung gestellten Bodens in die Miete eingebracht wurde.

Bild 9: Vorbereitung des Versuchsbodens, Kontaminationsbereiche (Cirkawerte)

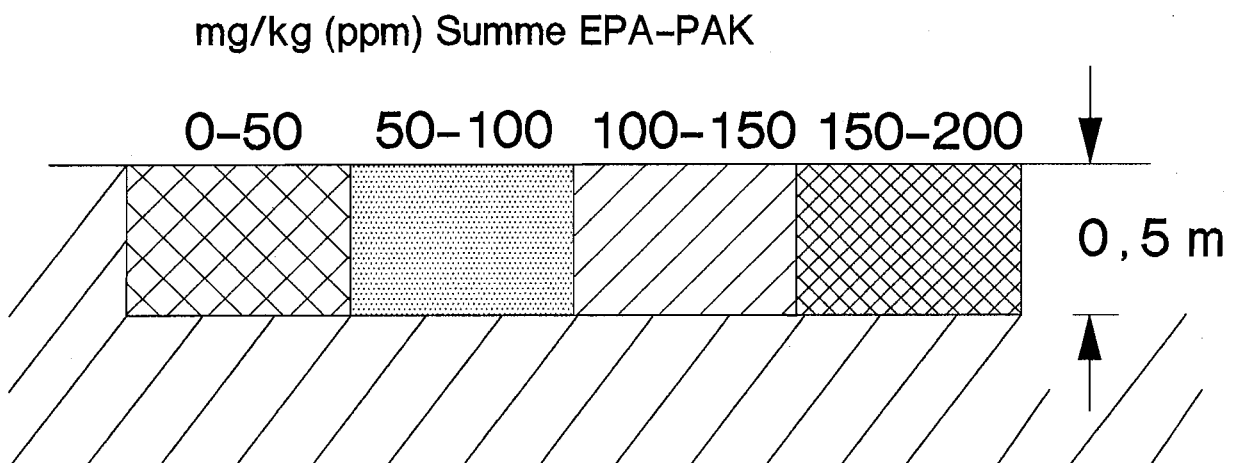
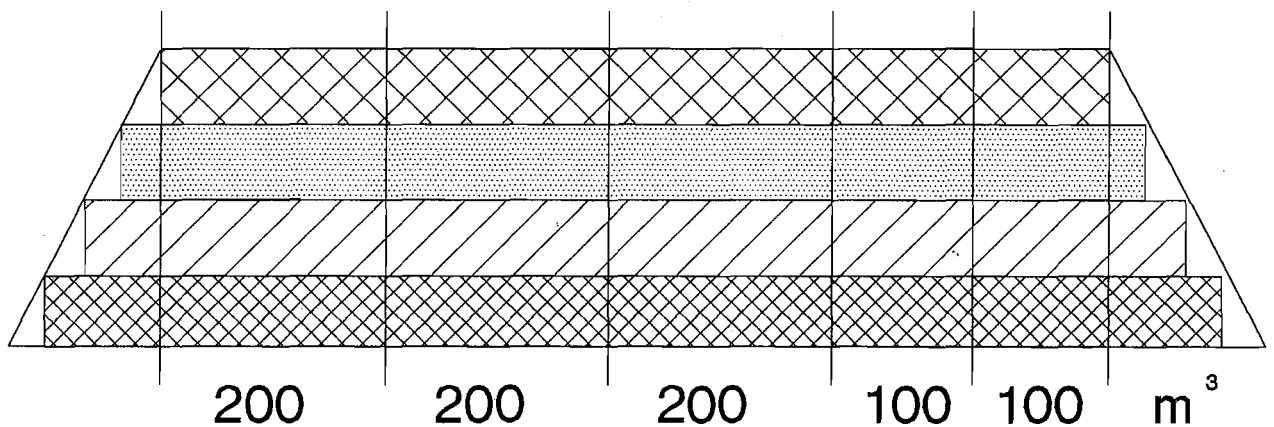


Bild 10: Aufschüttung des Aushubs in Lagen nach Auskoffnung der einzelnen Kontaminationssegmente



3.5 Klima- und Wettersituation

Die Temperatur- und Niederschlagswerte während der Auskofferungszeit sowie während der gesamten Sanierungsdauer von 17 Monaten sind dem Balkendiagramm zu entnehmen (Abb. 1).

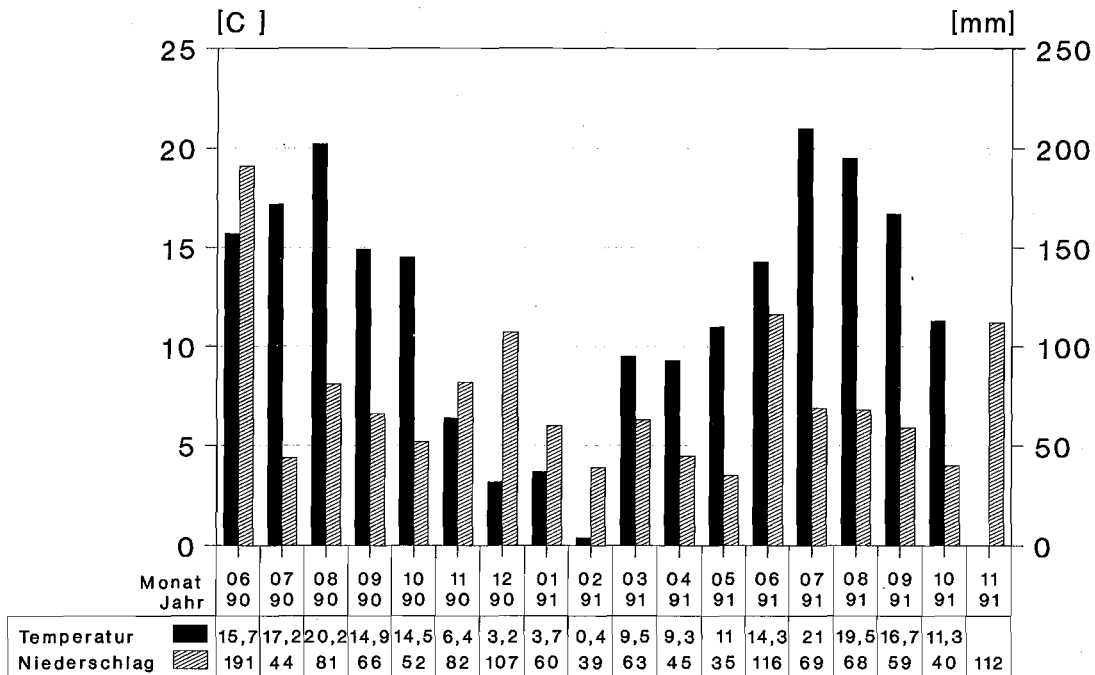
Es ist zu erkennen, daß in der Auskofferungszeit Juni 1990 der Niederschlagsmittelwert den absolut höchsten Wert in der Sanierungsperiode erreichte. Diese starken Regenfälle riefen zwar keinen Einstau im Hochwasserrückhaltebecken hervor, behinderten jedoch die Firma PNW beim Vorbereiten des Versuchsbodens.

Die starke Frostperiode Anfang Februar 1991 ließ eine Kontrollbeprobung nicht zu, da die offenen Mieten der Stadt Solingen und der Firma CB durchgefroren waren. Aufgrund des starken Bewuchses auf der Kontrollmiete war diese nur oberflächennah gefroren.

Starke Schneefälle Ende Februar 1991 und damit verbundene hohe Dachlasten bei den eingehausten Mieten verursachten Schäden sowohl am Zelt als auch am Folientunnel. Ansonsten waren die eingehausten Mieten keinen Witterungseinflüssen ausgesetzt. Vielmehr entwickelte sich in den Zelten ein eigenes Kleinklima, das besonders in den Sommermonaten zum Teil die Belüftung der Zelte notwendig machte.

Abb. 1: Temperatur- und Niederschlags-Monatsmittelwerte von 06.1990 bis 11.1991

Temperaturwerte und Niederschläge (Monatsmittel)



4. Durchführung der Feldversuche

4.1 Vorbereitung der Versuchsfläche

Alle Versuchspartellen wurden mit einer Untergrundabdichtung versehen. Als Abdichtungsmaterial wurde eine 2,5 mm HDPE-Folie verwendet, die den Anforderungen der "Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen des Landes NRW" entspricht. Die einzelnen Dichtungsbahnen werden durch Extrusionsschweißverfahren miteinander verbunden. Für die Dichtungsfolie, das Schweißverfahren und die Schweißnähte wurden Eignungszeugnisse bzw. Prüfberichte von der ausführenden Fachfirma vorgelegt. Auf allen Versuchspartellen wurde auf das hergestellte Planum zum Schutz der Dichtungsfolie vor mechanischer Zerstörung eine 10 cm starke Sandausgleichsschicht aufgebracht. Auf dieser Sandausgleichsschicht wurde die Folie verlegt.

Die nicht überdachten Mieten der Stadt Solingen, der Caro Biotechnik GmbH (CB) und der Kontrollmiete waren mit einem 2 %igen Gefälle hergestellt worden. Über dieses Gefälle wurden die Versuchspartellen in einem auf der Schmalseite der Miete angeordneten Sickerwassersammelgraben entwässert. Die Sickerwassersammelgraben hatten ein Fassungsvermögen von ca. 60 m³.

Zum Schutz gegen mechanische Zerstörung der Abdichtungsfolie auf der Versuchsfläche der Umweltschutz Nord GmbH wurde die Folie durch den Auftrag von 30 cm nicht kontaminiertem Verfüllboden geschützt. Diese zusätzliche Schutzmaßnahme war erforderlich, da der Versuchsboden auf dieser Parzelle während der Versuchsdurchführung intensiv maschinell bearbeitet wurde.

Auf dem Versuchsgelände wurde ein Fahrzeugwaschbecken angelegt. Zur Stromversorgung war ein Stromübergabekasten installiert. Es standen Drehstrom mit 380 V und Wechselstrom mit 220 V zur Verfügung. Des weiteren wurde zur Ableitung der Sickerwässer und des Waschwassers, das aus der Waschanlage zur Reinigung von Schuhwerk und Fahrzeugreifen stammte, ein Abwasseranschluß installiert. Um die Versuchsfläche wurde ein 2 m hoher Zaun errichtet (Bild 11).

Bild 11: Feldversuche biologische Sanierungsverfahren

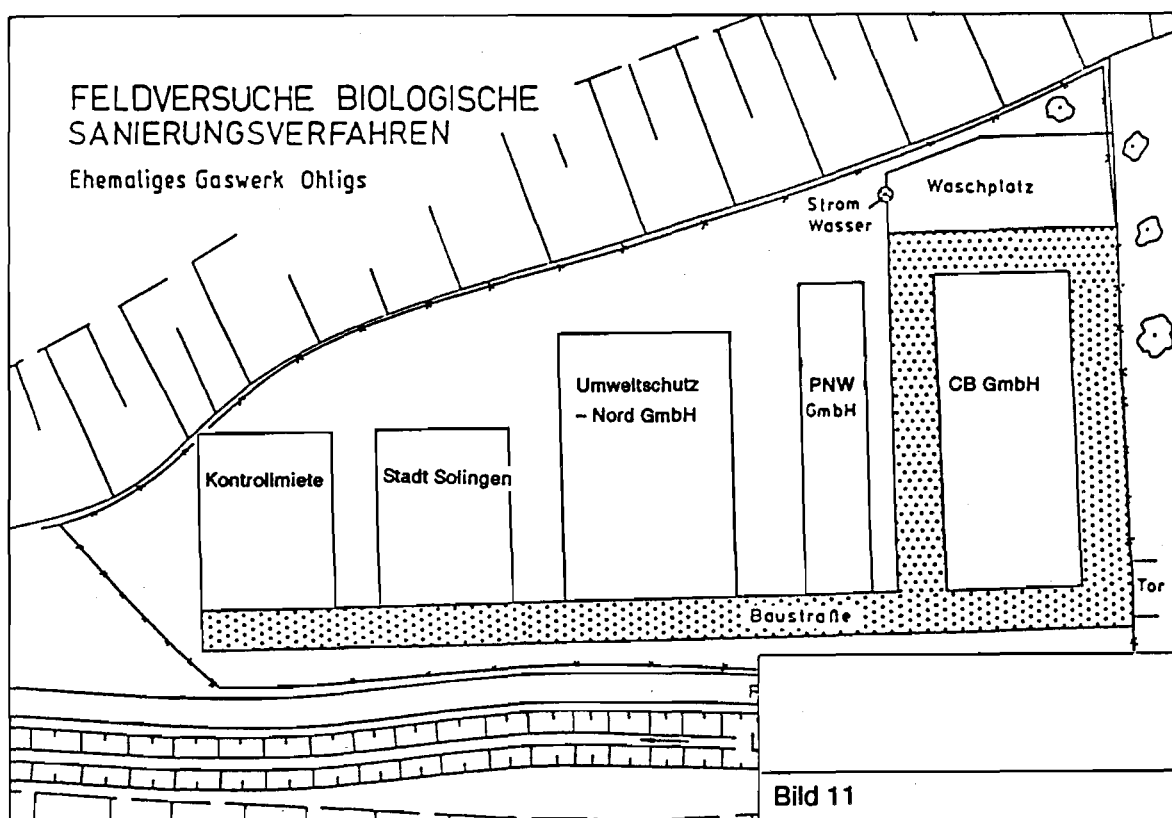


Bild 11: Feldversuche biologische Sanierungsverfahren

4.2 Mietenaufbau

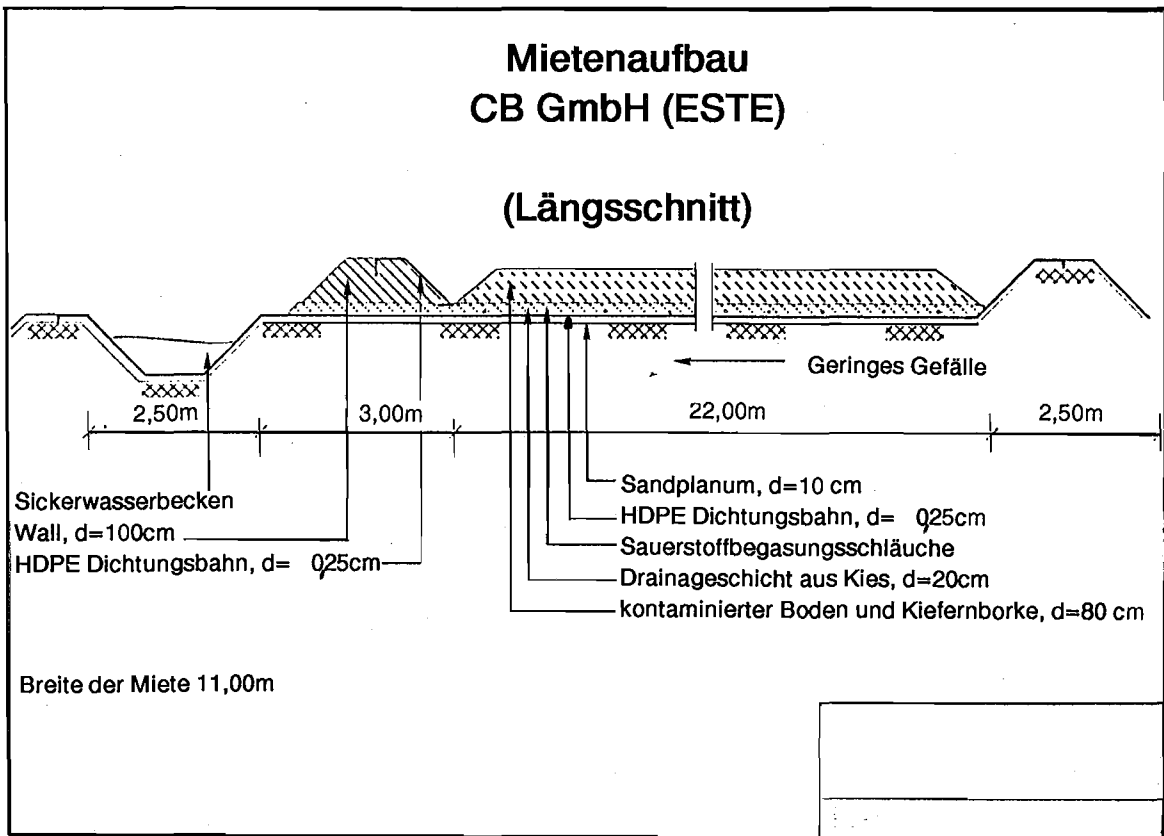
Den Firmen wurden für die Versuchsdurchführung jeweils ca. 200 m³, der Stadt Solingen und für die Kontrollmiete lediglich 100 m³ Boden zur Verfügung gestellt.

Der Aufbau der Versuchsmieten ist nachstehend dargestellt. Angaben zur Betriebsführung sind Kap. 4.3 zu entnehmen.

Caro Biotechnik GmbH, CB (ehemals ESTE GmbH)

Es handelte sich hierbei um eine ca. 0,8 m hohe nicht überdachte Miete. Der Boden wurde unter Zugabe von ca. 2,5 Gew.-% Strukturmaterial ("Bioreg Universalbinder", im wesentlichen Kiefernborke) eingebaut. Dieses Strukturmaterial war durch Prüfzeugnisse spezifiziert. In den Sommermonaten 1989 erfolgte eine wöchentliche Belüftung des Bodens durch Bearbeitung mit einem Spatengerät. An den Rändern der Miete befand sich eine Sprinkleranlage zur Bewässerung des Bodens in Trockenzeiten.

Bild 12: Mietenaufbau CB GmbH

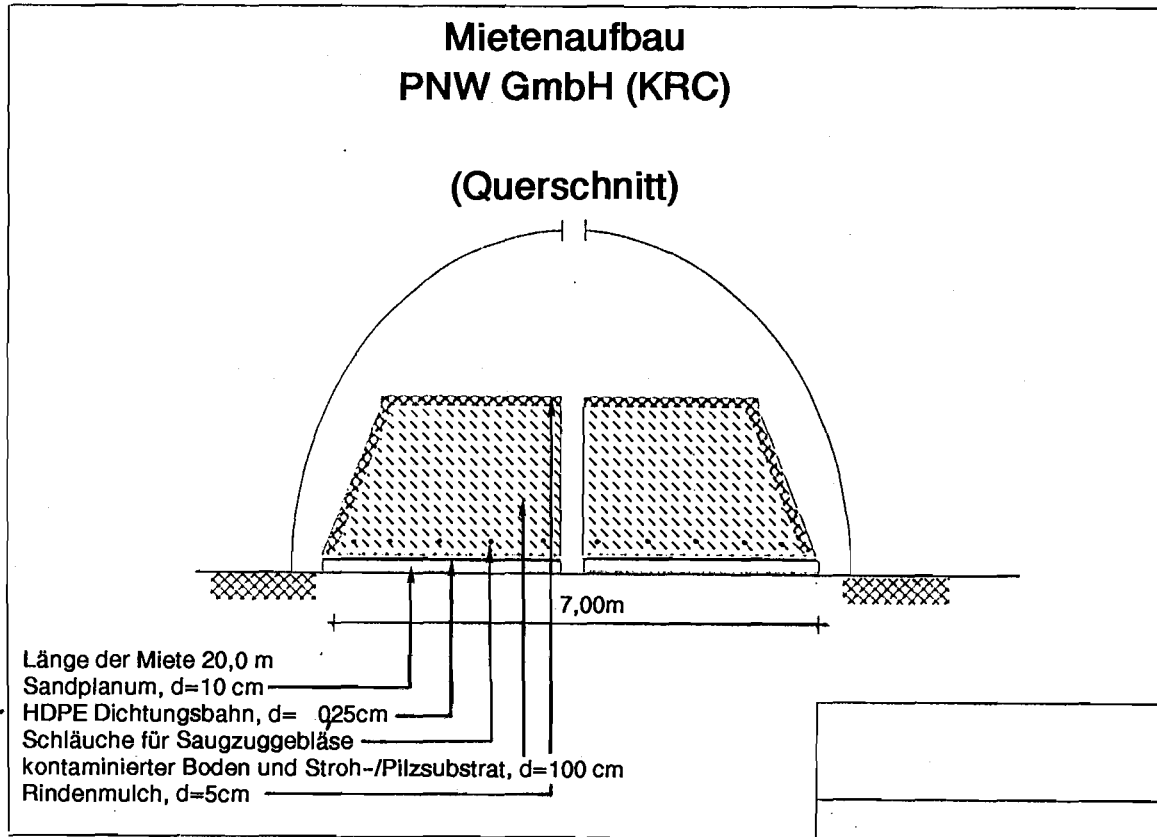


Preussag Noell Wassertechnik GmbH, PNW (ehemals KRC GmbH)

Es handelte sich hierbei um eine ca. 1,0 m hohe mit einem Folientunnel überdachte Miete. Dieser Folientunnel war zum Schutz vor zu starker Sonneneinstrahlung mit einem Tarnnetz abgedeckt. Dem kontaminierten Boden wurden im Hochwasserrückhaltebecken ca. 13 Gew.-% Stroh/Pilz-Substrat zugemischt. Nach Aufbau der Miete wurden diese mit einer 5 cm Rindenmulch-Schicht überdeckt.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Firmen stand PNW nur 140 m³ Boden für die Versuchsdurchführung zur Verfügung.

Bild 13: Mietenaufbau PNW GmbH



Umweltschutz Nord GmbH, UN

Die Homogenisierung des Versuchsbodens und die Zumischung des Strukturmaterials (Biosubstrat BSMN, hauptsächlich bestehend aus Rindenmulch) erfolgte im Hochwasserrückhaltebecken. Es handelt sich bei dieser Miete um eine ca. 1,5 m hohe mit einer Zeltkonstruktion überdachte Miete. Der Boden wurde unter Zuhilfenahme eines "Maulwurfs" unter gleichzeitiger Zugabe von ca. 10 Gew.-% Strukturmaterial homogenisiert. Bei der Homogenisierung wurden ca. 7 % des Einsatzmaterials, wie Steine, Holz etc., als nicht verarbeitbar abgetrennt.

Stadt Solingen, SO

Der Boden für die Miete der Stadt Solingen wurde im Hochwasserrückhaltebecken mit ca. 30 Vol.-% Kompost, bestehend aus Grünschnitt und Biomüll, aus der stadteigenen Kompostierungsanlage versetzt. Nach dem Aufbau wurde die Miete mit tiefwurzelndem Klee eingesät. Die Möglichkeit einer Be- und Entlüftung der Miete war durch Einbau von Drainage

Bild 14: Mietenaufbau Umweltschutz Nord GmbH

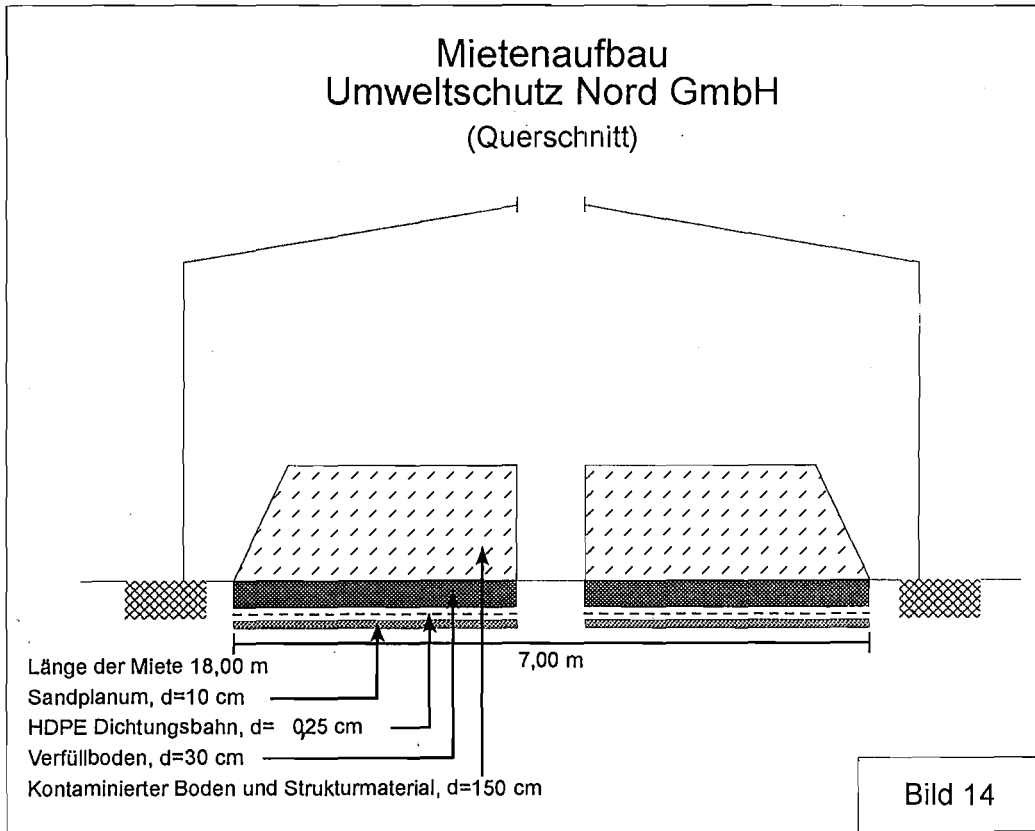
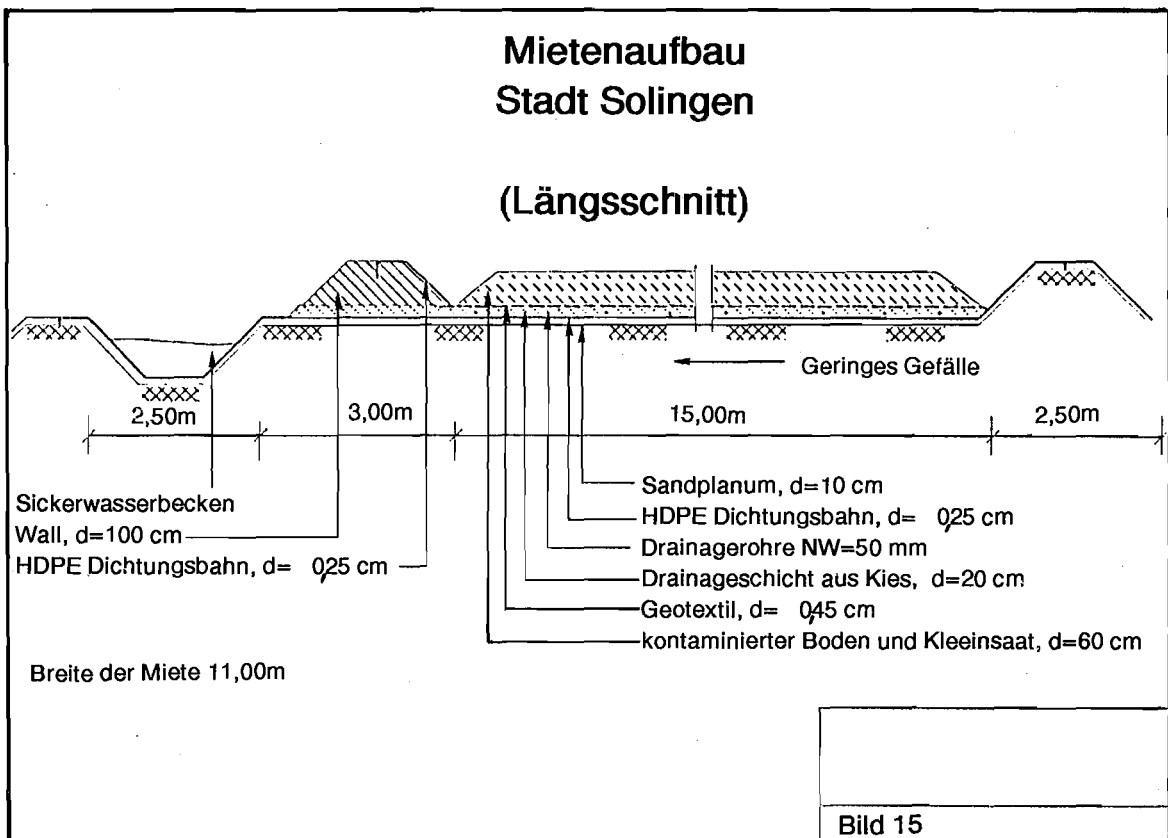


Bild 15: Mietenaufbau Stadt Solingen



rohren gegeben. Von dieser Möglichkeit wurde jedoch kein Gebrauch gemacht. Im August 1990 wurde die Miete versehentlich maschinell umgepflügt. Im Juni 1991 fand eine Tiefenauflockerung per Hand statt, und die Miete wurde mit Landsberggeremenge eingesät.

Kontrollmiete, KO

Hierbei handelt es sich um eine ca. 0,6 m hohe nichtüberdachte Miete. Bei dem Boden handelt es sich um den gleichen wie bei den anderen Versuchsteilnehmern. Der Kontrollmiete wurde kein Strukturmaterial zugegeben. Es fand auch im Sanierungszeitraum keine Bearbeitung dieser Miete statt. Die Miete begrünzte sich selbst und war bereits im 1. Winter dicht bewachsen. Diese Miete wurde als Referenzobjekt zu den anderen 4 behandelten Mieten aufgebaut.

4.3 Betrieb der Mieten

Der Mietenbetrieb wurde im August 1991 und im Dezember 1991 (Abschluß der Feldversuche Ende November 1991) bei den Firmen abgefragt. Fragen und Antworten sind nachfolgend zitiert. Widersprüchliche Angaben wurden nicht korrigiert, da die Richtigstellung dieser Aussagen keinen Einfluß auf die Bewertung der Feldversuchsergebnisse hat. Die Stadt Solingen wurde zum Betrieb ihrer Miete im Dezember 1991 nicht mehr befragt, da Fragen für das Solinger Verfahren nicht zutreffend waren. Folgende verfahrenstechnische Daten wurden im August 1991 abgefragt:

- Separierung des Bodens
- Homogenisierung des Bodens und Zuschlagsstoffe
- Wasserzugabe
- Nährstoffzugabe
- Wendetermine
- Besonderheiten in der Verfahrensdurchführung
- Firmeneigene Beprobung
- Firmeneigene Analytik

Separierung des Bodens

CB	PNW	UN	SO	KO
keine	keine	Absiebung von größeren Bestandteilen wie Steine, Holz, Metalle etc. (ca. 7 % des Einsatzmaterials)	keine	keine

Homogenisierung des Bodens mit den Zuschlagsstoffen

	CB	PNW	UN	SO	KO
Zuschlagstoff	(Bioreg) Kiefernborke ca. 2,5 Gew.-%	Stroh-Pilzsubstrat ca. 13 % Gew.-%	Stroh/Borke ca. 10 % Gew.-%	Kompost 30 Vol.-%	keine Homogenisierung erforderlich
Verfahren	3 x Durchmischung von Boden und Substrat mit einem Tiefenbelüfter	mit Hilfe eines Häckslers auf dem Gelände d. Hochw.-Beckens in den Boden eingearbeitet	mit Hilfe des Großgerätes "Maulwurf" homogenisiert. Gleichzeitig werden Mikroorganismen und Dünger zugegeben.	mit Hilfe eines Häckslers auf dem Gelände des HWR-Beckens in den Boden eingearbeitet	

Wasserzugabe

	CB	PNW	UN	SO	KO
Datum	aus Sickerwasserbecken 07.08.90 31.10.90 10.04.91 keine Wasserzugabe nach dem 10.04.1991	Juli-Dez. 90 1.800 l Juli-Aug. 91 2.400 l Sept.-Nov. 91 7.200 l	über Tankwagen 12.09.90 18.10.90 11.12.90 30.01.91 10.04.91 07.06.91 .	August 90	-
Menge	n.b.	Σ 11,4 m ³	Σ 20 m ³	n.b.	

Nährstoffzugabe

	CB	PNW	UN	SO	KO
Datum	September 90 11.04.91	Mitte Mai 91	15.07.90 18.10.90	keine Nährstoffzugabe	keine Nährstoffzugabe
Art	Stickstoff Phosphat Mineralien/ Vitamine/ Indikatoren Verhältnis C:N:P 250/10/3 in fester und flüssiger Form	Blaukorn	Kalium: 1.815 g Natrium: 1.238 g Calcium: 609 g Magnesium: 35 g Stickstoff: 780 g Phosphor: 3.210 g Schwefel: 95 g Chlor: 22 g Spurenelemente: 300 ml Vitaminlösung: 30 ml		
Menge	n.b.	ca. 4 kg			

Wendetermin

CB	PNW	UN	SO	KO
monatl. Wendung Juli 90-Sept.90 Zeitraum Okt. 90 - März 91 April 91 - Okt.91 wöchentliche Lockerung	keine Wendeterminen	12.09.90 18.10.90 11.12.90 30.01.91 10.04.91 07.06.91 14.08.91 15.10.91 29.11.91 07.01.92 23.01.92 05.03.92 12.05.92	1. Irrtümliche Wendung August 90 2. Wendetermin Juni 91	keine Wendeterminen

Besonderheiten

CB	PNW	UN
<p>O₂-Begasungsanlage - ca. 264 m O₂-Leitungsschläuche</p> <p>Die Anlage nahm am 08.01.91 den Betrieb auf. 8,2 sec lang wird begast mit einer anschließenden Pause von 14,51 min. Ca. 120 m³ O₂ wird pro Monat eingeblasen; das entspricht ca. 1 Bündel O₂-Flaschen pro Monat</p>	<p>Zwangsbelüftung mittels Saugzuggebläse und Reinigung der Abluft durch einen Aktivkohlefilter</p> <p>Laufzeit des Gebläses: von Juli 90 - Juni 91 ca. 1.200 h, daraus ergibt sich ein Belüftungsvolumen von ca. 144.000 Nm³ Luft. Die Saugentlüftung erfolgte während der warmen Monate aufgrund der hohen Temperaturen oberhalb der Mierte (bis zu 79 °C) nur in der Nacht</p>	<p>Die Mierte wird mit einer Spezialmaschine "Wendy" aufgelockert und mit Wasser, Nährstoff und Mikroorganismen versorgt.</p> <p>Im Oktober 1990 (Versuchsdauer 4 Monate) wurde ein nicht ionisches Tensid in einer Konzentration von 0,166 g/mg FB als Lösungsmittel in das Beet eingearbeitet.</p>

Firmeneigene Probenahmen

	CB	PNW	UN	SO	KO
	<p>Probenahme 07.08.90 31.10.90 10.04.91 ab 04.06.91 Probenahme durch GERTEC</p>	<p>keine eigene Be- probung durchge- führt, Probe- nahmedaten sind identisch mit Probenahmedaten von GERTEC (Proben wurden von GERTEC genommen)</p>	<p>Probenahme 12.09.90 18.10.90 11.12.90 30.01.91 ab 04.06.91 Probenahme durch GERTEC</p>	<p>keine eigene Be- probung</p>	-
Verfahren	4-6 Pürckhauer- proben zu einer Mischprobe ver- arbeitet	s. Probenahme GERTEC	10 Proben werden als Mischprobe verarbeitet	s. Probenahme GERTEC	s. Probe- nahme GERTEC

Firmeneigene Analytik

	CB	PNW	UN
Verfahren	n-Hexan (LWA) in Anlehnung an DIN 38409 H13	10 g Boden 200 ml Cyclohexan 8 h Heißsoxhlet	n-Hexan (LWA) in Anlehnung an DIN 38409 H13
Besonderheiten bei Analytik	7. Probe beprobt nach 3 ver- schiedenen Verfahren	-	-
Σ PAK in mg/kg TS (EPA)	57,39 n-Hexan = LWA 65,24 Cyclohexan/Toluol=LAGA 64,28 CH ₂ Cl ₂ (Dichlormethan)/ 15 min Ultraschall		
Benzo(a)pyren im mg/kg TS	6,15 n-Hexan = LWA 4,90 Cyclohexan/Toluol=LAGA 8,51 CH ₂ Cl ₂ (Dichlormethan)/ 15 min Ultraschall		

Fragen zum Mietenbetrieb an die Firmen im Dezember 1991:

Frage: Wurde der Boden im Sanierungszeitraum Juni/Juli 1990 - November 1991 in irgendeiner Art und Weise zusätzlich aufbereitet?		
CB	PNW	UN
Im Sanierungszeitraum (Jun./ Jul.1990 bis Nov.1991) erfolg- te lediglich eine wöchent- liche Lockerung des Bodens.	NPK Düngung	Der in der Miete befindliche Boden wurde von dem Spezial- wender von Umweltschutz Nord an folgenden Terminen gewen- det: Juli, Sept., Okt., Dez. '90, Jan., Apr., Jun., Aug., Okt. und Nov. 1991. Durch diesen Prozeß wurde der Boden jedesmal homogenisiert und Bodenagglomerate dadurch mechanisch zerstört.
Frage: Wurden in diesem Zeitraum weitere Zuschlagstoffe hinzugegeben?		
Neben der Zugabe von adap- tierten Mikroorganismen zur Verbesserung der Organis- menpopulation erfolgte die Zugabe von Nährsalzen sowie der erforderlichen Vitamine und Spurenelemente.	nein	Während der Wendeprozesse wurden dem Boden insgesamt an Nährstoffen hinzugefügt: Kalium 3.600 g, Natrium 2.500 g, Calcium 1.200 g, Magnesium 70 g, Stickstoff 3.000 g, Phosphor 6.400 g, Schwefel 200 g, Chlorid 40 g, Spurenelemente 660 ml, Vitaminlösung 60 ml.

Frage: Nach welchen Kriterien wurde die Wasserzugabe geregelt? Welcher Feuchtegehalt stellte sich dabei ein?		
CB	PNW	UN
Die Wasserzugabe erfolgte anhand der organoleptischen Begutachtung des Bodenmaterials. Dabei stellte sich ein durchschnittlicher Feuchtegehalt von 20 % ein.	Wasserzugabe abh. vom Feuchtegehalt des Bodens. Einstellung der Feuchte auf ca. 30 %.	Nach Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapaz. wurde ein Feuchtegehalt eingestellt, der zwischen 60 und 70 % der maximalen Wasserhaltekapaz. lag. Dies entspricht ca. 20 - 25 % Wasser bezogen auf die Trockensubstanz. Zum Ausgleich für Verdunstungsverluste wurden über den gesamten Zeitraum ca. 20 m ³ Wasser dem Boden hinzugefügt.
Frage: Welche Untersuchungen führten Sie durch, um die Nährstoffzugabe zu regeln?		
Zur Regelung der Nährstoffzugabe erfolgte die Messung der für den Abbau erforderlichen Nährstoffe im Eluat mit an den deutschen Einheitsverfahren ausgerichteten naßchemischen Methoden.	Untersuchung Fa. Trautmann.	Es wurden Gesamtkohlenstoff, Gesamtstickstoff, Nitrat, Ammonium und verfügbares Phosphat bestimmt.
Frage: Haben Sie Untersuchungen zum Mikroorganismenbesatz durchgeführt?		
Zur Überprüfung der Organismenpopulation im Boden wurden selektive Nährböden eingesetzt, die mit verschiedenen Verdünnungsstufen einer Aufschwemmung des Bodenmaterials beimpft wurden. Die Keimzahl der an den Abbau von PAK adaptierten Mikroorganismen betrug bei den jeweiligen Probenahmen im Durchschnitt $1,45 \times 10^{10}$ K/kg naturfeuchtem Boden bei einer Gesamtorganismendichte von $1,85 \times 10^{10}$ K/kg naturfeuchtem Boden.	Know-How	Die aeroben copiotropen Bakterien wurden in der Ausgangssubstanz und in den Optimierungsansätzen bestimmt. Die Bakterienzellzahl im Ausgangsboden lag mit $1,3 \times 10^4$ koloniebildende Einheiten pro g Trockensubstanz sehr niedrig. In der Optimierung erhöhte sich die Zellzahl auf $2,1 \times 10^7$ koloniebildende Einheiten.

Frage: Können Sie Aussagen zur Bioverfügbarkeit in Ihrer Miete treffen?		
CB	PNW	UN
nein	nein	Die abbaubende Mikroflora metabolisiert nur soviel Kohlenwasserstoffe wie in wässriger Phase vorliegen. Eine feste Bindung der Schadstoffe an die Bodenmatrix verzögert somit den Abbauprozess. Im vorliegenden Fall ist die Bioverfügbarkeit herabgesetzt durch eine Bindung der PAK an feine Schlackenanteile und Tonaggregate. Dies erklärt sich aus der Herkunft des Materials. Die im Lochbachtal vorhandenen Kontaminationen entstammen vermutlich dem Hauptkontaminationsbereich des Gaswerkes. Sie sind dort im Laufe der letzten 50 Jahre ausgespült und im Bereich des Lochbachtals an den Tonmineralien und Feinschlacken wieder gebunden worden. Durch zeitweise auftretende Überschwemmung wurden die leicht verfügbaren PAK wieder gelöst und erneut ausgeschwemmt. Das hier zu sanierende Material enthält somit überwiegend sehr fest an die Bodenmatrix adsorbierte Polycyclen.
Frage: Bitte geben Sie die Mieten-Wendetermine nach dem Zeitraum April 1991 an. Welches Verfahren setzen Sie dabei ein?		
Von Apr. 1991 bis Okt. 1991 erfolgte eine wöchentliche Bearbeitung des Bodens mit einem Tiefenlockerer MM 50.	entfällt	Nach dem April 1991 wurde das gleiche Verfahren zum Umsetzen der Mieten eingesetzt wie im vorherigen Zeitraum. Die Termine im Jahre 1991 waren 10. April, 07. Juni, 14. Aug., 15. Okt. und 29. Nov.
Frage: Bitte geben Sie Ihre eigenen Probennahmetermine nach Juni 1991 an und stellen Sie die Ergebnisse vor.		
Nach Juni 1991 erfolgten 2 Probennahmen, und zwar am 12.08.1991 und am 09.10.1991.	keine eigene Beprobung	Die Probennahmetermine sind identisch mit den Wendeterminen (s. Seite 4.9)

Frage: Wie erfolgt Ihre eigene Probennahme (Gerät, Anzahl, Entnahmetechnik, Entnahmeraster, Entnahmetiefe, Homogenisierung, Probentransport etc.)?		
CB	PNW	UN
Die Probennahme erfolgte mit Hilfe einer Pürkhauerstange. Es wurden insgesamt 8 Proben an gleichmäßig über der Miete verteilten Stellen bis zu einer Tiefe von 80 cm gezogen. Die Proben wurden zu einer Mischprobe vereinigt, homogenisiert und mittels PKW zum Labor transportiert.	keine eigene Beprobung	Die Probennahme erfolgte mit einem Hohlmeißelbohrer (Pürkhauer Bohrstock). Gemäß einem Probenzugplan werden an 10 Stellen Einstiche vorgenommen, die Material aus verschiedenen Tiefen der Miete enthalten. Diese 10 Einstiche werden zu 4 Mischproben vgreinigt, so daß für je 50 m ³ Boden eine Mischprobe repräsentativ ist. Die Homogenisierung der Mischproben erfolgt im Labor. Der Probentransport wurde i.d.R. direkt im Anschluß ab die Probenahmen im Sommerhalbjahr gekühlt.
Frage: Wieviele Stunden nach der Probennahme erfolgte die Analytik? Wie wurden die Proben gelagert?		
Die Analytik erfolgt 48 h nach der Probennahme. Die Proben wurden während dieser Zeit kühl gelagert.	Von der Firma GERTEC gezogene Proben per Kurierdienst zugestellt und an das Labor in Taunusstein weitergeleitet. Zeitraum ca. 1 Woche, Lagerung nicht bekannt.	Die Aufbereitung mit anschl. Analytik erfolgt i.d.R. innerhalb von 24 h, max. innerhalb 72 h In diesem Zeitraum erfolgt die Lagerung bei Zimmertemperatur.
Frage: Wie wurden die Proben im Labor vorbereitet?		
Als Vorbereitung der Bodenproben erfolgt zunächst eine Homogenisierung. Anschließend wird der Boden gesiebt, so daß für die Messung des PAK-Gehaltes Bodenfraktionen von ca. < 2 mm vorliegen.	Proben von GERTEC wurden folgendermaßen analysiert: Institut Fresenius Taunusstein Cyclohexan, 8h Soxhlet, HPLC.	Zunächst wird die Probe grob zerkleinert und homogenisiert. Eine Durchschnittsprobe v. ca. 100 g wird fein zerkleinert. 15 g Probenmaterial wird mit 150 ml methanolischer Kalilauge verseift. Die verseifte Lösung wird 2 x mit je 70 ml Cyclohexan ausgeschüttelt. Die gewaschene Cyclohexanphase wird bei 40 °C am Rotationsverdampfer auf 25 ml eingeeengt. Nach weiteren Reinigungsschritten wird in Azetonitril überführt und die GC-Bestimmung durchgeführt.
Frage: Welche Parameter haben Sie neben der reinen PAK-Analytik zusätzlich analysiert?		
Neben der PAK-Analytik erfolgte die Messung der biologisch relevanten Parameter (pH-Wert und Nährstoffgehalt) im Eluat mit an den deutschen Einheitsverfahren ausgerichteten naßchemischen Methoden. Zusätzlich wurde der Trockensubstanzanteil der Bodenprobe bestimmt.	keine	Zusätzlich wurde die Bodenatmung, der Wassergehalt und an einigen Probennahmetermen auch der Gehalt an Cyaniden bestimmt.

Frage: Welchen Zusammenhang können Sie zwischen der mikrobiologischen Aktivität und der PAK-Wiederfindungsrate feststellen?		
CB	PNW	UN
Dieses sollte Thema der Grundlagenforschung sein.	spez. Solingen keine Angaben ansonsten: höhere mikrobiolog. Aktivität -> mehr org. Säuren -> höhere Desorption.	Eine eindeutige Relation zwischen der Bodenatmung und der PAK-Wiederfindungsrate ist nicht festzustellen. Es gibt jedoch eine Tendenz im ersten 3/4 Jahr, wonach eine hohe Bodenatmung mit niedrigen PAK-Werten korreliert. Im darauf folgenden halben Jahr ist die Tendenz umgekehrt, PAK-Gehalt und Bodenatmung verlaufen nahezu parallel.
Frage: Was unternahmen Sie während des Sanierungszeitraumes, um den "PAK-Abbau" zu beschleunigen?		
Zur Induktion des Abbaus wurde der Boden mit Nährstoffen sowie den erforderlichen Vitaminen und Spurenelementen versorgt. Zur Verbesserung der Organismenpopulation wurden adaptierte Mikroorganismen zugesetzt. Damit eine ausreichende Versorgung des Bodens mit Sauerstoff gewährleistet war, wurde der Boden wöch. mit Hilfe eines Tiefenlockers aufgelockert.	Nährstoffzugabe vergl. 1	Durch das 6-wöchentliche Wenden der Bodenmiete soll ein mechanischer Aufschluß durch die Zerstörung der Bodenaggregate bewirkt werden. Verdunstungsverluste wurden mit insgesamt 20m ³ Wasser ausgeglichen. Das C-N-P Verhältnis wurde mehrfach neu eingestellt.
Frage: Welche Änderungen etc. haben sich aufgrund der Solinger Ergebnisse für Ihre Sanierungstechnik ergeben?		
Aufgrund der Solinger Ergebnisse sollte eine Verlängerung der Behandlungszeiten erfolgen.	Nach Zugabe der Pilze muß die Regenerationsmiete sofort aufgebaut werden. Durch den einspruchsbedingten Baustellenstillstand von über 1 Wochen kam es beim Transport des mit dem Pilz/Stroh-Substrat vermischten Versuchsbodens vom Hochwasserrückhaltebecken zur Versuchsfläche zur Zerstörung des bereits weitestgehend ausgebildeten Pilzmyzels. Dies hatte entscheidende Auswirkungen auf den Sanierungsverlauf und das Sanierungsergebnis.	Prinzipielle Änderungen der Sanierungstechnik von UN haben sich nicht ergeben, da mit dieser Technik flexibel auf Probleme reagiert werden kann. Aktuell laufende Laborversuche mit Boden aus der Versuchsmiete, bei deren erfolgreichem Verlauf die Ergebnisse aus dem Feldversuch übertragen und mit den nächsten Wendeterminen umgesetzt werden können. Als weitere Konsequenz des Feldversuches wird bei neuen Projekten der Frage nach der Bioverfügbarkeit der PAK noch stärker nachgegangen. Daraus resultiert in bestimmten Fällen eine Änderung des Aufschlußverfahrens.

Frage: Unter welchen Voraussetzungen halten Sie eine Fortführung der Feldversuche in Solingen-Ohligs für sinnvoll?		
CB	PNW	UN
Eine Fortführung der Feldversuche halten wir in jedem Fall für erforderlich und sinnvoll. Da die Ergebnisse in vollem Umfang publiziert werden, sollten öffentliche Fördermittel die Maßnahme unterstützen.	Kostenübernahme durch Dritten	Die Fortführung der Feldversuche in Solingen-Ohligs ist in jedem Fall sinnvoll. Die Frage der finanziellen Beteiligung bedarf noch weiterer Klärung. Ziel von UN ist, den Wert von 10 mg/kg Σ EPA-PAK bzw. 1 mg/kg BaP zu erreichen. Die Feldversuche bieten die Chance, Fragen der Analytik, der Grenzwerte, der Bioverfügbarkeit, der Metabolitenbildung und der Aussagefähigkeit mikrobiologischer Parameter zu untersuchen.

5. Versuchsbegleitende Untersuchungen

5.1 Probenahme

Bevor die einzelnen am Versuch beteiligten Firmen dem Boden ihr Substrat beimischten, wurden die Nullproben zur Ermittlung der Ausgangsbelastung gezogen. Die erste Probenahme erfolgte dann unmittelbar nach Aufbau der Mieten mit Ausnahme bei der Kontrollmiete. Im i.d.R. zweimonatigen Abstand wurde dann die weitere Beprobung durchgeführt. Insgesamt wurden in der Sanierungszeit von Juli 1990 bis Ende November 1991 11 Beprobungen vorgenommen (einschl. Nullprobenahme).

Bei der Probenahme wurden jeder Miete mit dem Pürkhauerhammer über die gesamte Höhe der Miete, max. jedoch 1 m, und über die gesamte Fläche 100 Einzelproben entnommen. Der Probennehmer orientierte sich dabei an einem imaginären Raster mit 50 Doppelprobenahmepunkten. Jeweils 50 Proben wurden in einem Gefäß mit Hilfe eines Rührwerkes zu einer Mischprobe homogenisiert. Damit standen je Miete 2 Mischproben zur Verfügung, denen wiederum je 2 Proben für die chemische Analyse entnommen wurden. Somit wurden pro Probenahmetermin und je Miete 4 Proben, über den Sanierungszeitraum von fast 1,5 Jahren 44 Proben (einschl. Nullprobe) chemisch analysiert. Die Proben wurden verschlüsselt an das Labor geliefert (Bild 16).

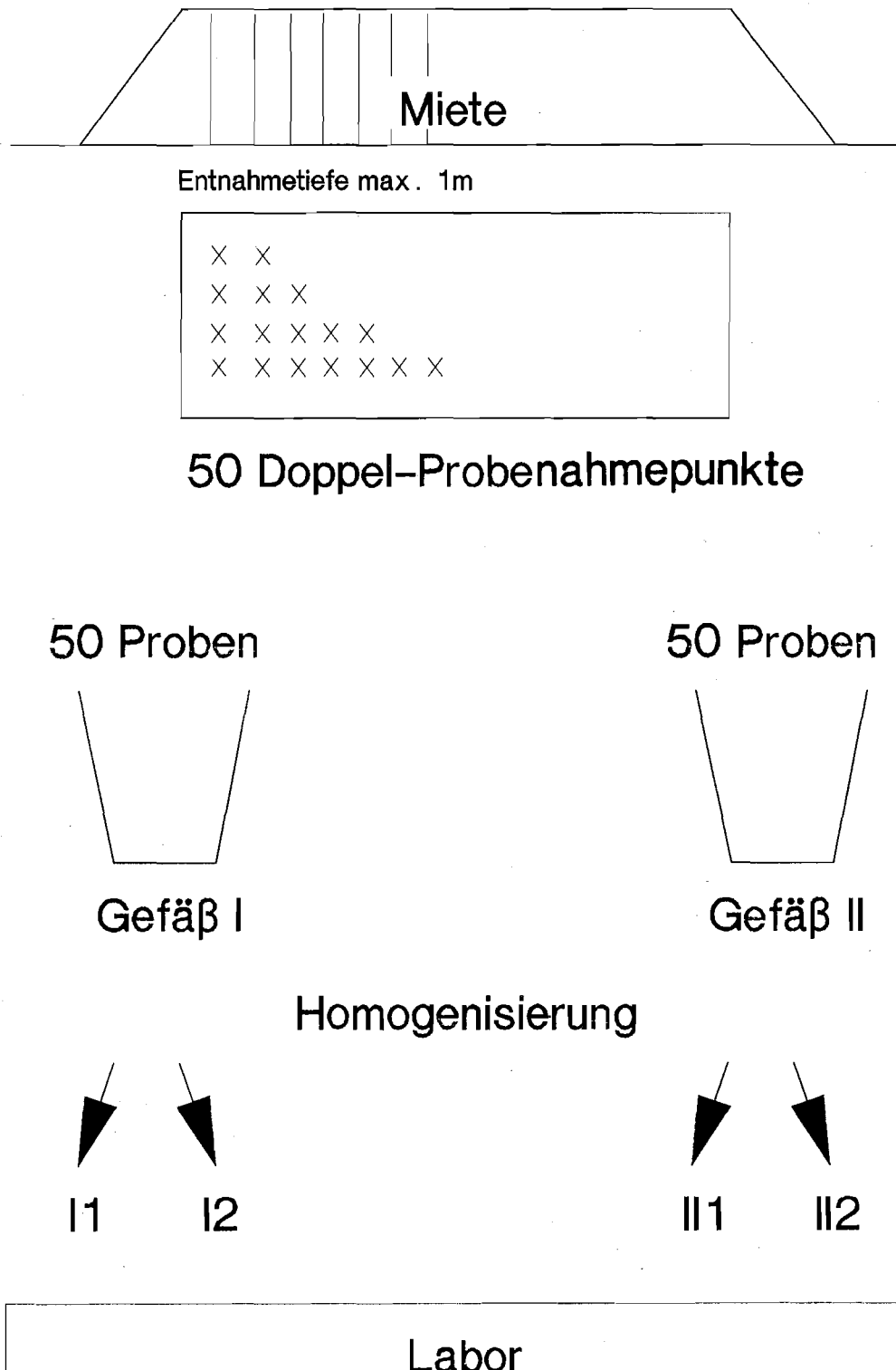
Diese Proben wurden in einem 750 ml-Glas mit Schraubdeckel verschlossen, verpackt und bei ca. +15°C Kellertemperatur über Nacht gelagert, um sie am nächsten Tag zum chemischen Labor Claytex nach Inden zu transportieren.

Aus dem Gefäß I und Gefäß II wurde nach Entnahme der Proben für die chemische Analytik eine Mischprobe erstellt und ebenfalls mit dem Rührgerät homogenisiert. Es wurde an-

schließlich je Miete eine Probe für die bodenkundliche Untersuchung und Bestimmung der mikrobiellen Aktivität, die von der Firma Trautmann durchgeführt wurde, und für die Keimzahlbestimmung, die von der Universität Wuppertal durchgeführt wurde, gezogen. Diese Proben wurden ebenfalls wie zuvor angeführt verpackt, gelagert und transportiert.

Ab April 1991 wurden zusätzlich Rückstellproben für die bodenchemische und bodenphysikalische Untersuchung zurückgestellt und bei - 25°C gelagert.

Bild 16: Probenahme, Homogenisierung, Kodierung für das Labor



5.2. Untersuchungsprogramm und -methodik

Die Untersuchungsmethoden sind nachfolgend in Tabellenform beschrieben.

5.2.1 Schadstoffanalytische Untersuchungen

5.2.1.1 Im Boden

Tabelle 7: Methoden der schadstoffanalytischen Untersuchungen im Boden

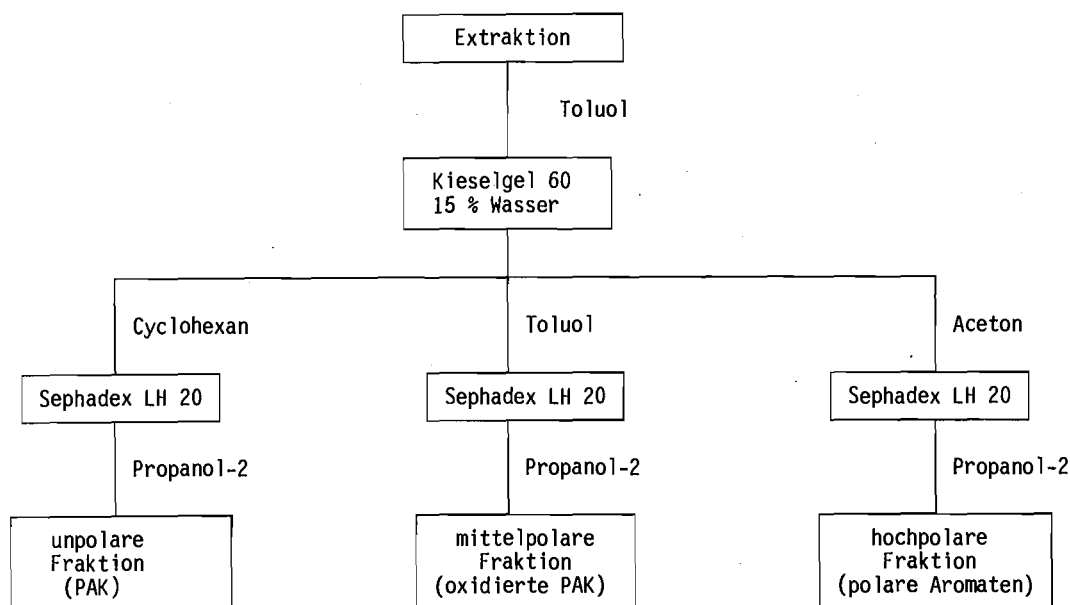
Stoffgruppe	Methode
EPA-PAK 16 Einzelsubstanzen und zusätzl. Benzo(e)pyren, Perylen	Extraktion mit Dichlormethan, 15 min. im Ultraschallbad, Messung an GC, Detektion am FID
Kohlenwasserstoffe	analog DIN 38409 H 18
EOX	analog DIN 38409 H 8
Cyanide	analog DIN 38405 D 13-1-3
Schwermetalle	Königswasseraufschluß gem. DIN 38414 S 7 (Messung von As und Hg am AAS gem. DIN 38405 D 18 und E 12, alle übrigen an ICP gem. DIN 38406 E 22)

Untersuchung auf mikrobielle Abbauprodukte von PAK

Im Rahmen der Feldversuche in Solingen-Ohligs über die Möglichkeiten des mikrobiellen Abbaus von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Bodenproben sollten dabei entstehende Abbauprodukte untersucht werden.

Die Probennahme erfolgte durch GERTEC. Insgesamt wurden 9 Proben im Dezember 1990 und im April 1991 9 Proben der Firma GfA Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster, zur Analyse auf mögliche Abbauprodukte übergeben. Das Labor ging dabei nach folgendem Fraktionierungsschema vor.

Bild 17: Verwendetes Fraktionierungsschema



5.2.1.2 Im Sickerwasser

Tabelle 8: Methoden der schadstoffanalytischen Untersuchungen im Sickerwasser

Stoffgruppe	Methode
TVO-PAK 6 Einzelsubstanzen	Extraktion mit Cyclohexan, Messung an HPLC mit Fluoreszenz-Detektor

Es wurden keine schadstoffanalytischen Untersuchungen im Eluat durchgeführt.

5.2.1.3 Bodenluftmessungen

Zu Beginn der Feldversuche wurden einmalig Bodenluftmessungen durchgeführt.

Tabelle 9: Methoden der Bodenluftmessung

Parameter	Methode
BTEX	Quantitative Bestimmung der Bodenluftspuren mittels GC-FID
CKW	GC-ECD

5.2.2. Bodenkundliche Untersuchungen

5.2.2.1 Im Boden

Tabelle 10: Bodenphysikalische Untersuchungsmethoden

Parameter	Methode
Wasserhaltevermögen	gravimetrisch
Korngrößenverteilung	Sieb/Pipettmethode, DIN 19683 Teil 2

Tabelle 11: Bodenchemische Untersuchungsmethoden

Parameter	Methode
C _{org}	nasse Veraschung analog DIN 19684 Teil 2
N _t	DIN 38406 H 11
pflanzenverfügbares Phosphat	Extraktion mit DL-Lösung analog VDLUFA-Methode
pflanzenverfügbares Kalium	Extraktion mit DL-Lösung analog VDLUFA-Methode
pflanzenverfügbares Magnesium	Extraktion mit 0,0125 M CaCl ₂ -Lösung analog VDLUFA-Methode
N _{min} (Nitrat, Ammonium)	Extraktion mit 0,01 M CaCl ₂ -Lösung analog VDLUFA-Methode
pH-Wert	H ₂ O und 0,01 M CaCl ₂ -Lösung analog DIN 19684 Teil 1

Tabelle 12: Bodenmikrobiologische Untersuchungsmethoden

Parameter	Methode
Bodenatmung	analog ISERMEYER 1952, 50 g Boden, 22 °C, 24 h
substratinduzierte Bodenatmung	analog ISERMEYER 1952, 50 g Boden, 22 °C, 24 h, Zusatz von 0,5 % Glucose
Dehydrogenase-Aktivität	analog CASIDA et.al. 1964, CASIDA 1977 (vgl. TABATABAI 1982, S. 937 - 940 und ALEF 1991, S. 106 - 116)

Bestimmung der Lebendkeimzahl im Boden

1 g Boden wurde im 10 ml Phosphat-Puffer (50 mM, pH 7,4) aufgenommen und suspendiert. Nach einminütiger Ultraschallbehandlung der Probe wurde von der Suspension eine Verdünnungsreihe erstellt und jeweils 0,1 ml auf Komplet-Agar (Nutrient Broth bzw. Malzextrakt) und Minimalagar ausplattiert. Die Minimalagar-Platten werden in einer Atmosphäre von Naphthalin inkubiert. Die Kolonien auf den Kompletmedien werden nach 2-tägiger Bebrütung bei 30°C ausgezählt, während die Auswertung der mit Naphthalin gewachsenen Kolonien nach 8 Tagen erfolgt.

Eine Untersuchung von durch die Firmen zugesetzten Spezialstämmen erfolgte nicht.

5.2.2.2 Im Eluat

Tabelle 13: Methoden der Untersuchungen von Nährstoffen, C_{org}, N_t und pH-Wert im Eluat

Parameter	Methode
Eluatherstellung	DIN 38414 S 4
TOC	DIN 38409 Teil 3
N _t	DIN 38406 H 11
Phosphat	DIN 38404 D 11
Kalium	DIN 38406 E 19-1
Magnesium	DIN 38406 E 3-1
Nitrat-N	DIN 38405 D 9-2
Ammonium-N	DIN 38406 E5-1
pH-Wert	Einstabmeßkette

5.2.3 Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit

Ziel war es, eine Erklärung für die ungenügende PAK-Abnahme im Sanierungszeitraum von 17 Monaten zu finden.

Mit den Untersuchungen wurde die DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Niederlassung Essen, im Dezember 1991 beauftragt. Eine repräsentative Probe aus der Kontrollmiete wurde am 03.12.1991 von der GERTEC zur Verfügung gestellt. Im Zeitraum Dezember 1991 bis Februar 1992 wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Überprüfung der biologischen Sanierbarkeit durch Abbauversuche unter optimierten Bedingungen und Zusatz von Spezialstämmen im Sapromaten (27tägige Behandlung)
- Charakterisierung der biologischen Ausgangssituation
 - Korngrößenanalyse
 - Gesamtzellzahlbestimmung
 - Bestimmung der biologischen Aktivität, gemessen als Sauerstoffzehrung im Sapromaten einschließlich der Prüfung der Aktivierbarkeit der standorteigenen Mikroorganismen
- Charakterisierung der Kontamination
 - Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes im Bodenmaterial
 - lichtmikroskopische Untersuchung des Bodenmaterials
 - Sink-/Schwimmscheidung
- Bestimmung der Toxizität nach DIN 39412, Teil 34
 - Herstellen von wässrigen Bodeneluaten in Anlehnung an DEV-S 4

5.2.4 Weitere PAK-Analytik

5.2.4.1 Firmeneigene Analytik

In der Versuchsdauer von 17 Monaten wurden im regelmäßigen Abstand eigene PAK-Analysen von den Firmen durchgeführt, wobei jedoch nicht die von Claytex verwendete Extraktion zur Anwendung kam.

Die angewandten Methoden der einzelnen Firmen sind auf Seite 4.10 "firmeneigene Analytik" dargestellt.

5.2.4.2 Ringanalytik

Aus Gründen der Qualitätssicherung entschied der Arbeitskreis auf dem Sitzungstermin von Oktober 1991, eine Ringanalytik durchzuführen. Jedem Versuchsteilnehmer wurde von jeder Miete eine Mischprobe zur Verfügung gestellt. Grundlage für das Analyseverfahren sollte die Vorgabe aus dem LWA-Entwurf des Landes NRW "Abfallwirtschaft Nr. 13" vom Dezember 1987 sein, auf dem auf Seite 37 - 45 folgendes Verfahren für die PAK-Analytik vorgegeben ist:

- Trocknung bei 110°C oder Lufttrocknung
- homogene Bodenprobe von 5 g mit wasserfreiem Natriumsulfat Na₂SO₄ verreiben
- Extraktion mit 100 ml Hexan in einer Soxhlet-Apparatur (NV = 30 ml)
- Trennung der PAK mit HPLC-Säulen
- Detektion mit einem Spektralfluorometer

Trotz dieser Vorgabe wurden von den Versuchsteilnehmern PNW, UN und vom Labor Claytex andere Methoden verwendet, die nachfolgend aufgeführt sind. Das für die Stadt Solingen arbeitende Analytische Labor Aachen (ALA) verwendete statt des HPLC den GC und FID zur PAK-Trennung.

Übersicht über die verwendeten Analysenmethoden

Firmenname	Labor	Methode
Caro Biotechnik GmbH (ehem. ESTE)	Lebensmittelchemie Untersuchungsanstalt Aachen	LWA-Vorgabe
Stadt Solingen	ALA	LWA-Vorgabe, jedoch GC-FID
Umweltschutz Nord GmbH	eigenes Labor	in Anlehnung an DIN 38 409 H13
Preussag Noell Wassertechnik GmbH (ehem. KRC)	Institut Fresenius	10 g Boden 200 ml Cyclohexan 8 h Heißsoxhlet
	Claytex	s.u.

Methodik der angewandten PAK-Analytik der Firma Claytex:

1. Nach Erhalt wurden die Proben bis zur Analytik bei -20°C gelagert; ein Zeitraum von 4 Wochen wurde nicht überschritten.
2. Da die Homogenität der Proben vorausgesetzt wurde, wurden unter Verzicht einer vorherigen Durchmischung mit einem Hohlspatel jeweils 20 g entnommen und in einem 250 ml Schraubdeckelglas mit Teflondichtscheibe überführt. In diesem wurden die Proben zur Trocknung mit einer adäquaten Menge an Na₂SO₄ gründlich durchmischt.
3. Nach Zugabe von 100 ml CH₂Cl₂ wurde nach Aufschütteln 3 x 20 min. im Ultraschallbad extrahiert (wiederholtes Aufschütteln).
4. Über einen Faltenfilter wurden 50 ml Extrakt in einen 100 ml Meßzylinder abfiltriert, in einen Spitzkolben überführt und am Rotationsverdampfer auf 10 ml eingeeengt.
5. 1 µl des eingeeengten Extraktes wurde nach automatischer Injektion gaschromatographisch getrennt und am FID detektiert.
6. Fünffache Aufarbeitung jeder Probe. Die Quantifizierung erfolgte über externe Kalibrierung mit einer käuflichen Standardlösung. Analysen, die unerwartet hohe Befunde auswiesen, wurden mindestens 3 mal (Probenaufbereitung in DC-Trennung) durchgeführt.

7. Die Ergebnisse wurden auf Trockenrückstand, der von einem aliquoten Probenanteil ermittelt wurde (DIN 38414 S 2), bezogen.

5.2.4.3 Analytik der eingefrorenen Rückstellproben

Ab Probenahme April 1991 wurden jeweils 2 Proben je Miete als Rückstellprobe bei - 25°C eingefroren.

Der Arbeitskreis wollte sich dadurch die Möglichkeit offen halten, die Proben zum gegebenen Zeitpunkt durch ein verbessertes Analysenverfahren nachträglich zu beproben bzw. die bis dato durchgeführte "Frischprobenanalytik" eventuell zu überprüfen. Zur Kontrolle der verwendeten Analytik wurden diese Rückstellproben im Dezember 1991 analysiert.

Die Untersuchungsmethodik für die eingefrorenen Rückstellproben entspricht der auf den Seiten 5.8 und 5.9 dargestellten Methode jedoch mit einfacher Aufarbeitung jeder Probe bei Punkt 6.

5.2.4.4 Aktivkohlefilter PNW

Zusätzlich zur versuchsbegleitenden Untersuchung wurde im Dezember 1992 der Aktivkohlefilter von PNW beprobt und analysiert. Es wurden keine PAK auf der Aktivkohle nachgewiesen. Die erfaßten Stoffe sind Permene, die von der gesetzten Kieferborke stammen, und Weichmacher, die auf den eingesetzten PVC-Drainageschlauch zurückgeführt werden können.

6. Darstellung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse

6.1 Bewertung der schadstoffanalytischen Untersuchungen

6.1.1 Bewertung der PAK-Gehalte im Boden

Frischproben

In den Abb. 2 und 3 sind die Mittelwerte der chemischen Analysen (Σ EPA-PAK = 16 Einzelsubstanzen, BaP-Konzentration) der einzelnen Versuchsteilnehmer aufgeführt. Die Analysenergebnisse (Nullprobennahme bis 2. Probennahme) sind insofern überraschend, als die Reduzierung der Ausgangsbelastung an PAK in der Kontrollmiete nahezu parallel mit der beobachteten Reduzierung in den z.T. aufwendig biotechnologisch behandelten Mieten verläuft.

Die Abb. 2 zeigt die Mittelwerte der Summe der EPA-PAK zu den Beprobungsterminen über den Behandlungszeitraum von 17 Monaten. Im Juli 1990 wurde bei allen Mieten die Nullprobe gezogen. Die Nullprobe ist die Probe aus dem natürlichen Bodenmaterial, d.h. es fand noch keine Zumischung von firmeneigenem Substrat statt. Die 1. Probe, die dann im August 1990 gezogen wurde, setzt sich aus dem Bodenmaterial plus der Beimischung zusammen. Im allgemeinen hätte man generell bei der 1. Probe eine geringe PAK-Konzentration erwartet, da es durch die Beimischung von 2,5 Gew.-% bei CB, 13 Gew.-% bei PNW, 10 Gew.-% bei UN und 30 Vol.-% bei der Stadt Solingen zu einem Verdünnungseffekt kam. Bei der Stadt Solingen und PNW ist dieser Effekt auch deutlich zu erkennen. Dahingegen ist nach Einmischung des jeweiligen Substrates bei CB und UN ein Anstieg der PAK-Konzentration bei der 1. Probe zu erkennen.

Deutlich zu erkennen ist, daß vier Monate nach Sanierungsbeginn (Probe 10.90) bei allen Mieten eine sehr geringe PAK-Konzentration gemessen wurde. So werden bei Solingen und PNW bereits bei der 2. Probe 65 % weniger EPA-PAK gegenüber der 1. Probe analytisch nachgewiesen, bei CB und UN geht die EPA-PAK-Konzentration um ca. 44 % zurück.

Von Oktober 1990 bis Juni 1991 steigt die PAK-Konzentration bei allen Mieten an. Bei CB, PNW, Solingen und der Kontrollmiete liegt der 06/91 Wert (7. Probe) sogar über dem Ausgangswert (1. Probe, 08/90). Lediglich bei UN werden in der 7. Probe ca. 1/3 EPA-PAK weniger vorgefunden als in der 1. Probe. Die EPA-PAK-Konzentration bei der 8. Probe liegt wieder deutlich tiefer, bei Solingen ist der EPA-PAK-Wert sogar um 50 % niedriger als bei der 7. Probe. Die 9. Probe weist wieder eine Erhöhung des EPA-PAK-Gehaltes auf, bei Solingen diesmal sogar eine Erhöhung um über das Doppelte gegenüber der 8. Probe. Der 10. Wert (11.91) ist wieder tief.

Die B(a)P-Konzentrationen verlaufen bei allen Mieten etwa parallel mit den Σ EPA-PAK Konzentrationen. Die Schwankungen der PAK-Konzentrationen über den Behandlungszeitraum von 17 Monaten sind derzeit nicht erklärbar. Inhomogenitäten der Probe, Ungenauigkeiten bei der Probenvorbereitung im Labor, analytische Fehler, um nur einige Fehlerquellen zu nennen, sind nicht eindeutig als Ursache zu nennen, da die Schwankungen bei allen Mieten synchron verlaufen. Darüber hinaus sind die Streuungen der Analysenergebnisse von jeder Probe (4 Mischproben) deutlich geringer als die Schwankungen von Probe zu Probe.

Auch die firmeneigene Analytik zeigt diese Tendenz auf. Ein signifikanter "PAK"-Abbau" ist ebenfalls nicht festzustellen (s. Abb. 4).

(Anmerkung: Obwohl CB, SO und KO nur 9 Balkenwerte in Abb. 2 aufweisen, wird von 10 Proben gesprochen. Zum Zeitpunkt 02.91 konnte wegen herrschendem Frost bei diesen Mieten keine Probe gezogen werden. Gelegentlich ist auch von 11 Proben die Rede. Dies liegt darin begründet, daß die gezogenen Proben 04.91 nicht analysiert wurden. Demzufolge wurden maximal 11 Proben gezogen, mit obiger Ausnahme jedoch nur 10 Proben analysiert.)

Abb. 2: Übersicht über die PAK-Gehalte nach EPA (16 Einzelsubstanzen im Sanierungszeitraum von 17 Monaten der fünf Versuchsmieten)

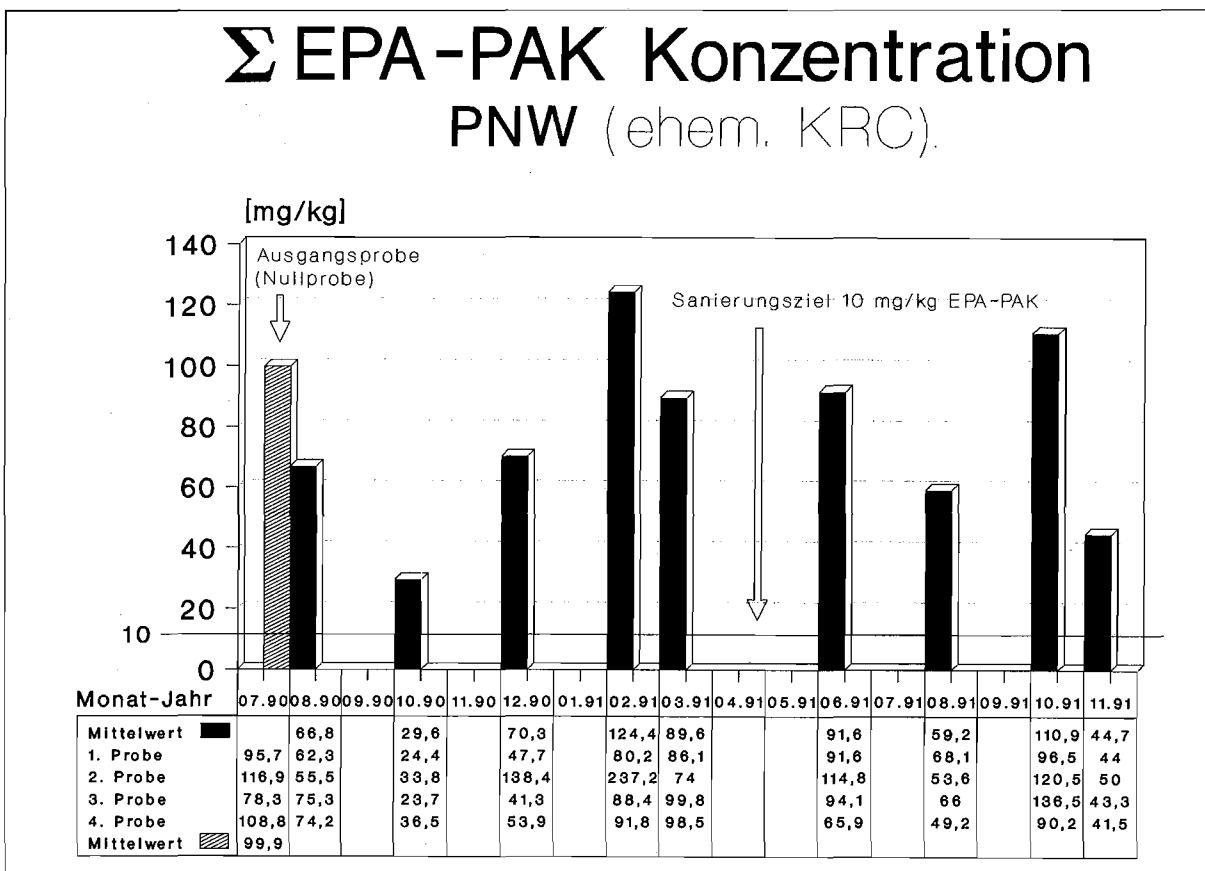
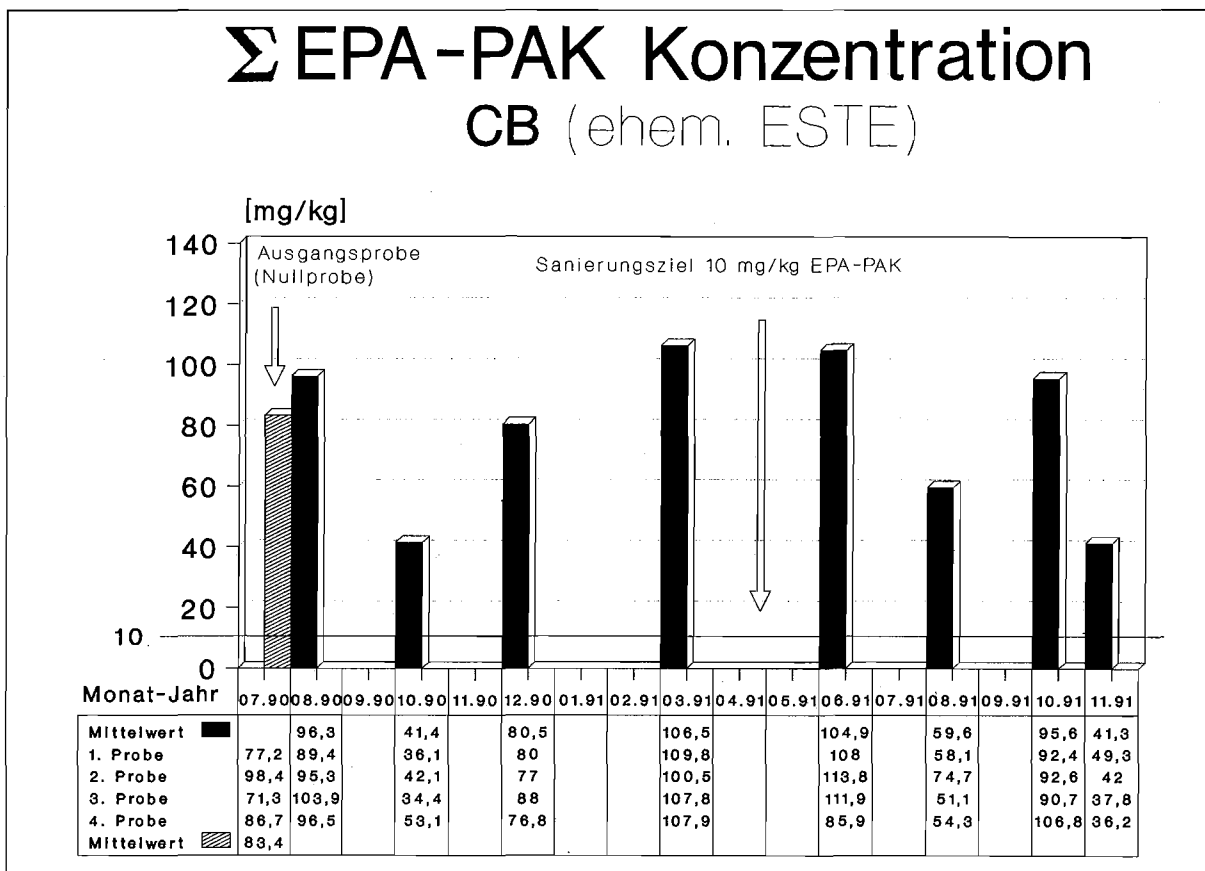
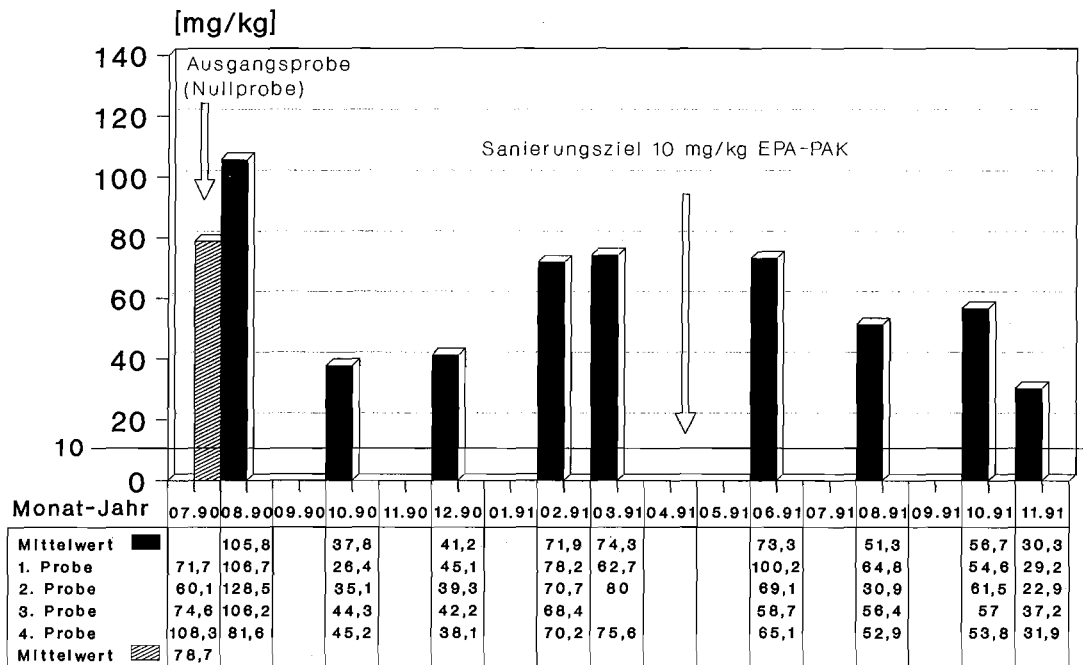
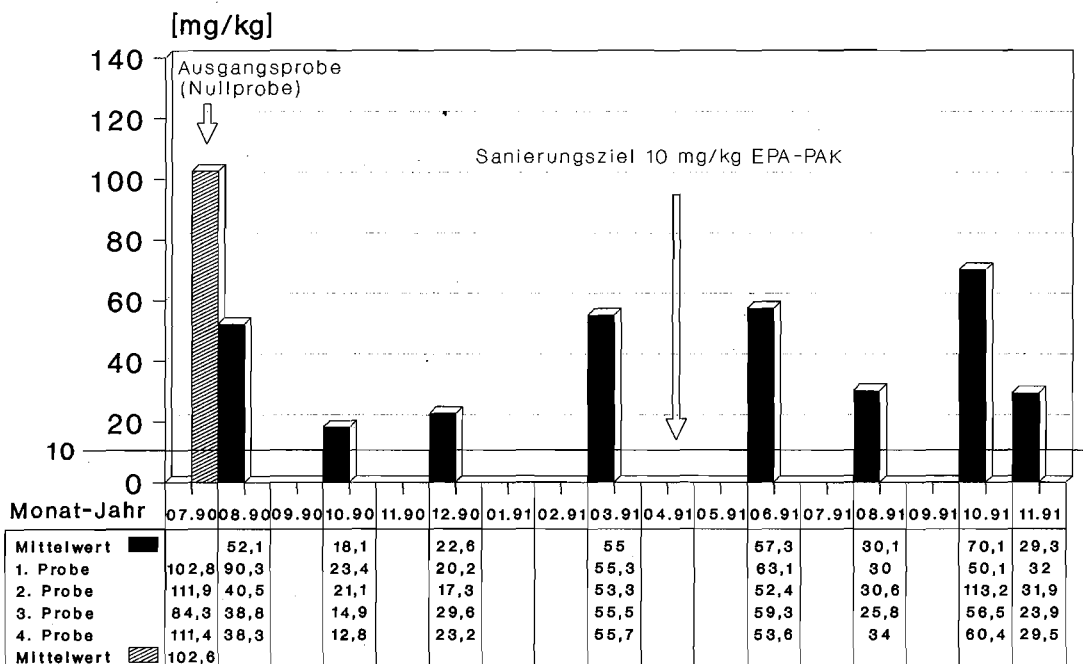


Abb. 2: Fortsetzung

Σ EPA-PAK Konzentration Umweltschutz Nord



Σ EPA-PAK Konzentration Stadt Solingen



Σ EPA-PAK Konzentration Kontrollmiete

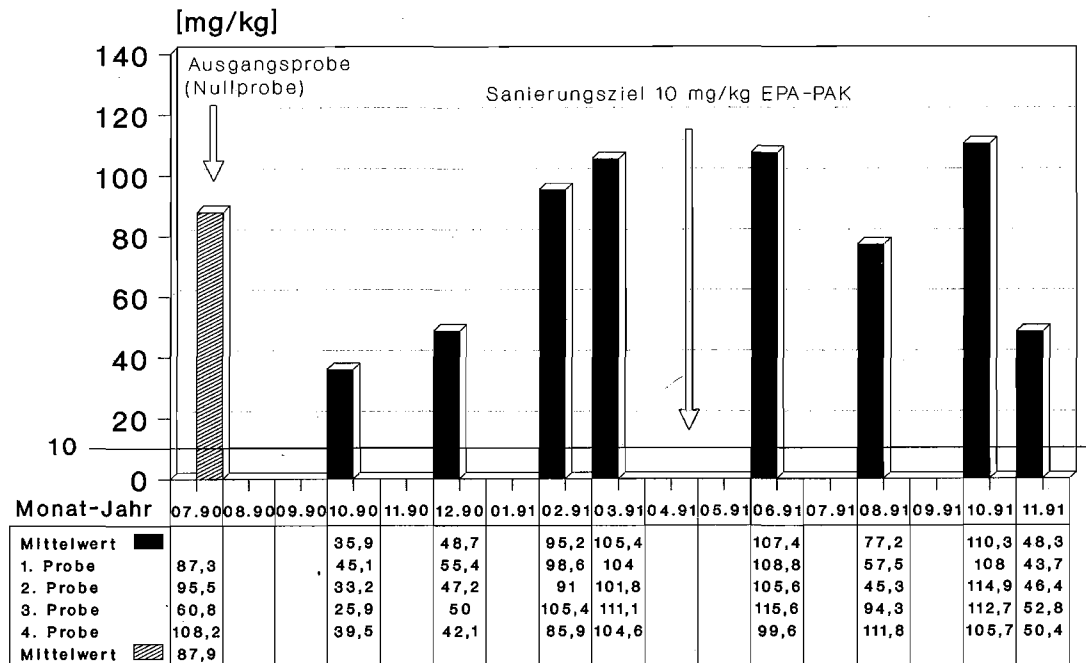


Abb. 3: Übersicht über die B(a)P-Konzentration im Sanierungszeitraum von 17 Monaten der fünf Versuchsmieten

BaP-Konzentration CB (ehem. ESTE)

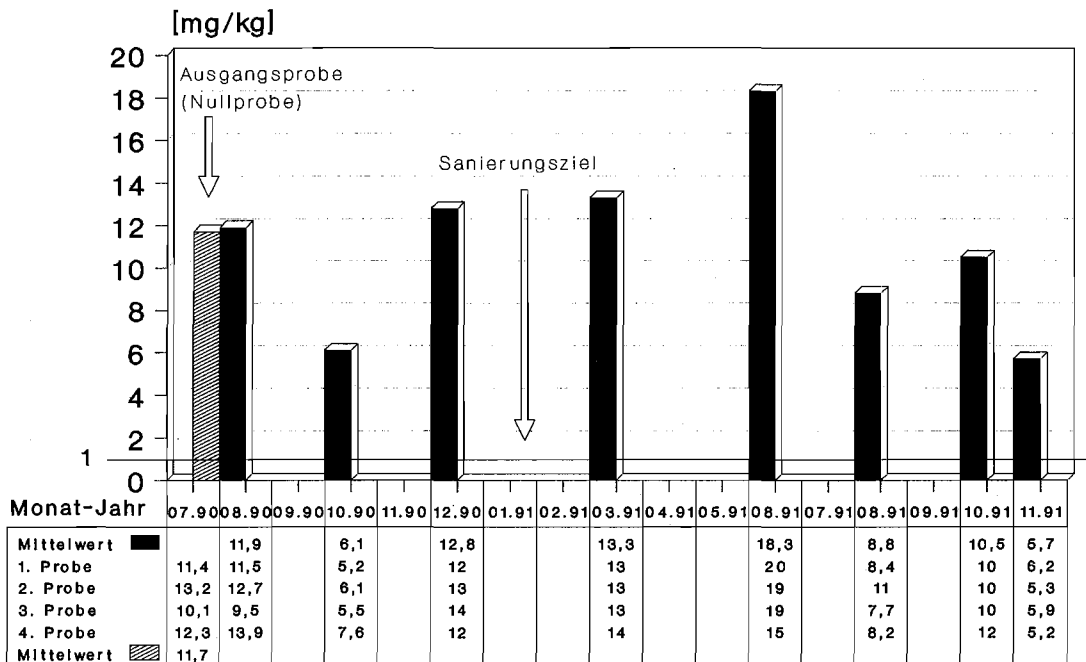


Abb. 3: Fortsetzung

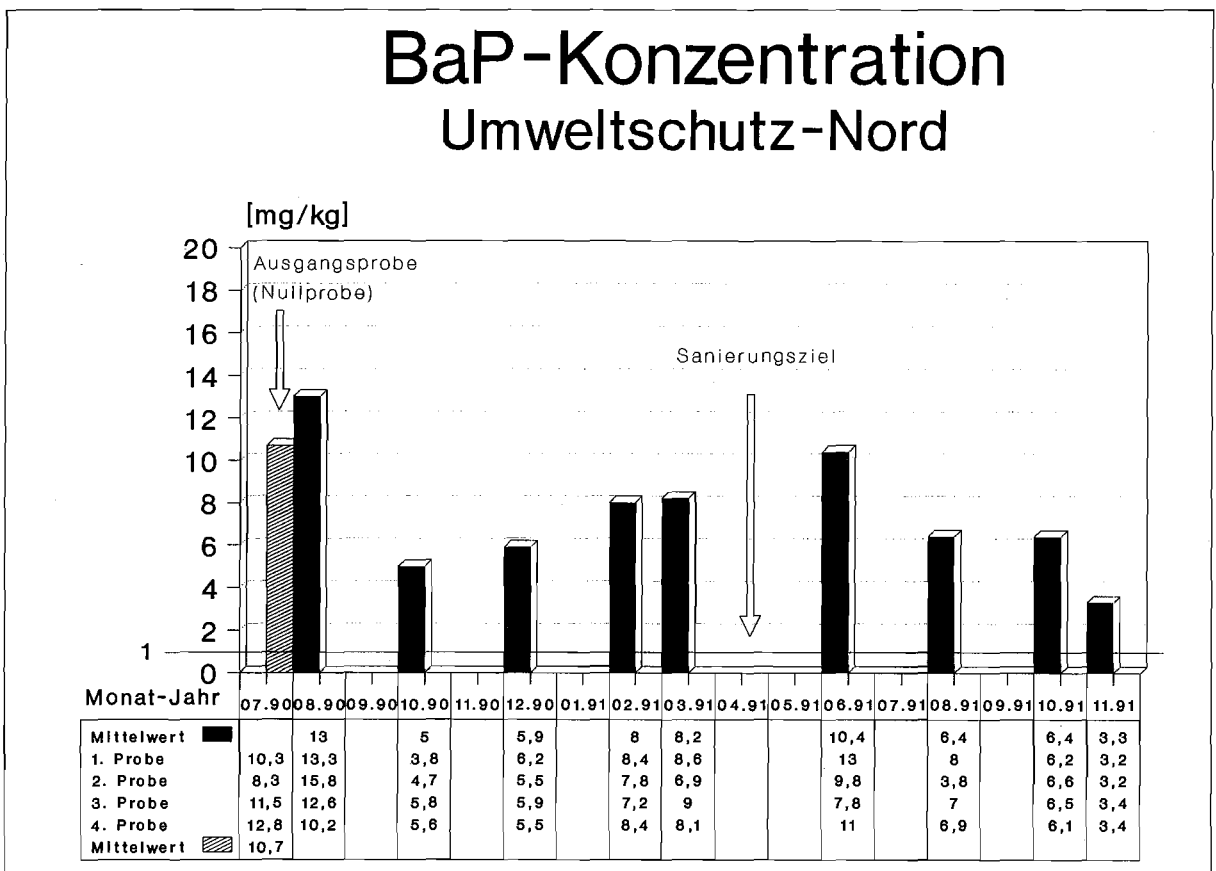
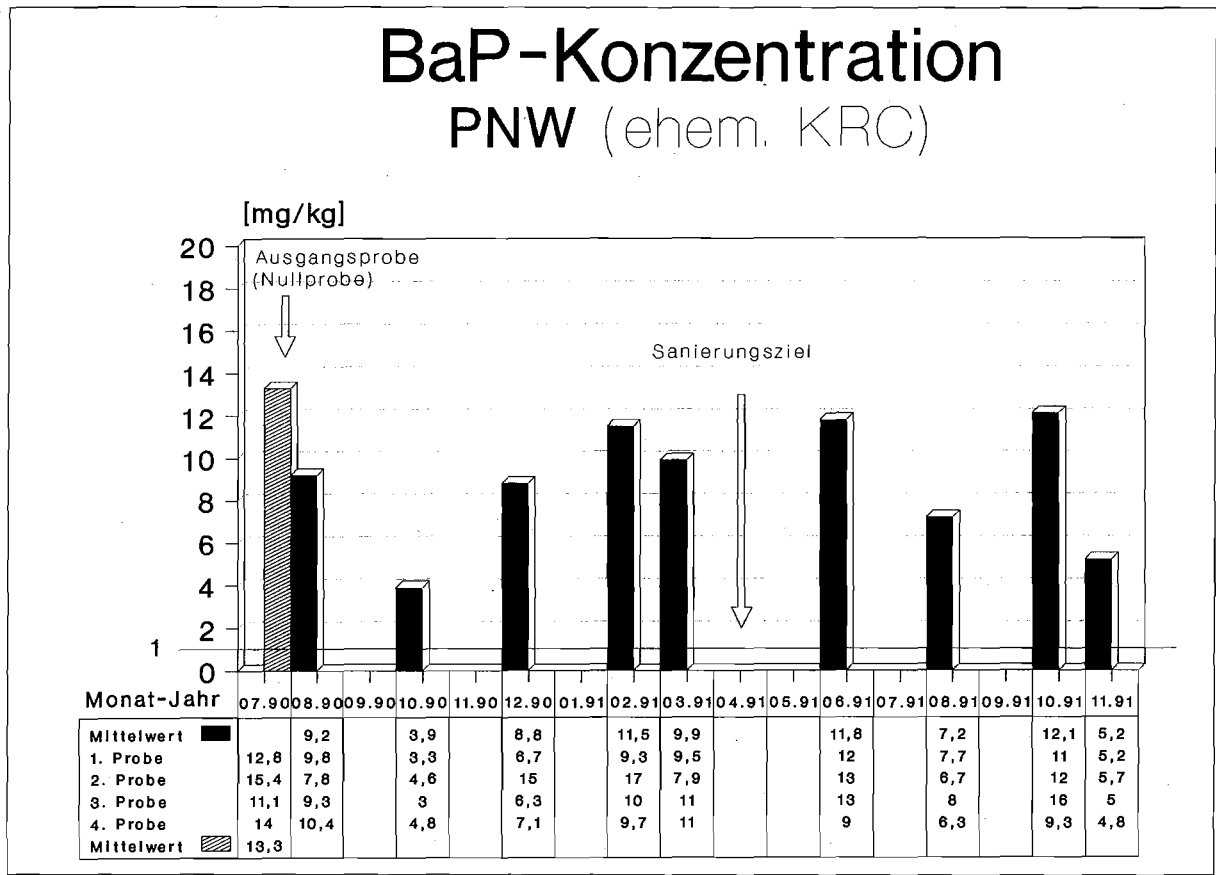
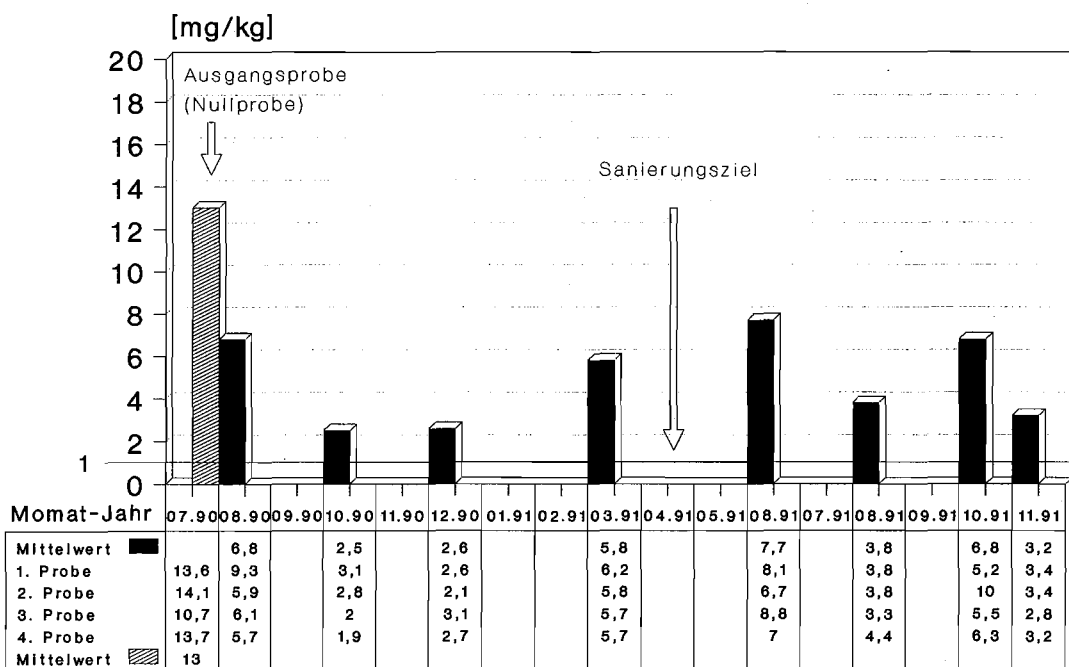


Abb. 3: Fortsetzung

BaP-Konzentration Stadt Solingen



BaP-Konzentration Kontrollmiete

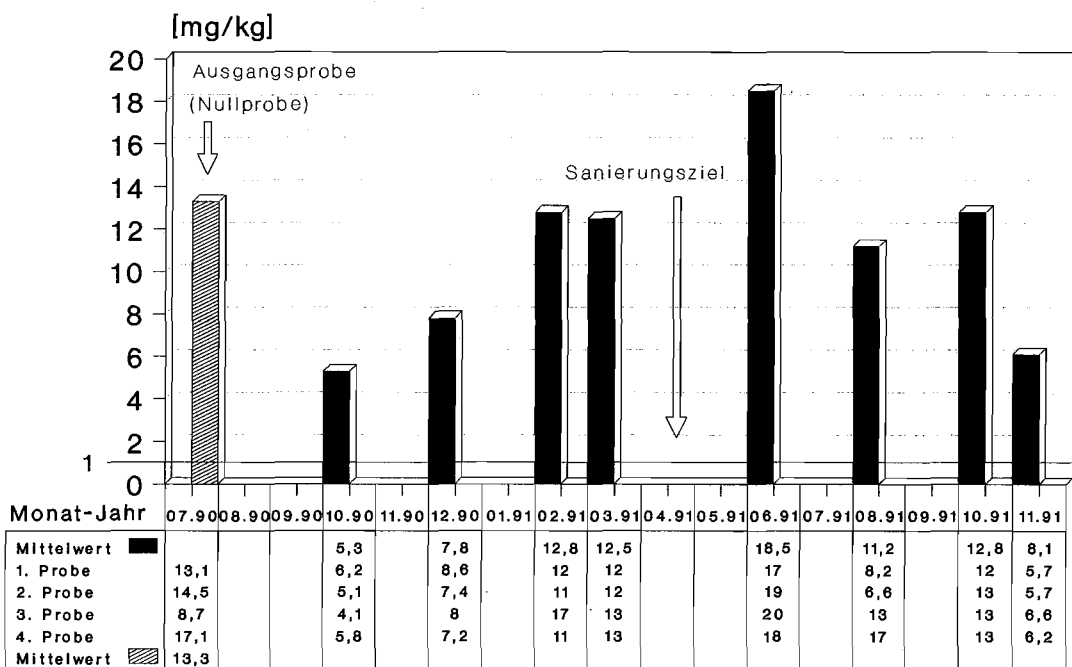


Abb. 4: Analyseergebnisse der durch die Firmen selbst durchgeführten Analysen von CB, PNW, UN dem Analyseergebnis von CLAYTEX gegenübergestellt

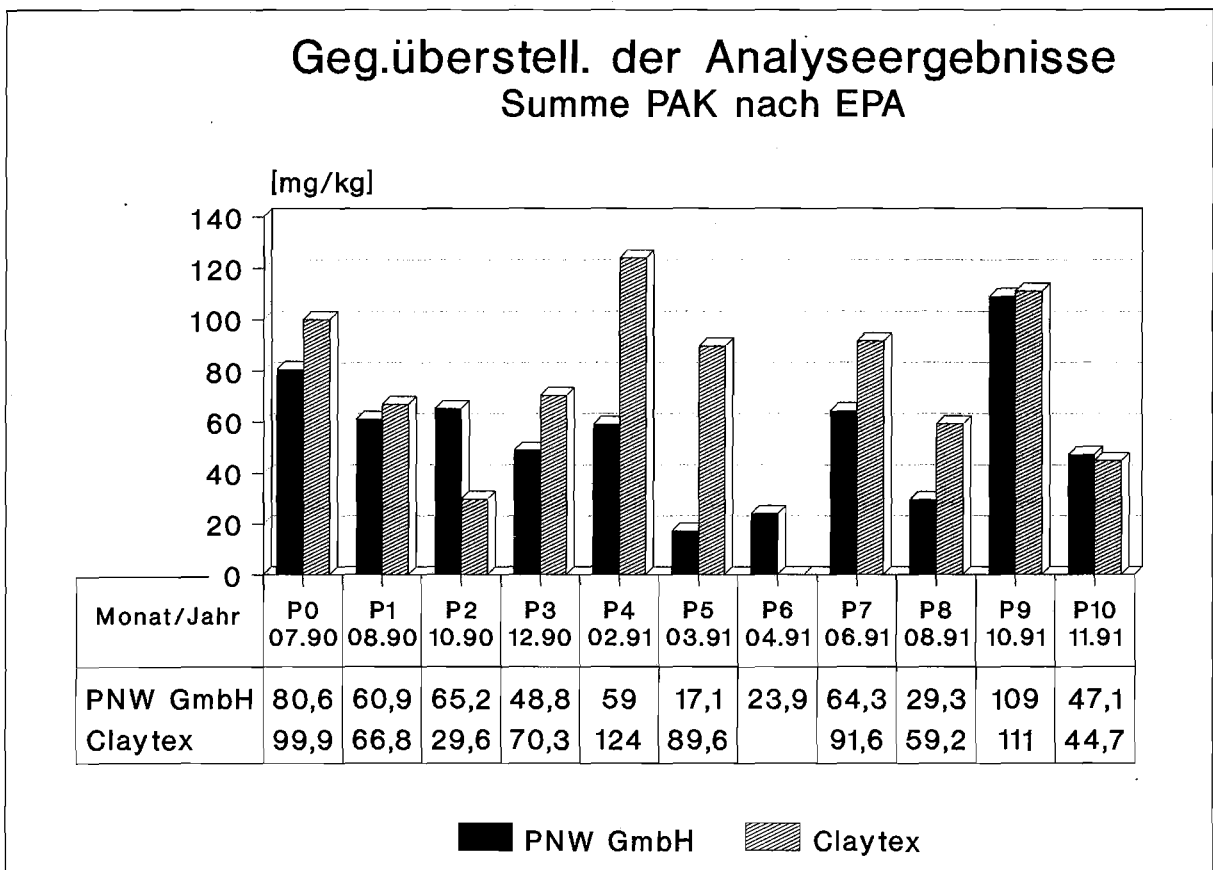
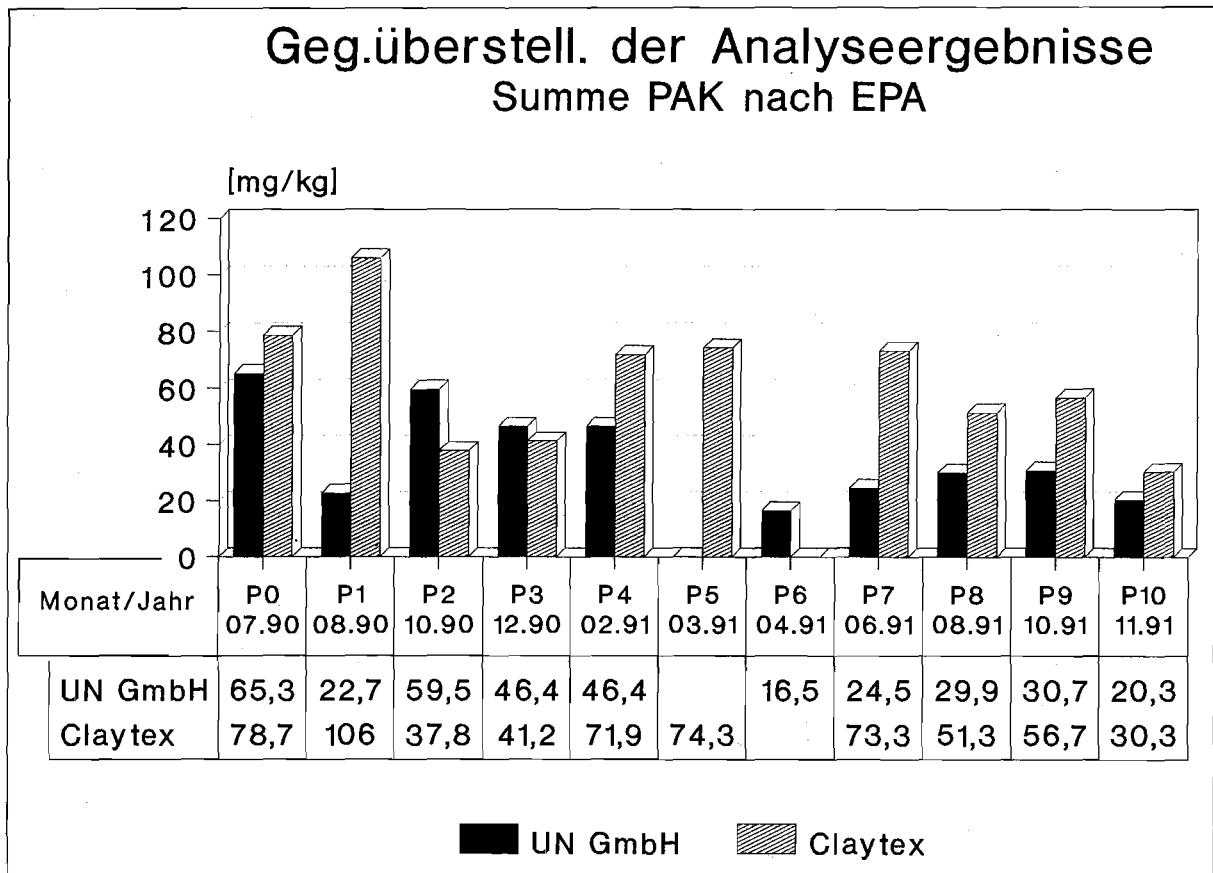
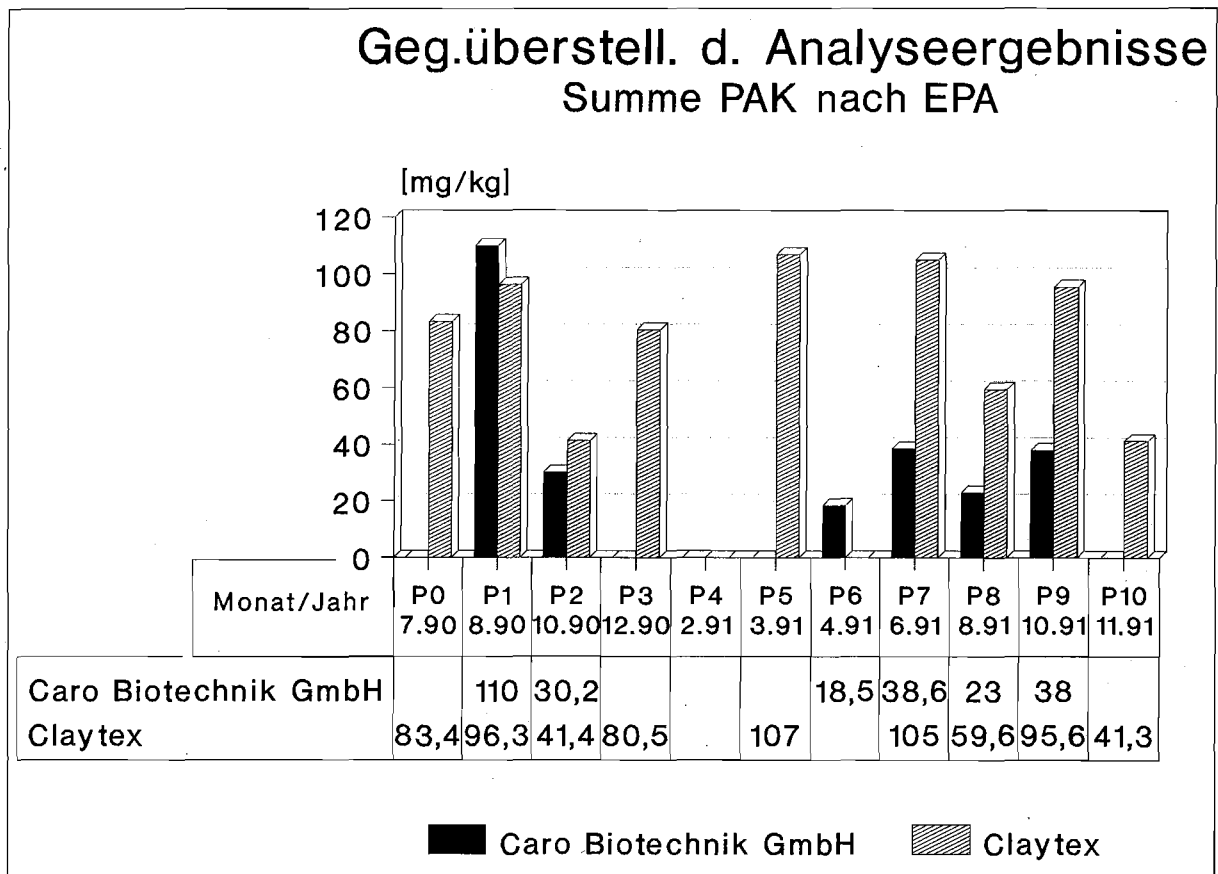


Abb. 4: Fortsetzung



Eingefrorene Rückstellproben

Von April 1991 ab wurden jeweils drei Rückstellproben direkt nach der Beprobung der Mieten bei

-25°C eingefroren und bis Dezember 1991 aufbewahrt. Diese Proben wurden dann Ende Dezember vom Labor Claytex zur gleichen Zeit analysiert.

In der nachfolgenden Abb. 5 zeigen die gepunkteten Balken die Analytik für die eingefrorenen Proben, wohingegen die schwarzen Balken die Mittelwerte der EPA-PAK-Konzentrationen für die Frischproben darstellen (Analyseergebnis jeweils direkt nach der Beprobung). Wie zu erkennen, wurden die Konzentrationen im Juni, August, Oktober und November 1991 gemessen. Die Analytik für die Proben des Monats April 1991 wurde nicht durchgeführt.

Deutlich zu erkennen ist, daß für die eingefrorenen Proben eine annähernd gleiche Konzentration über die dargestellte Zeitspanne vom Juni bis November 1991 vorliegt. Im Gegensatz dazu zeigen die Konzentrationen an den Frischproben das bekannte Schwankungsbild. Dieses überraschende Ergebnis zeigt, daß bei der PAK-Analytik von Bodenproben erhebliche methodische Unsicherheiten bestehen.

Abb. 5: Übersicht über den Vergleich der Analyseergebnisse der Frischproben und eingefrorenen Proben der fünf Versuchsteilnehmer

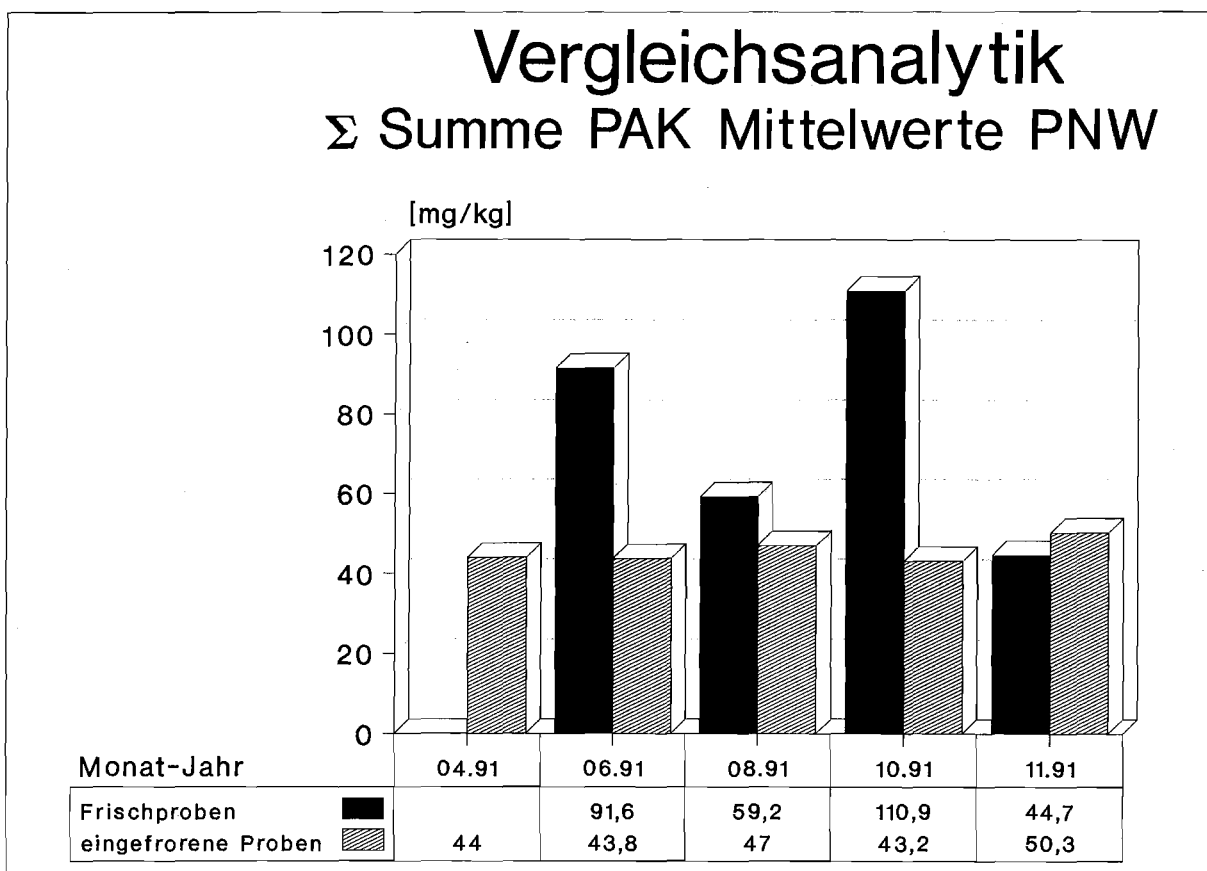
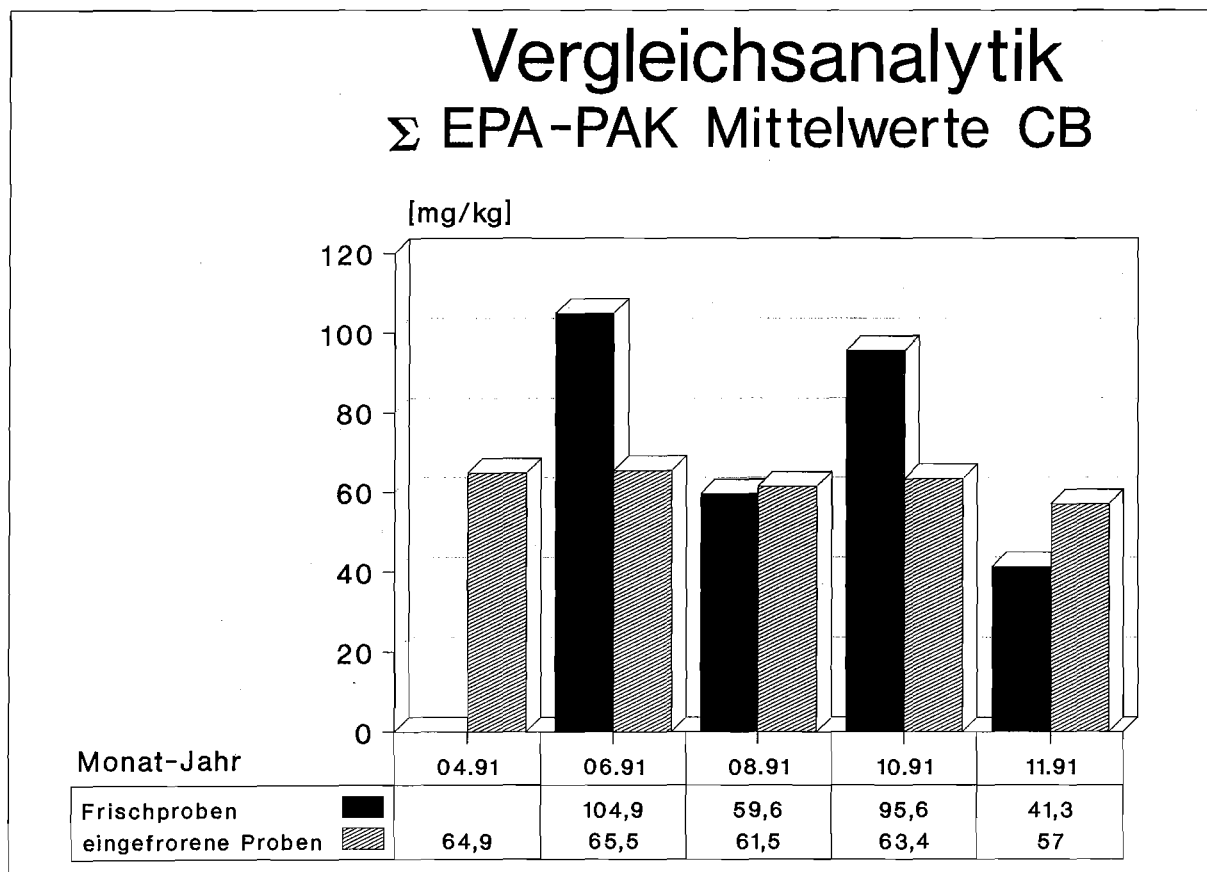


Abb. 5: Fortsetzung

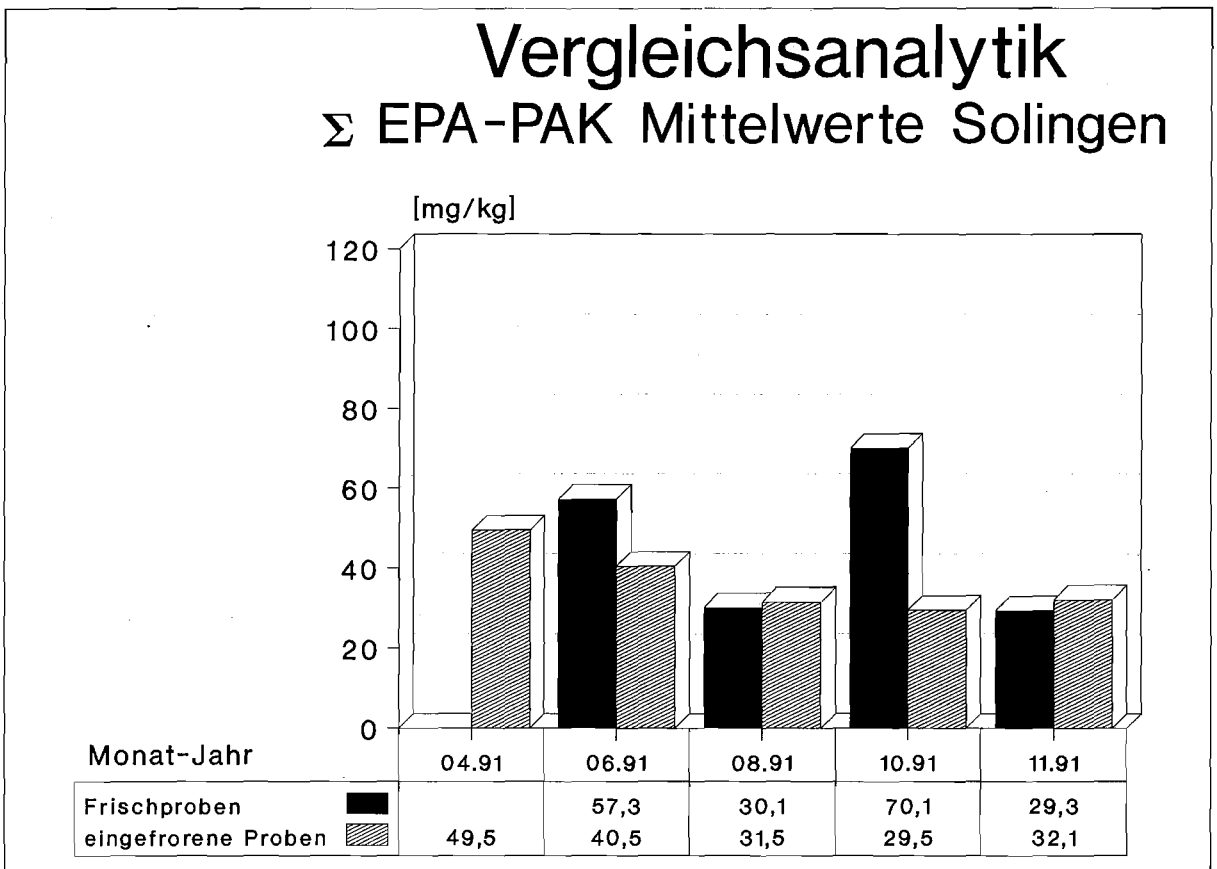
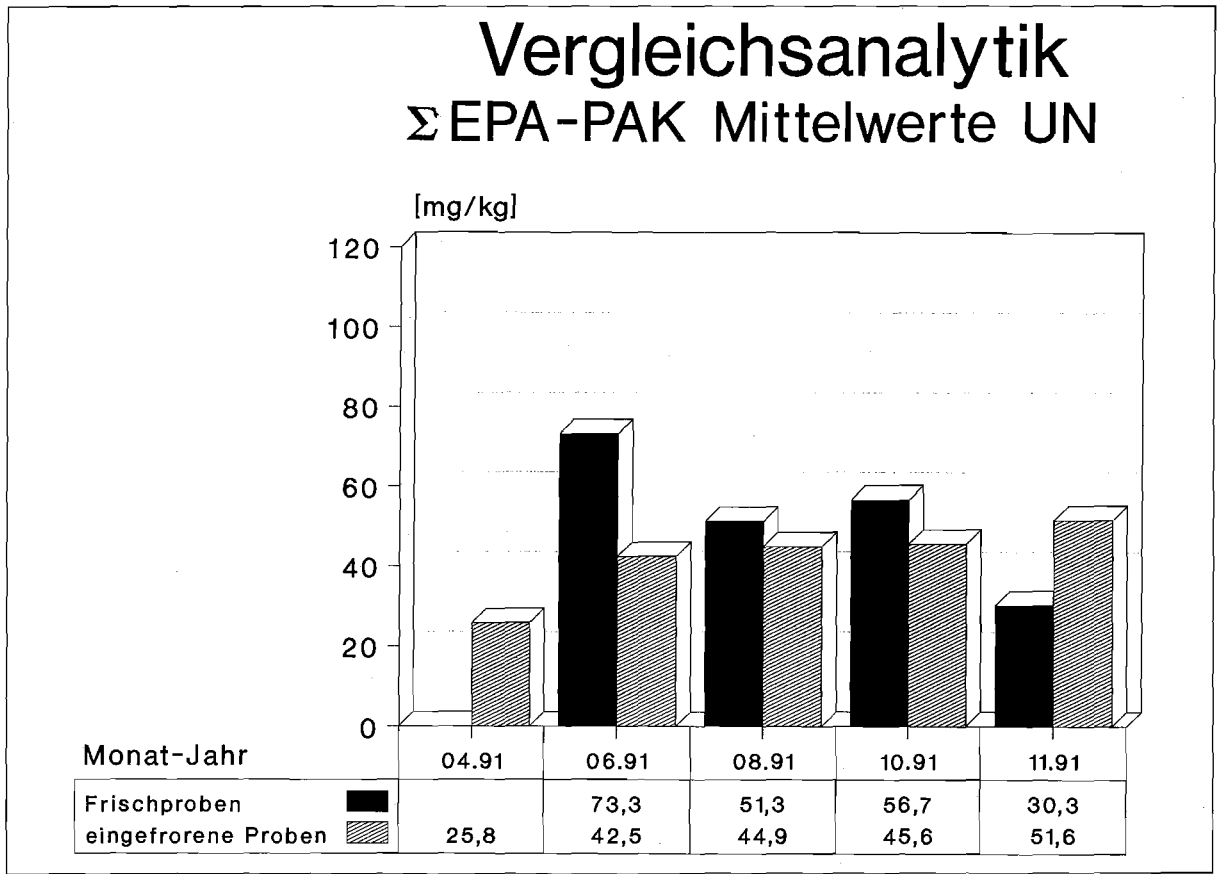
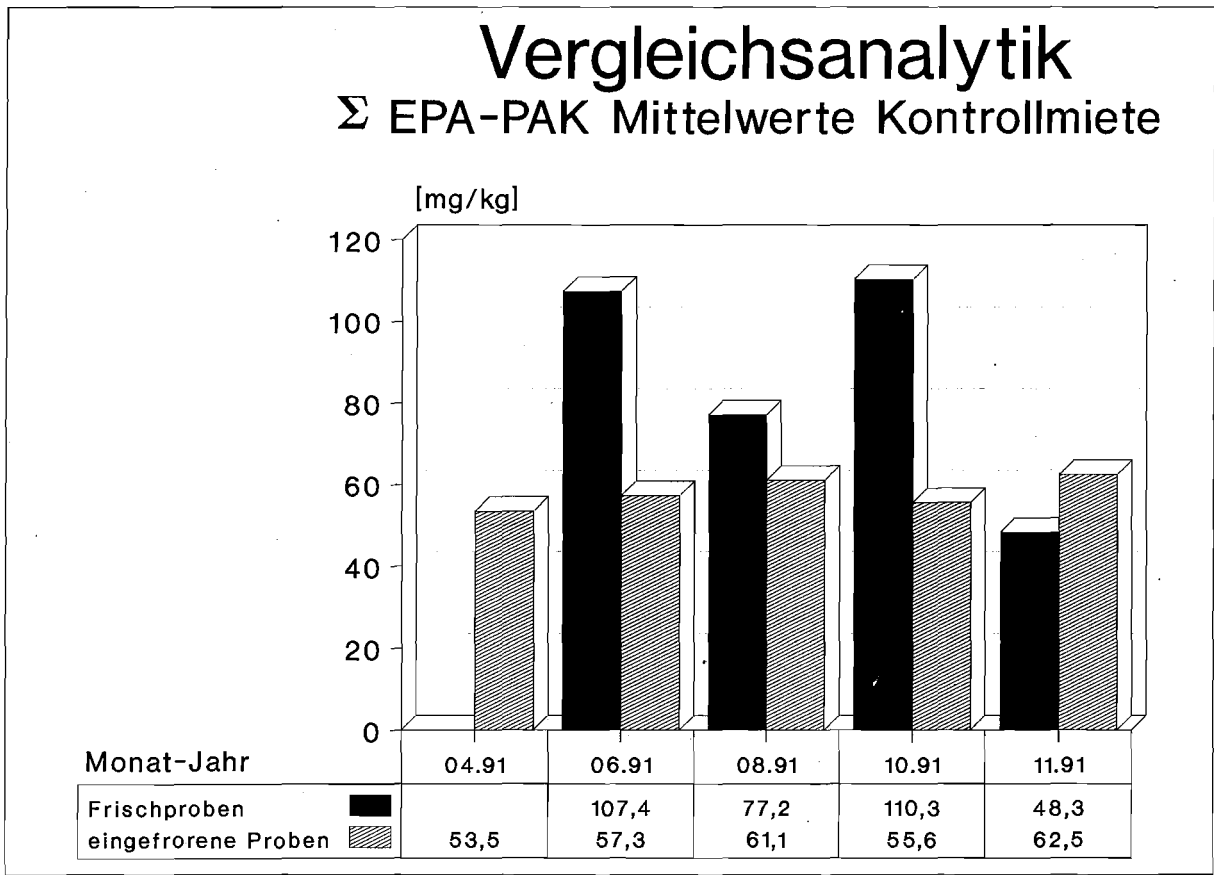


Abb. 5: Fortsetzung



Ringversuch

Für den Ringversuch wurden am 18.10.1991 Proben nach dem für diesen Versuch festgelegten Probenahmeverfahren gezogen (vgl. Kapitel 5.1). Dieser Ringversuch kann jedoch nicht zur Bewertung und Klärung des unzureichenden "PAK-Abbaus" herangezogen werden, da nicht von allen 5 Laboren die LWA-Methode strikt eingehalten wurde. Vielmehr belegte dieser Ringversuch, daß unterschiedliche Analysemethoden unterschiedliche PAK-Gehalte detektieren (Abb. 6).

Auffällig dabei ist, daß der Analysewert von ALA (88,98 mg/kg) um über das Dreifache höher liegt als der von CARO Biotechnik (27,61 mg/kg) bei der Probe aus der Miete CB.

Beide Labors hielten sich an die LWA-Vorgaben. Der einzige Unterschied besteht jedoch in der Wahl des Analyse-Gerätes; HPLC bei CB, GC-FID bei ALA. Nach Aussagen von Herrn Dr. Püttmann, TH Aachen, haben PAK-Analysen bei Bodenproben gezeigt, daß generell die PAK-Ausbeute bei Verwendung des HPLC größer ist als mit dem GC. Diese Aussage belegen sowohl Untersuchungen von Dr. Sellner, Umweltbehörde Hamburg, als auch Untersuchungen der Firma Caro Biotechnik. Somit wäre zu erwarten gewesen, daß CB höhere Extraktionsausbeuten erzielt als ALA.

Die Analysenwerte von Claytex liegen für alle 5 Mieten etwa gleich hoch wie die von ALA.

Es fällt auf, daß die Analysenwerte von Umweltschutz Nord bei den Mieten PNW, UN und Solingen die niedrigsten sind, und bei den Mieten CB und Kontrollmiete die zweitgeringste Extraktionsausbeute erzielt wird.

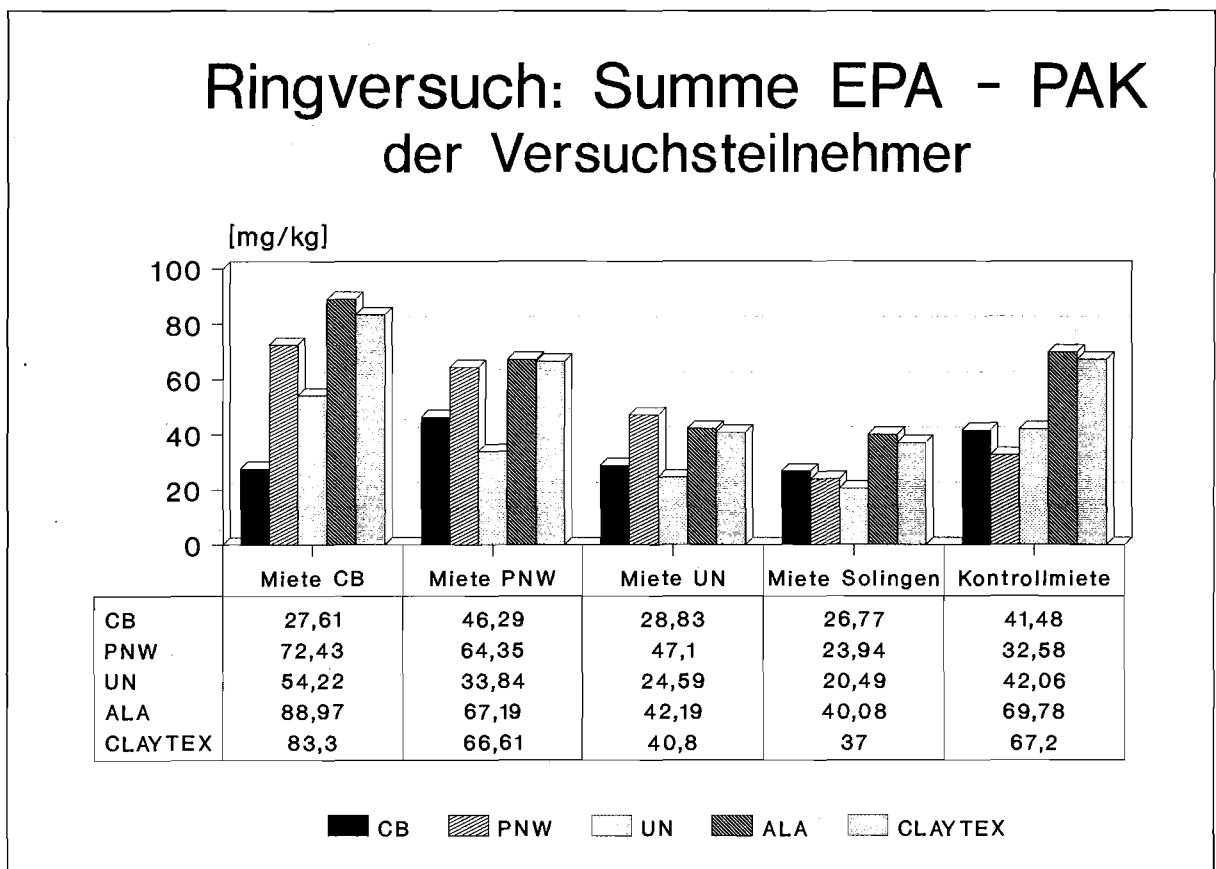
Da sich nicht alle Labore an die LWA-Analysenmethode hielten, können die Werte nicht unmittelbar miteinander verglichen werden.

Auch die Firma Caro Biotechnik hat in einem Versuch gezeigt, daß bei Verwendung verschiedener Extraktionsmittel jeweils unterschiedliche PAK-Ausbeuten erzielt werden. Dabei wurden bis zu über 100% differierende Ergebnisse erzielt.

Bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen sollte bei der begleitenden Analytik auf jeden Fall eine genau festgelegte und definierte Methodik angewandt werden. Insbesondere sollten für die Kontrolle des Sanierungserfolges durch zusätzliche Analytik eingefrorene Rückstellproben individuelle Analysefehler minimiert bzw. zumindest ihr Ausmaß kalkulierbar gemacht werden. Es muß als sinnvoll erachtet werden, an jedem Analysetermin erneut alle bis dahin gezogenen Proben zu analysieren, um sich auf einen Standard beziehen zu können.

Der Feldversuch Solingen-Ohligs zeigt, daß eine Standardisierung der PAK-Analytik für Bodenproben notwendig ist. Mittlerweile haben weitere Sanierungsprojekte die Dringlichkeit aufgezeigt, eine allgemeingültige PAK-Analytik für Bodenproben zu erforschen. Eine neue DIN-Methode befindet sich derzeit in Bearbeitung. In einer Arbeitsgruppe des Landes wird z.Zt. außerdem an einer Vereinheitlichung der bestehenden Methoden gearbeitet.

Abb. 6: Ringversuch mit den Versuchsteilnehmern



6.2 Bewertung der Untersuchungsergebnisse auf PAK-Abbauprodukte (Metabolite)

Bei den Untersuchungen wurden von der GfA Totalionenchromatogramme (TIC) vergleichbarer Art erstellt. Die Zuordnung der polycyclischen aromatischen Verbindungen in den untersuchten Extrakten erfolgte durch Vergleich der Retentionszeiten sowie des Fragmentierungsmusters mit bei der GfA vorhandenen Referenzsubstanzen sowie in der Literatur zu findenden Massenspektren solcher Substanzen. Die vorgefundenen polycyclischen aromatischen Verbindungen konnten in 4 Gruppen unterteilt werden:

- PAK-Ketone
- PAK-Chinone
- stickstoffhaltige PAK
- Methylderivate der PAK-Ketone

Das Vorhandensein dieser Substanzen muß jedoch nicht der Verfahrenstechnik zugeschrieben werden können. Eine abschließende Bewertung der Metabolitenuntersuchungen ist wegen methodischer Unsicherheiten daher nicht möglich.

6.3 Bewertung der Bioverfügbarkeit

Um der Frage nach Gründen für den fehlenden Abbau der PAK in den Versuchsmieten nachzugehen, wurde die DMT mit zusätzlichen Untersuchungen beauftragt. Diese Untersuchungen sollten vor allem klären, ob die Kontamination im Bodenmaterial der Versuchsmieten in "bioverfügbarer" Form vorliegt und damit überhaupt mikrobiellen Abbauprozessen zugänglich ist.

Einer Probe aus der Kontrollmiete, die sich aus 50 Mischproben zusammensetzte, wurde eine bakterielle Mischkultur zugesetzt, die nachweislich PAK abbauen kann. Diese Probe wurde nach einer mineralischen Düngung über einen Zeitraum von 27 Tagen im Sapromaten bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % und einer Temperatur von 22°C bebrütet. Es wurde eine Bestimmung des biologischen Sauerstoffbedarfs in Anlehnung an DIN 38 409 H52 durchgeführt. Diese Untersuchungen erbrachten im wesentlichen zwei Ergebnisse:

1. Die Sauerstoffzehrung im Bodenmaterial Solingen deutet auf geringe Stoffumsetzungen hin. Nach Zufuhr leicht abbaubarer C-Quellen (Glucose) ist eine erhebliche Steigerung der Aktivität zu verzeichnen.
2. Durch Zufuhr einer nachweislich PAK-abbauenden Mischkultur unter Einstellung optimaler Bedingungen bleibt nach 27 Tagen Behandlungsdauer die PAK-Konzentrationen unverändert gegenüber den Ausgangsgehalten.

Diese Ergebnisse wurden dahingehend interpretiert, daß in dem untersuchten Bodenmaterial die Kontaminationen in einer für den mikrobiellen Abbau nicht verfügbaren Form vorliegen.

Zur Aufklärung der Gründe für die mangelnde Bioverfügbarkeit wurde die organische Substanz des Versuchsbodens einer speziellen Untersuchung unterzogen. Bei einem C_{org} -Gehalt

von 5,9 % konnte durch eine Sink-/Schwimmscheidung eine Bodenfraktion mit einer Dichte von $<1,6 \text{ g/m}^3$ abgetrennt werden, die 2,9 Gew.-% der Bodenprobe ausmachte. Aufgrund lichtmikroskopischer Untersuchungen wurde deutlich, daß die abgetrennte Leichtfraktion im wesentlichen aus Kohle-, Koks- und Holzpartikeln besteht. In dieser Fraktion liegen die PAK-Konzentrationen im Vergleich zu der Gesamtprobe etwa um den Faktor 10 (!) angereichert vor. Die geringe Verfügbarkeit der PAK im Bodenmaterial Solingen wurde daher auf eine starke Adsorption an die hydrophobe, organische Matrix des Bodens zurückgeführt.

Zusätzlich zu den obengenannten Untersuchungen wurde an Eluaten des Versuchsbodens der Leuchtbakterienhemmtest nach DIN 39412, Teil 34, durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen verdeutlichen nochmals die geringe Verfügbarkeit der PAK. Die Eluate verursachten nur eine geringe Hemmung der Lumineszenz von Leuchtbakterien, die mit Eluaten natürlicher unbelasteter Böden vergleichbar ist. Das verdeutlicht, daß die PAK des Versuchsbodens in nur sehr geringem Maße durch wässrige Elution freigesetzt werden.

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Untersuchungen, daß die Schadstoffe (PAK) in dem Versuchsboden eine geringe Bioverfügbarkeit besitzen. Der mangelnde Abbau der PAK in den Versuchsmieten ist daher mit großer Wahrscheinlichkeit auf diesen Umstand zurückzuführen.

6.4 Bewertung der Schwermetallgehalte

Eine Schwermetallanalytik wurde nur in der Nullprobennahme durchgeführt. Es zeigt sich, daß die Schwermetallgehalte größenordnungsmäßig bei allen Versuchsteilnehmern gleich hoch sind. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist hierdurch eine Hemmung der mikrobiellen Aktivität nicht zu erwarten.

6.5 Bewertung der BTX-, EOX-, Cyanid- und Kohlenwasserstoffgehalte

Auch für diese Stoffe wurde die Analytik nur einmal in der Nullprobe durchgeführt. Die Daten sind in der Anlage aufgelistet. Insgesamt sind diese Stoffgruppen im Rahmen der Feldversuche Solingen-Ohligs von untergeordneter Bedeutung.

6.6 Bewertung der PAK-Konzentrationen im Sickerwasser

Im Sanierungszeitraum von 17 Monaten wurden viermal Sickerwasseruntersuchungen nach TVO-PAK durchgeführt (Juli 1990, Oktober 1990, Dezember 1990 und November 1991). Die Konzentrationen liegen im Sickerwasser der drei offenen Mieten und im Wasser des Fahr-

zeugwaschbeckens zwischen nicht nachweisbar und $0,79 \mu\text{g TVO-PAK/l}$. Diese PAK-Konzentrationen belegten, daß die TVO-PAK im Versuchsboden Solingen-Ohligs nur sehr gering ausgewaschen werden. Sie sind als unbedenklich anzusehen und stellen keine Gefährdung dar.

Zur Einleitung der Sickerwässer in die Kanalisation der Stadt Solingen war ein Maximalwert von $5 \mu\text{g TVO-PAK/l K}$ von der zuständigen Wasserbehörde genehmigt.

6.7 Bewertung der Bodenluftmessung

Die Konzentrationswerte für BTEX und CKW liegen unter der Nachweisgrenze. Eine Gefährdung über den Luftpfad ist somit auszuschließen.

6.8 Bewertung der bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften

6.8.1 Pflanzenverfügbare Nährstoffe im Boden

Die Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden sind in der Abb. 7 für alle fünf Mieten dargestellt. Die untersuchten Hauptnährelemente Phosphor, Kalium, Magnesium und Stickstoff lassen sich in hauptsächlich zwei Gruppen unterteilen. Ammonium und Nitrat unterliegen im Versuchszeitraum erwartungsgemäß einer stärkeren zeitlichen Dynamik, demgegenüber verhalten sich die Gehalte an Phosphor, Kalium und Magnesium zwischen der ersten und letzten Beprobung verhältnismäßig konstant. Dieser Tatbestand wird durch die gemessenen Nährstoffgehalte im Eluat unterstrichen (vgl. Kap. 5.2.2).

Die K_2O -Gehalte sämtlicher Mieten bewegen sich bei der Nullbeprobung auf ähnlichem Niveau zwischen knapp unter 7 mg/100g und 11 mg/100g . Sie liegen damit innerhalb der Gehaltsklasse B³⁾ nach VDLUFA (1979). Nach der Errichtung der Mieten (1. Beprobung, August 1990) kommt es bei der Miete CB (ehem. ESTE) zu einer schwachen Erhöhung der K_2O -Gehalte, bei Umweltschutz Nord und Solingen zu einer starken und bei PNW zu einer sehr starken Erhöhung der K_2O -Gehalte (bei PNW um das 10-fache, von $7,5 \text{ mg/100g}$ auf 75 mg/100g). Darin dokumentieren sich jeweils die Zufuhr anorganischer und/oder organischer Dünger zu dem Substrat der Mieten. Bei den Mieten von Umweltschutz Nord, Stadt Solingen und PNW wird die Gehaltsklasse E nach VDLUFA erreicht. Die K_2O -Gehalte der

3) Die Einteilung von Nährstoffgehalten in Gehaltsklassen ist ursprünglich für die landwirtschaftliche Düngungspraxis von den LUFAs entwickelt worden. Dabei werden 5 Gehaltsklassen unterschieden, denen jeweils bestimmte Düngeraufwendungen zugeordnet werden. So benötigen Standorte der Gehaltsklasse A eine stark erhöhte, die der Gehaltsklasse B noch eine erhöhte Düngung. Die Gehaltsklasse E hingegen charakterisiert eine sehr gute Nährstoffversorgung, die keiner Düngung zur Erzielung von Optimalerträgen bedarf.

Die Bewertung der Nährstoffuntersuchungen auf der Grundlage der Gehaltsklasseneinteilung nach VDLUFA wurde hier hilfsweise angewandt, um eine größenordnungsmäßige Einordnung der Nährstoffgehalte vornehmen zu können. Vergleichsweise, die sich auf eine optimale Nährstoffversorgung von Mikroorganismen zum Schadstoffabbau beziehen, liegen nicht vor.

Beprobung vom März 1991 entsprechen in etwa denen der ersten Beprobung, lediglich bei der Kontrollmiete und bei der Miete von Umweltschutz Nord ist jeweils ein geringfügiger Anstieg im Vergleich zur Erstbeprobung zu verzeichnen. Die abschließende Beprobung im November 1991 zeigt für alle Mieten einen deutlichen Rückgang der pflanzenverfügbaren Kalium-Gehalte im Vergleich zu der Beprobung vom März 1991, was mit einer K-Fixierung in den Zwischenschichten von Tonmineralen (Vermikulite und randlich aufgeweitete Illite) erklärt werden könnte.

Die pflanzenverfügbaren Magnesium-Gehalte bewegen sich bei allen Mieten und sämtlichen Beprobungen auf einem sehr ähnlichen Niveau zwischen knapp unter 10 mg/100g und ca. 15 mg/100g. Sie erreichen durchgehend die Gehaltsklasse E der VDLUFA. Für keine der Mieten kann eine größere Zufuhr von Magnesium durch organische und/oder anorganische Dünger auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse nachvollzogen werden.

Die Phosphor-Versorgung ist als ausreichend bis gut zu bezeichnen. Sie bewegt sich mit P_2O_5 -Gehalten zwischen knapp unter 15 mg/100g und ca. 30 mg/100g innerhalb der Gehaltsklassen C bis E nach VDLUFA. Im allgemeinen steigen die pflanzenverfügbaren Phosphor-Gehalte zum Ende des Versuchszeitraums hin an. Dies mag bei den Mieten von CB, PNW und Umweltschutz Nord mit der Zufuhr mineralischer Dünger erklärbar sein, bei der Miete der Stadt Solingen und der Kontrollmiete aus der Umsetzung organischer Substanzen.

Die mineralischen Stickstoffverbindungen NH_4 und NO_3 unterliegen im Boden einer starken zeitlichen Dynamik, die durch die Prozesse der Ammonifizierung, Nitrifizierung und Denitrifizierung gesteuert werden. Das Ausmaß der genannten Teilprozesse ist von zahlreichen physiko-chemischen Eigenschaften des Bodens (z. B. Wasser- und Lufthaushalt, Redox-Potential, pH-Wert, Gehalt an N_t , N_{org} und C_{org} , C/N Verhältnis, Temperatur) abhängig und unterliegt stärkeren jahreszeitlichen Schwankungen. Deshalb ist das Ausmaß der Mobilisierung anorganischer N-Verbindungen aus dem organischen Stickstoffvorrat des Bodens und der Immobilisierung von Ammonium und Nitrat und damit die meßbaren Ammonium- und Nitratgehalte in den Mieten stärkeren Schwankungen unterworfen, die mit lediglich drei Untersuchungsterminen innerhalb von 17 Monaten jedoch kaum zu erfassen sind. Immerhin ist zu erkennen, daß zu Beginn der Versuche im Juli bzw. August 1990 die N_{min} -Vorräte in den Substraten aller Mieten auf einem ausreichenden Niveau lagen. Am Ende des Winters 1990/91 (Beprobung im März 1991) sind die N_{min} -Gehalte sämtlicher Mieten deutlich geringer. Dieses ist eventuell auf eine Immobilisierung mineralischen Stickstoffs während der kalten Jahreszeit zurückzuführen oder auf eine generell geringe Mineralisierungsrate. Am Ende der Vegetationsperiode 1991 (Beprobung im November 1991) ist bei allen Mieten wiederum ein Anstieg der N_{min} -Gehalte zu verzeichnen. Insbesondere die Nitratgehalte der Miete PNW sind deutlich erhöht, was u.a. auf die Wirkung einer mineralischen Stickstoffdüngung zurückgeführt werden kann.

Die gemessenen pH-Werte liegen bei allen Beprobungsterminen und bei allen Mieten im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Weder die geringfügigen Unterschiede zwischen einzelnen Mieten noch die ebensowenig ausgeprägten Unterschiede an den einzelnen Beprobungsterminen lassen eindeutige Tendenzen erkennen.

Abb. 7: Übersicht der pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Boden für die fünf Versuchsmieten

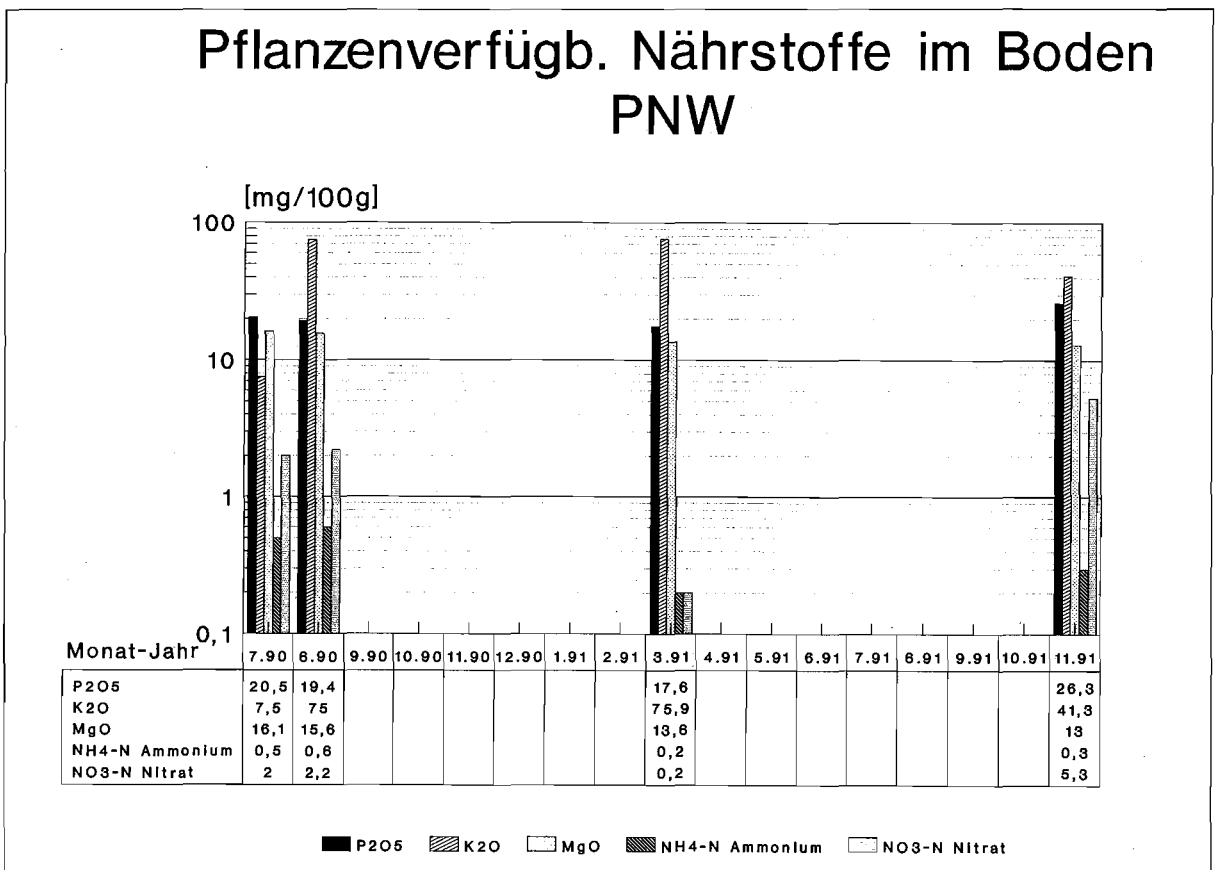
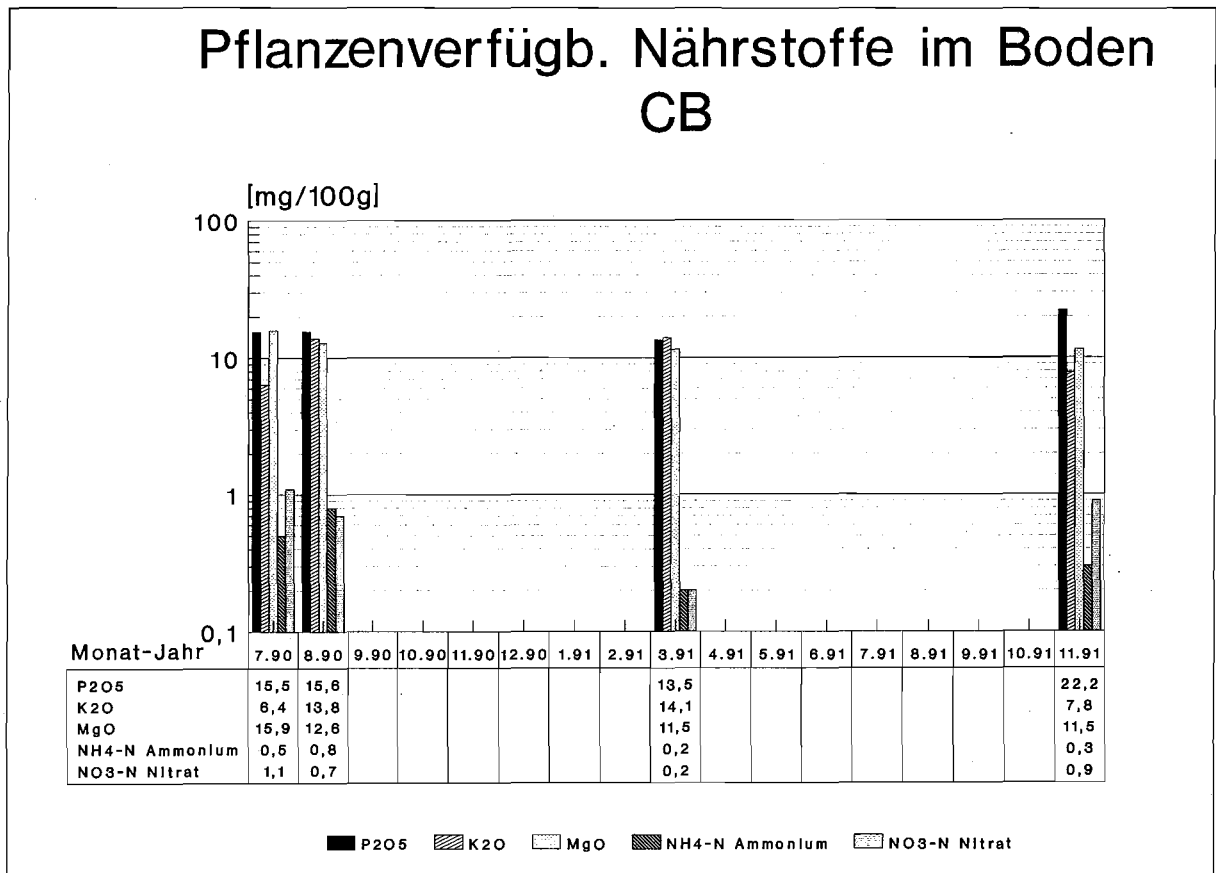
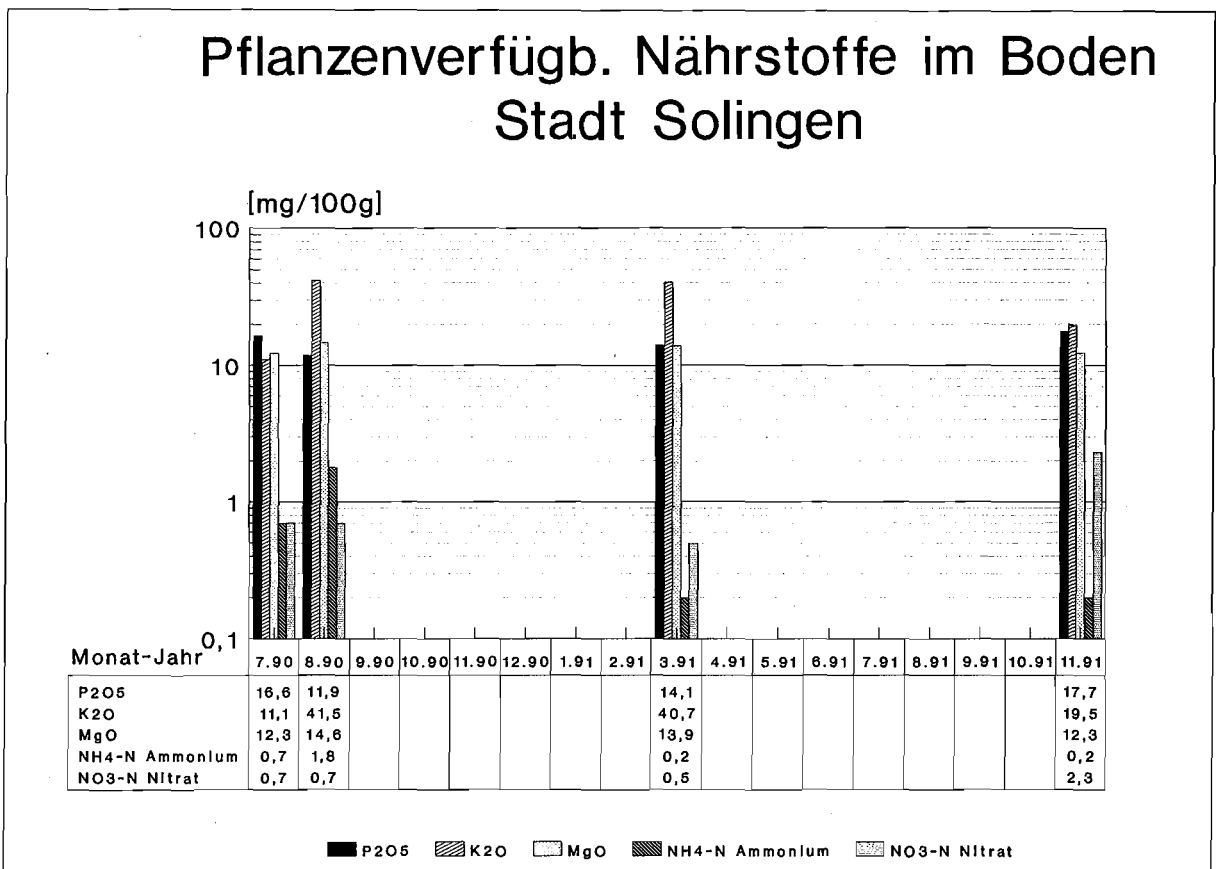
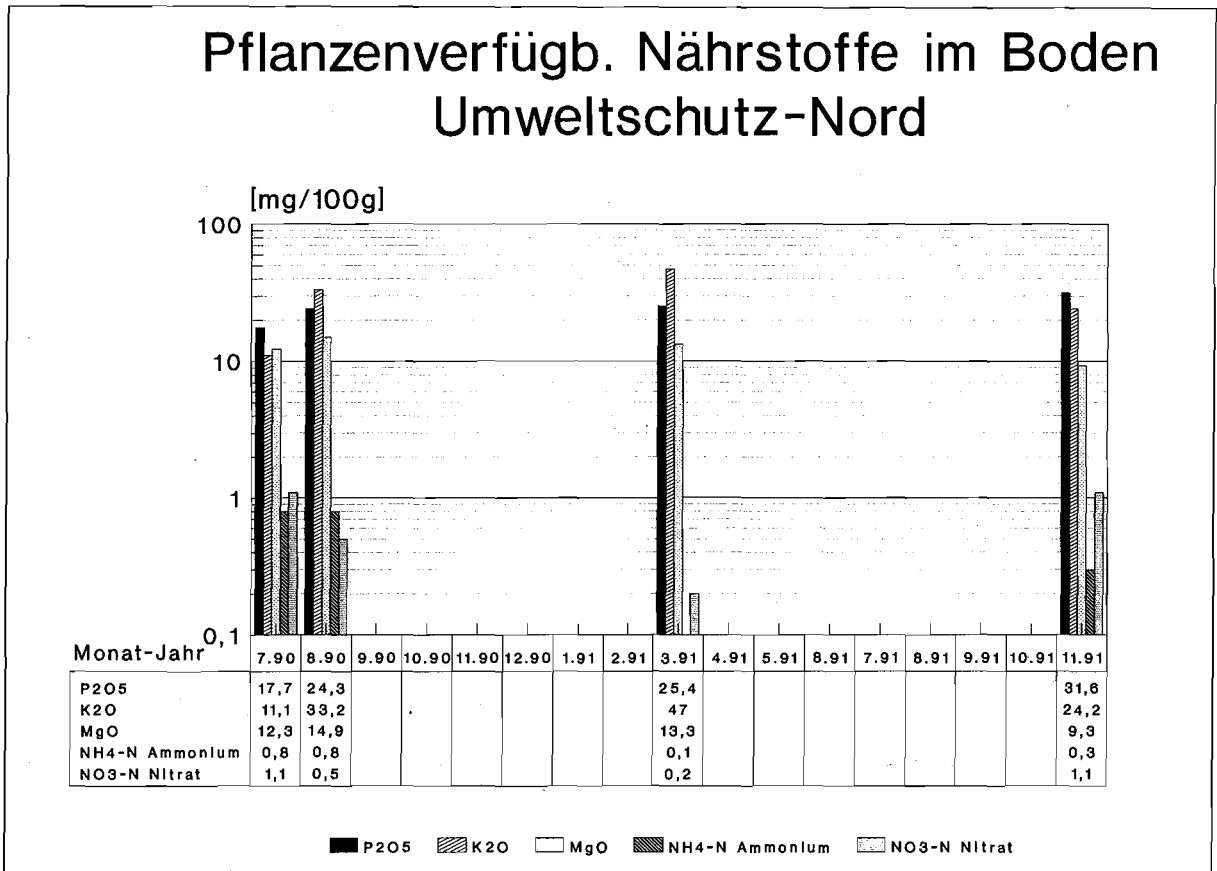
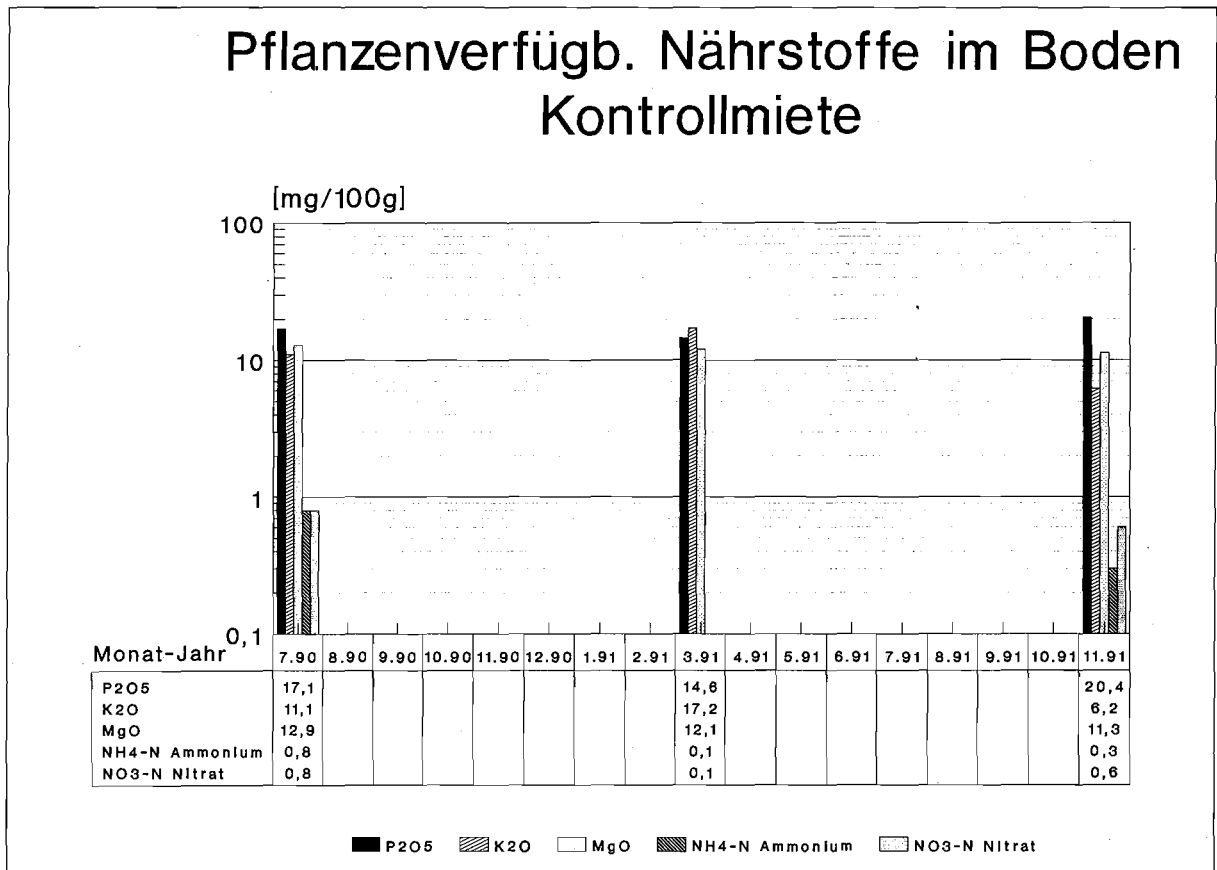


Abb. 7: Fortsetzung





6.8.2 Gehalte an C_{org} und N_t , C/N-Verhältnis im Boden

Die C_{org} -Gehalte des unbehandelten Bodenmaterials der Mieten (Nullbeprobung) bewegen sich zwischen ca. 3 % und 6 %. Daraus ergeben sich Gehalte an organischer Substanz des Bodens (Multiplikation des gemessenen C_{org} -Gehaltes mit dem Faktor 2, siehe SCHROEDER, 1978, S. 47) zwischen 6% und 12%. Diese Werte sind auf der Grundlage der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODENKUNDE, 1982) als stark bis sehr stark humos anzusprechen. Sie verdeutlichen, daß das Substrat der Versuchsmieten im wesentlichen aus Ah-Horizont-Material besteht. Zwar macht ein Teil des organischen Kohlenstoffs anthropogen eingebrachte Kohle, Koks und Holzpartikel aus, die natürliche organische Substanz des Bodens liegt demgegenüber in Form dispers verteilter Humusstoffe kolloidaler Größe vor (Beobachtungen am Binokular). Der hohe Gehalt natürlicher organischer Substanz dokumentiert sich auch in der dunklen Bodenfarbe (dunkel-gelblich-braun, 10YR 4/2, trocken). Nach der Aufbereitung der Substrate und der Zumischung organischer Substanzen ist bei der Miete von Umweltschutz Nord nur eine relativ geringe, bei den Mieten von PNW und CARO Biotechnik (CB) keine Zunahme der C_{org} -Gehalte zu verzeichnen (s. Abb. 8). Diese Tatsache scheint angesichts der z.T. recht großen Mengen organischer Materialien, die durch die einzelnen Versuchsteilnehmer eingemischt wurden, zu überraschen. Aufgrund der Unter-

suchungsmethodik bzw. der Vorbehandlung der Proben ist dieser Befund jedoch leicht zu erklären. Die Absiebung des Bodens auf < 2 mm dürfte zu einer Eliminierung größerer Anteile der zugesetzten, grob strukturierten organischen Stoffe vor der C_{org} -Bestimmung geführt haben.

Die zeitliche Entwicklung der C_{org} -Gehalte verläuft bei den einzelnen Versuchsteilnehmern nicht ganz einheitlich. Während die C_{org} -Gehalte der Kontrollmiete im gesamten Versuchszeitraum ungefähr auf gleichem Niveau bleiben, ist bei den Versuchsteilnehmern i. allg. ein Rückgang der Gehalte an organischer Substanz zu verfolgen. Dieser kann zumindest z.T. auf einen mikrobiellen Abbau organischer Substanz zurückgeführt werden. Bei der Miete von Umweltschutz Nord wird dieser Rückgang so deutlich, daß der o.g. Prozeß als alleinige Ursache wohl kaum in Frage kommt und daher auch die recht hohe Fehleranfälligkeit der angewandten Methode dafür eine Rolle spielen kann. Bei der Miete der Stadt Solingen ist neben dem methodischen Aspekt mit Sicherheit der Kompostabbau bzw. die Kompostverwertung für den Rückgang der organischen Substanz entscheidend.

Die N_t -Gehalte aller Mieten bewegen sich bei sämtlichen Untersuchungsterminen auf einem ähnlichen Niveau zwischen 0,11 % und 0,21 %. Aufgrund der geringen Probenanzahl, der relativ ähnlichen N_t -Gehalte der einzelnen Mieten sowie der einzukalkulierenden Analysefehler lassen sich eindeutige Tendenzen nur schlecht beschreiben.

Die C/N-Verhältnisse variieren in einem recht weiten Bereich von wenig über 30 bis 17. Auf der Grundlage der C/N-Verhältnisse kann die Humusqualität der Mieten nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODENKUNDE, 1982) als gering bis mittel eingestuft werden. Bei allen Versuchsteilnehmern ist bei fortschreitender Zeit eine Verengung des C/N-Verhältnisses festzustellen, die durch die Abnahme der C_{org} -Gehalte und/oder Zunahme der N_t -Gehalte bedingt wird. Am ausgeprägtesten ist dieser Prozeß bei der Miete der Stadt Solingen zu sehen, mit einer Abnahme des C/N-Verhältnisses von 32 (1. Beprobung, Aug. 1990; 30 Vol.-% Kompostzugabe) auf 17 (letzte Beprobung, Nov. 1991; Abbau von C-Verbindungen).

Aus den Parametern C_{org} , N_t und pflanzenverfügbarer Phosphor läßt sich das C:N:P-Verhältnis ableiten, das als wichtiger Kennwert für die Bewertung des Substrates hinsichtlich des Wachstums von Mikroorganismen gelten kann. Aus dem C:N:P-Verhältnis in den Zellen (etwa 100-200:10-30:1) läßt sich unter der Voraussetzung, daß ca. 50 % des organischen Kohlenstoffs veratmet werden, und daß ein Teil des Phosphors wegen Adsorption nicht verfügbar ist, ein für das Wachstum von Mikroorganismen optimales C:N:P-Verhältnis von 250:10:3 ableiten. Die C:N:P-Verhältnisse der hier untersuchten Proben liegen im allgemeinen in einem als günstig anzusehenden Bereich.

Die untersuchten bodenchemischen Parameter liegen nach der Erstellung der Mieten durch die Versuchsteilnehmer während des gesamten Versuchszeitraums in einem für die Durchführung einer mikrobiologischen Sanierung günstigen Bereich. Nährstoffgehalte, C_{org} - und N_{org} -Gehalte und pH-Werte dürften für die mikrobiologische Aktivität in den Mieten keine maßgeblichen limitierenden Faktoren gewesen sein.

Abb. 8: Übersicht der Corg-Gehalte im Boden der fünf Versuchsmieten

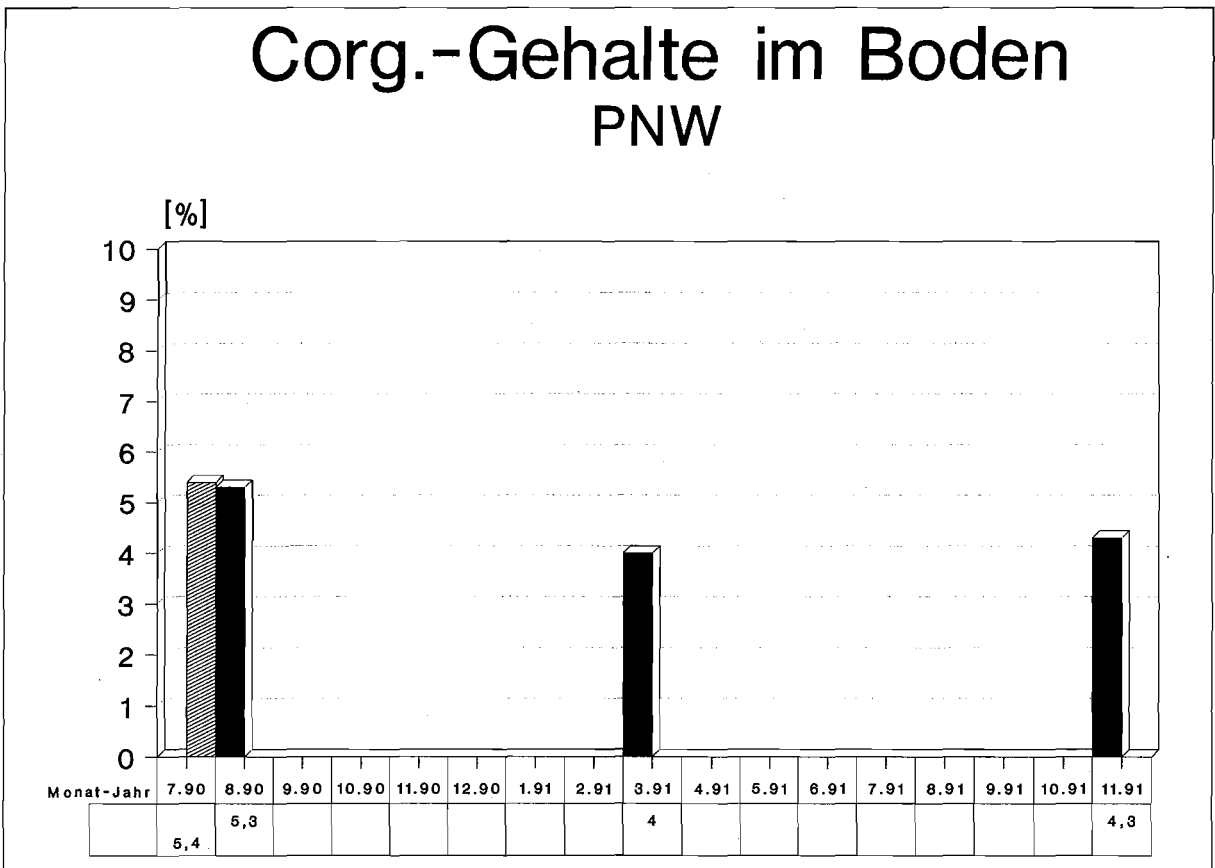
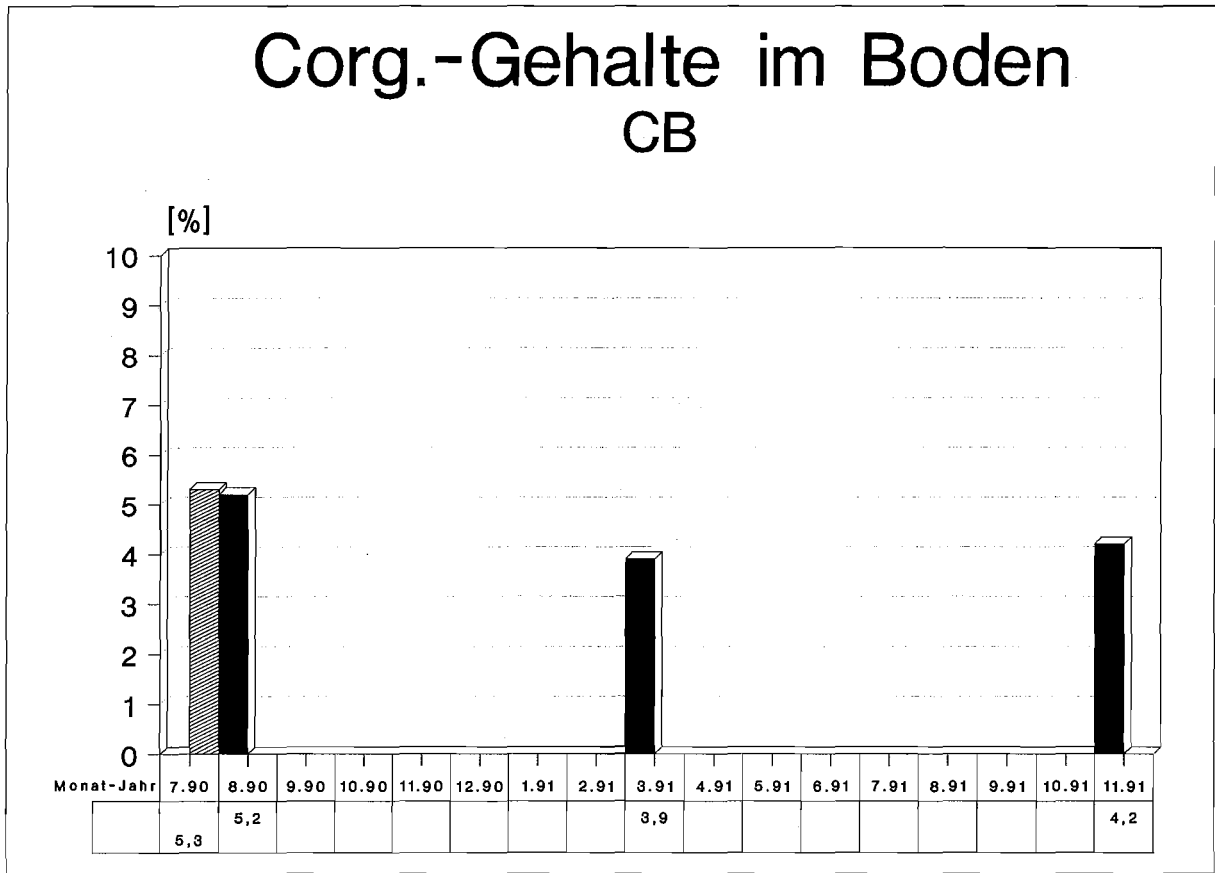


Abb. 8: Fortsetzung

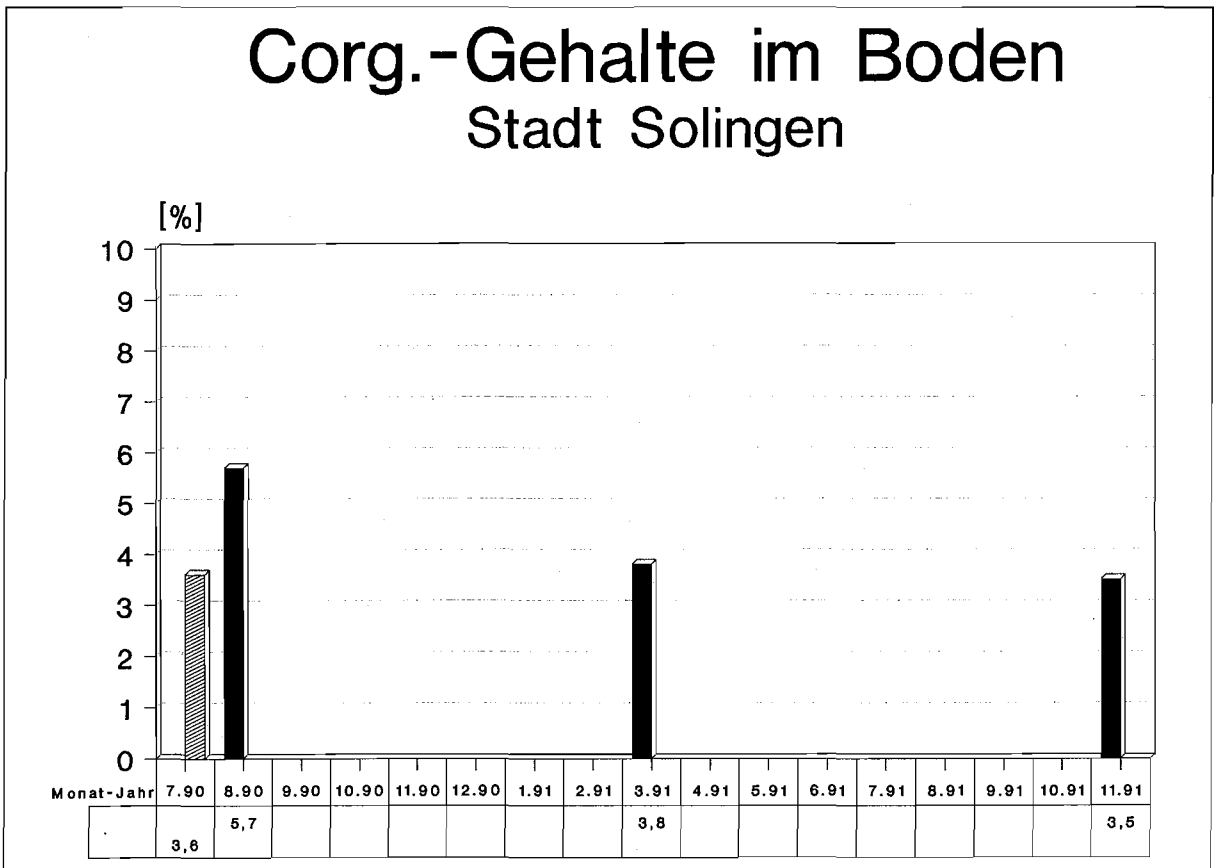
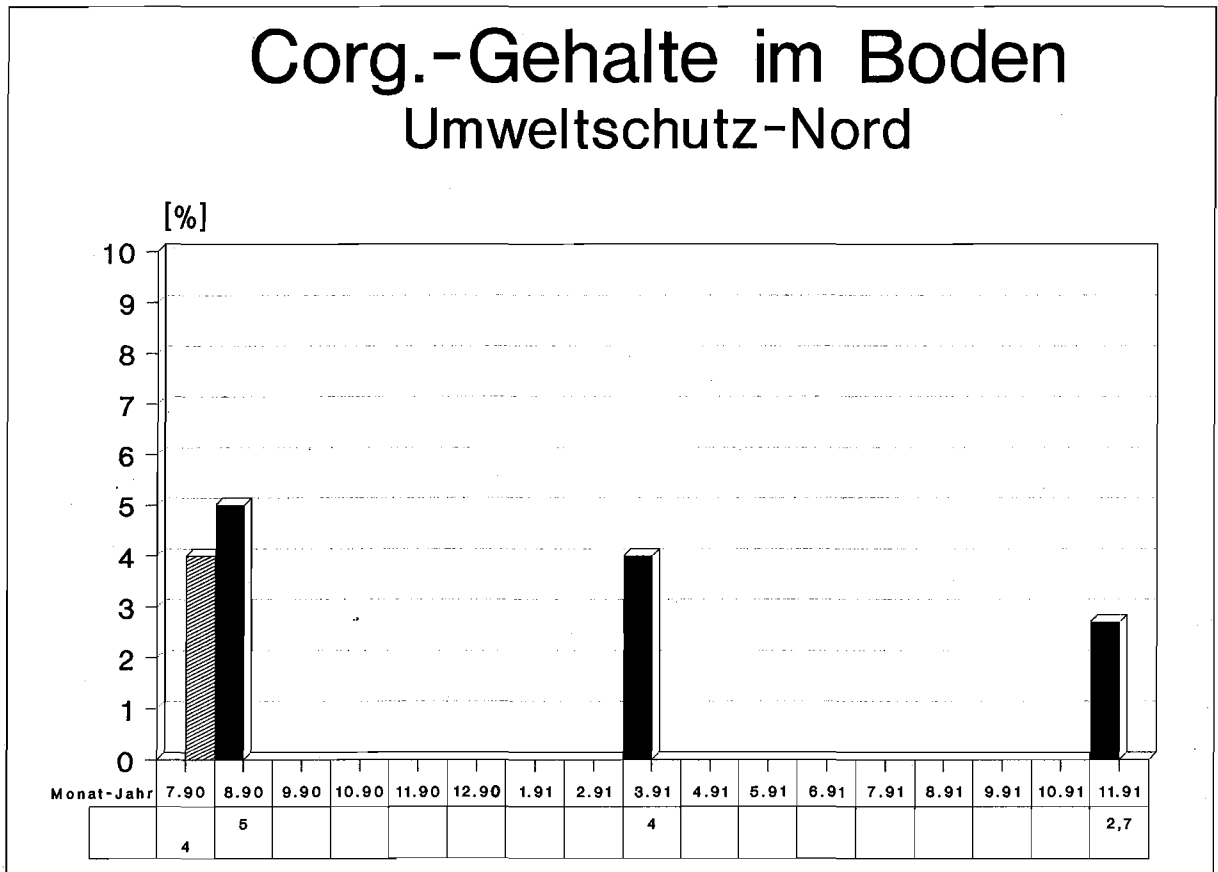
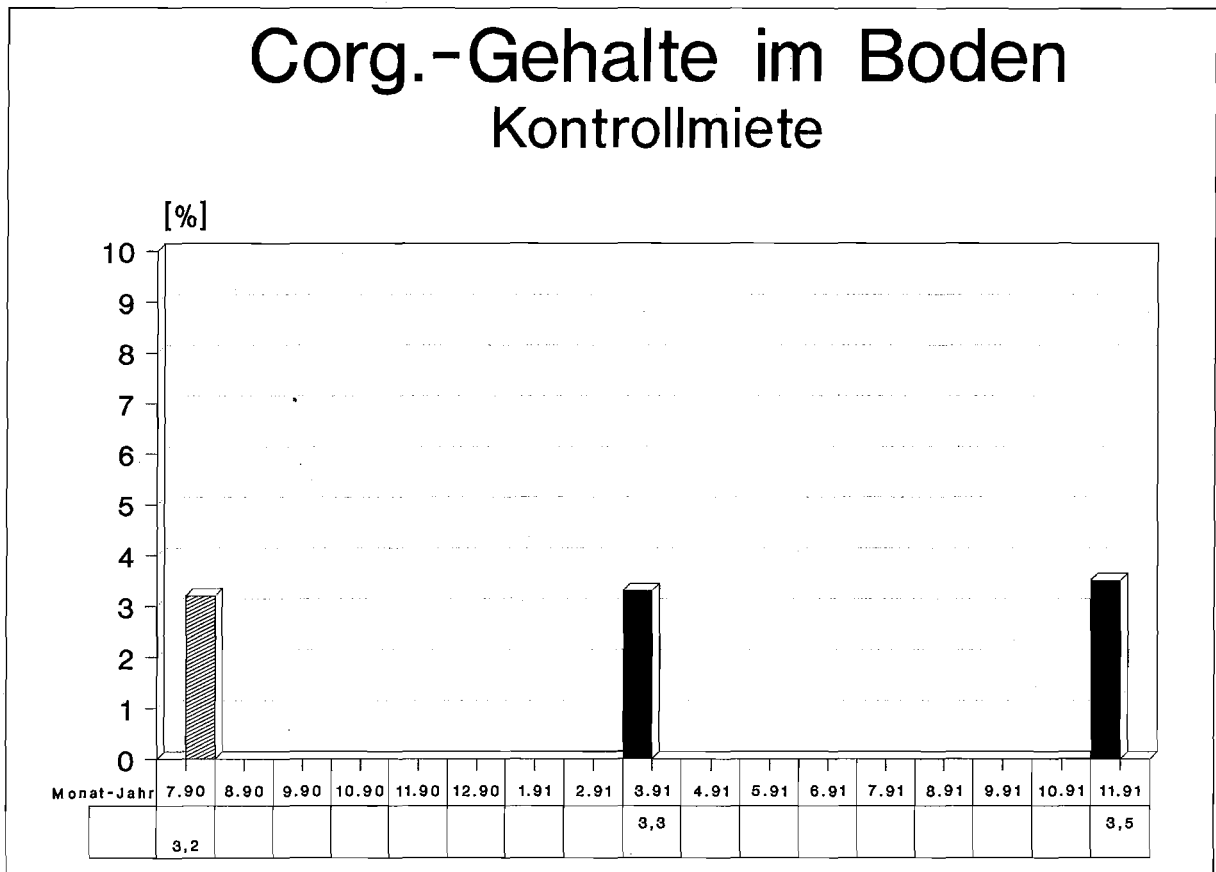


Abb. 8: Fortsetzung



6.8.3 Bodenmikrobiologische Untersuchungen

6.8.3.1 Aktivitätsparameter

Die Untersuchung der bodenmikrobiologischen Aktivitätsparameter Bodenatmung, substratinduzierte Atmung, Dehydrogenase-Aktivität und Populationsdichten verfolgten das Ziel, die durch das Mietenmanagement (Bodenbearbeitung, Zufuhr von Nährstoffen und organischen Zuschlagsstoffen) angestrebte Optimierung der mikrobiellen Aktivität festzustellen und zu prüfen, ob das Ausmaß der mikrobiellen Aktivität der einzelnen Mieten in Beziehung zu dem gemessenen PAK-Abbau der jeweiligen Versuchsteilnehmer steht. Grundsätzlich ist letzteres nur für den Fall eines Schadstoffabbaus im Kometabolismus, d.h. gekoppelt an den allgemeinen mikrobiellen Abbau organischen Materials, zu erwarten. Die spezifische Abbauaktivität PAK-abbauender Organismen ist anhand von Summenparametern der biologischen Aktivität vor dem Hintergrund der allgemein hohen Abbauaktivität im Boden nicht zu erkennen.

Die Entwicklung der Bodenatmung der Versuchsmieten ist in Abb. 9 dargestellt. In der Regel weist die Nullbeprobung die geringste Bodenatmung auf. Nach Erstellung der Mieten ist ein Anstieg der Bodenatmung zu verzeichnen, der jeweils insbesondere bei der zweiten Beprobung (Okt. 1990) zu deutlich höheren Werten führt. Ab der zweiten Beprobung verbleibt

die Bodenatmung bei fast allen nachfolgenden Terminen auf einem ähnlich hohen Niveau, lediglich im März und/oder April 1991 ist bei den Mieten der Stadt Solingen, von PNW und in abgeschwächter Form auch von CB ein Rückgang der Bodenatmung zu verzeichnen. Bei einem Vergleich mit Referenzdaten aus der Literatur (BECK, 1973) ergibt sich bei einer größenordnungsmäßigen Bewertung der Meßergebnisse (die in dem o.g. Aufsatz dargestellten Vergleichswerte beziehen sich auf eine andere Bodeneinwaage und Bebrütungstemperatur als bei der hier angewandten Methode) für die Nullbeprobungen der Mieten eine mäßige Aktivität. Bei den weiteren Beprobungsterminen ist im allgemeinen eine starke bis sehr starke Aktivität zu verzeichnen. In der festzustellenden Aktivitätszunahme äußern sich die positiven Wirkungen der in die Mieten eingebrachten Zuschlagsstoffe sowie des Mietenmanagements. Bei der Kontrollmiete ist ebenfalls eine Zunahme der Bodenatmung zu konstatieren. Diese tritt jedoch erst nach der dritten Beprobung (Dez. 1990) stärker in Erscheinung. Die mikrobiologische Aktivität der Kontrollmiete, die nicht mit organischen Stoffen angereichert wurde, wird auf die Erdbaumaßnahmen (Auskoffierung des Bodens - Mietenaufbau) und Selbstbebrütung zurückgeführt. Die guten bis sehr guten Bodenatmungswerte weisen auf keine vorhandene Hemmung der Kontamination und Einschränkung der mikrobiologischen Sanierbarkeit hin. Als Richtwert gilt die potentielle Atmungsaktivität von 5,0 mg CO₂/100 g TS Boden in 24 h (DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz).

Eine insgesamt vergleichbare Entwicklung ist bei der substratinduzierten Atmung festzustellen (vgl. Abb. 10). Die substratinduzierte Atmung steigt nach der Errichtung der Mieten der Versuchsteilnehmer mehr oder weniger deutlich an, am stärksten bei der Miete der Stadt Solingen. Ein erstes Maximum der substratinduzierten Atmung wird bei der zweiten (Okt. 1990) bzw. dritten (Dez. 1990) Beprobung erreicht. Nach dem Winter 1990/1991 verläuft die substratinduzierte Atmung zunächst bis zum Juni 1991 auf einem niedrigeren Niveau; die höchsten Aktivitäten werden nach einem steilen Anstieg im August 1991 erreicht. Dabei weisen die Mieten von PNW und der Stadt Solingen die absolut höchsten Werte der substratinduzierten Atmung auf. Mit dem einsetzenden Herbst läßt sich wieder ein Rückgang der Aktivität bei allen Versuchsteilnehmern erkennen (vgl. Probennahmen 9. und 10. der Abb. 10). Die Entwicklung der substratinduzierten Atmung der Kontrollmiete verläuft grundsätzlich ähnlich wie bei den übrigen Versuchsmieten.

Die stärkste Differenzierung hinsichtlich der mikrobiologischen Aktivität ist aufgrund der Entwicklung der Dehydrogenase-Aktivität festzustellen (vgl. Abb. 11). Bei der Eingangsuntersuchung liegt die Dehydrogenase-Aktivität aller Mieten in einem Bereich, der bei einem Vergleich mit Referenzwerten von BECK (1973, S. 281) auf eine sehr schwache Aktivität schließen läßt. Nach Errichtung der Mieten ist bei allen Versuchsteilnehmern eine mehr oder weniger starke Zunahme der Dehydrogenase-Aktivität zu verzeichnen. Diese Zunahme ist bei der Miete von PNW am stärksten. Im Dezember 1990 wird in dieser Miete eine Dehydrogenase-Aktivität gemessen, die nach BECK (1973) als sehr stark zu bezeichnen ist. Der Anstieg der Dehydrogenase-Aktivität verläuft bei den Mieten von Umweltschutz Nord und der Stadt Solingen weniger steil. Immerhin werden auch in diesen beiden Mieten im Dezember 1990 bereits starke Aktivitäten gemessen. Eine noch deutlich geringere Steigerung ist bei der Miete der CB sowie der Kontrollmiete festzustellen. In diesen Mieten werden lediglich mäßige Aktivitäten erreicht.

Die zeitliche Differenzierung der Dehydrogenase-Aktivität ist jahreszeitlich bedingt. Sie spiegelt mit einer gewissen Zeitverzögerung den Temperaturverlauf wider. Die unterschiedlich hohe DHA der einzelnen Mieten dürfte durch den Eintrag unterschiedlicher organischer Stoffe durch die einzelnen Versuchsteilnehmer bei der Errichtung der Mieten sowie durch das unterschiedliche Mietenmanagement verursacht sein. Die drei gemessenen bodenmikrobiologischen Parameter zeigen deutlich, daß die Behandlung der Böden durch die beteiligten Versuchsteilnehmer zu einer Erhöhung der mikrobiologischen Gesamtaktivität geführt hat. Das Ausmaß der Steigerung der mikrobiologischen Gesamtaktivität fällt unterschiedlich stark aus. Die Dehydrogenase-Aktivität läßt dabei eine erheblich stärkere Differenzierung der einzelnen Versuchsmieten erkennen als Bodenatmung und substratinduzierte Atmung. Bei einer vorsichtigen Gesamtbewertung der drei untersuchten bodenmikrobiologischen Parameter läßt sich eine Rangfolge der Mieten erkennen. Die günstigsten mikrobiologischen Parameter zeigen demnach die Mieten von PNW und der Stadt Solingen. Nur etwas geringer ist die Aktivität in der Miete von Umweltschutz Nord einzuschätzen. Die Miete von CB zeigt gegenüber den vorgenannten schon eine deutlich geringere mikrobielle Aktivität, die insgesamt nur geringfügig höher als in der Kontrollmiete ausfällt.

Abb. 9: Übersicht der Bodenatmung für die fünf Versuchsmieten

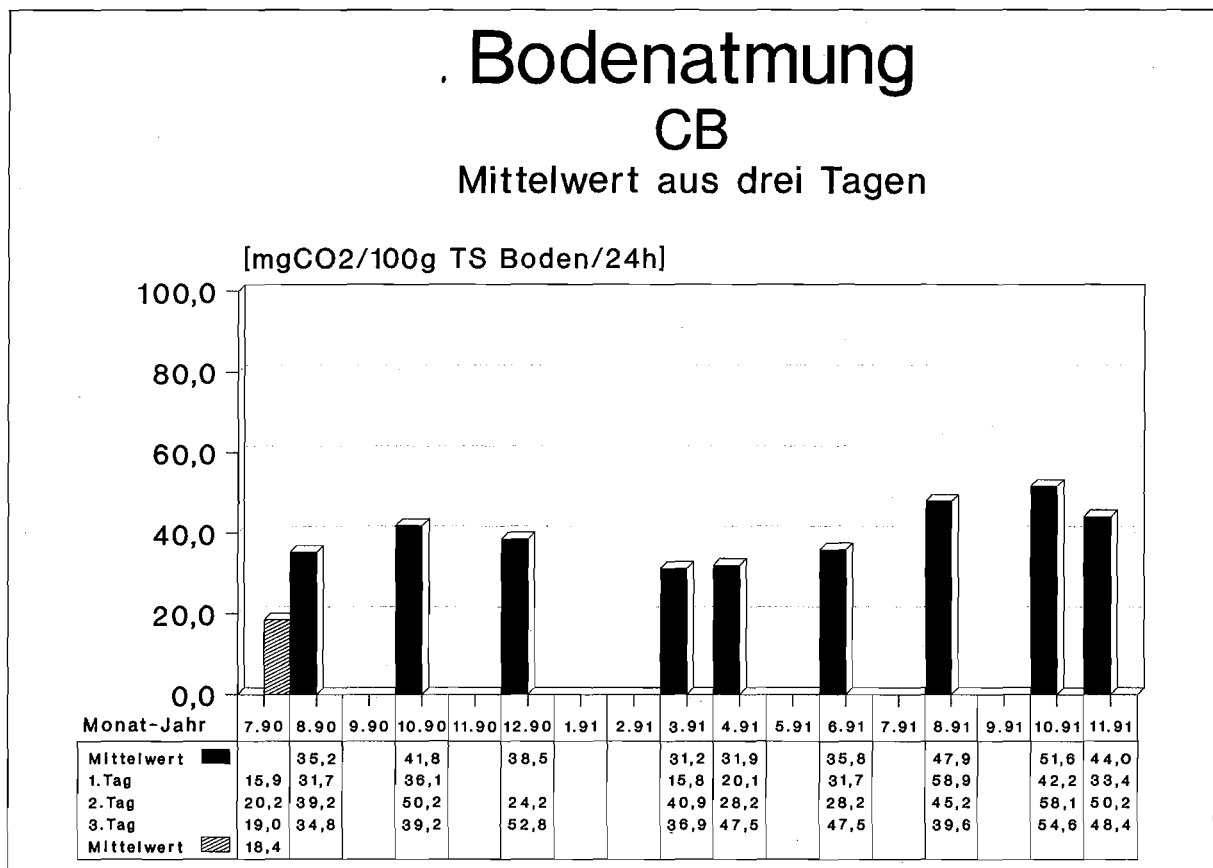


Abb. 9: Fortsetzung

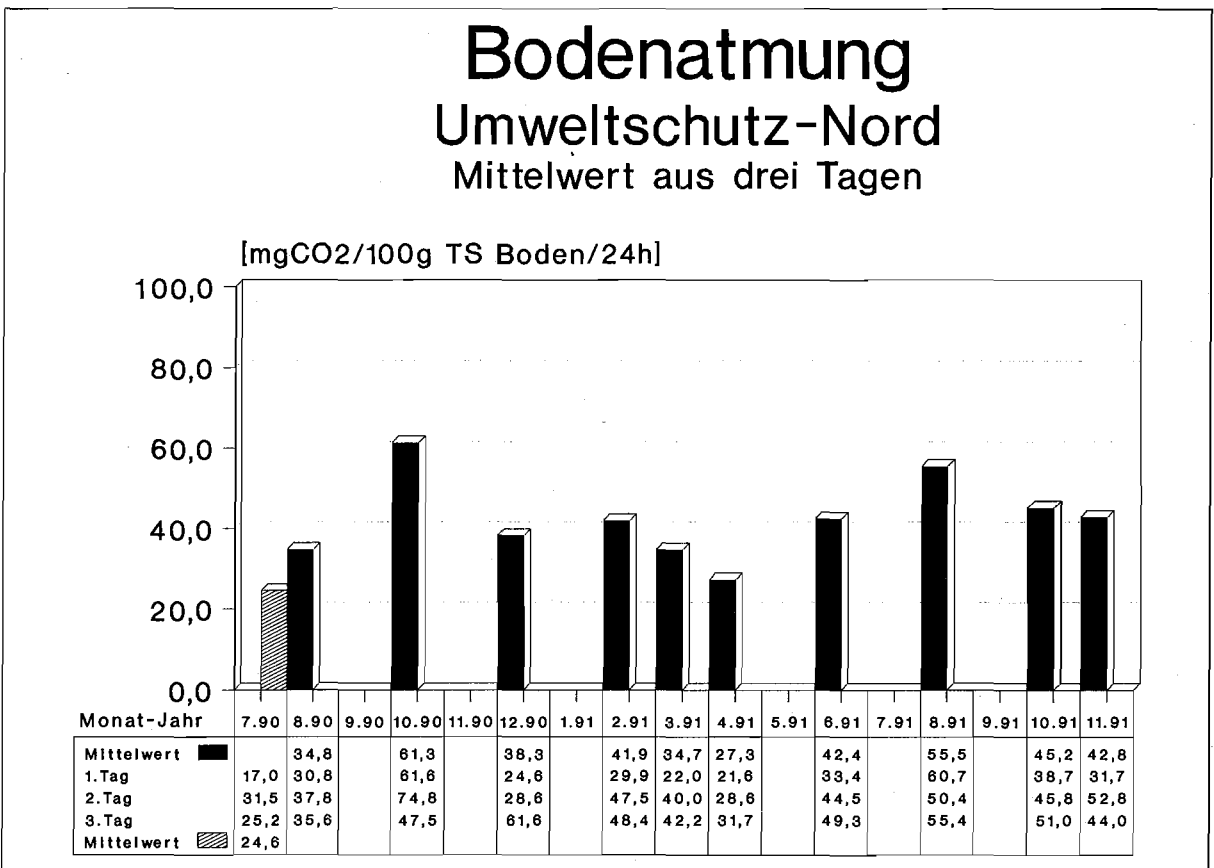
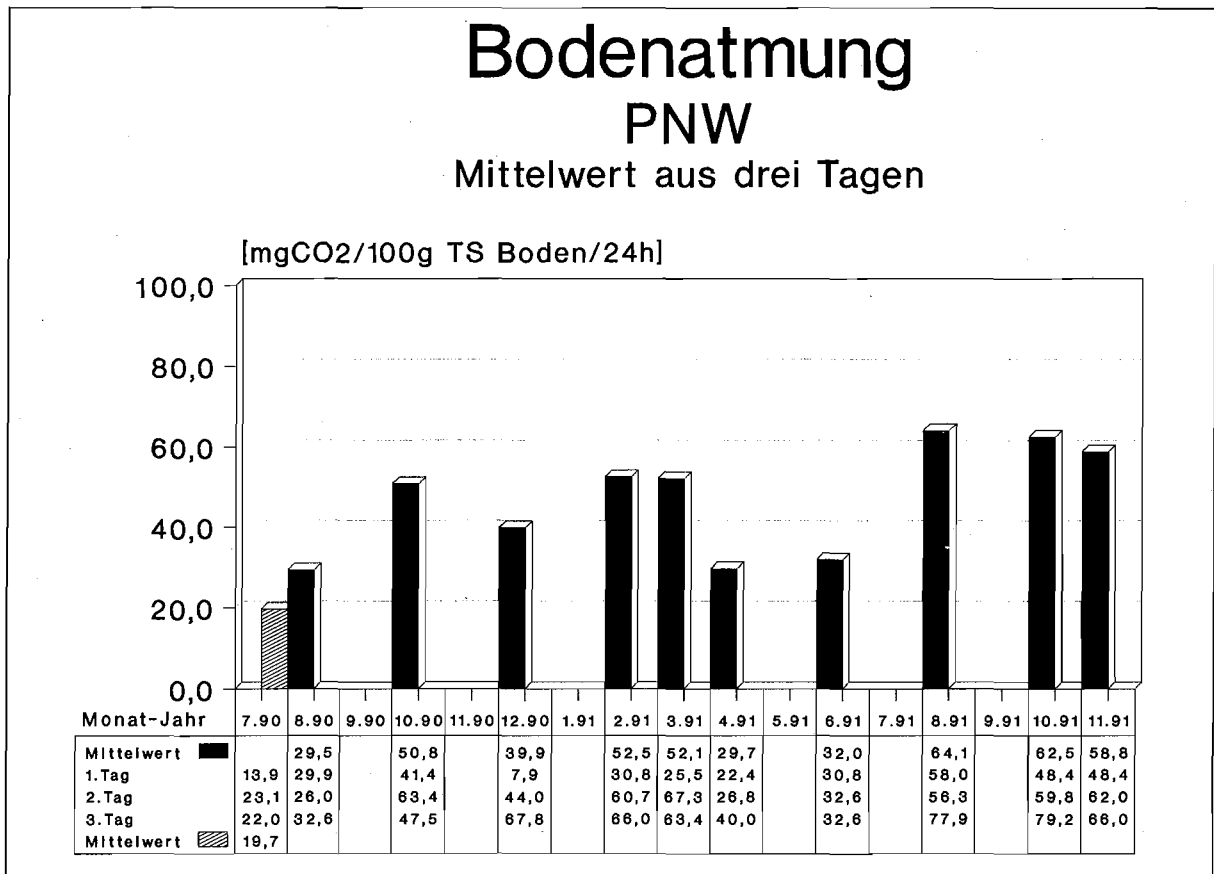


Abb. 9: Fortsetzung

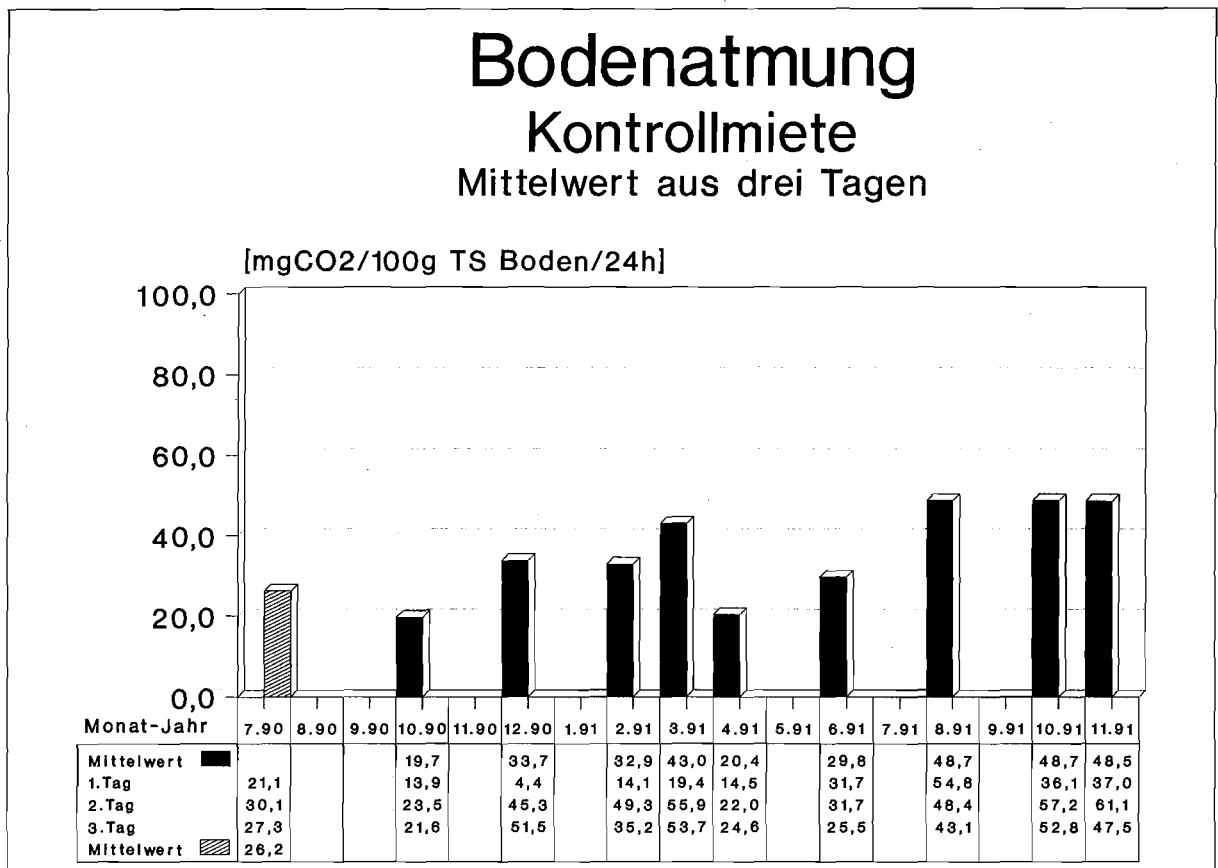
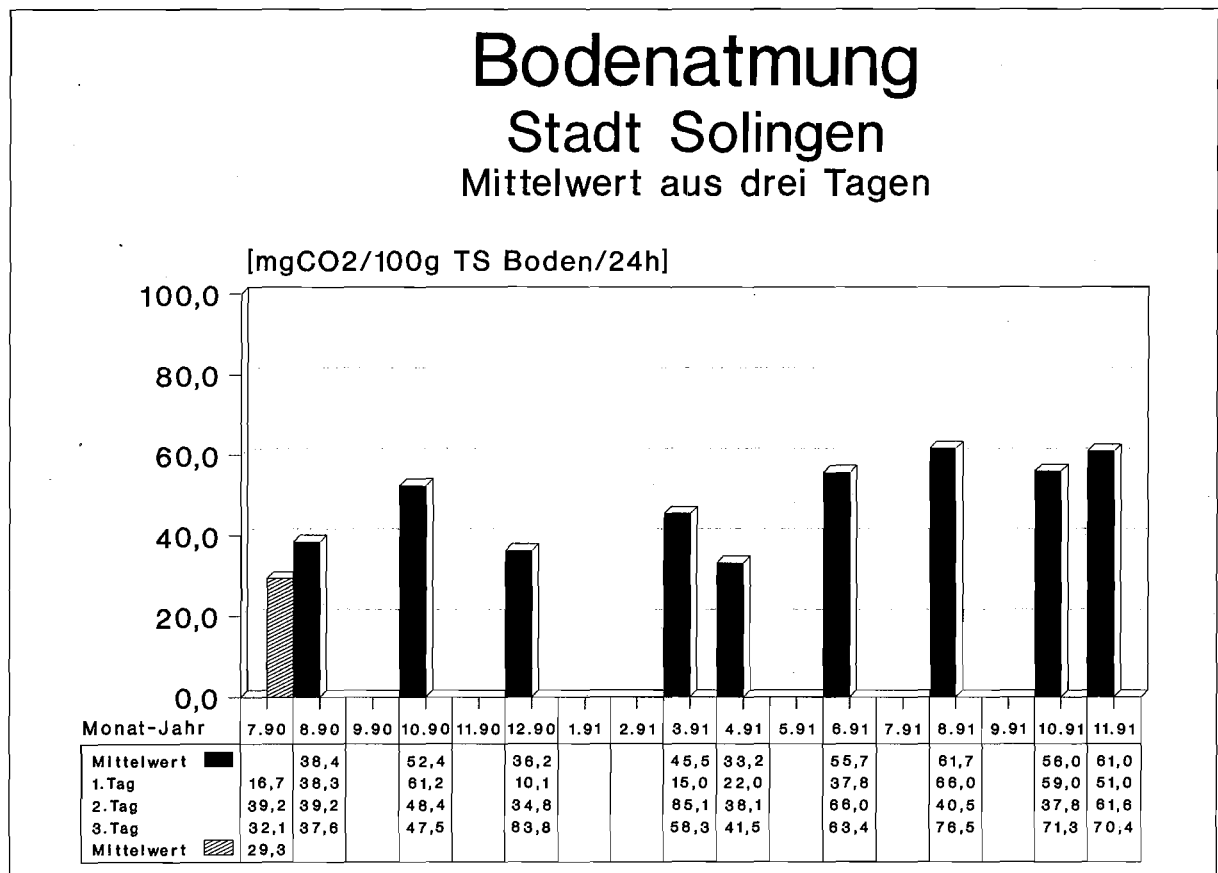
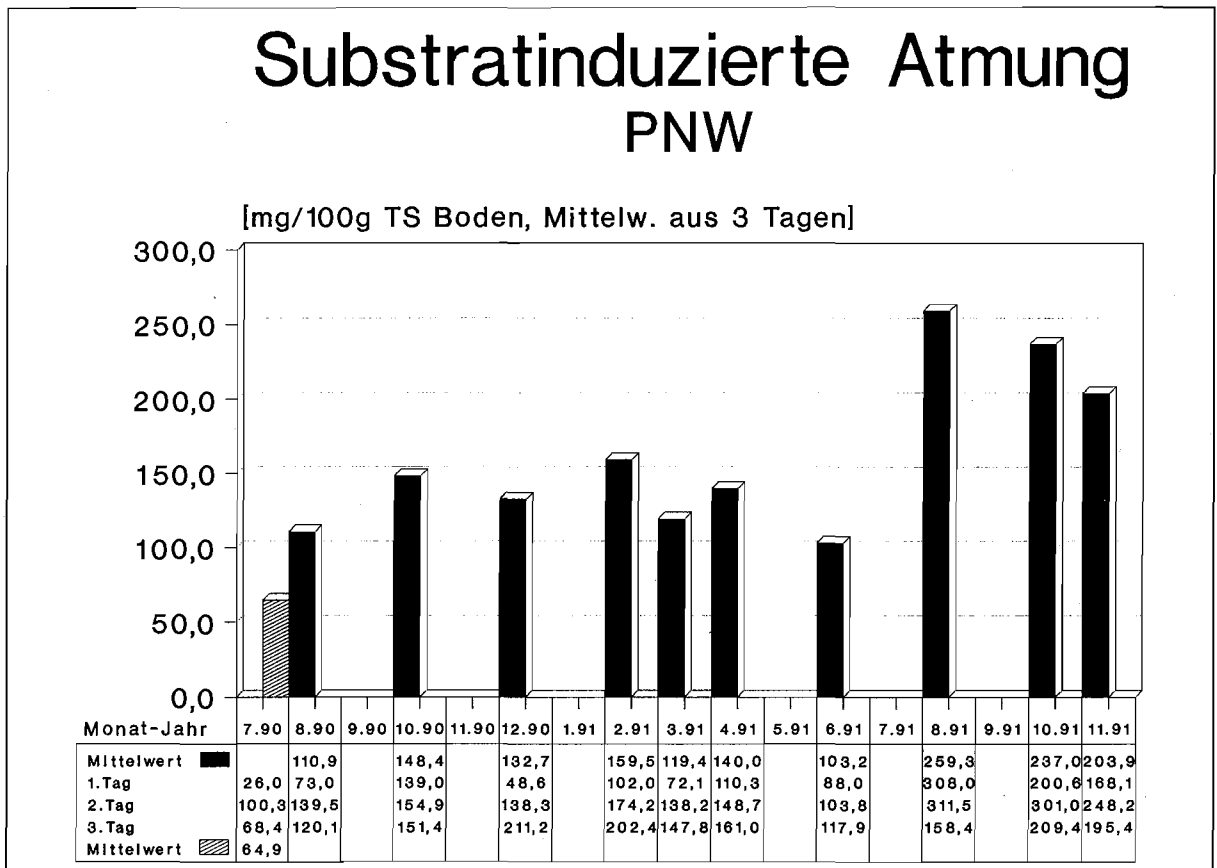
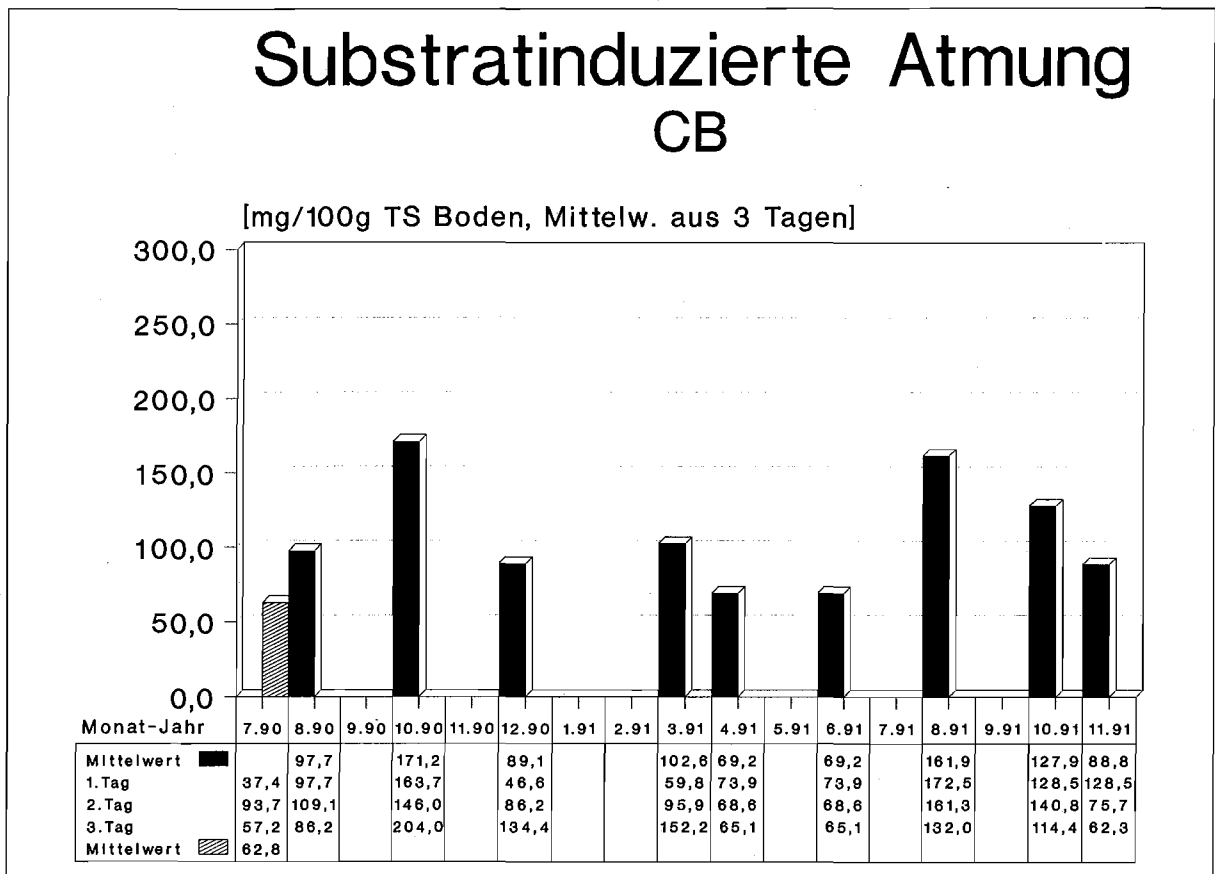
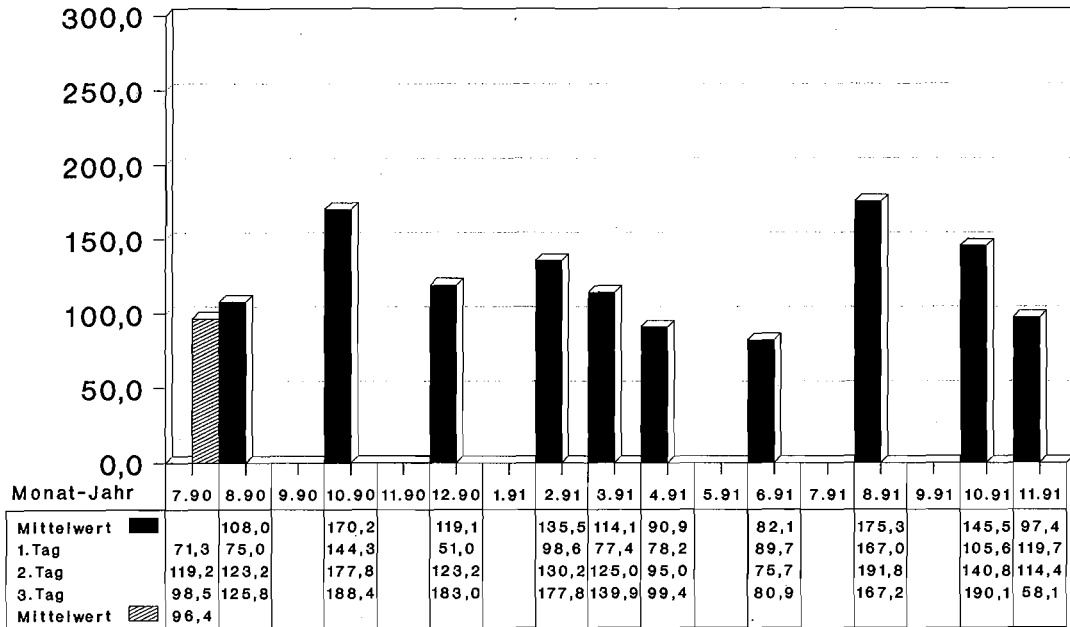


Abb. 10: Übersicht der substratinduzierten Atmung für die fünf Versuchsmieten



Substratinduzierte Atmung Umweltschutz-Nord

[mg/100g TS Boden, Mittelw. aus 3 Tagen]



Substratinduzierte Atmung Stadt Solingen

[mg/100g TS Boden, Mittelw. aus 3 Tagen]

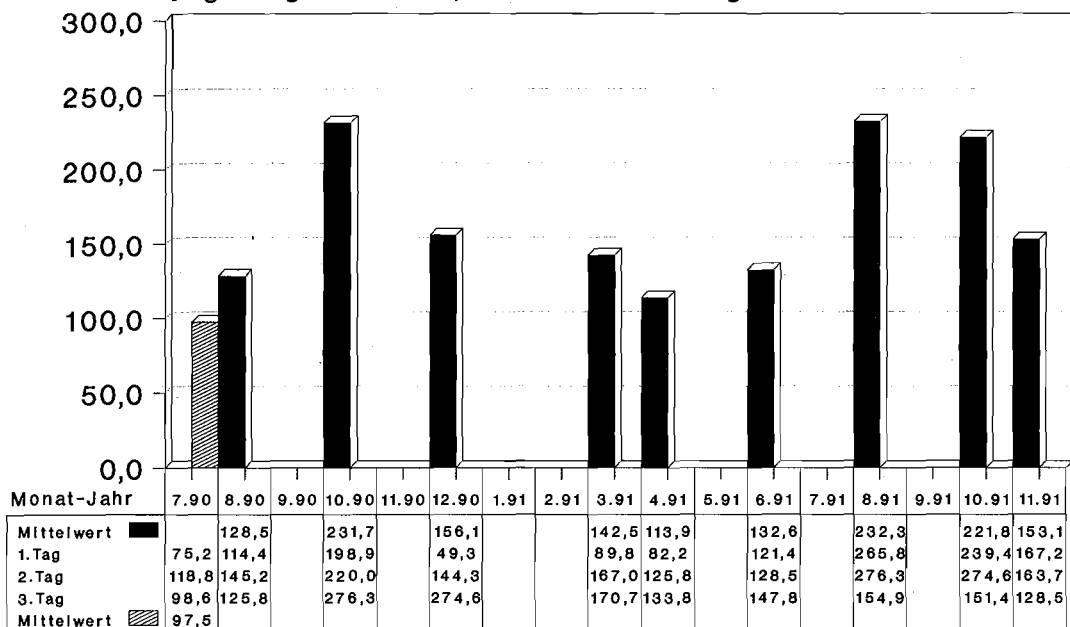


Abb. 10: Fortsetzung

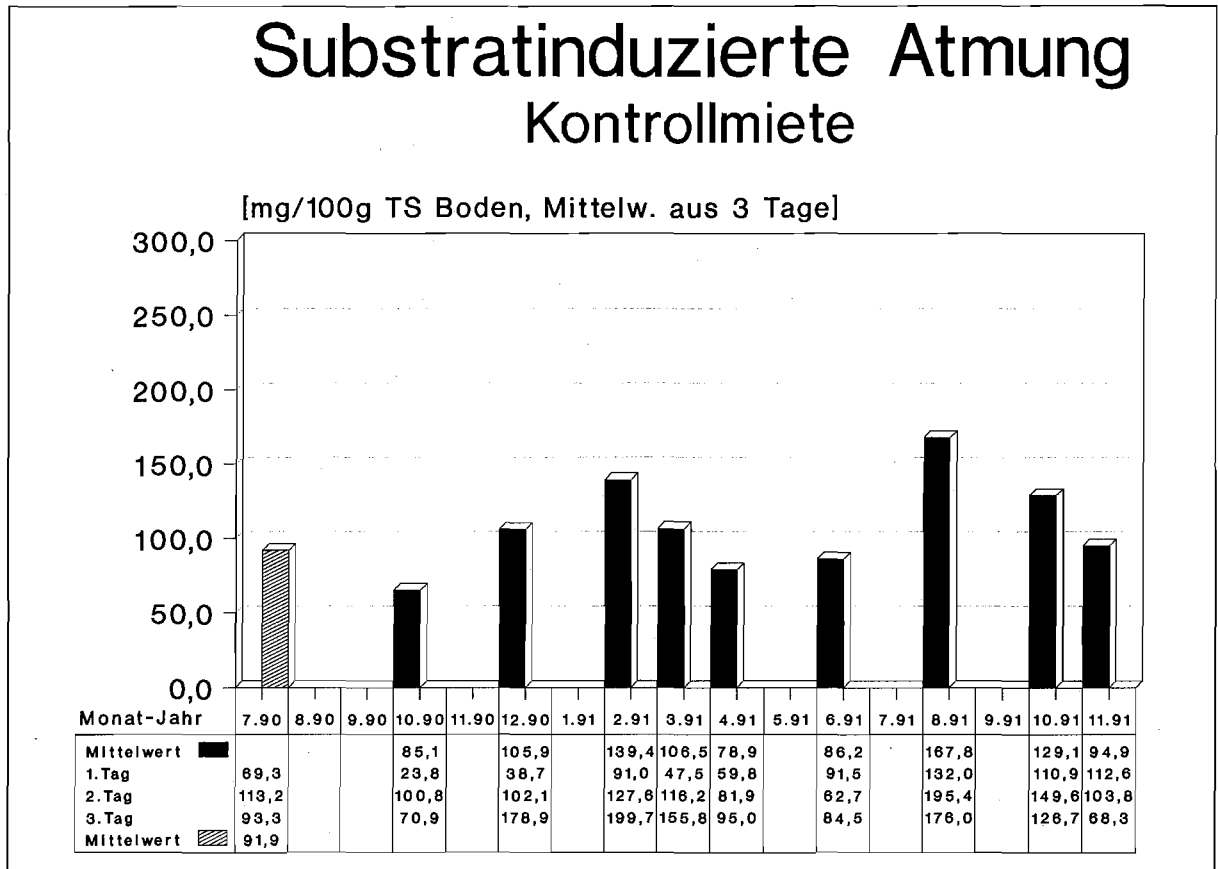


Abb. 11: Übersicht über die Dehydrogenase-Aktivität aller fünf Versuchsmieten

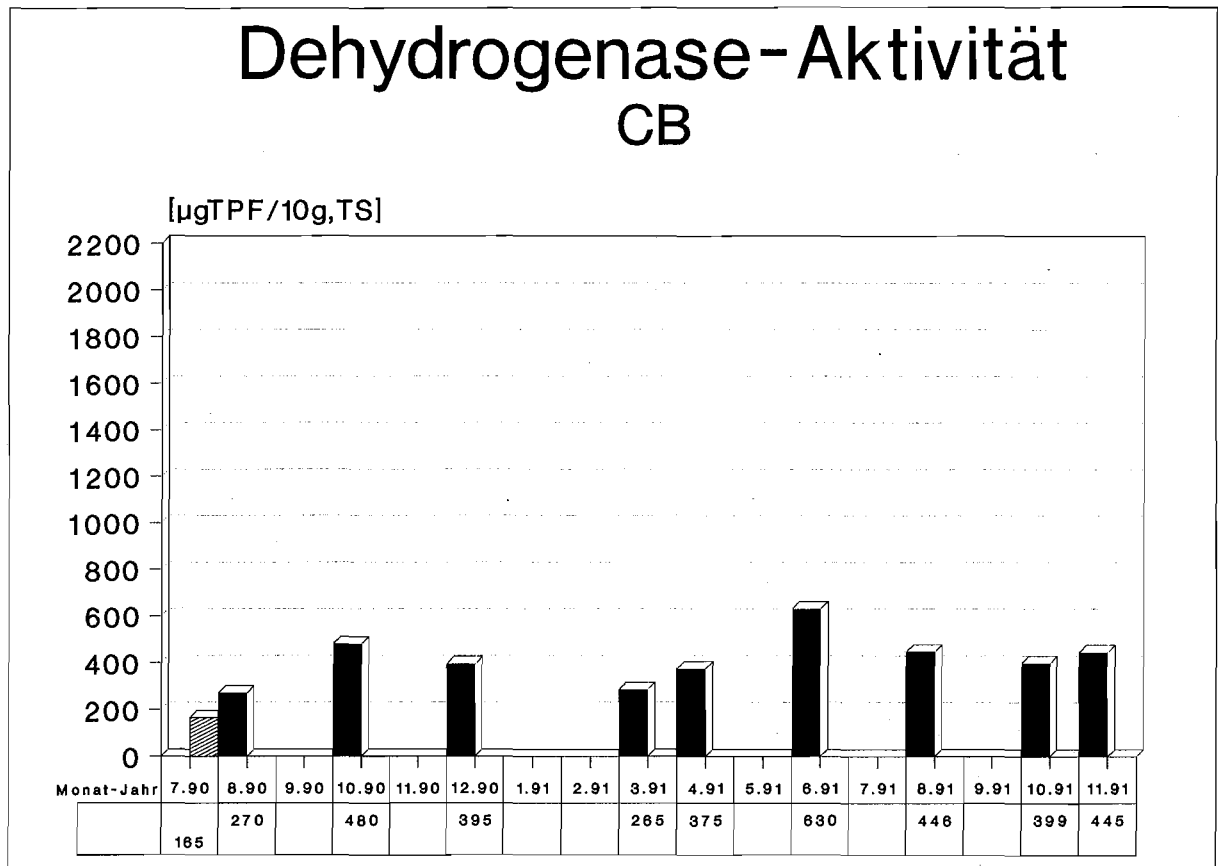


Abb. 11: Fortsetzung

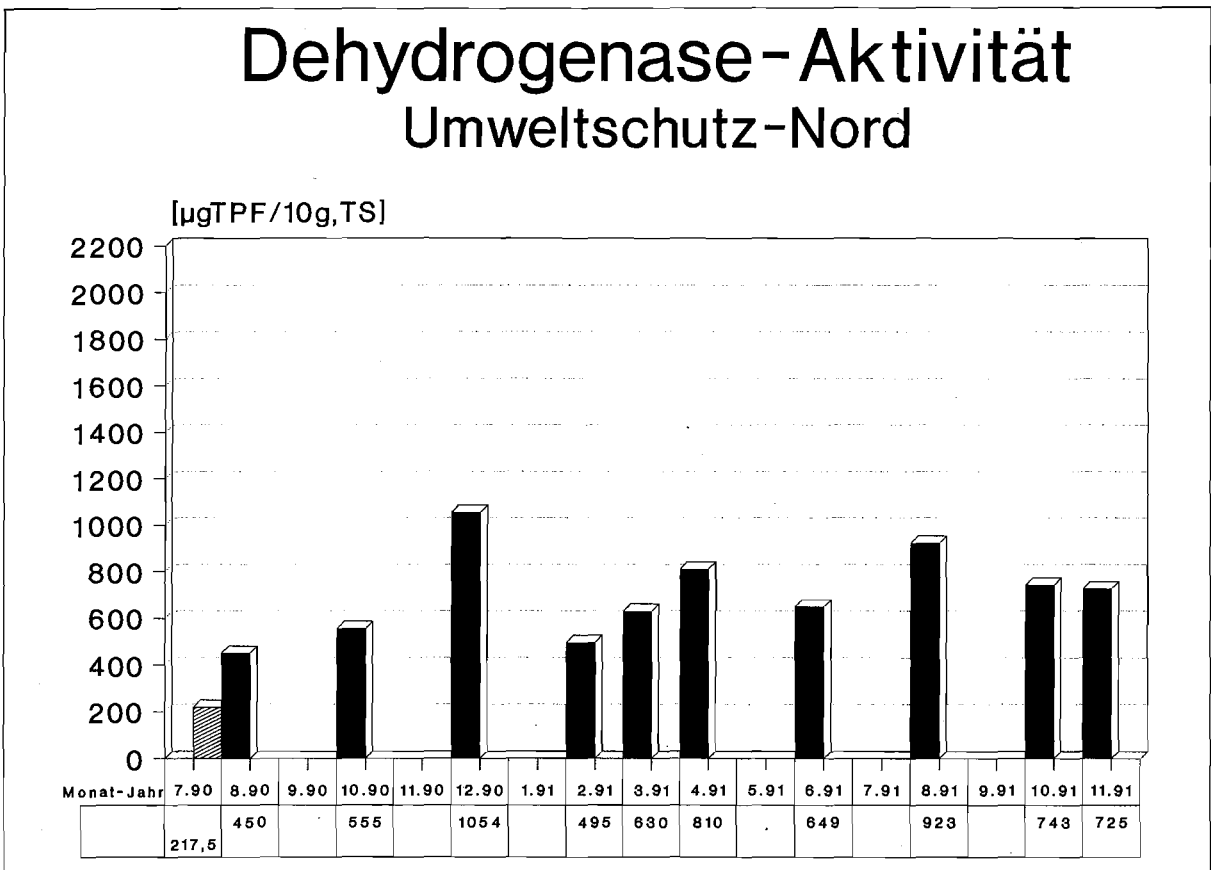
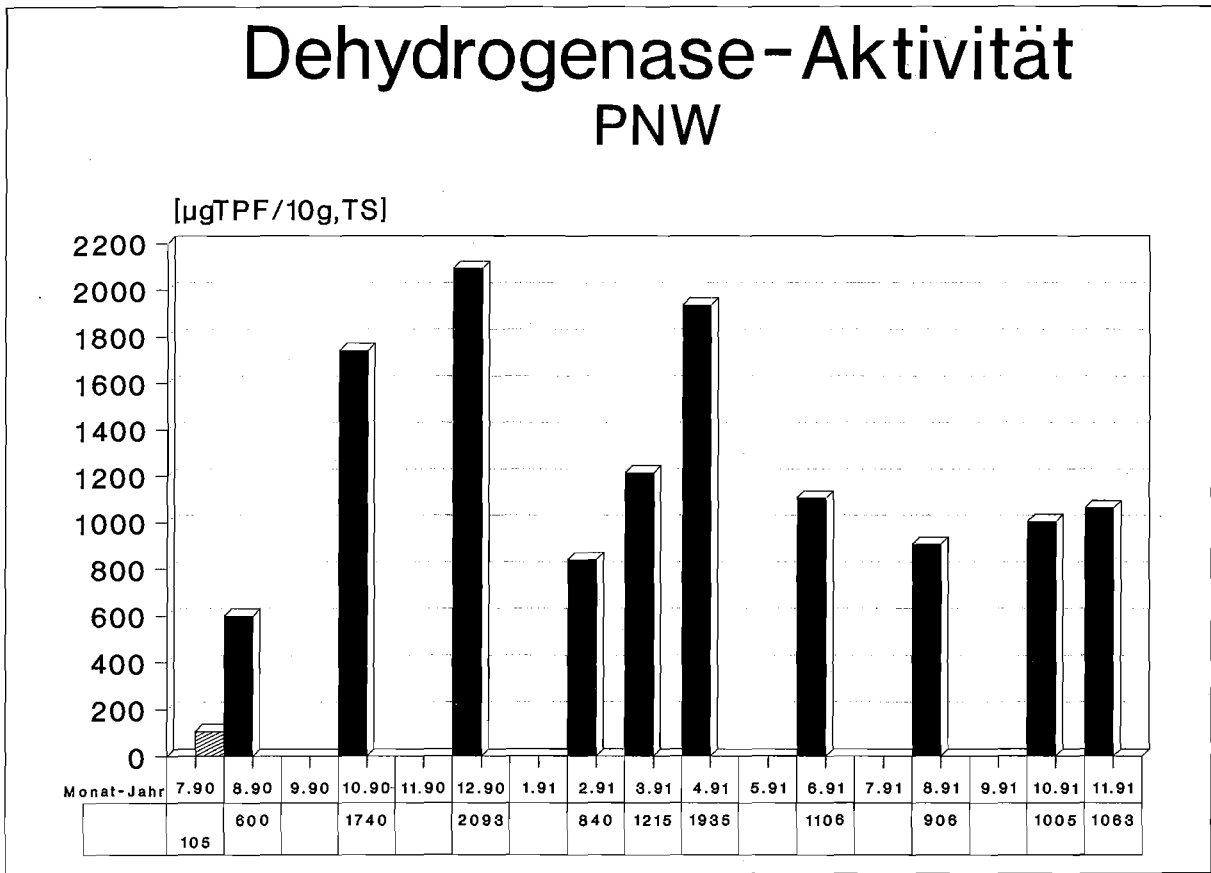
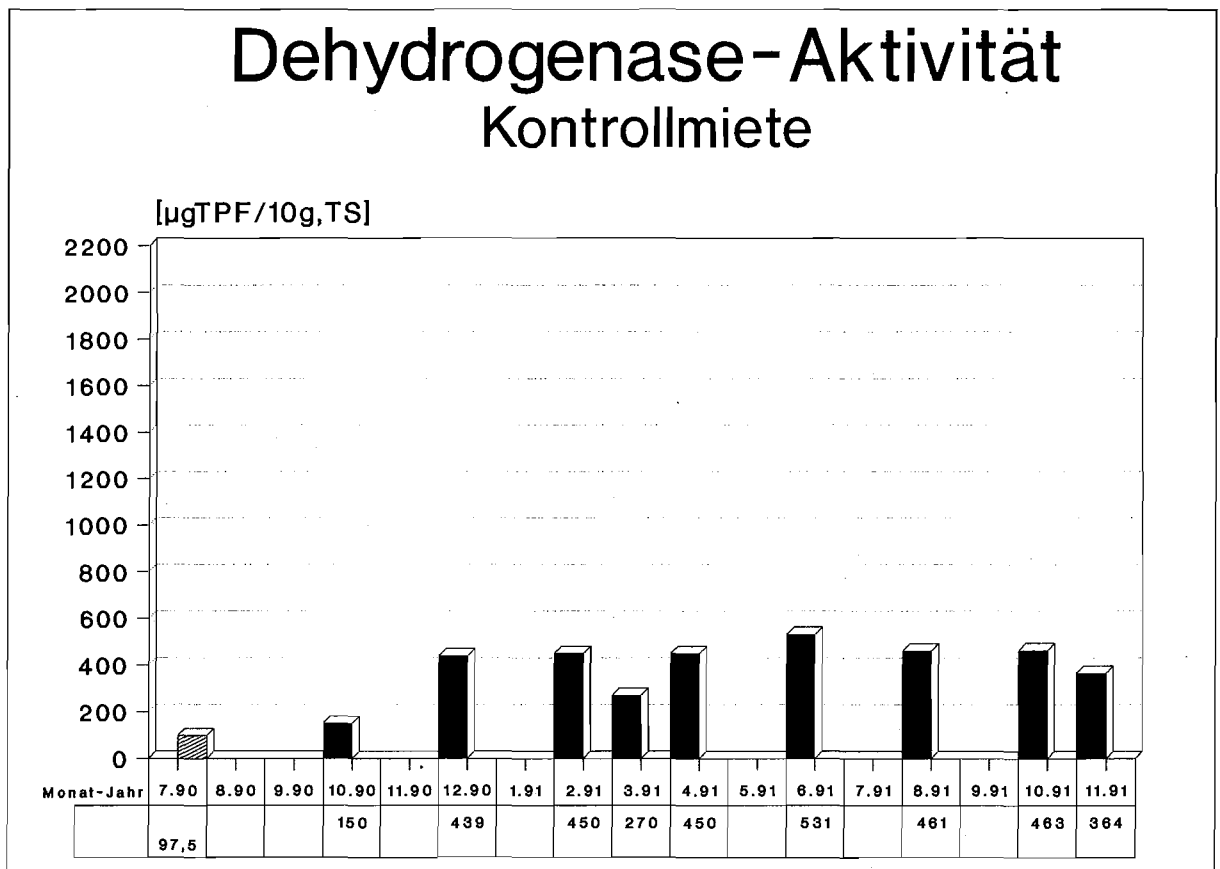
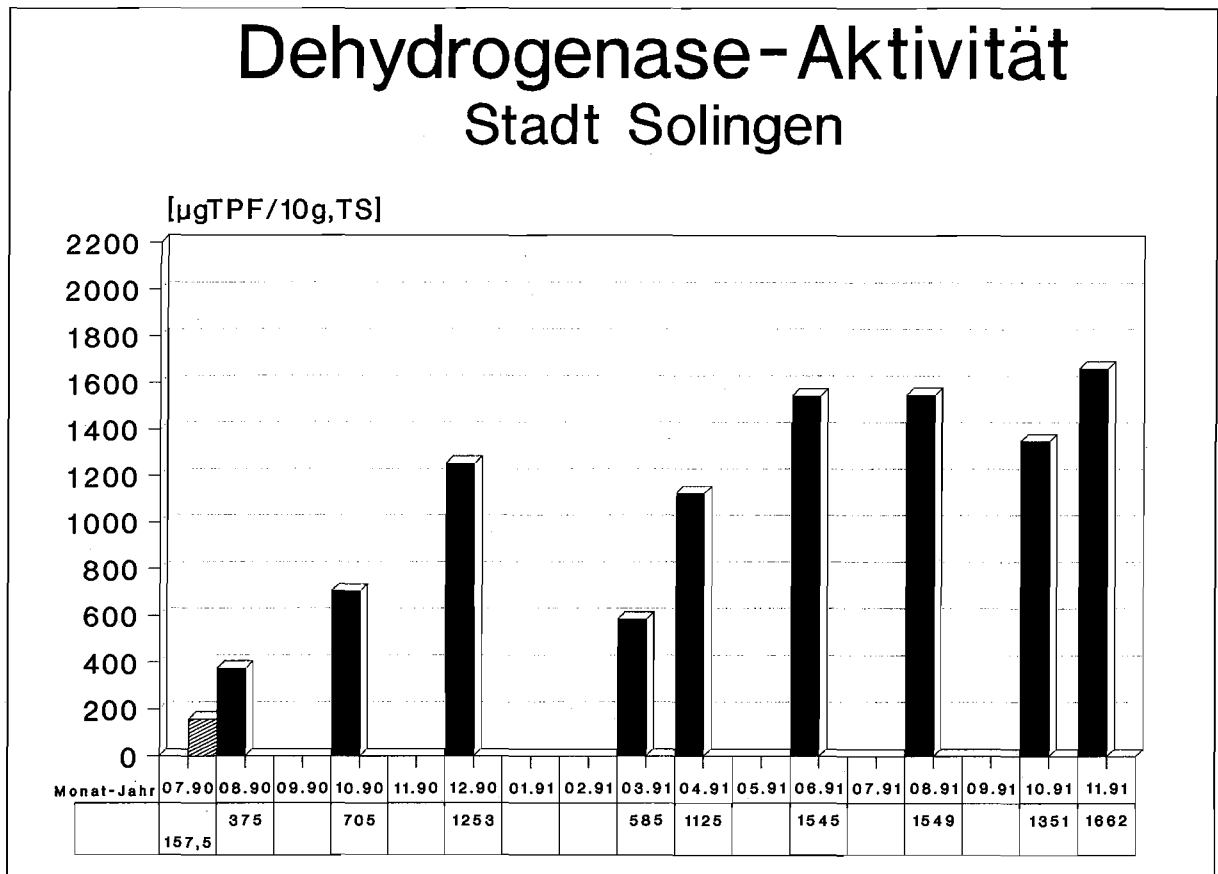


Abb. 11: Fortsetzung



6.8.3.2 Populationsdichten

Zwischen Böden bestehen naturgemäß beträchtliche Unterschiede in der Anzahl der darin befindlichen Mikroorganismen. Die Differenzen in der Anzahl aerober Bakterien, verantwortlich für einen beträchtlichen Teil der Mineralisierung, beruhen vor allem auf Nährstoffunterschieden der Böden sowie unterschiedlichen pH-Werten. So findet man beispielsweise in der Regel bei pH 3 wenige Bakterien, hingegen bei pH 7 viele. Im allgemeinen liegt der Titer zwischen 10^6 und 10^9 kolonien-bildenden Einheiten (KBE) pro g getrockneter, natürlicher Boden, wobei es schwierig ist, feststehende Zahlen anzugeben, da auch verschiedene Zählmethoden unterschiedliche Werte ergeben. Häufig beläuft sich die durch Plattierung auf festen Medien gefundene Lebendzellzahl auf 0,1 - 5 % derjenigen Zahl, die mikroskopisch ermittelt wurde. Bei sehr guter Extraktion der Mikroorganismen von der Bodenmatrix kann die Ausbeute bis auf 50 % steigen. Vergleiche mit Daten aus der Literatur sind aus den angeführten Gründen und des Fehlens vergleichbarer Methodik nur als grobe Orientierungshilfe geeignet.

Ein Anstieg der Biomasse durch Wachstum der Organismen mit den im Solinger Boden vorhandenen PAK (ca. 100 mg/kg Boden) kann - innerhalb der Ungenauigkeit des Zählens (hoher Organikanteil) - nicht erwartet werden. So kann aus 1,2 g/l Benzoat, selbst bei vollständiger Verwertung, nur ein Anstieg der Zellzahl von 10^8 auf 2×10^9 Zellen/ml im Fermenter beobachtet werden.

Bei allen Mieten, so auch der Kontrollmiete, zeigte sich auf den Medien Nutrient Broth (NB) sowie Plate Count (PC) ein in etwa konstanter Titer, der sich im Bereich 10^7 und 10^8 Zellen pro g getrockneter Boden bewegt. Es fällt auf, daß nach der Aufstellung der Mieten ein merklicher Anstieg der Populationsdichte (Faktor 10) auftrat. Malzextrakt-Agar (ME) als Pilze selektierender Nährböden läßt nur säuretolerierende Organismen wachsen, so daß die ME-Werte immer um den Faktor 100 tiefer liegen als die auf den beiden anderen Komplettmedien (Abb. 12).

Der Zusatz von Mikroorganismen durch die Firmen - bei der Miete der Fa. CB beim Aufbau der Miete sowie zu den Zeitpunkten nach 7/90 und 4/91; bei der Miete der Fa. Umweltschutz Nord 9/90 sowie nach den Probenahmen 10/90 und 12/90 - wurde an den nachfolgenden Beprobungsterminen anhand der NB- oder PC-Werte nicht sichtbar.

Der Zusatz von mikrobiellen Populationen wird einzig an der Miete der Fa. PNW deutlich, wo ein kurzzeitiger Anstieg um 2 Zehnerpotenzen auf dem Malzextrakt-Agar neben dem in allen Mieten sichtbaren Anstieg um den Faktor 10 auftrat. Es konnte kein Unterschied in NB-, PC- und ME-Titer als Folge der jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen festgestellt werden. Dies hätte sich besonders stark bei den nicht überdachten Mieten CB, Solingen und Kontrolle bemerkbar machen müssen.

Die größten Unterschiede im zeitlichen Gang zeigten sich bei der Zählung der Populationen, die mit Naphthalin wachsen (MM-Naphthalin). Diese müssen überwiegend auf die Schwierigkeiten bei der Auszählung der kleinen - da langsam wachsenden - Kolonien zurückgeführt werden. Die Daten geben einzig einen Hinweis, daß Organismen im Boden vorhanden sind, die Aromaten als Kohlenstoff- und Energiequelle verwerten können. Vergleichsdaten zum

Vorkommen von Mikroorganismen aus unbelasteten Böden sind nicht veröffentlicht. Die hier ermittelten Populationsdichten liegen in der gleichen Größenordnung wie die von Weissenfels et al. (1992), die bei zwei PAK-kontaminierten Böden 10^3 bzw. 10^5 Naphthalin-verwertende Zellen pro g getrocknetem Boden ermittelten.

Angaben zu Populationsdichten in Böden können nur grobe Hinweise auf mögliche Aktivitäten von Organismen im Boden geben. Die hier ermittelten Populationsdichten deuten nicht auf eine Hemmung der mikrobiellen Aktivität hin. Als Richtwert dafür gab die DECHEMA 10^3 KBE/g TS Boden an (DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz).

Die bodenmikrobiologischen Untersuchungen zeigen, daß in den Mieten eine für mikrobielle Abbauprozesse ausreichende Aktivität herrscht, insbesondere in den Mieten von PNW, UN und der Stadt Solingen. Die Tatsache, daß kein Abbau von PAK zu erkennen ist, muß daher auf andere Gründe als die allgemeinen Nährstoff- und Wachstumsbedingungen zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 6.3). Ein Zusammenhang zwischen biologischer Aktivität und PAK-Abbau kann nicht festgestellt werden.

Abb. 12: Übersicht über die KBE auf vier verschiedenen Nährböden der fünf Versuchsmieten

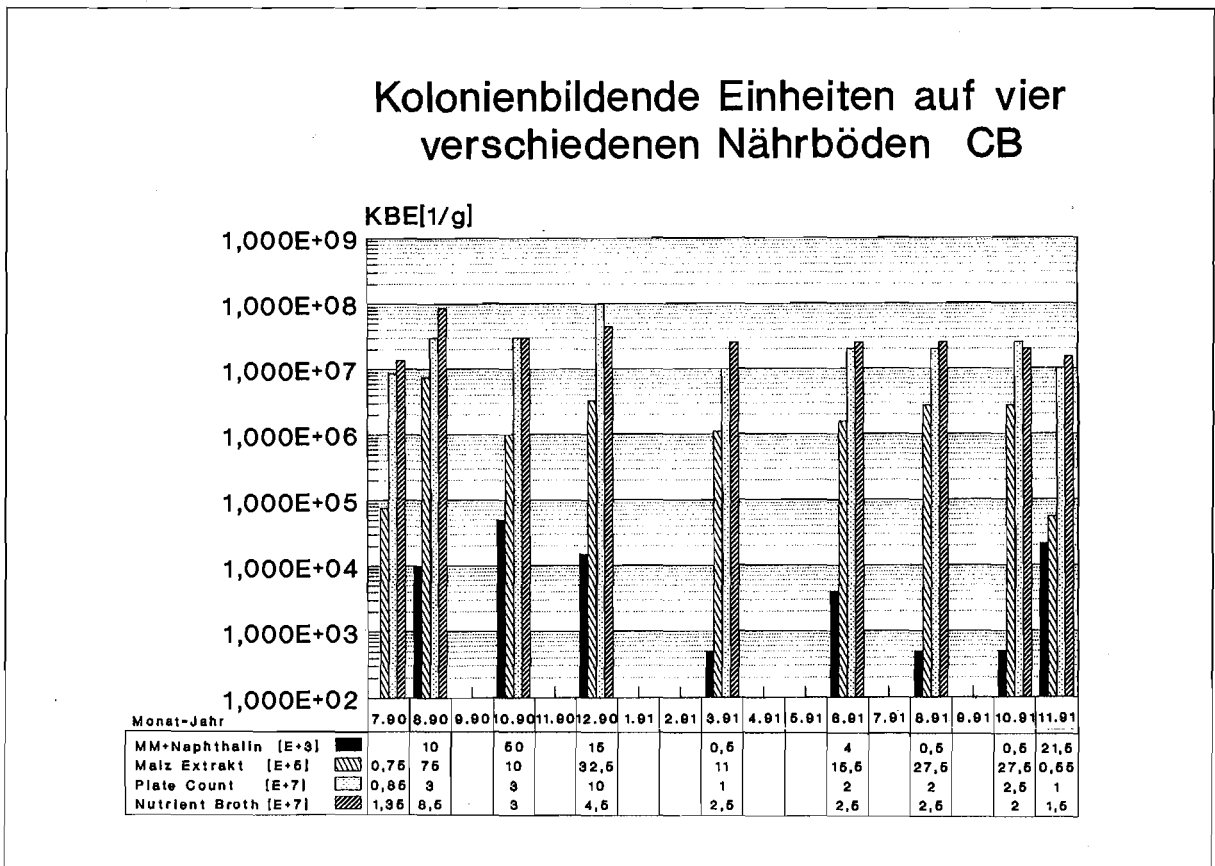
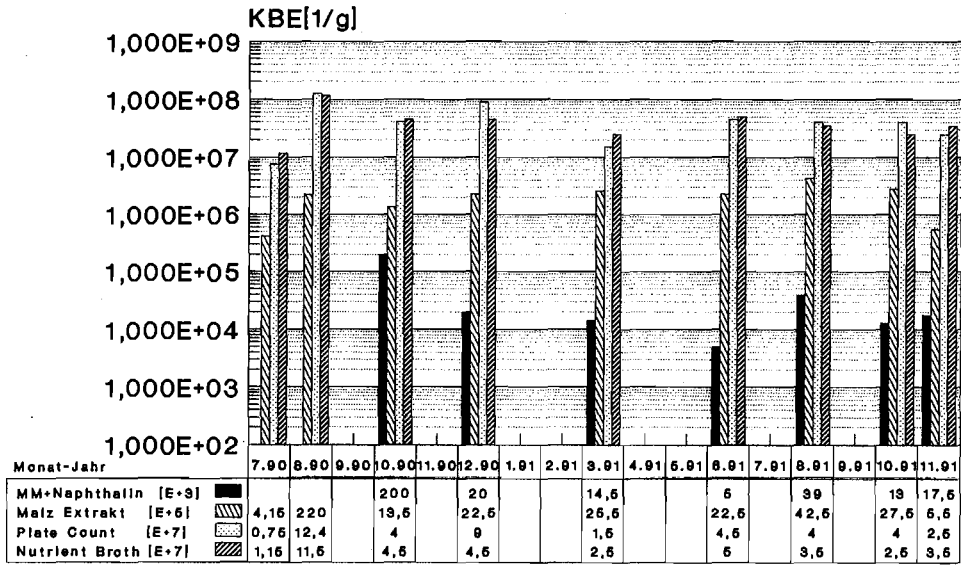


Abb. 12: Fortsetzung

Kolonienbildende Einheiten auf vier verschiedenen Nährböden PNW



Kolonienbildende Einheiten auf vier verschiedenen Nährböden UN

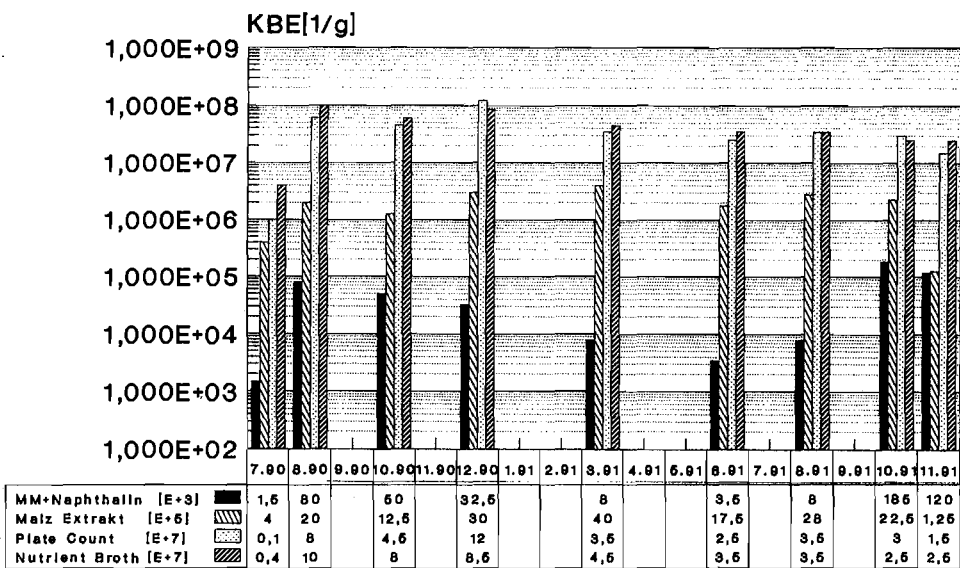
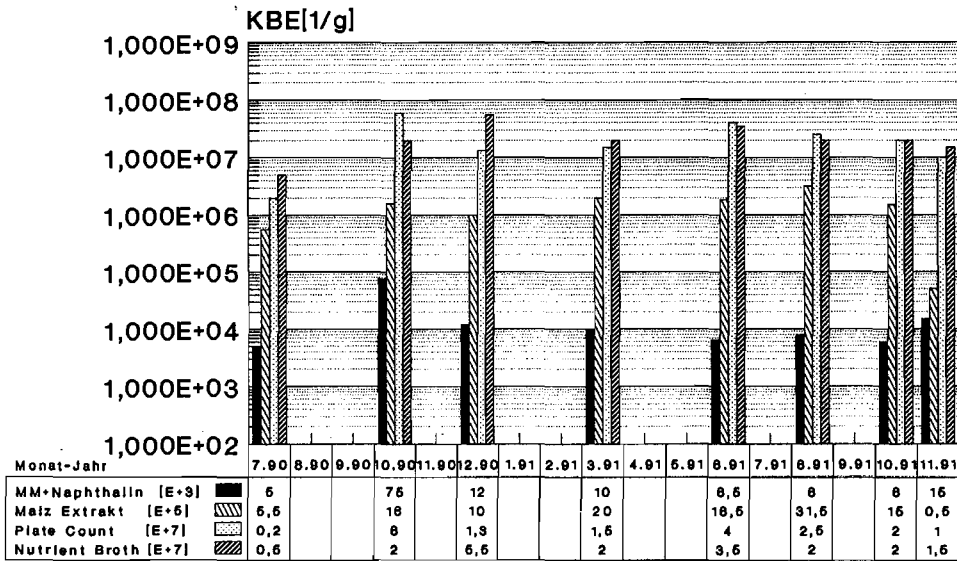
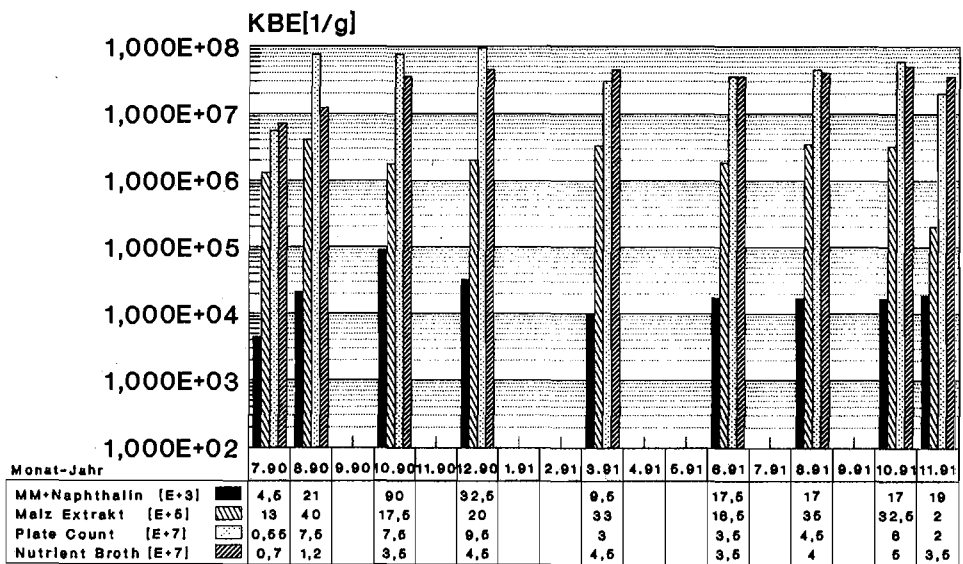


Abb. 12: Fortsetzung

Kolonienbildende Einheiten auf vier verschiedenen Nährböden Kontrollmiete



Kolonienbildende Einheiten auf vier verschiedenen Nährböden Stadt Solingen



6.8.4 Nährstoffgehalte im Eluat

Die Untersuchung der Nährstoffgehalte im Eluat sollte zeigen, inwieweit eine Nährstofffreisetzung aus den zugefügten Zuschlagsstoffen sowie den z.T. in recht hohen Gaben verabreichten mineralischen Düngern stattfindet und ob davon bei einem eventuellen Wiedereinbau der Versuchsböden eine Gefährdung für das Grundwasser, insbesondere durch die Freisetzung von wasserlöslichen mineralischen Stickstoffverbindungen, ausgehen kann. Die Nährstoffgehalte der Eluate sind in Abb. 13 dargestellt.

Die durchgehend geringen Phosphor-Gehalte der Eluate verdeutlichen, daß die gemessenen, pflanzenverfügbaren Phosphorverbindungen (s. Kap. 6.8.1) des Substrates zum größten Teil wasserunlöslich sind.

Die Kalium-Gehalte der Eluate stehen in einer deutlichen Beziehung zu den pflanzenverfügbaren Kalium-Gehalten. Während sie in den Eluaten der Mieten von CARO Biotechnik (CB) und der Kontrollmiete 5 mg/l nicht überschreiten (Ausnahme: Kontrollmiete, Beprobung Nov 1991, 7,7 mg/l), erreichen sie in den Eluaten der Mieten von Umweltschutz Nord und der Stadt Solingen zwischen ca. 15 mg/l und 25 mg/l. Die höchsten Kalium-Gehalte mit > 30 mg/l bis ca. 60 mg/l weisen die Eluate der Miete von PNW auf.

Die Magnesium-Gehalte der Eluate schwanken bei allen Mieten in einem recht weiten Bereich von ca. 2 mg/l bis über 10 mg/l. Angesichts der recht konstanten pflanzenverfügbaren Magnesium-Gehalte der Substrate (s. Kap. 6.8.1) erscheint dieser Befund überraschend; eine eindeutige Erklärung für die starke Schwankung der Mg-Gehalte der Eluate kann nicht gegeben werden.

Die mineralischen Stickstoffverbindungen NO_3 und NH_4 der Eluate unterliegen den gleichen Prozessen, wie sie im Kap. 6.8.1 für die pflanzenverfügbaren NO_3^- und NH_4^- -Gehalte beschrieben sind. Eine jahreszeitliche Differenzierung der mineralischen Stickstoffverbindungen im Eluat der Versuchsmieten kann allerdings nicht eindeutig erkannt werden. Es wird jedoch deutlich, daß bei den letzten Beprobungen (Okt. und Nov. 1991), insbesondere in den Eluaten der Mieten von PNW und der Stadt Solingen, die Nmin-Gehalte, besonders die NO_3^- -Konzentrationen im Vergleich zur Kontrollmiete, stark ansteigen. Dieser Anstieg geht einher mit einer Zunahme der pflanzenverfügbaren NO_3^- -Gehalte in diesen Mieten (vgl. Kap. 6.8.1).

Die zulässigen Grenzwerte der TVO für Kalium und Nitrat werden zeitweilig im Eluat der Miete von PNW überschritten.

Abb. 13: Übersicht der Nährstoffgehalte im Eluat der fünf Versuchsmieten

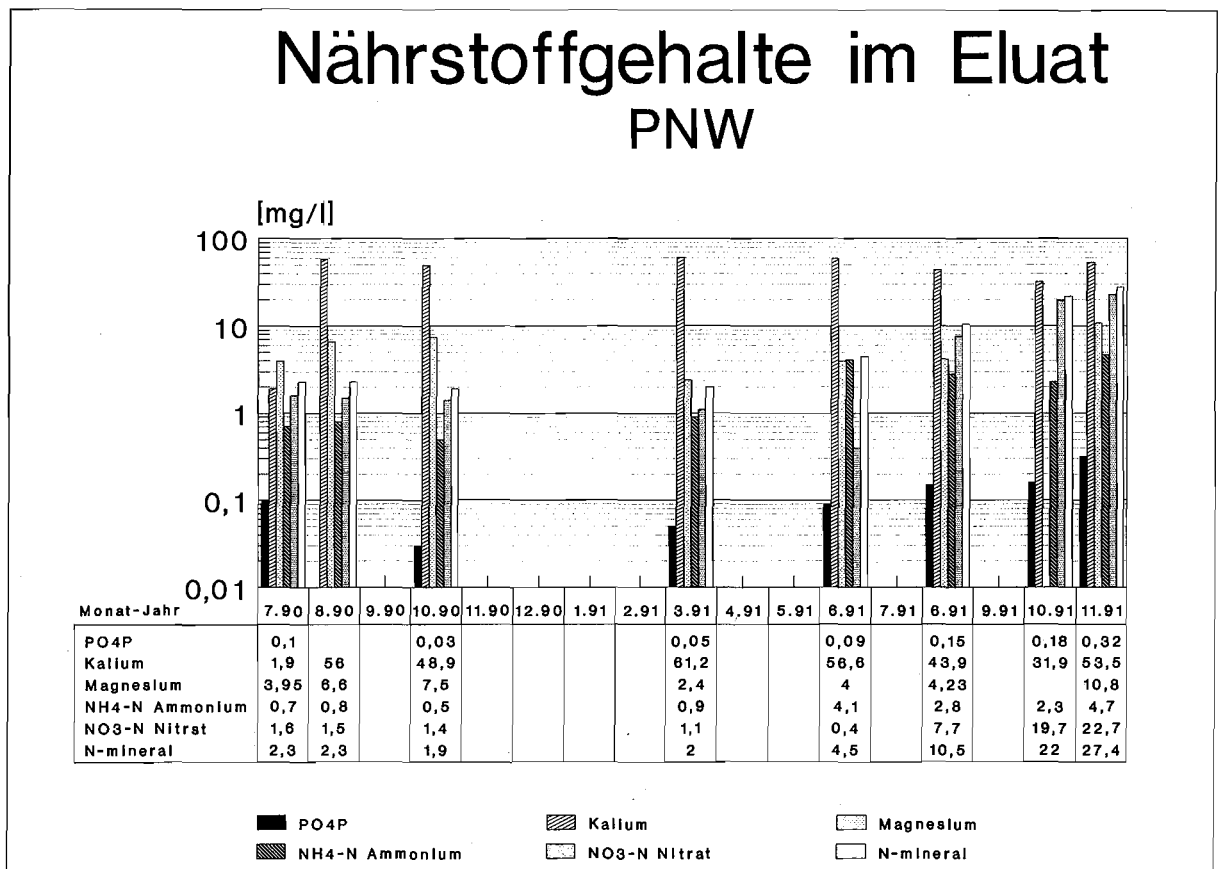
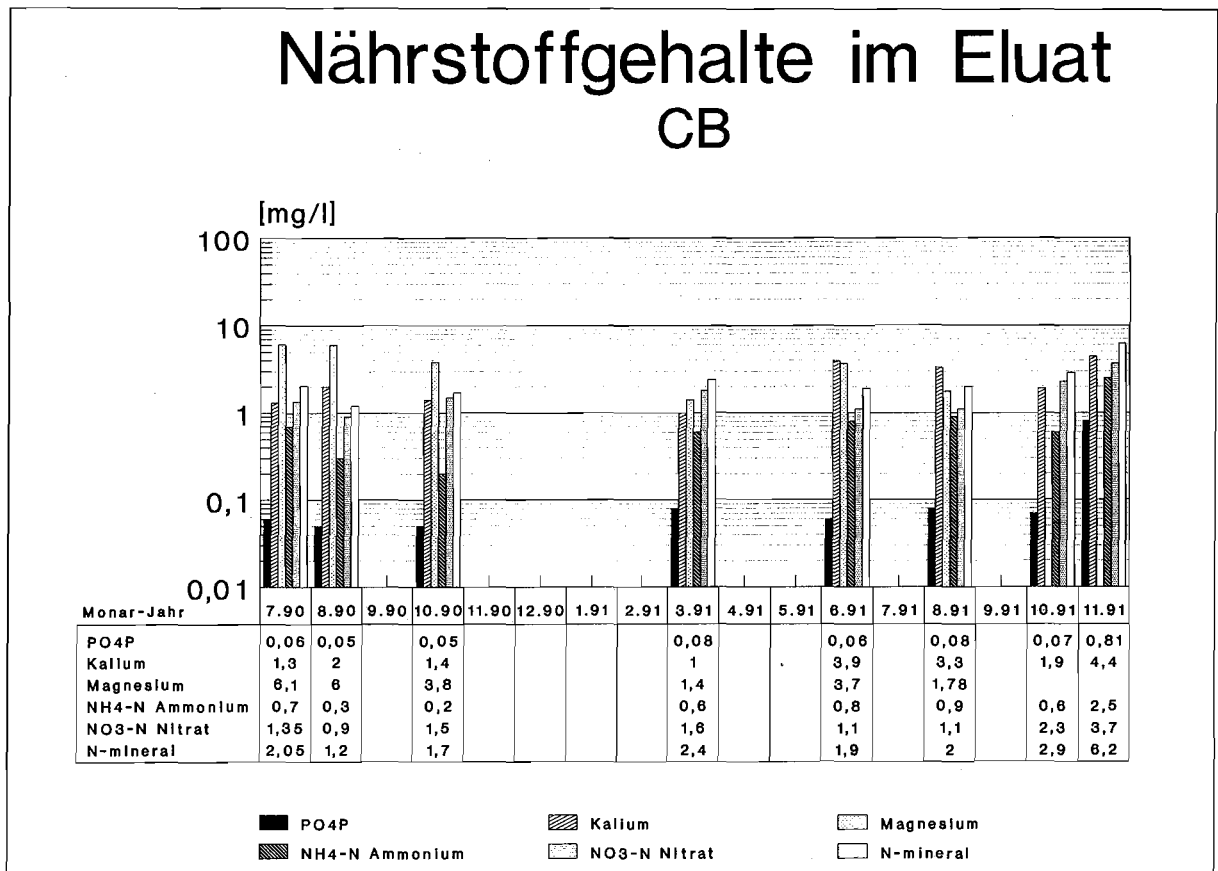
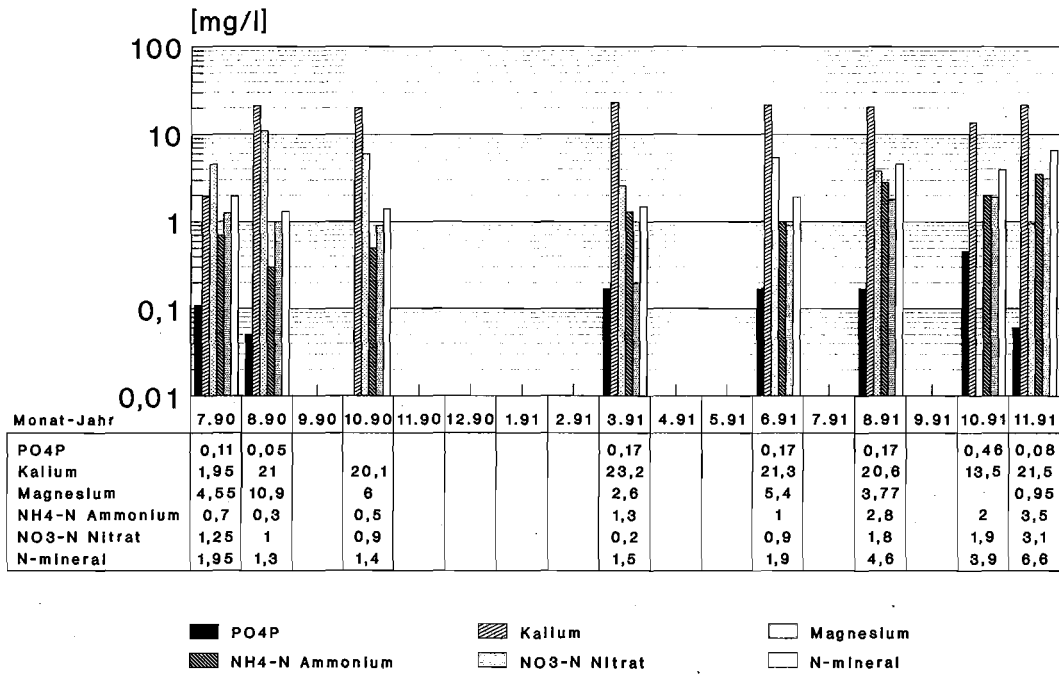
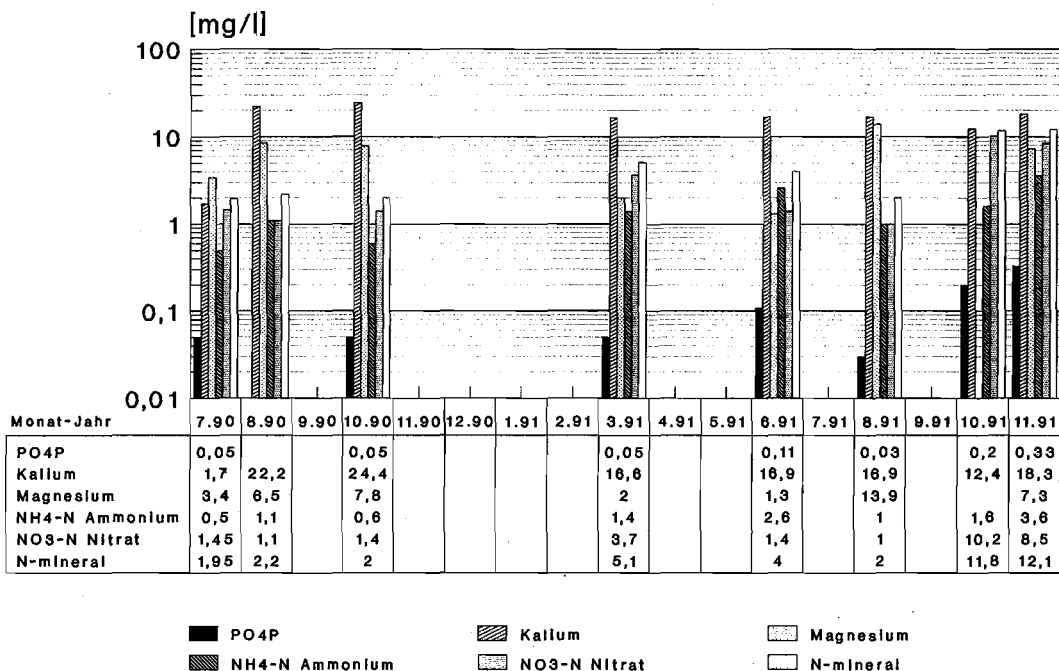


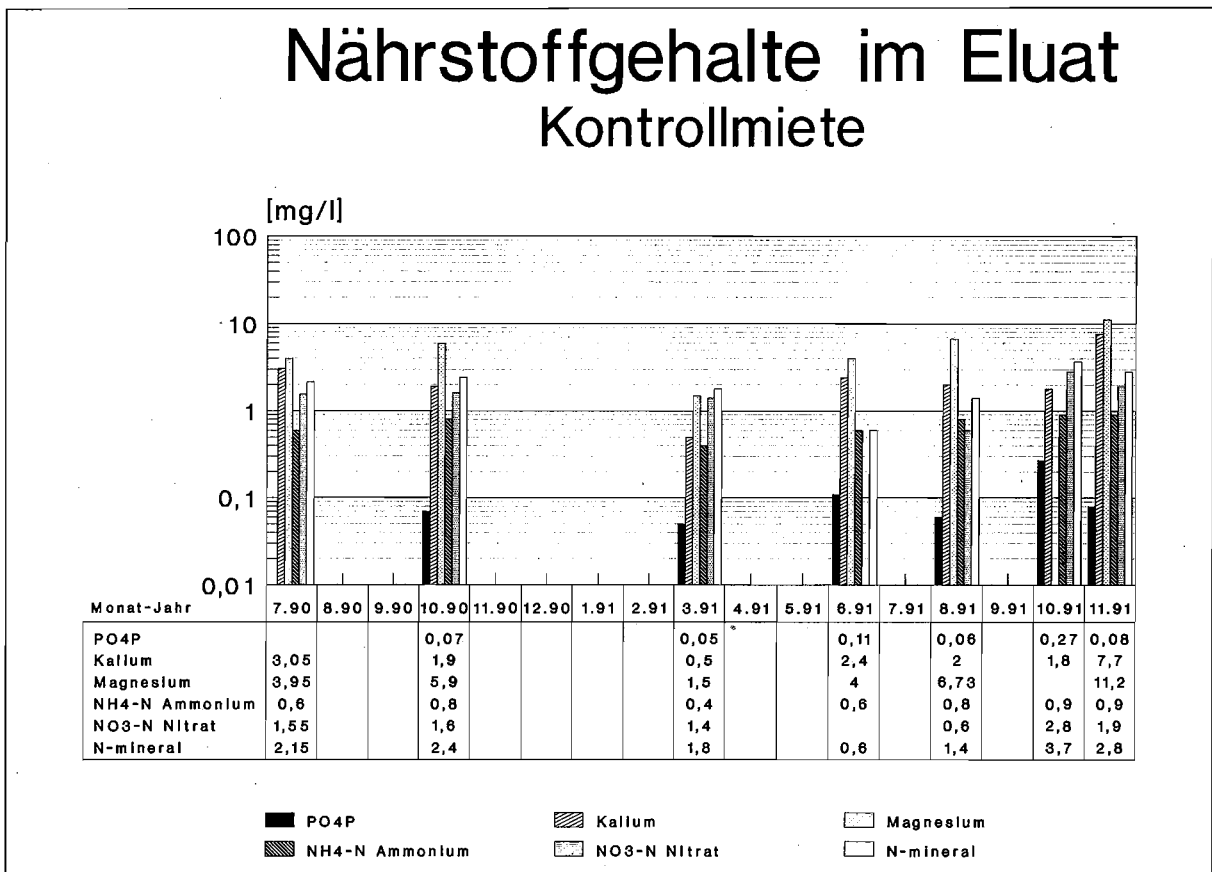
Abb. 13: Fortsetzung

Nährstoffgehalte im Eluat Umweltschutz-Nord



Nährstoffgehalte im Eluat Stadt Solingen





6.8.5 Gehalte an C_{org} , N_t und C/N-Verhältnis im Eluat

Die Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff im Eluat sollten darüber Aufschluß geben, inwieweit eine Freisetzung wasserlöslichen Kohlenstoffs und Stickstoffs aus den Versuchsmieten geschieht oder ob mit einer eventuellen Grundwassergefährdung durch die Versuchsböden zu rechnen ist.

Die Gehalte am gesamten organischen Kohlenstoff im Eluat bewegen sich zwischen ca. 20 mg/l (Nullbeprobung, CB) und ca. 75 mg/l (Beprobung vom Juni 1991, PNW). Die Eluate der Mieten von Umweltschutz Nord (UN), Stadt Solingen und PNW weisen bei den meisten Beprobungsterminen höhere C_{org} Gehalte auf als die der Kontrollmiete. Offensichtlich enthalten die zugesetzten, organischen Zuschlagsstoffe größere Mengen wasserlöslicher, organischer Stoffe. Auffallend ist weiterhin die Tendenz, daß die Beprobung vom März 1991 bei allen Mieten deutlich geringere C_{org} -Gehalte der Eluate aufweist als bei der anschließenden Beprobung vom Juni 1991 (s. Abb. 14). Diese Tatsache kann evtl. darauf zurückgeführt werden, daß es im Frühjahr zu einem stärkeren mikrobiellen Abbau organischer Stoffe im Boden gekommen ist, und dabei größere Mengen wasserlöslicher organischer Substanzen freigesetzt worden sind. In der zweiten Hälfte 1991 ist bei den Eluaten der Mieten von PNW, Umweltschutz Nord und Stadt Solingen ein Rückgang der C_{org} -Gehalte zu verzeichnen.

Die Gesamtstickstoffgehalte (N_T) der Eluate aller Mieten weisen eine sehr charakteristische zeitliche Differenzierung auf. Die Gehalte bewegen sich bis zur Beprobung im Oktober 1990 um ca. 2 mg/l. Ab der fünften Probennahme (März 1991) steigen die N_T -Gehalte in den Eluaten deutlich auf i.d.R. über 10 mg/l an. Die höchsten Werte erreichen bei den letzten beiden Probennahmen (Okt. und Nov. 1991) die Eluate der Mieten der Stadt Solingen (22 mg/l bzw. 24 mg/l) und von PNW (48 mg/l bzw. 51 mg/l). Während der o.g., bei allen Mieten zu beobachtende Anstieg der N_T -Gehalte nach der fünften Probennahme ohne erkennbare Beziehung zu den gemessenen Gehalten an pflanzenverfügbaren Stickstoffverbindungen (vgl. Kap. 6.8.1) und mineralischem Stickstoff im Eluat (vgl. Kap. 6.8.4) ist, korrelieren die sehr hohen N_T -Konzentrationen der letzten beiden Beprobungen in den Eluaten der Miete der Stadt Solingen und von PNW mit steigenden pflanzenverfügbaren Stickstoffgehalten im Boden und mit ansteigenden Nitrat- und Ammonium-Gehalten in den jeweiligen Eluaten. Die C/N-Verhältnisse in den Eluaten stehen in enger Beziehung zu den Gesamtstickstoffgehalten. Während sie bis zur Beprobung im Okt. 1990 zwischen ca. 10 und 15 liegen, erreichen sie danach Werte < 5 . Die engsten C/N-Verhältnisse weisen die Eluate der beiden letzten Beprobungen der Mieten von PNW und der Stadt Solingen auf (1,8 bis 0,9).

Eine Grundwasserbelastung durch die Mieten ist nicht gegeben. Das Ausmaß einer möglichen Beeinträchtigung hängt jedoch in erheblichem Maße von der jeweiligen Prozeßführung ab. Aufgrund des gewählten Dichtungssystems in Solingen-Ohligs (Drainage und HDPE-Dichtungsbahn) wurden grundsätzlich mögliche GW-Beeinträchtigungen ausgeschlossen.

Abb. 14: Übersicht der C_{org} -Gehalte im Eluat der fünf Versuchsmieten

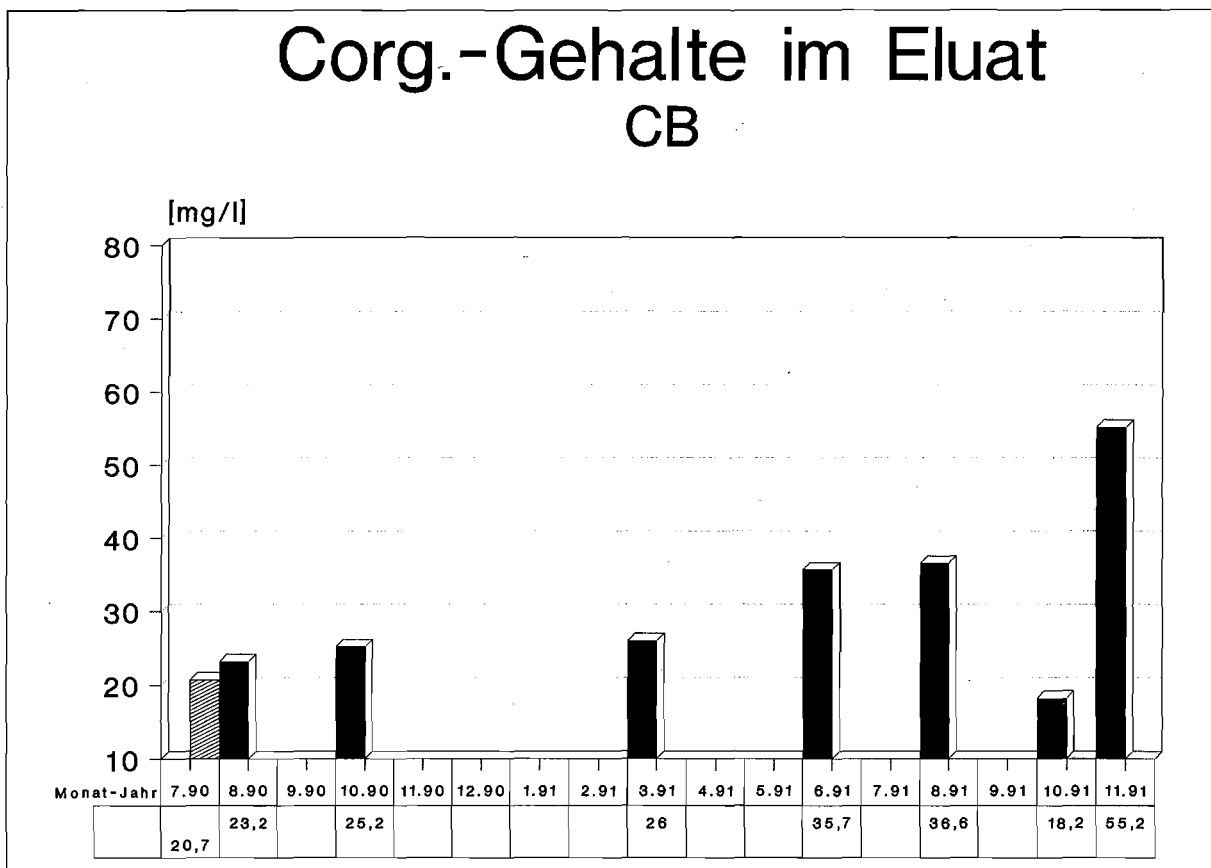
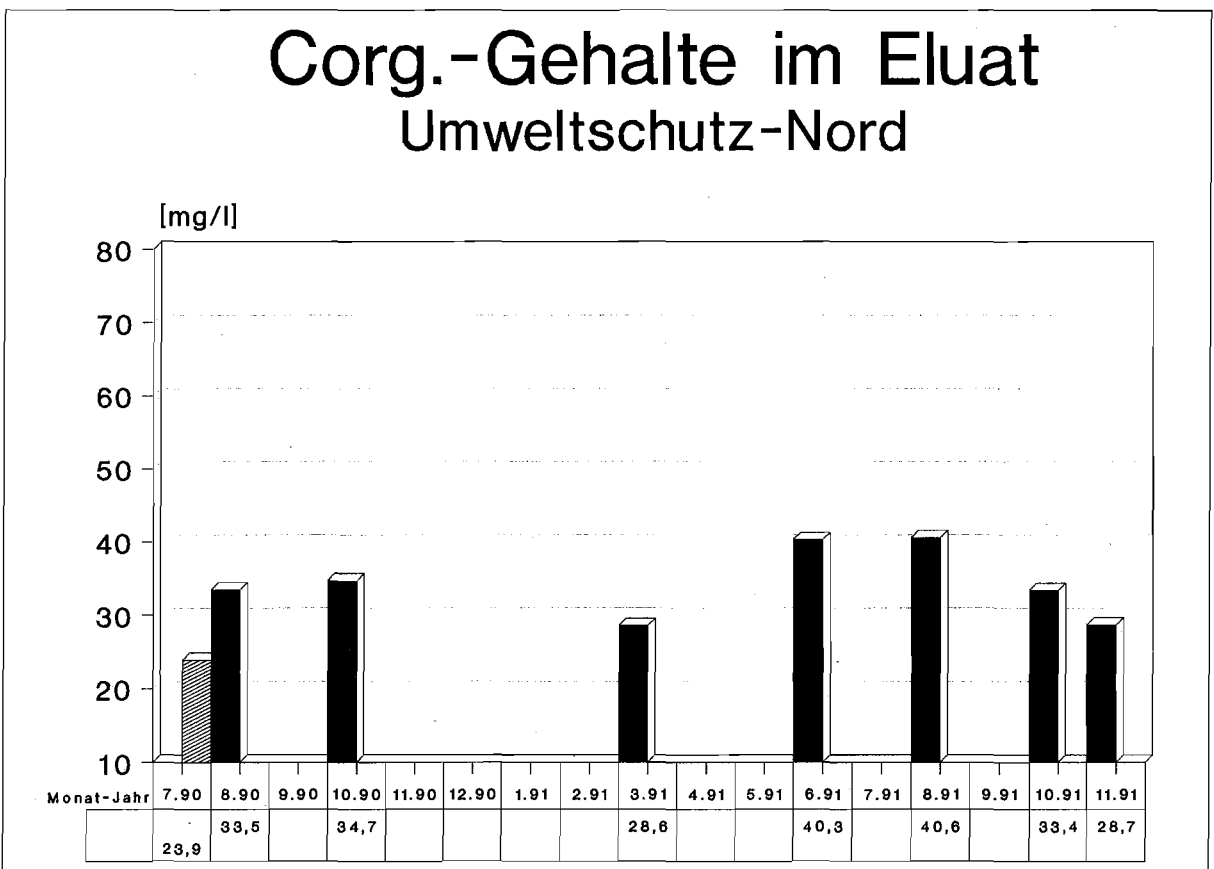
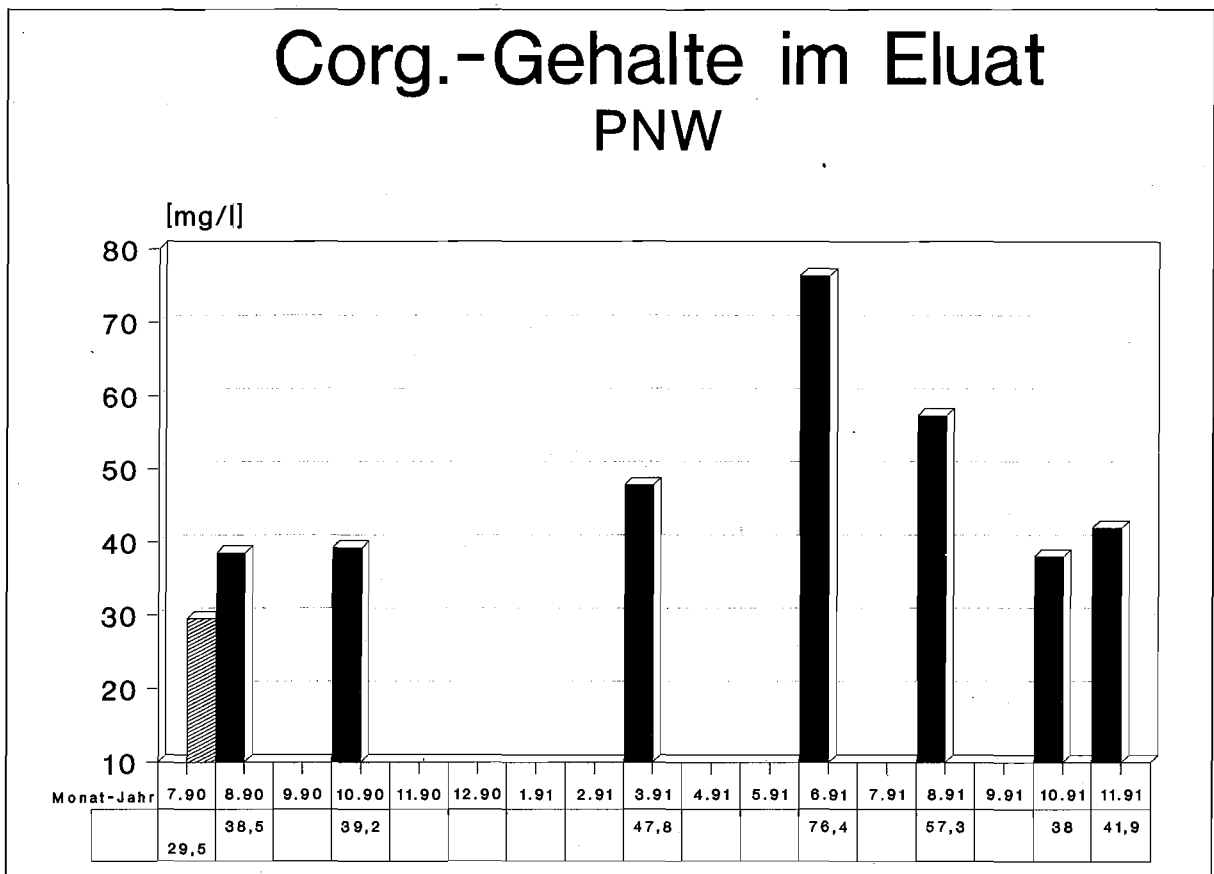
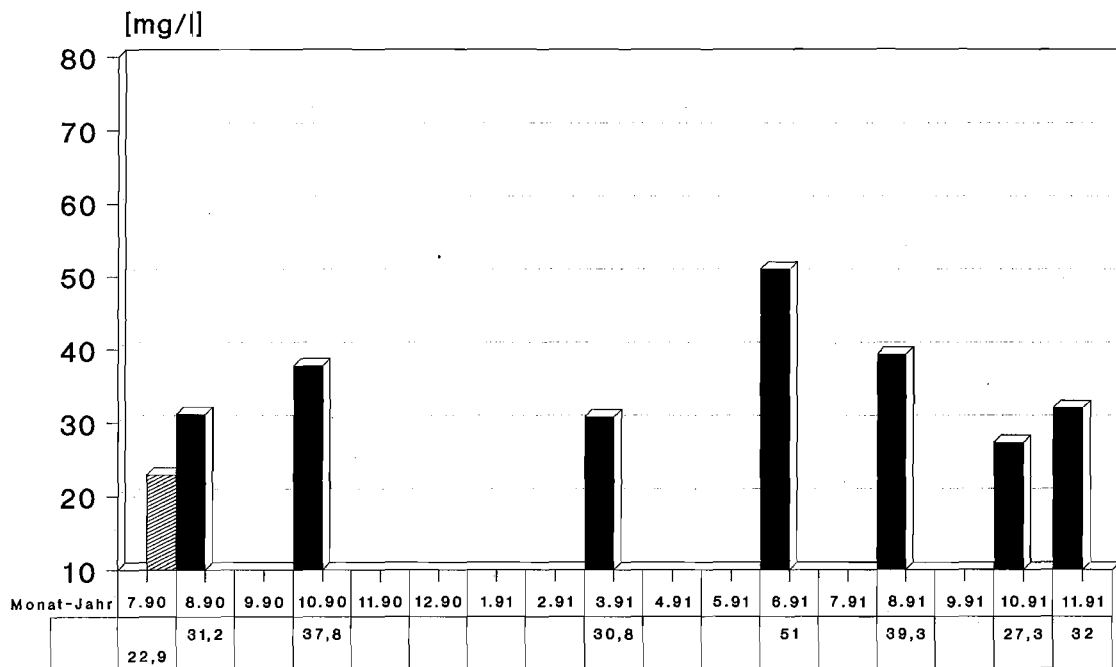


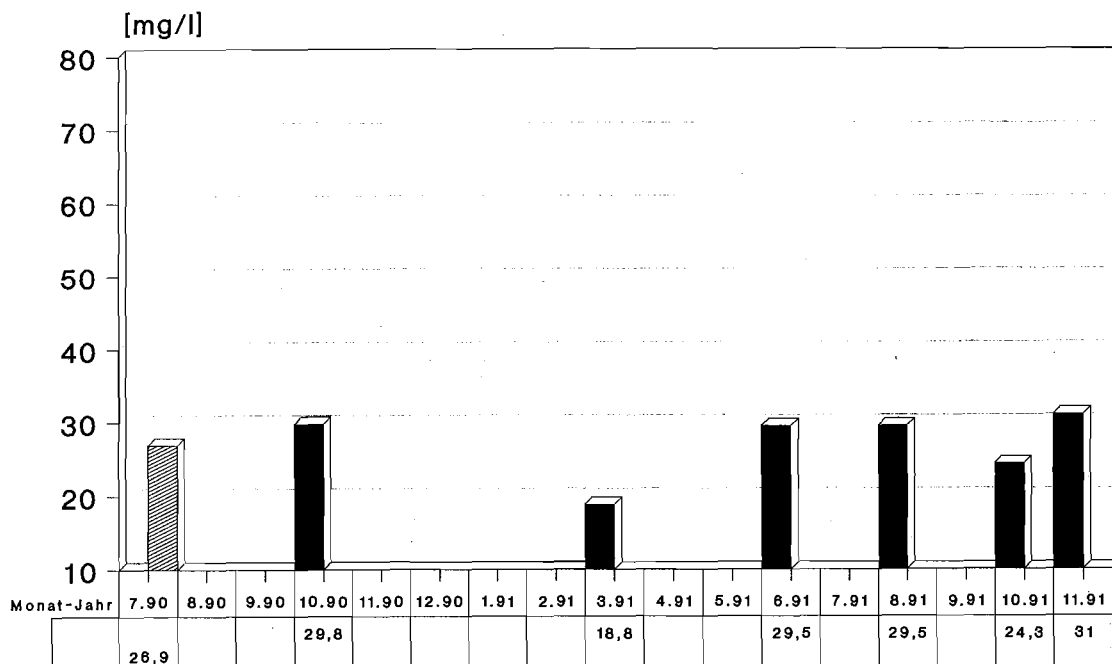
Abb. 14: Fortsetzung



Corg.-Gehalte im Eluat Stadt Solingen



Corg.-Gehalte im Eluat Kontrollmiete



6.8.6 Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Als Sanierungsziel hatte der Auftraggeber einen PAK-Gehalt nach EPA (16 Einzelsubstanzen) von 10 mg/kg Boden bzw. B(a)P-Gehalt von 1 mg/kg TS Boden vorgegeben. Nach Beendigung der Feldversuche im November 1991 bei einer Sanierungszeit von 17 Monaten hat jedoch kein Versuchsteilnehmer dieses Versuchsziel erreicht. Die Entwicklung der PAK-Konzentrationen läßt darüber hinaus keinerlei Trend erkennen, der eindeutig auf einen mikrobiellen PAK-Abbau schließen läßt.

Um die Ursachen näher zu untersuchen, wurde im Februar 1992 Boden aus dem Feldversuch unter optimalen Bedingungen mit spezialisierten Mikroorganismen in einem Sapromaten behandelt, um die Bioverfügbarkeit der PAK festzustellen. Innerhalb von 27 Tagen konnte kein PAK-Abbau festgestellt werden. Dies ließ die Schlußfolgerung zu, daß eine sehr geringe Bioverfügbarkeit der PAK im Boden vorliegen muß. Der unbefriedigende "PAK-Abbau" ist somit nicht nur auf die angewandte Verfahrenstechnik der an diesem Feldversuch beteiligten Firmen zurückzuführen, sondern auf den vorliegenden Boden mit hohem Schadstoffadsorptionsvermögen sowie mit geringer PAK-Bioverfügbarkeit. Der im Feldversuch verwendete Boden hat einen sehr hohen Schluffanteil von ca. 48 % und einen Kohlenstoffgehalt von ca. 3,0 - 6,0 %. Da bekannt ist, daß PAK besonders von der organischen Substanz im Boden inkorporiert werden, kann dies eine Erklärung für die sehr geringe Bioverfügbarkeit der PAK im Boden sein. Die Untersuchungen von DMT haben belegt, daß im Bodenmaterial Solingen-Ohligs die PAK in der Leichtgutfraktion, die sich im wesentlichen aus Kohle-, Koks- und Holzpartikeln zusammensetzt, stark angereichert vorliegen.

Die Voruntersuchungen der Firmen, die aufgrund der positiven Laborergebnisse die mikrobiologische Sanierung mit ihrem firmeneigenen Verfahren als problemlos darstellten, können daher nicht als repräsentativ für den Feldversuch und aussagekräftig für die Beurteilung der Verfahrenseignung angesehen werden.

Die zwei- und dreiringigen PAK machen insgesamt unter den EPA-PAK nur einen Anteil von 20% aus. Die B(a)P-Konzentrationen verhalten sich zu den SEPA-PAK-Konzentrationen etwa 1 : 8 während der gesamten Versuchsdauer. Der vergleichbar hohe Anteil von PAK-Verbindungen höherer Ringzahl vermindert die Abbauchancen alleine aufgrund der Molekülstruktur.

In diesem Feldversuch lagen zudem die 2-Ring-PAK nur noch in sehr geringer Konzentration vor. Vielleicht auch deshalb fand auch bei den 2- und 3-Ring-PAK kein signifikanter Abbau statt. Daraus kann jedoch nicht der Schluß gezogen werden, daß diese Komponenten auf anderen Standorten ebenso wenig mikrobiologisch abgebaut werden können. Für die vier-ringigen z.T. und die fünf- und mehrringigen PAK zeigen aber auch andere Ergebnisse aus der Praxis, daß der Nachweis einer mikrobiellen Abbaubarkeit nicht erbracht werden kann.

Die Schwankungen der Schadstoffgehalte der EPA-PAK sind nicht mit den bodenkundlichen bzw. bodenmikrobiologischen Untersuchungsergebnissen zu korrelieren. Grundsätzlich ist letzteres nur für den Fall eines Schadstoffabbaus im Cometabolismus, d.h. gekoppelt an den allgemeinen mikrobiellen Abbau organischen Materials, zu erwarten. Die spezifische Abbauproduktivität PAK-abbauender Organismen ist anhand von Summenparametern der bodenbiologischen Aktivität vor dem Hintergrund der allgemein hohen Abbauproduktivität im Boden nicht zu erkennen.

Neben der Erkenntnis der dringenden Entwicklung einer verlässlichen PAK-Analytik für Bodenproben hat der Feldversuch gezeigt, daß optimale mikrobiologische Voraussetzungen nicht konsequenterweise eine Aussage über die Abbaubarkeit von PAK zulassen, da durchaus hohe allgemeine Abbauaktivitäten von Mikroorganismen vorliegen können, ohne daß Schadstoffmoleküle angegriffen werden. Die allgemeinen Summenparameter der bodenbiologischen Aktivität geben daher lediglich Aufschluß über die Milieubedingungen im Boden und sind kein Prüfinstrumentarium, um das Abbauverhalten beurteilen zu können.

Eine Anfangs- und Endanalytik der Schadstoffe zu Beginn und Beendigung einer Sanierungsdurchführung ist nicht als aussagekräftig zur Dokumentierung einer PAK-Sanierung zu betrachten. Jedoch kann das begleitende Untersuchungsprogramm gegenüber dem in Solingen-Ohligs um verschiedene Parameter gekürzt werden.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den Feldversuchen in Solingen-Ohligs können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Der Boden, der für den Feldversuch verwendet wurde, ist für eine mikrobiologische Sanierung mit dem Ziel, PAK abzubauen, nicht geeignet. Mit hoher Wahrscheinlichkeit gilt dies auch für andere Böden mit ähnlichen Eigenschaften und Schadstoffgehalten. Hieraus kann gefolgert werden, daß zur Beurteilung der mikrobiologischen Sanierbarkeit eines Bodens vorher umfangreiche mikrobiologische Tests durchgeführt werden sollten.
- Die biologische Grundlagenforschung zeigt, daß PAK bis 4 Ringe grundsätzlich im Labor biologisch abbaubar sind. Jedoch sind Laborergebnisse nicht generell auf die Standortsituation übertragbar.
- Die hohe Adsorption der PAK an die Leichtgutfraktion sowie der hohe Corg-Gehalt von 3,0 - 6,0 % sind wahrscheinlich für die sehr begrenzte Bioverfügbarkeit der PAK verantwortlich.
- Diese sehr geringe Bioverfügbarkeit der PAK erscheint als der wichtige limitierende Faktor für den mikrobiologischen Abbau. Bevor für die Sanierung eines PAK-belasteten Bodens eine mikrobiologische Sanierungstechnik von Behörden ausgewählt wird, sollte zuerst die Bioverfügbarkeit im Boden bestimmt werden. Jedoch gibt es auch für die Bestimmung der Bioverfügbarkeit bisher keine allgemein gültige standardisierte Testmethode.
- Es ist dringend erforderlich, eine standardisierte Methode für die PAK-Analytik in Böden zu entwickeln bzw. eine Vereinheitlichung der bestehenden Methoden vorzunehmen.
- Toxizitätstests in den verschiedenen Phasen der Sanierung sollten Hinweise geben, ob von dem Boden bzw. dem Sanierungsverfahren ein Umweltrisiko ausgeht. (Verfügbarkeit für Pflanzen, GW-Gefährdung, orale und perkutane Aufnahme).
- Bisher verfügbare Toxizitätstests (z.B. Leuchtbakterientest, Ames-Test) erfassen nur bestimmte Wirkungen auf spezielle Organismen und werden zudem im Eluat und nicht am Feststoff durchgeführt. Toxizitätstests für den Boden als Feststoff existieren bisher nicht und sind zu entwickeln.

Jede Bodensanierung ist eine neue Herausforderung und verlangt je nach Bodeneigenschaften die entsprechende Sanierungstechnik. Die Mikrobiologie ist grundsätzlich als kostengünstige

und ökologisch verträgliche Methode im Vergleich zu anderen Sanierungstechniken zu betrachten. Umfangreiche Voruntersuchungen müssen aufzeigen, ob und bis zu welchem Grad PAK-belasteter Boden mikrobiologisch abzureinigen ist.

Hier kann grob eingeteilt werden in bereits praxisreife Verfahren, v.a. bei der biologischen Sanierung von Mineralölkohlenwasserstoffen, und derzeit noch nicht allgemein praxisreifen Sanierungsverfahren. Die mikrobiologischen Sanierungen von PAK-Schadensfällen sind aufgrund der o.g. Aspekte der letzten Kategorie zuzuordnen. Denn bislang existiert kein Beleg für erfolgreich bilanzierte mikrobiologische PAK-Sanierungen im großtechnischen Maßstab.

7. Empfehlungen

Für die Bodensanierung sind vertiefende geochemische, mikrobiologische, bodenkundliche, hydrogeologische und verfahrenstechnische Fachkenntnisse notwendig. Die sehr komplexe Herausforderung der Altlastensanierung ist daher nur noch von qualifizierten Teams und nicht mehr von einzelnen Fachdisziplinen zu bewältigen. Darüber hinaus hängt der Erfolg einer Sanierung, insbesondere mikrobiologische, in starkem Maße vom Bodentyp, der Schadstoffzusammensetzung und deren Einbindung in die Bodenmatrix ab.

Beispielsweise sind die Erfolgsaussichten einer mikrobiologischen Sanierung bei Mineralölkohlenwasserstoffen vergleichsweise aussichtsreicher, auch wenn es hierbei Unterschiede im Abbauverhalten zwischen leichten und schweren Mineralölen gibt.

Die mikrobiologische Sanierungstechnik kann i.d.R. als ökologisch verträglichste Methode im Vergleich zu chemisch/physikalischen und thermischen Sanierungsmethoden betrachtet werden.

Aufgrund der Erfahrungen im Feldversuch zur mikrobiologischen Sanierung von PAK-kontaminierten Böden in Solingen lassen sich folgende Empfehlungen an die Kommunen und andere Sanierungspflichtige, die eine mikrobielle Sanierung erwägen, geben:

- a) Die PAK gelten als schwer abbaubare Schadstoffklasse und gehören somit zu den problematischen Verbindungen für biologische Sanierungsverfahren. Eine mikrobiologische PAK-Sanierung auf Gaswerk- oder Kokereistandorten kann z.Z. noch nicht als Stand der Technik gelten. Die Erfolgsaussichten biologischer Sanierungsverfahren steigen grundsätzlich für schwerer abbaubare Verbindungen mit Wahl der Verfahren in folgender Reihenfolge
 - in situ (kommt bei PAK kaum in Frage, nur in sehr durchlässigen Böden mit hoher Schadstoff-Verfügbarkeit sinnvoll)
 - on site (Miete)
 - statischer Bioreaktor (Feststoff)
 - dynamischer Bioreaktor (Suspension)

Die Reaktorverfahren sind großtechnisch bislang noch nicht ausgereift. Versuche im Technikumsmaßstab sind z.T. jedoch erfolgversprechend, auch wenn die Abbaugrade für PAK's mit höherer Ringzahl (≥ 4) noch nicht zufriedenstellend sind.

Vor dem Hintergrund der von den beteiligten Firmen vor Beginn der Feldversuche dargestellten Einschätzung, das Bodenmaterial sei mit den jeweiligen firmeneigenen Verfahren problemlos und innerhalb recht kurzer Zeit mikrobiologisch zu reinigen, lassen sich folgende Forderungen aufstellen:

- b) Der Sanierungspflichtige sollte zur Kontrolle normierte Vorversuche von einem unabhängigen Labor durchführen lassen.
- c) Soweit nicht aus der Gefährdungsabschätzung bekannt, sind genaue Erhebungen der Standortbedingungen erforderlich (Korngrößenverteilung, C_{org} , pH-Werte etc.).
- d) Die Bioverfügbarkeit am Standort ist unter optimalen Verhältnissen zu untersuchen.
- e) Wenn danach positive Erfolgsaussichten bestehen, müssen die anbietenden Firmen umfangreiche Voruntersuchungen durchführen (z.B. empfohlenes Mindestprüfschema, S. Abb. 18).
- f) Abbau-Studien im Labormaßstab (z.B. Perkolationsverfahren), halbtechnischen Maßstab und ggf. Feldversuch sollten vor einer großtechnischen Sanierung vorgeschrieben werden.
- g) Die Vorversuche benötigen eine Mindestdauer von 2 bis 3 Monaten. Hochrechnungen von wenigen Tagen auf Langzeitverhalten sind nicht aussagekräftig.
- h) Eine Garantiepflcht der Sanierungsfirmer für das Erreichen der Sanierungszielwerte ist erforderlich.
- i) Detaillierte Ausschreibung.
- j) Intensive Sanierungsüberwachung mit einer den Sanierungserfolg nachweisbaren detaillierten Kontrollanalytik.
- k) Während und insbesondere nach Beendigung der Sanierung sollten mit dem sanierten Material Toxizitätstests durchgeführt werden, hierzu existieren derzeit allerdings nur Testverfahren für Bodeneluate, deren Aussagekraft zudem umstritten sind.
- l) Aufgrund des längeren Zeitbedarfs von mikrobiologischen Sanierungsverfahren gegenüber anderen Techniken (chemisch-physikalisch, thermisch) ist diese Verfahrenstechnik für Sanierungsfälle mit kurzfristiger Standortnutzung ungeeignet.

Dieser Feldversuch hat gezeigt, daß es dringend erforderlich ist, eine Standard-PAK-Analytik für Feststoffproben zu entwickeln. Ferner muß den bodenkundlichen Aspekten wesentlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden als bisher. Eine breitere sichere Anwendung der mikrobiologischen Verfahren zur Behandlung PAK-haltiger Böden/Materialien erfordert insbesondere noch tiefgehende wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich Humifizierung/Biofixierung von PAK's in Böden im Zusammenhang mit dem Ad- und Desorptionsverhalten.

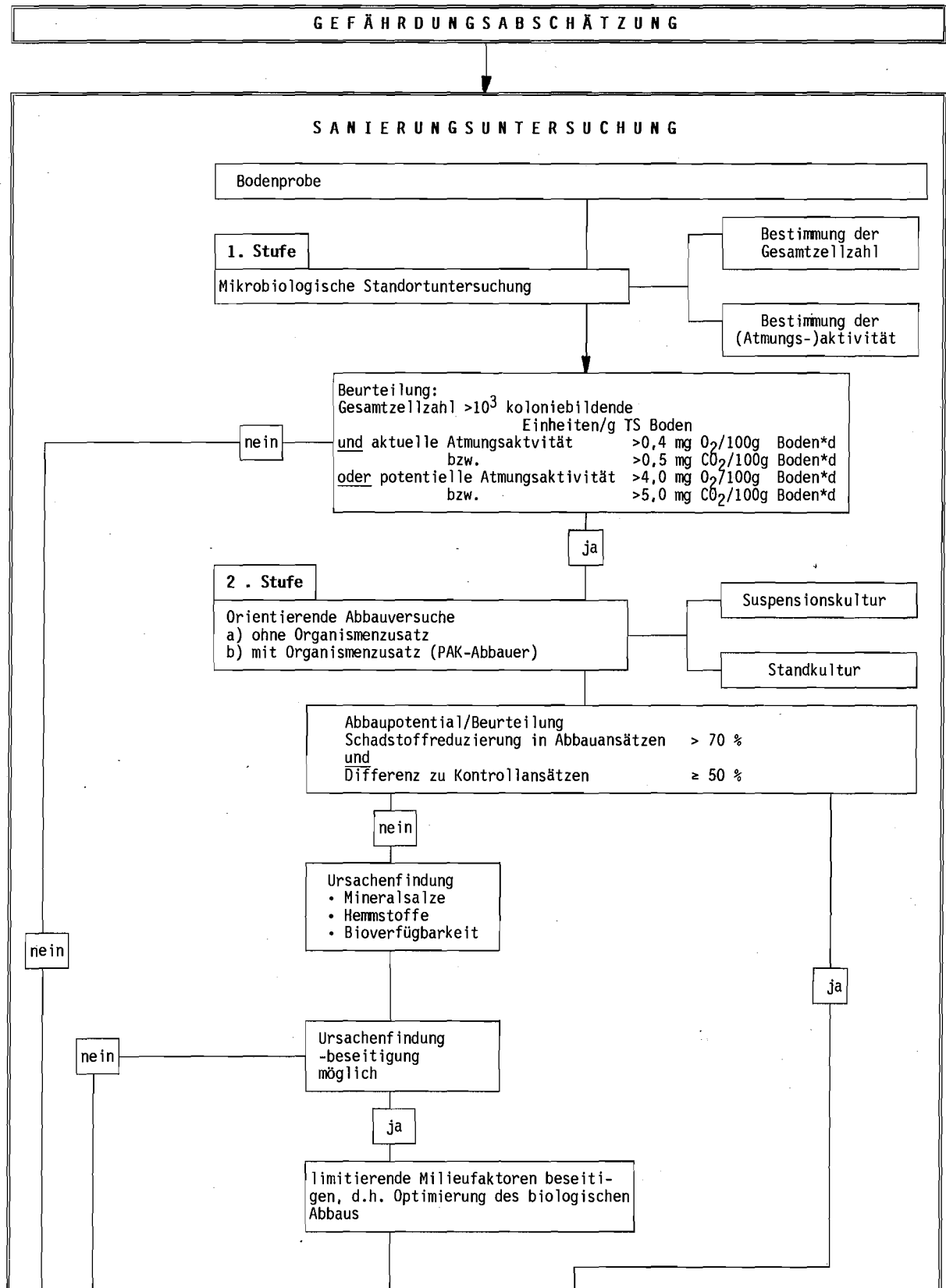
Auch wenn in Laboren der mikrobiologische Abbau von Vierring-Aromaten einwandfrei nachgewiesen wurde, und Fünfring- und Mehringaromate derzeit nicht nachweislich mikrobiologisch zu mineralisieren sind, ist eine mikrobiologische Behandlung von PAK-belastetem Bodenmaterial nicht generell auszuschließen. Dies kann insbesondere dann gelten, wenn nur der Wirkungspfad Grundwasser betroffen ist und die höherringigen PAK's in immobilisierter Form vorliegen. Denn unterschiedliche Nutzungen der behandelten Fläche bzw. des behandelten Bodens, d.h. unterschiedlich betroffene Wirkungspfade und Schutzgüter (z.B. orale Aufnahme, Pflanzenaufnahme, Grundwasser) erfordern eine differenzierte Betrachtung bei der Festlegung der Sanierungszielwerte, insbesondere auch für PAK-Einzelkomponenten.

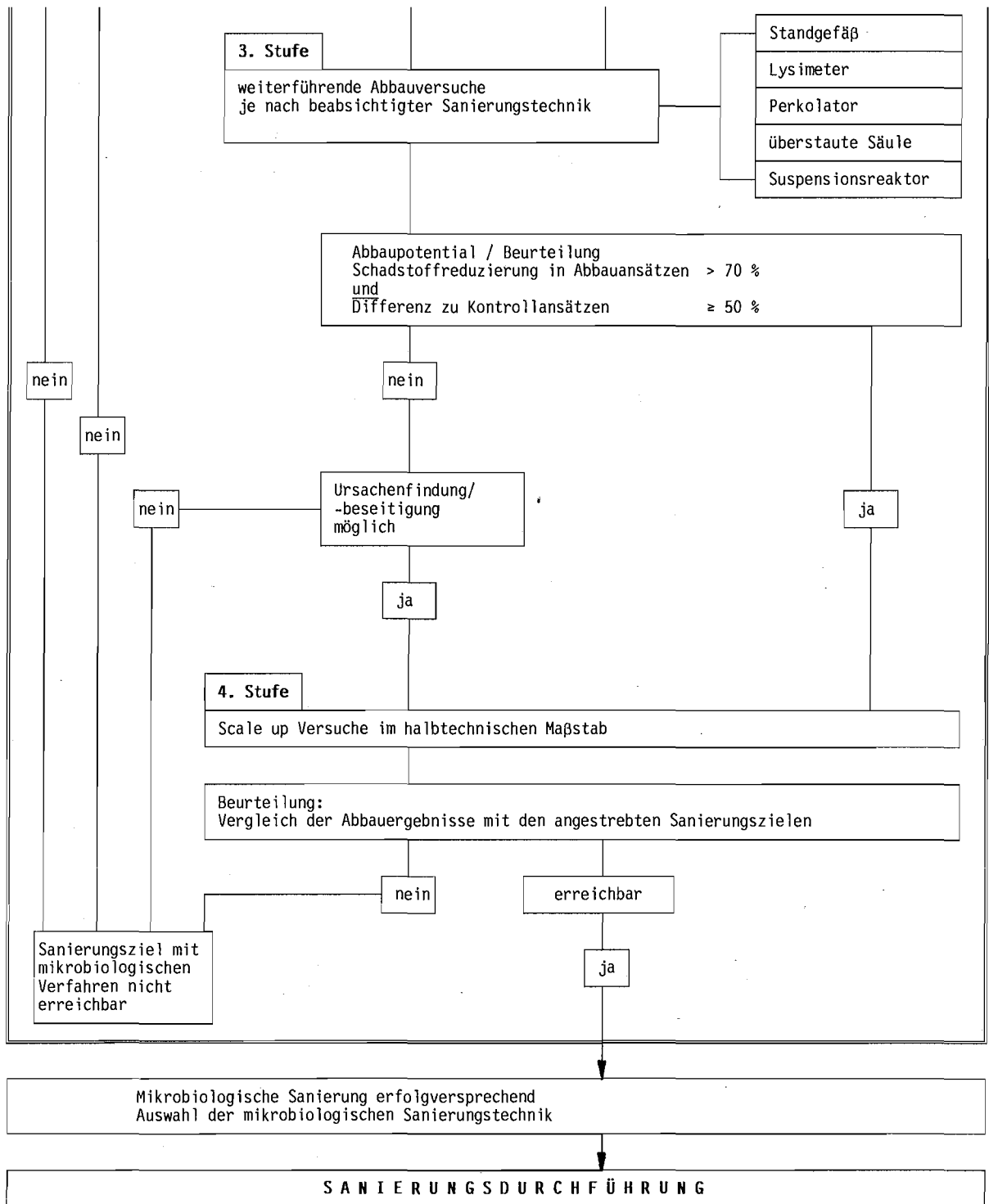
Toxizitätstest können zusätzliche Erkenntnisse über mögliche Gefährdungen liefern. Die verfügbaren Untersuchungsmethoden, z.B. der Leuchtbakterientest, sind auf Bodeneluate ausgerichtet und decken nur ein begrenztes Wirkungsspektrum ab. Für die Wirkungen von Schadstoffen im Boden sind diese Testmethoden noch weiterzuentwickeln.

Zur Klärung der Frage, ob mikrobiologische Sanierungsmethoden für PAK-belastete Böden u.a. erfolgversprechend sind, wurde anhand der Erkenntnisse des Sanierungsprojektes Solingen-Ohligs in Anlehnung an das Fließschema für praxisorientierte Voruntersuchungen (DECHEMA-Arbeitskreis, Umweltbiotechnologie und den Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung, DECHEMA-Fachgespräche, Umweltschutz) folgendes Mindestprüfschema zusammengestellt:

Empfohlenes Mindestprüfschema zur Beurteilung der Erfolgsaussichten einer mikrobiologischen Sanierung

Bild 18: Empfohlenes Mindestprüfschema zur Beurteilung der Erfolgsaussichten einer mikrobiologischen Sanierung, verändert und ergänzt nach DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz, Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung, 2. Bericht des interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie Boden"





Literatur

- AG Bodenkunde der geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland 1982. Bodenkundliche Kartieranleitung (3. Auflage). Hannover. (331S., 19 Abb., 98 Tab., 1 Beil.)
- ALEF, K. 1991. Methodenhandbuch Mikrobiologie (Aktivitäten * Biomasse * Differenzierung). Landsberg:Ecomed Verlagsgesellschaft.
- AOCHI, Y. O., FARMER, W. J. & SAWHNEY, B. L. 1992. In Situ Investigations of 1,2-Dibromethane Sorption/Desorption Processes on Clay Mineral Surfaces by Diffuse Reflectance Infrared Spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.* 26,329-335.
- BARNESLEY, E. A. 1975. The bacterial degradation of fluoranthene and benzo(a)pyrene. *Can. J. Microbiol.* 21,1004-1008.
- BECK, T. 1973. Über die Eignung von Modellversuchen bei der Messung der biologischen Aktivität von Böden. *Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch*, 50. Jahrg.270-288.
- 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 Bodensanierung. 15. Mülltechnisches Seminar, Berichte aus Wasser- und Abfallwirtschaft, Technische Universität München 108, 99-114
- BIERL, R., KAA, W. & THOMAS, W. 1984. Spatial and temporal concentration gradients of PAH (Fluoranthene, Benzo(a)pyrene), BHC and 2,4 D in samples of soil, soil water and groundwater in an agricultural research area. *Fres. Z. Anal. Chem.* 319,172- 179.
- BRYNIOK, D., EICHLER, B., KÖHLER, A., CLEMENS, W., MACKENBROCK, K., FREIER-SCHRÖDER, D. & KNACKMUSS, H.-J. 1990. Entwicklung eines biologischen Verfahrens zur Sanierung von Kokereiböden: Mikrobieller Abbau von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. In: ARENDT, F., HINSEVELD, M. & v. d. BRINK, W.J. (Hg.): Altlastensanierung '90, Dordrecht:Kluwer Acad. Publ. 1155-1156.
- BUMPUS, J. A. 1989. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.* 55,154-158.
- CALLAHAN, M. A., SLIMAK, M. W., GRABEL, N. W., MAY, J. P., FOWLER, C. F., FREED, J. R., JENNINGS, P., DURFEE, R. L., WHITMORE, F. C., MAESTRI, B., MABEY, W. R., HOLT, B. R. & GOULD, C. 1979. Water-related environmental fate of 129 priority pollutants. Volume II: Halogenated aliphatic hydrocarbons, halogenated ethers, monocyclic aromatics, phthalate esters, polycyclic aromatic hydrocarbons, nitrosamines and miscellaneous compounds. EPA-440/4-79-029b.
- CASIDA, L. E., Jr. 1977. Microbial metabolic activity as measured by dehydrogenase determinations. *Appl. Environ. Microbiol.* 34,630-636.
- CASIDA, L. E., Jr., KLEIN, D. A. & SANTORO, T. 1964. Soil dehydrogenase activity. *Soil Sci.* 98,371-376.
- CATELANI, D., MOSSELMANS, G., NIENHAUS, J., SORLINI, C. & TRECCANI, V. 1970. Microbial degradation of aromatic hydrocarbons used as water reactor coolants. *Experimentia*, 26,922-923.

- CATELANI, D., SORLINI, C. & TRECCANI, V. 1971. The metabolism of biphenyl by *Pseudomonas putida*. *Experimentia*, 26,922-923.
- CERNIGLIA, C. E. 1984. Microbial metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Adv. Appl. Microbiol.* 30,31-71.
- CERNIGLIA, C. E. & GIBSON, D. T. 1979. Oxidation of benzo(a)pyrene by the filamentous fungus *Cunninghamella elegans*. *J. Biol. Chem.* 254,12174-12180.
- CERNIGLIA, C. E. & YANG, S. K. 1984. Stereoselective metabolism of anthracene and phenanthrene by fungus *Cunninghamella elegans*. *Appl. Environ. Microbiol.* 47, 119-124.
- CHIOU, C. S. & SHOUP, T. D. 1985. Soil Sorption of Organic Vapors and Effects of Humidity on Sorptive Mechanism and Capacity. *Environ. Sci. Technol.* 19,1196-1200.
- CRÖBMANN, G. 1992. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Böden und Pflanzen. Hrsg.: Kommunalverband Ruhrgebiet, KVR, Essen.
- DAVIES, J. I. & EVANS, W. C. 1964. Oxidative metabolism of naphthalene by soil pseudomonads. *Biochem. J.* 91,251-261.
- DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz 1991. Einsatzmöglichkeiten und Grenzen mikrobiologischer Verfahren zur Bodensanierung. 1. Bericht des interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie-Boden". Hrsg.: Klein, Jürgen. Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, Frankfurt am Main.
- DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz 1992. Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung; 2. Bericht des interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie - Boden"; Ad-hoc-Arbeitsgruppe "Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung". Hrsg.: Klein, Jürgen. Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, Frankfurt am Main.
- EICEMAN, G. A., DAVANI, B. & INGRAM, J. 1986. Depth profiles for hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons in soil beneath waste disposal pits from natural gas production. *Environ. Sci. Technol.* 20,508-512.
- ESCHENBACH, A., GEHLEN, P. & BIERL, R. 1991. Untersuchungen zum Einfluß von Fluoranthren und Benzo(a)pyren auf Bodenmikroorganismen und zum mikrobiellen Abbau dieser Substanzen. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 63,91-94.
- GARBARINI, D. R. & LION, L. W. 1986. Influence of the Nature of Soil Organics on the Sorption of Toluene and Trichloroethylene. *Environ. Sci. Technol.* 20,1263-1269.
- GAULTHIER, T. D., SEITZ, W. R. & GRANT, C. L. 1987. Effects of Structural and Compositional Variations of Dissolved Humic Materials on Pyrene Koc-Values. *Environ. Sci. Technol.* 21,243- 248.
- GAULTHIER, T. D., SHAME, E. C., GUERIN, W. F., SEITZ, W. R. & GRANT, C. L. 1986. Fluorescence quenching method for determining equilibrium constants for polycyclic aromatic hydrocarbons binding to dissolved humic materials. *Environ. Sci. Technol.* 20,1162-1166.

- GERTEC, Beratende Ingenieure 1988. Gefährdungsabschätzung ehemaliges Gaswerk Ohligs - Textband 1 "Allgemeiner Teil" - Stadt Solingen, 88
- GERTEC, Beratende Ingenieure 1989. Erweiterte Gefährdungsabschätzung ehemaliges Gaswerk Ohligs - Anlagenband 2.1 "Chemie" - Stadt Solingen, Anhang Analyseergebnisse Sanierungsuntersuchung RK 1/S - RK 96/S, BP 1/S - BP 66/S, 6 - 7
- GIBSON, D. T., MAHADEVAN, V., JERINA, D. M., YAGI, H. & YEH, H. J. C. 1975. Oxidation of the carcinogens benzo(a)pyrene and benzo(a)anthracene to dihydrodiols by a bacterium. *Science*, 189,295-297.
- GIBSON, D. T., ROBERTS, R. L., WELLS, M. C. & KOBAL, V. M. 1973. Oxidation of biphenyl by a *Beijerinckia* species. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 50,211-219.
- GIBSON, D. T. & SUBRAMANIAN, V. 1984. Microbial degradation of aromatic hydrocarbons. In: GIBSON, D. T. (Hg.): *Microbial degradation of organic compounds*, Marcel Dekker Inc., New York, 181-252.
- GRATWOHL, P. 1990. Influence of Organic Matter from Soils and Sediments from Various Origins on the Sorption of some Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons: Implications on Koc- Correlations. *Environ. Sci. Technol.* 24,1687-1693.
- HARMS, H. 1975. Metabilisierung von Benzo(a)pyren in pflanzlichen Zellsuspensionskulturen und Weizenkeimpflanzen. *Landbauforsch. Völkenrode*, 25,83-90.
- HARMS, H. 1981. Aufnahme und Metabolismus polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PCKs) in aseptisch kultivierten Nahrungspflanzen und Zellsuspensionskulturen. *Landbauforsch. Völkenrode*, 31,1-6.
- HARMS, H. Uptake and conversion of three different 5-ring polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in cell suspension cultures of various *Chenopodiaceae*-species. *Z. Naturforsch.* , 38 c,382-386.
- HARMS, H., DEHN, W. & MÖNCH, W. 1977. Benzo(a)pyrene metabolites formed by plant cells. *Z. Naturforsch.* 32 c,321-326.
- Harms, H.; Sauerbeck D. 1984. Organische Stoffe in Siedlungsabfällen: Herkunft, Gestalt und Umsetzung in Böden und Pflanzen. *Angew. Botanik*, 58,97-108.
- HASSETT, J. H. & BANWART, W. L. 1989. The Sorption of Nonpolar Organics by Soils and Sediments. In: SAWHNEY, B. L. & BROWN, K. (Hg.): *Reactions and Movement of Organic Chemicals in Soils*, Soil Science Soc. of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 31-45. (SSSA Special Publication Number 22)
- HEITKAMP, M. A. & CERNIGLIA, C. E. 1988. Mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by a bacterium isolated from sediment below an oil field. *Appl. Environ. Microbiol.* 54,1612- 1614.
- HEITKAMP, M. A., FRANKLIN, W. & CERNIGLIA, C. E. 1988. Microbial metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons: isolation and characterization of a pyrene-degrading bacterium. *Appl. Environ. Microbiol.* 54,2549-2555.

- HEITKAMP, M. A., FREEMAN, J. P., MILLER, D. W. & CERNIGLIA, C. E. 1988. Pyrene degradation by a Mycobacterium sp.: identification of ring oxidation and ring-fission products. *Appl. Environ. Microbiol.* 54,2556-2565.
- HELLMANN, H. 1982. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in Acker- und Waldböden und ihr Beitrag zur Gewässerbelastung. *Dtsch. Gewässerkundl. Mitt.* 26,633-639.
- HERBES, S. E. & SCHWALL, L. R. 1978. Microbial transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in pristine and petroleum-contaminated sediments. *Appl. Environ. Microbiol.* 35,306-316.
- HOFFMANN-KAMENSKY, M. 1992. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in Atmosphäre und Böden. Kolloquium Bodentechnologie und Umweltschutz des Instituts für Ökologie, Angewandte Bodenkunde, Universität Essen.
- ISERMEYER, H. 1952. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde.* 56,26-38.
- JEFFREY, A. M., YEH, H. J. C., JERINA, D. M., PATEL, T. R., DAVEY, J. F. & GIBSON, D. T. 1975. Initial reactions in the oxidation of naphthalene by *Pseudomonas putida*. *Biochemistry*, 14,575-584.
- JERINA, D. M., SELANDER, H., YAGI, H., WELLS, M. C., DAVEY, J. F., MAHADEVAN, V. & GIBSON, D. T. 1976. Dihydrodiols from anthracene and phenanthrene. *J. Am. Soc. Chem.* 98,5988-5996.
- KARICKHOFF, S. W., BROWN, D. S. & SCOTT, T. A. 1979. Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments. *Water Res.*, 13,241-248.
- KEUTH, S. & REHM, H. J. 1991. Biodegradation of phenanthrene by *Arthrobacter polychromogenes* isolated from a contaminated soil. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 34,804-808.
- KOCH, R. 1991. Umweltchemikalien. Physikalisch-chemische Daten, Toxizitäten, Grenz- und Richtwerte, Umweltverhalten. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft. (2. Auflage)
- KÖGEL-KNABNER, I. & KNABNER, P. 1991. Einfluß von gelöstem Kohlenstoff auf die Verlagerung organischer Umweltchemikalien. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 63,119-122.
- KÖHLER, A., BRYNIOK, D., EICHLER, B., MACKENBROCK, K., FREIER-SCHRÖDER, D. & KNACKMUSS, H.-J. 1990. Use of surfactants and aliphatic hydrocarbons to accelerate degradation of phenanthrene. *Dechema-Biotechnology-Conferences*.
- KRENGEL-ROTHENSEE, 1992. PAK-Analytik von Bodenproben. Vortrag im Rahmen des Workshops der Fachgruppe "Umweltbiotechnologie" der VAAM am 15. März 1992 an der Universität Düsseldorf.
- Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Abfallwirtschaft Nr. 13, Dez. 1989. Analytik ausgewählter organischer Parameter bei der Abfalluntersuchung, 15 - 54
- LINNE, C. & MARTENS, R. 1978. Überprüfung des Kontaminationsrisikos durch polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im Erntegut von Möhren und Pilzen bei der Anwendung von Müllkomposten. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkde.* 141,265-274.

- LITZ, N. 1990. Organische Verbindungen, in: BLUME, H.-P. (Hg.): Handbuch des Bodenschutzes (Bodenökologie und -belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen), Landsberg:Ecomed Verlagsgesellschaft, 340-367.
- MACKAY, D. & SHIU, W. Y. 1977. Aqueous solubility of polycyclic aromatic hydrocarbons. *J. Chem. Eng. Data*, 22,399-402.
- MAGEE, B. R., LION, L. W. & LEMLEY, A. T. 1991. Transport of Dissolved Organic Macromolecules and Their Effect on the Transport of Phenanthrene in Porous Media. *Environ. Sci. Technol.* 25,323-331.
- MAHAFFEY, W. R., GIBSON, D. T. & CERNIGLIA, C. E. 1988. Bacterial degradation of chemical carcinogens: formation of polycyclic aromatic acids from benzo(a)anthracene. *Appl. Environ. Microbiol.* 88,2415-2423.
- MATZNER, E., HÜBNER, D. & THOMAS, W. 1981. Content and storage of polycyclic aromatic hydrocarbons in two forested ecosystems in northern Germany. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkde.* 144,283-288.
- MCCARTHY, J. F. & ZADARA, J. M. 1989. Subsurface transport of contaminants. *Environ. Sci. Technol.* 23,496-502.
- MEANS, J. L., WOOD, S., HASSETT, J. J. & BANWART, W. L. 1980. Sorption of polynuclear aromatic hydrocarbons by sediments and soils. *Environ. Sci. Technol.* 14,1524-1528.
- MÜLLER, H. 1976. Aufnahme von 3,4-Benzpyren durch Nahrungspflanzen aus künstlich angereicherten Substraten. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkde.* 6,685-695.
- MUELLER, J. C., CHAPMAN, P. J. & PRITCHARD, P. H. 1989. Creosote- contaminated sites. Their potential for bioremediation. *Environ. Sci Technol.* 23,1197-1201.
- MUELLER, J. G., CHAPMAN, P. J., BLATTMANN, B. O. & PRITCHARD, P. H. 1990. Isolation and characterization of a fluoranthene- utilizing strain of *Pseudomonas paucimobilis*. *Appl. Environ. Microbiol.* 56,1079-1086.
- MUELLER, J. G., LANTZ, S. E., BLATTMANN, B. O. & CHAPMAN, P. J. 1991. Bench-scale evaluation of alternative biological treatment processes for the remediation of pentachlorophenol- and creosote-contaminated materials: Solid-phase bioremediation. *Environ. Sci. Technol.* 25,1045-1055.
- MUELLER, J. G., LANTZ, S. E., BLATTMANN, B. O. & CHAPMAN, P. J. 1991. Bench-scale evaluation of alternative biological treatment processes for the remediation of pentachlorophenol- and creosote-contaminated materials: Slurry phase bioremediation. *Environ. Sci. Technol.* 25,1055-1061.
- OHMORI, T., IKAI, T., MINODA, Y. & YAMADA, R. 1973. Utilization of polyphenyl and polyphenyl-related compounds by microorganisms. Part I. *Agr. Biol. Chem.* 37, 1599-1605.
- PÜTTMANN W. 1990. Kriterien zur Beurteilung von Sanierungsverfahren auf mikrobiologischer Basis: Handbuch Bodenschutz, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, Kap. 6440, 1-25

- RADDING, S. G., MILL, T., GOULD, C. W., LIU, D. H., JOHNSON, H. L., BAMBERGER, D. C. & FAJO, C. V. 1976. The environmental fate of selected polynuclear aromatic compounds. U.S Environmental Protection Agency. (EPA-560/5-75 009)
- RIPPEN, G., ILGENSTEIN, M., KLÖPFER, W. & POREMSKI, H. J. 1982. Screening of the adsorption behaviour of new chemicals: Natural soils and modelxicoladsorbent. *Ecotox. Environ. Safety*, 6,236-245.
- ROGERS, J. E. 1986. Anaerobic transformation processes: A review of the microbiological literature. Washington D.C.:U.S. Government Printing Office. (U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/3-86/042)
- ROGERS, R. D., MCFARLANE, J. C. & CROSS, A. J. 1980. Adsorption and Desorption of Benzene in Two Soils and Montmorillonite Clay. *Environ. Sci. Technol.* 14,457-460.
- 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, 336-340.
- SAWHNEY, B. L. & GENT, M. P. N. 1990. Hydrophobicity of Clay Surfaces: Sorption of 1,2-Dibromoethane and Trichloroethene. *Clay and Clay Minerals*, 38,14-20.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. 1989. Lehrbuch der Bodenkunde (13. Auflage). Stuttgart:Ferdinand Enke Verlag.
- SCHROEDER, D. 1978. Bodenkunde in Stichworten. Kiel:Hirt. (3. Auflage)
- SHIU, W. Y. & MACKAY, D. 1986. A critical review of aqueous solubilities, vapor pressures, Henry's Law constants and octanol/water partition coefficients of the polychlorinated biphenyls. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 15,911-929.
- SIEGFRIED, R. 1975. Einfluß von Müllkompost auf den 3,4- Benzpyren-Gehalt von Möhren und Kopfsalat. *Naturwissenschaften*, 62,300.
- SMITH, J. A., JAFFÄ, P. R. & CHIOU, C. T. 1990. Effect of Ten Quaternary Ammonium Cations on Tetrachloromethane Sorption to Clay from Water. *Environ. Sci Technol.* 24,1167-1172.
- STARKE, U., HERBERT, M. EINSELE, G. 1988. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im Boden und Grundwasser. Teil II. Grundlagen zur Beurteilung von Schadensfällen. In: Bodenschutz (Hrsg. Rosenkranz, D., Einsele, G., Haneß, H.-M.), Erich Schmidt-Verlag, Berlin 1-38
- STIEBER, M., BÖCKLE, K., WERNER, P. & FRIMMEL, F. H. 1990. Abbauverhalten von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Untergrund. In: ARENDT, F., HINSEVELD, M. & van den BRINK, W. J. (Hg.): Altlastsanierung '90, Kluver Acad. Publ., Dordrecht, 551-557.
- SUTHERLAND, J. G., SELBY, A. L., FREEMAN, J. P., EVANS, F. E. & CERNIGLIA, C. E. 1991. Metabolism of phenanthrene by *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.* 57,3310- 3316.

- TABATABAI, M. A. 1982. Soil Enzymes. In: PAGE, A. L., MILLER, R. H. & KEENEY, D. R. (Hg.): *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, Madison, Wisc.:American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America Inc. 903-943.
- TEBAAY, R. H., WELP, G. & BRÜMMER, G. W. 1991. Gehalte an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in Böden unterschiedlicher Belastung. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 63,157-160.
- VOICE, T. C. & WEBER, W. J., Jr. 1983. Sorption of Hydrophobic Compounds by Sediments, Soils and Suspended Solids-I: Theory and Background. *Water Res.* 17, 1433-1441.
- WALTER, U., BEYER, M., KLEIN, J. & REHM, H.-J. 1991. Degradation of pyrene by *Rhodococcus* sp. UW 1. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 34,671-676.
- WALTER, U., WEIßENFELS, W., BEYER, M. & KLEIN, J. 1989. Mikrobiologischer Abbau von Terröl-Aromaten. In: : DGMK- Fachbereichstagung "Umwelt", 5.10-6.10 1989, Köln, , 223-234.
- WALTHER, W., TEICHGRÜBER, B., SCHÜFER, B. & DÖHNE, M. 1986. Polyzyklische aromatische und chlorierte Kohlenwasserstoffe in der Bodenzone und im Grabensediment eines Ackerbaugesbietes. *gwf- wasser-abwasser*, 127,184-190.
- WEBER, J. B. & MILLER, C. T. 1989. Organic chemical movement over and through soil. In: SAWHNEY, B. L. & BROWN, K. (Hg.): *Reactions and movement of organic chemicals in Soils*, Soil Science Soc. of America Inc., American Soc. of Agronomy Inc., Madison, Wisconsin, USA, 305-334. (SSSA Special Publication Number 22)
- WEBER, W. J., Jr., VOICE, T. C., PIRBAZARI, M., HUNT, G. E. & ULANOFF, D. M. 1983. Sorption of Hydrophobic Compounds by Sediments, Soils and Suspended Solids-II: Sorbent Evaluation Studies. *Water Res.* 17,1443-1452.
- WEISSENFELS, W. D., BEYER, M. & KLEIN, J. 1990. Degradation of phenanthrene, fluorene and fluoranthene by pure bacterial cultures. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 32,479-484.
- WEISSENFELS, W. D., BEYER, M., KLEIN, J. & REHM, H. J. 1991. Microbiol metabolism of fluoranthene: isolation and identification of ring fission products. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 34,528-535.
- WEISSENFELS, W. D. & KLEVER, H. J., Langhoff, J. 1992. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) by soil particles: influence on bioavailability and biotoxicity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 36,689-696.
- WODZINSKI, R. S. & BERTOLINI, D. 1972. Physical state in which naphthalene and bibenzyl are utilized by bacteria. *Appl. Microbiol.* 23,1077-1084.
- WODZINSKI, R. S. & COYLE, J. E. 1974. Physical state of phenanthrene for utilization by bacteria. *Appl. Microbiol.* 27,1081-1084.
- WODZINSKI, R. S. & JOHNSON, M. J. 1968. Yields of bacterial cells from hydrocarbons. *Appl. Microbiol.* 16,1886-1891.

- ZANDER, M. 1980. Polycyclic aromatic and heteroaromatic hydrocarbons. In: HUTZINGER, O. (Hg.): The handbook of Environmental Chemistry, Springer Verlag, Berlin, (Vol. 3A), 109-131.
- ZIELKE, R. C., PINNAVAIA, T. J. & MORTLAND, M. M. 1989. Adsorption and Reactions of Selected Organic Molecules on Clay Mineral Surfaces. In: SAWHNEY, B. L. & BROWN, K. (Hg.): Reactions and Movement of Organic Chemicals in Soils, Soil Science Soc. of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 81-98. (SSSA Special Publication Number 22)

Anmerkung

Zu diesem Abschlußbericht existiert ein zusätzlicher Anlagenband, der nicht veröffentlicht wird, beim LUA jedoch eingesehen werden kann. Dieser enthält:

- Weitere graphische Ergebnisdarstellungen.
- Anschriften der Firmen, die 1988 die mikrobiologische Sanierung von PAK in ihren Referenzen auswiesen.
- Anschriften der Firmen, die ihr Interesse an der Teilnahme beim Feldversuch in Solingen-Ohligs bekundeten.
- Preisspiegel.
- Leistungsverzeichnis für die vergleichenden Feldversuche zur mikrobiologischen Sanierung von PAK in Solingen-Ohligs.
- Ausführlicher Bericht der Analysenmethode der Firma Claytex Consulting GmbH, Bergheim.
- Untersuchungsbericht von Bodenproben (Solingen-Ohligs) auf mikrobielle Abbauprodukte von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, der GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH), Münster-Roxel.
- Untersuchungsbericht "Mikrobiologische Untersuchung zur Sanierbarkeit sowie Beurteilung PAK-belasteten Bodenmaterials (Solingen-Ohligs) der DMT (Deutsche Montan Technologie für Rohstoff, Energie, Umwelt), Institut für Chemische Umwelttechnologie, Essen.
- Abschlußberichte zum Feldversuch in Solingen-Ohligs der Firmen Umweltschutz Nord GmbH, Ganderkesee; Preussag Noell Wassertechnik GmbH, Darmstadt; Caro Biotechnik GmbH, Aachen.

Ergebnisse der chem. Analysen CB (ehem. Este GmbH) Blatt 1-1																				
Gefäß Probe	Nullprobenahme 06.90					1. Probenahme 08.90					2. Probenahme 10.90					3. Probenahme 12.90				
	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert
1. Trockensubstanz	78,8	75,8	77,3	76,3	77,1	84,4	86,9	86,6	86,3	86,1	76,0	76,0	76,0	77,0	76,3	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen																				
Naphthalin [mg/kg]	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,5	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,5	0,6	0,3	0,5
Acenaphthylen [mg/kg]	0,6	0,9	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Acenaphthen [mg/kg]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren [mg/kg]	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,2
Phenanthren [mg/kg]	1,4	3,3	1,6	2,1	2,1	1,4	1,3	1,5	1,3	1,4	0,8	0,8	0,6	1,1	0,8	2,6	1,5	1,4	1,3	1,7
Anthracen [mg/kg]	0,9	1,2	0,9	1,0	1,0	0,7	0,8	1,0	0,9	0,9	0,5	0,6	0,5	0,7	0,6	1,1	0,8	0,9	0,9	0,9
Fluoranthren [mg/kg]	6,5	9,8	7,1	8,1	7,9	16,6	11,5	12,7	10,3	12,8	3,6	4,7	3,3	5,2	4,2	7,7	6,0	7,1	6,0	6,7
Pyren [mg/kg]	6,7	9,5	7,0	8,3	7,9	6,8	7,8	8,5	7,3	7,6	2,7	3,3	2,6	3,8	3,1	5,8	4,8	5,6	4,8	5,3
Benz(a)anthracen [mg/kg]	8,0	9,9	7,8	9,0	8,7	8,2	9,6	11,5	10,1	9,9	3,0	4,0	3,0	4,8	3,7	7,3	6,7	7,5	6,6	7,0
Chrysen [mg/kg]	8,2	11,2	7,9	8,5	9,0	7,8	9,1	10,9	9,7	9,4	3,6	4,2	3,6	5,6	4,3	7,4	7,0	7,9	6,9	7,3
Benzo(b+k)fluoranthren [mg/kg]	19,0	21,1	15,5	19,7	18,8	17,8	20,7	24,2	22,0	21,2	8,0	9,8	8,0	11,4	9,3	17,6	18,6	22,8	19,4	19,6
Benzo(a)pyren [mg/kg]	11,3	13,2	10,1	12,3	11,7	11,5	12,7	9,5	13,9	11,9	5,2	6,1	5,5	7,6	6,1	12,0	13,0	14,0	12,0	12,8
Indeno(1,2,3-cd)pyren																7,6	7,5	8,6	7,6	7,8
Dibenz(a,h)anthracen [mg/kg]	7,9	9,6	7,1	9,4	8,5	9,1	11,2	11,5	10,4	10,6	4,5	4,2	4,6	6,8	5,0	1,9	2,0	2,5	2,3	2,2
Benzo(ghi)perylene [mg/kg]	5,8	7,7	4,9	6,7	6,3	7,9	9,0	10,7	9,0	9,2	3,4	3,7	1,8	5,3	3,6	7,7	8,0	8,4	8,0	8,0
Benzo(e)pyren [mg/kg]	7,0	8,0	6,6	8,0	7,4	7,9	8,2	6,9	8,8	8,0	2,9	3,5	3,0	4,4	3,5	6,9	7,8	8,0	6,6	7,3
Perylen [mg/kg]	4,9	5,4	4,4	5,5	5,1	4,3	6,0	5,7	7,0	5,8	1,9	0,0	1,9	0,0	1,9	3,9	3,9	4,4	3,7	4,0
Summe PAK [mg/kg]	89,1	111,8	82,3	100,2	95,8	101,6	109,5	116,5	112,3	110,0	40,9	45,6	39,0	57,5	45,8	90,8	88,7	100,4	87,1	91,8
Summe PAK nach TVO [mg/kg]	42,6	51,8	37,6	46,8	44,7	53,8	53,9	57,1	55,2	55,0	20,2	24,3	18,6	29,5	23,2	52,6	53,1	60,9	53,0	54,9
Summe PAK nach EPA [mg/kg]	77,2	98,4	71,3	86,7	83,4	89,4	95,3	103,9	96,5	96,3	36,1	42,1	34,1	53,1	41,4	80,0	77,0	88,0	76,8	80,5

Ergebnisse der chem. Analysen CB (ehem. ESTE GmbH)										
Gefäß Probe	4. Probenahme * 02.91					5. Probenahme 03.91				
	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert
1. Trockensubstanz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen										
Naphthalin [mg/kg]	-	-	-	-	-	überl	überl	überl	überl	überl
Acenaphthylen [mg/kg]	-	-	-	-	-	2,2	1,3	1,9	2,2	1,9
Acenaphthen [mg/kg]	-	-	-	-	-	0,4	0,1	0,3	0,3	0,3
Fluoren [mg/kg]	-	-	-	-	-	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Phenanthren [mg/kg]	-	-	-	-	-	3,7	2,7	3,1	2,7	3,1
Anthracen [mg/kg]	-	-	-	-	-	2,5	2,2	2,2	2,5	2,4
Fluoranthren [mg/kg]	-	-	-	-	-	15,0	13,0	14,0	13,0	13,8
Pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	11,0	10,0	11,0	10,0	10,5
Benz(a)anthracen [mg/kg]	-	-	-	-	-	10,0	9,3	10,0	9,7	9,8
Chrysen [mg/kg]	-	-	-	-	-	12,0	11,0	12,0	11,0	11,5
Benzo(b+k)fluoranthren [mg/kg]	-	-	-	-	-	22,7	21,4	22,4	23,6	22,5
Benzo(a)pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	13,0	13,0	13,0	14,0	13,3
Indeno(1,2,3-cd)pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	8,0	8,0	8,1	9,2	8,3
Dibenz(a,h)anthracen [mg/kg]	-	-	-	-	-	2,0	1,7	2,2	1,8	1,9
Benzo(ghi)perylene [mg/kg]	-	-	-	-	-	6,7	6,3	7,1	7,4	6,9
Benzo(e)pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	10,0	9,9	10,0	10,0	10,0
Perylen [mg/kg]	-	-	-	-	-	3,7	3,4	3,4	4,0	3,6
Summe PAK [mg/kg]	-	-	-	-	-	123,5	113,8	121,2	121,9	120,1
Summe PAK nach TVO [mg/kg]	-	-	-	-	-	65,4	61,7	64,6	67,2	64,7
Summe PAK nach EPA [mg/kg]	-	-	-	-	-	109,8	100,5	107,8	107,9	106,5

* 4. Probenahme war nicht möglich, da Miete bis ca. 20cm gefroren

Ergebnisse der chem. Analysen CB (ehem. Este GmbH) Blatt 1-2																									
		6. Probennahme Frischprobe ** 04.91					geflorene Probe 04.91			7. Probennahme Frischprobe 06.91					geflorene Probe 06.91			8. Probennahme Frischprobe 08.91					geflorene Probe 08.91		
Gefäß Probe		I	I	II	II	Mittelwert	1,0	2,0	Mittelwert	I	I	II	II	Mittelwert	1,0	2,0	Mittelwert	I	I	II	II	Mittelwert	1,0	2,0	Mittelwert
1. Trockensubstanz							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78,50	78,80	78,10	78,30	78,4	-	-	-
2. PAK-Analysen																									
Naphthalin	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,5	0,3	0,4	0,7	1,2	0,8	0,7	0,9	0,2	0,4	0,3	0,5	0,6	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,4
Acenaphthylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,5	0,4	0,5	1,3	1,3	1,2	1,0	1,2	0,7	0,6	0,7	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,4	0,4	0,4
Acenaphthen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,1	0,2	0,4	0,7	0,7	0,3	0,5	0,1	0,1	0,1	überl.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
Phenanthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,8	1,3	1,6	2,7	6,1	5,2	2,0	4,0	1,2	1,3	1,3	1,7	1,8	1,3	1,3	1,5	1,3	1,0	1,2
Anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,9	0,7	0,8	1,5	1,9	2,1	1,3	1,7	0,6	0,8	0,7	0,8	1,0	0,7	0,7	0,8	0,5	0,5	0,5
Fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	7,9	6,5	7,2	13,0	14,0	14,0	9,4	12,6	5,5	7,2	6,4	7,3	9,0	5,9	6,5	7,2	6,2	5,8	6,0
Pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	6,4	5,6	6,0	11,0	12,0	11,0	7,6	10,4	4,6	6,3	5,5	5,9	7,3	4,8	5,2	5,8	5,0	4,6	4,8
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	6,0	5,2	5,6	9,7	9,8	9,4	7,7	9,2	4,7	6,3	5,5	5,0	6,5	4,3	4,7	5,1	5,2	4,7	5,0
Chrysen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	6,8	6,0	6,4	12,0	13,0	11,0	12,0	12,0	5,2	7,5	6,4	5,7	7,5	5,1	5,5	6,0	6,1	5,4	5,8
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	16,0	14,0	15,0	24,0	23,0	24,4	19,0	22,6	14,0	17,0	15,5	11,0	15,0	10,0	11,0	11,8	15,0	14,0	14,5
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	11,0	9,4	10,2	20,0	19,0	19,0	15,0	18,3	9,2	12,0	10,6	8,4	11,0	7,7	8,2	8,8	9,5	9,0	9,3
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,6	4,6	4,6	8,4	8,3	10,0	7,8	8,6	5,3	5,6	5,5	4,0	5,4	3,7	3,8	4,2	7,1	5,9	6,5
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,5	1,3	1,4	3,1	3,2	2,7	1,9	2,7	1,5	1,1	1,3	1,4	1,5	1,0	1,0	1,2	1,8	1,5	1,7
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	-	-	-	-	-	5,2	4,7	5,0	überl	überl	überl	überl	0,0	5,6	6,1	5,9	5,4	7,0	5,3	5,2	5,7	5,9	5,3	5,6
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	9,3	7,8	8,6	überl	12,0	15,0	8,6	11,9	7,5	9,6	8,6	5,1	6,5	4,7	4,7	5,3	8,2	7,5	7,9
Perylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,5	3,9	3,7	5,3	4,8	6,7	3,7	5,1	2,1	4,2	3,2	2,0	2,5	1,8	2,2	2,1	2,8	2,1	2,5
Summe PAK	[mg/kg]	-	-	-	-	-	82,3	71,9	77,1	113,3	130,6	133,6	98,2	118,9	68,1	86,2	77,2	65,2	83,7	57,6	61,2	66,9	75,5	68,3	71,9
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	-	-	-	-	-	44,7	39,7	42,2	65,4	64,3	67,4	51,2	62,1	39,6	47,9	43,8	36,1	47,4	32,6	34,7	37,7	43,7	40,0	41,9
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	-	-	-	-	-	69,5	60,2	64,9	108,0	113,8	111,9	85,9	104,9	58,5	72,4	65,5	58,1	74,7	51,1	54,3	59,6	64,5	58,7	61,6

Ergebnisse der chem. Analysen CB (ehem. ESTE GmbH)																	
		9. Probennahme Frischprobe 10.91					geflorene Probe 10.91			10. Probennahme Frischprobe 11.91					geflorene Probe 11.91		
Gefäß Probe		I	I	II	II	Mittelwert	1,0	2,0	Mittelwert	I	I	II	II	Mittelwert	1,0	2,0	Mittelwert
1. Trockensubstanz		77,1	77,0	77,3	77,5	77,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen																	
Naphthalin	[mg/kg]	0,3	0,5	0,5	0,6	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3
Acenaphthylen	[mg/kg]	1,0	1,7	1,0	1,3	1,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4	0,4	0,4
Acenaphthen	[mg/kg]	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren	[mg/kg]	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Phenanthren	[mg/kg]	2,8	2,9	2,9	3,0	2,9	1,4	1,3	1,4	1,2	0,9	0,5	0,8	0,9	1,1	1,7	1,4
Anthracen	[mg/kg]	1,8	1,7	1,8	2,0	1,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	0,7
Fluoranthren	[mg/kg]	12,0	13,0	12,0	14,0	12,8	6,9	6,9	6,9	5,0	4,4	3,2	4,0	4,2	5,8	7,1	6,5
Pyren	[mg/kg]	9,5	10,0	8,0	13,0	10,1	5,6	5,6	5,6	4,2	3,6	2,7	3,1	3,4	4,8	5,6	5,2
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	11,0	11,0	11,0	12,0	11,3	5,3	5,5	5,4	3,8	3,3	2,7	3,0	3,2	4,7	5,4	5,1
Chrysen	[mg/kg]	10,0	10,0	11,0	11,0	10,5	6,0	6,0	6,0	4,2	3,6	3,1	3,2	3,5	5,5	6,0	5,8
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	18,0	17,0	17,0	19,0	17,8	14,0	15,0	14,5	9,5	8,1	8,4	7,8	8,5	12,0	13,0	12,5
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	10,0	10,0	10,0	12,0	10,5	10,0	9,8	9,9	6,2	5,3	5,9	5,2	5,7	8,9	9,0	9,0
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	6,1	5,5	5,9	7,1	6,2	3,8	6,3	5,1	5,8	4,8	4,1	3,1	4,5	4,3	4,3	4,3
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	2,1	1,8	1,8	2,3	2,0	1,2	1,7	1,5	1,7	1,5	1,3	1,2	1,4	1,1	1,2	1,2
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	7,3	6,8	7,2	8,8	7,5	4,9	6,1	5,5	6,1	5,2	5,0	4,0	5,1	4,5	4,8	4,7
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	6,9	6,7	6,9	8,3	7,2	8,4	8,1	8,3	4,7	3,9	3,7	3,3	3,9	6,8	7,0	6,9
Perylen	[mg/kg]	2,8	3,3	3,6	4,0	3,4	3,2	2,5	2,9	1,3	1,1	1,3	1,4	1,3	2,5	2,5	2,5
Summe PAK	[mg/kg]	102,1	102,6	101,2	119,0	106,2	72,4	76,6	74,5	55,3	47,0	42,8	40,9	46,5	63,5	69,2	66,4
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	53,4	52,3	52,1	60,9	54,7	39,6	42,9	41,3	32,6	27,8	26,6	24,1	27,8	35,5	38,2	36,9
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	92,4	92,6	90,7	106,7	95,6	60,8	66,0	63,4	49,3	42,0	37,8	36,2	41,3	54,2	59,7	57,0

** Probe wurde nicht analysiert

Ergebnisse der bodenchem.-und bodenbiol. Analysen CB (ehem. ESTE GmbH) Blatt 1-3													
Probo	Nullprobenahme (06.-07.90)			1. Probe-	2. Probe-	3. Probe-	4. Probe-	5. Probe-	6. Probe-	7. Probe-	8. Probe-	9. Probe-	10. Probe-
	I	II	Mittelwert	nahme 08.90	nahme 10.90	nahme 12.90	nahme 02.91	nahme 03.91	nahme** 04.91	nahme 06.91	nahme 08.91	nahme 10.91	nahme 11.91
3. BPK-Aromata													
Benzol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toluol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-,p-Xylol [mg/kg]	0,13	-	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
o-Xylol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Metalle													
Arsen [mg/kg]	6,54	-	6,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blei [mg/kg]	209,24	-	209,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium [mg/kg]	1,70	-	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium (CaCl2-Extrakt) [mg/l]	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom [mg/kg]	68,00	-	68,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisen [mg/kg]	28770,00	-	28770,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupfer [mg/kg]	115,08	-	115,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nickel [mg/kg]	69,31	-	69,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quecksilber [mg/kg]	0,78	-	0,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink [mg/kg]	470,79	-	470,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink (CaCl2-Extrakt) [mg/l]	0,07	0,07	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Cyanid ges. [mg/kg]													
	6,00	8,90	7,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. EOX [mg/kg]													
	2,20	2,10	2,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Kohlenwasserstoffe [mg/kg]													
	109,80	6,30	38,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Keimzahlbestimmung													
Nährst. Brod - Agar [10 ⁶ E+7]	0,90	1,80	1,35	8,50	3,00	4,50	-	2,50	-	2,50	2,50	2,00	1,50
Plate Count - Agar [10 ⁶ E+7]	0,70	1,00	0,85	3,00	3,00	10,00	-	1,00	-	2,00	2,00	2,50	1,00
Malz Extrakt - Agar [10 ⁶ E+5]	0,60	0,90	0,75	75,00	10,00	32,50	-	11,00	-	15,50	27,50	27,50	0,55
Minimalagar + Naphthalin [10 ⁶ E+3]	-	-	-	10,00	50,00	15,00	-	<1	-	4,00	<1	<1	21,50
9. Pflanzverfügbare Nährstoffe im Boden													
P2O5 (Phosphat) [mg/100g]	14,20	16,70	15,45	15,60	-	-	-	13,50	-	-	-	-	22,20
K2O (Kaliumoxid) [mg/100g]	6,10	6,60	6,35	13,80	-	-	-	14,10	-	-	-	-	7,80
MgO (Magnesiumoxid) [mg/100g]	15,90	15,80	15,85	12,80	-	-	-	11,50	-	-	-	-	11,50
NH4 - N (Ammonium) [mg/100g]	0,51	0,52	0,52	0,83	-	-	-	0,20	-	-	-	-	0,30
NO3 - N (Nitrat) [mg/100g]	1,07	1,13	1,10	0,72	-	-	-	0,20	-	-	-	-	0,90
C (org. - Kohlenstoff) [%]	5,51	5,17	5,34	5,24	-	-	-	3,90	-	-	-	-	4,20
N ges. Stickstoff [%]	0,18	0,20	0,19	0,16	-	-	-	0,12	-	-	-	-	0,16
C : N - Verhältnis [/]	30,61	28,90	29,76	32,80	-	-	-	33,00	-	-	-	-	26,00
10. Bodenatmung (CO2)													
1. Tag [mg/100g]	17,80	14,08	15,94	31,68	36,10	-	-	15,80	20,10	31,70	58,90	42,20	33,40
2. Tag [mg/100g]	19,36	21,12	20,24	39,16	50,20	24,20	-	40,90	28,20	28,20	45,20	58,10	50,20
3. Tag [mg/100g]	19,58	18,48	19,03	34,76	39,20	52,80	-	36,90	47,50	47,50	39,60	54,60	48,40
11. substratbiol. Atmung													
1. Tag [mg/100g]	36,96	37,84	37,40	97,68	163,70	46,60	-	59,80	73,90	73,90	172,50	128,50	128,50
2. Tag [mg/100g]	97,24	90,20	93,72	109,12	146,00	86,20	-	95,90	68,60	68,60	181,30	140,80	75,70
3. Tag [mg/100g]	60,72	53,70	57,21	86,24	204,00	134,40	-	152,20	65,10	65,10	132,00	114,40	62,30
12. Verhältnis 11/10													
1. Tag [/]	2,07	2,68	2,38	3,08	4,53	-	-	3,80	3,70	2,30	2,90	3,00	3,80
2. Tag [/]	5,02	4,27	4,65	2,79	2,90	3,60	-	2,30	2,40	2,40	4,00	2,40	1,50
3. Tag [/]	3,10	2,90	3,00	2,48	5,20	2,70	-	4,10	1,40	1,40	3,30	2,00	1,30
13. Dehydrogenase [µg ATP/10g]													
	150,00	180,00	165,00	270,00	480,00	395,00	-	285,00	375,00	630,00	448,00	399,00	443,00
14. H2O-Spacerkap [%]													
	46,30	54,20	50,25	35,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15. pH-Wert (in CaCl2) [/]													
	7,80	7,60	7,70	6,40	-	-	-	-	-	-	-	-	7,10
16. Untersuchungen im Eluat													
pH - Wert [/]	7,10	7,00	7,05	7,20	7,30	-	-	8,30	-	8,30	7,70	7,30	7,20
PO4-P (Orthophosphat) [mg/l]	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	-	-	0,08	-	0,06	0,08	0,07	0,81
K (Kalium) [mg/l]	1,50	1,10	1,30	2,00	1,40	-	-	1,00	-	3,90	3,30	1,90	4,40
Mg (Magnesium) [mg/l]	5,80	6,40	6,10	6,00	3,80	-	-	1,40	-	3,70	1,78	-	2,90
NH4 - N (Ammonium) [mg/l]	0,80	0,60	0,70	0,30	0,20	-	-	0,60	-	0,80	0,90	0,60	2,50
NO3 - N (Nitrat) [mg/l]	1,10	1,60	1,35	0,90	1,50	-	-	1,80	-	1,10	1,10	2,30	3,70
N - mineral [mg/l]	1,90	2,20	2,05	1,20	1,70	-	-	2,40	-	1,90	2,00	2,90	6,20
C (org. - Kohlenstoff) [mg/l]	23,50	17,80	20,65	23,20	25,20	-	-	26,00	-	35,70	36,60	18,20	55,20
N ges. Stickstoff [mg/l]	2,00	2,40	2,20	1,20	2,90	-	-	14,00	-	12,00	17,00	10,00	7,00
C : N - Verhältnis [/]	11,80	7,40	9,60	19,30	9,00	-	-	1,90	-	3,00	2,20	1,82	7,90

* 4. Probenahme war nicht möglich, da Mist bis ca. 20cm gefroren

** 6. Probe wurde teilw. nicht analysiert

Ergebnisse der chem. Analysen		PNW					GmbH					Blatt 2-1									
		Nullprobenahme 06.90					1. Probenahme 08.90					2. Probenahme 10.90					3. Probenahme 12.90				
Gefäß:		I	I	II	II	Mittel	I	I	II	II	Mittel	I	I	II	II	Mittel	I	I	II	II	Mittel
Probe:		1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert
1. Trockensubstanz	[%]	78,3	77,9	78,4	78,4	78,3	73,2	74,9	73,8	72,4	73,6	71,0	72,0	72,0	73,0	72,0	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen																					
Naphthalin	[mg/kg]	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Acenaphthylen	[mg/kg]	0,6	0,6	0,5	0,8	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Acenaphthen	[mg/kg]	0,3	0,3		0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,1	0,1	0,3
Fluoren	[mg/kg]	0,5	0,5		0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,2	0,1	0,4	0,5
Phenanthren	[mg/kg]	3,1	3,5	2,3	3,7	3,1	1,8	1,7	4,6	3,3	2,9	1,0	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	11,0	1,0	2,5	3,9
Anthracen	[mg/kg]	1,3	1,5	1,0	1,4	1,3	0,8	0,8	1,8	1,1	1,1	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,5	3,2	0,4	1,0	1,3
Fluoranthren	[mg/kg]	9,7	12,8	8,0	12,1	10,7	6,6	6,7	10,4	8,3	8,0	2,8	3,4	2,5	4,0	3,2	4,1	19,0	3,6	5,6	8,1
Pyren	[mg/kg]	10,0	12,8	9,1	12,0	11,0	6,3	6,5	9,6	7,6	7,5	2,3	2,7	2,2	3,1	2,6	3,3	15,0	2,9	4,2	6,4
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	9,6	11,9	8,2	10,7	10,1	6,3	5,6	7,0	6,9	6,5	2,1	3,1	2,9	3,4	2,9	3,8	13,0	3,5	4,7	6,3
Chrysen	[mg/kg]	10,7	12,8	8,4	12,1	11,0	6,7	6,1	8,0	7,5	7,1	2,3	3,7	2,3	4,2	3,1	4,1	13,0	3,8	5,1	6,5
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	20,4	25,7	17,9	23,0	21,7	13,1	11,1	13,6	16,6	13,6	4,9	7,3	4,9	7,3	6,1	9,5	24,4	9,1	10,4	13,4
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	12,8	15,4	11,1	14,0	13,3	9,6	7,6	9,3	10,4	9,2	3,3	4,6	3,0	4,8	3,9	6,7	15,0	6,3	7,1	8,8
Indeno(1,2,3-c-d)pyren																	5,4	9,0	4,2	5,0	5,9
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	9,3	10,8	6,4	10,2	9,2	5,7	4,5	5,1	6,6	5,5	2,4	3,9	2,2	4,7	3,3	3,3	5,5	1,1	2,2	3,0
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	6,8	7,8	5,1	7,8	6,9	4,4	3,9	4,3	4,8	4,4	2,4	3,5	2,1	3,0	2,8	5,1	7,8	4,6	5,0	5,6
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	8,0	9,9	3,4	7,5	7,2	5,9	4,5	5,8	5,9	5,5	2,1	2,9	1,9	2,9	2,5	4,3	9,8	3,9	4,7	5,7
Perylen	[mg/kg]	6,9	8,1	4,8	6,5	6,6	3,8	2,5	3,3	3,7	3,3	0,9	3,5	1,3	1,9	1,9	2,1	4,7	2,1	2,2	2,8
Summe PAK	[mg/kg]	110,6	134,9	86,6	122,8	113,7	72,0	62,6	84,4	83,8	75,7	27,4	40,2	26,9	39,4	33,5	54,1	152,9	47,3	60,8	78,8
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	49,7	61,7	42,1	56,9	52,6	33,6	29,2	37,7	40,1	35,1	13,4	18,8	12,5	19,1	16,0	30,8	75,2	27,8	33,1	41,7
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	95,7	116,9	78,3	108,8	99,9	62,3	55,5	75,3	74,2	66,8	24,4	33,8	23,7	36,5	29,6	47,7	138,4	41,3	53,9	70,3

Ergebnisse der chem. Analysen		PNW					GmbH				
		4. Probenahme 02.91					5. Probenahme 03.91				
Gefäß:		I	I	II	II	Mittel	I	I	II	II	Mittel
Probe:		1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert
1. Trockensubstanz	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen											
Naphthalin	[mg/kg]	0,6	7,4	0,6	0,9	2,4	überl	überl	überl	überl	überl
Acenaphthylen	[mg/kg]	<0,5	2,5	<0,5	0,5	0,8	0,9	0,9	1,2	1,2	1,1
Acenaphthen	[mg/kg]	<0,5	2,3	<0,5	<0,5	0,6	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Fluoren	[mg/kg]	<0,5	4,8	<0,5	0,6	1,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Phenanthren	[mg/kg]	2,7	39,0	3,3	5,6	12,7	3,0	2,6	3,9	3,6	3,3
Anthracen	[mg/kg]	0,8	6,2	0,8	1,1	2,2	1,4	1,2	2,1	1,9	1,7
Fluoranthren	[mg/kg]	9,1	41,0	11,0	12,0	18,3	12,0	10,0	14,0	13,0	12,3
Pyren	[mg/kg]	7,1	27,0	8,1	9,2	12,9	8,8	7,8	10,0	9,9	9,1
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	8,3	18,0	9,4	8,7	11,1	8,2	7,1	10,0	9,6	8,7
Chrysen	[mg/kg]	8,4	17,0	9,1	9,1	10,9	9,4	8,3	11,0	11,0	9,9
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	17,1	28,5	18,5	18,0	20,5	17,4	14,5	20,2	20,3	18,1
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	9,3	17,0	10,0	9,7	11,5	9,5	7,9	11,0	11,0	9,9
Indeno(1,2,3-c-d)pyren	[mg/kg]	6,8	11,0	7,2	6,8	8,0	6,4	5,5	7,5	7,7	6,8
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	1,5	2,5	1,3	1,2	1,6	2,4	1,1	2,3	2,3	2,0
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	8,5	13,0	9,1	8,4	9,8	6,2	6,6	5,9	6,4	6,3
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	7,6	14,0	überl.	8,0	9,9	7,8	7,3	9,0	4,0	7,0
Perylen	[mg/kg]	2,5	4,4	2,8	2,5	3,1	2,4	2,1	2,3	1,3	2,0
Summe PAK	[mg/kg]	90,3	255,6	91,2	102,3	134,9	96,3	83,4	111,1	103,8	98,7
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	50,8	110,5	55,8	54,9	68,0	51,5	44,5	58,6	58,4	53,3
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	80,2	237,2	88,4	91,8	124,4	86,1	74,0	99,8	98,5	89,6

Ergebnisse der chem. Analysen		PNW GmbH Blatt 2-2																								
Gefäß: Probe:		6. Probennahme Frischprobe ** 04.91					geflorene Probe 04.91			7. Probennahme Frischprobe 06.91					geflorene Probe 06.91			8. Probennahme Frischprobe 08.91					geflorene Probe 08.91			
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	
1. Trockensubstanz	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75,9	75,3	76,7	76,8	76,2	-	-	-
2. PAK-Analysen																										
Naphthalin	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,5	0,4	0,7	0,3	0,5	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	
Acenaphthylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,7	0,6	0,9	0,5	0,7	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,6	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	
Acenaphthen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Fluoren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,5	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	
Phenanthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,1	2,4	1,8	3,6	8,6	3,3	2,1	4,4	1,5	1,3	1,4	4,3	1,9	3,3	1,7	2,8	1,9	1,2	1,6	
Anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,5	0,7	0,6	1,3	2,5	2,3	1,0	1,8	0,6	0,5	0,6	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9	0,6	0,5	0,6	
Fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,9	7,0	6,0	12,0	21,0	11,0	7,8	13,0	5,5	5,5	5,5	11,0	8,7	9,9	6,8	9,1	6,6	5,0	5,8	
Pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,8	5,2	4,5	9,7	15,0	9,1	6,3	10,0	4,3	4,3	4,3	7,8	5,6	7,6	5,4	6,6	5,3	4,0	4,7	
Benzo(a)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,8	4,8	4,3	8,1	11,0	7,9	5,7	8,2	4,1	4,1	4,1	5,8	4,7	5,8	4,7	5,3	4,5	3,8	4,2	
Chrysen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,4	5,4	4,9	9,3	14,0	16,0	7,3	11,7	4,7	4,8	4,8	7,4	5,4	6,7	5,3	6,2	5,4	4,6	5,0	
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	8,8	9,9	9,4	18,0	19,8	19,0	13,0	17,5	9,9	9,9	9,9	12,0	10,0	12,0	9,1	10,8	11,0	9,8	10,4	
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	6,1	5,7	5,9	12,0	13,0	13,0	9,0	11,8	5,9	5,8	5,9	7,7	6,7	8,0	6,3	7,2	7,1	6,3	6,7	
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	2,2	2,0	2,1	6,4	6,3	7,8	5,4	6,5	2,5	2,5	2,5	4,1	3,6	4,1	3,2	3,8	2,6	1,9	2,3	
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,8	0,9	0,9	1,7	1,7	2,4	1,3	1,8	1,0	0,8	0,9	1,2	1,2	1,3	1,1	1,2	1,1	1,0	1,1	
Benzo(ghi)perylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,1	3,3	3,2	7,8	überl	überl	5,8	6,8	3,4	3,5	3,5	4,7	4,3	5,0	3,8	4,5	4,5	3,6	4,1	
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	5,9	4,6	5,3	7,6	8,3	8,3	5,7	7,5	5,4	5,7	5,6	4,8	3,8	5,3	4,1	4,5	6,5	6,0	6,3	
Perylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,9	1,5	1,7	2,9	3,3	3,5	1,8	2,9	1,9	2,0	2,0	1,8	1,4	1,9	1,6	1,7	2,7	2,2	2,5	
Summe PAK	[mg/kg]	-	-	-	-	-	47,9	54,0	51,0	102,1	126,4	105,9	73,4	102,0	51,3	51,3	51,3	74,7	58,8	73,2	54,9	65,4	60,6	50,7	55,7	
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	-	-	-	-	-	25,1	27,9	26,5	56,2	60,1	50,8	41,0	52,0	27,2	27,2	27,2	39,5	33,3	39,0	29,2	35,3	31,8	26,6	29,2	
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	-	-	-	-	-	40,1	47,9	44,0	91,6	114,8	94,1	65,9	91,6	44,0	43,6	43,8	68,1	53,6	66,0	49,2	59,2	51,4	42,5	47,0	

Ergebnisse der chem. Analysen		PNW GmbH															
Gefäß: Probe:		9. Probennahme Frischprobe 10.91					geflorene Probe 10.91			10. Probennahme Frischprobe 11.91					geflorene Probe 11.91		
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert
1. Trockensubstanz	[%]	79,0	80,4	80,9	80,5	80,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen																	
Naphthalin	[mg/kg]	0,6	0,7	0,9	0,6	0,7	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Acenaphthylen	[mg/kg]	1,0	1,1	2,3	1,0	1,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3
Acenaphthen	[mg/kg]	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren	[mg/kg]	0,4	0,6	0,3	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Phenanthren	[mg/kg]	3,4	5,9	4,2	2,7	4,1	1,1	1	1,1	1,2	2,5	1,2	1,3	1,6	1,1	1,9	1,5
Anthracen	[mg/kg]	1,8	2,3	2,3	1,5	2,0	0,5	0,4	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,6	0,5	0,8	0,7
Fluoranthren	[mg/kg]	12,0	17,0	15,0	12,0	14,0	4,6	5	4,8	4,8	6,3	4,6	5,5	5,3	4,7	6,6	5,7
Pyren	[mg/kg]	9,0	13,0	14,0	10,0	11,5	3,7	4,2	4,0	4,0	4,8	3,7	4,4	4,2	3,6	5,2	4,4
Benzo(a)anthracen	[mg/kg]	11,0	13,0	15,0	9,6	12,2	3,5	4,1	3,8	3,5	3,8	3,4	3,5	3,6	3,6	5,4	4,5
Chrysen	[mg/kg]	11,0	14,0	14,0	9,8	12,2	4,2	4,6	4,4	4,0	4,1	3,8	3,9	4,0	4,0	5,8	4,9
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	18,0	21,0	27,0	17,0	20,8	8,2	11	9,6	8,4	8,6	8,1	7,6	8,2	9,1	14,0	11,6
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	11,0	12,0	16,0	9,3	12,1	5,4	6,1	5,8	5,2	5,7	5,0	4,8	5,2	5,0	8,0	6,5
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	6,8	7,8	10,0	6,3	7,7	3,1	4,1	3,6	4,6	5,7	5,7	3,6	4,9	3,8	4,8	4,3
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	2,2	2,4	3,3	2,3	2,6	0,8	1,7	1,3	1,6	1,5	1,4	1,9	1,6	1,6	2,0	1,8
Benzo(ghi)perylen	[mg/kg]	8,1	9,3	12,0	7,7	9,3	3,7	4,2	4,0	5,5	5,4	5,2	4,0	5,0	3,3	4,4	3,9
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	8,1	8,8	11,0	6,7	8,7	5,5	5,6	5,6	4,1	4,2	4,0	3,3	3,9	4,4	7,3	5,9
Perylen	[mg/kg]	3,9	3,8	5,0	3,0	3,9	1,8	0,9	1,4	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	0,8	1,7	1,3
Summe PAK	[mg/kg]	108,5	133,1	152,5	99,9	123,5	46,7	53,4	50,1	49,2	55,3	48,4	45,8	49,7	46,1	68,7	57,4
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	55,9	67,1	80,0	52,3	63,8	25,0	30,4	27,7	28,5	31,7	28,6	25,5	28,6	25,9	37,8	31,9
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	96,5	120,5	136,5	90,2	110,9	39,4	46,9	43,2	44,0	50,0	43,3	41,5	44,7	40,9	59,7	50,3

** 6. Probe wurde nicht analysiert

Anlage 6

Ergebnisse der bodenchem.- und bodenbiol. Analysen PNW GmbH Blatt 2-3													
Probe:	Nullprobenahme (06.90)			1. Probe-	2. Probe-	3. Probe-	4. Probe-	5. Probe-	6. Probe-	7. Probe-	8. Probe-	9. Probe-	10. Probe-
	I	II	Mittelwert	nahme 06.90	nahme 10.90	nahme 12.90	nahme 02.91	nahme 03.91	nahme 04.91	nahme 06.91	nahme 08.91	nahme 10.91	nahme 11.91
3. BTEX-Aromatische													
Benzol [mg/kg]	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toluol [mg/kg]	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzol [mg/kg]	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-p-Xylol [mg/kg]	0,13	-	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
o-Xylol [mg/kg]	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Metalle													
Arsen [mg/kg]	5,11	-	5,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blei [mg/kg]	268,37	-	268,37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium [mg/kg]	1,79	-	1,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium (CaCl2-Extrakt) [mg/l]	0,01	0,00	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom [mg/kg]	70,29	-	70,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisen [mg/kg]	24281,0	-	24281	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupfer [mg/kg]	123,96	-	123,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nickel [mg/kg]	92,01	-	92,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quecksilber [mg/kg]	0,64	-	0,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink [mg/kg]	549,52	-	549,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink (CaCl2-Extrakt) [mg/l]	0,09	0,05	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Cyanid ges. [mg/kg]	12,14	12,78	12,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. BOX [mg/kg]	1,92	2,30	2,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Kohlenwasserstoffe [mg/kg]	8,95	6,37	7,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Keimzahlbestimmung													
Nutrient Broth - Agar [10 ⁶ E+7]	1,30	1,00	1,15	11,50	4,50	4,50	-	2,50	-	5,00	3,50	2,50	3,50
Plate Count - Agar [10 ⁶ E+7]	0,70	0,80	0,75	12,40	4,00	9,00	-	1,50	-	4,50	4,00	4,00	2,50
Malz Extrakt - Agar [10 ⁶ E+5]	5,00	3,30	4,15	220,00	13,50	22,50	-	25,50	-	22,50	42,50	27,50	5,50
Minimalagar + Naphthalin [10 ⁶ E+3]	-	-	-	-	200,00	20,00	-	14,50	-	5,00	39,00	13,00	17,50
9. Nährstoffgehalt im Boden													
P2O5 (Phosphat) [mg/100g]	19,20	21,80	20,50	19,40	-	-	-	17,60	-	-	-	-	26,30
K2O (Kaliumoxid) [mg/100g]	7,50	7,50	7,50	75,00	-	-	-	75,90	-	-	-	-	41,30
MgO (Magnesiumoxid) [mg/100g]	16,50	15,60	16,05	15,60	-	-	-	13,60	-	-	-	-	13,00
NH4 - N (Ammonium) [mg/100g]	0,48	0,56	0,52	0,56	-	-	-	0,20	-	-	-	-	0,30
NO3 - N (Nitrat) [mg/100g]	1,82	2,21	2,02	2,21	-	-	-	0,20	-	-	-	-	5,30
C (org.- Kohlenstoff) [%]	5,41	5,33	5,37	5,33	-	-	-	4,00	-	-	-	-	4,30
N ges. Stickstoff [%]	0,19	0,17	0,18	0,17	-	-	-	0,13	-	-	-	-	0,20
C : N-Verhältnis [/]	28,47	31,35	29,83	31,35	-	-	-	31,00	-	-	-	-	22,00
10. Bodenatmung (CO2)													
1. Tag [mg/100g]	13,86	13,86	13,86	29,92	41,40	7,90	30,80	25,50	22,40	30,80	58,00	48,40	48,40
2. Tag [mg/100g]	22,66	23,54	23,10	25,96	63,40	44,40	60,70	67,30	26,80	32,60	56,30	59,80	62,00
3. Tag [mg/100g]	22,44	21,56	22,00	32,56	47,50	67,80	66,00	63,40	40,00	32,60	77,90	79,20	66,00
11. substratind. Atmung													
1. Tag [mg/100g]	28,16	23,76	25,96	73,04	139,00	48,60	102,00	72,10	110,30	88,00	308,00	200,60	168,10
2. Tag [mg/100g]	99,88	100,76	100,32	139,48	154,90	138,30	174,20	138,20	148,70	103,80	311,50	301,00	248,20
3. Tag [mg/100g]	66,00	70,86	68,43	120,12	151,40	211,20	202,40	147,80	161,00	117,90	158,40	209,40	195,40
12. Verhältnis 11./10.													
1. Tag [/]	2,03	1,71	1,87	2,44	3,35	6,20	3,30	2,80	4,90	2,90	5,30	4,10	3,50
2. Tag [/]	4,41	4,28	4,35	5,37	2,44	3,10	2,90	2,10	5,50	3,20	5,50	5,00	4,00
3. Tag [/]	2,94	3,29	3,12	3,69	3,19	3,10	3,10	2,30	4,00	3,60	2,00	2,60	3,00
13. Dehydrogenase [µg TPF/10g]													
	60,00	150,00	105,00	600,00	1740	2093,00	840,00	1215,00	1935,00	1106,00	906,00	1005,00	1063,00
14. H2O-Speicherkap. [%]													
	47,90	45,60	46,75	84,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15. pH-Wert (in CaCl2) [/]													
	7,50	7,40	7,45	7,30	-	-	-	7,00	-	-	-	-	7,20
16. Umrechnungen im Eluat													
pH - Wert [/]	7,20	7,30	7,25	7,30	7,30	-	-	8,10	-	8,20	7,80	7,20	7,50
PO4-P (Orthophosphat) [mg/l]	0,10	mn	0,05	mn	0,03	-	-	0,05	-	0,09	0,15	0,16	0,32
K (Kalium) [mg/l]	2,60	1,20	1,90	58,00	48,90	-	-	61,20	-	58,60	43,90	31,90	53,50
Mg (Magnesium) [mg/l]	4,40	3,50	3,95	6,60	7,50	-	-	2,40	-	4,00	4,23	-	10,80
NH4 - N (Ammonium) [mg/l]	0,70	0,70	0,70	0,80	0,50	-	-	0,90	-	4,10	2,80	2,30	4,70
NO3 - N (Nitrat) [mg/l]	1,70	1,50	1,60	1,50	1,40	-	-	1,10	-	0,40	7,70	19,70	22,70
N - mineral [mg/l]	2,40	2,20	2,30	2,30	1,90	-	-	2,00	-	4,50	10,50	22,00	27,40
C (org.- Kohlenstoff) [mg/l]	33,80	25,20	29,50	38,50	39,20	-	-	47,80	-	76,40	57,30	38,00	41,90
N ges. Stickstoff [mg/l]	2,40	2,10	2,25	2,50	2,20	-	-	8,90	-	14,00	51,00	37,00	48,00
C : N-Verhältnis [/]	14,08	11,95	13,11	15,40	17,82	-	-	5,37	-	5,46	1,10	1,02	0,90

** 6. Probe wurde teilweise nicht analysiert

Ergebnisse der chem. Analysen		Umweltschutz Nord GmbH										Blatt 3-1									
Gefäß Probe		Nullprobenahme 06.90					1. Probenahme 08.90					2. Probenahme 10.90					3. Probenahme 12.90				
		I	I	II	II	Mittel-	I	I	II	II	Mittel-	I	I	II	II	Mittel-	I	I	II	II	Mittel-
		1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert
1. Trockensubstanz	[%]	74,9	75,0	80,7	75,7	76,6	74,2	75,9	78,8	76,1	76,3	75,0	75,0	75,0	76,0	75,3	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen																					
Naphthalin	[mg/kg]	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
Acenaphthylen	[mg/kg]	0,5	0,4	0,6	0,9	0,6	0,8	1,1	0,9	0,7	0,9	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3
Acenaphthen	[mg/kg]	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren	[mg/kg]	0,3	0,3	0,2	1,2	0,5	0,4	0,7	0,5	0,3	0,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Phenanthren	[mg/kg]	1,6	1,5	1,6	5,2	2,5	1,9	4,1	2,4	1,7	2,5	0,7	1,1	1,2	1,6	1,2	1,1	1,2	1,2	1,1	1,2
Anthracen	[mg/kg]	0,9	0,8	0,9	2,8	1,3	1,1	2,0	1,4	0,9	1,3	0,3	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Fluoranthren	[mg/kg]	6,7	5,9	6,9	12,8	8,1	13,1	14,5	10,8	10,0	12,1	2,6	4,4	5,1	4,9	4,3	4,3	4,1	4,3	3,9	4,2
Pyren	[mg/kg]	6,9	6,0	7,1	12,4	8,1	10,9	14,5	12,7	8,8	11,7	2,0	3,1	3,9	4,5	3,4	3,3	2,7	3,0	2,9	3,0
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	7,2	6,4	7,7	11,5	8,2	10,8	14,5	11,9	8,8	11,5	2,1	3,7	4,2	6,2	4,1	3,7	3,0	4,2	3,3	3,6
Chrysen	[mg/kg]	8,4	6,7	8,7	11,9	8,9	12,0	14,5	12,2	9,6	12,1	2,6	3,6	4,9	4,4	3,9	4,0	3,3	3,7	3,5	3,6
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	17,4	14,7	17,3	21,1	17,6	24,3	23,7	22,8	17,1	22,0	5,4	7,2	8,8	8,8	7,6	9,5	8,4	8,4	7,5	8,5
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	10,3	8,3	11,5	12,8	10,7	13,3	15,8	12,6	10,2	13,0	3,8	4,7	5,8	5,6	5,0	6,2	5,5	6,2	5,5	5,9
Indeno(1,2,3-c-d)pyren																	5,0	4,3	4,1	3,9	4,3
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	6,8	5,6	6,8	8,7	7,0	9,3	12,9	9,5	7,5	9,8	3,3	3,5	5,5	4,1	4,1	1,4	1,2	1,0	0,9	1,1
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	4,3	3,3	4,7	6,3	4,7	8,4	9,4	7,7	5,5	7,7	3,0	2,7	3,6	3,5	3,2	5,1	4,4	4,8	4,1	4,6
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	6,5	5,5	6,8	8,1	6,7	8,6	10,7	8,4	6,4	8,5	2,1	2,9	3,4	3,5	3,0	4,3	3,7	3,9	3,5	3,9
Perylen	[mg/kg]	5,6	4,4	4,7	5,4	5,0	6,1	7,4	7,9	3,3	6,1	1,4	1,7	Überl.	2,2	1,8	2,1	1,8	1,8	1,7	1,9
Summe PAK	[mg/kg]	83,8	70,0	86,1	121,8	90,4	121,4	146,5	122,5	91,3	120,4	29,9	39,7	47,7	50,9	42,1	51,5	44,8	48,0	43,3	46,9
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	38,6	32,1	40,5	53,1	41,1	59,0	63,4	53,9	42,8	54,8	14,8	19,0	23,3	22,8	20,0	30,1	26,7	27,8	24,9	27,4
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	71,7	60,1	74,6	108,3	78,7	106,7	128,5	106,2	81,6	105,8	26,4	35,1	44,3	45,2	37,8	45,1	39,3	42,3	38,1	41,2

Ergebnisse der chem. Analysen		Umweltschutz Nord GmbH									
Gefäß Probe		4. Probenahme 02.91					5. Probenahme 03.91				
		I	I	II	II	Mittel-	I	I	II	II	Mittel-
		1,0	2,0	1,0	2,0	wert	1,0	2,0	1,0	2,0	wert
1. Trockensubstanz	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen											
Naphthalin	[mg/kg]	0,9	0,8	0,9	0,7	0,8	überl.	überl.	überl.	überl.	überl.
Acenaphthylen	[mg/kg]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,0	0,9	1,1	1,0	1,0
Acenaphthen	[mg/kg]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Fluoren	[mg/kg]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Phenanthren	[mg/kg]	2,9	2,7	1,9	2,0	2,4	2,5	2,1	2,8	3,0	2,6
Anthracen	[mg/kg]	1,0	0,9	0,7	0,6	0,8	1,5	1,2	1,6	1,6	1,5
Fluoranthren	[mg/kg]	10,0	9,4	8,1	8,4	9,0	10,0	8,1	11,0	11,0	10,0
Pyren	[mg/kg]	7,6	6,7	6,1	6,4	6,7	7,8	6,2	8,4	7,7	7,5
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	7,8	7,5	7,4	7,5	7,6	7,5	6,1	7,7	7,3	7,2
Chrysen	[mg/kg]	7,9	7,2	7,0	7,1	7,3	8,5	7,0	8,5	8,9	8,2
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	15,5	13,8	14,0	14,6	14,5	18,1	13,4	16,5	14,5	15,6
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	8,4	7,8	7,2	8,4	8,0	8,6	6,9	9,0	8,1	8,2
Indeno(1,2,3-c-d)pyren	[mg/kg]	6,1	5,4	5,7	5,2	5,6	6,1	5,0	6,1	5,7	5,7
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	1,2	1,0	1,0	0,8	1,0	1,9	1,5	1,6	1,7	1,7
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	7,4	6,0	6,9	7,0	6,8	4,7	3,8	5,0	4,4	4,5
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	7,4	überl.	6,1	6,6	6,7	3,2	2,9	6,9	6,1	6,7
Perylen	[mg/kg]	2,2	2,5	2,6	2,7	2,5	0,8	0,8	2,2	1,7	1,4
Summe PAK	[mg/kg]	87,8	73,2	77,1	79,5	79,4	82,7	66,4	89,1	83,4	80,4
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	47,4	42,4	41,9	43,6	43,8	47,5	37,2	47,6	43,7	44,0
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	78,2	70,7	68,4	70,2	71,9	78,7	62,7	80,0	75,6	74,3

Ergebnisse der chem. Analysen		Umweltschutz Nord GmbH Blatt 3-2																							
Gefäß Probe		6. Probennahme Frischprobe ** 04.91					geflorene Probe 04.91			7. Probennahme Frischprobe 06.91					geflorene Probe 06.91			8. Probennahme Frischprobe 08.91					geflorene Probe 08.91		
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert
1. Trockensubstanz	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80,6	83,8	81,3	81,5	81,8	-	-	-	
2. PAK-Analysen																									
Naphthalin	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,1	0,2	0,6	0,6	0,6	1,1	0,7	0,2	0,3	0,3	0,6	0,3	0,6	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4
Acenaphthylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,2	0,2	0,2	0,5	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3
Acenaphthen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
Phenanthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,7	0,4	0,6	4,5	2,5	2,0	2,2	2,8	1,1	1,2	1,2	2,6	1,1	2,4	2,2	2,1	1,2	0,9	1,1
Anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,1	0,2	1,5	1,1	0,9	1,1	1,2	0,5	0,6	0,6	1,0	0,5	0,8	0,9	0,8	0,6	0,4	0,5
Fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,6	2,0	2,8	14,0	8,2	6,9	7,4	9,1	3,7	4,6	4,2	11,0	5,2	9,0	7,4	8,2	4,6	4,3	4,5
Pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	2,7	1,4	2,1	11,0	6,5	5,6	6,0	7,3	2,9	3,8	3,4	6,7	3,3	6,2	5,6	5,5	3,5	3,0	3,3
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,2	1,9	2,6	8,7	5,7	4,7	5,7	6,2	3,2	4,4	3,8	5,5	2,7	4,8	4,7	4,4	4,0	3,7	3,9
Chrysen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,5	2,0	2,8	10,0	6,9	5,6	8,5	7,8	3,8	4,9	4,4	6,3	3,1	5,5	5,3	5,1	4,5	4,0	4,3
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	7,8	4,2	6,0	18,5	14,0	11,1	14,0	14,4	8,2	12,0	10,1	11,0	5,7	10,0	10,0	9,2	12,0	11,0	11,5
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,9	2,3	3,6	13,0	9,8	7,8	11,0	10,4	4,1	6,8	5,5	8,0	3,8	7,0	6,9	6,4	6,2	5,7	6,0
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	2,8	1,3	2,1	6,6	5,2	5,0	5,7	5,6	3,1	4,9	4,0	4,1	1,9	3,7	3,6	3,3	4,3	4,1	4,2
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,9	0,6	0,8	2,1	1,3	1,9	1,2	1,6	1,0	2,1	1,6	1,0	0,5	1,1	0,9	0,9	1,7	1,3	1,5
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	-	-	-	-	-	2,9	1,3	2,1	8,3	6,1	5,6	überl	6,7	2,4	4,3	3,4	6,1	2,3	4,5	4,2	4,3	3,7	3,4	3,6
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,6	1,8	3,2	8,7	6,0	5,1	7,0	6,7	3,7	5,9	4,8	5,2	2,5	4,4	4,4	4,1	5,6	5,5	5,6
Perylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,0	0,5	0,8	3,4	2,4	überl	2,6	2,8	0,9	1,3	1,1	2,0	0,8	1,6	1,7	1,5	1,4	0,9	1,2
Summe PAK	[mg/kg]	-	-	-	-	-	39,3	20,2	29,8	112,3	77,5	63,8	74,7	82,1	39,2	57,5	48,4	72,0	34,2	62,4	59,0	56,9	54,2	48,9	51,6
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	-	-	-	-	-	22,0	11,1	16,6	60,4	43,3	36,4	38,1	44,6	21,5	32,6	27,1	40,2	18,9	34,2	32,1	31,4	30,8	28,5	29,7
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	-	-	-	-	-	33,7	17,9	25,8	100,2	69,1	58,7	65,1	73,3	34,6	50,3	42,5	64,8	30,9	56,4	52,9	51,3	47,2	42,5	44,9

Ergebnisse der chem. Analysen		Umweltschutz Nord GmbH															
Gefäß Probe		9. Probennahme Frischproben 10.91					geflorene Probe 10.91			10. Probennahme Frischprobe 11.91					geflorene Probe 11.91		
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert
1. Trockensubstanz	[%]	83,2	82,2	82,0	83,3	82,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2. PAK-Analysen																	
Naphthalin	[mg/kg]	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4
Acenaphthylen	[mg/kg]	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3
Acenaphthen	[mg/kg]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren	[mg/kg]	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Phenanthren	[mg/kg]	1,7	2,6	2,1	1,6	2,0	1,1	1,0	1,1	0,8	0,6	1,1	1,6	1,0	1,6	1,2	1,4
Anthracen	[mg/kg]	0,9	1,1	0,9	0,7	0,9	0,5	0,4	0,5	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,6	0,5	0,6
Fluoranthren	[mg/kg]	6,5	7,9	7,0	6,3	6,9	4,2	5,2	4,7	3,1	2,1	5,9	3,3	3,6	5,2	4,6	4,9
Pyren	[mg/kg]	5,1	6,0	5,4	6,3	5,7	3,3	4,1	3,7	2,5	1,6	3,2	3,3	2,7	4,1	3,5	3,8
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	6,0	6,6	6,2	5,9	6,2	3,9	4,8	4,4	2,1	1,5	2,5	2,5	2,2	5,0	4,3	4,7
Chrysen	[mg/kg]	6,1	6,9	6,2	5,8	6,3	4,3	5,3	4,8	2,8	1,9	3,8	2,2	2,7	5,2	4,6	4,9
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	11,0	12,0	11,0	10,0	11,0	11,0	11,0	11,0	5,7	4,9	6,7	5,7	5,8	14,0	12,0	13,0
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	6,2	6,6	6,5	6,1	6,4	7,0	6,0	6,5	3,2	3,2	3,4	3,4	3,3	8,0	6,6	7,3
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	3,7	4,0	4,0	3,7	3,9	3,8	3,8	3,8	3,1	2,6	3,2	3,3	3,1	5,4	4,9	5,2
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	1,2	1,3	1,2	1,1	1,2	1,1	2,0	1,6	0,7	0,8	1,2	0,5	0,8	1,4	1,4	1,4
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	4,8	5,0	5,0	4,8	4,9	3,1	3,6	3,4	4,3	3,1	5,4	5,2	4,5	4,0	3,8	3,9
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	4,5	4,8	4,7	4,4	4,6	5,9	5,5	5,7	2,7	2,2	3,1	3,1	2,8	8,6	6,8	7,7
Perylen	[mg/kg]	1,7	2,0	2,1	2,0	2,0	1,0	1,1	1,1	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	1,6	1,3	1,5
Summe PAK	[mg/kg]	60,8	68,3	63,8	60,2	63,3	50,8	54,3	52,6	32,8	25,8	41,2	35,8	33,9	65,5	56,3	60,9
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	32,2	35,5	33,5	30,9	33,0	29,1	29,6	29,4	19,4	15,9	24,6	20,9	20,2	36,6	31,9	34,3
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	54,6	61,5	57,0	53,8	56,7	43,9	47,7	45,8	29,2	22,9	37,2	31,9	30,3	55,3	48,2	51,8

** 6. Probe wurde nicht analysiert

Ergebnisse der bodenchem.- und bodenbiol. Analysen Umw.-Nord Blatt 3-3													
Probe:	Nullprobenahme (07.90)			1. Probe-	2. Probe-	3. Probe-	4. Probe-	5. Probe-	6. Probe-	7. Probe-	8. Probe-	9. Probe-	10. Probe-
	I	II	Mittel-	nahme	nahme	nahme	nahme	nahme	nahme**	nahme	nahme	nahme	nahme
			wert	07.90	10.90	12.90	02.91	03.91	04.91	06.91	08.91	10.91	11.91
3. BTX-Aromate													
Benzol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toluol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-,p-Xylol [mg/kg]	0,13	-	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
o-Xylol [mg/kg]	0,07	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Metalle													
Arsen [mg/kg]	6,53	-	6,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blei [mg/kg]	274,24	-	274,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium [mg/kg]	2,22	-	2,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium (CaCl ₂ -Extrakt) [mg/l]	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom [mg/kg]	80,97	-	80,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisen [mg/kg]	30035,00	-	30035	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupfer [mg/kg]	156,71	-	156,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nickel [mg/kg]	87,50	-	87,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quecksilber [mg/kg]	1,04	-	1,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink [mg/kg]	600,72	-	600,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink (CaCl ₂ -Extrakt) [mg/l]	0,04	0,04	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Cyanid ges. [mg/kg]	12,80	10,06	11,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. BOD ₅ [mg/kg]	1,95	1,83	1,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Kohlenwasserstoffe [mg/kg]	7,84	6,53	7,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Keimzahlbestimmung													
Nutrient Broth - Agar [10 ⁶ E+7]	0,40	0,40	0,40	10,00	6,00	8,50	-	4,50	-	3,50	3,50	2,50	2,50
Plate Count - Agar [10 ⁶ E+7]	0,10	n.a.	0,05	6,00	4,50	12,00	-	3,50	-	2,50	3,50	3,00	1,50
Malz Extrakt - Agar [10 ⁶ E+5]	3,00	5,00	4,00	20,00	12,50	30,00	-	40,00	-	17,50	28,00	22,50	1,25
Minimalsagar + Naphthalin [10 ⁶ E+3]	1,00	2,00	1,50	80,00	50,00	32,50	-	8,00	-	3,50	8,00	185,00	120,00
9. Nährstoffgehalt im Boden													
P ₂ O ₅ (Phosphat) [mg/100g]	18,00	17,30	17,65	24,30	-	-	-	25,40	-	-	-	-	31,60
K ₂ O (Kaliumoxid) [mg/100g]	11,10	11,10	11,10	33,20	-	-	-	47,00	-	-	-	-	24,20
MgO (Magnesiumoxid) [mg/100g]	12,50	12,10	12,30	14,90	-	-	-	13,30	-	-	-	-	9,30
NH ₄ - N (Ammonium) [mg/100g]	1,11	0,47	0,79	0,75	-	-	-	0,10	-	-	-	-	0,30
NO ₃ - N (Nitrat) [mg/100g]	0,43	1,67	1,05	0,46	-	-	-	<1	-	-	-	-	1,10
C (org.- Kohlenstoff) [%]	3,95	4,13	4,04	5,00	-	-	-	4,00	-	-	-	-	2,70
N ges. Stickstoff [%]	0,15	0,14	0,15	0,15	-	-	-	0,15	-	-	-	-	0,11
C : N-Verhältnis [/]	26,30	29,50	27,90	32,00	-	-	-	27,00	-	-	-	-	25,00
10. Bodenatmung (CO₂)													
1. Tag [mg/100g]	16,28	17,62	16,95	30,80	61,60	24,60	29,90	22,00	21,60	33,40	60,70	38,70	31,70
2. Tag [mg/100g]	31,24	31,68	31,46	37,84	74,80	28,60	47,50	40,00	28,60	44,50	50,40	45,80	52,80
3. Tag [mg/100g]	23,20	27,28	25,24	35,64	47,50	61,60	48,40	42,20	31,70	49,30	55,40	51,00	44,00
11. substratind. Atmung													
1. Tag [mg/100g]	64,24	78,32	71,28	74,96	144,30	51,00	98,60	77,40	78,20	89,70	167,00	105,60	119,70
2. Tag [mg/100g]	112,64	125,84	119,24	123,20	177,80	123,20	130,20	125,00	95,00	75,70	191,80	140,80	114,40
3. Tag [mg/100g]	94,12	102,96	98,54	125,84	188,40	183,00	177,80	139,90	99,40	80,90	167,20	190,10	58,10
12. Verhältnis 11./10.													
1. Tag [/]	3,95	2,54	3,25	2,43	2,34	2,10	3,30	3,50	3,60	2,70	2,80	2,70	3,80
2. Tag [/]	3,61	3,97	3,79	3,26	2,38	4,30	2,70	3,10	3,30	1,70	3,80	3,10	2,20
3. Tag [/]	4,06	3,77	3,92	3,53	3,97	3,00	3,70	3,30	3,10	1,60	3,00	3,70	1,30
13. Dehydrogenase [µg TPF/10g]	135,00	300,00	217,50	450,00	555,00	1054,00	495,00	630,00	810,00	649,00	923,00	743,00	725,00
14. H ₂ O-Speicherkap. [%]	35,20	34,30	34,75	37,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15. pH-Wert (in CaCl ₂) [/]	6,80	7,00	6,90	6,70	-	-	-	7,20	-	-	-	-	7,20
16. Untersuchungen im Eluat													
pH - Wert [/]	7,20	7,10	7,15	7,30	7,40	-	-	8,40	-	8,20	7,80	7,00	7,40
PO ₄ -P (Orthophosphat) [mg/l]	0,05	0,17	0,11	0,05	mn	-	-	0,17	-	0,17	0,17	0,46	0,06
K (Kalium) [mg/l]	2,00	1,90	1,95	21,00	20,10	-	-	23,20	-	21,30	20,60	13,50	21,50
Mg (Magnesium) [mg/l]	3,20	5,90	4,55	10,90	6,00	-	-	2,60	-	5,40	3,77	-	<1
NH ₄ - N (Ammonium) [mg/l]	0,70	0,70	0,70	0,30	0,50	-	-	1,30	-	1,00	2,80	2,00	3,50
NO ₃ - N (Nitrat) [mg/l]	1,00	1,50	1,25	1,00	0,90	-	-	0,20	-	0,90	1,80	1,90	3,10
N - mineral [mg/l]	1,70	2,20	1,95	1,30	1,40	-	-	1,50	-	1,90	4,60	3,90	6,60
C (org.- Kohlenstoff) [mg/l]	21,90	25,90	23,90	33,50	34,70	-	-	28,60	-	40,30	40,60	33,40	28,70
N ges. Stickstoff [mg/l]	1,90	2,40	2,15	1,40	2,50	-	-	6,90	-	10,00	14,00	10,00	10,00
C : N-Verhältnis [/]	11,50	10,70	11,10	23,90	13,90	-	-	4,10	-	4,00	2,90	3,30	2,90

** 6. Probe wurde teilweise nicht analysiert

Ergebnisse der chem. Analysen		Stadt Solingen										Blatt 4-I										
Gefäß Probe		Nullprobenahme 06.90					1. Probenahme 08.90					2. Probenahme 10.90					3. Probenahme 12.90					
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	
1. Trockensubstanz	[%]	80,9	78,1	81,1	80,5	80,2	77,3	77,5	79,2	78,3	78,1	74,0	76,0	75,0	74,0	74,8						
2. PAK-Analysen																						
Naphthalin	[mg/kg]	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	1,5	0,3	0,5	
Acenaphthylen	[mg/kg]	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	
Acenaphthen	[mg/kg]	0,2	0,3	0,1	0,4	0,2	0,3	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Fluoren	[mg/kg]	0,4	0,5	0,4	0,7	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	
Phenanthren	[mg/kg]	3,0	3,7	2,7	4,8	3,6	5,3	1,0	1,0	1,1	2,1	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	2,1	0,7	1,0	
Anthracen	[mg/kg]	1,2	1,5	1,1	1,5	1,3	1,7	0,4	0,4	0,5	0,7	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,7	0,3	0,4	
Fluoranthren	[mg/kg]	10,8	12,2	8,9	13,7	11,4	14,2	4,1	3,8	4,3	6,6	2,4	2,0	1,7	1,3	1,9	2,0	1,7	3,4	2,4	2,4	
Pyren	[mg/kg]	10,4	11,7	8,6	12,4	10,8	11,9	4,3	3,9	3,8	6,0	1,9	1,7	1,4	1,0	1,5	1,7	1,3	2,8	1,9	1,9	
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	10,6	10,9	8,3	10,7	10,1	8,9	3,9	3,7	3,6	5,0	2,1	2,0	1,4	1,0	1,6	1,7	1,3	2,3	1,8	1,8	
Chrysen	[mg/kg]	12,4	12,0	9,4	11,7	11,4	9,8	4,5	4,0	4,1	5,6	2,8	2,4	1,7	1,3	2,1	1,8	1,6	2,4	2,0	2,0	
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	23,5	25,6	19,7	23,6	23,1	16,8	8,4	8,6	9,1	10,7	4,8	4,6	3,2	2,9	3,9	4,4	3,5	5,3	4,6	4,5	
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	13,6	14,1	10,7	13,7	13,0	9,3	5,9	6,1	5,7	6,8	3,1	2,8	2,0	1,9	2,5	2,6	2,1	3,1	2,7	2,6	
Indeno(1,2,3-c-d)pyren																	2,1	1,8	2,8	2,6	2,3	
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	9,5	11,3	8,4	10,6	9,9	6,9	4,5	4,4	3,7	4,9	2,9	2,7	1,4	1,4	2,1	0,6	0,7	0,5	0,9	0,7	
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	6,6	7,6	5,5	7,1	6,7	4,4	3,0	2,5	2,3	3,0	2,1	2,0	1,4	1,3	1,7	2,1	2,1	3,3	3,0	2,6	
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	8,9	9,9	7,5	9,4	8,9	6,3	7,2	3,9	3,4	5,2	2,0	1,8	1,4	1,2	1,6	überl.	überl.	überl.	überl.	überl.	
Perylen	[mg/kg]	8,0	9,1	6,8	6,0	7,5	5,3	7,2	3,9	5,5	5,5	1,6	-	1,1	0,9	0,9	0,9	0,5	1,1	1,1	0,9	
Summe PAK	[mg/kg]	120,3	131,4	99,0	127,3	119,8	102,2	55,1	46,7	47,9	63,0	27,2	23,1	17,5	15,0	20,7	21,2	17,9	32,2	24,6	24,0	
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	54,4	59,4	44,9	58,0	54,2	44,8	21,4	21,0	21,5	27,1	12,4	11,4	8,3	7,4	9,9	13,2	11,2	17,9	15,3	14,4	
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	102,8	111,9	84,3	111,4	102,6	90,3	40,5	38,8	38,8	52,1	23,4	21,1	14,9	12,8	18,1	20,2	17,3	29,6	23,2	22,6	

Ergebnisse der chem. Analysen		Stadt Solingen									
Gefäß Probe		4. Probenahme* 02.91					5. Probenahme 03.91				
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert
1. Trockensubstanz	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen											
Naphthalin	[mg/kg]	-	-	-	-	-	überl.	überl.	überl.	überl.	überl.
Acenaphthylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Acenaphthen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Fluoren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
Phenanthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,8	2,1	2,2	2,1	2,1
Anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
Fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	7,2	7,6	7,7	8,2	7,7
Pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	5,5	5,4	5,9	6,0	5,7
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	5,4	5,1	5,3	5,7	5,4
Chrysen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	6,3	5,7	5,9	6,4	6,1
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	11,1	10,3	10,8	10,9	10,8
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	6,2	5,6	5,7	5,7	5,8
Indeno(1,2,3-c-d)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,5	4,1	4,3	4,0	4,2
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,6	1,6	1,7	1,5	1,6
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,9	4,0	4,1	3,2	3,8
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	5,4	5,2	überl.	5,0	5,2
Perylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,2	1,5	1,5	1,5	1,4
Summe PAK	[mg/kg]	-	-	-	-	-	61,9	60,0	57,0	62,2	60,3
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	-	-	-	-	-	32,9	31,6	32,6	32,0	32,3
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	-	-	-	-	-	55,3	53,3	55,5	55,7	55,0

* 4. Probenahme war nicht möglich, da Miete ca. 20cm Tief gefroren

Ergebnisse der chem. Analysen		Stadt Solingen Blatt 4-2																							
Gefäß Probe		6. Probenahme Frischprobe ** 04.91					gefrorene Probe 04.91			7. Probenahme Frischprobe 06.91					gefrorene Probe 06.91			8. Probenahme Frischprobenahme 0					gefrorene Probe 08.91		
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert
1. Trockensubstanz	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85,1	85,0	86,3	86,5	85,7	-	-	-	
2. PAK-Analysen																									
Naphthalin	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
Acenaphthylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,3	0,1	0,2	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	1,5	0,1	0,8	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
Acenaphthen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Phenanthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,1	1,8	1,5	2,7	1,8	1,7	1,9	2,0	1,8	0,7	1,3	1,1	1,2	0,8	1,1	1,1	0,9	0,6	0,8
Anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	0,4	0,6	0,5	1,1	0,5	1,0	0,8	0,9	0,6	0,2	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2
Fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,5	5,7	5,1	7,9	6,1	6,5	6,2	6,7	5,0	3,1	4,1	4,2	4,8	3,9	5,1	4,5	3,5	2,9	3,2
Pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,4	5,0	4,2	6,4	4,9	5,4	5,1	5,5	4,2	2,4	3,3	3,3	3,2	2,7	3,5	3,2	2,6	2,2	2,4
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,9	4,9	4,4	5,1	4,4	5,1	4,5	4,8	4,2	2,6	3,4	2,6	2,6	2,2	2,8	2,6	2,9	2,1	2,5
Chrysen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	4,3	5,4	4,9	6,1	7,3	6,2	6,3	6,5	4,7	2,9	3,8	3,1	3,2	2,7	3,5	3,1	3,1	2,6	2,9
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	11,0	15,0	13,0	11,8	10,0	12,5	10,0	11,1	13,0	7,7	10,4	5,9	5,9	5,0	6,8	5,9	8,9	7,1	8,0
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	5,6	6,7	6,2	8,1	6,7	8,8	7,0	7,7	6,7	3,4	5,1	3,8	3,8	3,3	4,4	3,8	4,7	3,4	4,1
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	3,9	4,6	4,3	5,0	4,4	4,7	5,0	4,8	4,4	2,6	3,5	2,1	2,1	1,8	2,4	2,1	3,0	3,7	3,4
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	2,0	1,9	2,0	1,6	0,9	1,0	1,0	1,1	2,1	1,3	1,7	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	1,4	2,1	1,8
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	-	-	-	-	-	2,6	3,5	3,1	5,9	4,3	5,7	4,5	5,1	3,3	1,9	2,6	2,4	2,3	2,1	2,7	2,4	2,0	2,0	2,0
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	-	-	-	-	-	5,6	6,4	6,0	3,6	4,5	5,7	4,8	5,2	6,8	3,2	5,0	2,7	2,7	2,3	3,0	2,7	4,1	3,2	3,7
Perylen	[mg/kg]	-	-	-	-	-	1,1	1,1	1,1	1,8	1,5	2,0	1,6	1,7	1,4	0,6	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	1,5	1,2	1,4
Summe PAK	[mg/kg]	-	-	-	-	-	50,0	63,1	56,6	68,5	58,4	67,6	60,0	63,6	60,2	33,0	46,6	33,6	34,2	29,1	37,9	33,7	39,2	33,7	36,5
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	-	-	-	-	-	27,6	35,5	31,6	38,7	31,5	38,2	32,7	35,3	32,4	18,7	25,6	18,4	18,9	16,1	21,4	18,7	22,1	19,1	20,6
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	-	-	-	-	-	43,3	55,6	49,5	63,1	52,4	59,9	53,6	57,3	52,0	29,2	40,6	30,0	30,6	25,8	34,0	30,1	33,6	29,3	31,5

Ergebnisse der chem. Analysen		Stadt Solingen															
Gefäß Probe		9. Probenahme Frischprobe 10.91					gefrorene Probe 10.91			10. Probenahme Frischprobe 11.91					gefrorene Probe 11.91		
		I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert
1. Trockensubstanz	[%]	81,6	81,1	80,2	81,3	81,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2. PAK-Analysen																	
Naphthalin	[mg/kg]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Acenaphthylen	[mg/kg]	0,5	0,8	0,6	0,5	0,6	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Acenaphthen	[mg/kg]	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Fluoren	[mg/kg]	0,2	0,5	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Phenanthren	[mg/kg]	1,6	5,1	1,7	1,9	2,6	0,6	0,6	0,6	0,7	1,0	0,6	1,0	0,8	0,9	0,7	
Anthracen	[mg/kg]	0,6	2,1	0,7	0,9	1,1	0,2	0,2	0,2	0,4	2,4	0,2	0,3	0,8	0,3	0,3	
Fluoranthren	[mg/kg]	6,5	18,0	7,1	7,6	9,8	2,8	3,1	3,0	3,9	1,9	2,8	3,4	3,0	3,6	3,8	
Pyren	[mg/kg]	6,2	16,0	8,0	5,7	9,0	2,3	2,5	2,4	3,1	3,1	2,3	2,7	2,8	2,7	3,0	
Benz(a)anthracen	[mg/kg]	5,1	13,0	5,7	5,9	7,4	1,9	2,1	2,0	2,5	2,5	1,9	2,3	2,3	2,2	2,6	
Chrysen	[mg/kg]	5,7	13,0	6,4	6,8	8,0	2,9	3,0	3,0	2,9	2,9	2,3	2,7	2,7	3,1	3,4	
Benzo(b+k)fluoranthren	[mg/kg]	9,4	19,0	11,0	12,0	12,9	7,6	7,6	7,6	6,0	5,9	4,6	5,5	5,5	6,7	7,5	
Benzo(a)pyren	[mg/kg]	5,2	10,0	5,5	6,3	6,8	4,2	3,9	4,1	3,4	3,4	2,8	3,2	3,2	4,1	3,4	
Indeno(1,2,3-cd)pyren	[mg/kg]	3,3	6,0	3,6	4,6	4,4	3,0	2,6	2,8	3,4	3,4	2,6	3,4	3,2	4,4	2,7	
Dibenz(a,h)anthracen	[mg/kg]	1,0	1,7	1,0	1,9	1,4	1,5	1,1	1,3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,5	1,3	
Benzo(ghi)perylene	[mg/kg]	4,3	7,4	4,5	5,6	5,5	2,3	2,1	2,2	4,3	4,1	2,5	3,7	3,7	2,6	2,2	
Benzo(e)pyren	[mg/kg]	4,1	7,1	4,3	4,8	5,1	4,0	3,7	3,9	3,8	2,8	1,9	2,6	2,8	3,6	3,5	
Perylen	[mg/kg]	1,6	3,0	überl.	1,8	2,1	3,0	3,2	3,1	0,8	0,7	0,6	0,7	0,9	1,0	1,0	
Summe PAK	[mg/kg]	55,8	123,3	60,8	67,0	76,7	36,7	36,1	36,4	36,6	35,4	26,4	32,8	32,8	37,1	36,2	
Summe PAK nach TVO	[mg/kg]	28,7	60,4	31,7	36,1	39,2	19,9	19,3	19,6	21,0	18,7	15,3	19,2	18,6	21,4	20,0	
Summe PAK nach EPA	[mg/kg]	50,1	113,2	56,5	60,4	70,1	29,7	29,2	29,5	32,0	31,9	23,9	29,5	29,3	32,5	31,7	

** 6. Probe wurde nicht analysiert

Anlage 12

Ergebnisse der bodenchem.- und bodenbiol. Analysen Stadt Sol. Blatt 4-3													
Probe:	Nullprobenahme (07.90)			1. Probe-	2. Probe-	3. Probe-	4. Probe-	5. Probe-	6. Probe-	7. Probe-	8. Probe-	9. Probe-	10. Probe-
	I	II	Mittelwert	07.90	10.90	11.90	02.91	03.91	04.91	06.91	08.91	10.91	11.91
3. BTEX-Aromate													
Benzol [mg/kg]	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toluol [mg/kg]	0,10	-	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzol [mg/kg]	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-,p-Xylol [mg/kg]	0,12	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
o-Xylol [mg/kg]	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Metalle													
Arsen [mg/kg]	6,24	-	6,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blei [mg/kg]	237,06	-	237,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium [mg/kg]	2,25	-	2,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium (CaCl2-Extrakt) [mg/l]	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom [mg/kg]	89,83	-	89,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisen [mg/kg]	31191	-	31191	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupfer [mg/kg]	149,72	-	149,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nickel [mg/kg]	77,35	-	77,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quecksilber [mg/kg]	0,87	-	0,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink [mg/kg]	548,97	-	548,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink (CaCl2-Extrakt) [mg/l]	31191	0,03	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Cyanid ges. [mg/kg]	9,73	8,98	9,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. EOX [mg/kg]	1,75	2,87	2,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Kohlenwasserstoffe [mg/kg]	9,98	78,60	44,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Keimzahlbestimmung													
Nutrient Broth - Agar [10 ⁶ E+7]	0,80	0,60	0,70	1,20	3,50	4,50	-	4,50	-	3,50	4,00	5,00	3,50
Plate Count - Agar [10 ⁶ E+7]	0,50	0,60	0,55	7,50	7,50	9,50	-	3,00	-	3,50	4,50	6,00	2,00
Malz Extrakt - Agar [10 ⁶ E+5]	14,00	12,00	13,00	40,00	17,50	20,00	-	33,00	-	18,50	35,00	32,50	2,00
Minimalagar + Naphthalin [10 ⁶ E+3]	7,00	2,00	4,50	21,00	90,00	32,50	-	9,50	-	17,50	17,00	17,00	19,00
9. Nährstoffgehalt im Boden													
P2O5 (Phosphat) [mg/100g]	15,90	17,30	16,60	11,90	-	-	-	14,10	-	-	-	-	17,70
K2O (Kaliumoxid) [mg/100g]	11,10	11,10	11,10	41,50	-	-	-	40,70	-	-	-	-	19,50
MgO (Magnesiumoxid) [mg/100g]	12,40	12,10	12,25	14,60	-	-	-	13,90	-	-	-	-	12,30
NH4 - N (Ammonium) [mg/100g]	0,59	0,81	0,70	1,76	-	-	-	0,20	-	-	-	-	0,20
NO3 - N (Nitrat) [mg/100g]	0,72	0,69	0,71	0,73	-	-	-	0,50	-	-	-	-	2,30
C (org.- Kohlenstoff) [%]	3,17	3,94	3,56	5,73	-	-	-	3,80	-	-	-	-	3,50
N ges. Stickstoff [%]	0,13	0,15	0,14	0,18	-	-	-	0,19	-	-	-	-	0,21
C : N - Verhältnis [/]	24,40	26,30	25,35	31,80	-	-	-	20,00	-	-	-	-	17,00
10. Bodenatmung (CO2)													
1. Tag [mg/100g]	16,72	16,72	16,72	38,28	61,20	10,10	-	15,00	22,00	37,80	66,00	59,00	51,00
2. Tag [mg/100g]	39,16	39,16	39,16	39,16	48,40	34,80	-	65,10	36,10	66,00	40,50	37,80	61,60
3. Tag [mg/100g]	29,92	34,32	32,12	37,84	47,50	63,80	-	56,30	41,50	63,40	78,50	71,30	70,40
11. Substratind. Atmung													
1. Tag [mg/100g]	77,44	73,04	75,24	114,40	198,90	49,30	-	89,80	82,20	121,40	265,80	239,40	167,20
2. Tag [mg/100g]	120,56	117,04	118,80	145,20	220,00	144,30	-	167,00	125,80	128,50	276,30	274,60	163,70
3. Tag [mg/100g]	102,08	95,04	98,56	125,84	276,30	274,60	-	170,70	133,80	147,80	154,90	151,40	128,50
12. Verhältnis 11./10.													
1. Tag [/]	4,63	4,37	4,50	2,99	3,23	4,80	-	6,00	3,80	3,20	3,90	4,10	3,30
2. Tag [/]	3,08	2,95	3,02	3,71	4,54	4,10	-	2,60	3,50	1,90	6,80	7,30	2,70
3. Tag [/]	3,41	2,77	3,09	3,33	5,82	4,30	-	3,00	3,20	2,30	2,00	2,10	1,80
13. Dehydrogenase [mg TPF/10g]													
	150,00	165,00	157,50	375,00	705,00	1.253,00	-	585,00	1.125,00	1.545,00	1.549,00	1.351,00	1.662,00
14. H2O-Speicherkap. [%]													
	34,70	34,50	34,60	35,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15. pH-Wert (in CaCl2) [/]													
	6,70	6,70	6,70	6,90	-	-	-	6,70	-	-	-	-	7,30
16. Untersuchungen im Eluat													
pH - Wert [/]	6,80	7,60	7,20	7,40	7,50	-	-	8,20	-	8,10	7,70	7,10	7,30
PO4 (Orthophosphat) [mg/l]	0,07	0,03	0,05	mm	0,05	-	-	0,05	-	0,11	0,03	0,20	0,33
K (Kalium) [mg/l]	1,50	1,90	1,70	22,20	24,40	-	-	16,60	-	16,90	16,90	12,40	18,30
Mg (Magnesium) [mg/l]	3,60	3,20	3,40	8,50	7,80	-	-	2,00	-	1,30	13,90	-	7,30
NH4 - N (Ammonium) [mg/l]	0,50	0,50	0,50	1,10	0,60	-	-	1,40	-	2,60	1,00	1,60	3,60
NO3 - N (Nitrat) [mg/l]	1,60	1,30	1,45	1,10	1,40	-	-	3,70	-	1,40	1,00	10,20	8,50
N - mineral [mg/l]	2,10	1,80	1,95	2,20	2,00	-	-	5,10	-	4,00	2,00	11,80	12,10
C (org.- Kohlenstoff) [mg/l]	22,60	23,20	22,90	31,20	37,80	-	-	30,80	-	51,00	39,30	27,30	32,00
N ges. Stickstoff [mg/l]	2,20	2,00	2,10	2,30	2,30	-	-	8,20	-	12,00	22,00	37,00	24,00
C : N - Verhältnis [/]	10,30	11,80	11,05	13,60	16,40	-	-	3,80	-	4,30	1,80	0,74	1,30

* 4. Probenahme war nicht möglich, da Miets ca. 20cm Tief gefroren

** 6. Probe wurde teilw. nicht analysiert

Ergebnisse der chem. Analysen Kontrollmiete Blatt 5-1															
Gefäß Probe	Nullprobenahme = 1. Probenahme 0					2. Probenahme 10.90					3. Probenahme 12.90				
	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert
1. Trockensubstanz	76,6	76,1	76,7	75,9	76,3	77,0	77,0	77,0	77,0	77,0	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen															
Naphthalin [mg/kg]	0,4	0,4	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2
Acenaphthylen [mg/kg]	0,8	0,8	0,4	0,9	0,7	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
Acenaphthen [mg/kg]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,1
Fluoren [mg/kg]	0,4	0,3	0,1	0,4	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,1
Phenanthren [mg/kg]	1,8	1,6	0,9	1,7	1,5	0,9	1,5	0,6	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9
Anthracen [mg/kg]	1,3	1,1	0,7	1,3	1,1	0,6	0,5	0,3	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Fluoranthren [mg/kg]	7,7	8,3	5,3	8,7	7,5	4,5	3,9	2,5	3,9	3,7	4,3	3,8	3,7	3,4	3,8
Pyren [mg/kg]	7,7	8,8	5,3	9,2	7,8	3,8	3,0	2,0	3,1	3,0	3,5	3,2	3,2	2,8	3,2
Benz(a)anthracen [mg/kg]	9,5	10,1	6,6	11,5	9,4	4,4	3,2	2,3	3,5	3,4	4,5	3,7	3,9	3,3	3,9
Chrysen [mg/kg]	9,1	9,6	6,4	12,3	9,3	5,2	3,8	2,7	4,3	4,0	4,8	4,1	4,2	3,5	4,2
Benzo(b+k)fluoranthren [mg/kg]	19,6	23,7	15,6	26,4	21,3	9,3	7,4	5,9	8,5	7,8	12,0	10,1	11,1	9,3	10,6
Benzo(a)pyren [mg/kg]	13,1	14,5	8,7	17,1	13,3	6,2	5,1	4,1	5,8	5,3	8,6	7,4	8,0	7,2	7,8
Indeno(1,2,3-cd)pyren											6,5	5,4	6,0	4,8	5,7
Dibenz(a,h)anthracen [mg/kg]	9,5	9,7	6,1	10,7	9,0	6,2	3,4	3,5	4,9	4,5	1,9	1,7	1,5	1,4	1,6
Benzo(ghi)perylen [mg/kg]	6,3	6,7	4,2	7,6	6,2	3,2	0,6	1,4	3,5	2,2	6,9	5,5	6,1	4,7	5,8
Benzo(e)pyren [mg/kg]	8,4	9,5	10,2	10,1	9,5	3,5	3,0	2,3	3,4	3,1	5,6	4,3	4,7	3,4	4,5
Perylen [mg/kg]	6,7	8,1	4,8	8,2	6,9		1,8	1,5		1,7	2,6	2,2	2,4	2,1	2,3
Summe PAK [mg/kg]	102,3	113,1	75,7	126,5	104,4	48,6	38,0	29,7	42,9	39,8	63,6	53,7	57,1	47,6	55,5
Summe PAK nach TVO [mg/kg]	46,6	53,1	33,9	59,8	48,4	23,2	17,0	13,9	21,7	19,0	38,3	32,2	34,9	29,4	33,7
Summe PAK nach EPA [mg/kg]	87,3	95,5	60,8	108,2	87,9	45,1	33,2	25,9	39,5	35,9	55,4	47,2	50,0	42,1	48,7

Ergebnisse der chem. Analysen Kontrollmiete										
Gefäß Probe	4. Probenahme 02.91					5. Probenahme 03.91				
	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel wert
1. Trockensubstanz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen										
Naphthalin [mg/kg]	0,6	0,6	0,6	<0,5	0,5	überl	überl	überl	überl	überl
Acenaphthylen [mg/kg]	0,5	0,5	0,5	<0,5	0,4	1,6	1,5	1,8	1,6	1,6
Acenaphthen [mg/kg]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,0	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
Fluoren [mg/kg]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,0	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5
Phenanthren [mg/kg]	3,1	2,3	2,0	1,7	2,3	3,7	2,7	3,5	2,9	3,2
Anthracen [mg/kg]	1,0	0,9	0,8	0,7	0,9	2,0	1,9	2,2	1,9	2,0
Fluoranthren [mg/kg]	13,0	11,0	10,0	9,3	10,8	14,0	14,0	15,0	13,0	14,0
Pyren [mg/kg]	9,7	8,5	8,5	7,3	8,5	11,0	10,0	11,0	10,0	10,5
Benz(a)anthracen [mg/kg]	9,9	9,3	10,0	8,5	9,4	9,7	9,8	11,0	9,9	10,1
Chrysen [mg/kg]	9,6	9,1	10,0	8,6	9,3	11,0	12,0	12,0	12,0	11,8
Benzo(b+k)fluoranthren [mg/kg]	19,9	18,6	22,8	18,6	20,0	21,5	21,2	22,5	22,4	21,9
Benzo(a)pyren [mg/kg]	12,0	11,0	17,0	11,0	12,8	12,0	12,0	13,0	13,0	12,5
Indeno(1,2,3-cd)pyren [mg/kg]	7,7	7,7	9,5	7,7	8,2	7,8	7,5	8,9	8,1	8,1
Dibenz(a,h)anthracen [mg/kg]	1,3	1,3	1,7	1,5	1,5	2,2	2,2	2,3	2,0	2,2
Benzo(ghi)perylen [mg/kg]	9,3	9,2	11,0	9,0	9,6	6,7	6,4	7,1	7,1	6,8
Benzo(e)pyren [mg/kg]	12,0	9,4	14,0	überl.	11,8	10,0	10,0	11,0	11,0	11,8
Perylen [mg/kg]	4,0	3,1	3,9	3,1	3,5	3,2	3,6	3,9	3,5	3,6
Summe PAK [mg/kg]	114,6	103,5	123,3	89,0	107,6	117,2	115,4	126,0	119,1	119,4
Summe PAK nach TVO [mg/kg]	61,9	57,5	70,3	55,6	61,3	62,0	61,1	66,5	63,6	63,3
Summe PAK nach EPA [mg/kg]	98,6	91,0	105,4	85,9	95,2	104,0	101,8	111,1	104,6	105,4

Ergebnisse der chem. Analysen Kontrollmiete Blatt 5-2																								
Gefäß Probe	6. Probennahme Frischprobe ** 04.91					geflorene Probe 04.91			7. Probennahme Frischprobe 06.91					geflorene Probe 06.91			8. Probennahme Frischprobe 08.91					geflorene Probe 08.91		
	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert
1. Trockensubstanz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	84,30	84,10	84,80	84,70	84,5	-	-	-
2. PAK-Analysen																								
Naphthalin [mg/kg]	-	-	-	-	-	0,3	0,1	0,2	0,8	0,8	1,1	0,9	0,9	0,1	0,3	0,2	0,4	0,3	1,0	0,9	0,7	0,4	0,4	0,4
Acenaphthylen [mg/kg]	-	-	-	-	-	0,4	0,2	0,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3	0,4	0,4	0,4	0,7	0,4	1,0	1,2	0,8	0,4	0,4	0,4
Acenaphthen [mg/kg]	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluoren [mg/kg]	-	-	-	-	-	0,2	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1
Phenanthren [mg/kg]	-	-	-	-	-	2,6	0,9	1,8	2,6	2,7	3,3	2,7	2,8	1,1	1,3	1,2	1,8	1,1	3,1	3,2	2,3	1,4	1,4	1,4
Anthracen [mg/kg]	-	-	-	-	-	0,8	0,4	0,6	1,3	1,6	1,9	1,5	1,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,6	1,4	1,5	1,1	0,7	0,7	0,7
Fluoranthren [mg/kg]	-	-	-	-	-	8,2	4,0	6,1	12,0	12,0	13,0	11,0	12,0	5,9	6,5	6,2	7,2	5,7	13,0	13,0	9,7	6,4	6,2	6,3
Pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	6,1	3,3	4,7	9,6	10,0	10,0	9,3	9,7	4,7	5,2	5,0	5,8	4,6	10,0	11,0	7,9	5,0	5,0	5,0
Benz(a)anthracen [mg/kg]	-	-	-	-	-	6,1	2,9	4,5	8,8	9,9	10,0	9,2	9,5	4,5	4,9	4,7	4,8	3,9	8,0	9,0	6,4	4,9	5,0	5,0
Chrysen [mg/kg]	-	-	-	-	-	6,6	3,4	5,0	10,0	12,0	15,0	11,0	12,0	4,9	5,2	5,1	5,5	4,4	9,1	10,0	7,3	5,3	5,3	5,3
Benzo(b+k)fluoranthren [mg/kg]	-	-	-	-	-	15,0	8,4	11,7	22,8	23,0	26,8	23,0	23,9	13,0	13,0	13,0	11,0	9,4	17,0	21,0	14,6	14,0	13,0	13,5
Benzo(a)pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	9,7	5,4	7,6	17,0	19,0	20,0	18,0	18,5	8,0	8,9	8,5	8,2	6,6	13,0	17,0	11,2	9,5	8,6	9,1
Indeno(1,2,3-cd)pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	6,5	3,7	5,1	7,9	9,1	9,6	8,7	8,8	6,0	5,6	5,8	4,1	3,3	6,5	8,4	5,6	6,8	6,2	6,5
Dibenz(a,h)anthracen [mg/kg]	-	-	-	-	-	1,7	1,0	1,4	2,1	3,6	3,0	2,4	2,8	1,8	1,7	1,8	1,0	0,9	1,7	2,1	1,4	2,0	1,9	2,0
Benzo(ghi)perylene [mg/kg]	-	-	-	-	-	5,5	3,3	4,4	12,0	überl	überl	überl	12,0	4,7	4,9	4,8	5,9	3,8	9,0	13,0	7,9	5,4	5,4	5,4
Benzo(e)pyren [mg/kg]	-	-	-	-	-	8,8	4,6	6,7	9,7	11,0	12,0	10,0	11,8	6,6	7,2	6,9	5,0	4,1	7,9	10,0	6,8	8,1	7,3	7,7
Perylen [mg/kg]	-	-	-	-	-	2,3	1,3	1,8	4,6	4,6	5,2	4,6	4,8	2,1	2,6	2,4	1,8	1,4	2,8	3,9	2,5	2,8	2,3	2,6
Summe PAK [mg/kg]	-	-	-	-	-	80,9	43,1	62,0	123,1	121,2	132,8	114,2	122,8	64,6	68,5	66,6	64,3	50,8	105,0	125,7	86,3	73,3	69,3	71,3
Summe PAK nach TVO [mg/kg]	-	-	-	-	-	44,9	24,8	34,9	71,7	63,1	69,4	60,7	66,2	37,6	38,9	38,3	36,4	28,8	58,5	72,4	49,0	42,1	39,4	40,8
Summe PAK nach EPA [mg/kg]	-	-	-	-	-	69,8	37,2	53,3	108,8	105,6	115,6	99,6	107,4	55,9	58,7	57,3	57,5	45,3	94,3	111,8	77,2	62,4	59,7	61,1

Ergebnisse der chem. Analysen Kontrollmiete																
Gefäß Probe	9. Probennahme Frischprobe 10.91				geflorene Probe 10.91			10. Probennahme Frischprobe 11.91					geflorene Probe			
	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert	I 1,0	I 2,0	II 1,0	II 2,0	Mittel- wert	1,0	2,0	Mittel- wert
1. Trockensubstanz	80,0	79,7	80,8	81,8	80,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. PAK-Analysen																
Naphthalin [mg/kg]	0,9	0,9	0,9	0,5	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
Acenaphthylen [mg/kg]	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	0,4	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4
Acenaphthen [mg/kg]	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2
Fluoren [mg/kg]	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Phenanthren [mg/kg]	2,8	2,8	3,2	2,6	2,9	1,2	1,3	1,3	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	1,4	1,7	1,6
Anthracen [mg/kg]	2,2	2,2	2,2	1,9	2,1	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Fluoranthren [mg/kg]	13,0	14,0	13,0	13,0	13,3	5,8	6,2	6,0	5,6	4,9	5,4	5,4	5,3	6,1	7,9	7,0
Pyren [mg/kg]	11,0	12,0	12,0	10,0	11,3	4,6	4,8	4,7	4,0	4,0	4,5	4,4	4,2	4,9	6,3	5,6
Benz(a)anthracen [mg/kg]	12,0	13,0	12,0	13,0	12,5	4,5	4,8	4,7	3,3	3,6	4,0	4,1	3,8	4,9	5,6	5,3
Chrysen [mg/kg]	11,0	12,0	11,0	10,0	11,0	4,9	5,4	5,2	3,8	3,9	4,4	4,3	4,1	5,5	6,4	6,0
Benzo(b+k)fluoranthren [mg/kg]	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	12,0	13,0	12,5	8,2	9,3	11,0	10,0	9,6	14,0	14,0	14,0
Benzo(a)pyren [mg/kg]	12,0	13,0	13,0	13,0	12,8	8,5	8,5	8,5	5,7	5,7	6,6	6,2	6,1	8,7	9,4	9,1
Indeno(1,2,3-cd)pyren [mg/kg]	8,5	8,4	8,6	7,3	8,2	6,0	5,7	5,9	4,5	5,4	6,0	5,7	5,4	6,3	5,8	6,1
Dibenz(a,h)anthracen [mg/kg]	2,6	2,6	2,7	2,5	2,6	1,7	1,7	1,7	1,5	1,6	1,8	1,7	1,7	1,8	1,5	1,7
Benzo(ghi)perylene [mg/kg]	9,1	11,0	11,0	9,2	10,1	5,3	4,9	5,1	4,8	5,6	6,5	6,0	5,7	5,0	5,2	5,1
Benzo(e)pyren [mg/kg]	8,1	8,9	8,9	8,9	8,7	7,8	7,2	7,5	3,7	4,4	5,0	4,7	4,5	7,6	8,1	7,9
Perylen [mg/kg]	3,8	4,3	4,2	4,8	4,3	2,5	2,2	2,4	1,1	1,2	1,3	1,3	1,2	2,5	2,6	2,6
Summe PAK [mg/kg]	119,9	128,1	125,8	119,4	123,3	66,2	67,0	66,6	48,5	52,0	59,1	56,4	54,0	70,0	76,0	73,0
Summe PAK nach TVO [mg/kg]	63,6	67,4	66,6	63,5	65,3	37,6	38,3	38,0	28,8	30,9	35,5	33,3	32,1	40,1	42,3	41,2
Summe PAK nach EPA [mg/kg]	108,0	114,9	112,7	105,7	110,3	55,9	57,6	56,8	43,7	46,4	52,8	50,4	48,3	59,9	65,3	62,6

** 6. Probe wurde nicht analysiert

Ergebnisse der bodenchem.-u. bodenbiol. Analysen Kontrollmiete Blatt 5-3													
Probe	Nullprobenahme/ 1. Probenahme			(07.90) Mittel- wert	2. Probe- nahme 10.90	3. Probe- nahme 12.90	4. Probe- nahme 02.91	5. Probe- nahme 03.91	6. Probe- nahme** 04.91	7. Probe- nahme 06.91	8. Probe- nahme 08.91	9. Probe- nahme 10.91	10. Probe- nahme 11.91
	I	II											
3. BTK-Aromate													
Benzol [mg/kg]	0,05	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toluol [mg/kg]	0,05	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzol [mg/kg]	0,05	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-,p-Xylol [mg/kg]	0,10	-	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
o-Xylol [mg/kg]	0,05	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Metalle													
Arsen [mg/kg]	6,70	-	6,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blei [mg/kg]	217,30	-	217,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium [mg/kg]	1,79	-	1,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium (CaCl ₂ -Extrakt) [mg/l]	nn	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom [mg/kg]	77,79	-	77,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisen [mg/kg]	26842,00	-	26842,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupfer [mg/kg]	127,82	-	127,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nickel [mg/kg]	71,58	-	71,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quecksilber [mg/kg]	0,77	-	0,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink [mg/kg]	511,28	-	511,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zink (CaCl ₂ -Extrakt) [mg/l]	0,05	0,10	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Cyanid ges. [mg/kg]													
	5,88	5,37	5,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. EOX [mg/kg]													
	1,91	3,45	2,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Kohlenwasserstoffe [mg/kg]													
	6,39	29,40	17,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Keimzahlbestimmung													
Nutrient Broth - Agar [10 ⁶ E+7]	0,50	0,50	0,50	2,00	5,50	-	-	2	-	3,50	2,00	2	1,5
Plate Count - Agar [10 ⁶ E+7]	0,20	0,20	0,20	6,00	1,30	-	-	1,5	-	4,00	2,50	2	1
Malz Extrakt - Agar [10 ⁶ E+5]	5,00	6,00	5,50	16,00	10,00	-	-	20	-	18,50	31,50	15	0,45
Minimalagar + Naphthalin [10 ⁶ E+3]	8,00	2,00	5,00	75,00	12,00	-	-	10	-	6,50	8,00	6	15
9. Nährstoffgehalt im Boden													
P2O5 (Phosphat) [mg/100g]	17,40	16,70	17,05	-	-	-	-	14,60	-	-	-	-	20,4
K2O (Kaliumoxid) [mg/100g]	11,10	11,10	11,10	-	-	-	-	17,20	-	-	-	-	6,2
MgO (Magnesiumoxid) [mg/100g]	13,20	12,50	12,85	-	-	-	-	12,10	-	-	-	-	11,3
NH ₄ - N (Ammonium) [mg/100g]	0,60	1,04	0,82	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-	0,3
NO ₃ - N (Nitrat) [mg/100g]	0,64	1,02	0,83	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-	0,6
C (org.- Kohlenstoff) [%]	2,84	3,55	3,20	-	-	-	-	3,30	-	-	-	-	3,5
N ges. Stickstoff [%]	0,11	0,13	0,12	-	-	-	-	0,15	-	-	-	-	0,16
C : N-Verhältnis [/]	25,80	27,30	26,55	-	-	-	-	22,00	-	-	-	-	22
10. Bodenatmung (CO₂)													
1. Tag [mg/100g]	23,32	18,92	21,12	13,86	4,40	14,10	19,40	14,50	31,70	54,60	36,1	37	
2. Tag [mg/100g]	34,76	25,52	30,14	23,54	45,30	49,30	55,90	22,00	31,70	48,40	57,2	61,1	
3. Tag [mg/100g]	26,84	27,72	27,28	21,65	51,50	35,20	53,70	24,60	25,50	43,10	52,8	47,5	
11. substratind. Atmung													
1. Tag [mg/100g]	73,04	65,52	69,28	23,76	38,70	91,00	47,50	59,80	91,50	132,00	110,9	112,6	
2. Tag [mg/100g]	110,00	116,48	113,24	100,76	102,10	127,60	116,20	81,90	82,70	195,40	149,6	103,8	
3. Tag [mg/100g]	91,52	95,04	93,28	70,86	176,90	199,70	155,80	95,00	84,50	176,00	126,7	68,3	
12. Verhältnis 11./10.													
1. Tag [/]	3,13	3,67	3,40	1,71	8,80	6,50	2,40	4,10	2,90	2,40	3,1	3	
2. Tag [/]	3,16	4,17	3,67	4,28	2,30	2,60	2,10	3,70	2,60	4,00	2,6	1,7	
3. Tag [/]	3,41	3,43	3,42	3,27	3,40	5,70	2,90	3,90	3,30	4,00	2,4	1,4	
13. Dehydrogenase [µg TPR/10g]													
	90,00	105,00	97,50	150,00	439,00	450,00	270,00	450,00	531,00	461,00	463	364	
14. H₂O-Speicherkap. [%]													
	32,60	33,50	33,05	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-
15. pH-Wert (in CaCl₂) [/]													
	6,90	7,20	7,05	-	-	-	7,20	-	-	-	-	-	7,3
16. Untersuchungen im Eluat													
pH - Wert [/]	7,40	7,30	7,35	7,20	-	-	8,20	-	8,20	7,90	7,3	7,4	
PO ₄ -P (Orthophosphat) [mg/l]	nn	nn	0,00	0,07	-	-	0,05	-	0,11	0,06	0,27	0,08	
K (Kalium) [mg/l]	4,10	2,00	3,05	1,90	-	-	0,50	-	2,40	2,00	1,8	7,7	
Mg (Magnesium) [mg/l]	4,30	3,60	3,95	5,90	-	-	1,50	-	4,00	6,73	-	11,2	
NH ₄ - N (Ammonium) [mg/l]	0,50	0,70	0,60	0,80	-	-	0,40	-	0,60	0,80	0,9	0,9	
NO ₃ - N (Nitrat) [mg/l]	1,60	1,50	1,55	1,60	-	-	1,40	-	0,00	0,60	2,8	1,9	
N - mineral [mg/l]	2,10	2,20	2,15	2,40	-	-	1,80	-	0,60	1,40	3,7	2,8	
C (org.- Kohlenstoff) [mg/l]	26,60	27,20	26,90	29,80	-	-	18,80	-	29,50	29,50	24,3	31	
N ges. Stickstoff [mg/l]	2,30	2,40	2,35	2,00	-	-	12,00	-	9,00	14,00	16	12	
C : N-Verhältnis [/]	11,60	11,30	11,45	14,90	-	-	1,60	-	2,80	2,10	1,51	2,6	

** 6. Probe wurde teilw. nicht analysiert

Bilderverzeichnis	Seite
Bild 0.1: Übersicht ehemaliges Gaswerk Solingen-Ohligs	11
Bild 0.2: Cirkawerte der Kontaminationsbereiche, idealisiert	12
Bild 0.3: Aufschüttung des Aushubs in Lagen nach Auskoffierung der einzelnen Kontaminationssegmente	12
Bild 0.4: Probenahme, Homogenisierung, Kodierung für das Labor	14
Bild 0.5: Ergebnisse der chemischen Analyse Σ EPA-PAK der fünf Versuchsmieten über die Sanierungsdauer von 17 Monaten	16
Bild 0.6: Benzo(a)pyren-Konzentration der fünf Versuchsmieten über den Sanierungszeitraum von 17 Monaten	17
Bild 0.7: Vergleich zweier Analysenmethoden	18
Bild 0.8: Vergleich "frischer" - "eingefrorener" Proben	19
Bild 0.9: Dehydrogenase-Aktivität im Vergleich der fünf Mieten	22
Bild 0.10: Empfohlenes Mindestprüfschema zur Beurteilung der Erfolgsaussichten einer mikrobiologischen Sanierung	26
Bild 1: Die 16 Einzel-PAK nach EPA sowie die 6 PAK nach der Trinkwasserverordnung (TVO)*	33
Bild 2: Schematische Darstellung der Prozesse, die für die Verteilung und den Verbleib von PAK in der Umwelt verantwortlich sind	34
Bild 3: Schematische Darstellung der einleitenden Schritte im Abbau von Aromaten durch Prokaryonten (A) und Eukaryonten (B)	40
Bild 4: Sequenz des bakteriellen Abbaus von Naphthalin zum Brenzcatechin	41
Bild 5: Sequenz des bakteriellen Abbaus von Phenanthren	41
Bild 6: Reaktionsschritte der Oxidation von Naphthalin durch Pilze	42
Bild 7: Reaktionsschritte der Oxidation von Phenanthren durch <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	43
Bild 8: Übersicht ehemaliges Gaswerk Solingen-Ohligs	50
Bild 9: Vorbereitung des Versuchsbodens, Kontaminationsbereiche (Cirkawerte)	51
Bild 10: Aufschüttung des Aushubs in Lagen nach Auskoffierung der einzelnen Kontaminationssegmente	52
Bild 11: Feldversuche biologische Sanierungsverfahren	54
Bild 12: Mietenaufbau CB GmbH	55
Bild 13: Mietenaufbau PNW GmbH	56
Bild 14: Mietenaufbau Umweltschutz Nord GmbH	57
Bild 15: Mietenaufbau Stadt Solingen	57
Bild 16: Probenahme, Homogenisierung, Kodierung für das Labor	67
Bild 17: Verwendetes Fraktionierungsschema	68
Bild 18: Empfohlenes Mindestprüfschema zur Beurteilung der Erfolgsaussichten einer mikrobiologischen Sanierung	122

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Temperatur- und Niederschlags-Monatsmittelwerte von 06.1990 bis 11.1991	53
Abb. 2: Übersicht über die PAK-Gehalte nach EPA	75
Abb. 3: Übersicht über die B(a)P-Konzentration im Sanierungszeitraum von 17 Monaten der fünf Versuchsmieten	77
Abb. 4: Analysenergebnisse der durch die Firmen selbst durchgeführten Analysen von CB, PNW, UN dem Analysenergebnis von CLAYTEX gegenübergestellt	80
Abb. 5: Übersicht über den Vergleich der Analysenergebnisse der Frischproben und eingefrorenen Proben der fünf Versuchsteilnehmer	82
Abb. 6: "Ringversuch" mit den beteiligten Versuchsteilnehmern	85
Abb. 7: Übersicht der pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Boden für die fünf Versuchsmieten	90
Abb. 8: Übersicht der Corg-Gehalte im Boden der fünf Versuchsmieten	94
Abb. 9: Übersicht der Bodenatmung für die fünf Versuchsmieten	98
Abb. 10: Übersicht der substratinduzierten Atmung für die fünf Versuchsmieten	101
Abb. 11: Übersicht über die Dehydrogenase-Aktivität aller fünf Versuchsmieten	103
Abb. 12: Übersicht über die KBE auf vier verschiedenen Nährböden der fünf Versuchsmieten	107
Abb. 13: Übersicht der Nährstoffgehalte im Eluat der fünf Versuchsmieten	111
Abb. 14: Übersicht der Corg-Gehalte im Eluat der fünf Versuchsmieten	114

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 0.1: Vorversuche der 8 Firmen mit Darstellung der vergleichbaren Untersuchungsparameter	9
Tabelle 1: Beispiel für vorherrschende polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe eines Teeröls	31
Tabelle 2: Geschätzte PAK-Emissionen der Hauptquellen für die Bundesrepublik Deutschland in kg/a	32
Tabelle 3: Physiko-chemische Eigenschaften von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen der EPA-Liste	35
Tabelle 4: Gruppeneinteilung der PAK-Kontaminationen der Böden und der liegenden Sedimente für die Landfarming-Methode	45
Tabelle 5: Prozentualer PAK-Abbau im Boden und Sediment mit und ohne Zugabe von Mineralsalzen beim Landfarming-Verfahren nach 12 Wochen	45
Tabelle 6: Vorversuche der 8 Firmen mit Darstellung der vergleichbaren Untersuchungsparameter	49
Tabelle 7: Methoden der schadstoffanalytischen Untersuchungen im Boden	68
Tabelle 8: Methoden der schadstoffanalytischen Untersuchungen im Sickerwasser	69
Tabelle 9: Methoden der Bodenluftmessung	69
Tabelle 10: Bodenphysikalische Untersuchungsmethoden	69
Tabelle 11: Bodenchemische Untersuchungsmethoden	69
Tabelle 12: Bodenmikrobiologische Untersuchungsmethoden	70
Tabelle 13: Methoden der Untersuchungen von Nährstoffen, C_{org} , N_t und pH-Wert im Eluat	70

Abkürzungsverzeichnis

AAS:	Atomabsorptionsspektrometrie
Abb.:	Abbildung
ALA:	Analytisches Labor Aachen
Ap.:	Mineralhorizont im Oberboden gepflügt
Aug.:	August
B(a)p:	Benzo(a)pyren
BtSw:	Mineralhorizont (verändert) tonakkumuliert, naßgebleicht
BTX:	Benzol, Toluol, Xylol
bzw.:	beziehungsweise
CAS:	Chemical Abstracts
C/N/P:	Kohlenstoff/Stickstoff/Phosphat-Verhältnis
C/N:	Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis
ca.:	circa
CaCl ₂ :	Calziumchloridlösung
CB:	Caro Biotechnik GmbH
CH ₂ Cl ₂ :	Dichlormethan
CKW:	Chlorkohlenwasserstoff
cm:	Zentimeter
C _{org} :	Kohlenstoff (organisch gebunden)
d:	day (Tag)
d.h.:	das heißt
DC:	Dünnschichtchromatographie
DEV:	Deutsches Einheitsverfahren
Dez.:	Dezember
DHA:	Dehydrogenase-Aktivität
DIN:	Deutsche Industrie Norm
DL:	Doppelaktat
DMT:	Deutsche Montan Technologie GmbH
DOC:	dissolved organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
einschl.:	einschließlich
EOX:	Extrahierbares organisches Halogen
EPA:	Environmental Protection Agency (US-Umweltbehörde)
ESTE:	Lager- und Handelsgesellschaft mbH, Bereich Umweltschutz (Shellgruppe)
Fa.:	Firma
FB:	Feuchtboden
FID:	Flammenionisationsdetektor
µg/kg:	Mikrogramm/Kilogramm

g:	Gramm
GC:	Gaschromatograph
Gew.-%:	Gewichts-%
Gew.:	Gewicht
GFA:	Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH
GL ₂₀ :	niedrigster Verdünnungsfaktor, der eine Hemmung der Lichtintensität um 20 % aufzeigt
GOK:	Geländeoberkante
GW:	Grundwasser
H/C-Verhältnis:	Wasserstoff/Kohlenstoff
H/O-Verhältnis:	Wasserstoff/Sauerstoff
h:	Stunde
H ₂ O:	Wasser (destilliert)
HPLC:	High pressure liquid chromatograph (Hochdruckflüssigkeitschromatograph)
HDPE-Folie:	Hochdichte Polyethylen-Folie
i.allg.:	im allgemeinen
i.d.R.:	in der Regel
ICP:	Induktiv gekoppelte Plasmaspektrometrie
k.A.:	keine Angabe
K ₂ O:	Kaliumoxid
KBE:	koloniebildende Einheiten
K _F :	Sorptionskonstante nach Freundlich
kg/a	Kilogramm/Jahr
K _{oc} -Wert:	Sorptionskoeffizient nach Freundlich für org. Kohlenstoffe
KO:	Kontrollmiete
l:	Liter
LAGA:	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LÖLF:	Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung NRW
LWA:	Landesamt für Wasser und Abfall NRW
M:	Molarität
m ³ :	Kubikmeter
max.:	maximal
ME:	Malz Extrakt Agar
Mg-Ionen:	Magnesium-Ionen
meq/100 g:	Kationenaustauschkapazität
meq:	meq = mval (Milliäquivalent)
mg/kg:	Milligramm/Kilogramm
min:	Minute
ml:	Milliliter
mM:	Millimolar
MS:	Massenspektrometer

N:	Stickstoff
Na ₂ SO ₄ :	Natriumsulfat
n.b.:	nicht bekannt
NB:	Nutrient Broth Agar
NH ₄ :	Ammonium
Nm ₃ :	Normkubikmeter
Nmin:	Stickstoff (mineralisiert) [wasserlöslicher Mineral-Stickstoff]
NO ₃ :	Nitrat
N _{org} :	Stickstoff (organisch gebunden)
Nov.:	November
N/P/K:	Verhältnis Stickstoff/Phosphat/Kalium
NRW:	Nordrhein-Westfalen
N _t :	Stickstoff (Totalauszug) [Gesamtstickstoff]
NV:	Nennvolumen
o.g.:	obengenannten
Okt.:	Oktober
org.:	organisch
P ₂ O ₅ :	Phosphat
PAK:	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PC:	Plate Count Agar
pH-Wert:	Maß für den Säuregrad (negativer log-Wert der Wasserstoffionenkonzentration)
PNW:	Preussag Noell Wassertechnik GmbH
ppm:	parts per million
RAht:	Mischhorizont (durch Tiefenumbruch); Mineralhorizont im Oberboden, huminstoffakkumuliert, tonakkumuliert
RP:	Regierungspräsident
s. Kap.:	siehe Kapitel
S.:	Seite
s.:	siehe
sec:	Sekunde
SO:	Solingen
spez.:	speziell
StAWA:	Staatliches Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft NRW (hier: Düsseldorf)
TH:	Technische Hochschule
TIC:	Totalionenchromatogramm
TPF:	Triphenylformazan, Endprodukt der Aktivitätsbestimmung der Dehydrogenasen
TS:	Trockensubstanz
TVO:	Trinkwasserverordnung

u.E.: unseres Erachtens
UN: Umweltschutz Nord GmbH

v.a. vor allem
VDLUFA: Verband Deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und
Forschungsanstalten

vergl.: vergleiche
Vol.-%: Volumen-%
WS: Wassersäule

Y: anthropogener Auftrag
z.B.: zum Beispiel
z.T.: zum Teil
zus.-fass.: zusammenfassend
z.Z.: zur Zeit

In der Reihe „**Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten**“ werden

- umfassende **Stellungnahmen** der beim Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen eingerichteten **Altlasten-Kommission**,
- **Schlußberichte über Untersuchungsvorhaben**, die im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen zu Altlastenfragen durchgeführt worden sind,
- ausgewählte **Ergebnisse sonstiger wissenschaftlicher Arbeit** und Beratung zum Problemkreis „Altlasten“

veröffentlicht, um sie der praktischen Anwendung, der fachlichen Diskussion und der interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Bisher sind erschienen:

- Band 1** Untersuchung 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 aussagekräftigen Elutionsverfahrens
- Band 7** Beurteilung von PCB und PAK in Kulturböden
- Band 8** Feststoffuntersuchungsprogramme für Altstandorte der Metallbearbeitung
- Band 9** Handlungshinweise 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